



Kennismontage Hitte en Klimaat in de Stad

TNO-060-UT-2011-01053
mei 2011

Climate Proof Cities consortium
Sonja Döpp (TNO) *Editor*

Opdrachtgever: Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Deltaprogramma Nieuwbouw en Herstructurering

Opdrachtnemer: Climate Proof Cities Consortium
www.knowledgeforclimate.nl/climateproofcities

Datum: 27 mei 2011

Auteurs:

Sonja Döpp (TNO) *editor*

Lisette Klok (TNO) – *Hitte in de stad: Wat is er aan de hand?*

Bijdrage van: Sabine Janssen (TNO), Cor Jacobs (Wageningen Universiteit)

Cor Jacobs (Wageningen Universiteit) – *Lokale probleemanalyse: Hittekaarten*

Bijdrage van: Bert Heusinkveld (Wageningen Universiteit)

Laura Kleerekoper (TU Delft) – *Maatregelen*

Sanda Lenzholzer (Wageningen Universiteit -Alterra) *groen*

Reinder Brolsma (Deltares) *water*

Bert Blocken (TU Eindhoven) *gebouwen*

Peter Bosch (TNO) *adaptatie-mitigatie*

Bijdrage van: Mike van der Heijden (TU Eindhoven), Hein Daanen (TNO), Harry Timmermans (TU Eindhoven), Jan Hensen (TU Eindhoven), Harm ten Broeke (TNO), Wiebke Klemm (Wageningen Universiteit)

Caroline Uittenbroek (Universiteit Utrecht) – *Hitte en Beleid*

Inhoudsopgave

1	Inleiding	4
2	Hitte in de stad: Wat is er aan de hand?	5
2.1	Inleiding	5
2.2	Het stedelijk hitte-eiland effect	6
2.2.1	Oorzaken stedelijk hitte-eiland effect.....	7
2.2.2	Het stedelijk hitte-eiland effect in Nederland.....	8
2.3	Gevolgen van hitte op de mens	10
2.3.1	Thermisch comfort.....	11
2.3.2	Hitte en gezondheid.....	11
3	Lokale probleemanalyse: Hittekaarten	16
3.1	Inleiding	16
3.2	Klimaatkaarten: achtergrond en historie	16
3.3	Klimaatkaarten als instrument voor planning en communicatie	17
3.3.1	Analysekaart (UCM-An).....	17
3.3.2	Visiekaart (UCM-Re).....	17
3.4	Klimaatkaarten voor Nederlandse steden	18
3.4.1	Klimatologische informatie.....	18
3.4.2	Terreininformatie en stedenbouwkundige data.....	18
3.4.3	Relatie tussen meteorologische gegevens en terreininformatie.....	19
3.5	Voorbeelden van hittekaarten in Nederland	20
3.5.1	Arnhem	20
3.5.2	Rotterdam.....	21
3.5.3	Den Haag.....	22
3.5.4	Limburg en Brabant.....	23
4	Maatregelen	26
4.1	Overzicht maatregelverkenningen	26
4.2	Rol van groene ruimten en elementen	30
4.2.1	Groene ruimten en effect op lokaal microklimaat	31
4.2.2	Groene ruimten en effect op omliggend microklimaat.....	32
4.2.3	Effect van bomen, groene gevels en groene daken.....	32
4.3	Rol van water	34
4.4	Aanpassingen op gebouwniveau	35
4.4.1	Oververhitting en gebouwkoeling.....	36
4.4.2	Albedo van daken en gevels	37
4.4.3	Thermische massa	38
4.4.4	Simulatiemodellen.....	38
4.5	Stedelijke structuur en samenstelling	39
4.5.1	Bebouwingsstructuur.....	39
4.5.2	Albedo op stadsniveau	40
4.6	Gedrag en aanpassingsvermogen	41
4.7	Combinaties adaptatie – mitigatie	42
5	Hitte en beleid	49
5.1	Inleiding	49
5.2	Sturingsmodellen	49
5.3	Hittebeleid in Nederlandse steden	51
5.4	Hittebeleid in buitenlandse steden	52
5.5	Lessen voor Nederlandse steden	54
5.6	Rol van inwoners en private partijen	54
6	Samenvatting en conclusies	56

1 Inleiding

Volgens de KNMI'06 scenario's zal klimaatverandering leiden tot hogere temperaturen en meer hittegolven waardoor een grotere kans op hittestress ontstaat. In het stedelijk gebied speelt daarbij het hitte-eiland effect een versterkende rol. Beschikbare kennis over de ernst van hitteproblematiek in de stad en over de mogelijkheden die steden hebben om hier mee om te gaan is op dit moment versnipperd. De bereidheid om met het onderwerp aan de slag te gaan is in steeds meer gemeenten aanwezig, maar het ontbreekt aan inzicht in beschikbare en toepasbare kennis. Bestuurders vragen zich af in hoeverre hitte in de stad een probleem vormt en welk handelingsperspectief er binnen gemeentes bestaat.

De Alliantie Klimaatbestendige Steden, een samenwerkingsverband tussen de vier grote steden (Amsterdam, Rotterdam, Den Haag en Utrecht) en ministerie van Infrastructuur en Milieu (IenM), heeft behoefte aan een overzicht van de huidige kennis rond de thema's 'stedelijk hitte-eiland' en 'hittestress'. Daartoe heeft de alliantie de opdracht voor het maken van een kennismontage gegeven aan het consortium Climate Proof Cities (CPC), een van de acht consortia binnen het door IenM gecoördineerde onderzoeksprogramma Kennis voor Klimaat¹. Het CPC consortium omvat alle relevante Nederlandse onderzoeksinstituten die betrokken zijn bij onderzoek naar klimaatadaptatie in het stedelijk gebied over een breed domein van kennisvelden, van meteorologie, techniek, bouwkunde, ruimtelijke inrichting en planologie.

Doel van kennismontage

Het doel van de kennismontage is het bijeenbrengen van alle aanwezige kennis op het gebied van hitte in de stad die relevant is voor de uitvoeringspraktijk. De doelgroep is de gemeenteambtenaar die met dit thema aan de slag wil, ook binnen andere gemeenten dan de G4. De kennismontage dient als informatiebasis voor de verschillende facetten van hitte in de stad, van urgentie tot handelingsperspectief. Het bevat verwijzingen naar nationale en internationale studies en projecten die relevant zijn voor Nederlandse steden. Bovendien zal de kennismontage als basis dienen voor verschillende communicatiedoelstellingen rond hitte in de stad.

Leeswijzer

De kennismontage is opgebouwd rond de verschillende aspecten van hitte in stad, van de probleemanalyse tot de implementatie van maatregelen. De volgende hoofdvragen staan daarbij centraal:

- Hitte in de Nederlandse stad: wat is er aan de hand? (Hoofdstuk 2)
- Hoe kan lokale hitteproblematiek in kaart worden gebracht door middel van hittekaarten? (Hoofdstuk 3)
- Welke maatregelen kunnen genomen worden op het gebied van groen, water, gebouw en stedelijke structuur? (Hoofdstuk 4)
- Hoe kunnen gemeenten hittemaatregelen implementeren en integreren in hun beleid? (Hoofdstuk 5)

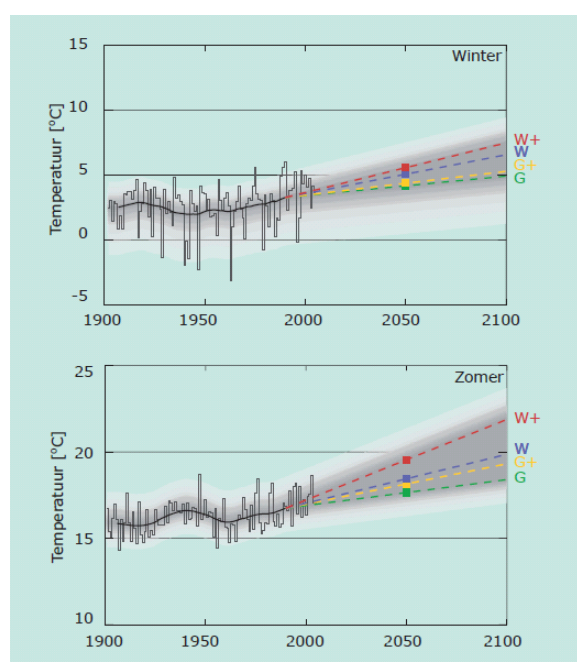
¹ www.knowledgeforclimate.nl/climateproofcities

2 Hitte in de stad: Wat is er aan de hand?

2.1 Inleiding

Hitte in de stad: wat is er aan de hand en wat is er bekend over eventuele hoge temperaturen in Nederlandse steden als gevolg van klimaatverandering en het stedelijk hitte-eiland effect? Is er onderscheid te maken tussen verschillende typen steden en hoe beïnvloeden locale omstandigheden en stedelijke inrichting de temperaturen in de stad? Wat zijn de gevolgen van stedelijke hitte voor de mens? Welke kennis is beschikbaar over hittestress en de impact van hitte op gezondheid en leefkwaliteit? Wat zijn de risicofactoren en -groepen? Op deze vragen zal worden ingegaan in dit hoofdstuk. Een eerste rapport dat in 2009 in het kader van het onderzoeksprogramma Kennis voor Ruimte verscheen en deze onderwerpen beschrijft, is: "Heat in the city" (Rahola et al. 2009). In de tussentijd is binnen de onderzoeksprogramma's Kennis voor Klimaat en Future Cities meer bekend geworden over hitte in de Nederlandse steden en de gevolgen ervan. De resultaten van hiervan zullen in dit hoofdstuk veelvuldig aan bod komen.

In een warmer wordend klimaat zullen ook in Nederland warmere zomers en zachtere winters vaker voorkomen. De KNMI'06 scenario's geven aan dat de gemiddelde zomertemperatuur in Nederland rond 2050 met 0,9 tot 2,8 °C zal zijn gestegen ten opzichte van het huidige klimaat (1990) (Figuur 2.1). Klimaatonderzoekers verwachten dat het aantal hittegolven in de komende eeuw ook stijgt, maar over de exacte toename in frequentie en duur van hittegolven kan het KNMI op dit moment nog geen betrouwbare uitspraken doen. Wel is berekend dat er meer tropische dagen zullen zijn in de toekomst. Dat zijn dagen waarop de maximum temperatuur hoger is dan 30 °C. In 2050 zullen gemiddeld 7 tot 15 tropische dagen voorkomen per jaar ten opzichte van gemiddeld 4 in het huidige klimaat. Deze schattingen gelden voor De Bilt. In de kustgebieden zullen de gemiddelde zomertemperatuur en het aantal hete en tropische dagen iets lager liggen dan meer landinwaarts. Daarnaast zijn de temperaturen in steden over het algemeen hoger dan gemiddeld in het buitengebied. Dit wordt veroorzaakt door het stadseffect, ook wel het stedelijk hitte-eiland effect of urban heat island (UHI) effect genoemd.



	De Bilt 1976-2005*	G 2050	G+ 2050	W 2050	W+ 2050	Parijs 1976- 2005
Dagtemperatuur (°C)	16,8 (15,3-18,7)	17,7	17,6	17,9	19,6	19,3
Max. temperatuur (°C)	21,7 (19,8-24,6)	22,6	23,1	23,4	24,5	23,9
Zomerse dagen (max. temperatuur >= 25°C)	24 (4-48)	30	34	39	47	45
Aantal tropische dagen (max. temperatuur >= 30 °C)	4 (0-13)	7	9	10	14	9
Totale neerslag (mm)	214 (72-352)	220	193	227	173	147
Gemiddelde max. zomer- dagneerslag per jaar (mm)	27 (11-51)	29	27	32	29	27
% dagen zonder regen	51 (33-75)	52	57	54	61	63

Figuur 2.1 (links) Temperatuur in De Bilt tussen 1900 en 2005, en de vier klimaatscenario's voor 2050. (boven) Klimaatverandering in Nederland rond 2050 volgens de vier KNMI'06 klimaatscenario's ten opzichte van referentieperiode 1976-2005. (Bron: www.knmi.nl/klimaatscenarios/knmi06/index.php)

Verschillende temperaturen, verschillende metingen

Hitte in de stad wordt op verschillende manieren gemeten en tot uitdrukking gebracht. Temperaturen die in relatie tot hitte in de stad vaak worden gebruikt zijn lucht-, oppervlakte en gevoelstemperatuur.

- De meest voorkomende temperatuur die binnen de meteorologie gebruikt wordt is de *luchttemperatuur*. Dit is de temperatuur van de buitenlucht en wordt gemeten door een thermometer die is afgeschermd voor direct zonlicht en neerslag, en goed wordt geventileerd. Op meteorologische stations wordt de luchttemperatuur gemeten op een hoogte van 1,5m boven open grasvlakte, volgens internationale afspraken van de Wereld Meteorologische Organisatie (WMO). In steden wordt de luchttemperatuur gemeten door middel van vaste meetstations aan/op gebouwen en mobiele meetstations, bijvoorbeeld op rijdende trams of de speciaal ingerichte bakfiets.
- De *oppervlakte temperatuur* representeert de temperatuur van het gras, de daken, wegen, gebouwen, vegetatie etc., en kan worden afgeleid uit satellietbeelden (thermische infrarood opnames). Het voordeel van het gebruik van satellietbeelden ten opzicht van temperatuurmetingen van weerstations is dat een gebiedsdekkend inzicht kan worden verkregen in temperatuurvariaties. Duidelijk wordt welke gebieden (wijken of delen van de stad) de hoogste oppervlaktetemperaturen kennen en het meest gevoelig zijn voor het hitte-eiland effect. De oppervlaktetemperatuur is gekoppeld aan de luchttemperatuur, maar deze relatie blijkt complex is nog niet duidelijk (Duyzer et al. 2011).
- De *gevoelstemperatuur* of het thermisch comfort van mensen (op straat) en wordt door verschillende factoren beïnvloed. De belangrijkste meteorologische parameters zijn luchttemperatuur, straling van de omgeving, windsnelheid en luchtvochtigheid. Om een beter inzicht te krijgen in de gevoelstemperatuur in het stedelijk gebied zullen deze factoren gemeten moeten worden, via vaste of mobiele meetstations. Om objectieve vergelijkingen te maken van de gevoelstemperatuur op verschillende locaties worden indicatoren gebruikt zoals de Fysiologisch Equivalente Temperatuur (PET).

Een overzicht van diverse metingen die de in 2011 – 2014 gepland staan in verschillende Nederlandse steden wordt gegeven in de Meetstrategie van Climate Proof Cities².

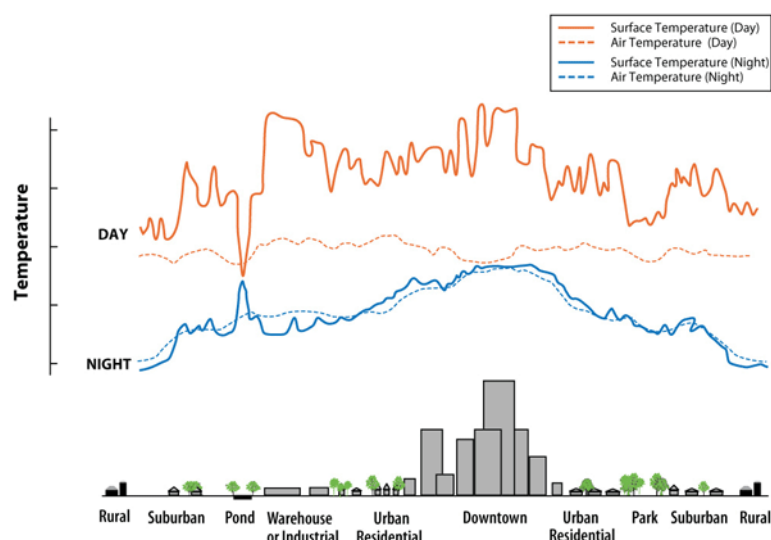


2.2 Het stedelijk hitte-eiland effect

Het stedelijk hitte-eiland effect is het fenomeen dat steden over het algemeen warmer zijn dan het buitengebied (Figuur 2.2). Dit is gebleken uit vele studies voor buitenlandse steden,

² Zie website Climate Proof Cities: <http://www.klimaatonderzoeknederland.nl/onderzoekthemas/stedelijk-gebied/projecten-nieuws/10679535/Meetstrategie-van-Climature-Proof-Cities>

maar ook uit onderzoek voor Nederlandse steden. Door de toename in verstedelijking en stedelijke verdichting neemt het stedelijk hitte-eiland effect naar verwachting toe, en worden de temperatuurverschillen tussen stad en buitengebied groter. Overigens wordt het hitte-eiland effect niet alleen in grote steden waargenomen; ook kleinere plaatsen en dorpen vertonen hogere temperaturen ten opzichte van de omgeving. Internationale studies laten zien dat het stedelijk hitte-eiland effect zich zowel in de zomer als in de winter manifesteert, maar omdat deze kennismontage het onderwerp hitte betreft, zal voornamelijk het hitte-eiland effect gedurende de zomer besproken worden.



Figuur 2.2: Het stedelijk hitte-eiland effect: verschil in lucht- en oppervlaktetemperatuur tussen stad en buitengebied overdag en 's nachts (Bron: <http://www.epa.gov/heatisland/about/index.htm>).

Maximum temperatuurverschillen tussen stad en buitengebied die zijn gemeten en berekend in internationale studies (Memon et al. 2009) laten waarden tot 12 °C zien, waarbij de grootste verschillen zich meestal tijdens de nacht voordoen. Voor Nederland was Conrads (1975) de eerste die in de jaren '70 het stadseffect voor een Nederlandse stad onderzocht: Utrecht. Uit temperatuurmetingen uitgevoerd tijdens de zomer bleek de temperatuur 's nachts in Utrecht gemiddeld 2,7 °C hoger te zijn dan buiten de stad, met uitschieters tot 8 °C. Het stadseffect van Rotterdam werd een tiental jaren later onderzocht door Roodenburg (1983). Daarbij werden ook maximum temperatuurverschillen tussen stad en buitengebied gevonden van 8 °C, voornamelijk tijdens windstille nachten met weinig bewolking. De laatste jaren is opnieuw veel onderzoek gedaan naar het stadseffect in Nederland. De resultaten hiervan zijn in de paragraaf 2.2.2 *Het stedelijk hitte-eiland effect in Nederland* beschreven.

2.2.1 Oorzaken stedelijk hitte-eiland effect

Dat de stad over het algemeen warmer is dan het buitengebied heeft te maken met de eigenschappen van het stedelijk of bebouwd gebied. Doordat stedelijke materialen vaak donkerder zijn en een lagere albedo hebben (albedo is de fractie zonlicht die gereflecteerd wordt door het oppervlak), wordt minder zonlicht weerkaatst en meer straling geabsorbeerd gedurende de dag. Daarnaast zal door de aanwezigheid van gebouwen ook nog een deel van het gereflecteerde zonlicht worden opgevangen door bijvoorbeeld muren, waardoor in totaal meer zonnestraling wordt opgenomen in bebouwd gebied dan daarbuiten.

Bovendien gaat de aanwezigheid van gebouwen en veel verharding in het stedelijk gebied ten koste van de hoeveelheid vegetatie. Hierdoor verdampt er minder water in de stad ten opzichte van het buitengebied, en is meer energie beschikbaar voor de opwarming van stedelijke oppervlakken en de lucht erboven. Daarnaast zullen gebouwen ervoor zorgen dat

de gemiddelde windsnelheid in stad lager is. Lage windsnelheid zorgt ook voor lagere afkoeling van gebouw- en straatoppervlak.

's Nachts koelt het stedelijk gebied af door warmte-uitstraling. De netto warmte-uitstraling is evenredig met de fractie van de hemelkoepel die zichtbaar is vanaf het oppervlak. Aangezien hoge gebouwen en nauwe straatjes ervoor zorgen dat het hemelzicht beperkt is, zal in de stad minder warmte kunnen wegstralen en in plaats daarvan gevangen blijven tussen de bebouwing. Bovendien verschillen de thermische eigenschappen van de bouwmaterialen in de stad van de thermische eigenschappen van het buitengebied. Steen, beton, asfalt en metaal slaan over het algemeen makkelijker warmte op. Dit zijn allemaal redenen waarom de stad 's nachts over het algemeen langzamer afkoelt dan het buitengebied.

Vervolgens is er de bijdrage van antropogene warmte aan het stedelijk hitte-eiland effect. Dit is de warmte die vrijkomt bij energieconversie door menselijke activiteiten zoals industrie, huishoudens en verkeer. Deze bronnen, die vooral in de stad aanwezig zijn, staan door de energieconversie voelbare warmte af, waardoor de luchttemperatuur toeneemt. Als laatste kan het stedelijke broeikas effect genoemd worden als mogelijke medeveroorzaker van het stadseffect. Luchtverontreiniging, hogere broeikasgasconcentraties, meer waterdamp en hogere temperaturen van de atmosfeer boven de stad zouden meer warmtestraling tot gevolg kunnen hebben.

2.2.2 *Het stedelijk hitte-eiland effect in Nederland*

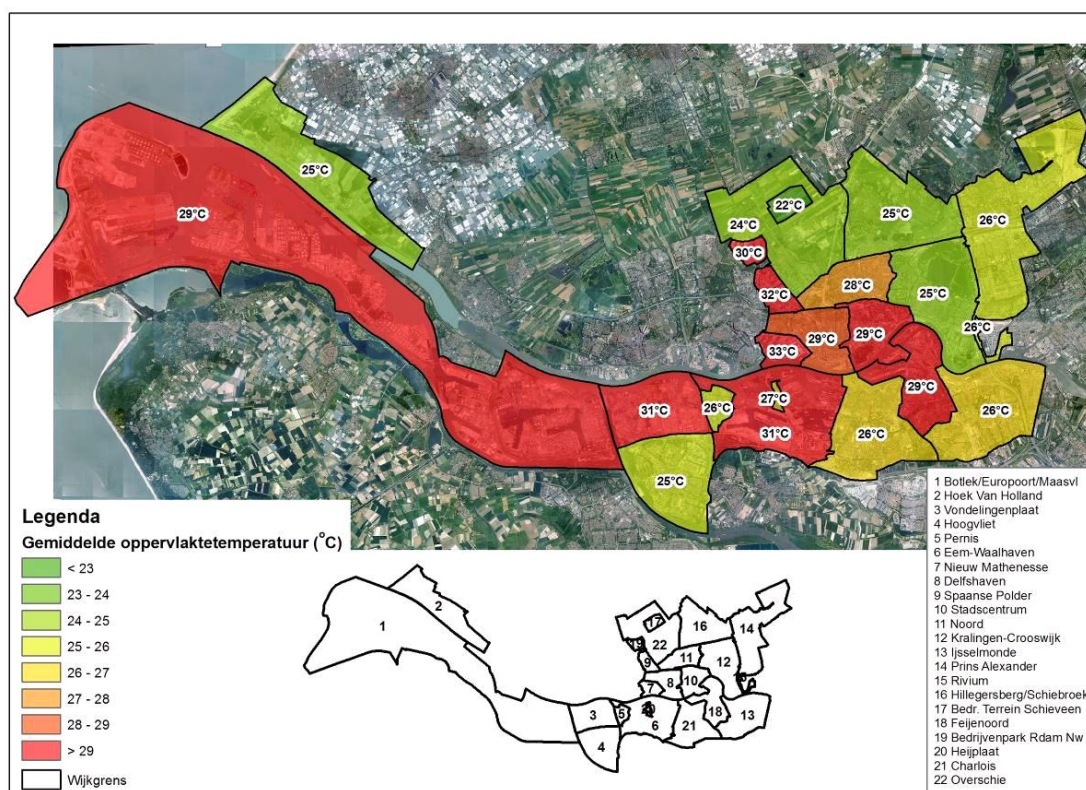
Omdat er weinig langdurige temperatuurmetingen in Nederlandse steden bestaan, zijn in recent onderzoek metingen van weeramateurs geanalyseerd om het stadseffect in Nederland te schatten (Steenefeld et al. 2010a; Wolters en Bessembinder 2011). Hierbij werden temperatuurmetingen van weeramateurs³ in ongeveer 20 verschillende dorpen en steden vergeleken met de dichtstbijzijnde KNMI metingen in het buitengebied. Maximum temperatuurverschillen bleken te variëren van 1 tot 8°C, en treden op tijdens zomerdagen met helder weer en weinig wind. Het stedelijk hitte-eiland effect is het grootst bij windstille en onbewolkte meteorologische omstandigheden. Toenemende wind zorgt namelijk voor meer uitwisseling van lucht tussen stad en buitengebied. Onderzoek in Rotterdam wijst uit dat bij geringe windkracht (lager dan 2 meter per seconde) het stedelijke hitte-eiland effect al grotendeels verdwijnt. Op dagen met weinig wolkenbedekking is er een sterkere invloed van straling op de temperatuur en komen de verschillen in de stralingseigenschappen tussen het stedelijk gebied en het buitengebied meer tot uiting.

Er is ook een dagelijks patroon waarneembaar in het stadseffect. Net na zonsopkomst is het verschil in de luchttemperatuur tussen stad en buitengebied minimaal. Het komt zelfs voor dat het in de stad 's ochtends koeler is dan in het buitengebied. Dit heeft te maken met schaduwvorming door hoge gebouwen en andere structuren in de stad, waardoor het zonlicht het oppervlak niet bereikt. Daarnaast vertragen de bouwmaterialen de temperatuuroename, doordat zij zelf warmte opslaan. Gedurende de dag wordt het temperatuurverschil tussen stad en platteland echter positief, maar blijft beperkt. Na zonsondergang nemen de verschillen in eerste instantie snel toe, door de verschillen in afkoelingskarakteristiek, en bereikt een maximum waarde enkele uren na zonsondergang. Daarna blijft het temperatuurverschil tamelijk constant, tot zonsopkomst. Dit patroon werd ook aangetoond in een studie op grond van meteorologische metingen op 3 verschillende locaties in Rotterdam uitgevoerd over de afgelopen 2 jaar (Van Hove et al. 2010a).

³ <http://www.knmi.nl/klimatologie/weeramateurs/>

Om de ruimtelijke patronen in het hitte-eiland effect overdag en 's nachts te onderzoeken, zijn door Wageningen UR in Rotterdam en Arnhem metingen uitgevoerd met een mobiel meetplatform (meteorologische meetinstrumenten gemonteerd op een bakfiets) (Heusinkveld et al. 2010a; Daanen et al. 2010). De resultaten geven aan dat het hitte-eiland effect 's nachts kan oplopen tot meer dan 7 °C, wederom voornamelijk op heldere en windstille dagen, maar overdag zijn de gemeten temperatuurverschillen lager met waarden tot 2 °C. Groene wijken laten het geringste temperatuurverschil zien met het buitengebied. En parken kunnen in sommige situaties zelfs koeler zijn dan het buitengebied. Het effect van waterpartijen op de omgevingstemperatuur is vooralsnog niet eenduidig (Heusinkveld et al. 2010a; Verhoeven et al. 2009). Hier zal vanaf 2011 nader onderzoek naar gedaan worden binnen de KvK Climate Proof Cities projecten in Rotterdam en Amsterdam.

