

Een koele kijk op de  
inrichting van de buitenruimte

# De hittebestendige stad



dr. ir. Jeroen Kluck

dr. ir. Lisette Klok

dr. ir. Anna Solcerová

dr. ir. Laura Kleerekoper

dr. Liesbeth Wilschut

dr. ir. Cor Jacobs

ir. Ronald Loeve

**Hogeschool van Amsterdam**

Onderzoeksprogramma Urban Technology

Faculteit Techniek

**ISBN:** 978-94-92644-80-0

**Foto omslag:** Nerja, Spanje. Linda Hooijer.

**Een koele kijk op de  
inrichting van de buitenruimte**

# **De hittebestendige stad**

dr. ir. Jeroen Kluck

dr. ir. Lisette Klok

dr. ir. Anna Solcerová

dr. ir. Laura Kleerekoper

dr. Liesbeth Wilschut

dr. ir. Cor Jacobs

ir. Ronald Loeve

## **Met bijdragen van:**

Erica Caverzam Barbosa, MSc. (Hogeschool van Amsterdam)

dr. ir. Floris Boogaard (Hanzehogeschool Groningen)

dr. ir. Emma Daniels (Wageningen Environmental Research)

dr. Rutger Dankers (Wageningen Environmental Research)

ir. Monique de Groot – Reichwein (Tauw)

Kylia Postema, BSc. (Hogeschool van Amsterdam)

Allard Roest, MSc. (Hanzehogeschool Groningen)

Luc van Zandbrink, MSc. (Hogeschool van Amsterdam)

**Mei 2020**

# Colofon

## **Uitgave:**

Onderzoeksprogramma Urban Technology, Faculteit Techniek, Hogeschool van Amsterdam

## **Auteurs:**

dr. ir. Jeroen Kluck, dr. ir. Lisette Klok, dr. ir. Anna Solcerová, dr. ir. Laura Kleerekoper, dr. Liesbeth Wilschut, dr. ir. Cor Jacobs, ir. Ronald Loeve

## **Samenwerking:**

Deze publicatie is het resultaat van het praktijkgerichte onderzoeksproject 'De hittebestendige stad', uitgevoerd door een consortium van gemeenten en kennisinstellingen. Aan dit project werkten in consortiumverband mee: gemeente Amsterdam (Joyce van den Berg, Geertje Wijten), gemeente Arnhem (Hans van Ammers), gemeente Apeldoorn (Diederik Anema, Theo Straatsma), gemeente Beverwijk (Erik Warns, Bärbel Böhling, Rixt Hofman, Wouter Stolp), gemeente Breda (Vincent Kuiphuis, Sanne Verbeek), BUCH<sup>1</sup> gemeenten (Otto van den Berg), gemeente Eindhoven (Luuk Postmes, Rosalie Franssen), gemeente Groningen (Martijn Schuit), gemeente Haarlem (Diana Bakboord, Hans Bueno, Joram de Ruijter), gemeente Leeuwarden (Pietrik Hoornstra), gemeente Rheden (Tanja Mosselman), Samenwerkingsverband RIVUS<sup>2</sup> (Thomas Braaksma, Leander Ernst, Freddy ten Kate, Marcel Wenker, Rik Zeeuwen), gemeente Tilburg (Petra Mackowiak), GGD Amsterdam (Wouter Egas, Ben Rozema), Klimaatverbond Nederland (Madeleen Helmer), Stichting CAS (Hasse Goosen, Arjen Koekoek, Anna Stolk), Wetterskip Fryslân (Karel Veeneman), Wageningen Environmental Research (Cor Jacobs, Emma Daniels, Rutger Dankers), Tauw B.V. (Monique de Groot – Reichwein, Sanne Huisman, Ruben Keizer), Hanzehogeschool Groningen (Floris Boogaard,

Allard Roest, Doutsen Krol) en de Hogeschool van Amsterdam (Jeroen Kluck, Lisette Klok, Anna Solcerová, Laura Kleerekoper, Liesbeth Wilschut, Ronald Loeve, Erica Caverzam Barbosa, Kylian Postema, Luc van Zandbrink).

## **Redactie:**

Els de Roon Hertoge, Fonar

## **Vormgeving:**

Creja Ontwerpen

## **Financiering:**

Dit onderzoek is medegefinancierd door Regieorgaan SIA, onderdeel van de Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO).



## **Contact:**

dr. ir. Jeroen Kluck  
j.kluck@hva.nl  
Hogeschool van Amsterdam, Faculteit Techniek  
Postbus 1025, 1000 BA Amsterdam  
[hva.nl/klimaatbestendigestad](http://hva.nl/klimaatbestendigestad)

## **Meer informatie:**

Deze publicatie is ook online beschikbaar op:  
[hva.nl/klimaatbestendigestad](http://hva.nl/klimaatbestendigestad)

**ISBN:** 978-94-92644-80-0

<sup>1</sup> BUCH: Bergen, Uitgeest, Castricum en Heiloo.

<sup>2</sup> RIVUS is een samenwerkingsverband in de afvalwaterketen in West-Overijssel tussen de gemeenten Dalfsen, Deventer, Kampen, Olst-Wijhe, Raalte, Staphorst, Zwartewaterland, Zwolle en Waterschap Drents Overijsselse Delta.

# Samenvatting

Het klimaat verandert. Het wordt natter en heter. Nederland moet zich aanpassen aan het veranderende klimaat. Daarom staan de gemeenten voor de uitdaging om er vanaf 2020 voor te zorgen dat een (her)inrichting van een straat of wijk klimaatbestendig is.

Voor wateroverlast en waterveiligheid weten we ongeveer hoe dat moet. Voor hitte is eigenlijk nog niet duidelijk wat er moet gebeuren. En dat is zorgelijk, want hitte kan grote problemen geven. Hitte kan leiden tot extra sterfte en zal het leven in de stad bovendien steeds vaker onaangenaam maken. Duidelijk is dat er aandacht nodig is op het sociale vlak (o.a. in de zorg), voor gebouwen (koele binnenruimtes) en voor de buitenruimte. Dit rapport richt zich op dat laatste: op het hittebestendig inrichten van de buitenruimte, omdat daar nog veel kennis ontbreekt.

Stedenbouwkundigen, landschapsarchitecten, projectontwikkelaars, waterbeheerders en andere professionals bij gemeenten weten vaak niet welke eisen ze moeten stellen aan nieuwe hittebestendige ontwerpen van de stad, van wijken en van straten. Ze weten niet wat de gewenste hittebestendige eindsituatie van een ontwerp is en welke maatregelen nodig zijn om een hittebestendig ontwerp te realiseren. Kortom, de hitteopgave is nog onvoldoende bekend.

Daarom hebben de Hogeschool van Amsterdam, Hanzehogeschool Groningen, Wageningen Environmental Research (WENR) en Tauw een consortium gevormd met een twaalfstal gemeenten en twee gemeentelijke samenwerkingsverbanden<sup>3</sup>. Onderzoekers en professionals werkzaam bij deze gemeenten hebben de afgelopen twee jaar onderzocht hoe gemeenten inzicht kunnen krijgen in de vragen wat hun hitteopgave is en welke maatregelen en ontwerprichtlijnen effectief zijn.

In het eerste onderdeel van het onderzoek, over de hitteopgave, concluderen we dat vanuit het werkveld van ruimtelijke adaptatie de hitteopgave gezien kan worden als dat wat je moet doen om de stad en vooral de buitenruimte leefbaar en comfortabel te houden met het oog op hitte. De door ons ontwikkelde interactieve mindmap maakt zichtbaar welke problemen er door een hittebestendige buitenruimte kunnen worden voorkomen. We adviseren de hitteopgave voor een bepaald gebied te bepalen met getallen die aangeven hoe vaak hitte nu en in de toekomst zal optreden. Daarnaast adviseren wij drie soorten hittekaarten te gebruiken om inzicht in de hitteopgave te krijgen: temperatuurkaarten, hiterisicokaarten en toetsings- of maatregelenkaarten. Onze inzichten in de hitteopgave zijn voor een deel al verwerkt in de landelijke standaard voor hittekaarten.

In het onderdeel over hittemaatregelen hebben we ervoor gekozen van twee doelen uit te gaan. Het ene doel is tijdens hete periodes de gemiddelde luchttemperatuur in de stad zo laag mogelijk te houden. Dit kan het beste door meer verdamping te creëren. Over het algemeen leidt 10

<sup>3</sup> De deelnemende publieke partijen zijn de gemeenten Amsterdam, Arnhem, Apeldoorn, Beverwijk, Breda, Eindhoven, Groningen, Haarlem, Rheden, Leeuwarden en Tilburg. Daarnaast zijn er twee gemeentelijke samenwerkingsverbanden aangesloten (RIVUS en BUCH).

procentpunt<sup>4</sup> meer groen tot een verlaging van de luchttemperatuur met grofweg 0,5°C . Dat is op een hete dag natuurlijk niet veel (het verschil tussen 34,5 en 35°C), maar gemiddeld zal het overdag en 's nachts dan toch iets koeler zijn. Het andere doel is overdag de hitte te beperken en de stad leefbaar te houden door voldoende koele plekken te creëren. Daarvoor gebruiken we de gevoelstemperatuur PET als indicator. In de schaduw is de gevoelstemperatuur 10-15°C lager dan in de zon. Schaduw creëren is dan ook de meest effectieve manier om de gevoelstemperatuur omlaag te brengen.

Deze twee doelen hebben we samengevoegd in een drietal bruikbare en toetsbare ontwerprichtlijnen die gemeenten bij het (her)inrichten van hun openbare ruimte kunnen hanteren.

- > **Afstand tot koelte:** Iedere woning moet zich voldoende dicht bij een aangename en aantrekkelijke koele verblijfsplek bevinden (voorstel: binnen 300 m).
- > **Percentage schaduw op belangrijke looproutes en in buurten:** Er is op het heetst van de dag voldoende schaduw (voorstel minimaal 40%) op belangrijke looproutes, zodat essentiële functies in de stad voor iedereen bereikbaar blijven. Ook is er op het heetst van de dag op loopgebieden in buurten voldoende schaduw (voorstel minimaal 30%), zodat de buurten aantrekkelijk blijven.
- > **Percentage groen per buurt:** Er moet zoveel groen zijn dat er verdamping kan optreden en de gemiddelde luchttemperatuur wordt beperkt (voorstel afhankelijk per wijktype).

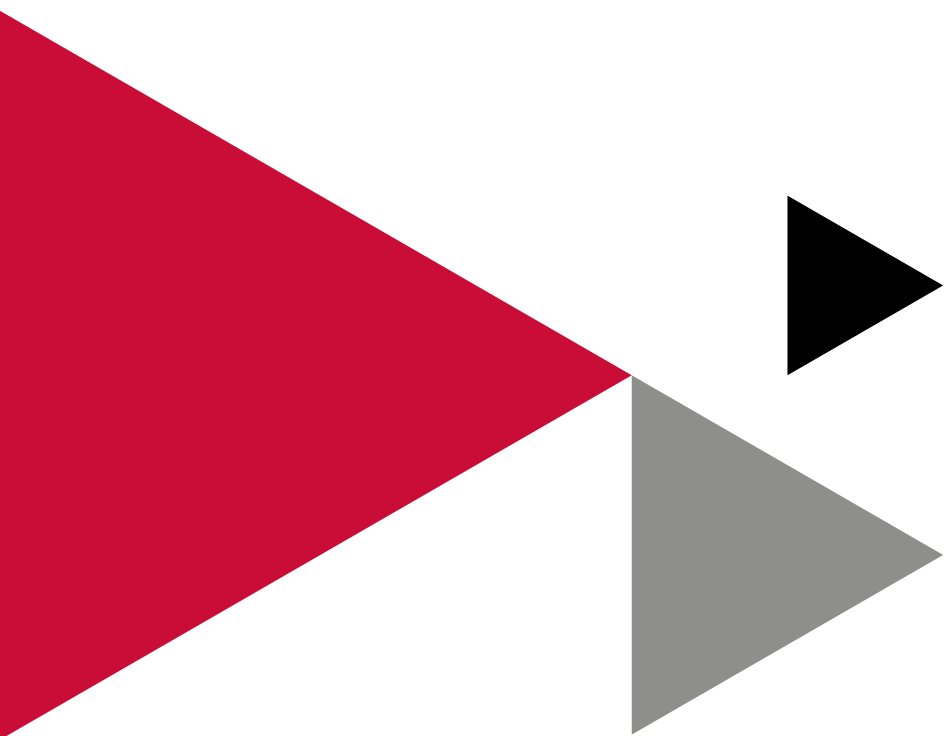
Voor deze richtlijnen hebben we duidelijke grenzen voorgesteld. We kiezen bewust niet voor visies als doelstelling (bijvoorbeeld 'meer groen is beter') of voor harde normen ten aanzien van temperaturen, omdat die of te vaag zijn, of niet controleerbaar of niet haalbaar. De professionals die bij een gemeente werken, kunnen deze concrete richtlijnen gebruiken bij het beoordelen van ontwerpen. De richtlijnen geven daarbij voldoende vrijheid aan de ontwerpers om zelf te bedenken hoe iets moet worden ingericht.