Het ruimtelijk patroon in het stadseffect en temperatuurverschillen tussen stadswijken onderling kunnen ook worden afgeleid uit oppervlaktetemperaturen (Figuur 2.3), gemeten door thermisch infraroodsensoren van satellieten of gemonteerd aan vliegtuigen. Deze oppervlaktetemperatuur representeert de temperatuur van het gras, de daken, wegen, gebouwen en vegetatie en verschilt van de luchttemperatuur, maar is wel gekoppeld daaraan door verschillende uitwisselingsprocessen van energie, die samen de energiebalans vormen. Uit dergelijk onderzoek uitgevoerd door TNO bleek dat oppervlaktetemperaturen van Rotterdam tijdens zomerse dagen 10 °C kunnen verschillen van oppervlaktetemperaturen in het buitengebied (Klok et al. 2010) (Figuur 2.3). Wijken die de hoogste oppervlaktetemperaturen vertonen, en waarvoor geconcludeerd kan worden dat het stadseffect mogelijk het grootst is, zijn de wijken met weinig groen, veel verharde oppervlakken en veel bebouwing.



Figuur 2.3: Ruimtelijke variatie in de gemiddelde oppervlaktetemperatuur overdag van 22 Rotterdamse wijken gebaseerd op 15 thermische infrarood Landsatbeelden opgenomen tijdens zomerse dagen geprojecteerd op een luchtfoto van het gebied (Bron: Klok et al., 2010). De gemiddelde oppervlaktetemperatuur van het buitengebied was 23 °C.

Over het algemeen kan worden gesteld dat de volgende lokale condities het stedelijk hitte-eiland effect bevorderen⁴:

- Hoge bebouingsdichtheid met materialen die langzaam opwarmen en afkoelen en veel warmte op kunnen slaan.
- Vervanging van natuurlijke oppervlakken door verharde en waterdoorlatende oppervlakken wat leidt tot een droog stedelijk gebied, waar weinig water beschikbaar is voor verdamping.
- Donkere oppervlakken met een laag albedo, zoals asfalt, waardoor weinig zonlicht wordt gereflecteerd, en veel warmte wordt geabsorbeerd.

Ook modelsimulaties worden gebruikt om het stadseffect in Nederland en de onderliggende oorzaken te onderzoeken. Simulaties met een atmosferisch model, waarbij onder andere een hittegolfperiode is doorgerekend voor Rotterdam, tonen aan dat het stadseffect na zonsondergang aanzienlijk is (Steenefeld et al. 2010b; Ronda et al. 2010; Van Hove et al. 2010b). Dit komt overeen met de waarnemingen. Ook is uit deze modelresultaten afgeleid dat het stadseffect reikt tot buiten de stad. Tot op ongeveer 10 km buiten de stad zijn verhoogde temperaturen waarneembaar. Met modellen kan ook het effect van antropogene warmte op de temperatuur in de stad worden geschat. Voor Rotterdam blijkt dat de warmte die ontstaat door antropogene activiteiten weinig bijdraagt (~ 0,5 °C) aan het stedelijke hitte-eiland effect. Lokaal zou het temperatuureffect groter kunnen zijn.

2.3 Gevolgen van hitte op de mens

Wanneer het gaat om de gevolgen van hitte op de mens, wordt vaak in eerste instantie gedacht aan gezondheidsproblemen en oversterfte. Van deze laatste zijn de extra sterfgevallen in Europa en in Nederland tijdens de extreme hittegolf in 2003 het meest illustratieve voorbeeld. Over de gevolgen van hitte op bijvoorbeeld arbeidsproductiviteit, het vervoerssysteem, en de aantrekkelijkheid van het stadsklimaat om er te verblijven, recreëren, wonen en werken is minder bekend. De verschillende gevolgen van hitte op de mens in Nederlandse steden die genoemd kunnen worden:

- Gezondheidsproblemen en oversterfte (zie 2.3.2 *Hitte en gezondheid*)
- Thermisch comfort in de buitenomgeving: Hitte kan het thermisch comfort in de stad tijdens de zomer negatief beïnvloeden, zoals in de paragraaf hierboven reeds is genoemd (zie ook 2.3.1 *Thermisch comfort*). Hierdoor wordt het op dat moment minder aangenaam om er te werken, wonen of recreëren.
- Thermisch comfort in de binnenomgeving: Hitte in de buitenomgeving wordt in zekere mate vertaald naar hitte in de binnenomgeving, tenzij gebruik gemaakt wordt van airconditioning. Wanneer dit niet het geval is, zal het thermisch comfort in de binnenomgeving van gebouwen afnemen.
- Energieverbruik: Verhoogde temperaturen zullen over het algemeen het gebruik van energie in de winter doen verminderen. Dit is positief. Echter, in de zomer zou het energieverbruik iets kunnen toenemen, omdat naar verwachting meer gebruik zal worden gemaakt van air conditioning. Het effect hiervan op de broeikasgasemissies en het stedelijk hitte-eiland (door een toename in de antropogene warmteafgifte) is voor de Nederlandse situaties volgens sommige studies niet noemenswaardig (Klok et al. 2010).
- Luchtkwaliteit: Hitte is nadelig voor de luchtkwaliteit en zorgt voor meer kans op smogvorming in de stad. Dit komt enerzijds doordat de gemiddelde ozonconcentraties geleidelijk stijgen als functie van de temperatuur. Daarnaast komen verhoogde concentraties van fijnstof en ozon vaak tot stand onder invloed van stabiele atmosferische omstandigheden. Onder deze condities is er weinig

⁴ <http://www.actionbioscience.org/environment/voogt.html>

uitwisseling van de lucht met de hogere luchtlagen waardoor de concentraties van deze luchtverontreinigde stoffen gestaag stijgen.

- Ecologie: Hogere temperaturen hebben invloed op de stadsecologie en het groeiseizoen zal door hogere temperaturen worden verlengd.
- Arbeidsproductiviteit: Hitteduur en -intensiteit bepalen het menselijk functioneren en daarmee ook de arbeidsproductiviteit. FNV Bondgenoten geeft in 2006 aan dat naar schatting 39% van de Nederlandse werknemers wel eens in extreme hitte werkt⁵. Nieuwe inzichten over de nadelige effecten van hitte op de werkplek en veiligheidskundige grenswaarden staan beschreven in een rapport van de Gezondheidsraad (2008).

2.3.1 *Thermisch comfort*

Hoge temperaturen zijn niet alleen bepalend voor de gevolgen van hitte op de mens en gezondheid. Ook andere aspecten, zoals zonnestraling, warmtestraling van gebouwen, schaduw, wind, en luchtvochtigheid bepalen de mate waarin warmte, en ook koude, door de mens als belastend of comfortabel ervaren wordt. Dit wordt het thermisch comfort genoemd. Een indicator die informatie geeft over het thermisch comfort is de gevoelstemperatuur. Metingen voor Rotterdam laten zien dat het verschil in de gevoelstemperatuur tussen stad en buitengebied op een zomerse dag kan oplopen tot meer dan 15 °C (Verhoeven et al. 2009). Op schaduwloze en windluwe plekken in de stad is de gevoelstemperatuur het hoogst, en in wijken met veel laagbouw en groen het laagst (Heusinkveld et al. 2010b). Wanneer het thermisch comfort boven een bepaalde drempelwaarde uitkomt, kan men van hittestress spreken. Op grond van meetanalyses van weeramateurgegevens, is geschat dat in ongeveer 50% van de stedelijke gebieden in Nederland hittestress kan optreden gedurende 7 dagen per jaar. In dichtbebouwde wijken komt hittestress vaker voor dan in ruimer opgezette wijken (Daanen et al. 2010).

2.3.2 *Hitte en gezondheid*

Onder de gevolgen van hitte op gezondheid valt niet alleen oversterfte. Hittestress, (de aanwezigheid van hitte als stressor op de fysiologie, welke zich uit in een temperatuurverhoging van het lichaam) kan leiden tot warmteziekten en sterfte, en kan ook invloed hebben op het menselijk gedrag (bijvoorbeeld agressiviteit oproepen) en op de slaapkwaliteit. Daarnaast worden bij verhoogde temperaturen bepaalde micro-organismen actiever, waardoor de kans op infectieziekten kan toenemen, maar ook de aard van infectieziekten kan veranderen. Bij het effect van hitte op gezondheid speelt ook de interactie tussen hitte en een slechtere luchtkwaliteit een rol (Daanen et al. 2010).

De mens is een homeotherm wezen; de temperatuur in de lichaamskern moet voor optimaal functioneren rond de 37°C blijven. Als de mens meer warmte produceert dan afgeeft, bijvoorbeeld tijdens inspanning, stijgt de lichaamstemperatuur en spreekt men van hyperthermie. Omgekeerd spreekt men van hypothermie als de warmteafgifte de warmteproductie overstijgt. De mens kan in ruimtes rond kamertemperatuur de kerntemperatuur goed regelen door bloedvaten in de huid meer of minder samen te trekken. In de hitte kan een mens extra koelen door zweetverdamping, in de kou kan een mens extra warmte produceren door rillen en in mindere mate door verbranden van bruin vet. Aan hitte kunnen mensen zich goed aanpassen, aan koude nauwelijks (Weller et al. 2007). De warmtebalans van de mens kan goed gemeten en berekend worden. De warmteproductie wordt bepaald met zuurstofopname; de warmteopslag en -afgifte worden bepaald door meting van het gewichtsverlies en de kern(interne lichaam)- en huidtemperatuur. Vaak wordt voor meting van de kerntemperatuur de oorkoortsthermometer gebruikt, maar deze is niet valide.

⁵ http://www.arbobondgenoten.nl/redarbowet/factsheets/factsheet_klimaat.pdf

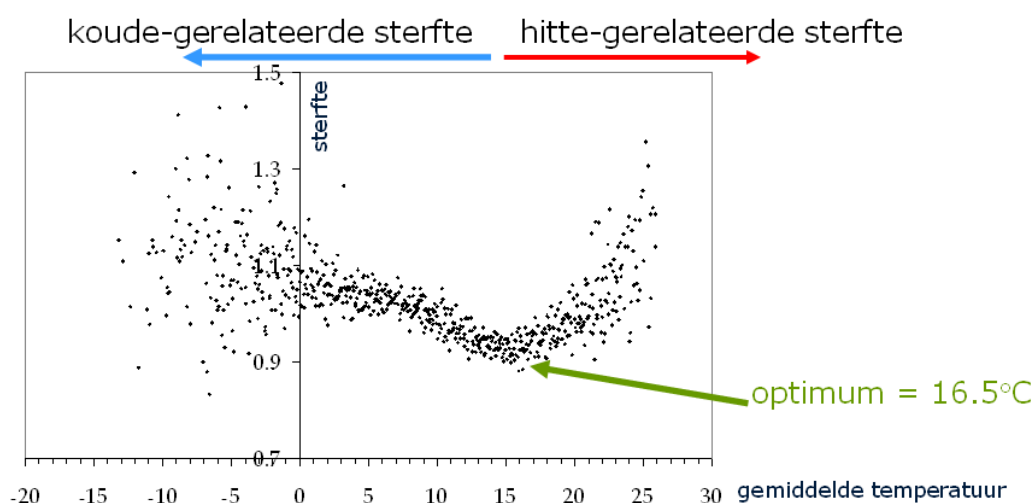
Ziekte

Bij extreem hoge temperaturen probeert de mens zijn lichaamswarmte kwijt te raken door bloedvatverwijding en zweten. Wanneer deze regelmechanismen tekort schieten, zijn er vier warmteziekten die kunnen optreden: warmte-uitslag, hittekrampen, hitte-uitputting en hitteberoerte. Hierbij is warmte-uitslag de lichtste vorm van warmteziekte en hitteberoerte de ernstigste aandoening (Howe en Boden, 2007). Ouderen, mensen die bepaalde geneesmiddelen gebruiken, mensen met overgewicht en mensen met hart- of bloeddrukproblemen vallen onder de risicogroepen voor hitteberoerte. Ook mensen onder invloed van alcohol en drugs die inspanning leveren zijn een gevoelige groep. Kinderen lijken niet kwetsbaarder voor hitte dan volwassenen (Rowland 2008). Ouderen zijn een risicogroep door de verminderende temperatuurswaarneming, gebruik van medicatie, aanwezigheid van ziekten en aandoeningen, verminderende dorstprikkel en verminderend transpiratievermogen.

De gevolgen van hitte op gezondheid en ziekte wordt teruggezien in de statistieken van ziekenhuisopnames (Kovats en Hajat 2008; Johnson et al. 2005; Kovats et al. 2004; Semenza et al. 1999). Tijdens de hittegolf van augustus 2003 was er een duidelijke toename in ziekenhuisopnames in Spanje (Cajato et al. 2005) en vooral in Frankrijk, waar men de toevloed van opnames niet meer aankon (Vanhems et al. 2003; Gremy et al. 2004; Lecomte en Penanster 2004). Die ziekenhuisopnames betreffen vooral nier- en ademhalingsziekten, en vooral ouderen (Kovats et al. 2004). Nieraandoeningen kunnen worden verklaard door uitdroging van ouderen die bij hitte regelmatig wordt waargenomen (Pandolf 1997). Respiratoire aandoeningen hebben wellicht een relatie met bacteriële of virale infecties, of met toegenomen concentraties van ozon en fijn stof (O'Neill et al. 2005; Kosatsky, in press). Het gaat in veel mindere mate over cardiovasculaire ziekten (Kovats et al. 2004; Panagiotakos et al. 2004). Studies hebben echter aangetoond dat de toename in ziekenhuisopnames minder uitgesproken is dan de toename in sterftegevallen. Dit kan te wijten zijn aan het feit dat mensen die tijdens hittegolven sterven, plots overlijden en niet op tijd aan medische hulp geraken. Deze hypothese heeft belangrijke consequenties voor het type maatregelen bij hittegolven (Kovats en Hajat 2008).

Sterfte

Het effect van temperatuur op sterfte wordt beschreven door een V-vormige relatie (Figuur 2.4): sterfte is het laagst bij een bepaalde optimale temperatuur, en loopt op bij hogere en lagere temperaturen (Huynen et al. 2001). De temperatuur die gepaard gaat met de laagste sterfte verschilt per land (Keatinge et al. 2000). Dit betekent dat de mens zich kan aanpassen aan het lokale klimaat. Hoewel sterfte in de winter over het algemeen hoger is dan in de zomer, sterven in de zomer meer mensen naarmate de temperatuur toeneemt. Uit onderzoek naar sterfte tijdens hittegolvenperioden in Nederland is gebleken dat de sterfte tijdens een hittegolf met 12% toeneemt (overeenkomend met 40 doden per dag).



Figuur 2.4 Relatie tussen gemiddelde dagtemperatuur (°C) en oversterfte in Nederland (Bron: Huynen et al., 2001)

Slaap

Relatief hoge nachttemperaturen hebben daarnaast invloed op de nachtrust. Dit uit zich in vaker ontwaken, langere waakperiodes en meer bewegen tijdens de slaap. Naar verwachting hebben verschillende bevolkingsgroepen hiermee te maken, in Nederland is tot nu toe vooral onderzoek gedaan naar het effect bij ouderen.

Het effect van de omgevingstemperatuur op de slaapkwaliteit van oudere bewoners in Rotterdam is recent onderzocht op grond van objectieve metingen van aspecten van de slaap (Janssen et al. 2010). Dit onderzoek bevestigde dat de gemiddelde buitentemperatuur van het voorafgaande etmaal een negatieve invloed had op de totale slaapduur, de inslaaptijd en de motorische onrust tijdens de slaap. Hoewel de gevonden nadelige effecten van hoge omgevingstemperaturen op de slaapkwaliteit niet groot zijn, blijkt hieruit wel dat ouderen belemmerd worden in hun slaap.

Dit bleek ook uit onderzoek gedaan in het afgelopen jaar naar de warmtebeleving bij ouderen in Tilburg (Daalen en Van Riet 2010). Uit dit onderzoek gebaseerd op vragenlijsten bij 300 ouderen en metingen bij 14 ouderen thuis bleek dat 19% van de ouderen ernstig gehinderd is door de warmte en 17% ernstig verstoord in de slaap. De meest voorkomende gezondheidsklachten waren vermoeidheid, slecht slapen en benauwdheid. De hinder bleek samen te hangen met de ligging van de slaapkamer op de zonkant en de mogelijkheid tot ventilatie, maar ook met fysieke en psychosociale factoren.

Referenties

- Cajoto, V.I., Peromingo, J.A., Vicdeo, G.V., Leira, J.S., Frojan, S., 2005. Health impact of 2003 heat wave at Hospital de Riveira (A Coruna). *An. Med. Int.* 22:15–20.
- Conrads, L.A., 1975. Observations of meteorological urban effects. The heat island of Utrecht. PhD thesis Universiteit Utrecht, 84 blz.
- Daalen, E. van, en Riet, N. van, 2010. Onderzoek naar warmtebeleving bij ouderen. Zomer 2010. Tilburg: Bureau Gezondheid, Milieu & Veiligheid GGD'en Brabant/Zeeland
- Daanen, H., Simons, A. en Janssen, S., 2010. De invloed van hitte op de gezondheid, toegespitst op de stad Rotterdam. TNO publicatie, TNO-DV 2010 D248, 25 blz.
- Gezondheidsraad, 2008. Hittestress op de werkplek. Gezondheidsraad, Den Haag, publicatienummer 2008/24.

- Greymy I, Lefranc A, Pepin P. 2004. Consequences sanitaire de la canicule d'aout 2003 en Ile-de-France [Impact of the August 2003 heat wave: sanitary consequences in Ile-de-France]. *Rev. Epidemiol. Sante Publique* 52:93–98.
- Heusinkveld, B., Hove, B. v. en Jacobs, C., 2010 (a). Ruimtelijke analyse van het stadsklimaat in Rotterdam. WUR publicatie, 22 blz.
- Heusinkveld, B.G., Hove, L.W.J. van, Jacobs, C.M.J., Elbers, J.A., Moors, E.J., Holtslag, A.A.M., 2010 (b). Use of a mobile platform for assessing urban heat stress in Rotterdam. In: *Proceedings of the 7th Conference on Biometeorology. - Berichte des Meteorologischen Instituts der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg 20 - ISSN 1435-618X - p. 433 - 438.*
- Hove, B. van, Elbers, J., Jacobs, C. Heusinkveld, B., en Jans, W., 2010 (a). Het stadsklimaat in Rotterdam. Een eerste analyse van de meetgegevens van het meteorologisch meetnet. WUR publicatie, 23 blz.
- Hove, B.v., Steeneveld, G.-J., Jacobs, C., Maat, H. ter, Heusinkveld, B., Elbers, J., Moors, E. en Holtslag, B., 2010 (b). Modelling and observing urban climate in the Netherlands. *KvR 020/10*, ISBN 978-90-8815-020-3.
- Howe, A.S., en Boden, B.P., 2007. Heat-related illness in athletes. *American Journal of Sports Medicine* 35(8), 1384 – 1395.
- Huynen, M.M., Martens, P., Schram, D., Weijenberg, M.P., en Kunst, A.E., 2001. The impact of heat waves and cold spells on mortality rates in the Dutch population: *Environmental Health Perspectives* 109, 463 – 470.
- Janssen, S., Vos, H., Kluizenaar, Y. de, Berg, J.F. van den, Hofman, A. en Tiemeijer, H., 2010. De relatie tussen omgevingstemperatuur en slaapkwaliteit van ouderen. TNO-rapport, concept.
- Johnson, H., Kovats, R.S., McGregor, G.R., Stedman, J.R., en Gibbs, M. 2005. The impact of the 2003 heatwave on mortality and hospital admissions in England. *Health Stat. Q* 2005:6–11.
- Keatinge, W.R., Donaldson, G.C., Cordioli, E., Martinelli, M., Kunst, A.E. en Mackenbach, J.P., 2000. Heat-related mortality in warm and cold regions of Europe, observational study. *British Medical Journal*, 321, 670-673.
- Klok, E.J., Broeke, H. ten, Harmelen, T. v., Verhagen, H., Kok, H., en Zwart, S., 2010. Ruimtelijke verdeling en mogelijke oorzaken van het hitte-eiland effect. TNO publicatie, TNO-034-UT-2010-01229_RPT-ML, 78 blz.
- Kosatsky, T. et al. (in press). Short-term effects of temperature and air pollution on health: a review of the evidence. In: Matthies F, Menne B, eds. Preparedness and response to heat-waves in Europe, from evidence to action. Public health response to extreme weather events. Copenhagen, WHO Regional Office for Europe.
- Kovats, R.S., Hajat, S., 2008. Heat stress and public health: A critical review, *Annual Review Public Health* 29: 9.1-9.15.
- Kovats, R.S., Hajat, S., Wilkinson, P., 2004. Contrasting patterns of mortality and hospital admissions during heatwaves in London, UK. *Occup. Environ. Med.* 61:893–98.
- Lecomte D, de Penanster D. 2004. People living in Paris, dead during the August 2003 heatwave and examined in Medicolegal Institute. *Bull. Acad. Natl. Med.* 188:459–69
- Memon, R.A., Leung, D.Y.C. en Liu C.-H., 2009. An investigation of urban heat island intensity as an indicator of urban heating. *Atmopheric Research* 94, 491 – 500.
- O'Neill M.S., Hajat, S., Zanobetti, A, Ramirez-Aguilar, M., en Schwartz, J., 2005. Impact of control for air pollution and respiratory epidemics on the estimated associations of temperature and daily mortality. *Int J Biometeorol*, 50(2):121-129.
- Panagiotakos DB, Chrysohou C, Pitsavos C. 2004. Climatological variations in daily hospital admissions for acute coronary syndromes. *Int. J. Cardiol.* 94:229–33.
- Pandolf, K.B., 1997. Aging and human heat tolerance: *Experimental Aging Research* 23, p. 69-105.

- Ronda, R., Steeneveld, G.-J., en Hove, B. v., 2010. Modelsimulaties van het stadsklimaat Rotterdam. WUR publicatie, 27 blz.
- Roodenburg, J., 1983. Adaptation of rural minimum temperature forecasts to an urban environment. *Arch. Met. Geoph. Biocl., Ser. B*, 32, 395 – 401.
- Rowland, T., 2008. Thermoregulation during exercise in the heat in children: old concepts revisited. *Journal of Applied Physiology* 105, 718 – 724.
- Salcedo Rahola, B., Oppen, P. van en Mulder, K. (2009). Heat in the city, ISBN 978-90-8815-008, rapportnummer KvR013/2009
- Semenza, J.C., McCullough, J.E., Flanders, W.D., McGeehin, M.A., Lumpkin, J.R., 1999. Excess hospital admissions during July 1995 heat wave in Chicago. *Am. J. Prev. Med.* 16:269–77
- Steeneveld, G.J., Koopmans, S., Hove, L.W.A. van, en Holtslag, A.A.M., 2010 (a). Urban Heat Island Effects and Human Comfort in a Mild Cfb Climate: Exploring Long Term Observations by Hobby Meteorologists in The Netherlands., 9th Symp. on the Urban Environment, 2-6 Aug 2010, Keystone, USA.
- Steeneveld, G.J., en Hove, L.W.A., 2010 (b). Een eerste inschatting van het 'Urban Heat Island' effect voor Rotterdam en omgeving: Een modelstudie. WUR publicatie, 25 blz.
- Vanhems P, Gambotti L, Fabry J. 2003. Excess rate of in-hospital death in Lyons, France, during the August 2003 heat wave. *N. Engl J. Med.* 348:2077–78
- Verhoeven, G., Broksma, R., en Rutten, M., 2009. Meetexperiment invloed open water op omgevingstemperatuur. Deltares, conceptrapport 1200473-000-ZWS-0007.
- Weller A, Linnane D, Jonkman A, Daanen H (2007) Quantification of the decay and re-induction of heat acclimation in dry-heat following 12 and 26 days without exposure to heat stress. *Eur J Appl Physiol* 102:57–66
- Wolters, D. en Bessembinder, J. 2011. Inventarisatie stadsklimaat in de regio's Rotterdam en Haaglanden, met waarnemingen door weeramateurs. KNMI publicatie, in concept.

3 Lokale probleemanalyse: Hittekaarten

3.1 Inleiding

Stedelijke klimaatkaarten of Urban Climatic Maps (UCM) geven een analyse weer van het lokale stedelijke klimaat op grond van weergegevens en stedelijke karakteristieken. Klimaatkaarten worden gebruikt om planningsprocessen te ondersteunen en gebruikt voor de analyse van kwetsbaarheid aan weer en klimaat verbonden risico's. Er bestaat geen universele methode om stedelijke klimaatkaarten maken. De methodiek om tot een dergelijke kaart te komen is namelijk afhankelijk van de beschikbare informatie en de focus binnen de stedelijke ontwerpogaven waarvoor de kaart bedoeld is. Iedere stad en doelstelling vereist vermoedelijk zijn eigen klimaatkaart. De meest recente stedelijke klimaatkaarten richten zich op vraagstukken rond thermisch comfort, deze categorie klimaatkaarten wordt ook wel hittekaarten genoemd (zie 3.5 *Voorbeelden van hittekaarten in Nederland*).

In Nederland is in het verleden niet veel aandacht besteed aan het stedelijk klimaat. Na de hittegolven van 2003 en 2006 is ook in Nederland het onderzoek aan stadsklimaat op gang gekomen. Momenteel vindt een inhaalslag plaats op dit gebied, om ontbrekende gegevens te achterhalen en de benodigde kennis op te doen. De eerste pogingen om klimaatkaarten te creëren ter ondersteuning van stedelijke planning zijn inmiddels ondernomen. Voortbouwend op internationale ervaring richt men zich nu actief op het ontwikkelen van geschikte methodologieën om de kaarten te maken, afgestemd op de specifieke behoeften van regio's of steden in Nederland. De nu beschikbare voorbeelden van stedelijke klimaatkaarten zijn hittekaarten. Ze lijken goed bruikbaar te zijn, maar laten ook nog een aantal markante verschillen met metingen op straatniveau zien. Hieruit blijkt dat validatie van de methoden en de kaarten cruciaal is. Hoewel de huidige voorbeelden zich vooral beperken tot het thema hitte of thermisch comfort, zijn kaarten met alternatieve thema's mogelijk. Dit vereist innovatieve meetmethodes en karteringstechnieken, waaraan momenteel wordt gewerkt.