Het onderzoeksconsortium hittebestendige stad is van mening dat met de voorgestelde richtlijnen de hitteopgave tot eenvoudige hanteerbare regels is teruggebracht, omdat de richtlijnen het mogelijk maken om hitte als een extra ontwerpeis bij een (her)inrichtingsproject te hanteren.

Dus nu aan de slag! (en o ja, natuurlijk zijn er nog aanvullende onderzoeksvragen, en daar helpen we u graag mee verder in een volgend onderzoek).

<sup>4</sup> Procentpunt: eenheid voor het absolute verschil tussen waarden die in procenten worden uitgedrukt. Voorbeeld: een stijging van vier naar vijf procent is een stijging van één procentpunt, of een stijging van 25%.





# Inhoudsopgave

|     |                                                                   |     |
|-----|-------------------------------------------------------------------|-----|
| 1   | Inleiding                                                         | 12  |
| 1.1 | Aanleiding                                                        | 12  |
| 1.2 | Doelstelling                                                      | 13  |
| 1.3 | Leeswijzer                                                        | 14  |
| 1.4 | Kader en organisatie                                              | 15  |
| 2   | Hitteopgave                                                       | 18  |
| 2.1 | Het fenomeen hitte                                                | 18  |
| 2.2 | Gevolgen van hitte                                                | 21  |
| 2.3 | Risico door hitte                                                 | 25  |
| 2.4 | Hittekaarten                                                      | 26  |
| 2.5 | Slimme keuzes in het weergeven van de hitteopgave                 | 33  |
| 2.6 | Conclusies                                                        | 34  |
| 3   | Hittemaatregelen                                                  | 38  |
| 3.1 | Doelen van hittemaatregelen in de stedelijke inrichting           | 38  |
| 3.2 | Verkoelingsprincipes                                              | 38  |
| 3.3 | Resultaten modellering: maatregelen op stadsschaal                | 45  |
| 3.4 | Resultaten modellering: maatregelen op lokale schaal              | 47  |
| 3.5 | Maatregelenoverzicht                                              | 55  |
| 3.6 | Conclusies                                                        | 59  |
| 4   | Hitterichtlijnen                                                  | 64  |
| 4.1 | Richtlijnen hitte, tussen visie en temperatuurwaarde              | 64  |
| 4.2 | Koele plekken                                                     | 68  |
| 4.3 | Ons advies: drie ontwerprichtlijnen voor een hittebestendige stad | 73  |
| 4.4 | Conclusies                                                        | 84  |
| 5   | Conclusies                                                        | 88  |
|     | Literatuur                                                        | 92  |
|     | Bijlagen                                                          | 104 |

# Inleiding





1

*How Many*

# 1. Inleiding

## 1.1 Aanleiding

Wetenschappelijk onderzoek laat keer op keer zien dat het klimaat verandert. De internationale politiek heeft in Parijs afgesproken de temperatuurstijging te proberen te beperken tot +2°C (Verenigde Naties, 2015). De kans is echter groot dat we bij een stijging van 3 tot 4°C gaan uitkomen (IPCC, 2013). Duidelijk is dat ook als de temperatuur 'slechts' 2°C stijgt, het aantal warme dagen zal toenemen en er meer hittegolven in Nederland zullen optreden (KNMI, 2015). Dit betekent dat burgers meer last gaan krijgen van (extreme) hitte. Daar komt nog bij dat de steden zogenoemde hitte-eilanden zijn en dat vooral 's nachts de temperatuur zo'n 3-4°C (Echevarria Icaza, 2017) hoger kan zijn dan op het platteland. En in grote steden als Rotterdam kan het 's nachts wel 8°C warmer zijn (Heusinkveld en Holtslag, 2010). Bovendien wordt de groep ouderen die kwetsbaar is voor hitte groter vanwege de vergrijzing. Ook het overheidsbeleid dat ouderen langer thuis blijven wonen is een factor die in tijden van hitte de kwetsbaarheid verhoogt. Hitegolven vormen voor het komende decennium het klimaatrisico met de grootste waarschijnlijkheid en de grootste impact (>100 dodelijke slachtoffers per event) (PBL, 2015).

De Deltabeslissing Ruimtelijke adaptatie (Deltaprogramma, 2014) beoogt dat Rijk, provincies, waterschappen en gemeenten samen zorgen dat Nederland in 2050 zo klimaatbestendig mogelijk is ingericht. Gemeenten, waterschappen en provincies zijn relatief ver met thema's als overstromingsrisico's en wateroverlast, iets minder ver met droogte en **het minst ver met het thema hittestress** (PBL, 2016).

Duidelijk is dat hittegolven vaker zullen optreden: het aantal nachten boven 20°C neemt toe van nu ongeveer één week per jaar tot 2 à 4 weken per jaar in het jaar 2050 (Klimaat-effectatlas, 2019). De maatregelen die nodig zijn, liggen op het vlak van zorg (zorgen voor de kwetsbare mensen), de gebouwen (de binnenruimte koel houden) en de openbare ruimte (de buitenruimte aangenaam en aantrekkelijk houden). De hittebestendige inrichting van de buitenruimte is een van de onderwerpen waarvoor aandacht nodig is en waarover nog veel kennis ontbreekt.

Gemeenten hebben de opgave om vanaf 2020 bij herinrichting van de stad deze voldoende klimaatbestendig te laten zijn. Over het onderwerp **hittebestendig inrichten** van de buitenruimte speelde bij het begin van dit onderzoek een aantal belangrijke vraagstukken die nu nog steeds actueel zijn:

- > Het is niet duidelijk wanneer een ontwerp (voor een herinrichting) *voldoende hittebestendig* is.
- > Het is niet duidelijk welke maatregelen de bij de openbare ruimte betrokken professionals zouden moeten kiezen om de stad voldoende koel te houden. Ook is niet duidelijk hoe ze daarbij rekening moeten houden met verschillen in gebruik van de openbare ruimte: denk aan gebieden met veel ouderen, of winkelgebieden en andere gebieden met veel voetgangers. Kies je bijvoorbeeld voor witte daken, groene gevels of fontein?
- > Er zijn geen normen en geen duidelijke doelstellingen of richtlijnen.

Zonder een goede kennis van het klimaatbestendig en vooral het hittebestendig inrichten van de stad kunnen gemeenten geen plannen maken of beoordelen die bijdragen aan de klimaatbestendigheid. Daardoor kunnen ze niet voldoen aan de opgave om vanaf 2020 klimaatbestendig te zijn.

## 1.2 Doelstelling

Voor u ligt het resultaat van twee jaar praktijkgericht onderzoek dat het kennishiaat omtrent de hittebestendige inrichting in steden wil verkleinen. Ook wil het de professional **handvatten geven voor een hittebestendige stedelijke inrichting van de buitenruimte**. Wij richten ons op professionals met verschillende achtergronden, bijvoorbeeld: stedenbouwkundigen, landschapsarchitecten, hydrologen, planologen, civiel technici, klimaatambassadeurs, beleidsmedewerkers klimaatadaptatie, ontwerpers, groenbeheerders, wegbeheerders en waterbeheerders. Zij werken bij gemeenten maar ook bij bedrijven die gemeenten helpen. We hebben de ruimte genomen de nodige concepten en achtergronden uit te leggen, zodat de professionals met kennis van zaken eigen en beargumenteerde keuzes kunnen maken om de stad voldoende hittebestendig in te richten.

Omdat het onderwerp nog te veel in ontwikkeling is, is dit niet een 'kookboek' geworden waarin staat 'doe dit en dit', maar een basisboek waarin in staat 'weet dit en dit'.



Figuur 1.1 Onderzoeksopzet.

De centrale onderzoeksvraag is:

> Wanneer is een stad, wijk of straat voldoende hittebestendig?

Deze vraag is opgesplitst in een aantal deelvragen verdeeld over drie onderdelen: hitteopgave, hittemaatregelen, en hiterichtlijnen zoals in figuur 1.1:

### **1. Hiteopgave**

- 1.1. Met welke gevolgen van hitte in de stad moet je rekening houden als je de buitenruimte (her)inricht? Wat is de hitteopgave van een stad, wijk of straat?
- 1.2. Welke data en kennis hebben gemeentelijke professionals nodig om te kiezen waar welke maatregelen nodig zijn? Denk hier bijvoorbeeld aan hittekwaetsbaarheidskarten.

### **2. Maatregelen in de openbare ruimte en aan gebouwen**

- 2.1. Welke maatregelen in de openbare ruimte en aan de schil van gebouwen zijn het effectiefst en efficiëntst? Denk bijvoorbeeld aan schaduw, bomen, gevelgroen, kleur en materiaal van de bestrating en gebouwschil.
- 2.2. Welke maatregelen kunnen gemeenten toepassen? Past het bijvoorbeeld in het budget en bij het beleid, is het acceptabel, spelen er andere belangen?

### **3. Ontwerprichtlijnen voor een voldoende hittebestendige inrichting van de stad**

- 3.1. Hoe vertaal je de hitteopgave en inzichten in maatregelen naar ontwerprichtlijnen voor professionals?
- 3.2. Welke ontwerprichtlijnen werken in de praktijk?

## **Beperking**

Binnen het thema van de hittebestendige stad hebben wij ons in dit onderzoek beperkt tot de hittebestendige inrichting van de buitenruimte. We leggen wel uit wat alle gevolgen van hitte in de stad zijn, maar we gaan niet nader in op adaptatiemaatregelen op het sociale vlak of met betrekking tot zorg of gedrag. Ook behandelen we niet de noodzakelijke maatregelen aan gebouwen om het binnen koel te houden. Daarnaast: hittebestendigheid is vanzelfsprekend slechts een van de vele aspecten die een rol spelen bij de inrichting van de openbare ruimte. Afweging van het belang van die verschillende aspecten is niet het doel van dit onderzoek

## **1.3 Leeswijzer**

Hoofdstuk 2 gaat over de hitteopgave. Het geeft inzicht in de manier waarop de zomerse temperaturen zich in Nederland ontwikkelen en wat de gevolgen daarvan zijn. We laten zien met welke karten je hitte en hittekwaetsbaarheden in beeld kunt krijgen. Er volgt hieruit echter geen eenduidige definitie van de hitteopgave. Daarvoor is inzicht in de maatregelen nodig en dat vertaalt zich uiteindelijk in richtlijnen.

In hoofdstuk 3 vertellen we welke hittemaatregelen er zijn en hoe deze gebaseerd zijn op verschillende verkoelingsprincipes. We leggen uit welke maatregelen bijdragen aan een stadsbrede verlaging van de luchttemperatuur en welke kunnen worden ingezet om lokaal aangename koele plekken te creëren waar de gevoelstemperatuur lager is. Daarbij geven we een overzicht van de effectiviteit van maatregelen op basis van eigen onderzoek en literatuuronderzoek.

Tot slot tonen we in hoofdstuk 4 een set van richtlijnen waarmee je een stad, wijk of straat hittebestendig kunt inrichten.