De belangrijkste algemene informatie die nodig is om klimaatkaarten te maken, zoals klimaatgegevens of een hoogtekkaart, is beschikbaar in Nederland. Meer specifieke informatie, zoals wijkkarakteristieken en toepassing van groen, is soms beschikbaar bij gemeenten, of kan worden afgeleid uit specifieke metingen. Mogelijk kan een deel van de ontbrekende informatie worden afgeleid uit bestaande gegevensbronnen. Deze laatste optie vereist meer onderzoek.

Het afstemmen van klimaatkaarten op de behoefte van de gebruikers vereist een intensieve interactie tussen klimatologen en de belanghebbenden (zoals vertegenwoordigers van de lokale overheid of architecten). GIS-specialisten kunnen daarbij behulpzaam zijn.

3.2 Klimaatkaarten: achtergrond en historie

Klimaatkaarten kunnen meerdere doelen dienen, op verschillende thema's. De eerste ontwerpen van klimaatkaarten waren gericht op de verbetering van luchtkwaliteit door stedelijk ontwerp. Op het moment richten klimaatkaarten richten zich meer en meer specifiek op vraagstukken over thermisch comfort in de stedelijke omgeving (zie Ren et al., 2010, voor voorbeelden). Deze kaarten noemt men ook wel 'hittekaarten'. Wanneer de hittekaarten zijn bedoeld als ondersteuning voor het ontwerpen van steden met een optimaal thermisch comfort is het van cruciaal belang om rekening te houden met de perceptie en waarnemingen van mensen (Lenzhölzer, 2010; Vanos et al., 2010). Ook andere

klimaatgerelateerde thema's, zoals overstromingsrisico's, kunnen centraal staan bij het ontwerp van klimaatkaarten. Wij beperken ons in deze kennismontage tot het thema hitte.

Het ontwikkelen van klimaatkaarten ter ondersteuning van beleid en stedenbouwkundig ontwerp vindt zijn oorsprong in Duitsland, in de jaren '70 (Matzarakis, 2005). Duitsland is nog steeds een toonaangevend land op dit gebied. Vanaf het midden van de jaren '80 is het aantal UCM studies in Europa sterk gegroeid, vooral in Duitsland en een aantal omliggende landen. De hittegolven in 2003 en 2006 waren in Europa een extra stimulans voor stedelijk klimaatanalyse en het in kaart brengen van het stedelijke klimaat (Ren et al., 2010). Dit geldt ook voor Nederland, waar tot dan toe relatief weinig aandacht was besteed aan stadsklimaat (Van Hove et al., 2010). Sinds de jaren '90 zijn UCM studies ook uitgevoerd in andere delen van de wereld, met een hoofdrol voor Japan. Zie Ren et al. (2010) voor een compleet overzicht van UCM studies tussen 1963 en 2009.

3.3 Klimaatkaarten als instrument voor planning en communicatie

Voor optimale ondersteuning van stedelijk beleid, ontwerp en planning dient een klimaatkaart te bestaan uit twee componenten: een 'Urban Climate Analysis map' (UCM-An) ofwel analysekaart, en Urban Climate Recommendations map (UCM-Re) ofwel visiekaart of aanbevelingskaart (Matzarakis, 2005; Ren et al., 2010). Een analysekaart met informatie over één klimatologisch aspect (bijvoorbeeld hitte) kan soms volstaan voor wetenschappelijke doeleinden of voor bewustwording van het grote publiek (bijv. Knight et al., 2010). Klimaatkaarten zijn ook toepasbaar in kwetsbaarheid- en risicobeoordelingen, ter ondersteuning van klimaatadaptatie strategieën (Lindley et al., 2006). Klimaatkaarten kunnen dan ook in de bredere context van beslissingsondersteunende systemen worden geplaatst, inclusief sociaaleconomische en bestuurlijke aspecten, afhankelijk van de behoeften van de gebruikers (zie Bridge Consortium, 2010 www.bridge-project.eu).

Iedere stad heeft zijn eigen specifieke klimatologische omstandigheden en stedenbouwkundige kenmerken. Daarnaast kan het doel van klimatologische analyses steeds anders zijn. Daarom vereist iedere stad een eigen klimaatkaart, waarin de nadruk op verschillende aspecten komt te liggen. Zo zal een kaart om de mogelijkheden inzichtelijk te maken om het stedelijk hitte-eiland effect te verminderen andere informatie bevatten dan een kaart die gebruikt wordt voor het ontwikkelen van opties voor vermindering van overstromingsrisico's. Optimale ondersteuning van het planningsproces betekent bovendien het regelmatig actualiseren van visiekaarten (Ren et al., 2010).

3.3.1 Analysekaart (UCM-An)

Een stedelijke klimaatanalysekaart (UCM-An) toont een tweedimensionale analyse van het stedelijk klimaat. De basisstructuren zijn zogenoemde 'klimatopen' of stedelijke klimaatzones. Klimatopen kunnen worden opgevat als eenheden van combinaties van topografie, landgebruik en stedelijk ontwerp die op eenzelfde manier reageren op het weer (Scherer et al., 1999; Oke, 2006; Mora et al., 2010). Klimatopen hebben een schaal van enkele tientallen tot honderden meters, wat overeenkomt met de schaal van een wijk. Dit hoofdstuk richt zich op die specifieke schaal. De lay-out van een analysekaart is afhankelijk van zijn doel en doelgroep. Voor planologen bijvoorbeeld, kunnen verschillend gekleurde figuren met pijlen en symbolen en een eenvoudige uitleg goed werken (Ren et al., 2010), terwijl voor wetenschappelijke doeleinden gedetailleerde 2D velden met een of twee meteorologische parameters soms meer geschikt zijn.

3.3.2 Visiekaart (UCM-Re)

De visiekaart of aanbevelingskaart (UCM-Re) vertaalt de klimatologische analyse in concrete aanbevelingen voor stedenbouwkundig ontwerp. De visiekaart geeft naast de

gevoeligheid van bepaalde gebieden voor de effecten van veranderingen in de stedelijke configuratie op het stedelijk klimaat, ook expliciet verschillende opties voor plannen van aanpak weer (Ren et al., 2010). De visiekaart kan ook worden ontworpen als een kwetsbaarheids- of risicobeoordelingskaart. Een dergelijke kaart kan helpen om de gevolgen van klimaatverandering voor de stedelijke gebieden inzichtelijk te maken en zo te helpen bij het ontwerpen en prioriteren van adaptatieopties (Lindley et al., 2006). Het is belangrijk dat de schalen van de planning en van de klimatologische factoren goed op elkaar worden afgestemd. Ontwerpen van open ruimtes verbindt bijvoorbeeld de klimatologie van een wijk met thermisch comfort; een stedelijk masterplan verbindt de schaal van een stad met het stedelijk hitte-eiland (UHI) (Katzschner en Mulder, 2008).

3.4 Klimaatkaarten voor Nederlandse steden

Voor het construeren van een klimaatkaart moet klimatologische informatie gekoppeld worden aan geografische terreininformatie en data op het gebied van stedelijke planning en ontwerp. In hoeverre is deze informatie in Nederland aanwezig?

3.4.1 *Klimatologische informatie*

In Nederland is klimatologische informatie direct verkrijgbaar bij het Koninklijk Nederland Meteorologisch Instituut (KNMI; www.knmi.nl). Maar de onderliggende data stammen uit gebieden waarin de stedelijke invloed op de waarnemingen normaal gesproken minimaal is conform de richtlijnen van de Wereld Meteorologische Organisatie (WMO). Mede daarom is kwantitatieve informatie over het Nederlandse stadsklimaat zeer beperkt. Soms is het nuttig om klimaatscenario's te gebruiken. Maar zulke scenario's zijn in eerste instantie ontworpen op wereldschaal. Methodes om zulke scenario's naar lokaal schaalniveau te vertalen zijn beschikbaar, maar de resultaten zijn onzeker. Deze vertaling is een actief onderzoeksgebied met veel onbeantwoorde vragen.

Voor de constructie van klimaatkaarten zijn meteorologische waarnemingen in de stedelijke omgeving zelf zeer waardevol. Representatieve, kwalitatief goede meteorologische waarnemingen binnen steden zijn echter bijzonder lastig uit te voeren (Grimmond, 2006). Om die reden, en omdat het stedelijk klimaat in Nederland tot de hittegolven van 2003 en 2006 niet als een probleem werd gezien (Van Hove et al., 2010), is dergelijke informatie binnen Nederlandse steden schaars. In sommige gevallen kunnen data van amateurmeteorologen na zorgvuldige kwaliteitscontrole goede informatie verschaffen over het stedelijk klimaat (Van Hove et al., 2010; Steeneveld et al., 2011). Inmiddels lopen verschillende wetenschappelijke onderzoeken waarbinnen meteorologische waarnemingen binnen stedelijke gebieden worden uitgevoerd met behulp van vaste en mobiele meetstations (Van Hove et al., 2011; Heusinkveld et al., 2010; Brandsma, 2010; Heusinkveld et al., 2011). Het is nog onduidelijk of dergelijke informatie kan worden geëxtrapoleerd naar andere steden dan de steden waar de metingen werden uitgevoerd.

Ook remote sensing ("metingen op afstand", bijvoorbeeld met behulp van satellieten of vliegtuigen) zou waardevolle informatie kunnen bieden voor het ontwerp van klimaatkaarten (Scherer et al., 1999; Weng, 2009). Maar het verzamelen van dergelijke informatie en vooral de interpretatie van de gegevens is verre van triviaal (Voogt en Oke, 2003), en bovendien vaak alleen gericht op thermisch comfort. Betrouwbare en representatieve informatie over stadsklimaat voor andere grootheden dan temperatuur, zoals neerslag, verdamping en de uitstoot van broeikasgassen, is nauwelijks beschikbaar.

3.4.2 *Terreininformatie en stedenbouwkundige data*

De benodigde terreininformatie en gegevens over stedelijke lay-out zijn afhankelijk van de methodologie en het doel van de klimaatkaart. Wanneer bijvoorbeeld het UHI effect het

centrale thema van de kaart vormt zullen de karakteristieken die dat UHI beïnvloeden in kaart moeten worden gebracht (zie hoofdstuk 2). Volgens een eerste schatting voor gaat het daarbij in Nederlandse steden om (Katzschner, persoonlijke mededeling, 2010): 1) landgebruik en bodem; 2) stedelijke morfologie (bouwwolume en hoogte, de afmetingen van publieke of open ruimte; 3) topografie; 4) materiaalgebruik en kleur; 5) zogenoemde windbanen. De ruimtelijke verdeling van temperaturen in de stad wordt bepaald door de combinatie van deze kenmerken. Een directe relatie tussen de kenmerken en hitte is in veel gevallen daarom lastig te definiëren en locatiespecifiek.

De meeste algemene geografische informatie van Nederland is met een redelijke kwaliteit beschikbaar. Bijvoorbeeld: "Landelijk Grondgebruiksbestand Nederland" (LGN5) bevat landgebruik informatie voor 39 verschillende klassen, met een ruimtelijke resolutie van 25m (Hazeu, 2005). Zeer gedetailleerde informatie over de hoogte van het oppervlak en oppervlakte-elementen kan worden opgevraagd bij het "Actueel Hoogtebestand Nederland" (AHN; www.ahn.nl), en topografische informatie kan worden verkregen bij het "Kadaster" (www.kadaster.nl).

Gemeenten beschikken vaak over vrij gedetailleerde informatie over kenmerken van steden. Dit kan variëren van informatie over bouwwolume en -hoogte tot informatie over de locatie van bomen. Als dergelijke informatie niet beschikbaar is, kan de gewenste informatie soms worden afgeleid uit wel bestaande gegevens. Zo bestaat de mogelijkheid om topografische en hoogtegegevens binnen steden te combineren om bebouwingsdichtheid af te leiden. In Nederland is echter nog nauwelijks of geen ervaring met dergelijke methodes. De hiervoor genoemde gegevens zijn vaak beschikbaar in een digitaal Geografisch Informatie Systeem (GIS) omgeving, wat het aanmaken van de kaarten aanzienlijk vergemakkelijkt.

Data uit specifieke waarnemingen kunnen ook bruikbaar zijn bij het in kaart brengen van het stadsklimaat. Heusinkveld et al. (2011) bijvoorbeeld, maakten een hittekaart van de stad Rotterdam op basis van hun mobiele meetgegevens, waarbij bebouwingsdichtheid, 'sky-view factor' (mate van beperking van het hemelzicht, hier vanaf de begane grond), en het percentage groen oppervlak gebruikt om de lokale metingen langs de trajecten te vertalen naar de hele stad. Dit soort voorbeelden is echter schaars in Nederland en onderzoek naar de toepasbaarheid van zulke karteringsmethoden is momenteel in uitvoering.

3.4.3 *Relatie tussen meteorologische gegevens en terreininformatie*

Om een klimaatkaart te maken moet een relatie tussen klimatologische gegevens en terreininformatie landgebruik worden gelegd. Geschikte methodes hiervoor zijn afhankelijk van beschikbare gegevens en hulpmiddelen. Vooralsnog is er geen algemeen aanvaarde methodologie voorhanden.

Het construeren van klimatopen is een cruciale stap in het maken van klimaatkaarten. Maar het gebruik en de definitie van klimatopen is soms nogal kwalitatief (bijv. Slabbers et al., 2010), vaak subjectief en afhankelijk van beschikbare informatie. Zo baseren Scherer et al. (1999) klimatopen op remote sensing data; Svensson en Eliasson (2002) op landgebruik categorieën die ook in het stedelijk masterplan van Göteborg ; Katzschner en Mulder (2008) gebruiken een combinatie van stedelijke ruwheid en thermische straling. Een zekere mate van subjectiviteit voor de indeling in klimatopen is niet *per se* een nadeel, omdat de informatie in de kaarten dan kan worden afgestemd op het specifieke doel ervan. Optimale afstemming vereist een goede interactie tussen betrokken partijen (zoals architecten en vertegenwoordigers van de lokale overheid) en (stedelijke) klimatologen of meteorologen.

Om de relatie tussen landgebruik en klimatologische gegevens te bepalen worden statistische technieken gebruikt (bijvoorbeeld Svensson et al., 2002) of modellen toegepast.

Er zijn veel modellen beschikbaar; Grimmond et al. (2010) geven een overzicht van de verschillende modellen die momenteel internationaal gebruikt kunnen worden om regionale weerpatronen naar het schaalniveau van wijken te vertalen. Regionale weerpatronen kunnen op hun beurt berekend worden met behulp van meteorologische modellen op mesoschaal (Van Hove et al., 2010; Ronda et al., 2011). Simulaties van stromings- en warmtepatronen in steden worden ook wel uitgevoerd voor het maken van klimaatkaarten, maar dit kan alleen nog met sterk vereenvoudigde meteorologische modellen (zie Baumüller et al., 2008). Onderzoek is gaande naar de mogelijkheden om specialistische stromingsmodellen op wijkniveau in te zetten bij het maken van klimaatkaarten met de focus op thermisch comfort.

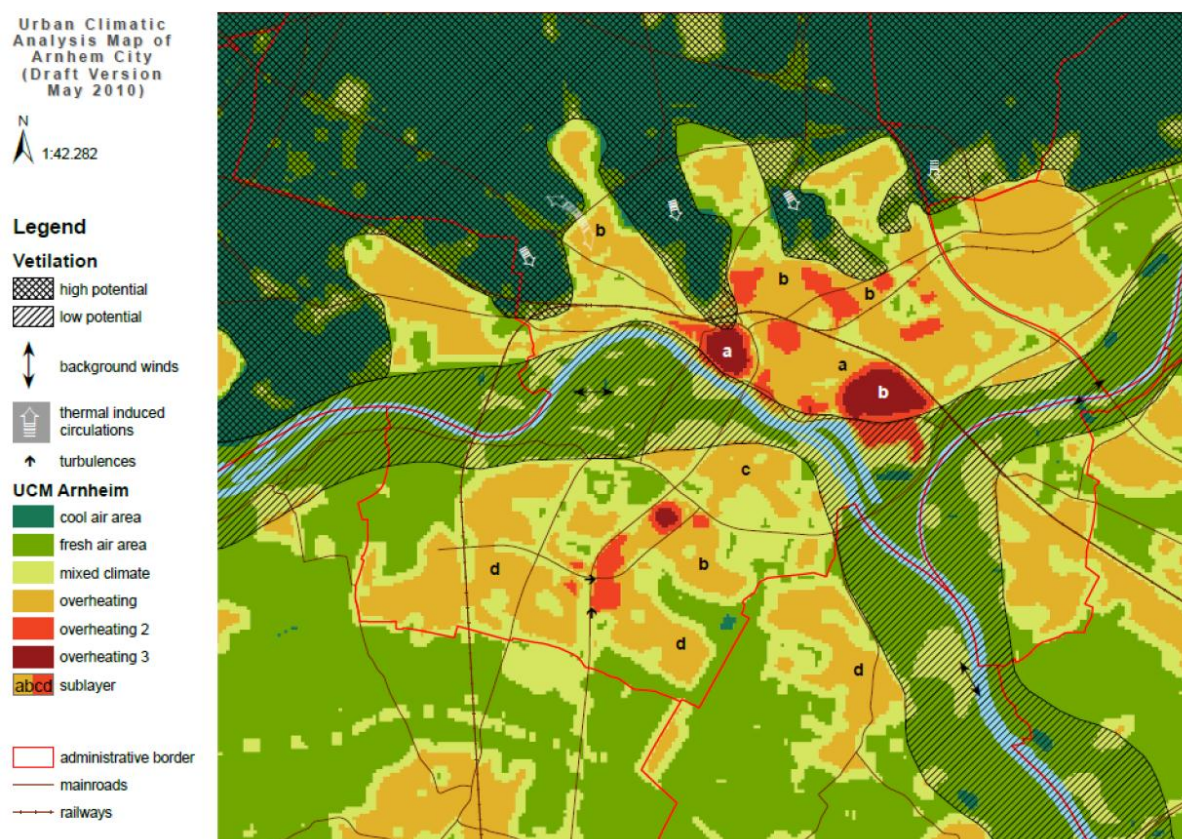
3.5 Voorbeelden van hittekaarten in Nederland

Tot nu toe is slechts een beperkt aantal pogingen ondernomen om klimaatkaarten voor Nederlandse steden te construeren. Deze pogingen zijn vooral gericht op vraagstukken rondom thermisch comfort. De resulterende kaarten kunnen worden beschouwd als analysekaarten (UMC-An) in de vorm van hittekaarten. Ze zijn gemaakt voor verschillende doeleinden, variërend van bewustmaking (bijv. Limburgse en Brabantse kaarten; zie 3.5.4) tot kaarten die gebruikt worden om een aanbevelingskaart te ondersteunen (bijv. Arnhemse kaart; 3.5.1). In de volgende paragrafen worden kaarten besproken die beschikbaar waren op het moment van schrijven. Over het algemeen zijn de kaarten kwalitatief consistent met de huidige kennis over de vorming van het UHI effect en temperatuur op wijkniveau. Soms zien we wel een duidelijk verschil met waarnemingen op leefniveau. Dit duidt erop dat een kritische evaluatie van de kaarten (of validatie) belangrijk is.

3.5.1 Arnhem

De eerste klimaatkaart in Nederland is ontwikkeld voor de stad Arnhem in het kader van het project Future Cities (www.future-cities.eu) (Figuur 3.1). De kaart werd gemaakt door de Universiteit van Kassel (Duitsland), met behulp van topografie, landgebruik, bouwvolume en -hoogte, afmetingen van publieke open ruimte, materiaalgebruik en -kleur, en informatie over windbanen in combinatie met meteorologische waarnemingen uit het weerstation in Deelen. De kaart toont duidelijk verhoogde kans op een intens UHI-effect in het centrum van Arnhem, evenals in een industrieel gebied ten oosten van het centrum en een winkelgebied in het zuiden. In twee laatstgenoemde gebieden werd geen UHI effect geconstateerd tijdens de mobiele metingen op leefniveau (Heusinkveld et al., niet-gepubliceerde gegevens). Ook andere verschillen tussen de kaart en de metingen werden geconstateerd. De windbanen die op de kaart te zien zijn wijzen op de mogelijkheid van natuurlijke ventilatie langs de rivier de Neder-Rijn en koeling door een luchtstromen vanuit het noorden van Arnhem die kunnen ontstaan door de hoogteverschillen in de stad. Het laatstgenoemde fenomeen komt naar verwachting niet veel voor in Nederland: mogelijk komen vergelijkbare koele luchtstromen ook voor in enkele steden in het Limburgse heuvelland.

De Arnhemse kaart zal nu worden gebruikt als basis voor een binnenkort te ontwikkelen visiekaart (UCM-Re) ter ondersteuning van de stadsplanning. De hittekaart is wel al toegepast in een zogenoemde "Proeftuin", waarbij opties voor het ontwerp van een de wijk Koningspleij werden ontwikkeld (Slabbers et al., 2010).



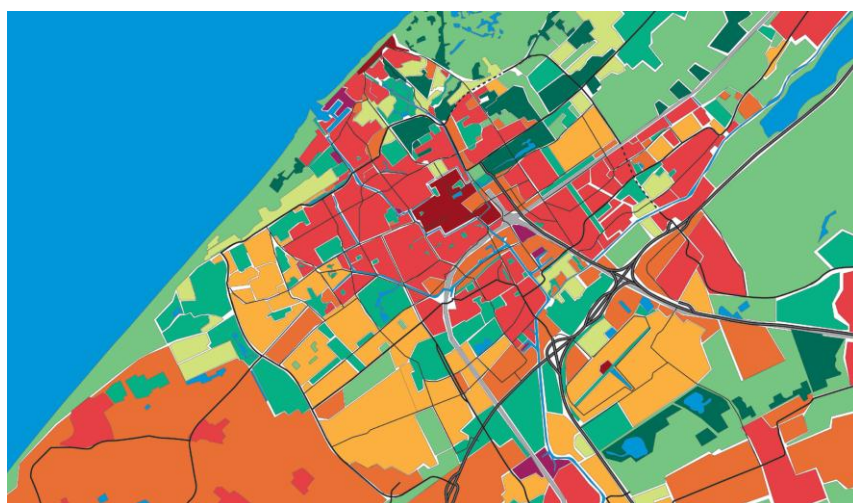
Figuur. 3.1 Hittekaart voor Arnhem (bron: www.future-cities.eu)

3.5.2 Rotterdam

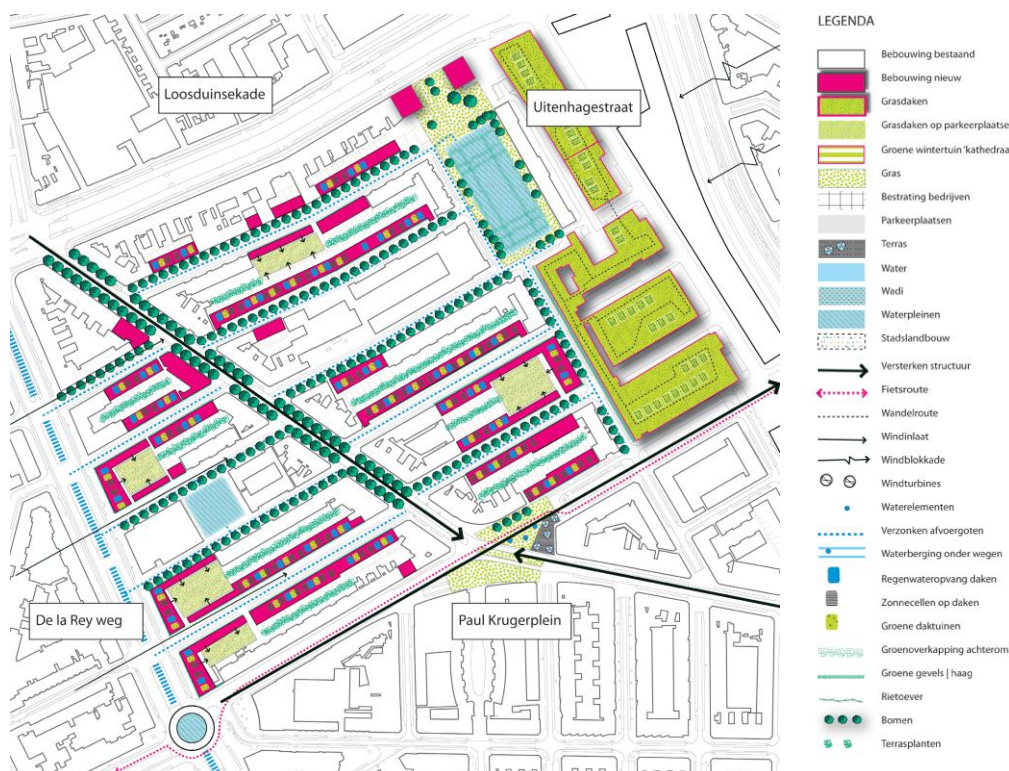
Voor de stad Rotterdam is een hittekaart gemaakt met behulp van remote sensing data van de satellieten Landsat (15 beelden bij onbewolkt weer in de zomers, van 1984 tot en met 2007) en NOAA-AVHRR (42 beelden verkregen tijdens de hittegolf van 2006) (Figuur 2.3). Op basis van de waargenomen temperatuurpatronen werden gemiddelde oppervlaktetemperaturen berekend voor 22 wijken in Rotterdam (Klok et al., 2010). De kaart is uitgebreid naar de regio Den Haag en omgeving (Duyzer et al., 2011). De resulterende kaarten van Rotterdam laten duidelijke patronen van relatief warme en koele plekken zien, waarbij het stadscentrum en grote aaneengesloten verharde gebieden (zoals industriële zones) maximale opwarmingseffecten vertonen, en groene zones en wateroppervlakken overdag de koelste plekken blijken te zijn. Kaarten van NOAA-AVHRR laten zien dat de wijken die het overdag het warmst zijn in de nacht ook koeler kunnen zijn dan andere wijken. De vertaling van oppervlaktetemperatuur naar luchttemperatuur is erg lastig (Voogt en Oke, 2003; Duyzer et al. 2011), en de vertaling naar thermisch comfort van mensen is zelfs nog moeilijker. Hoewel de afgeleide oppervlaktetemperaturen overdag een redelijke correlatie vertonen met de luchttemperaturen op het weerstation "Zestienhoven" en met door amateurmeteorologen gemeten luchttemperaturen in de stad, zijn er grote verschillen tussen deze hittekaart op basis van de oppervlaktetemperaturen en het lokale UHI-effect zoals afgeleid uit de mobiele metingen of leefniveau (Heusinkveld et al., 2010, 2011). Er is momenteel gewerkt aan een alternatieve stedelijke hittekaart voor Rotterdam, gebaseerd op de mobiele metingen door Heusinkveld et al. (2010) (Heusinkveld et al., 2011). Deze kaart zal gebruik maken van de relatie tussen de waargenomen luchttemperatuur op straatniveau en de kenmerken van de stedelijke omgeving in de wijken waar de metingen zijn uitgevoerd.