## 1.4 Kader en organisatie

Het onderzoek is medegefinancierd vanuit de regeling RAAK-publiek van Regieorgaan SIA, onderdeel van de Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO). RAAK-publiek financiert onderzoeksprojecten van hogescholen in samenwerking met de publieke sector. De regeling stimuleert samenwerking en kennisuitwisseling tussen hogescholen en professionals uit de publieke sector en heeft als doel het creëren van ruimte voor praktische innovaties die direct aansluiten op de dienstverlening door de sector.

Het onderzoek is uitgevoerd door een consortium uit de publieke sector en kennisinstellingen. De volgende kennisinstellingen en specialisten vormden het projectteam:

- > Hogeschool van Amsterdam, faculteit Techniek, Onderzoeksprogramma Urban Technology is penvoerder en biedt een toonaangevende en diverse onderzoeksgroep op het gebied van hitte in de stad. Bovendien heeft de onderzoeksgroep veel nauwe contacten met gemeenten in de omgeving.
- > Wageningen Environmental Research (WENR) is het kennisadviesbureau gekoppeld aan de WUR. WENR beschikt over specialistische kennis van hitte in de stad en met name van het modelleren van temperaturen op schaal van stad en straat.
- > Tauw heeft veel gemeenten geadviseerd over het klimaatbestendig inrichten van de stedelijke leefomgeving. Met deze praktijkervaring loopt Tauw voorop in het ontwikkelen van een analyse over hitte in de stad.
- > Hanzehogeschool Groningen, Kenniscentrum Noordruimte doet met en voor gemeenten in Noord-Nederland onderzoek naar klimaatadaptatie.

De specialisten van de publieke sector in het consortium kwamen uit de gemeenten Amsterdam, Arnhem, Apeldoorn, Beverwijk, Breda, Eindhoven, Groningen, Haarlem, Leeuwarden, Rheden en Tilburg. Daarnaast zijn er twee gemeentelijke samenwerkingsverbanden aangesloten (RIVUS<sup>5</sup> en BUCH<sup>6</sup>). Ongeveer de helft van de gemeenten verzorgt casestudies. Alle gemeenten brengen hun eigen ervaring in over het vaststellen van de hitteopgave, over de bruikbaarheid van hittekaarten en over het zoeken naar pragmatische ontwerprichtlijnen. Daarnaast werd het onderzoek ondersteund door een divers klankbord met brede kennis over het klimaatbestendig inrichten van steden: City Deal Klimaatadaptatie, De BouwCampus, Deltaprogramma Ruimtelijke adaptatie, gemeenten Heemskerk en Utrecht, GGD Amsterdam, Klimaatverbond Nederland, ProRail, Provincie Noord-Brabant, Stichting CAS, VNG en Wetterskip Fryslân.

Het onderzoeksbudget heeft het mogelijk gemaakt dat het onderzoeksteam, bestaande uit ervaren onderzoekers met verschillende disciplines, zich twee jaar heeft kunnen buigen over dit interessante onderwerp. Het heeft daardoor veel vragen uit de praktijk kunnen beantwoorden en een keur aan relevante kennis beschikbaar kunnen maken voor de praktijk.

<sup>5</sup> RIVUS: samenwerkingsverband tussen de gemeenten Dalfsen, Deventer, Kampen, Olst-Wijhe, Raalte, Staphorst, Zwartewaterland, Zwolle en Waterschap Drents Overijsselse Delta.

<sup>6</sup> BUCH: Bergen NH, Uitgeest, Castricum, Heiloo.

A photograph of a modern, multi-story apartment building. The building has a textured, brownish-grey facade. A balcony on the second floor is visible, featuring a blue metal railing. On the balcony, there are two white laundry items hanging on a line, a yellow patio umbrella, and a white patio umbrella. A small potted plant with pink flowers sits on the balcony. The building is surrounded by green trees, and a dark door is visible on the ground floor. The text "Hitteopgave" is overlaid in white on the lower part of the image.

**Hitteopgave**



2

## 2. Hitteopgave

De centrale vraag die we in dit hoofdstuk willen beantwoorden, is: **'Wat is de hitteopgave?'** Met de hitteopgave bedoelen we 'dat wat je moet doen om je stad hittebestendig te maken'. De opgave is dus het verschil tussen hoe je wilt dat het gaat worden en hoe het nu is of wordt door klimaatverandering. Dat hoeft niet concreet te zijn, het kan juist ook globaal zijn.

Vanuit het werkveld van ruimtelijke adaptatie kan de hitteopgave worden gezien als het **leefbaar** en **comfortabel** houden van de buitenruimte. Maar de hitteopgave is breder dan alleen de buitenruimte. Het gaat in de hitteopgave om alle niet-acceptabele gevolgen van hitte en hoe je die tegengaat met aanpassingen in de buitenruimte, aan gebouwen of in gedrag.

Het doel van dit hoofdstuk is om gemeenten en ruimtelijke professionals handvatten aan te reiken waarmee zij de eigen hitteopgave kunnen formuleren. Daartoe leggen we uit:

- > wat het fenomeen hitte is en wat het hitte-eilandeffect is;
- > welke temperatuurscenario's Nederland kan verwachten;
- > wat de gevolgen van hitte in de stad zijn;
- > wat het hiterisico is;
- > welke hittekaarten de hitteopgave in beeld kunnen brengen.

Vervolgens geven we tips om de hitteopgave met hittekaarten te kunnen visualiseren. Tot slot vatten we samen hoe de hitteopgave voor de buitenruimte van een gebied kan luiden en hoe je deze kunt ondersteunen met getallen en kaartmateriaal.

NB Naast hittekaarten kunnen ook metingen helpen om inzicht te krijgen in de hitteopgave. Metingen kunnen de lucht- of gevoelstemperatuur op bepaalde momenten en plekken in de stad in beeld brengen. Als professionals bij gemeenten (of studenten) zelf metingen verrichten, vergroten zij bovendien hun inzicht in het verschijnsel van stedelijke hitte en de processen die bepalen waarom het ergens aangenaam of juist onaangenaam is. In het onderzoek hebben we twee meetmethodes verkend die ook inzicht kunnen geven in de hitteopgave. We hebben geëxperimenteerd met de *thermal walk* met als doel medewerkers van gemeenten het fenomeen hitte aan den lijve te laten ondervinden. Meer informatie over de thermal walk staat in bijlage 2. Een andere meetmethode die we verkend hebben maakt gebruik van mobiele apparatuur waarmee de ruimtelijke en temporele variatie in temperatuur onderzocht kan worden. Zie hiervoor bijlage 3.

### 2.1 Het fenomeen hitte

#### 2.1.1 Van wereldschaal naar straatniveau

Op wereldschaal zijn er grote variaties in de hitteproblematiek. In landen dicht bij de evenaar met weinig vegetatie kunnen luchttemperaturen oplopen tot 50°C. In bijvoorbeeld India vormt de hitte een groot probleem vanwege de combinatie van hoge temperaturen en weinig (financiële) mogelijkheden voor mensen om zich aan te passen aan of zich te beschermen tegen de hitte. In mediterrane landen zijn de zomers over het algemeen

warmer dan in Nederland en zien we dat de architectuur zich met kleine ramen, witte materialen en arcades heeft aangepast aan het klimaat.

In tegenstelling tot India heerst in Nederland een relatief gunstig klimaat, met – in de afgelopen millennia – relatief koele zomers. Door klimaatverandering komen er nu echter steeds vaker hittegolven en extreem hete dagen voor, zoals we in 2019 ervaren hebben. Gebouwen en buitenruimte in Nederland zijn daar vaak nog niet op ingericht. Zo blijft de warmte dikwijls hangen in de Nederlandse voor de winter geïsoleerde huizen en zijn pleinen en straten vaak volledig verhard en zonder bankjes in de schaduw.

Maar het wordt niet overal in Nederland even heet. Aan de kust is er meer sprake van een zeeklimaat, met meer wind en mildere temperaturen in zomer (zie ook tabel 2.1) en winter. In oostelijke en zuidelijke richting wordt het effect van de zee kleiner en zijn de temperaturen in de zomer hoger en in de winter lager.

Daarnaast zijn er verschillen in hitte als gevolg van de inrichting en kan de hitte per wijk verschillen. Afhankelijk van de wijktypologie warmt een wijk meer of minder op (Kleerekoper, 2016). Vooral in wijken met compacte bebouwing, veel verharding en weinig groen, kunnen temperaturen enkele graden hoger zijn dan elders in de stad (Van Hove et al., 2015).



### 2.1.2 Nu en in de toekomst

Door klimaatverandering zullen de gemiddelde temperaturen in de zomer en het aantal zomerse en tropische dagen in de toekomst toenemen (Tabel 2.1; KNMI, 2015). Hoeveel hete dagen en nachten we precies kunnen verwachten, hangt af van hoe de gemiddelde temperatuur wereldwijd zich gaat ontwikkelen en met welk luchtstromingspatroon Nederland te maken gaat hebben. Het KNMI heeft daarom vier klimaatscenario's opgesteld, waarbij rekening is gehouden met een **gematigd** ( $G_L$  en  $G_H$ ) of **warm** ( $W_L$  en  $W_H$ ) scenario voor de gemiddelde temperatuur wereldwijd en een **lage** ( $G_L$  en  $W_L$ ) of **hoge** waarde ( $G_H$  en  $W_H$ ) voor het luchtstromingspatroon.

Tabel 2.1 laat zien dat extreme hitte vaker zal voorkomen in de toekomst. Daarnaast blijkt dat het aantal hete dagen (nu en in de toekomst) in Zuidoost-Nederland sterk verschilt met die in Noordwest-Nederland. Het aantal zomerse en tropische dagen ligt nu met een verschil van respectievelijk 22 en 5 dagen duidelijk hoger in het zuidoosten van Nederland en dit verschil neemt in de toekomst toe.

Tabel 2.1. Huidige zomerklimaat (1981-2010) en klimaatscenario's voor 2050 voor Maastricht en De Kooy bij Den Helder (Bron: KNMI, 2015).

| Indicator                                      | Maastricht     |            |            |            |            | De Kooy bij Den Helder |            |            |            |            |
|------------------------------------------------|----------------|------------|------------|------------|------------|------------------------|------------|------------|------------|------------|
|                                                | Huidig klimaat | $G_L$ 2050 | $G_H$ 2050 | $W_L$ 2050 | $W_H$ 2050 | Huidig klimaat         | $G_L$ 2050 | $G_H$ 2050 | $W_L$ 2050 | $W_H$ 2050 |
| Gemiddelde temperatuur in de zomer (°C)        | 17,5           | 18,6       | 19,0       | 19,3       | 20,0       | 16,4                   | 17,4       | 17,7       | 18,1       | 18,6       |
| Aantal zomerse dagen per jaar <sup>7</sup>     | 32             | 40         | 44         | 47         | 55         | 9                      | 12         | 14         | 15         | 19         |
| Aantal tropische dagen per jaar <sup>8</sup>   | 6              | 9          | 12         | 13         | 18         | 1                      | 1          | 2          | 2          | 4          |
| Aantal tropische nachten per jaar <sup>9</sup> | 0              | 1          | 2          | 4          | 5          | 0                      | 2          | 2          | 4          | 5          |

### 2.1.3 Het probleem: hitte of het stedelijk hitte-eiland?

In de afgelopen 10 jaar is er steeds meer aandacht ontstaan voor het hitte-eilandeffect van de Nederlandse steden (Van Hove et al., 2015). Uit verschillende onderzoeken bleek dat de luchttemperatuur van het stedelijk gebied in Nederland door het hitte-eilandeffect enkele graden hoger kan zijn dan op het platteland (Steenefeld et al., 2011; Brandsma en Wolters, 2012). Het hitte-eilandeffect werd als nieuw probleem geformuleerd, met name voor de gezondheid van ouderen (Döpp, 2011). Door deze inzichten zijn waarschijnlijk veel klimaatadaptatie-experts onbewust en onterecht het hitte-eilandeffect gaan zien als het voornaamste hitteprobleem van steden (Martilli et al., 2020). In het werkveld lijkt het stedelijk hitte-eilandeffect soms synoniem te zijn geworden voor het hitteprobleem. Hitteproblemen in steden ontstaan echter niet alleen als gevolg van het hitte-eilandeffect. Ze ontstaan met name als gevolg van warm weer en doordat klimaatverandering het aantal hitte-extremen doet toenemen.