3.5.3 Den Haag

Slabbers et al. (2010) construeerden een klimaatkaart voor de stad Den Haag en haar omgeving. De kaart is grotendeels gebaseerd op de methodologie en klimatopen die zijn toegepast voor de Duitse stad Stuttgart (VDI, 1997; Baumüller et al., 2008). De klimatopen worden gecombineerd met informatie over stromingspatronen, en topografische en demografische informatie. De gebruikte klimatopen definiëren kwalitatieve kenmerken met betrekking tot meteorologische (vooral thermische) aspecten op wijkniveau (Figuur 3.2). Het stadscentrum bijvoorbeeld vertoont een sterke mate van verhitting gedurende de dag, nauwelijks afkoeling tijdens de nacht en bijna geen ventilatie. Een “adaptatie toolbox” is gebruikt om de klimatologische analyse naar geschikte ontwerpopties voor de wijk Transvaal te vertalen (Slabbers et al. 2010).

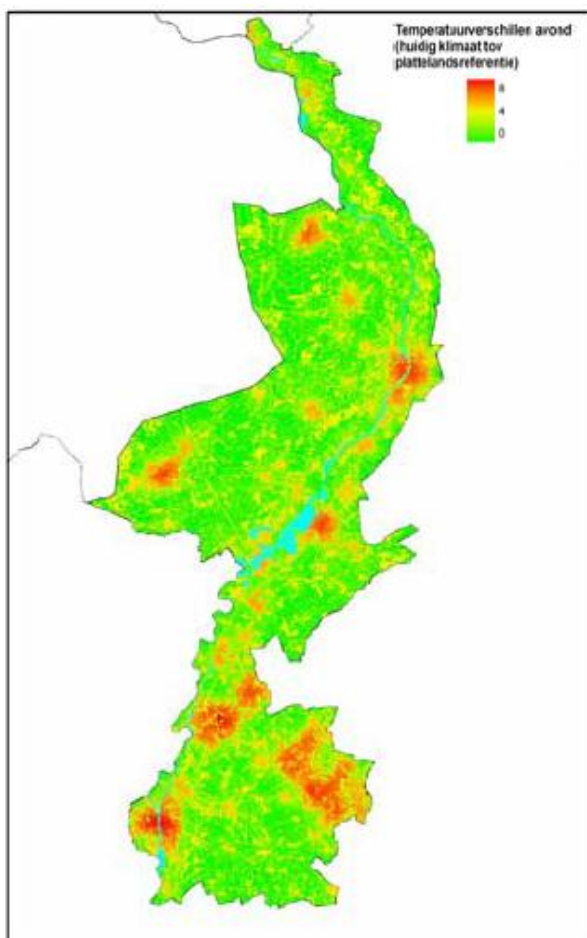


Figuur. 3.2 Boven: Klimatopenkaart voor Den Haag. Gebieden in donkerrode tinten kunnen hun warmte slecht kwijt, groene en blauwe tinten geven verkoelende gebieden aan. Onder: klimaatadaptieve mogelijkheden voor de ontwikkeling van Transvaal Noord, een van de deelopgaven in Den Haag. (bron: Slabbers et al., 2010)



3.5.4 Limburg en Brabant

Een eerste, tamelijk ruwe relatie die voortkomt uit de eerste analyses van de mobiele metingen in Rotterdam is gebruikt om resultaten met betrekking tot het UHI te extrapoleren naar dorpen en steden in de provincies Limburg en Brabant (Goosen et al., 2010). De kaart (Figuur 3.3) moet worden beschouwd als een eerste, ruwe indicatie van een mogelijk UHI effect in de genoemde provincies, voor het huidige klimaat. Ze bevatten een grote onzekerheid ten aanzien van de extrapolatie vanuit Rotterdam naar een heel ander deel van Nederland. Bovendien hebben de gebruikte statistische verbanden een voorlopig, verkennend karakter. Aangezien de statistische relatie is gebaseerd op de koppeling tussen de UHI-intensiteit enerzijds en de bebouwingsdichtheid en mate van groene ruimten anderzijds, suggereren deze kaarten dat zowel kleine als grote steden een significant UHI-effect kunnen ervaren. Dit lijkt overigens in overeenstemming met waarnemingen van amateurmeteorologen (zie hoofdstuk 2).



Figuur 3.3 Geschat maximum UHI voor stedelijk gebied in de provincie Limburg (bron: Goosen et al., 2010).

Referenties

- Baumüller, J., Reuter, U., Hoffmann, U., and Esswein, H., 2008. *Klimaatlas Region Stuttgart*. Verband Region Stuttgart, Stuttgart, ISBN 978-3-00-024951-8, 168 pp.
- Brandsma, Th, 2010. Warmte-eilandeffect van de stad Utrecht, *Zenit* **37**, 500-505.
- Bridge Consortium, 2010. *Bridge Newsletter 2*. Available from www.bridge-project.eu
- Duyzer, J., Klok, E.J., Verhagen, H., 2011. Hoge temperaturen ten gevolge van het stedelijk hitte-eiland effect nu en in de toekomst: Een verkenning in de noordelijke Stadsregio

- Rotterdam en het zuidelijk deel van Stadsgewest Haaglanden. TNO publicatie TNO-034-UT-2011-00006_versie2
- Goosen, H., M. de Groot, A. Koekoek, K. van der Sandt, L. Masselink, M. van Eupen, J. van der Gaast, M. van Vliet, W. Immerzeel, C. Jacobs, A. Jeuken, G. Blom-Zandstra, W. Fransen, B. Schaap and R. Smidt, 2010. *Klimaat-effectatlas Limburg*. klimaat-effectatlas.wur.nl.
- Grimmond, C.S.B., 2006. Progress in measuring and observing the urban atmosphere. *Theor. Appl. Climatol.*, 84, 3-22.
- Grimmond, C.S.B., and Coauthors, 2010: The International Urban Energy Balance Models Comparison Project: First Results from Phase 1. *J. Appl. Meteorol. Clim.*, 49, 1268-1292.
- Hazeu, G., 2005. *Landelijk Grondgebruiksbestand Nederland (LGN5); Vervaardiging, nauwkeurigheid en gebruik*. Alterra-report 1213, Wageningen UR Alterra, 92 pp (In Dutch).
- Heusinkveld, B.G., L.W.A. van Hove, C.M.J. Jacobs, G.J. Steeneveld, J.A. Elbers, E.J. Moors and A.A.M. Holtslag, 2010. Use of a mobile platform for assessing urban heat stress in Rotterdam. *Proc. BIOMET 7, Freiburg, 12-14 April 2010*, 433-438.
- Heusinkveld, B.G., L.W.A. van Hove, C.M.J. Jacobs, G.J. Steeneveld, J.A. Elbers, E.J. Moors and A.A.M. Holtslag, 2011. Mapping thermal comfort in Rotterdam from mobile traverse measurements. *In preparation*.
- Katzschner, L., and J. Mülder, 2008. Regional climatic mapping as a tool for sustainable development. *J. Env. Management* 87, 262-267.
- Klok, E.J., Broeke, H. ten, Harmelen, T. v., Verhagen, H., Kok, H., en Zwart, S., 2010. Ruimtelijke verdeling en mogelijke oorzaken van het hitte-eiland effect. TNO publicatie, TNO-034-UT-2010-01229_RPT-ML, 78 pp..
- Knight, S., C. Smith and M. Roberts, 2010. Mapping Manchester's urban heat island. *Weather*, 65, 188-193.
- Lenzhölzer, S., 2010. *Designing atmospheres: research and design for thermal comfort in Dutch urban squares*. Thesis, Wageningen University, Wageningen, 196 pp.
- Lindley S.J., J.F. Handley, N. Theuray, E. Peet and D. Mcevoy, 2006. Adaptation Strategies for Climate Change in the Urban Environment: Assessing Climate Change Related Risk in UK Urban Areas. *Journal of Risk Research* 9, 543-568.
- Matzarakis, 2005. Country report: urban climate research in Germany. *IAUC Newsletter*, 11, 4-6.
- Mora, C. A synthetic map of the klimatopen of the Serra da Estrela (Portugal), 2010. *Journal of Maps*, 2010, 591-608.
- Oke, T.R., 2006. Towards better scientific communication in urban climate. *Theor. Appl. Climatol.*, 84, 179-190.
- Ren, C., E.Y. Ng and L. Katzschner, 2010. Urban climate map studies: a review. *Int. J. Climatol.*, DOI:10.1002/joc.2237.
- Ronda, R., G.-J. Steeneveld and B. van Hove, 2011. *Modelsimulaties van het stadsklimaat van Rotterdam*. WUR external scientific report, Wageningen UR, Wageningen (in prep.).
- Scherer, D., U. Fehrenbach, H.-D. Beha, and E. Parlow, 1999. Improved concepts and methods in analysis and evaluation of the urban climate for optimizing urban planning processes. *Atmospheric Environment*, 33, 4185-4193.
- Slabbers, S., W. Klemm and A.-S. Verburg, 2010. *Proeftuin Den Haag Arnhem. Klimaatadaptatie in de stad*. www.maakruimtevoorklimaat.nl, 128 pp.
- Steeneveld, G.J., S. Koopmans, B.G. Heusinkveld, L.W.A. van Hove en A.A.M. Holtslag, 2011. Quantifying urban heat island effects and outdoor human comfort in relation to urban morphology by exploring observations from hobby-meteorologists in the Netherlands. *In prep. for J. Geophys. Res.*
- Svensson, M. K., and I. Eliasson, 2002. Diurnal air temperatures in built-up areas in relation to urban planning. *Landscape and Urban Planning*, 61, 37-54.

- Svensson M.K., Eliasson, I. and Holmer, B., 2002. A GIS based empirical model to simulate air temperature variations in the Göteborg urban area during the night. *Climate Research*, 22, 215–226.
- Van Hove, B., G.-J. Steeneveld, C. Jacobs, H. ter Maat, B. Heusinkveld, J. Elbers, E. Moors, and B. Holtslag, 2010. *Modelling and observing urban climate in the Netherlands*. Scientific Report Climate Changes Spatial Planning, KvR 020/10. ISBN/EAN 978-90-8815-020-3, 60 pp.
- Van Hove, B., J. Elbers, C. Jacobs, B. Heusinkveld and W. Jans, 2011. *Het stadsklimaat in Rotterdam. Een eerste analyse van de meetgegevens van het meteorologische meetnet*. WUR external scientific report. Wageningen UR, Wageningen.
- Vanos, J.K., J.S. Warland, T.J. Gillespie and N.A. Kenny, 2010. Review of the physiology of human thermal comfort while exercising in urban landscapes and implications for bioclimatic design. *Int. J. Biometeorol.*, 54, 319-334.
- VDI. 1997. *VDI-Guideline 3787, Part 1, Environmental Meteorology-Climate and Air Pollution Maps for Cities and Regions*. VDI, Beuth Verlag, Berlin.
- Voogt, J.A., and T.R. Oke, 2003. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sens. Environ.*, 86, 370-384.
- Weng, Q., 2009. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. *ISPRS J. Phot. Rem. Sens.*, 64, 335 – 344.

4 Maatregelen

Er zijn verschillende mogelijkheden voor gemeentes om zich voor te bereiden op of aan te passen aan meer hitte in de stad. Enerzijds kunnen maatregelen genomen worden om verdere temperatuurstijging in de stad te voorkomen en het UHI effect te beperken, anderzijds bestaan er diverse maatregelen om eventuele schade of andere negatieve effecten van hitte te voorkomen of beperken. De verschillende opties richten zich op de oorzaken van het stedelijk hitte-eiland effect en op effecten op de mens die genoemd zijn in hoofdstuk 2.2 en 2.3.

Recentelijk zijn al door meerdere partijen verkenningen uitgevoerd naar klimaatadaptatie maatregelen, al dan niet met een focus op hitte. In paragraaf 4.1 wordt een overzicht gegeven van de belangrijkste studies voor Nederlandse steden. In de daaropvolgende paragrafen (4.2 t/m 4.7) wordt de aanwezige kennis over hittemaatregelen per thema beschreven. In Tabel 4.1 staan de belangrijkste maatregelen die per thema aan bod komen. Tot slot worden in 4.7 voorbeelden genoemd van combinaties van adaptatie- en mitigatiemaatregelen.

Tabel 4.1 Overzicht van thema's en belangrijkste maatregelen in deze kennismontage

Thema (paragraaf)	Maatregelen
Groen (4.2)	Openbare ruimte: bossen, parken en tuinen
	Bomen
	Groene gevels
	Groene daken
Water (4.3)	Oppervlakte water in openbare ruimte
	Verneveling, bijvoorbeeld via fontein
	Natte straten ("Uchimizu")
	Natte daken
Gebouwen (4.4)	Albedo verhoging gevels en daken (wit schilderen)
	Groene gevels en daken
	Passieve ventilatie
	Mechanische ventilatie (airco)
	Verdampingskoeling
	Thermische massa
Stedelijke structuur (4.5)	Bebouwingsstructuur t.b.v. ventilatie en schaduw
	Albedo verhoging gebouw- en grondoppervlak
Gedrag (4.6)	Hitteplan

4.1 Overzicht maatregelverkenningen

Verkenningen naar hitte maatregelen zijn te onderscheiden in algemene kennisinventarisaties over klimaatadaptatie in de stad, inventarisaties specifiek gericht op hitte, verkenningen op lokaal niveau, en internationale studies (zie tabel 4.2).

Tabel 4.2 Overzicht van studies waarin verkenningen naar hittemaatregelen gedaan zijn

Type studie	Titel	Uitgevoerd door	In opdracht van	Korte beschrijving
Klimaatadaptatie in de stad – algemeen	<i>Building the Netherlands Climate Proof, Urban Areas</i>	Deltares en het IHE (2011))	Planbureau voor de Leefomgeving	Deze inventarisatie onderscheidt twee type maatregelen; schade beperken/voorkomen en omgaan met klimaatverandering (beperken van de effecten). Deze typen maatregelen zijn onderverdeeld naar Gebouwen, Infrastructuur en Openbare ruimte. Voor elke maatregel wordt aangegeven of deze betrekking heeft op overstroming (zee en rivieren), wateroverlast (regen en grondwater), droogte en hitte. http://www.deltares.nl/xmlpages/TXP/files?p_file_id=22001
	<i>Definitiestudie "Zicht op klimaatadaptatie in de stad"</i>	Locus (2011)	Ministerie van IenM/ Deltaprogramma	In opdracht van VROM/Deltaprogramma heeft Locus een zogenaamde definitiestudie uitgevoerd naar maatregelen voor klimaatadaptatie die van invloed zijn op gebruik, beleving en toekomstwaarde van stedelijke gebieden en ingrijpen op de configuratie, identiteit en inrichting van het ruimtegebruik. Een 'Quick scan klimaatadaptatie maatregelen in Nederland en Internationaal' uitgevoerd door Nirov in 2010 maakt onderdeel uit van deze studie. Aspecten die in deze inventarisatie worden belicht: Maatregel omschrijving, Type maatregel (o.a. proces, bouw en ontwerp), Concept omschrijving, Fase plancyclus, Schaalniveau, Bestaand/nieuw, Multifunctionaliteit, Hoogte investering (hoog/laag), Initiatiefnemer, Voorbeeld project.
	<i>Ontwerp en beoordelingstool klimaatadaptatie stedenbouw</i>	BuildDesk (in ontwikkeling)	Provincie Gelderland	Methodiek voor een waardering van directe en indirecte relaties die bestaan tussen effecten van klimaatverandering en ruimtelijke, (steden)bouwkundige ingrepen. Het biedt de (steden)bouwkundige een tool om eenvoudig de consequenties te overzien van ontwerpbeslissingen op secundaire effecten van klimaatverandering. Andersom is het mogelijk al bestaande (steden)bouwkundige ontwerpen te beoordelen op klimaatbestendigheid. Klimateffecten zijn onderverdeeld in thema's: veiligheid, gezondheid, comfort, biodiversiteit en profijt. De ruimtelijke ingrepen zijn onderverdeeld in: Stedenbouw, Gebouw, Groen, Water en Bodem.
Hitte in de stad	<i>Hitte in de stad</i>	TU Delft, SBR (Rahola et al. 2009)	Klimaat voor Ruimte	Een inventarisatie van kennis en kennisiaten met betrekking tot hittestress in Nederlandse steden en mitigatie en adaptatie opties. Bestaande uit internationale literatuurstudie, en maatregelen op het gebied van <ul style="list-style-type: none"> - Beleids en gedrags aanpassingen - Gebouwniveau - Stadsniveau Kwalitatieve beschrijving van de maatregelen.

Lokale studies klimaatadaptatie / hitte in de stad	<i>Maatregelen tegen het hitte-eilandeffect en hittestress in Rotterdam</i>	TNO (Harmelen et al. 2011)	Kennis voor Klimaat, hotspot Rotterdam	Uitgebreide inventarisatie van hitte beperkende maatregelen en de effectiviteit ervan voor de stad Rotterdam. Een onderverdeling in type maatregelen is gemaakt naar type bron en aangrijpingspunt van de maatregel: Binnenklimaatregeling en gedrag, Energieconversie, Gebouwgereleerd en Ruimtelijke inrichting. Van de maatregelen zijn de volgende kenmerken weergegeven: <ul style="list-style-type: none"> - Type Maatregel - Karakterisering - No Regret? - Implementatie
	<i>Brede, gebiedsspecifieke verkenning van effecten van klimaatverandering, in samenhang met toekomstscenario's en trendmatige ontwikkelingen.</i>	TNO, Deltares, HKV, Alterra en Geodan (2010)	Kennis voor Klimaat, hotspot Haaglanden	Brede inventarisatie van mogelijke klimaateffecten die zich in de regio Haaglanden kunnen voordoen. De volgende aspecten worden belicht: Compartiment (Stad, Glas of Gras?), Thema, Effect (beschrijving), Oorzaak (klimaatfactor), Schatting urgentie voor Haaglanden, Waarom problematisch?, Kennishiaten, Waar? Optionele maatregelen: eerste idee over maatregelen die kunnen worden genomen om het knelpunt op te heffen
	<i>Proeftuin Den Haag en Arnhem</i>	Bosch en Slabbers (Klemm et al. 2010)	Ministerie van IenM	De toolbox klimaatadaptatie maatregelen is ingedeeld naar schaalniveau: stad en omgeving, stad, wijk, perceel En naar thema: vegetatie, water, bebouwingsvorm, materiaal, overig. per adaptatie maatregel is gegeven: positieve effecten op hitteoverlast, positieve effecten op wateroverlast, beschrijving maatregel.
	<i>Proeftuin klimaat in de Stad, Delft Zuid-Oost</i>	opMAAT (Pötz and Bleuzé, 2010)	Ministerie van IenM	De klimaatkaarten geven per klimaat adaptatiemaatregel aan of deze wel of geen betrekking heeft op: efficiënt gebruik drinkwater, inzichtelijk systeem, klimaatbestendig (vasthouden/bufferen/vertraagd afvoeren), verbeteren microklimaat, energieopwekking/besparing, natuurontwikkeling, reductie afvalwater, CO2 reductie Inclusief beschrijving van effectiviteit maatregel (vaak kwantitatief)
	<i>Klimaatatelier Gelderland</i>	Alterra, Geodan, DHV, KvR, KvK, Stadsregio Arnhem Nijmegen, Regio Achterhoek, Regio de Vallei, Stedendriehoek (Goosen et al. 2010)	Provincie Gelderland	Voortbordurend op het klimaateffectenschetsboek (Provincie_Noord-Holland 2008) is er in klimaatateliers gekeken naar oplossingen. Voor vijf regio's is in kaart gebracht waar in de toekomst knelpunten kunnen optreden, en hoe deze mogelijk kunnen worden opgelost. Er is gekeken naar de relevante klimaateffecten en hoe deze eventueel botsen met ruimtelijke ontwikkelingen en beleidsdoelen. Op basis hiervan is per regio een ontwerpogave geformuleerd. De opgaven zijn samengevat in vier overkoepelende thema's: <ul style="list-style-type: none"> • Hitte in de stad: groen in de wijk en windcorridors • Hitte in de regio: recreatief aanbod, leefomgevingskwaliteit en stad-

				land relaties <ul style="list-style-type: none"> • Wateroverlast: beekherstel en water in de stad • Droogte: landbouw, natuur en ontwikkeling richting multifunctioneel landschap
	<i>Bouwen aan een hittebestendige stad</i>	Gontmij (Barendrecht, 2010)	Provincie Limburg	Een handreiking met maatregelen om de temperatuurgerelateerde effecten van klimaatverandering in steden op te vangen. Beschrijving van de effecten, overzicht van de maatregelen, aanbevelingen toepassing van de maatregelen en de resultaten van een drietal cases waarin de handreiking is toegepast.
Internationale studies	<i>Adapting to climate change impacts - A good practice guide for sustainable communities</i>	Land Use Consultants ism Oxford Brookes University, CAG Consultants en Gardiner & Theobald (2006)	Defra London en de Three Regions Climate Change Group	Een raamwerk om adaptatie maatregelen te kunnen vergelijken. De volgende aspecten worden in de tabel belicht: <ul style="list-style-type: none"> • Besluitvormingscriteria (puntsgewijs) • Adaptatie maatregelen (omschrijving) • Win/win (ja/nee) • Geen/Lage faal kans (ja/nee) • Flexibel (ja/nee) • Hoge mate van robuustheid (ja/nee)
	<i>Handboek Stadsklimaat</i>	Steinrücke, Düttemeyer et al. 2010	Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen	Handleiding stedelijk klimaat: maatregelen en actieplannen voor het aanpassen van steden en grootstedelijk gebied aan de klimaatverandering.

De meeste verkenningen naar klimaat adaptatiemaatregelen zijn algemeen van aard en gaan niet specifiek over hitte. Lokale studies zijn wel vaker gericht op uitsluitend hitte. De inventarisaties geven over het algemeen een structureel overzicht van bekende maatregelen, en op welke schaal en in welke situatie deze toepasbaar zijn. Ook wordt vaak onderscheid gemaakt tussen maatregelen die beschermen tegen een klimaateffect (beperken schade) of het klimaateffect reduceren. In een aantal studies worden indicaties gegeven over kwalitatieve kenmerken of effectiviteit zoals 'no-regret', 'win-win', flexibel, positief of negatief effect op verschillende aspecten. Kwantitatieve effecten ontbreken in de meeste studies. Waar wel kwantitatieve effecten op temperatuur worden gegeven zijn deze zeer locatiespecifiek en dikwijls modelmatig verkregen (Harmelen, Broeke et al. 2011). Deze kwantitatieve gegevens over temperatuurseffect geven wel een indicatie van de orde grootte van effectiviteit van de maatregelen indien elders toegepast. Over de effectiviteit van combinaties van maatregelen is niets bekend.

4.2 Rol van groene ruimten en elementen

Over het algemeen is bekend dat groene gebieden en elementen belangrijk zijn om steden te koelen. Consequente toepassing van groene maatregelen kan een groot effect op de schaal van een hele stad teweeg brengen (bijvoorbeeld Landsberg 1981, Bolund & Hunhammar 1999). Er ontbreekt echter nog veel kennis als het gaat om de kwantitatieve effectiviteit van groen. Onderzoek naar de rol van groen bij klimaatadaptatie wordt onder andere voortgezet in verschillende projecten van Climate Proof Cities, zoals *Green Interventions*, *Urban green for climate-proof cities* (door WUR) en *Strategic urban design and spatial planning for the climate change adaption in metropolitan areas* (door TU Delft).

Vegetatie koelt overdag zijn omgeving actief af door verdamping via de huidmondjes van bladeren - de evapotranspiratie. Op een zonnige dag koelt een boom alleen al door evapotranspiratie met een vermogen van 20-30 kW, een vermogen vergelijkbaar met die van meer dan 10 airco's (Kravčik, Pokorny et al. 2007). Daarnaast verkoelt vegetatie ook passief door beschaduwing van oppervlakken zoals bodem, bestrating en gevels. Ook absorbeert vegetatie - in tegenstelling tot stenige stedelijke oppervlaktes relatief weinig warmte. Deze effecten zijn 's nachts weer anders omdat er dan weinig evapotranspiratie plaats vindt en omdat bepaalde types vegetatie de afstraling van warmte ook afremmen.

Er zijn projecties met het gebruik van groen gemaakt op de toekomstige verwachte warmere klimaatsituaties. Zo is bijvoorbeeld binnen het ASCCUE project in Manchester berekend dat een toename van 10% stedelijk groen temperaturen tot 2080 op of onder de huidige temperaturen kan houden (bij een hoog emissie scenario van de IPCC). Een daling van 10% van het stedelijk groen daarentegen zou resulteren in een verhoogde maximale oppervlaktetemperatuur tot 8,2 °C extra in 2080 (Walsh, Hall et al. 2007, pag 49).

De potentie van groen om de stad te koelen is afhankelijk van de grootte van groene gebieden en elementen. Groene maatregelen kunnen genomen worden op uiteenlopende schaalniveaus van stad naar wijk, straat en particuliere kavel: stedelijke bossen, parken, plantsoenen, stadslandbouw en particuliere tuinen, straatbomen, groene gevels en groene daken.

In de laatste jaren is veel onderzoek verricht naar de invloed van groene gebieden in de stad door middel van computersimulaties. Aan deze methoden zijn echter grote onzekerheden verbonden en de zeggingskracht van deze modellen is dan ook beperkt. In deze kennismontage maken we vooral gebruik van kennis die op feitelijke metingen is gebaseerd. Hierbij gaat het vooral om metingen van effectiviteit van groen op kleinere schaalniveaus, zoals straatbomen, groene gevels en daken, etc.

In de volgende paragrafen onderscheiden we deze kleinere elementen van grotere groene ruimten of stedelijke gebieden. Voor de groene gebieden is het ook belangrijk om het effect binnen het gebied zelf en op zijn omgeving te onderscheiden. Bovendien moet vaak een verschil worden gemaakt tussen de effecten overdag en 's nachts, en moet rekening gehouden worden met het typische gebruik van groene ruimten op deze tijden.