7 Een zomerse dag heeft een maximumtemperatuur van 25°C of hoger.

8 Een tropische dag heeft een maximumtemperatuur van 30°C of hoger.

9 Een tropische nacht heeft een minimumtemperatuur van 20°C of hoger.

Het is daarom goed om bij het definiëren van de hitteopgave helder te verwoorden waardoor hitte in de stad wordt veroorzaakt:

1. Problemen met hitte in het stedelijk gebied ontstaan tijdens periodes met warm weer (hete dagen en hete nachten). Deze periodes komen door klimaatopwarming steeds vaker voor.
2. Het stedelijk gebied versterkt de hitte op twee manieren:
  - a. Vooral in de avond en 's nachts zorgt het hitte-eilandeffect ervoor dat de **luchttemperatuur** in de stad een paar graden warmer is dan de omgeving (Steenefeld et al., 2011; Brandsma en Wolters, 2012). Het effect neemt toe als gevolg van stadsuitbreiding en -inbreiding. NB Een veelgehoord misverstand is dat het stedelijk hitte-eilandeffect de problemen overdag zou vergroten. Dat is niet waar. Overdag is het hitte-eilandeffect doorgaans klein (Oke et al., 2017).
  - b. Met name overdag kan de **gevoelstemperatuur** op bepaalde locaties in de stad onaangenaam hoog worden. Dat komt vooral doordat daar geen schaduw van bomen is of doordat bepaalde materialen veel warmte uitstralen, zoals asfalt en baksteen en de reflectie van zonnestraling door ramen en glazen gevels of zeer lichtgekleurde oppervlakken. Verschillen in de gevoelstemperatuur tussen verschillende plekken in de stad kunnen hierdoor oplopen tot 22°C (Klok et al., 2019).

## 2.2 Gevolgen van hitte

### 2.2.1 De mindmap – overzicht van gevolgen

Hitte heeft vele gevolgen. Deze zijn in te delen in vijf hoofdthema's: netwerken, water, leefbaarheid, buitenruimte en gezondheid. Deze thema's zie je terug in de mindmap 'Hitte in de stad' (Klok & Kluck, 2018; figuur 2.1). De mindmap hebben we in 2017 ontwikkeld en in 2019 een update gegeven en is nu als interactieve tool beschikbaar, als onderdeel van de gestandaardiseerde stresstest Ruimtelijke adaptatie ([www.hittebestendigestad.nl/mindmap/](http://www.hittebestendigestad.nl/mindmap/)). De mindmap ondersteunt gemeenten en lokale overheden bij de voorbereiding op de risicodialoog over hitte. Daarnaast helpt de mindmap hen om de belangrijkste problemen te verkennen die door hitte kunnen optreden en om de hitteopgave te formuleren. De interactieve mindmap toont in totaal 24 gevolgen van extreme hitte voor stedelijk gebied. Voor elk gevolg is een factsheet beschikbaar met een beknopte uitleg van het probleem. Daarin staat ook vermeld op welke manier kaarten en andere informatie het gevolg inzichtelijk kunnen maken. Iedere factsheet sluit af met suggesties voor maatregelen.

In voorbereiding op de risicodialoog kun je de interactieve mindmap gebruiken om te bepalen welke gevolgen, onderwerpen of partijen bij de dialoog moeten worden betrokken. In de tool kun je namelijk aangeven of je een gevolg in deze fase van het proces wilt meenemen of niet. Deze keuze is zichtbaar in de mindmap, zodat er uiteindelijk een overzicht ontstaat van de meest relevante gevolgen van hitte voor de gemeente in kwestie. Zo helpt de mindmap het werkveld ruimtelijke adaptatie om de gevolgen van hitte voor het ruimtelijk domein te duiden zonder de andere gevolgen te vergeten.

De mindmap is vooral een tool om in gesprek te gaan en is altijd in ontwikkeling. Het kan zijn dat de mindmap voor sommige situaties niet compleet is en dat er nog andere hitteproblemen van belang zijn. Het is goed om dit te beseffen.



Figuur 2.1. Mindmap van de belangrijkste gevolgen van extreme hitte voor de stad.

### 2.2.2 Diverse oorzaken en gevolgen van hitte en diverse maatregelen

Om meer grip te krijgen op de hitteproblematiek is het zinvol te onderzoeken welke fysieke aspecten van hitte de kernoorzaak zijn van de hittegevolgen. Tabel 2.2 toont voor ieder gevolg uit de mindmap op welke manier dit samenhangt met de temperatuur: de luchttemperatuur, de gevoelstemperatuur, de binnentemperatuur, de nachttemperatuur of de dagtemperatuur.

Uiteindelijk zijn natuurlijk altijd hoge buitentemperaturen de oorzaak, maar er zijn ook gevolgen die vooral gerelateerd zijn aan hitte in gebouwen, dus aan hoge binnentemperaturen. Ook zijn er gevolgen die voornamelijk een relatie hebben met een hoge gevoelstemperatuur buiten. De tabel laat zien dat sommige gevolgen meer gekoppeld zijn aan hitte overdag en andere aan hitte 's nachts. We horen overigens vaak in het werkveld dat het hitteprobleem veelal een nachtelijk probleem zou zijn, omdat het hitte-eilandeffect dan het sterkst is. Op zo'n moment wordt vergeten dat ook de hoge temperaturen overdag tot problemen leiden. Kortom, de problemen die door hitte in de stad ontstaan, treden zowel overdag als 's nachts op. Daarnaast treden sommige problemen pas op na een langdurige periode van hoge temperaturen terwijl andere al kunnen ontstaan op een enkel heet moment.

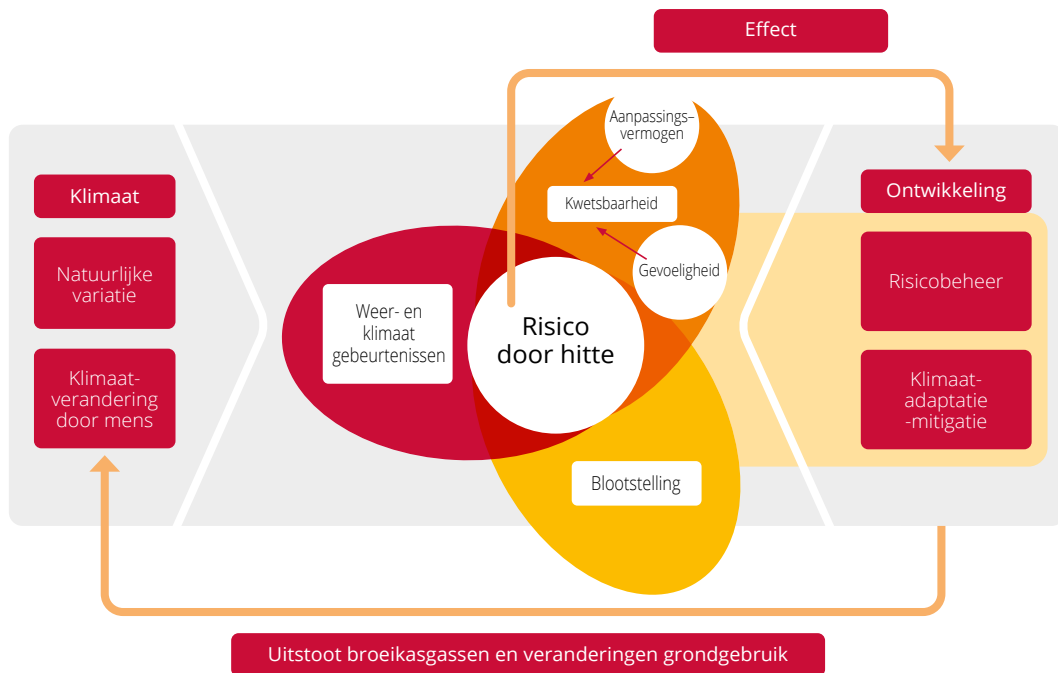
De laatste kolom van tabel 2.2 laat zien in welk domein de meest effectieve maatregelen kunnen worden genomen. Hieruit blijkt dat ruimtelijke adaptatie alleen een deel van de hitteproblemen kan oplossen. Zorg voor de medemens, gedragsverandering en aanpassingen aan gebouwen zijn in veel gevallen effectievere maatregelen dan ruimtelijke adaptatie. Uiteindelijk is het voor de realisatie van een hittebestendige stad nodig om verschillende domeinen en werkvelden te verbinden.



Tabel 2.2. Gevolgen van extreme hitte in de stad gekoppeld aan 1) verschillende temperatuurvariabelen die verschillen in type en vorm en 2) het domein waaraan de meest effectieve maatregelen zijn gekoppeld. Hierin staat 'anders' voor andere maatregelen dan die in ruimtelijke inrichting, aan gebouwen of in zorg en gedrag.

| Thema        | Gevolg van extreme hitte in de stad | Temperatuurvariabelen    |                          |                           |           |             |                       |                      | Domein voor<br>meest effectieve<br>adaptatiemaatregelen |
|--------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|-----------|-------------|-----------------------|----------------------|---------------------------------------------------------|
|              |                                     | Type                     |                          |                           | Vorm      |             |                       |                      |                                                         |
|              |                                     | Luchtttemperatuur binnen | Luchtttemperatuur buiten | Gevoelstemperatuur buiten | Dagwaarde | Nachtwaarde | Een enkele piekwaarde | Langere hete periode |                                                         |
| Gezondheid   | slaapproblemen                      | X                        |                          |                           |           | X           |                       | X                    | gebouw                                                  |
|              | gezondheidsproblemen                | X                        | X                        | X                         | X         | X           | X                     | X                    | zorg en gedrag                                          |
|              | gezondheidszorg en hulpdiensten     | X                        | X                        | X                         | X         | X           | X                     | X                    | zorg en gedrag                                          |
|              | ziekenhuisopnames                   | X                        | X                        | X                         | X         | X           | X                     | X                    | zorg en gedrag                                          |
|              | sterfte                             | X                        | X                        | X                         | X         | X           | X                     | X                    | zorg en gedrag                                          |
| Buitenruimte | schade aan natuur                   |                          | X                        |                           | X         |             |                       | X                    | ruimtelijke inrichting                                  |
|              | druk op buitenruimte                |                          | X                        | X                         | X         |             | X                     |                      | ruimtelijke inrichting                                  |
|              | sociale overlast                    |                          | X                        | X                         | X         | X           | X                     |                      | zorg en gedrag                                          |
|              | evenementen                         |                          | X                        | X                         | X         |             | X                     |                      | zorg en gedrag                                          |
| Leefbaarheid | comfort in de stad                  |                          | X                        | X                         | X         |             | X                     | X                    | ruimtelijke inrichting                                  |
|              | arbeidsproductiviteit buiten        |                          | X                        | X                         | X         |             | X                     |                      | zorg en gedrag                                          |
|              | comfort in gebouwen                 | X                        |                          |                           | X         | X           |                       | X                    | gebouw                                                  |
|              | arbeidsproductiviteit binnen        | X                        |                          |                           | X         |             |                       | X                    | gebouw                                                  |
|              | scholen en kinderopvang             | X                        |                          | X                         | X         |             |                       | X                    | zorg en gedrag                                          |
|              | detailhandel                        |                          | X                        | X                         | X         |             | X                     |                      | ruimtelijke inrichting                                  |
| Water        | koelwater                           |                          | X                        |                           | X         | X           |                       | X                    | anders                                                  |
|              | waterkwaliteit                      |                          | X                        |                           | X         | X           |                       | X                    | anders                                                  |
|              | watervraag                          |                          | X                        |                           |           |             |                       | X                    | anders                                                  |
|              | drinkwaterkwaliteit                 |                          | X                        |                           | X         |             |                       | X                    | ruimtelijke inrichting                                  |
| Netwerken    | energieblack-out                    |                          | X                        |                           | X         | X           | X                     | X                    | anders                                                  |
|              | energievraag                        | X                        | X                        |                           | X         | X           | X                     | X                    | anders                                                  |
|              | bestrating                          |                          | X                        |                           | X         |             | X                     |                      | ruimtelijke inrichting                                  |
|              | bruggen                             |                          | X                        |                           | X         |             | X                     |                      | anders                                                  |
|              | rails                               |                          | X                        |                           | X         |             | X                     |                      | anders                                                  |

## 2.3 Risico door hitte



Figuur 2.2. Het risico door hitte (naar IPCC, 2012).