4.2.1 Groene ruimten en effect op lokaal microklimaat

Groene ruimtes in steden zoals stadsbossen, parken en tuinen hebben een duidelijk effect op het microklimaat binnen deze gebieden. Het verschil van luchttemperatuur tussen het park en omliggend bebouwd stedelijk gebied ligt tussen 1 - 6°C. Daarom worden deze gebieden ook wel Park Cool Islands (PCI) genoemd. Binnen een groot park is de luchttemperatuur lager dan binnen kleinere groene gebieden (Upmanis et al., 1998, Chang et al 2007). In een wereldwijde meta-analyse van alle metingen die hiervoor zijn uitgevoerd, komt een gemiddeld temperatuurverschil van 1°C naar voren (Bowler et al 2010). Hierbij is echter niet specifiek naar hete periodes gekeken, wanneer het hitte-eiland effect het sterkst is (Spronken-Smith & Oke 1998). Tijdens hittegolven kan het temperatuurverschil tussen PCI's en de stedelijke omgeving overdag snel oplopen tot 5 °C en meer. Uit een studie in Göteborg blijkt dat een park in een dergelijke situatie een groot koelend effect genereert. Hier is in de zomer een maximaal verschil van 5,9 °C gemeten (Upmanis, Eliasson et al. 1998).

De mate van het PCI effect hangt sterk af van het soort vegetatie. Parken met dichte bomenbeplanting hebben het grootste PCI effect s' middags door de combinatie van evapotranspiratie en schaduw (Spronken-Smith & Oke 1998). Dit is een periode van de dag waar veel mensen parken en tuinen gebruiken en daarom is het belangrijk om voldoende bomen in dit soort groene gebieden te planten. Hierbij moet ook in acht worden genomen dat het thermisch comfort van mensen vooral beïnvloedt wordt door de gemiddelde stralingstemperatuur (die sterk verschilt van de luchttemperatuur), en die is vooral aan blootstelling aan zon en schaduw gerelateerd. Het aanbieden van voldoende boomschaduw is ook van eminent belang.

Groene gebieden die uit veel grasvlakten bestaan kunnen overdag warmer worden dan de gebouwde omgeving, en het verdrogingsrisico is groter dan andere soorten vegetatie. 's Nachts koelen ze echter sneller af dan gebieden met bomen of struiken omdat ze de langgolvlige warmtestraling sneller kwijtraken (Spronken-Smith & Oke 1998).



Wiebke Klemm

4.2.2 *Groene ruimten en effect op omliggend microklimaat*

Groene gebieden hebben ook een verkoelend effect op hun omgeving en kunnen daardoor hittestress in het omliggende bebouwde gebied verminderen. Deze werking blijkt uit verschillende studies, maar helaas is er nog niet voldoende onderzoek verricht om duidelijke kwantitatieve uitspraken te doen.

Het verschil in temperatuur tussen een park en omgeving creëert een atmosferisch drukverschil waardoor een verkoelende luchtstroom van het park naar omliggend bebouwd gebied kan ontstaan. Dit verkoelende effect hangt af van de grootte van een park en in hoeverre luchtstromen omliggende wijken kunnen bereiken.

Uit meetstudies komen uiteenlopende resultaten naar voren. Upmanis et al (1998) konden een verkoelingseffect tot 1100 m afstand in Göteborg meten. In een studie van Slater (2010) konden voor parken in Toronto een afkoeling van 50 tot 100 m afstand van parken aan de lijkzijde ten opzichte van de heersende windrichting vast worden gesteld. De studie van Saito et al (1990) wees op maar 20 m verkoelend effect op de omgeving op de lijkzijde van parken. Hieruit volgt dat het belangrijk is om de ventilatieruimtes voor de koele lucht aan de randen van parken niet dicht te planten met halfhoge struiken en heesters of vol te bouwen.

Het is ook bekend dat de koelte die vanuit een park in de omgeving wordt gedragen, afhankelijk is van de windsnelheid. Bij een typische situatie tijdens een hittegolf met matige of geen wind wordt een 'koeltepluim' in omringend gebied getransporteerd (Oke 1989). Bij hogere windsnelheden wordt de koele lucht direct verwerveld en heeft dan geen effect. Ook de ligging van een groen gebied speelt een rol. Als het in een kuil ligt dan kan koele lucht niet naar de omgeving afvloeien, maar als het ten opzichte van de omgeving hoger ligt, wordt dit juist bevorderd.

Gezien het feit dat parken met verschillende vegetatie ook verschillende temperatuurpatronen hebben, is het belangrijk om deze ook in relatie met de omringende functies te zien. Als er in de omgeving van een park bijvoorbeeld veel overdag gebruikte gebouwen zijn (stadscentra en kantoorlocaties), dan is een koelende werking van het park overdag belangrijker voor de omgeving dan die gedurende de nacht. Op deze locaties is de voorkeur aan "bomenparken" te geven, aangezien dichtbeplante parken overdag een betere koeling bieden dan open parken met veel gras. In een omgeving met veel woningen is het juist 's nachts belangrijk om voor veel afkoeling te zorgen. In deze gebieden kunnen meer open groene vlakten gecombineerd met boomrijke randen beter werken. In een gebied met gemengde functies is het aan te bevelen een park of plantsoen met een goede menging van open grasvlaktes en bomen te voorzien. Als de bomen hoge kruinen hebben en de koele lucht in de stamruimte vrij naar de omgeving kan stromen is hiervan een goed effect te verwachten.

Voor alle groene gebieden en vooral grasvlaktes geldt: als er niet voldoende water ter beschikking is, dan is de evaporatie van de planten beperkt en dan kunnen deze niet veel bijdragen aan verkoeling. Gedurende hitteperiodes is het dus van groot belang om voor voldoende irrigatie te zorgen.

4.2.3 *Effect van bomen, groene gevels en groene daken*

Straatbomen

Lijnen of clusters van bomen in straten hebben effect op de verkoeling van de straatruimtes zelf en op de omringende gevels die ze vaak beschaduwden. De directe effecten op de luchttemperatuur zijn beperkt en liggen tussen 0.5 en 1°C (Lenzholzer, 2010), waarbij clusters van bomen iets meer effect blijken te hebben op de luchttemperatuur dan enkele bomen (Streiling & Matzarakis 2003). Het belangrijkste koelende effect van straatbomen is de beschaduwing, en daarmee de sterke verlaging van de gemiddelde stralingstemperatuur,

die een zeer bepalende factor voor het menselijk thermisch comfort is. Verlaging van stralingstemperatuur in een boomschaduw kan snel de helft zijn; dit effect kent iedereen uit de dagelijkse ervaring. Niet te veronachtzamen voor de volksgezondheid en bescherming voor huidkanker zijn ook de effecten van verlaagde UVB waarden onder bomen (Heisler et al. 2003).



Wiebke Klemm

Het afhouden van instraling op gebouwen kan ook de opwarming van deze gebouwen duidelijk beperken. Een aan de zon blootgesteld oppervlak ontvangt in de volle zomerzon in Midden-Europa ca. 600 W/ m terwijl dit in de schaduw van een boom vaak maar de helft is (Streiling & Matzarakis 2003). Strategische plaatsing van bomen aan de meest bezonde kanten van gebouwen kan de noodzaak voor extra airconditioning in het gebouw verlagen. Een nauwkeurig ontwerp voor iedere specifieke locatie is noodzakelijk, ook om eventuele negatieve effecten van groen te voorkomen zoals een tunneleffect van lanen voor fijnstof of windbarrières door bomen in het algemeen.

Groene gevels

Net als straatbomen geeft de vergroening van gevels in eerste instantie een verkoelend effect op een gebouw door de sterke beschaduwing. Aangezien de bladeren in dit geval bovendien dicht bij de gevel liggen speelt hier ook de koeling door evapotranspiratie een rol. Een ander effect dat heel belangrijk voor de temperatuurhuishouding binnen en buiten het gebouw speelt is het feit dat tussen een groene gevel en de muren van het gebouw een luchtlaag ontstaat die extra isoleert (Tsoumarakis et al 2008). Daardoor kunnen tussen de begroende buitenkant van gebouwen en de binnenruimtes duidelijke temperatuurverschillen ontstaan. Zo werd in een inventarisatie van studies door Kikegawa et al. (2006), het effect van de vergroening van gevels gemeten voor de buitentemperatuur en het effect op de besparing op airconditioner koeling. De vergroening leidt tot een daling van gemiddeld 0.2-1.2 °C van de temperatuur op leefniveau en resulteert in een energiebesparing voor koeling van 4-40% (Kikegawa, Genchi et al. 2006). In een andere studie uit Singapore over de koelende werking van verschillende groene gevels werd een maximaal verschil van 3.3 °C in vergelijking met een controle muur gemeten (Wong, Kwang Tan et al. 2010).

Ook bij groene gevels is de effectiviteit in grote mate afhankelijk van de beschikbaarheid van water. Een test door *the Institute of Physics* toont dit aan voor gevelgroen om een verkoelend

effect te kunnen hebben. De planten van een groene gevel in *Berlin-Adlershof* verdampen aanzienlijk meer wanneer ze een overschot aan water beschikbaar hebben in vergelijking met de situaties wanneer ze te weinig water hebben (Schmidt 2009).

Groene daken

Groene daken kunnen het UHI effect beperken, maar dit is in grote mate afhankelijk van de schaal waarop ze worden aangelegd en het soort groen dak. Intensieve groene daken met een dikke substraatlaag en extra irrigatie zijn het meest effectief. Deze houden het water het beste vast en verkoelen meer door verdamping van water uit het grondsubstraat en door evapotranspiratie van de planten. Groene daken met een dunne substraatlaag (bijvoorbeeld sedumdaken) hebben geen effect of werken slechter dan licht gekleurde dakoppervlaktes (Nyuk Hien et al. 2007) voor de verkoeling van de omgeving.

Uit een studie in New York blijkt dat de oppervlaktetemperaturen van groene daken net zo laag, of lager blijven dan "koele" witte daken. De piektemperatuur van het groene dak was bij de metingen gemiddeld 33 °C koeler dan een zwarte dak (Gaffin, Rosenzweig et al. 2010)

Op leefniveau op straat is het verkoelend effect van groene daken zeer beperkt (Alexandri & Jones 2004). Groene daken kunnen enige invloed op straatniveau hebben indien deze op grote schaal worden aangelegd, waardoor een koelere luchtlaag boven de stad ontstaat die bijdraagt aan een koelere temperatuur op straat.

Omdat alle groene daken een extra laag op het dak vormen dragen ze wel bij aan isolatie en dus de verlaging van de binnentemperatuur direct onder het dak. Ook hier hebben dikkere substraatlagen een sterker effect dan dunne lagen (Nyuk Hien et al 2007). Naast een comfortabeler binnenklimaat hebben groene daken een belangrijke rol in het vasthouden van piekneerslag.

4.3 Rol van water

Water heeft een koelend effect op de luchttemperatuur door verdamping, door absorptie van warmte en eventueel transport van warmte. De verdamping van water kost energie (de latente warmtestroom). Deze energie kan daardoor niet in voelbare warmte en langgolvlige straling worden omgezet. Wanneer water overdag door de zon wordt opgewarmd, absorbeert het water energie door de hoge warmte capaciteit en conductiviteit. In combinatie met eventuele convectie zorgt dit ervoor dat er veel warmte geborgen kan worden zodat de lucht boven het water minder snel opwarmt dan boven de straat. 's Nachts is het effect omgekeerd en geeft het water warmte af, waarbij het water afkoelt. Het transport/afvoeren van energie vindt plaats bij stromend water zoals bij rivieren (warmtetransport uit de stad).

In Nederland gaat warm weer meestal samen met hoge concentraties vocht in de lucht. Daarom kan worden aangenomen dat koelen met water niet effectief is. Dit is echter een misverstand. Verdamping is niet afhankelijk van de absolute hoeveelheid vocht in de lucht, maar van het dampdruk deficit. Dit is het verschil tussen de maximale luchtvochtigheid bij de actuele temperatuur en de actuele luchtvochtigheid. Gedurende de dag stijgt de temperatuur waardoor het dampdruk deficit stijgt. Hierdoor kan de verdamping lang doorgaan. Een belangrijk punt hierbij is de aanvoer van water in warme en droge perioden (Park 2001, pag292).

Uit metingen uitgevoerd in Rotterdam (Deltares, 2011), blijkt dat het effect van oppervlaktewater op de temperatuur vlak boven water groot is (6 °C verschil tussen vlak boven en op 50cm boven het water). Echter, op straatniveau blijft het gemeten effect beperkt

tot de straat waar het water deel van uitmaakt. Mogelijk dat het effect op straatniveau onderschat wordt, doordat niet gemeten is onder zeer hete windstille condities en het feit dat de metingen uitgevoerd zijn op 5m hoogte.

Stromend water heeft een groter koelend effect dan stilstaand. Dit komt enerzijds door de betere menging van het water en daarmee van de warmte en anderzijds door de mogelijkheid van afvoer van warmte. Verneveling van water, zoals door vernevelaars en fontein heeft het grootste koeffect. Dit komt door dat het contact oppervlak van het water met de lucht vergroot wordt en daarmee de verdamping toeneemt. Ook kan de waternevel die neerslaat op de huid extra verkoeling van de huid opleveren door verdamping en de mogelijk lagere temperatuur dan die van de huid. Een studie in Japan toont luchttemperatuur metingen aan de lijzijde op korte afstand van een fontein met een verkoeling van ongeveer 3 °C. Het effect van het watersysteem is voelbaar (van 14:00 tot 15:00 uur) tot 35 m afstand (Nishimura, Nomura et al. 1998).

Japan heeft een traditie, genaamd 'Uchimizu', waarbij steden worden verkoeld door de besprenkeling van straten met water. Deze techniek wordt met de hand uitgevoerd. In Japan loopt nu een test met het inzetten van sneeuwsmeltpijpen voor het nat maken van straten. Deze methode blijkt het meest effectief in de ochtend en namiddag in direct zonlicht. De temperatuur daalt met 2-4 °C door besprenkeling van 1liter/m² per half uur. (Takahashi, Asakura et al. 2010) Deze techniek wordt ook in veel mediterrane gebieden toegepast. In Nederland wordt deze techniek hoofdzakelijk ingezet bij het koelen van (beweegbare) brugdelen ter voorkoming van schade. Deltares zal in 2011 onderzoek doen naar het effect van het nat maken van straten in Nederland.

Vergelijkbaar met het nat maken van straten, zijn natte daken. Dit kan in de vorm van een permanente laag water of met sproei-installaties. De verdamping van deze daken is vergelijkbaar met de verdamping van ander ondiep open water. De afname van de oppervlaktetemperatuur van het dak kan oplopen tot 23 °C (Jain in Tiwari, 1982). Het besproeien van daken door gebruik van sprinklerinstallaties op daken kunnen leiden tot een afname van 25 °C van oppervlaktetemperatuur van het dak (Jain in Tiwari, 1982).

Onderzoek naar de rol van water wordt onder andere voortgezet in verschillende projecten van Climate Proof Cities.

4.4 Aanpassingen op gebouwniveau

Het microklimaat rond gebouwen en in straten wordt bepaald door zonnestraling (direct, diffuus en gereflecteerd), langgolvlige stralingsuitwisseling met de omgeving, luchttemperatuur, relatieve vochtigheid, en windsnelheid. Deze parameters hebben een directe invloed op de warmteoverdracht tussen het gebouw en zijn omgeving, door geleiding, convectie en straling. Verder zijn er in gebouwen interne warmtelasten door de bewoners, verlichting en elektrische apparaten, en zorgen ook gebouwventilatie en infiltratie door uitwisseling van warmte en massa tussen gebouw en omgeving.

Tot nog toe had het merendeel van het onderzoek over klimaatverandering en gebouwen betrekking op acties en maatregelen voor mitigatie van klimaatverandering, door gebouwen energiezuiniger te maken en de productie van broeikasgassen te verminderen. Klimaatadaptatie heeft veel minder aandacht gekregen. In de voorbije jaren is onderzoek gestart om de potentiële gevolgen van klimaatverandering op energiegebruik en thermisch comfort te bestuderen, alsook maatregelen om met deze wijzigingen om te gaan (e.g. Lowe 2003, Frank 2005, Gaterell en McEvoy M, 2005, Hacker et al. 2005, de Wilde et al. 2008).

4.4.1 Oververhitting en gebouwkoeling

Een van de belangrijkste gevolgen van klimaatverandering op gebouwniveau is de toename van oververhitting in gebouwen. Door de toename van de buitentemperatuur neemt het koelpotentieel van comfortventilatie (de traditionele methode om gebouwen te koelen door natuurlijke ventilatie met de buitenlucht) af (Hacker en Holmes 2007). Hacker en Holmes toonden aan dat gebouwen in Londen die gebruik maken van comfortventilatie in toenemende mate gevoeliger worden voor ernstige oververhitting, en dat ofwel geavanceerde passieve of mechanische koeling nodig zal zijn.

Temperatuurstijgingen in de buitenomgeving als door klimaatverandering en het hitte-eiland effect zullen zich bij gebouwen zonder airconditioning ("free-running" gebouwen), vertalen naar temperatuurstijgingen in de binnenomgeving. De relatie tussen buiten- en binnentemperaturen hangt af van vele factoren, zoals de omringende gebouwen, beschaduwing, gebouwgeometrie, de eigenschappen van de bouwdelen (isolatiekwaliteit, thermische capaciteit en albedowaarde van daken en gevels, de isolatiekwaliteit en zonnetoetreding van ramen), het gebruikersgedrag, enz.

Eén van de relatief weinig bestaande studies over deze vertaling bij hittegolven is die van Coley en Kershaw (2010), die aantoont dat de relatie tussen buiten- en binnentemperatuur bij benadering lineair is. Deze relatie is afhankelijk van de geometrische en fysische karakteristieken van het gebouw en wordt beschreven door de zogenaamde "climate change amplification factor (CCA-factor)" (klimaatveranderingversterkingsfactor). Voor de gebouwen bestudeerd door Coley en Kershaw (2010) varieert deze factor tussen ongeveer 0.8 en 1.6. Een factor 0.8 geeft aan dat het gebouw het effect van de temperatuurstoename in de buitenomgeving reduceert, terwijl een factor 1.6 aangeeft dat de temperatuurstoename in de binnenomgeving 1.6 keer groter is dan in de buitenomgeving. Met andere woorden, een temperatuurstoename met 4°C buiten geeft een toename met 6.4°C binnen. Voor Nederlandse gebouwtypes is, voor zover bekend, geen informatie over CCA-factoren beschikbaar. Deze factoren moeten bepaald worden voor de verschillende types gebouwen in het Nederlandse gebouwenbestand, waarbij een onderscheid wordt gemaakt tussen enerzijds de geometrische en fysische (thermische) karakteristieken van gebouwen en anderzijds het gebouwgebruik (residentiële gebouwen, kantoorgebouwen, ziekenhuizen, verpleegtehuizen, schoolgebouwen, enz.). Het bepalen van deze factoren voor het Nederlandse gebouwenbestand is één van de hoofddoelstellingen binnen het programma Climate Proof Cities. Op basis van deze factoren zal er 'kwetsbaarheidssclassificatie' opgemaakt worden, die aangeeft welke gebouwen het eerst in aanmerking moeten komen voor het implementeren van adaptatiemaatregelen zoals hogere albedowaardes, nachtventilatiestrategieën, groene gevels/daken en/of verdampingskoeling. De evaluatie van die maatregelen voor verschillende types gebouwen is ook een belangrijk onderdeel van het programma Climate Proof Cities.

Hacker en Holmes (2007) vermelden dat voor vele bestaande gebouwen, waar de passieve adaptatiemogelijkheden beperkt zijn door de geometrie, vorm en omgevingsfactoren, mechanische koeling waarschijnlijk een belangrijk deel van de klimaatadaptatie zal worden. Dit levert meer CO₂-uitstoot, maar mogelijk zal klimaatmitigatie moeten wijken voor klimaatadaptatie, zeker wanneer thermisch comfort, productiviteit en gezondheid als argumenten gehanteerd worden. Het is dan ook belangrijk om bij nieuwe gebouwen en bij gebouwrenovatie veel meer dan vandaag aandacht te besteden aan klimaatadaptatie en passieve beheersing van het binnenklimaat (Hacker en Holmes 2007, Holmes and Hacker 2007, Lomas and Ji 2009). Uiteraard moet dit type acties deel uitmaken van een groter, schaaloverschrijdende visie, waarin ook de stedelijke omgeving klimaatadaptatiever wordt uitgerust, om het urban heat island effect te beperken (Santamouris 2006, Gartland 2008).

4.4.2 Albedo van daken en gevels

Eén van de belangrijkste gebouwparameters die ingezet kan worden om oververhitting te beperken of de energievraag voor koeling te reduceren is de albedowaarde van het dakoppervlak en de gevels. De albedowaarde is een getal tussen 0 en 1 dat aangeeft welke fractie van de invallende kortgolvlige zonnestraling door het oppervlak gereflecteerd wordt; lichte oppervlakken hebben een hoge en donkere oppervlakken een lage albedowaarde. Het verhogen van de albedowaarde van opake gebouwschildelen (d.w.z. daken en gevels) leidt tot een verminderde netto zonnestraling aan het oppervlak. Onderzoek heeft aangetoond dat lichtgekleurde dakmaterialen de zonbelasting aanzienlijk kan reduceren.



Het merendeel van het onderzoek naar adaptatiemaatregelen voor hittestress in gebouwen betreft de albedowaarde van daken. De reductie van het benodigde koelvermogen in het gebouw die behaald kan worden door het verhogen van de albedowaarde van daken, kan oplopen tot 60%. Deze waarde is echter sterk afhankelijk van onder meer de isolatiekwaliteit van de dakconstructie en van andere gebouwparameters zoals de convectieve warmteovergangscoefficiënt (bijv. Blocken et al. 2009), die in belangrijke mate wordt bepaald door de dakvorm (Givoni 1976, Reagan en Acklam 1979, Griggs en Shipp 1988, Taha et al. 1988, Anderson 1989, Parker en Barkaszi 1997). Verder is in enkele gevallen ook de invloed van vegetatie op het binnenklimaat onderzocht. Het gaat hier voornamelijk over de effecten van beschaduwing. Akbari et al. (1997) vonden bij metingen in twee huizen in Californië seizoensgemiddelde energiebesparing voor koeling van 30%. Het is echter moeilijk om algemene besluiten te trekken uit metingen die zijn uitgevoerd voor heel specifieke situaties.

In principe moet er een onderscheid worden gemaakt tussen de directe en de indirecte effecten van verhoogde albedowaarden. Het directe effect van het verhogen van de albedowaarde, maar ook van het toevoegen van vegetatie in de omgeving, is het reduceren van de zonbelasting en dus de oppervlaktetemperatuur. Voor dak- en geveloppervlakken leidt dit tot een daling van de warmtebelasting en een reductie van het benodigde energiegebruik voor koeling (of tot een reductie van de binnentemperatuur). Het verhogen van de albedowaarde is een effectievere en goedkopere maatregel dan het toevoegen van vegetatie (Rosenfeld et al. 1995). De effecten treden ook onmiddellijk op, terwijl het bij bomen meerdere decennia kan duren voordat deze voldoende schaduwwerking geven (Akbari et al. 1989).

De indirecte effecten hebben te maken met het verminderen van de koellast door grootschalig gebruik van lage-albedodaken: door grootschalige albedo verlaging vindt er vermindering van het UHI effect plaats en hoeft er dus minder gekoeld te worden (Taha et al. 1988, Bretz et al. 1992, Rosenfeld et al. 1995). Studies voor de VS suggereren dat door een combinatie van indirecte (op wijkniveau) en directe (op gebouwniveau) effecten van een albedoverhoging, het energiegebruik voor koeling met 30% verminderd zou kunnen worden (Parker en Barkaszi 1997). Specifieke metingen in Florida in negen woningen in de periode

1991-1994, in de situatie voor aanpassing en na aanpassing toonden een gemiddelde reductie van 19%, met een minimum van 2% en een maximum van 43% (Parker en Barkaszi 1997). Andere metingen en BES-simulaties tonen een gelijkaardige spreiding, maar eveneens de potentieel te behalen winst bij albedoverhoging (Bansal et al. 1992, Reagan en Acklam 1979, Akbari and Taha 1992, Akbari et al. 1992, 1993, Rosenfeld et al. 1995, Simpson and McPherson 1997, Suehrcke et al. 2008). Omgekeerd leidt de reductie van albedowaarden en het verwijderen van vegetatie (minder evapotranspiratie) tot een versterking van het UHI (Akbari et al. 1992).

4.4.3 *Thermische massa*

In de literatuur is relatief weinig informatie terug te vinden over het effect van thermische massa op de binnentemperatuur en de energievraag voor koeling. Thermische massa heeft een dempend effect op temperatuurfluctuaties, en blijkt minder belangrijk dan albedo (Suerhcke et al. 2008).

4.4.4 *Simulatiemodellen*

De analyse van de impact van klimaatverandering op het thermisch microklimaat rond gebouwen, in straten en op het binnenklimaat in gebouwen gebeurt door numerieke simulatie met drie verschillende types van warmtetransportmodellen: Computational Fluid Dynamics (CFD), Building Energy Simulation (BES) en Building Envelope Heat-Air-Moisture transfer modellen (BE-HAM). Elk van deze modellen laat toe om specifieke aspecten van het (hygro-)thermisch gedrag van gebouwen en hun omgeving te simuleren.

Bij CFD wordt een vereenvoudigde vorm van de stromingsvergelijkingen opgelost. CFD wordt onder meer toegepast voor het berekenen van de windstroming in straten en rond gebouwen (bvb. Murakami 1993, Stathopoulos and Baskaran 1996, Franke et al. 2007, Tominaga et al. 2008, Blocken and Persoon 2009), voor de simulatie van convectieve warmteoverdracht (bvb. Blocken et al. 2009, Defraeye et al. 2010) en voor natuurlijke ventilatie van gebouwen (bvb. Jiang et al. 2003, van Hooff en Blocken 2010, Norton et al. 2010). Voor een literatuuroverzicht van CFD-toepassingen op de schaal "gebouw en straat" wordt verwezen naar (Blocken et al. 2011) en (Erell et al. 2011).

Bij BES worden warmtebalansen opgelost voor rekenpunten die typisch in elke gebouwzone en in elk wanddeel worden geplaatst (e.g. Malkawi en Augenbroe 2004, Beausoleil-Morrison and Bernier 2005, Hensen and Lamberts 2011). BES gebruikt gebouweigenschappen in combinatie met meteorologische data als invoer en wordt typisch ingezet om het thermisch gedrag van gebouwen te analyseren, met name op thermisch comfort en het energiegebruik voor verwarming, koeling en ventilatie. BES wordt steeds meer toegepast voor de analyse van binnentemperaturen en voor het bepalen van het energiegebruik voor verwarming en koeling (Akbari et al. 1999, Watkins et al. 2002, Kolokotroni et al. 2007, Hacker en Holmes 2007, de Wilde et al. 2008, Ihara et al. 2008, Lu et al. 2008). Coley and Kershaw (2010) gebruikten BES om aan te tonen dat er een lineair verband bestaat tussen de toename van de buitentemperatuur door klimaatverandering en de toename van de binnentemperatuur. De proportionaliteitsfactor is afhankelijk van de geometrische en fysische karakteristieken van het gebouw, en wordt de "climate change amplification coefficient" genoemd.

Bij BE-HAM-modellen van het meest geavanceerde type wordt het gecombineerde warmte-, lucht- en vochttransport in gebouwdelen met poreuze en niet-poreuze materialen berekend (e.g. Künzle 1994, Grunewald 1997, Künzle et al. 2004, Cornick et al. 2003, Maref et al. 2004, Grunewald and Nicolai 2006, Janssen et al. 2007, Blocken et al. 2007). Deze modellen leveren informatie over het warmte- en vochtgedrag en de duurzaamheid van bouwmaterialen en bouwdelen, en over de overdracht van warmte tussen de buiten- en binnenomgeving van gebouwen.

4.5 Stedelijke structuur en samenstelling

De omvang, bebouwingsdichtheid, samenstelling en geometrie van een stad heeft invloed op de ontwikkeling van het UHI effect. Hoe groter de stad, hoe groter het temperatuurverschil tussen stedelijk en landelijk gebied (Oke 1973). Binnen de stad verschilt de temperatuur tussen dichtbebouwde versteende gebieden en groene of open stadsdelen met een lage bebouwingsdichtheid. In deze paragraaf worden de effecten van bebouwingsstructuur op hitte (beleving) beschreven, en in welke mate albedo-aanpassingen op groter schaalniveau dan individuele gebouwen (paragraaf 4.4) invloed hebben op hitte in de stad.



Wiebke Klemm

4.5.1 *Bebouwingsstructuur*

Wanneer bij de plaatsing van gebouwen in hun omgeving rekening wordt gehouden met koeling, zijn zowel zon en wind oriëntatie van belang. Aangezien Nederland op relatief hoge breedtegraad ligt, hebben zon en wind andere parameters in de zomer en winter dan in landen dicht bij de evenaar. De belangrijkste windrichting in de zomer is die uit het zuidwesten, maar in de winter komt de koudste wind uit het noordoosten. Een belangrijk gegeven bij hittegolf situaties is dat er dan meestal een oosten wind is en een hele lage windsnelheid. Het oriënteren van straten op de wind voor ventilatie in de zomer kan resulteren in een ongewenste situatie in de winter.

In het Future Cities project in Arnhem⁶ wordt gekeken hoe gebruik kan worden gemaakt van de koele dalwinden die in de avond optreden rond en in de stad. Koele lucht uit de bossen op de hoger gelegen Veluwe stroomt via de dalen en de parken de stad in, deze luchtstromen zijn echter zwak en snel te verstoren. Een van de adaptatiemaatregelen die voor Arnhem wordt bekeken is het behouden en versterken van het open karakter van de dalen naar het stadscentrum, zodat de koele luchtstromen de stad kunnen bereiken.

⁶ http://www.future-cities.eu/uploads/media/Future_Cities_Analyse_hitte_eilandeffect_op_Arnhem__16.pdf

Een andere manier om ventilatie te verbeteren is een mix van de lucht te genereren van de onderlaag (lucht binnen het straatprofiel, pleinen, parken, etc.) met de lucht uit de grenslaag (luchtlaag rond de aarde boven het aardoppervlak, steden en bossen). Een manier om deze mix te verkrijgen is het aanpassen van het straatprofiel. Met een hoogte/breedte (H/B) verhouding van ongeveer 0,5 of lager wordt de beste ventilatie verkregen. Bij een H/B van meer dan 2 is er bijna geen mix van de onder- en grenslaag (Xiaomin, Zhen et al. 2006; Esch, Bruin-Hordijk et al. 2007). De mix van de twee lagen wordt ook bevorderd door schuine daken. Deze genereren affectieve natuurlijke wind ventilatie bij de openingen van een straatprofiel. Dit is een veel effectiever middel voor het verbeteren van natuurlijke ventilatie dan een toenemende afstand tussen gebouwen (Rafailidis 1997).

Oververhitting door zonnestraling in de zomer kan worden tegengegaan met hoge H/B verhoudingen (Futcher 2008). Maar dit betekent ook minder luchtstroming, meer zonne-reflecties en een lagere terugstralingsfactor naar de hemelkoepel, waardoor de warmte wordt vastgehouden. In landen waar de zon in de winter laag staat leidt een hoge H/B verhouding tot oncomfortabele situaties. Individuele gebouwen kunnen worden ontworpen om zonne-energie te oogsten en elkaar niet te overschaduwen (Keeffe and Martin 2007). Op wijk- en stadsniveau kan de stedelijke structuur worden gericht op veel licht toetreding, veel ventilatie en seizoensgerichte beschaduwing van gebouwen en verhard oppervlak. Opties hiervoor zijn overstekken gedimensioneerd op 'hoog'staande zon op het zuiden en westen of technologische systemen die kunnen worden aangepast aan seizoensinvloeden. Hier kan ook worden gedacht aan 'slimme' zonwering waarbij het schaduwelement ook zonne-energie oplevert. Een goed alternatief voor zonwering zijn bladverliezende bomen waarvan de bladeren schaduw geven in de zomer en de zon doorlaten in de winter. Bijkomend voordeel is de bescherming die bomen bieden tegen de wind waardoor minder energie nodig is voor verwarming in de winter.

4.5.2 Albedo op stadsniveau

Lage albedo (reflectie) en langzame afkoeling van veel gebruikte materialen in verstedelijkte gebieden zorgen voor de accumulatie en het vasthouden van warmte, en veroorzaken mede het UHI effect (paragraaf 2.2). Door lichte gevels en daken en met behulp van licht zand in bestratingsmaterialen, kan de albedo van grote delen van de stad worden verhoogd. Zoals in paragraaf 4.4 al werd genoemd heeft albedo verhoging niet alleen (directe) invloed op het binnenklimaat en energiegebruik van gebouwen, maar ook een (indirecte) invloed op de temperatuur op groter (stads)schaalniveau.

In een studie van de universiteit van Minnesota is de temperatuur van het grondoppervlak voor verschillende soorten landgebruik gesimuleerd. Voor het gemiddelde van alle weersomstandigheden (nat en droog), tonen asfalt en beton duidelijk de hoogste gemiddelde temperatuur in elke maand. Asfalt geeft het hoogste gemiddelde dagelijkse maximum en de hoogste gemiddelde dagelijkse verschil in oppervlaktetemperatuur. Kort en lang gras, maïs, sojabonen en bos geven zeer vergelijkbare oppervlaktetemperaturen, ongeveer 10 °C lager dan de gemiddelde temperatuur van bestrating en 20 °C lager in de gemiddelde dagelijkse maximum temperatuur. Kale grond geeft oppervlaktetemperaturen die liggen tussen die van bestrating en met planten bedekte oppervlakken. Dagelijkse minimumtemperaturen van de verschillende vormen van grondgebruik waren vrij gelijkwaardig, met slechts 3-6 °C verschil tussen de hoogste (beton) en de laagste (hoge gras weide) temperatuur (Herb, Janke et al. 2008).

Resultaten van een toenemende albedo werden berekend in een simulatiemodel voor Sacramento, Californië. Door het vergroten van de stadsbrede albedo van 25 naar 40% kan een luchttemperatuur daling van 1-4 °C worden bereikt. Verhoging van het gebouw albedo van 9 naar 70% kan de jaarlijkse vraag naar koeling met 19% verminderen. Simulaties

toonden een afname van 62% in de energie vraag voor koeling wanneer zowel de stadsbrede albedo en de albedo van gebouwen worden verhoogd (Taha, Akbari et al. 1988).

De temperatuur en seizoensgebonden energiebalans van groene, witte en zwarte daken werd geanalyseerd voor het daklandschap van New York (Gaffin, Rosenzweig et al. 2010). Het zwarte dak bereikte een piek temperatuur van 80 °C. Tijdens het zomerseizoen was de piek temperatuur van het witte dak gemiddeld 17 °C koeler dan de zwarte. De piek temperatuur van het groene(vegetatie) dak was gemiddeld 33 °C koeler dan de zwarte. Tijdens de winter benaderde het zwarte dak temperaturen onder -20 °C. Het groene dak daarentegen, behoud in de winter een 'comfortabele' temperatuur boven het vriespunt omdat het niet rechtstreeks blootgesteld wordt aan de atmosfeer. Het witte dak vertoont een kleiner verschil en geen extra warmte verlies in de winter ten opzichte van het zwarte dak. Een wit of vegetatie dak zal vanwege de geringere temperatuursverschillen gedurende de seizoenen langer meegaan dan het zwarte dak.

Een onderzoeksproject in Singapore was gericht op het verschil in temperatuur op gevels als gevolg van donkere of lichte kleuren en gevel materiaal. Er werd een maximum temperatuur verschil van 8 en 10 °C aan de buitenmuur gemeten tussen 13:00 en 16:00 uur. Ook werd het gevelmateriaal in verhouding tot de afkoeling bestudeerd in Singapore. Drie soorten werden getest, een muur van bakstenen, beton en holle bouwstenen. De bakstenen muur had de langste afkoel tijd, gevolgd door de betonnen muur. De muur van holle bouwstenen was het snelst afgekoeld (Wong, Lee et al. 2007).

Het traditionele bouw materiaal in Nederland, zowel voor gebouwen als bestrating, zijn rode bakstenen. Door de donkere kleur en grote warmte opslag capaciteit wordt er in het materiaal veel warmte geaccumuleerd. Na zonsondergang geven de bakstenen via langgolvlige afstraling nog lang warmte af aan de lucht. Bij het bouwen met donkere kleuren of een warmte accumulerend materiaal, kan groen (bomen of een groene gevel) deze oppervlakken beschaduwden of warmte compenseren door middel van evapotranspiratie. Lichte oppervlakken vereisen een veel groter gebied dan groene daken om een vergelijkbare koeling te bereiken (Rosenzweig 2006).

4.6 Gedrag en aanpassingsvermogen

Naast aanpassingen van de stedelijke omgeving op verschillende schaalniveaus zoals ik de vorige paragrafen beschreven, kunnen mensen ook zelf veel doen om hittestress tegen te gaan. Het zijn meestal eenvoudige maar doeltreffende gedragsmaatregelen, waar relatief weinig wetenschappelijke kennis beschikbaar over is.

Sinds de hittegolf van 2003 hebben vele landen in West-Europa maatregelen geïmplementeerd voor de volksgezondheid, meestal in de vorm van "Heat Health Warning Systems" (HHWS) (Kovats en Hajat 2008). De relatief snelle ontwikkeling van deze systemen is een belangrijk succes in de strijd tegen hitte en zijn effecten. Er is echter relatief weinig kennis over wat nu de meest effectieve maatregelen zijn om mortaliteit door hitte te vermijden. Huidige kennis over de invloed van hitte op het menselijk systeem en oorzaken voor ziekte en sterfte is beschreven in hoofdstuk 2.3.2 *Hitte en gezondheid*.

In Nederland is in 2007 een nationaal hitteplan⁷ opgesteld door het Ministerie van Volksgezondheid, Welzijn en Sport (VWS 2007). Hierin worden een aantal acties aanbevolen tijdens warme periodes. Deze acties zijn samengevat op de zogenaamde

⁷ www.rivm.nl/milieuportal/images/hitteplan_tcm19-149433.pdf

hittesticker die gemaakt is voor organisaties en personen die omgaan met kwetsbare mensen (Figuur 4.1). In 2011 zal het nationaal hitteplan een update ondergaan.

Wat u moet doen als het warm wordt



Drink voldoende

Drink 2 liter vocht per dag, ook als u geen dorst heeft. Drink bij voorkeur water. Vermijd alcohol.



Vermijd inspanning

Vermijd inspanning vooral tussen 12.00 en 16.00 uur, de warmste uren van de dag.



Blijf uit de hitte

Blijf binnen of in ieder geval in de schaduw tussen 12.00 en 16.00 uur, de warmste uren van de dag. Draag een hoed, zonnebril en lichte kleding.



Zorg voor koelte

Leg af en toe een koele handdoek in uw nek, neem een koele douche of bad. Laat de zonwering zakken of doe de gordijnen dicht van kamers die veel zon krijgen. Doe ook de ramen dicht als het buiten warmer is dan binnen (overdag) en zet ze open als het buiten koeler is ('s nachts en vroeg in de morgen).



Zorg voor elkaar

Steek een helpende hand toe als er in uw omgeving ouderen of zieken zijn, die hulp nodig hebben om deze adviezen op te volgen.



Vragen?

Overleg met uw huisarts als u vragen heeft over uw gezondheid of met uw apotheek als u medicijnen gebruikt. Voor alle andere vragen kunt u terecht bij de GGD in uw regio. Weet u het nummer niet, bel dan met Postbus 51 (0800 – 8051).

Figuur 4.1 Praktische tips op de Hittesticker (Nationaal Hitteplan 2007)

Een mogelijkheid om kwetsbare groepen beschermen is het inrichten van koele plekken in de stad. Met name voor de huisvesting van deze kwetsbare groepen, zoals ouderen, is het van belang dat temperaturen 's nachts niet te hoog zijn. Bijna 20% van de ouderen geeft aan ernstige hinder en slaapverstoring te ervaren door de hitte. Dit percentage ligt tijdens warme dagen nog aanzienlijk hoger. De meest voorkomende warmteklachten zijn vermoeidheid, slecht slapen en benauwdheid. Modellen geven aan dat de mate van hinder en slaapverstoring samenhangt met de fysieke en psychosociale gezondheid van de ouderen. Mensen met meer hinder en/of slaapverstoring nemen meer maatregelen om hittegerelateerde problemen tegen te gaan dan mensen met minder hinder en slaapverstoring. Daarnaast zijn bij de gebouwkenmerken vooral de zonligging van de slaapkamer, ervaren comfort, en tevredenheid over ventilatiemogelijkheden van belang (Daalen and Riet 2010).

4.7 Combinaties adaptatie – mitigatie

In deze paragraaf komen maatregelen aan bod die zowel vermindering van hoge temperaturen in de stad (of de effecten daarvan) kunnen bieden, als kunnen bijdragen aan mitigatie van klimaatverandering. Bijdrage aan mitigatie bestaat hierbij voornamelijk uit de

vermindering van het verbruik van fossiele brandstoffen, door het vermijden van actieve, energieverbruikende koelmethodes.

Hitte maatregelen waarbij synergie tussen adaptatie en mitigatie bestaat kunnen worden ingedeeld in een aantal categorieën:

- Verkoeling buiten- en binnenklimaat. Gebouwen in steden worden opgewarmd door de directe blootstelling aan de zon en het gebrek aan verkoelende wind en vegetatie. Deze gebouwen stralen vooral in de avond en nacht deze warmte weer uit. Een aantal maatregelen op gebouwniveau gaan deze opwarming tegen en bieden daarmee verkoeling op lokale schaal en binnenshuis. Hierdoor wordt er energie bespaard op airconditioning, waardoor minder elektriciteitsopwekking hoeft plaats te vinden.
- Verkoeling binnenklimaat. Er bestaan maatregelen die warmte binnenshuis, die ontstaat door instraling van de zon, verminderen. Hierdoor hoeft er minder actief gekoeld te worden, met uiteindelijk een besparing op verbranding van fossiele brandstoffen. Deze en vorige type maatregelen hebben beide koeling als doel en mitigatie als neveneffect.
- Verlagen antropogene warmte. Antropogene warmte (veroorzaakt door menselijke activiteiten) heeft op stadsniveau een geringe bijdrage aan de temperatuurverhoging (zie hoofdstuk 1). De gemene deler in alle maatregelen binnen de antropogene categorie is het voorkómen van verbranding van fossiele brandstoffen t.b.v. energieopwekking. Daarmee zijn het dus mitigatiemaatregelen met een adaptief bijeffect.

Hier besproken maatregelen zijn alleen kwantitatief onderzocht op hun effect op hitte en niet op mitigatie. Dat er sprake is van mitigatie is beoordeeld op basis van de eigenschappen van de maatregel. In Tabel 4.3 worden een aantal maatregelen en hun effect op temperatuur en/of energieconsumptie uiteengezet.

Tabel 4.3 Maatregelen met adaptatie-mitigatie synergie

Categorie	Maatregel	Omschrijving en schaal van effecten	Kwantitatief effect
Verkoeling buiten- en binnenklimaat	Verdampingskoeling	Verdampingskoeling maakt gebruik van de natuurlijke verdamping van water waarbij warmte uit de omgeving wordt opgenomen en de omgeving dus koeler wordt. Gemeenschappelijk in alle methodes is dat gebouwoppervlakken vochtig worden gehouden waardoor ze veel minder opwarmen. Buiten- en binnenmilieu (binnen via het indirecte effect van verminderde warmte geleiding) worden beide gekoeld. Het binnenmilieu profiteert hiervan – in mitigatieopzicht – doordat er geen airco hoeft te worden gebruikt. Referenties: Carrasco <i>et al.</i> (1987)	Ca. 10 tot 15 °C reductie van oppervlaktetemperatuur. Binnen tot ca. 5 °C (op het heetst van de dag) aan indirecte verkoeling.
	Intensieve groene daken	Een intensief groen dak onderscheidt zich van extensieve groene daken doordat er qua omvang grotere en qua verscheidenheid meer diverse vegetatie op geplaatst is. De groeiende bomen en struiken zorgen voor verkoeling en dus een besparing vanwege minder aircogebruik. De isolerende werking van het dak bespaart, voornamelijk in de zomer, op koeling van het gebouw. Het is echter nog niet duidelijk of dit effect in de winter teniet wordt gedaan doordat lage temperaturen het isolerende effect verstoren. Referenties: Wong <i>et al.</i> (2003) en Niachou <i>et al.</i> (2001)	Oppervlaktetemperatuur - tijdens hittepieken - ca. 20 °C lager dan conventionele daken. Binnenshuis ca. 5 °C lager. Ca. 25% jaarlijkse besparing op energie voor koelen.
	Extensieve groene daken	Extensieve groene daken zijn daken met vegetatie die een statisch karakter hebben. Ze hebben een isolerende werking en kunnen actieve koeling bieden doordat de vegetatie vocht verdampt, waardoor voelbare warmte in latente warmte wordt omgezet. Voorwaarde hierbij is dat – in de zomer – het groene dak vochtig wordt gehouden. Het is echter – idem intensieve groene daken – nog niet duidelijk of dit effect in de winter teniet wordt gedaan doordat lage temperaturen het isolerende effect	Ca 2 tot 5 °C in stadscentra mits >10% van alle daken is uitgerust met groen dak Tot 5 °C koeler binnenshuis tijdens het heetst van de dag.

		verstoren. Referenties: Wong <i>et al.</i> (2003) en Niachou <i>et al.</i> (2001), Kolb <i>et al.</i> (1986), Onmura <i>et al.</i> (2001), Liu <i>et al.</i> (2005), Bass <i>et al.</i> (2002), Gill <i>et al.</i> (2007)	
Verkoeling binnenklimaat	Isolatie	Isolatie zorgt ervoor dat er minder warmte de woning ontsnapt, maar tevens dat er minder warmte naar binnen gaat. In de zomer hebben goed geïsoleerde gebouwen dus minder inkomende warmte hetgeen een besparing op de koelingsbehoefte oplevert. Vergroting van de albedo van de buitenmuren en dak, en vergroten van de thermische massa van gebouwen kunnen eveneens bijdragen tot een koeler binnenmilieu en daarmee de noodzak van actieve koeling verminderen.	Ca. 2 tot 3 °C (schatting).
Antropogeen	Zonneboiler	Een zonneboiler 'vangt' de warmte uit zonnestraling op in buiten geplaatste collectoren en verwarmt hiermee drinkwater voor huishoudelijk gebruik. Mitigatie vindt plaats door vermeden verbranding van gas. Vermindering van het hitte-eiland effect vindt plaats doordat de warmte-uitstoot niet meer door verbranding plaatsvindt (het effect is niet bepaald). Referentie: Van Harmelen <i>et al.</i> , 2010	Ca. 40% daling in warmteflux en energiegebruik.
	Verkeer	Een efficiëntere indeling van verkeer, promotie van zuinige auto's (met o.a. start-/stopsysteem), bevorderen van carpoolen en openbaar vervoer kunnen het brandstofverbruik en de verkeersdichtheid verminderen. Vanwege de dynamiek van het verkeer kunnen effecten slechts grof worden geschat. Deze maatregelen voorkomen verbranding (mitigatie), die direct gerelateerd is aan uitstoot van warmte. Het effect is echter grotendeels rondom wegen merkbaar en minder op leefniveau. Referentie: Van Harmelen <i>et al.</i> , 2010	Ca. 20% minder warmteproductie

Referenties

- Akbari H, Bretz SE, Hanford JW, Kurn DM, Fishman BL, Taha H. 1993. Monitoring peak power and cooling energy savings of shade trees and white surfaces in the Sacramento Municipal Utility District (SMUD) service area: data analysis, simulations, and results, Rep. LBL-3441L Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA.
- Akbari H, Bretz S, Hanford J, Rosenfeld A, Sailor D, Taha H, Bos W. 1992. Monitoring peak power and cooling energy savings of shade trees and white surfaces in the Sacramento Municipal Utility District (SMUD) Service Area: Project Design and Preliminary Results, LBL-33342-UC-000, Report for the California Institute for Energy Efficiency and Sacramento Municipal Utility District, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA.
- Akbari H, Taha H. 1992. The impact of trees and white surfaces on residential heating and cooling energy use in four Canadian cities. *Energy* 17(2): p. 141-149.
- Akbari H, Rosenfeld A, Taha H. 1989. Recent developments in heat island studies, technical and policy, Proc. Workshop Urban Heat Islands, Berkeley, CA, Feb. 23-24, Alexandri, E., and Jones, P. (2004). "The Thermal Effects of Green Roofs and Green Facades on an Urban Canyon" PLEA 2004. City: Eindhoven.
- Anderson RW. 1989. Radiation control coatings: an underutilized energy conservation technology for buildings, *ASHRAE Transactions* 95: 682.
- Bansal NK, Garg SN, Kothari S. 1992. Effect of exterior surface colour on the thermal performance of buildings, *Building and Environment* 27(1), 31-37.
- Bass, B.; Krayenhoff, S.; Martilli, A.; Stull, R. – Mitigating the Urban Heat Island with Green Roof Infrastructure, 2002. Urban Heat Island Summit, Toronto.
- Blocken B, Stathopoulos T, Carmeliet J, Hensen JLM, 2011. Application of CFD in building performance simulation for the outdoor environment: an overview. *Journal of Building Performance Simulation*. In press. (doi: 10.1080/19401493.2010.513740)

- Blocken B, Defraeye T, Derome D, Carmeliet J. 2009. High-resolution CFD simulations of forced convective heat transfer coefficients at the facade of a low-rise building. *Building and Environment* 44(12): 2396-2412.
- Blocken B, Persoon J. 2009. Pedestrian wind comfort around a large football stadium in an urban environment: CFD simulation, validation and application of the new Dutch wind nuisance standard. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 97(5-6): 255-270.
- Bolund, P., and Hunhammar, S. (1999). "Ecosystem services in urban areas." *Ecological Economics*, 29(2), 293-301.
- Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., and Pullin, A. S. (2010). "Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence." *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 147-155.
- Bretz S, Akbari H, Rosenfeld A, Taha H. 1992. Implementation of white surfaces: materials and utility programs, Heat Island Project, Rep. No. LBL-32467, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA, 1992.
- Carrasco, A; Pittard, R.; Kondepudi, S.; Somasundaram, S. – Evaluation of a direct evaporative roof-spray cooling system – Mechanical Engineering Department, Texas A&M University, College Station. Uit: Proceedings of the Fourth Symposium on Improving Building Systems in Hot and Humid Climates, Houston, TX, September 15-16, 1987
- Chang, C.-R., Li, M.-H., and Chang, S.-D. (2007). "A preliminary study on the local cool-island intensity of Taipei city parks." *Landscape and Urban Planning*, 80(4), 386-395.
- Daalen, E. v. and N. v. Riet (2010). Ouderen en hittebeleving. Tilburg, Bureau Gezondheid, Milieu & Veiligheid GGD' en Brabant/Zeeland.
- de Wilde P, Rafiq Y, Beck M. 2008. Uncertainties in predicting the impact of climate change on thermal performance of domestic buildings in the UK, *Building Services Engineering Research and Technology* 29, 7-26
- Defraeye T, Blocken B, Carmeliet J. 2010. CFD analysis of convective heat transfer at the surfaces of a cube immersed in a turbulent boundary layer. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53(1-3): 297-308.
- Deltares, TNO, et al. (2010). Brede, gebiedsspecifieke verkenning van effecten van klimaatverandering, in samenhang met toekomstscenario's en trendmatige ontwikkelingen, Kennis voor Klimaat.
- Deltares, 2011 (Concept), Meetexperiment invloed open water op omgevingstemperatuur, Kenmerk 1200473-000-ZWS-0007.
- Ek, R., J. Heemstra, et al. (2007). Inventarisatie van effecten van klimaatverandering op fysiek systeem Hoogheemraadschap van Delfland, TNO Bouw en Ondergrond, BU Bodem en Grondwater, Deltares, GeoDelft, Delft Hydraulics.
- Erell E, Williamson T, Pearlmutter D. 2011. Urban microclimate: designing the spaces between buildings. Earthscan, 256 pp.
- Esch, M. M. E. v., T. d. Bruin-Hordijk, et al. (2007). The influence of building geometry on the physical urban climate: a revival of "light, air and space". PLEA2007— The 24th Conference on Passive and Low Energy Architecture, TU Delft.
- Frank Th. 2005. Climate change impacts on building heating and cooling energy demand in Switzerland. *Energy and Buildings* 37: 1175–85.
- Futcher, J. (2008). 658-ICE TEA CITY. 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture. Dublin.
- Gaffin, S. R., C. Rosenzweig, et al. (2010). A temperature and seasonal energy analysis of green, white and black roofs. New York, Columbia University, Center for Climate Systems Research: 19.
- Gartland L. 2008. Heat island: understanding and mitigating heat in urban areas. Earthscan, 208 pp.