Het risico als gevolg van hitte is een optelsom van een aantal factoren, zie figuur 2.2. Het risico wordt in de eerste plaats veroorzaakt door de intensiteit en duur van de hitte. Daarnaast hangt het risico af van de **blootstelling**: hoeveel mensen (of objecten/flora/fauna) er door de hitte worden getroffen. De blootstelling is groter wanneer het gebied waar hitte optreedt groter is of de bevolkingsdichtheid hoger. Tot slot hangt het risico af van de **kwetsbaarheid** van de mensen, de objecten, de flora of fauna. Deze kwetsbaarheid is op te splitsen in **gevoeligheid** en **aanpassingsvermogen**. Oudere mensen zijn kwetsbaarder voor gezondheidsrisico's als gevolg van hitte doordat zij gevoeliger zijn, maar ook doordat hun aanpassingsvermogen vaak beperkter is.

Een voorbeeld: het hiterisico voor mensen in het centrum van Amsterdam wordt bepaald door hoe hoog de temperaturen oplopen in het centrum en hoe vaak dit voorkomt (de weersomstandigheden), hoeveel mensen er aan de hitte zijn blootgesteld (blootstelling), hoe gevoelig zij zijn doordat zij bijvoorbeeld eenzaam zijn en afhankelijk van thuiszorg (gevoeligheid), en hoe gemakkelijk zij zich kunnen aanpassen aan het hete weer door maatregelen te nemen in gedrag, aan gebouwen of in de inrichting van de buitenruimte (aanpassingsvermogen).

In de definitie van de hitteopgave kun je vervolgens aan al deze factoren aandacht geven op de volgende manier:

- > **Weeromstandigheid:** de hitteopgave is het grootst waar bijvoorbeeld de gevoelstemperatuur of het aantal tropische dagen per jaar een bepaalde waarde overschrijdt.
- > **Blootstelling:** de hitteopgave is het grootst waar de meeste mensen wonen of verblijven, bijvoorbeeld in het centrum of in winkelcentra.
- > **Gevoeligheid:** de hitteopgave is het grootst waar het percentage ouderen, chronisch zieken of kinderen hoog is of waar bijvoorbeeld verkeersstromen te maken hebben met beweegbare bruggen.
- > **Aanpassingsvermogen:** de hitteopgave is het grootst voor degenen die zich het minst makkelijk kunnen aanpassen, dus voor specifieke personen en op specifieke plekken, zoals wijken waar mensen wonen met een lager opleidings- en inkomensniveau.

Uiteindelijk lijkt een combinatie logisch: de opgave is het meest urgent op plekken waar het heet is en waar kwetsbare mensen wonen die niet kunnen ontsnappen aan hitte. Zie ook paragraaf 2.4.1 over hiterisicokaarten.

## 2.4 Hittekaarten

Hittekaarten zijn een handig hulpmiddel voor gemeenten om het probleem van hitte in de stad te onderzoeken en om te bepalen of ze een hitteopgave hebben. Er zijn veel soorten hittekaarten die je kunt gebruiken. Welke hittekaart het handigst is, hangt af van het doel dat je wilt bereiken. Hieronder geven we een overzicht van de hittekaarten waaruit je kunt kiezen.

### 2.4.1 Categorieën hittekaarten

Hittekaarten zijn grofweg te verdelen in zeven categorieën (figuur 2.3) die gekoppeld zijn aan het klimaatadaptatieproces van weten-willen-werken van het Deltaprogramma Ruimtelijke adaptatie en aan de doelen binnen dit proces:

- > Weten – Waar is het heet?
- > Willen – Waar is hitte een probleem? Of waar is hitte een probleem dat ik wil aanpakken?
- > Werken – Hoe ontwerp ik hittebestendig?



Figuur 2.3. De zeven categorieën hittekaarten. Bij elke kaart staat aangegeven in welk deel of welke delen van het klimaatadaptatieproces (weten-willen-werken) je de kaarten inzet.

**Klimatopenkaarten** (of *stedelijke klimaatzonekaarten*) brengen deelgebieden in de stad in kaart die eenzelfde landgebruik en bebouwingstypologie hebben en daardoor ook een soortgelijk stedelijk klimaat (Ren et al., 2011). Klimatopenkaarten geven aan welke deelgebieden koeler of warmer zijn tijdens een hete dag en sluiten dus aan bij het doel te identificeren waar het heet is.

**Temperatuurkaarten** (zie voorbeeld in figuur 2.4) tonen een inschatting van de lucht-, gevoels- of oppervlaktetemperatuur, op basis van modellen, metingen of satellietbeelden. De kaarten geven de temperatuur weer op een tijdstip op een hete dag, of geven een gemiddelde of maximum van een periode, zoals tijdens een hittegolf of een zomer. Temperatuurkaarten zijn vooral bedoeld om te verkennen waar de hitte het grootst is of waar het nog enigszins koel is.

Voorbeelden van temperatuurkaarten zijn:

- > de twee hittekaarten uit de gestandaardiseerde stresstest Ruimtelijke adaptatie: aantal hete nachten en gevoelstemperatuur (zie paragraaf 2.4.2);
- > de oppervlaktetemperatuur op basis van satellietbeelden;
- > het hitte-eilandeffect van verschillende wijken in een stad op een bepaald moment of over een periode.



Figuur 2.4. Voorbeeld van een temperatuurkaart. In dit geval van de gevoelstemperatuur (PET) in Middelburg volgens de Nederlandse standaard.

NB Temperatuurkaarten laten vooral zien welke gebieden heter zijn dan andere. Maar vergeet niet dat het op een hete dag eigenlijk overal heet is! De huidige en toekomstige problemen met hitte in de stad ontstaan meestal doordat het steeds vaker heet is en die hitte is overal in de stad merkbaar. Denk bijvoorbeeld aan de hittegolfdagen van de zomer van 2019: het was toen uitzonderlijk heet op alle plekken in de stad. Een temperatuurkaart van de stad laat zien waar het door het stedelijk effect tot iets meer of minder hitte leidt, maar problematisch heet is het op extreem hete dagen waarschijnlijk overal.

**Kwetsbaarheidskaarten** zijn kaarten waarop een combinatie van gevoeligheid voor hitte en aanpassingsvermogen wordt weergegeven. Deze kaarten laten zien waar hitte tot problemen kan leiden. Een voorbeeld is een hittekaart die ook aangeeft in welke gebieden eenzaamheid voorkomt of een kaart met informatie over de bevolkingsopbouw of het percentage thuiswonende ouderen. Wat hier niet in zit, is informatie over blootstelling, zoals het inwoneraantal van een buurt. Onder hittekwetsbaarheidskaarten vallen verder de kaarten die de locaties van kwetsbare groepen zoals seniorenwoningen, kinderdagverblijven of basisscholen of kwetsbare objecten zoals bruggen aanduiden.

**Risicokaarten** combineren temperatuurkaarten met blootstelling en kwetsbaarheid. Zo krijg je een kaart waarop je ziet waar in het gebied de hitte het grootst is in combinatie met de plaatsen waar de meest kwetsbare groepen mensen (of objecten of natuurgebieden, etc.) zich bevinden. Zo zal op een bedrijventerrein waar de temperaturen hoog oplopen het risico op hitteproblemen minder groot zijn dan in een versteende wijk met veel ouderen. Zie voor een voorbeeld en meer informatie bijlage 1.



**Toetsingskaarten** zijn bedoeld om doelstellingen op het gebied van hitte te toetsen (zie voorbeeld in figuur 2.5). Dat kan het toetsen zijn van het percentage schaduw, de afstand tot koele plekken vanaf elk woonadres of het percentage groen. In deze kaarten gaat het om het toetsen van ontwerprichtlijnen en het verkennen van wat nodig is voor een hittebestendig ontwerp. Ook geven toetsingskaarten weer waar hitte een probleem kan zijn. Voor een toetsingskaart is het nodig dat er een doelstelling, richtlijn of norm is gekozen.



Figuur 2.5. Voorbeeld van een toetsingskaart. In dit geval loopafstand-tot-koele in Nijmegen, waarbij de kleuren aangeven hoeveel minuten het lopen is naar een koele plek van minimaal 5000 m². De kaart gaat uit van een loopsnelheid van 4 km/uur (Kaartontwerp: Hester Bijen, Tauw).

**Kansenkaarten** laten *quick-wins* en *no regret*-maatregelen zien en geven zo een ruimtelijk beeld van de mogelijkheden om toe te werken naar een hittebestendig ontwerp. Arnhem maakte de hitte-attentiekkaart (Gemeente Arnhem, 2012). Hierop staat aangegeven welke maatregelen kunnen bijdragen aan het verminderen van de hitte in verschillende delen van de stad, en welke delen van de stad voor verkoeling zorgen, zoals uiterwaarden en parken.

**Maatregelenkaarten** zijn meestal temperatuurkaarten of toetsingskaarten waarop het effect van bepaalde hittemaatregelen is aangegeven, zoals het plaatsen van bomen of een zonnedoek. Je kunt de effecten van maatregelen kwantificeren, zoals is gedaan voor verstedelijkte wijken in Rotterdam (Kennis voor klimaat, 2011) en Haarlem (Kleerekoper et al., 2018).

#### 2.4.2 Basiskaarten gestandaardiseerde stresstest

De gestandaardiseerde stresstest Ruimtelijke adaptatie adviseert op dit moment twee temperatuurkaarten om de hitteopgave weer te geven: een met het aantal hete nachten per jaar en een gedetailleerde kaart van de gevoelstemperatuur buiten<sup>10</sup>.

##### ***Temperatuurkaart met het aantal hete nachten***

Deze kaart toont het aantal nachten per jaar waarop de luchttemperatuur boven de 20°C blijft. Deze kaart is beschikbaar in de klimaateffectatlas<sup>11</sup>. In Nederland beschouwen we het aantal keren per jaar dat de nachttemperatuur hoger blijft dan 20°C als een goede indicator voor de problemen die worden veroorzaakt door hete nachten. Als het buiten niet afkoelt tot onder de 20°C is het moeilijker om het binnen aangenaam koel te houden en om goed te slapen (Mureau et al., 2018). De nachttemperatuur heeft een sterk verband met andere gevolgen op het gebied van gezondheid, arbeidsproductiviteit, binnencomfort, oppervlaktewater, drinkwater en netwerken (zie tabel 2.2). Een kaart met het aantal hete nachten per jaar komt overigens aardig overeen met een kaart van het stedelijk hitte-eilandeffect, omdat het stedelijk hitte-eiland vooral door verschillen in de nachttemperatuur tot uiting komt, zoals is uitgelegd in paragraaf 2.1.3.

##### ***Gedetailleerde kaart van de gevoelstemperatuur buiten***

Deze kaart heeft als doel een eerste indruk te geven van de hitte overdag en gaat daarmee over gezondheid en de leefbaarheid van de buitenruimte (zie tabel 2.2). De kaart laat in hoog ruimtelijk detail zien op welke locaties de stedelijke inrichting tijdens een hete dag tot aangenaam koele of onaangenaam hete locaties leidt. De kaart biedt daarmee een basis voor een risicodialoog over het nemen van hittemaatregelen in de buitenruimte.

Als gevoelstemperatuur toont de kaart de PET-index. PET staat voor Physiological Equivalent Temperature. De PET-index is gebaseerd op de energiebalans van het menselijk lichaam (Höppe., 1999, en zie ook paragraaf 3.2.2) en is de meest gebruikte index in Europa om de gevoelstemperatuur aan te duiden (Matzarakis et al., 1999).