- Gaterell M, McEvoy M. 2005. The impact of climate change uncertainties on the performance of energy efficiency measures applied to dwellings. *Energy and Buildings* 37: 982–995.
- Gill, S.; Handley, J.; Ennos, A. en Pauleit, S. – *Adapting Cities for Climate Change: The Role of the Green Infrastructure – Built Environment Vol 33 No 1*, 2007
- Givoni B. 1976. *Man, Climate and Architecture*, Applied Science, London.
- Goosen, H., L. Masselink, et al. (2010). *Klimaatatelier Gelderland, Provincie Gelderland*.
- Griggs EI, Shipp PH. 1988. The impact of surface reflectance on the thermal performance of roofs: an experimental study, *ASHRAE Transactions* 94: 1626.
- Hacker JN, Holmes MJ. 2007. Thermal comfort: climate change and the environmental design of buildings in the United Kingdom. *Built Environment* 33(1): 97-114.
- Hacker J, Holmes M, Belcher S, Davies G. 2005. *Climate Change and the Indoor Environment: Impacts and Adaptation* London: CIBSE.
- Harmelen, T., H. t. Broeke, et al. (2011). *Maatregelen tegen het hitte-eilandeffect en hittestress in Rotterdam, Conceptversie oktober 2010*, TNO Earth Environment and Life Sciences.
- Heisler, G. M., Grant, R. H., and Gao, W. (2003). "Individual- and scattered-tree influences on ultraviolet irradiance." *Agricultural and Forest Meteorology*, 120(1-4), 113-126.
- Herb, W., B. Janke, et al. (2008). "Ground surface temperature simulation for different land covers." *Journal of Hydrology* 356(3-4): 327-343.
- Hien, W. N., Yok, T. P., and Yu, C. (2007). "Study of thermal performance of extensive rooftop greenery systems in the tropical climate." *Building and Environment*, 42(1), 25-54.
- Holmes MJ, Hacker JN. 2007. Climate change, thermal comfort and energy: Meeting the design challenges of 21st century, *Energy and Buildings* 39: 802-814.
- Keeffe, G. and C. Martin (2007). *MSA Yearbook*, Manchester School of Architecture.
- Kikegawa, Y., Y. Genchi, et al. (2006). "Impacts of city-block-scale countermeasures against urban heat-island phenomena upon a building's energy-consumption for air-conditioning." *Applied Energy* 83(6): 649-668.
- Klok, L. ; Broeke, H. ten; Harmelen, T. van; Kok, H.; Verhagen, H.; Zwart, S. *Ruimtelijke verdeling en oorzaken van het hitte-eiland effect*, TNO Bouw en ondergrond en Waterwatch BV, 2010
- Kolb, W.; Schwarz, T. (1986) – *Zum Klimatisierungseffekt von Pflanzenbeständen auf Dächern, Teil I: Kühlleistung verschiedener Gräser-Kräuter-Mischungen und Stauden bei Intensivbegrünungen; verschenen in 'Veitshöchheimer Berichte 66 (2002)'* uitgegeven door de Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau Würzburg/Veitshöchheim, Abteilung Landespflege
- Kravčik, M., J. Pokorny, et al. (2007). *Water for the Recovery of the Climate-A New Water Paradigm*. Publisher Municipalia.
- Landsberg, H. E. (1981). *The urban climate*, New York [etc.]: Academic Press.
- LandUseConsultants (2006). *Adapting to climate change impacts - A good practice guide for sustainable communities*, Land Use Consultants in association with Oxford Brookes University, CAG Consultants and Gardiner & Theobald. Defra, London.
- Liu, K; Minor, J. – *Performance evaluation of an extensive green roof; gepubliceerd in Greening Rooftops for Sustainable Communities*, Washington D.C., May 5-6 2005, pp. 1-11
- Lenzholzer, S. (2010). *Designing atmospheres : research and design for thermal comfort in Dutch urban squares*, Proefschrift Wageningen
- Lomas KJ, Ji Y, 2009. Resilience of naturally ventilated buildings to climate change: Advanced natural ventilation and hospital wards, *Energy and Buildings* 41: 629–653.
- Lowe R. Preparing the built environment for climate change (editorial). *Building Research & Information* 2003; 31: 195–9.

- McPherson, E. (1994). "Cooling urban heat islands with sustainable landscapes." *The ecological city: Preserving and restoring urban biodiversity*: 161-171.
- Niachou, A.; Papakonstantinou, K.; Santamouris, M.; Tsangrassoulis, A.; Mihalakakou, G. – Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance; *Energy and Buildings* 33 (2001) 719-729
- Nirov (2010). Quick scan klimaatadaptatiemaatregelen in Nederland en internationaal.
- Nishimura, N., T. Nomura, et al. (1998). "Novel water facilities for creation of comfortable urban micrometeorology." *Solar Energy* 64(4): 197-207.
- Oke, T. (1973). "City size and the urban heat island." *Atmospheric Environment* (1967) 7(8): 769-779.
- Oke, T. R., Crowther, J. M., McNaughton, K. G., Monteith, J. L., and Gardiner, B. (1989). "The Micrometeorology of the Urban Forest [and Discussion]." *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 324(1223), 335-349.
- Onmura, S.; Matsumoto, M.; Hokoi, S. – Study on evaporative cooling effect of roof lawn gardens; *Energy and Buildings* 33 (2001) 653-666
- Park, C. (2001). *The environment: principles and applications*, Routledge.
- Parker DS, Barkaszi SF. 1997. Roof solar reflectance and cooling energy use: field research results from Florida, *Energy and Buildings* 25: 105-115.
- Pötz, H. and P. Bleuzé (2010). Proeftuin klimaat in de Stad, Delft Zuid-Oost, VROM. Provincie_Nooord-Holland (2008). *Klimaat-effectenschetsboek Noord-Holland*, Alterra, DHV bv, KNMI, VU.
- Rafailidis, S. (1997). "Influence of building areal density and roof shape on the wind characteristics above a town." *Boundary-Layer Meteorology* 85(2): 255-271.
- Reagan JA, Acklam DM. 1979. Solar reflectivity of common building materials and its influences on the roof heat gain of typical southwestern US residences, *Energy and Buildings* 2: 237-248.
- Rosenfeld AH, Akbari H, Bretz S, Fishman BL, Kurn DM, Sailor D, Taha H. 1995. Mitigation of urban heat islands: materials, utility programs, updates, *Energy and Buildings* 22: 255-265
- Rosenzweig, C. (2006). *Mitigating New York City's Heat Island with urban forestry, living roofs and light surfaces*, New York City Regional Heat Island Initiative.
- Saito, I., Ishihara, O., and Katayama, T. (1990). "Study of the effect of green areas on the thermal environment in an urban area." *Energy and Buildings*, 15(3-4), 493-498.
- Salcedo Rahola, T., P. Van Oppen, et al. (2009). Heat in the city-an inventory of knowledge and knowledge deficiencies regarding heat stress in Dutch cities and options for its mitigation, *Klimaat voor Ruimte*.
- Santamouris M. 2006. *Environmental design of urban buildings: an integrated approach*. Earthscan / James & James, 322 pp.
- Schmidt, M. (2009). *Rainwater harvesting for Mitigating Local and Global Warming*. Fifth Urban Research symposium 2009. Marseille.
- Simpson JR, McPherson EG. 1997. The effects of roof albedo modification on cooling loads of scale model residences in Tucson, Arizona. *Energy and Buildings* 25: 127-137.
- Slabbers, S., W. Klemm, et al. (2010). *Proeftuin Den Haag en Arnhem*. B. S. Landschapsarchitecten, Ministerie van VROM.
- Slater, G. A. (2010). *The ability of urban parks to reduce air temperatures of surrounding neighbourhoods: a study of 4 Toronto parks*, University of Guelph, Guelph.
- Spronken-Smith, R. A., and Oke, T. R. (1998). "The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates." *International Journal of Remote Sensing*, 19(11), 2085-2104.
- Steinrücke, M., D. Düttemeyer, et al. (2010). *Handbuch Stadtklima: Massnahmen und Handlungskonzepte fuer Staedte und Ballungsraume zur Anpassung an den*

- Klimawandel. Düsseldorf, Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.
- Streiling, S., and Matzarakis, A. (2003). "Influence of single and small clusters of trees in the bioclimate of a city: a case study." *Journal of Arboriculture* 29(6), 769-780.
- Suehrcke H, Peterson EL, Selby N. 2008. Effect of roof solar reflectance on the building heat gain in a hot climate. *Australia, Energy and Buildings* 40: 2224-2235.
- Taha, H., H. Akbari, et al. (1988). "Residential cooling loads and the urban heat island--the effects of albedo." *Building and Environment* 23(4): 271-283.
- Taha H. 1997. Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration and anthropogenic heat. *Energy and Buildings* 25: 99-103.
- Takahashi, R., A. Asakura, et al. (2010). Using snow melting pipes to verify the water sprinkling's effect over a wide area. Sustainable techniques and strategies in urban water management, 7th International Conference. Lyon, France, Novatech.
- Tiwari, G. N., A. Kumar, et al. (1982). "Cooling by Water Evaporation over Roof - Review." *Energy Conversion and Management* 22(2): 143-153.
- Tsoumarakis, C., Assimakopoulos, V. D., Tsiros, I., Hoffman, M., and Chronopoulou, A. (2008). "Thermal performance of a vegetated wall during hot and cold weather conditions" PLEA 2008 - 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture, City: Dublin.
- Upmanis, H., I. Eliasson, et al. (1998). "The influence of green areas on nocturnal temperatures in a high latitude city (Göteborg, Sweden)." *International Journal of Climatology* 18(6): 681-700.
- van Hooff T, Blocken B, 2010. Coupled urban wind flow and indoor natural ventilation modelling on a high-resolution grid: a case study for the Amsterdam ArenA stadium. *Environmental Modelling & Software* 25(1): 51-65.
- Ven, F. v. d., E. v. Nieuwkerk, et al. (2010). Building the Netherlands Climate Proof, Urban Areas. draft.
- VWS (2007). Nationaal Hitteplan 2007, Ministerie van Volksgezondheid, Welzijn en Sport.
- Walsh, C. L., J. W. Hall, et al. (2007). Building knowledge for a changing climate, Collaborative research to understand and adapt to the impacts of climate change on infrastructure, the built environment and utilities, Newcastle University.
- Wong, N., A. Kwang Tan, et al. (2010). "Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls." *Building and Environment* 45(3): 663-672.
- Wong, N. H., S. E. Lee, et al. (2007). Thermal Performance of Facade Materials and the Impacts on Indoor and Outdoor Environment. Singapore.
- Wong, N.; Cheong, D.; Yan, H.; Soh, J.; Ong, C.; Sia, A. – The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore; *Energy and Buildings* 35 (2003) 353-364
- Xiaomin, X., H. Zhen, et al. (2006). "The impact of urban street layout on local atmospheric environment." *Building and Environment* 41(10): 1352-1363.

5 Hitte en beleid

5.1 Inleiding

In de vorige hoofdstukken zijn verschillende type maatregelen genoemd om temperatuurstijging in de stad of de gevolgen daarvan tegen te gaan. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op mogelijkheden die er zijn om hittemaatregelen op te nemen in gemeentelijk beleid.

De ruimtelijke inrichting van een stad is van invloed op het UHI effect. De gemeente zet voornamelijk de toon van de ruimtelijke ordening via het bestemmingsplan en de structuurvisie, en heeft daarmee een belangrijke rol bij maatregelen ten aanzien van het UHI en hittestress. Het aanpassen van het ruimtegebruik, zoals het aanbrengen van meer groene en blauwe oppervlakten, maar ook het creëren van schaduw of windstromen, kan een positief effect hebben op het beperken van temperatuurstijging. Niet alleen de ruimtelijke ordeningssector is belangrijk voor het doorvoeren van hittemaatregelen, ook actoren uit de gezondheidssector zijn relevant. Een dienst als de GGD kan ondersteunen in de communicatie naar de burger toe. Ook de bouwsector en de energiebranche kunnen een rol spelen bij het tegengaan van hittestress.

Het integreren van adaptatiemaatregelen in verscheidende sectoren wordt gezien als een goede strategie om het hitte eilandeffect en hittestress aan te pakken. In dit hoofdstuk worden de verschillende sturingsmodellen toegelicht die daarbij gebruikt worden. Vervolgens wordt beschreven hoe de eerste Nederlandse steden nu actief inzetten op hittemaatregelen, gevolgd door voorbeelden uit het buitenland waar men vaak al verder is met het formuleren van hittebeleid. Tot slot volgen de lessen die Nederlandse steden hieruit kunnen trekken, en de rol die inwoners en private partijen bij de aanpak van hitteproblematiek kunnen spelen.

5.2 Sturingsmodellen

Als een gemeente er voor kiest om maatregelen te integreren in beleidssectoren zoals ruimtelijke ordening of volksgezondheid, dan zal er gekozen worden voor een bepaald sturingsmodel. Dit wordt vastgelegd in beleid waardoor maatregelen in uitvoering worden gebracht. Een gemeente kan kiezen uit drie type sturingsmodellen (of instrumenten); economisch, juridisch of communicatief (Runhaar en Driessen, 2007). In het Engels worden ook wel de termen *carrot*, *stick* en *sermon* gebruikt (Bemelmans-Vidéc et al, 2003).

Juridisch

Een juridische aanpak is gebaseerd op de gedachte dat individuen en organisaties kiezen voor het gedrag waar toe ze gedwongen worden door uniforme regels. In het geval voor het invoeren van hittemaatregelen zou dit bijvoorbeeld betekenen dat de gemeente in het geval van nieuwbouw, herstructurering of transformatie de ontwikkelaars verplicht om bepaalde materialen te gebruiken voor het dak, het bouwen van groene daken of het behouden van bomen en planten. Naast een repressieve aanpak, is het ook mogelijk om gedrag te stimuleren. In dit geval kan de gemeente er voor kiezen de standaard van groen bij te stellen en op deze manier juist de aanleg van extra groen te promoten.

Economisch

In plaats van de wet aan te passen, kan de gemeente er voor kiezen om financiële stimulansen te creëren, bijvoorbeeld door lagere belastingen te rekenen voor de aanleg van groene daken of op isolatiematerialen. Daar tegenover staat dat de gemeente ontwikkelaars financiële sancties kan opleggen. De gemeente kan bijvoorbeeld een boete geven wanneer

een ontwikkelaar groen weghaalt en hier geen alternatief voor biedt. In het economische sturingsmodel wordt er van uitgegaan dat actoren zich in hun gedrag laten leiden door wat financieel het meest aantrekkelijk is.

Communicatief

De derde optie is het communicatieve sturingsmodel, dat zich baseert op de gedachte dat actoren hun keuze baseren op wat volgens hun weten het beste is. Het is aan de gemeente om de kennis van de actoren te vergroten of bij te stellen. Dit kan bijvoorbeeld door het goede voorbeeld te geven en alle overheidsgebouwen te voorzien van een groen dak, of door het uitschrijven van een wedstrijd waarbij de individuen en organisaties worden gevraagd mee te denken over de toepassing van hittemaatregelen. Evacuatieplannen, telefoonservices en websites zijn eveneens communicatieve instrumenten die de gemeente kan inzetten.

Bij het doorvoeren van hittemaatregelen kiest de gemeente voor één sturingsmodel of een combinatie van meerdere modellen. De keuze voor een adequaat sturingsmodel moet daarom gebaseerd zijn op vier condities, die vaak concurrerende en/of conflicterend zijn (Bemelmans-Vidéc et al, 2003):

- *Effectief*: Het sturingsmodel moet aansluiten op het doel dat de gemeente binnen een bepaald tijdsbestek wil bereiken. Als een gemeente bijvoorbeeld voor ogen heeft om in 2015 de groenste stad te zijn van Nederland, dan moeten de instrumenten daarbij aansluiten.
- *Efficiënt*: De gemeente moet realiseren welke mogelijke problemen kunnen optreden tijdens de doorvoering van het sturingsmodel. Bij verplichting van de aanleg van groene daken voor nieuwbouw bijvoorbeeld, kan het zijn dat een groen dak niet op elke dakconstructie past en dat deze dakconstructie wellicht de bouwkosten van de nieuwbouwhuizen omhoog stuwt. Zo ontstaat een negatieve output, en werkt het instrument niet efficiënt.
- *Legaliteit*: De doorvoering van een instrument moet passen binnen de bestaande wetgeving en de principes van het beleidsproces. Deze conditie is gebaseerd op rechtvaardigheid. De gemeente moet zich realiseren of het wel rechtvaardig is om inwoners te beboeten, omdat zij geen (of een te klein percentage) groen in de tuin hebben. De tuin is immers (vaak) privaat bezit.
- *Democratie*: De verhouding tussen de overheid en de burger bepaalt of de gekozen aanpak binnen de bestaande (acceptabele) norm valt. Dit hangt eveneens samen met rechtvaardigheid, maar ook motivatie. De motivatie om te beboeten moet gebaseerd zijn op gegronde argumenten. De inwoners beboeten omdat de wethouder graag tot de koplopers wil behoren is geen acceptabele reden. Echter als de gezondheid van de inwoners zwaar heeft te leiden onder de verstening van de tuin (doordat de luchtkwaliteit verslechterd of dat er lichamelijk ongemak ontstaat), dan biedt het een rechtvaardig argument.

Bij de keuze voor sturingsinstrumenten en formulering van beleid hebben gemeenten uiteraard een zekere mate van kennis nodig over hitteproblematiek: wat veroorzaakt het hitteprobleem in de stad (zie paragraaf 2.2), welke consequenties komen voort uit het hitteprobleem en welke hiervan moet de gemeente adresseren (zie paragraaf 2.3 en hoofdstuk 3), welke maatregelen zijn effectief (zie hoofdstuk 4) en hoe is het bewustzijn en gevoel van urgentie bij de private sector voor het probleem. Op basis van deze informatie kiest een gemeente voor een flexibele of robuuste aanpak, en een gefaseerde of directe doorvoering. Tegelijkertijd moet de gemeente evalueren of de instrumentkeuze effectief, efficiënt, legaal en democratie is. Dit is een proces van 'learning by doing', waarbij herziening van beleid onontkoombaar is.

5.3 Hittebeleid in Nederlandse steden

Veel Nederlandse steden zijn bezig met het formuleren van de juiste aanpak voor de hitteproblematiek. Onderzoek naar het stedelijk hitte-eiland effect en hittestress (zie hoofdstuk 2 en 3) heeft echter nog niet geleid tot het invoeren van algemeen adaptatiebeleid. Wel wordt er binnen een aantal gemeenten al actief ingezet op adaptatiemaatregelen. Tot nu toe gebeurt dat alleen nog door middel van economische en communicatieve instrumenten. Er wordt gekozen voor een stimulerende, maar geen intensieve aanpak. De steden zijn nog in de onderzoekende fase: in welke mate zal hittestress plaatsvinden en hoe wordt deze ondervonden door de burgers? Met maatregelen, zoals groene daken en informerende websites, worden er geen investeringen gedaan die later overbodig blijken te zijn.

Een aantal gemeenten biedt subsidiemogelijkheden voor de aanleg van groene daken. Amsterdam geeft een bijdrage (50 euro per m² tot maximaal 20.000 euro) aan de bewoners die een groen dak of groene gevel van minimaal 40 vierkante meter aan leggen⁸. In Rotterdam wordt een financiële prikkel gegeven in de vorm van 30 euro per vierkante meter per gerealiseerd groen dak⁹. Ook in Utrecht kan er subsidie (30 euro per m²) verkregen worden, maar de gemeente heeft slechts een beperkt budget beschikbaar voor het experiment 'groene daken'¹⁰. de gemeente Alkmaar biedt als financiële stimulans een duurzaamheidslening met een lagere rente aan eigenaren/ bewoners en Verenigingen van Eigenaren die voor een dergelijk dak kiezen¹¹. Ook Maastricht zegt een Groene Dakenplan te hebben, maar de inhoud hiervan is nog onbekend¹².

Hierbij moet gezegd worden dat de subsidie voor de groene daken niet alleen gebaseerd is op het argument dat groene daken hittestress tegen gaan. Ook de functie als wateropvang bij harde regen, de isolerende en geluiddempende werking, de mogelijke bufferwerking bij luchtvervuiling en de bijdrage die groene daken leveren aan het duurzame karakter van de stad spelen een rol bij subsidieverlening. Groene daken zijn hiermee een zogenaamde '*no-regret measure*' voor hittestress. In het geval dat hittestress niet tot uiting komt, zijn er nog genoeg andere voordelen te noemen voor het aanleggen van groene daken (Willows en Connell, 2003).

Naast groene daken, spreekt de gemeente van Rotterdam over het belang van de aanleg de aanleg van extra waterpartijen, parken en bomen, waarmee ook rekening gehouden dient te worden bij (her)inrichting van woonwijken¹³. Hier is echter nog geen juridische verplichting toe.

Naast de financiële prikkels hebben de gemeenten Rotterdam, Utrecht, Den Haag, Arnhem en Groningen een pagina op hun website gewijd aan de gevaren van hitte. Op de gemeentelijke website van GGD Rotterdam is informatie te vinden over hittegolven en wat de burger zelf kan doen om het koel te houden¹⁴. Er wordt een verwijzing gegeven naar het

⁸ Zie website Gemeente Amsterdam: http://www.amsterdam.nl/vrije_tijd_toerisme/groen/groene_daken

⁹ Zie website Gemeente Rotterdam: <http://www.rotterdam.nl/eCache/TER/10/95/917.html>

¹⁰ Zie website Gemeente Utrecht: <http://www.utrecht.nl/smartsite.dws?id=302792>

¹¹ Zie website Gemeente Alkmaar: http://www.alkmaar.nl/eCache/40206/Groen_dak_op_Sportcomplex_Oosterhout

¹² Zie collegenota Gemeente Maastricht: http://www.maastricht.nl/maastricht/servlet/nl.gx.maastricht.client.http.GetFile?id=348055&file=10_collegenota.pdf

¹³ Zie website Rotterdam Climate Initiative: http://www.rotterdamclimateinitiative.nl/nl/100_klimaatbestendig/projecten/onderzoek_hittestress_in_rotterdam?portfolio_id=21

¹⁴ Zie website GGD Rotterdam: <http://www.ggd.rotterdam.nl/smartsite229.dws?MainMenu=750071&goto=2123359&style=6400>

RIVM¹⁵. Ook Utrecht verwijst naar deze website, en de sites van het GGD, KNMI en het Nationale Hitteplan voor verdere toelichting¹⁶. Den Haag heeft dezelfde lay-out, maar biedt als extra geheugensteun de 'hittesticker'¹⁷. Deze kan uitgeprint worden en thuis worden opgehangen, zodat de burger in vijf stappen weet wat te doen bij hitte. De hittesticker is ook opgenomen in het regionaal plan van Hulpverlening Gelderland Midden dat een link heeft op de website van de gemeente Arnhem¹⁸. Ook Groningen informeert haar inwoners over hitte door middel van de website van de GGD. Zij geven naast de algemene informatie tevens specifieke inlichting aan scholen¹⁹.

5.4 Hittebeleid in buitenlandse steden

Over de hele wereld krijgen steden te maken met hogere temperaturen. In diverse buitenlandse steden worden naast financiële en communicatie middelen ook andere instrumenten ingezet om het hitte eiland effect en hittestress tegen te gaan. Om een vergelijking te maken tussen de aanpak in Nederlandse steden en relevante instrumenten in buitenlandse steden worden hier alleen steden beschouwd die net zoals Nederland een gematigd zeeklimaat hebben of eventueel een gematigd landklimaat (naar de klimaatclassificatie van Köppen-Geiger, zie Peel et al, 2007). Er is gekeken naar het hittebeleid van de volgende steden: New York, Chicago, Toronto, London, Stuttgart, Basel, Copenhagen en Tokyo. Ook hier ligt de focus op adaptatie maatregelen.

New York (Verenigde Staten) kent het 'Climate Change Adaptation in New York City' rapport²⁰. Het rapport noemt voornamelijk mogelijke oplossingen om het hitteprobleem tegen te gaan. De zogenaamde 'cool roofs' zijn al verplicht in de nieuwe bouwreglementen. Evenals dat er wetgeving is voor nieuwe en bestaande bouwprojecten om bomen te planten aan de voorzijde. Bovendien is er een Green Codes Task Force opgericht. Deze taskforce heeft 120 aanbevelingen gedaan om de ruimtelijke ordeningreglementen en bouwreglementen te vergroenen²².

In *Chicago* (Verenigde Staten) heeft de gemeente diverse maatregelen doorgevoerd met behulp van een mix van instrumenten. De stad heeft de bouwreglementen aangepast zodat platte daken een minimum reflectie waarde hebben van 0,5. De stad heeft daarnaast in sommige gebieden de bestrating reflexief en permeabel gemaakt, ook wel 'green alleys' genaamd. Naast een subsidieprogramma voor groene daken, heeft de stad ook een groen dak aangelegd op het stadhuis om zo een voorbeeldfunctie in te nemen. Wettelijk is vastgelegd dat nieuwe of gerenoveerde bouwprojecten bomen moeten planten of behouden (onderdeel van de Urban Forest Agenda). De stad biedt tevens een boom-plant-service aan. De schaduw van de bomen biedt immers verkoeling. Verder is het verplicht om bij nieuwbouw een stuk van de ontwikkeling af te staan aan groen of anders een kostenvergoeding te betalen. De inkomsten daarvan worden gestoken in vergroening van de openbare ruimte. Sommige van deze maatregelen dateren vanuit de jaren negentig en

¹⁵ Zie website RIVM dossier Hitte: <http://www.rivm.nl/milieuportaal/dossier/hitte/>

¹⁶ Zie website Gemeente Utrecht: <http://www.utrecht.nl/smartsite.dws?id=211795>

¹⁷ Zie website Gemeente Den Haag: <http://www.denhaag.nl/home/bewoners/to/Omgang-met-hitte.htm?fontSize=1>

¹⁸ Zie website Gemeente Arnhem: <http://www.arnhem.nl/content.jsp?objectid=91212>

¹⁹ Zie website GGD Groningen: <http://ggd.groningen.nl/milieu-gezondheid/warmte-hitte>

²⁰ Zie website City of New York: <http://www.nyc.gov/html/planyc2030/html/plan/climate.shtml>

²¹ Zie rapport New York City Panel: http://research.fit.edu/sealevelriselibrary/documents/doc_mgr/443/NYC_Risk_Manag._&_CC_Adaptation_Executive_Summary_-_NYAS_2009.pdf

²² Zie het vooruitgangsrapport: http://www.nyc.gov/html/planyc2030/downloads/pdf/planyc_climate_change_progress_2010.pdf

hebben al resultaat getoond²³. Momenteel wordt het 'heat response plan' geupdate en wordt verder onderzoek gedaan naar het hitte-eiland effect²⁴.