<sup>10</sup> <https://ruimtelijkeadaptatie.nl/stresstest/bijsluiter/hitte/>

<sup>11</sup> <http://www.klimaateffectatlas.nl/>

De PET is een functie van een aantal meteorologische variabelen op lichaamshoogte: luchttemperatuur, windsnelheid, luchtvochtigheid, directe en gereflecteerde zonnestraling en warmtestraling van objecten in de omgeving. De interactie tussen lichaam en omgeving bepaalt hoe warm of koud men het lokale microklimaat ervaart. Zo kan het lichaam bij een hogere luchttemperatuur zijn warmte minder goed kwijt, maar een hogere windsnelheid maakt dat weer makkelijker. Bij een hogere luchtvochtigheid kan er minder zweet van de huid ontsnappen, en dus ook minder warmte. Hoe feller de zonnestraling of hoe meer warme objecten in de omgeving, hoe meer straling het lichaam ontvangt. De meteorologische parameters verschillen per locatie en worden bepaald door de inrichting en het microklimaat van de omgeving.

PET is gekoppeld aan thermische perceptie (hoe we de omgeving thermisch gezien ervaren), variërend van zeer koud tot zeer heet, en aan de mate van fysiologische stress (tabel 2.3). Tussen een PET-waarde van 18 en 23°C ervaren we de omgeving voornamelijk als aangenaam en is er geen sprake van thermische stress. Boven 23°C PET kan al hittestress ontstaan. Vanaf 41°C PET is er sprake van extreme hittestress.

*Tabel 2.3. PET-classes, thermische perceptie en mate van fysiologische stress (Matzarakis et al., 1999).*

| PET (°C) | Thermische perceptie | Mate van fysiologische stress |
|----------|----------------------|-------------------------------|
| < 4      | Zeer koud            | Extreme koudestress           |
| 4 – 8    | Koud                 | Sterke koudestress            |
| 8 – 13   | Koel                 | Gematigde koudestress         |
| 13 – 18  | Beetje koel          | Lichte koudestress            |
| 18 – 23  | Aangenaam            | Geen thermische stress        |
| 23 – 29  | Beetje warm          | Lichte hittestress            |
| 29 – 35  | Warm                 | Gematigde hittestress         |
| 35 – 41  | Heet                 | Sterke hittestress            |
| > 41     | Zeer heet            | Extreme hittestress           |

In 2019 hebben onderzoekers van de WUR een recept ontwikkeld waarmee iedereen in Nederland op dezelfde manier een PET-kaart kan maken (Nijs et al., 2019). Deze standaard PET-kaart geeft voor een hete dag in hoog ruimtelijk detail de verwachte gevoelstemperatuur in de stad weer. De PET-kaart wordt gemaakt op basis van ruimtelijke informatie (hoogtekaart, luchtfoto, gebouwen-, water-, en groenoppervlakken) en meteorologische uurwaarden van een nabijgelegen KNMI-meetstation. Met de ruimtelijke informatie worden op leefniveau (lichaamshoogte) de openheid voor zon en wind, de warmteuitstraling van groen en verhard oppervlak, de schaduw en de door het hitte-eilandeffect veroorzaakte luchttemperatuurverschillen bepaald. Vervolgens worden deze gegevens gecombineerd met meteorologische uurwaarden van buiten de stad om een inschatting te doen van de lokale PET-waarden in de stad. Hiervoor wordt een regressiemodel gebruikt dat gebaseerd is op bakfietsmetingen op de tropisch hete dag van 2 augustus 2013, 14:00 uur lokale tijd.



*Figuur 2.6. Voorbeeld van een PET-middaggemiddeldekaart van het centrum van Breda.*

Figuur 2.6 geeft een voorbeeld van een PET-kaart voor het centrum van Breda. De kaart geeft de grootste temperatuurverschillen boven verhard oppervlak tussen plekken in de schaduw en plekken in de zon (ca. 15°C). De kaart toont veel kleinere verschillen tussen verharde en groene oppervlakken (1 tot 2°C). Naast schaduw heeft vooral de dichtheid van bebouwing invloed op de PET-waarde. Dichtere bebouwing leidt tot een lagere windsnelheid, waardoor de gevoelstemperatuur stijgt.

Een PET-kaart ziet er met het hoge ruimtelijke detail erg overtuigend uit, maar de modellering is een eerste poging om met relatief beperkte middelen voor heel Nederland een standaard te definiëren. Er zijn een aantal beperkingen:

- > Het is onzeker of de wind goed wordt ingeschat met het ontwikkelde recept. De vertaling van de wind gemeten op het KNMI-station buiten de stad naar een waarde met een hoge ruimtelijke resolutie in de stad, gebeurt namelijk op basis van een model dat niet voor een resolutie van 1 m<sup>2</sup> is bedoeld. Daardoor worden specifieke lokale windpatronen en het effect daarvan op de PET mogelijk onvoldoende gesimuleerd.
- > Het model gebruikt geen informatie over soorten bouwmaterialen (muren, schuttingen, glazen puien). Opwarming en uitstraling van materialen worden alleen heel algemeen verrekend via het stedelijke hitte-eilandeffect.
- > De standaard PET-kaart is een gemiddelde van de gehele middag. Plekken die de hele middag in de zon liggen komen veel heter naar voren dan plekken die maar even zon krijgen (figuur 2.6).

Tot slot: een enkele PET-hittekaart geeft niet aan waar de hitteproblemen het grootst zijn, maar geeft wel een indruk van de locaties waar de buitenruimte aangenaam koel of onaangenaam heet kan zijn tijdens een hete dag. De PET-hittekaart laat ook zien op welke plekken de inrichting kan worden verbeterd. Om de hitteopgave van een gebied echt goed in beeld te krijgen, adviseren we de PET-hittekaart te combineren met andere kaarten en informatiebronnen.

## 2.5 Slimme keuzes in het weergeven van de hitteopgave

Hoe geef je de hittekaarten weer? Met doordachte keuzes vergroot je de effectiviteit van de kaarten. Zorg er in ieder geval voor dat de weergave van de kaarten goed aansluit bij het doel en de doelgroep.

### 2.5.1 2D of 3D

De 2D-kaartweergave is het bekendst. Een voordeel van een 2D-kaart is dat hij vaak een goed overzicht kan geven. De weergave kan ook meerdere typen informatie (meerdere kaartlagen) in één kaart combineren, zoals aantallen bezoekers en gevoelstemperatuur.

Je kunt kaarten ook in 3D weergeven, waardoor de gebruiker bijvoorbeeld een beter beeld krijgt van hoogteverschillen tussen gebouwen of schaduweffecten. 3D-weergaves zijn vaak beter herkenbaar en spreken soms meer tot de verbeelding. Let op dat 3D-weergaves vooral geschikt zijn als het gaat om een klein projectgebied en voor het weergeven van een enkele kaartlaag. Als het gebied dat je wilt bespreken te groot is, of je wilt meerdere kaartlagen tegelijk laten zien, wordt een 3D-weergave snel onoverzichtelijk. Een 3D-weergave kan ook te mooi of te flitsend zijn waardoor ze afleidt van de opgave of het doel van de kaart.

### 2.5.2 Hoge of lage resolutie

Het voordeel van een hoge resolutie is de herkenbaarheid: mensen herkennen hun werk- of woonomgeving. Vaak wordt een hoge resolutie echter verward met een hoge nauwkeurigheid. Dit hoeft zeker niet zo te zijn. Ook met een onjuist rekenmodel kun je een kaart produceren op een schaal van centimeters. Deze schijnzekerheid is iets waarmee weinig rekening wordt gehouden en waarop commerciële organisaties soms handig inspelen.

Een lage resolutie kan als voordeel hebben dat de kaart overzicht biedt en kan daarom geschikt zijn om vragen te beantwoorden die op gemeenteniveau spelen. Een kaart met een lage resolutie is geschikt voor algemene communicatie over de plaatsen waar het heet en koel is in de stad. Een hogeresolutiekaart is meer geschikt voor specifieke adviezen op kleiner schaalniveau.

### 2.5.3 Statisch of interactief

Steeds vaker worden kaarten ook interactief weergegeven. Je kunt in- en uitzoomen, met een muisklik verschillende typen informatie laten zien en interactief berekeningen maken. Zo kun je bijvoorbeeld het effect van het plaatsen van een rij bomen op de gevoelstemperatuur berekenen terwijl de ontwerpers om de tafel zitten. Dit kan heel zinvol zijn als je vooraf heldere vragen hebt geformuleerd. Een aandachtspunt is dat een interactieve kaart ook snel te veel informatie kan opleveren, waardoor de gebruiker door de bomen het bos niet meer ziet. Vereisten voor een interactieve weergave zijn dus een gedegen voorbereiding, zeker als zulke kaarten gebruikt worden in een sessie. Maar dat geldt natuurlijk ook voor het gebruik van een statische kaart.

### 2.5.4 Momentopname of tijdsinterval

Het tijdsinterval dat de kaart weergeeft, heeft ook veel invloed op de effectiviteit van een kaart en bepaalt de boodschap. Een kaart kan gemiddelde temperaturen weergeven of temperaturen op een bepaald tijdstip. Momentopnames van een hete dag die nog vers in het geheugen ligt, spreken vaak meer tot de verbeelding en zijn makkelijker te interpreteren dan een kaart met gemiddelde temperaturen op een dag of in de zomer. Bij hitte werken gemiddelden vaak ook minder goed, omdat het juist om de extreme temperaturen gaat: dan ervaren mens en natuur immers de nadelige gevolgen.

Let op: kaarten die momentopnames of gemiddelden weergeven, geven geen informatie over het verloop van de temperaturen over een dag of bepaalde periode. Die informatie kan ook tot belangrijke inzichten leiden.

## 2.6 Conclusies

We begonnen dit hoofdstuk met de centrale vraag: wat is de hitteopgave? Vanuit het werkveld van ruimtelijke adaptatie kan de hitteopgave worden gezien als dat wat je moet doen om de stad en vooral de buitenruimte bij hitte leefbaar en comfortabel te houden. Dat betekent dat je alle niet-acceptabele gevolgen van hitte in de stad moet tegengaan door aanpassingen te doen in de buitenruimte.

Toch is op de vraag 'Wat is de hitteopgave?' geen eenduidig antwoord te geven. De stad voldoende leefbaar en comfortabel inrichten kan betrekking hebben op de optredende temperaturen en het verminderen van het hitterisico. Maar in tegenstelling tot wateroverlast is er geen duidelijke maximale temperatuur waaronder een stad hittebestendig is. De maximale temperatuur verschilt voor elk gevolg dat in de mindmap staat (figuur 2.1).

Om de hitteopgave toch iets concreter te maken, hebben we in dit hoofdstuk een overzicht gegeven van data en kaarten die inzicht geven. Samengevat adviseren we om de hitteopgave van een specifiek gebied met focus op ruimtelijke adaptatie te verkennen aan de hand van:

- > Getallen die aangeven hoe vaak hoge temperaturen nu en in de toekomst door verdere klimaatopwarming zullen voorkomen. Denk daarbij aan hittegolven, zomerse dagen en tropische nachten.
- > Het inzicht dat het stedelijk hitte-eilandeffect de temperatuur in de stad vooral tijdens de avond en nacht enkele graden kan verhogen. Onderbouw dit inzicht het liefst met getallen of meetwaarden.
- > Een overzicht van de niet-acceptabele gevolgen van hitte in de stad uit de mindmap die kunnen worden tegengegaan met aanpassingen in de buitenruimte.
- > Een drietal typen hittekaarten die gecombineerd het weten-willen-werken voor een hittebestendige stad in kaart brengen:
  1. Temperatuurkaarten om aan te geven waar het heet is. Gebruik daarvoor bijvoorbeeld de twee basiskaarten uit de gestandaardiseerde stresstest.
  2. Hitterisicokaarten om aan te geven waar hitte een groot probleem is.
  3. Toetsings- of maatregelenkaarten om te verkennen welke maatregelen of ontwerprichtlijnen nodig zijn voor een hittebestendig ontwerp. Want zonder handelingsperspectief is het niet zinvol een opgave te benoemen.

Met deze handvatten kan de hitteopgave naar ons idee worden geformuleerd. Daarvoor is het wel van belang om te weten hoe effectief maatregelen zijn en wat de mogelijkheden zijn om daar richtlijnen voor op te stellen. Dat zijn de onderwerpen van de volgende twee hoofdstukken.



**Hittemaatregelen**



3

### 3. Hittemaatregelen

Het is nog niet helemaal duidelijk welke maatregelen bij de openbare ruimte betrokken professionals zouden moeten kiezen om de stad voldoende koel te houden. Kiezen we voor witte daken, groene gevels of fontein? Welke hittemaatregelen in de openbare ruimte en aan de schil van gebouwen zijn het effectiefst en efficiëntst? Welke maatregel verdient prioriteit? Dat zijn vragen waar dit hoofdstuk op ingaat.

In dit hoofdstuk leggen we eerst uit dat maatregelen om een stad koeler in te richten twee verschillende doelen dienen: 1) stadsbreed de luchttemperatuur verlagen en 2) lokaal koele plekken creëren. Daarna presenteren we een overzicht van de verkoelingsprincipes en leggen we uit hoe deze de lucht- en de gevoelstemperatuur beïnvloeden. Daartoe duiken we eerst in de theorie en beschrijven we hoe de lucht- en gevoelstemperatuur zijn gekoppeld aan de stedelijke energiebalans en de energiebalans van het menselijk lichaam.

Verder geven we aan hoe effectief verschillende hittemaatregelen zijn om stadsbreed de luchttemperatuur of lokaal de gevoelstemperatuur te verlagen. Dit doen we op basis van eigen modelstudies, maar we geven ook een overzicht van de effectiefste hittemaatregelen op grond van in wetenschappelijke literatuur gevonden waarden.

#### 3.1 Doelen van hittemaatregelen in de stedelijke inrichting

Uit hoofdstuk 2 weten we dat problemen met hitte in het stedelijk gebied enerzijds ontstaan door klimaatopwarming, waardoor we steeds vaker te maken hebben hoge **luchttemperaturen**: hete dagen en hete nachten. Anderzijds leidt de stedelijke omgeving zelf tot meer hitte: vooral 's nachts zorgt het hitte-eilandeffect ervoor dat de **luchttemperatuur** in de stad een paar graden warmer is dan in de omgeving, en overdag leiden de stedelijke bebouwing en het gebrek aan schaduw ertoe dat de **gevoelstemperatuur** op bepaalde locaties onaangenaam hoog is.

Met inrichtingsmaatregelen in de buitenruimte kunnen we een deel van de hitteproblemen aanpakken. Tabel 2.2 (paragraaf 2.2.2) laat zien dat die problemen vooral gerelateerd zijn aan de luchttemperatuur of aan de gevoelstemperatuur of aan beide.

Er zijn daarom twee belangrijke doelen te onderscheiden die hittemaatregelen in de stedelijke inrichting kunnen dienen:

1. Stadsbreed de **luchttemperatuur** verlagen, overdag en 's nachts.
2. Lokaal koele plekken met een lage **gevoelstemperatuur** creëren om verkoeling te zoeken tijdens een hete dag. Beide doelen komen in de volgende paragrafen aan bod.

#### 3.2 Verkoelingsprincipes

Verkoelingsprincipes om de lucht- en gevoelstemperatuur te beïnvloeden, zijn er op kleine en grote schaal. Voordat we meteen de diepte van de verschillende verkoelingsprincipes in duiken, is het belangrijk om even afstand te nemen en het grotere geheel te begrijpen. Als we kijken naar hittemaatregelen in steden, maken we onderscheid tussen twee doelen. Het eerste doel, het verlagen van de luchttemperatuur op stadsschaal, houdt

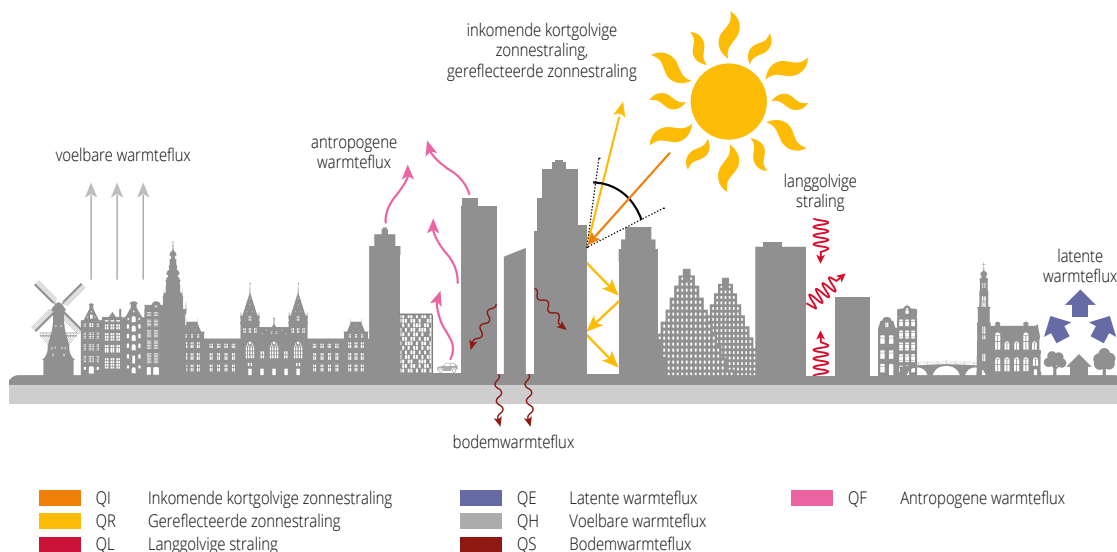
verband met de energiebalans van de stad. Het tweede doel, het verlagen van de gevoelstemperatuur op lokale schaal, houdt verband met de energiebalans van het menselijk lichaam. Eerst worden beide energiebalansen in deze paragraaf toegelicht. Daarna gaan we in op de belangrijkste verkoelingsprincipes.

### 3.2.1 Energiebalans van de stad

Als we het hebben over stedelijke hitte, dan praten we eigenlijk over energie. Warmte is immers een vorm van energie. Daarom kijken we eerst naar de energie die van de zon komt. Laten we uitgaan van een zonnige zomerse dag en kijken naar de energiebalans van de stad voor een volledig etmaal. Er komt over een etmaal gemiddeld  $320 \text{ W/m}^2$  energie van de zon binnen op het aardoppervlak als zogenoemde kortgolvlige straling (Qi in figuur 3.1 en figuur 3.2). Een deel daarvan wordt gereflecteerd terug de ruimte in of in een andere richting. Daarnaast is er ook langgolvlige straling, warmtestraling. Deze is afkomstig uit de atmosfeer (o.a. van wolken) en van alles wat op aarde aanwezig is (bodem, bomen, gebouwen). De langgolvlige straling van wolken is er de oorzaak van dat het tijdens een bewolkte nacht in de winter vaak warmer is dan tijdens een onbewolkte nacht. De langgolvlige straling van wolken is er bijvoorbeeld de oorzaak van dat het tijdens een bewolkte nacht in de winter vaak warmer is dan tijdens een onbewolkte nacht. Langgolvlige straling is ook de warmtestraling die je voelt als je langs de gevel van een gebouw loopt. Deze straling is dag en nacht aanwezig en de energie van deze straling is in de zomer over 24 uur gemiddeld even groot of zelfs groter dan die van de zon.

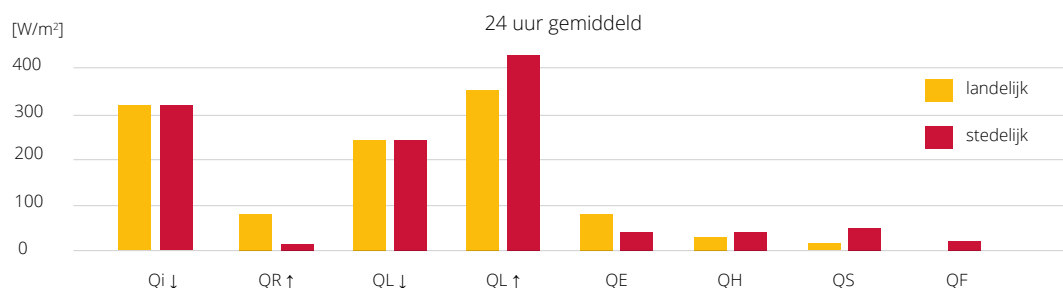
De inkomende stralingstermen in figuren 3.1 en 3.2 zijn groter dan de uitgaande stralingstermen. Het energieverval verdeelt zich over drie componenten:

- 1) Een deel zorgt voor verdamping van bodemvocht of door planten (latente warmteflux, QE).
- 2) Een deel verwarmt de lucht (de voelbare warmteflux, QH).
- 3) Een deel verwarmt het oppervlak, de bodem, maar ook de gebouwen (de bodemwarmteflux, QS).



Figuur 3.1 Energiebalans stedelijk gebied.

De benamingen van deze warmtefluxen – latente, voelbare, en bodemwarmte – vertellen hoe ze onze omgeving en onszelf beïnvloeden. Voelbare warmte kunnen we voelen als de warme lucht om ons heen. De bodemwarmte wordt gedurende de dag opgeslagen in de bodem en in andere materialen. Vervolgens stralen deze materialen en de bodem de warmte weer uit, wat vooral voelbaar wordt als het later op de dag kouder wordt. En latente warmte? Die kunnen we niet voelen of ervaren en ze wordt niet opgeslagen in oppervlakken. Vandaar de naam latent, wat verborgen betekent. Latente warmte is belangrijk als het gaat om het beperken van warmteontwikkeling in steden. Immers, als er meer energie wordt gebruikt voor verdamping, blijft er minder energie over om de lucht en het oppervlak op te warmen.



Figuur 3.2 Verschillen tussen de energiebalans van landelijk en stedelijk gebied (gebaseerd op Oke, 2017 en Sass, 2019). Qi↓ – inkomende kortgolvlige zonnestraling, QR↑ – gereflecteerde zonnestraling, QL↓ – inkomende langgolvlige straling, QL↑ – uitgaande langgolvlige straling, QE – latente warmteflux, QH – voelbare warmteflux, QS – bodemwarmteflux, QF – antropogene warmteflux.

Bijna elke hittemaatregel die gericht is op een verlaging van de luchttemperatuur is gebaseerd op een van de volgende vier principes: **verdamping**, **beschaduwing**, **ventilatie** en **reflectie**. Deze principes zijn grotendeels gekoppeld aan de energiebalans van de stad. Het principe van verdamping bestaat uit het vergroten van het aandeel latente warmte in de energiebalans, zodat er minder energie overblijft voor het opwarmen van lucht en oppervlak. Beschaduwing werkt op basis van het afvangen van zonnestraling, zodat de hoeveelheid energie die aan het beschaduwde oppervlak komt, wordt beperkt. Op eenzelfde manier helpt het verhogen van de reflectie van het oppervlak van gebouwen of bestrating om de beschikbare energie die de stad opwarmt te verminderen. Ventilatie zorgt voor afvoer van warme lucht de stad uit – en is niet aangegeven in figuur 3.1 als warmteflux. De warmtefluxen zijn natuurlijk niet constant, maar variëren sterk gedurende dag en nacht, en door het jaar heen.

Dat de luchttemperatuur in steden vaak hoger is, komt door het verschil in de energiebalans van stedelijk en landelijk gebied. In landelijk gebied is de hoeveelheid gereflecteerde zonnestraling bijvoorbeeld vijf keer zo hoog, de latente warmte twee keer zo hoog en de opslag van warmte in de grond slechts een kwart vergeleken met stedelijk gebied (zie figuur 3.2).