Toronto (Canada) heeft een adaptatie actie plan gemaakt, 'Ahead of the Storm' genaamd. Hierin staat de stad samenwerkt met gezondheidsinstellingen en dat er een 'heat alert system' en 'Hot Weather Response Plan' bestaat. De 'Toronto Green Development Standard' stelt voorwaarden aan de ruimtelijke inrichting en de bouw, waarbij rekening wordt gehouden met het reduceren van het hitte-eiland effect, het bewaren van water, het planten van bomen en het vermeerderen van groene ruimtes²⁵. Daarnaast is Toronto de eerste Noord-Amerikaanse stad waarbij de aanleg van een groen dak bij een nieuwbouw project groter dan 2000 m² wettelijk verplicht is. Het percentage groene dak dat verplicht is, hangt af van de oppervlakte van het gehele dak. Het is mogelijk een groen dak af te kopen door 200 dollar per m² te betalen²⁶.

Ook *London* (Engeland) krijgt te maken met 'overheating'. In 'Climate Change Adaptation Strategy for London'²⁷ worden de volgende suggesties gedaan om de stad koel te houden: het vergroenen van de stad om zo schaduw, verkoeling en isolatie te bieden. Daarnaast dienen de bouwreglementen aangepast te worden zodat nieuwbouw bestendig is voor de temperaturen van morgen. Acties hiervoor zijn het verder onderzoeken van de effecten van hogere temperaturen, het vergroenen van de stad door middel van samenwerking met 'partners' en het creëren van een robuust hittegolf plan. Dit wordt gedaan door investeringen in groen, het aanpassen van beleidsdocumenten en het promoten van nieuwe alternatieven binnen de bouw.

Stuttgart (Duitsland) heeft een klimaatkaart gemaakt waarop de warme en koude luchtstromen in de stad te zien zijn. Gebaseerd op deze informatie heeft de stad de ruimtelijke ordeningsplannen en bouwreglementen aangepast. Hierbij was het belangrijk om open ruimtes te bewaren en de aanwezigheid van groen in dichtbebouwde gebieden te vermeerderen. Door deze aanpassingen in beleid heeft Stuttgart de stad groener gemaakt²⁸ en worden de natuurlijke windpatronen beïnvloed.

Basel (Zwitserland) is 's wereld leider op het gebied van groene daken, als het gaat om aantal vierkante meters groen dak per capita (Carter, 2011). Door de invoering van een gebouw en constructie wet in 2002 zijn alle nieuwe en gerenoveerde platte daken nu verplicht groen²⁹. Daarvoor kende de stad al een subsidieprogramma voor groene daken. Het subsidieprogramma werd flink gepromoot in de media. Opmerkelijk is dat de stad met de aanleg van de groene daken niet doet voor het tegengaan van hittestress, maar juist voor het behouden van biodiversiteit en het verminderen van energieverbruik.

De stad *Nagoya* (Japan) lanceerde in 2008 het 2050 Nagoya Strategie voor Biodiversiteit, waarin de link tussen de groenstructuur en het hitte eiland effect wordt erkend. Het doel is om groene gebieden te verbeteren en uit te breiden. Drie mechanismen worden gebruikt om dit voor elkaar te krijgen; ten eerste een 'lening voor gebruik' overeenkomst, waarbij de stad groene gebieden van private landeigenaren pacht zodat deze groene gebieden behouden

²³ Zie website Yale University: <http://surfaceheat.sites.yale.edu/evaluating-chicago-s-urban-heat-island-policy-remote-sensing>

²⁴ Zie website City of Chicago: <http://www.chicagoclimateaction.org/pages/adaptation/11.php>

²⁵ Zie rapport Ahead of the Storm: http://www.toronto.ca/teo/pdf/ahead_of_the_storm_highlights.pdf

²⁶ Zie website City of Toronto: <http://www.toronto.ca/greenroofs/overview.htm>

²⁷ Zie rapport London Strategy: http://www.london.gov.uk/climatechange/sites/climatechange/staticdocs/Climiate_change_adaptation.pdf

²⁸ Zie GRaBS rapport Stuttgart: <http://www.grabs-eu.org/membersArea/files/stuttgart.pdf>

²⁹ Zie GRaBS rapport Basel: <http://www.grabs-eu.org/membersArea/files/basel.pdf>

blijven; ten tweede, een subsidieprogramma waarbij ontwikkelaars gestimuleerd worden hoger te bouwen in plaats van op meer oppervlakte; en als derde, de verplichting van het planten van bomen bij nieuwbouw ontwikkelingen groter dan 300 m². Hierbij moet 10 tot 20 percent groen zijn. Daarnaast kent de stad diverse richtlijnen voor het planten van groen bedoeld voor eigenaren van gebouwen ³⁰.

In deze acht steden is gekozen voor het inzetten van meerdere instrumenten tegelijkertijd. Bovendien gebruiken deze steden ook juridische instrumenten. Zowel richtlijnen voor de groenstructuur als de bouwreglementen zijn wettelijk aangepast. Ook subsidieprogramma's worden ingezet en worden er noodplannen geschreven. Door zelf een voorbeeldfunctie aan te nemen, communiceert de City of Chicago ook naar haar burgers. De acht buitenlandse steden laten voorbeelden zien van aanpak van klimaatadaptatie waarbij gericht naar een doel wordt toegewerkt.

5.5 Lessen voor Nederlandse steden

Een aantal Nederlandse steden hebben de eerste stap gezet om klimaatadaptatie te integreren in hun beleid. De inzet van economische en communicatieve instrumenten door de gemeenten laat zien dat de steden het probleem zien, maar nog niet daadwerkelijk weten te definiëren. Er wordt nog niet gehandeld vanuit een concreet geformuleerd doel. Meer metingen, onderzoek en nieuwe hittekaarten kunnen bijdragen aan het richting geven van gemeentelijk beleid. De acht genoemde buitenlandse steden zijn deels nog bezig met onderzoek, maar handelen doelgericht tegelijkertijd. Zo biedt het vergroenen van de stad bijvoorbeeld, genoeg positieve bijkomstigheden. Naast het bestrijden van hittestress, is het groen ook goed voor wateropvang en het uiterlijk van de stad.

Uit het succes van buitenlandse aanpakken blijkt dat het belangrijk is dat er een duidelijke visie is ten aanzien van klimaatadaptatie, alvorens instrumentkeuzes gemaakt worden. De acht buitenlandse steden hebben elk een plan of strategie met daarin een doel. Een nauwkeurige doelformulering is erg belangrijk, en wordt kwalitatief sterker wanneer het gekwantificeerd is en er een deadline aan is gekoppeld (Hoogerwerf, 1990). De strategie van London is een goed voorbeeld. Zo stelt de stad dat er 100.000 m² aan nieuwe groene daken aangelegd moet worden voor 2012³¹. In de strategie is gekozen om een prospectus te maken die de voordelen van groene daken voorlegt aan private actoren; een communicatief instrument. Het doel moet precies geformuleerd zijn, maar eveneens realiseerbaar zijn. De haalbaarheid van het doel hangt samen met het vertrouwen in het doel en de welwillendheid om het doel uit te voeren (Cörvers, 2001). Voor Nederlandse steden is het daarbij interessant om de relatie te leggen met doelstellingen die gesteld kunnen worden op het gebied van adaptatie aan wateroverlast.

5.6 Rol van inwoners en private partijen

In dit hoofdstuk is geredeneerd vanuit het perspectief van de lokale overheid: welk beleid kunnen de gemeenten voeren? Hierdoor lijkt het bestrijden van het hitteprobleem een top-down aangelegenheid. Gemeenten formuleren beleid en de bedrijven en inwoners voeren uit. Dit hoeft echter niet het geval te zijn. Hittestress is een maatschappelijk kwestie, waarbij ook individuen en bedrijven (de private sector) een rol spelen in zowel de oorzaak hitte problematiek (denk aan verkeer, airco's en andere warmte producerende activiteiten) als het omgaan met hitte. Samenwerking kan een gouden troef zijn voor het aanpakken van het

³⁰ Zie GRaBS rapport Nagoya: <http://www.grabs-eu.org/membersArea/files/nagoya.pdf>

³¹ Zie rapport London strategy, pagina 122: http://www.london.gov.uk/climatechange/sites/climatechange/staticdocs/Climate_change_adaptation.pdf

hitteprobleem. Steden besteden al op verschillende manieren aandacht aan het betrekken van burgers, bedrijven en andere belanghebbenden.

In Nederland is bijvoorbeeld onder andere het consortium Klimaatadaptatie Delft Zuid-Oost, waar samengewerkt wordt tussen publieke en private partijen. De burger wordt daarbij betrokken in workshops over herstructurering van het gebied³². Het Europees netwerk GRaBS, dat zich richt op het integreren van klimaatadaptatie maatregelen in regionale planning, heeft specifiek aandacht besteed aan het betrekken van de burger³³. Basel, Nagoya en Amsterdam Nieuw-West doen onder andere mee aan dit project. Andere manieren om de burgers en bedrijven te betrekken zijn het uitschrijven van prijsvragen en het opzetten en stimuleren van buurtprojecten³⁴. Daarnaast bestaan er ook bottom-up initiatieven waar bedrijven en burgers zelf de organisatie in handen nemen om het hitteprobleem aan te pakken. Steden kunnen hier onder andere op inspelen door burgerinitiatieven onder de aandacht te brengen bij het grotere publiek. Niettemin blijkt uit de rapporten van de buitenlandse steden dat zij ook nog zoekend zijn naar de juiste vorm van samenwerking. Het vroegtijdig betrekken van burgers en bedrijven tijdens het beleidsproces kan echter geen kwaad. Het leidt mogelijk niet direct tot actie, maar stimuleert wel de erkenning van het probleem en het gevoel van urgentie om te handelen in de toekomst.

Referenties

- Bemelmans-Videc, M.L., R.C. Rist, and E. Vedung (2003) *Carrots, Sticks, and Sermons: Policy Instruments and their Evaluation*. Transaction Publishers, New Brunswick, New Jersey.
- Carter, J.G. (2011) Climate change adaptation in European cities. In: *Elsevier (in press)*.
- Cörvers, R. (2001) *Netwerksturing bij natuurontwikkeling. Bestuurskundige consequentieanalyse van gebiedsgerichte instrumenten*. Shaker Publishing, Maastricht.
- Hoogerwerf, A. (1990) Reconstructing Policy Theory. In: *Evaluation and Program Planning*, 13, pp. 285-291.
- Peel, M.C., B.L. Finlayson, and T.A. McMahon (2007) Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. In: *Hydrology and Earth System Science*, 11, p. 1633-1644.
- Runhaar, H., and P. Driessen (2007) Milieubeleid als vraagstuk van doelrationeel handelen. In: P. Driessen en P. Glasbergen (eds.) *Milieubeleid Analyse en Perspectief*. Uitgeverij Coutinho, Bussum. Pp. 131-158.
- Willows, R. and R. Connell (eds.) (2003) Climate adaptation: risk, uncertainty and decision-making. In: *UKCIP Technical Report*. UKCIP, Oxford.

³² Zie VDW Water- en programmamanagement: <http://www.vdw-water.nl/Data/Sites/3/artikelklimaatadaptatiedelft.pdf>

³³ Zie GRaBS Expert paper 2 door Age Niels Holstein: Participation in climate change adaptation

³⁴ Zie website van City of Chicago: http://www.chicagoclimatereaction.org/pages/what_residents_can_do/6.php of http://www.chicagoclimatereaction.org/pages/what_businesses_can_do/7.php

6 Samenvatting en conclusies

Meer hitte in de stad

In een warmer wordend klimaat zullen ook in Nederland warmere zomers en zachtere winters vaker voorkomen. De KNMI'06 scenario's geven aan dat de gemiddelde zomertemperatuur in Nederland rond 2050 met 0,9 tot 2,8 °C zal zijn gestegen ten opzichte van het huidige klimaat (1990). In 2050 zullen gemiddeld 7 tot 15 tropische dagen voorkomen per jaar ten opzichte van gemiddeld 4 in het huidige klimaat. Daarnaast zijn de temperaturen in steden over het algemeen hoger dan gemiddeld in het buitengebied door het stedelijk hitte-eiland of urban heat island (UHI) effect. Lokale condities die het stedelijk hitte-eiland effect bevorderen zijn:

- hoge bebouwingsdichtheid met materialen die langzaam opwarmen en afkoelen en veel warmte kunnen opslaan;
- vervanging van natuurlijke oppervlakken door verharde en waterdoorlatende oppervlakken wat leidt tot een droog stedelijk gebied, waar weinig water beschikbaar is voor verdamping;
- donkere oppervlakken met een laag albedo, zoals asfalt, waardoor weinig zonlicht wordt gereflecteerd, en veel warmte wordt geabsorbeerd.

Door de toename in verstedelijking en stedelijke verdichting neemt het stedelijk hitte-eiland effect naar verwachting toe. Dit geldt niet alleen voor grote steden; ook kleinere plaatsen en dorpen vertonen hogere temperaturen ten opzichte van de omgeving.

Steden over de hele wereld hebben te maken met hogere temperaturen in de stad. Op veel plekken ter wereld kennen steden een soortgelijk stadsontwerp: dichtbebouwd en een versteende openbare ruimte, waarbij het groen zijn plek heeft moeten afstaan aan asfalt, stoepen en terrassen.

Doordat relatief weinig data over het stadsklimaat in Nederland beschikbaar is, is het lastig om het UHI effect te kwantificeren. Metingen van het lokale klimaat in de stad zijn pas recent gestart, op aantal specifieke locaties. Eerste onderzoeksresultaten uit Rotterdam en Arnhem laten zien dat het hitte-eiland effect 's nachts kan oplopen tot meer dan 7 °C. Overdag zijn de gemeten temperatuurverschillen lager met waarden tot 2 °C. Groene wijken laten het geringste temperatuurverschil zien met het buitengebied. Parken kunnen in sommige situaties zelfs koeler zijn dan het buitengebied.

Gevolgen

Tot nu toe is vooral onderzoek gedaan naar sterfte en gezondheidsproblemen door hittestress, als het gaat over de gevolgen van hitte in de stad. Hittestress beschrijft de situatie waarbij hitte een temperatuursverhoging van het lichaam veroorzaakt, en kan leiden tot warmteziekten en sterfte. Daarnaast kan hittestress invloed hebben op het menselijk gedrag en de slaapkwaliteit. Ouderen zijn een risicogroep door verminderende temperatuurswaarneming, gebruik van medicatie, aanwezigheid van ziekten en aandoeningen, verminderende dorstprikkel en verminderend transpiratievermogen. Uit een onderzoek naar sterfte tijdens hittegolfperioden in Nederland blijkt bijvoorbeeld dat de sterfte tijdens een hittegolf met circa 12% toeneemt (ongeveer 40 doden per dag), waarbij de meeste slachtoffers ouder zijn dan 75 jaar. Kinderen lijken niet kwetsbaarder voor hitte dan volwassenen.

Over andere gevolgen van hitte, bijvoorbeeld de invloed op thermisch comfort (binnen- en buitenshuis), energieverbruik, luchtkwaliteit, arbeidsproductiviteit, en de aantrekkelijkheid van het stadsklimaat om er te verblijven, recreëren, wonen en werken, is minder bekend.

Hittekaarten

In stedelijke klimaatkaarten worden gegevens over het lokale klimaat en ontwerpkenmerken gecombineerd om kwetsbaarheid aan weer en klimaat verbonden risico's te analyseren. Klimaatkaarten kunnen worden gebruikt om planningsprocessen te ondersteunen. Hittekaarten zijn een categorie klimaatkaarten, gericht op vragen rondom thermisch comfort in de stad. Er bestaat geen universele methode om klimaatkaarten maken; de methodiek is afhankelijk van de beschikbare informatie en de focus binnen de stedelijke ontwerpvoorwaarden voor de specifieke locatie. Bij de inzet van hittekaarten bij het ontwerpen van gezonde en comfortabele steden is het van belang om rekening te houden met waarnemingen en de beleving van mensen.

Voortbouwend op internationale ervaring richt men zich in Nederland sinds de hittegolven in 2003 en 2006 nu ook actief op het ontwikkelen van klimaatkaarten. Dit heeft geresulteerd in een aantal hittekaarten, onder andere voor Rotterdam, Arnhem, Den Haag, Provincie Limburg en Brabant, waarbij doelstellingen variëren van bewustmaking tot ondersteuning van visiekaarten.

Maatregelen

Er zijn verschillende mogelijkheden voor gemeente om zich voor te bereiden of aan te passen op hitte in de stad. Enerzijds kunnen maatregelen genomen worden om verdere temperatuurstijging in de stad te voorkomen en het UHI effect te beperken, anderzijds kunnen maatregelen genomen worden om schade of andere negatieve effecten van hitte zoals hittestress te voorkomen of te beperken.

Recente studies in binnen- en buitenland, op lokaal en nationaal niveau, geven overzichten van mogelijke adaptatiemaatregelen. De meeste verkenningen zijn algemeen van aard geven een structureel overzicht van bekende maatregelen, maar informatie over kwantitatieve effectiviteit ontbreken in de meeste studies.

Groen in de stad zorgt op drie manieren voor een verkoelende werking:

- actieve verkoeling overdag door verdamping via bladeren (evapotranspiratie)
- passieve verkoeling overdag door schaduw
- absorberen van relatief weinig warmte in tegenstelling tot stenig oppervlakte

De effectiviteit van groen als hittemaatregel is afhankelijk van het soort en dichtheid van vegetatie, en ligging en grootte van groene oppervlakken. Tot nu toe is nog weinig bekend over de kwantitatieve effectiviteit; beschikbare kennis is gebaseerd op computersimulaties en een beperkt aantal lokale metingen.

Om verdampingskoeling te leveren moeten planten en bomen wel over een gemakkelijk toegankelijke waterbron beschikken. Gedurende hitteperiodes is het dus van groot belang om voor voldoende irrigatie te zorgen.

Groene ruimtes in de stad zoals parken en tuinen bieden koeling ter plaatse waarbij het verschil in luchttemperatuur tussen park en omgeving kan variëren tussen 1 – 6 °C. Daarnaast kunnen groene ruimtes een verkoelend effect op hun omgeving hebben. De verkoelende werking van bomen in straten komt vooral door beschaduwing, zowel van mens als gebouwen. Ook groene gevels zorgen voor een verkoelend effect door beschaduwing, maar ook door verdampingskoeling van het groen dichtbij het gebouw. De luchtlaag die ontstaat tussen groen en gebouwschil zorgt bovendien voor extra isolatie en daarmee lagere binnentemperaturen bij hitte, net als groene daken. Groene daken hebben verder een belangrijke rol bij het vasthouden van water bij piekneerslag. Het direct koelende effect van groene daken op straatniveau is zeer beperkt. Bij aanleg op grote schaal kunnen 'intensieve' groene daken (met een dikke substraatlaag) het UHI effect beperken.

Water heeft een koelend effect op de luchttemperatuur door verdamping, en door absorptie en eventueel transport van warmte. Het effect van oppervlaktewater op de temperatuur vlak boven het water is groot, maar op straatniveau is dit beperkt tot de straat waar het water deel vanuit maakt. Stromend water heeft een groter koelend effect dan stilstaand. Verneveling, bijvoorbeeld via vernevelaars en fontein, heeft het grootste koelend effect. Temperaturen op straat en gebouwniveau kunnen door het besproeien van straten en daken naar beneden gebracht worden, de kwantitatieve effectiviteit van dergelijke technieken in Nederland moet nog worden onderzocht.

Een van de belangrijkste gevolgen van klimaatverandering op **gebouwniveau** is de toename van oververhitting in gebouwen. De relatie tussen buiten- en binnentemperatuur bij hitte is afhankelijk van veel factoren (omringende gebouwen, schaduw, gebouwgeometrie, isolatie, zontoetreding, gebruikersgedrag etc.). Voor Nederlandse bouwtypen is nog weinig over deze relatie bekend, maar duidelijk is dat gebouwen in toenemende mate gevoeliger zullen worden voor oververhitting. Mechanische koeling of airconditioning zal waarschijnlijk een belangrijk deel van klimaatadaptatie worden. Dit levert een verhoogd energieverbruik op. Eén van de belangrijkste bouwparameters die ingezet kan worden om oververhitting te beperken of de energievraag voor koeling te reduceren is de albedo of reflectiewaarde van het dakoppervlak en de gevels te vergroten. Onderzoek heeft aangetoond dat lichtgekleurde gevel- en dakmaterialen de zonbelasting aanzienlijk kunnen reduceren.

Stedelijke structuur heeft invloed op het UHI effect en hittebeleving in de stad door de specifieke omvang, bebouwingsdichtheid, samenstelling en geometrie van een stad. Wanneer bij de plaatsing van gebouwen in hun omgeving rekening wordt gehouden met koeling, zijn zowel zon- als windoriëntatie van belang. Een manier om natuurlijke ventilatie te verbeteren is het aanpassen van het straatprofiel, door middel van optimale hoogte/breedte verhoudingen. Lage albedo (reflectie) en langzame afkoeling van veel gebruikte materialen in verstedelijkte gebieden zorgen voor de accumulatie en het vasthouden van warmte, en veroorzaken mede het UHI effect. Studies in het buitenland laten zien dat verhoging van stadsbrede albedo door bijvoorbeeld lichtere gevels, daken, bestratings- en bouwmaterialen een significant effect op de luchttemperatuur op stadsniveau tot gevolg kan hebben.

Niet alleen fysieke ingrepen kunnen genomen worden om negatieve gevolgen van hitte in de stad te voorkomen. Ook het inspelen op het **gedrag en aanpassingsvermogen** van mensen kan effectief zijn om negatieve gevolgen van hitte tegen te gaan, in het bijzonder als het gaat om de meest kwetsbare groepen zoals ouderen. Aanbevelingen ten aanzien van gedrag tijdens hittegolven worden gegeven in het Nationaal Hitteplan. Steeds meer gemeenten maken gebruik van deze en andere handreikingen in communicatie naar hun bewoners.

Veel maatregelen die ingezet worden voor verkoeling van buiten- en/of binnenklimaat (zoals groene daken of verdampingskoeling) zorgen tegelijkertijd voor een besparing van energie en dus uitstoot van broeikasgassen. Daarmee hebben deze maatregelen niet alleen een adaptieve maar tevens een mitigerende werking. **Synergie tussen adaptatie en mitigatie** kan helpen bij het formuleren van zogenaamde 'no-regret' maatregelen, en een sterk argument vormen voor het doorvoeren van specifieke hittemaatregelen. Het tegenovergestelde effect is uiteraard ook van belang om rekening mee te houden bij het maken van keuzes; adaptatiemaatregelen zoals mechanische koelsystemen (airco) kunnen een negatieve werking hebben vanuit mitigatieoogpunt.

Hittebeleid

Veel steden in Nederland zijn bezig met het formuleren van de juiste aanpak voor hitteproblematiek. Onderzoek naar hittestress en UHI heeft nog niet geleid tot het invoeren van algemeen adaptatiebeleid. Wel zijn er steeds meer voorbeelden van gemeenten die actief inzetten op hittemaatregelen, door middel van subsidieregelingen en via verschillende communicatiemiddelen. Verschillende buitenlandse steden gaan verder. Behalve financiële prikkels en communicatie-instrumenten worden daar ook juridische instrumenten ingezet om hitte maatregelen door te voeren. Het gebruik van een combinatie van instrumenten en een heldere formulering van (kwantitatieve) doelstellingen ten aanzien van adaptatiebeleid lijkt bij te dragen aan het succes van de aanpak in deze steden. Net als in Nederland is men nog in de onderzoekende fase, maar tegelijkertijd wordt actief ingezet op het doorvoeren van 'no-regret' maatregelen.

Conclusies

Het hitte-eiland effect en hittestress in Nederlandse steden is een relatief nieuw probleem. Sinds de hittegolven in 2003 en 2006 is de aandacht voor deze onderwerpen gegroeid en wordt meer en meer onderzoek gedaan naar hitteproblematiek en mogelijkheden om er mee om te gaan. Op dit moment bestaan er nog veel onzekerheden over de omvang en gevolgen van hitte in de stad, zeker ook in het licht van toekomstige veranderingen van het globale klimaat. Huidig en toekomstig onderzoek zal een deel van deze onzekerheden verkleinen, maar niet volledig weg kunnen nemen.

Eerste onderzoeksresultaten geven aan dat er wel degelijk significante temperatuursverschillen bestaan tussen stad en omliggende omgeving, ook in Nederland. Ervaringen tijdens recente periodes van hitte maken duidelijk dat hitte in de stad, met name voor ouderen, een probleem vormt. De meeste nadelige effecten door het UHI effect, in combinatie met verdere temperatuurstijging door klimaatverandering, zijn echter lastig te kwantificeren. Dit komt ondermeer door het incidentele karakter van hittegolven en de subjectiviteit van hittebeleving. Bovendien kunnen nog geen heldere uitspraken gedaan worden over lange termijn gevolgen, bijvoorbeeld als het gaat om de aantrekkelijkheid van bepaalde steden of wijken om in te leven of het vestigingsklimaat voor bedrijven.

Door dit gebrek aan informatie, de veelvoud aan andere stedelijke opgaven met wel duidelijke urgentie, en beperkte budgetten staat hitteproblematiek niet bovenaan de gemeentelijke agenda. Toch voelen steeds meer gemeenten wel de noodzaak om met dit onderwerp aan de slag te gaan. Het besef van urgentie lijkt te groeien. Niet alleen vanwege het steeds vaker voorkomen van hittestress, maar ook vanwege het feit dat veel hittemaatregelen op korte termijn genomen moeten worden, bijvoorbeeld als het gaat om groen en blauw in ontwerpogaven, om op lange termijn hitteproblematiek te beperken en kosten te besparen. De vraag is nu: Hoe kan hitteproblematiek in de stad meeliften op andere stedelijke ontwikkelingen en beleid? Door aansluiting te vinden binnen beleidssectoren zoals RO, energie (mitigatie), gezondheidszorg en bouw kan beleid geïntegreerd worden. Dit geldt niet alleen voor de aanpak voor hitte in de stad maar ook voor andere thema's van klimaatadaptatie in het stedelijk gebied.