Door de energiebalans van stedelijk gebied dichterbij die van landelijk gebied te brengen kan de luchttemperatuur in steden worden beperkt. Door meer vegetatie aan te planten wordt de latente warmteflux bijvoorbeeld vergroot, waardoor de voelbare warmteflux die anders de lucht zou opwarmen kleiner wordt. Ook kan de hoeveelheid warmteopslag worden gereduceerd door het gebruik van bouwmaterialen die meer zonlicht reflecteren. Als gevolg hiervan geven gebouwen 's nachts minder warmte af.

Figuur 3.1 toont ook een warmteflux  $Q_F$  die de antropogene warmte presenteert. Antropogene warmte is ook een energiestroom in de stedelijke energiebalans en bestaat uit de warmte die vrijkomt als gevolg van menselijke activiteiten zoals de verbranding van fossiele brandstoffen voor gebouwen, voertuigen en industriële processen. Hitte in steden kan worden beperkt door de antropogene warmteuitstoot te verminderen. Dit is niet per se een adaptatiemaatregel, maar meer een maatregel om extra hitte te voorkomen. Desondanks is het belangrijk te beseffen dat er warmte wordt toegevoegd aan de buitenomgeving als we de binnenomgeving koelen met airconditioning. Het is niets meer dan het verplaatsen van het probleem, terwijl er ook nog extra energie (en dus warmte) aan wordt toegevoegd.

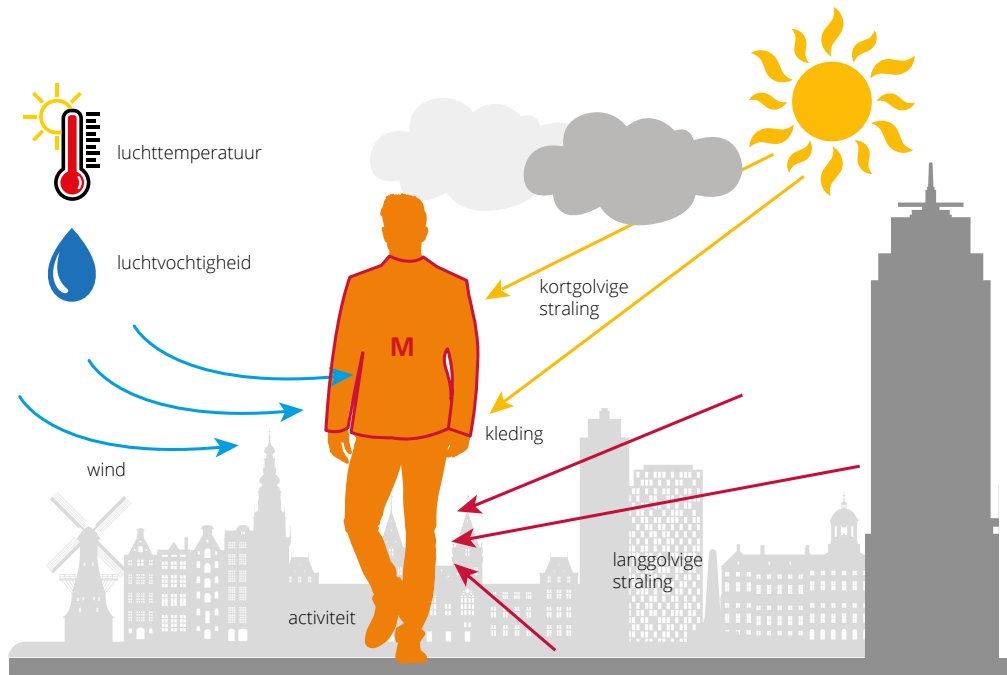
### 3.2.2 Energiebalans van het menselijk lichaam

Net als de energiebalans van een stad kunnen we met hittemaatregelen ook de energiebalans of thermische balans van het menselijk lichaam (figuur 3.3) beïnvloeden. Enerzijds zijn er factoren als activiteit, kleding en metabolisme die de thermische balans beïnvloeden. Anderzijds spelen meteorologische omgevingsfactoren een belangrijke rol en bepalen deze de uiteindelijke gevoelstemperatuur. Zoals vermeld in paragraaf 2.4.2 zijn luchttemperatuur, straling, wind en luchtvochtigheid de belangrijke meteorologische parameters die bepalen hoe warm of koud de omgeving aanvoelt.

De twee belangrijkste verkoelingsprincipes die tijdens hete dagen de gevoelstemperatuur kunnen verlagen, zijn **beschaduwing en ventilatie**. Schaduw creëren is van deze twee verreweg de efficiëntste manier. Zo kan op een warme zomermiddag de maximale inkomende (kortgolvrige) zonnestraling  $1000 \text{ W/m}^2$  bereiken. In de schaduw is deze straling al snel 10 keer kleiner (Shahidan et al., 2010). Dit betekent dat er veel minder energie is die ons lichaam zal verwarmen.

Het tweede effectieve principe is ventilatie (wind). Wind bevordert de warmteuitwisseling tussen een lichaam en de omgeving. Omdat het lichaam meestal warmer is dan de luchttemperatuur, leidt een hogere windsnelheid tot een afname in gevoelstemperatuur.

Eerder beschreven we dat **verdamping** een zeer efficiënt verkoelingsprincipe is om de luchttemperatuur in de stad te verlagen (paragraaf 3.2.1) en schaduw en wind de belangrijkste verkoelingsprincipes zijn voor het verlagen van de gevoelstemperatuur (deze paragraaf). Het principe van verdamping kan echter ook worden gebruikt om de gevoelstemperatuur te verlagen. Als water direct verdampt van de huid (na een verfrissende duik of een rondje hardlopen door de mist), is de temperatuur voor ons gevoel het laagst. Bij  $30^\circ\text{C}$  luchttemperatuur en 50% luchtvochtigheid, bijvoorbeeld, voelt de temperatuur met een vochtige huid slechts aan als  $22^\circ\text{C}$ . Daarom is mensen in contact brengen met water een zeer effectieve manier om hittestress te verminderen.



Figuur 3.3 Schematische weergave van de energiebalans van het menselijk lichaam. 'M' staat voor metabolisme. Gebaseerd op Havenith (1999) en <https://transsolar.com/approach/transsolar-academy/2014/mahrooh-basar>.

### 3.2.3 Verdamping

Verdamping van groen en wateroppervlakken verlaagt de temperatuur doordat er 2260 kJ per liter nodig is voor verdamping. In een stad verdampt er per jaar 200-250 mm minder dan in landelijk gebied. Verdamping is de effectiefste maatregel om stadsbreed de luchttemperatuur te verlagen. Verkoeling door verdamping is overdag het sterkst, omdat ook planten dan verdampen. Doordat hierdoor tegelijk minder warmte wordt opgeslagen, zet het effect ook 's nachts door. Toename van verdamping heeft vooral invloed op de luchttemperatuur. Het effect ervan op de gevoelstemperatuur is te verwaarlozen.

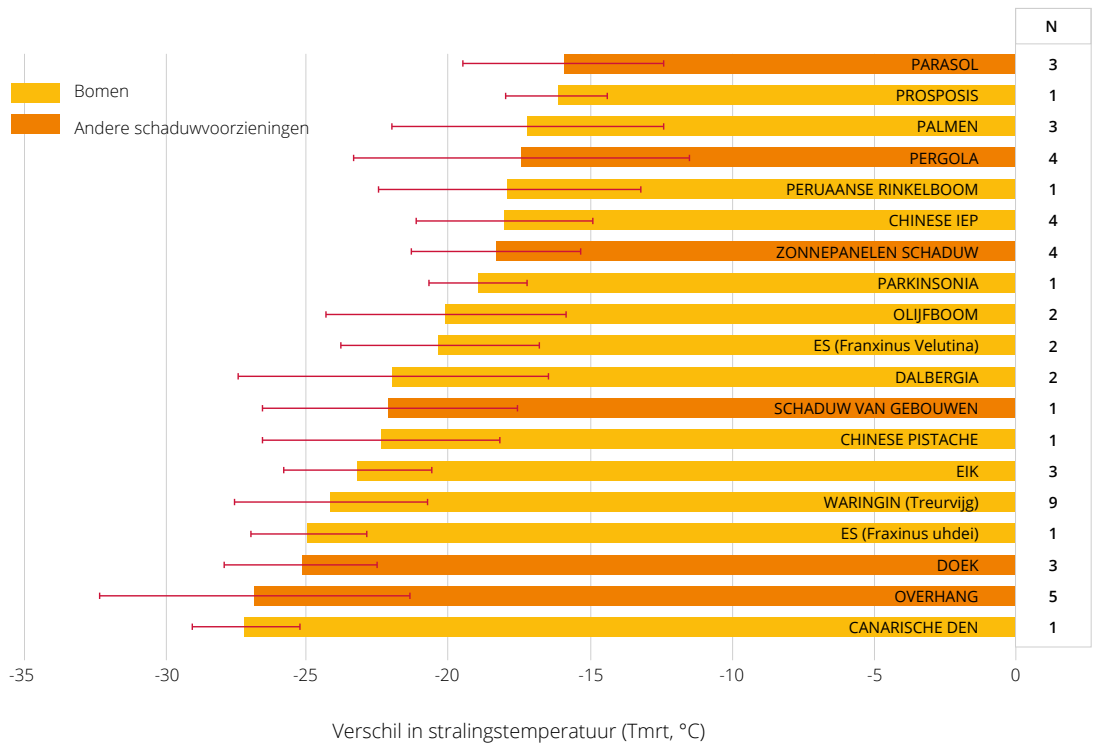
Hittemaatregelen waarbij verdamping een rol speelt zijn waterelementen zoals vijvers, sloten of fontein en groenelementen zoals parken, bomen, gazons of groene daken. Waterelementen zijn effectiever als het water uit kleine druppels bestaat. Een openwaterlichaam verkoelt de lokale luchttemperatuur met circa 1°C, terwijl vernevelingssystemen de luchttemperatuur lokaal met gemiddeld 0,7 tot 3°C kunnen verlagen (Ishii et al., 2009; Farnham et al., 2011; Yamada et al., 2006; Yamada et al., 2008). Het uiteenspatten van druppels zorgt ervoor dat het oppervlak van waar het water kan verdampen vele malen groter wordt. Groenelementen hebben genoeg water nodig om te kunnen verdampen. Als vegetatie uitdroogt of als het te heet wordt, stopt de verdamping.

### 3.2.4 Beschaduw

Het principe van schaduw bestaat uit het afvangen van zonnestraling, zodat de energie die het oppervlak

bereikt kleiner wordt. Schaduw kan de inkomende zonnestraling met een factor tien verlagen. In dat geval is er tien keer minder zonne-energie beschikbaar om de temperatuur van een oppervlak onder de boom, bijvoorbeeld de huid van iemand die in de schaduw van de boom zit, op te warmen. Het verschil in gevoelstemperatuur tussen een locatie die blootgesteld is aan de zon en een locatie in de schaduw van een boom is 3 tot 19°C (Klok et al., 2019). Schaduw is de beste manier om de gevoelstemperatuur te verlagen.

Er zijn verschillende manieren waarop steden in schaduw kunnen voorzien. Figuur 3.4 toont het effect van verschillende schaduwmaatregelen op de stralingstemperatuur (*mean radiant temperature*, Tmrt). Tmrt is net als PET ook een index voor de gevoelstemperatuur en combineert luchttemperatuur en straling. Temperatuur en straling zijn twee van de vier meteorologische variabelen die ook in PET worden gebruikt. Dit maakt Tmrt een belangrijke invoervariabele voor de berekening van PET. Gebouwen zorgen voor veel schaduw, maar bomen zijn veruit de beste oplossing, omdat ze niet alleen voor schaduw zorgen, maar ook door verdamping bijdragen aan verkoeling. Dat neemt niet weg dat, als er geen bomen zijn, schaduw van een pergola of parasol eveneens een goede optie is als de straat weinig ruimte biedt voor vegetatie, zoals in smalle winkelstaatjes. Een voordeel van dat soort schaduwvoorzieningen is dat ze 's avonds kunnen worden verwijderd, waardoor de in de bodem en gebouwen opgeslagen warmte kan ontsnappen en de stad sneller afkoelt.

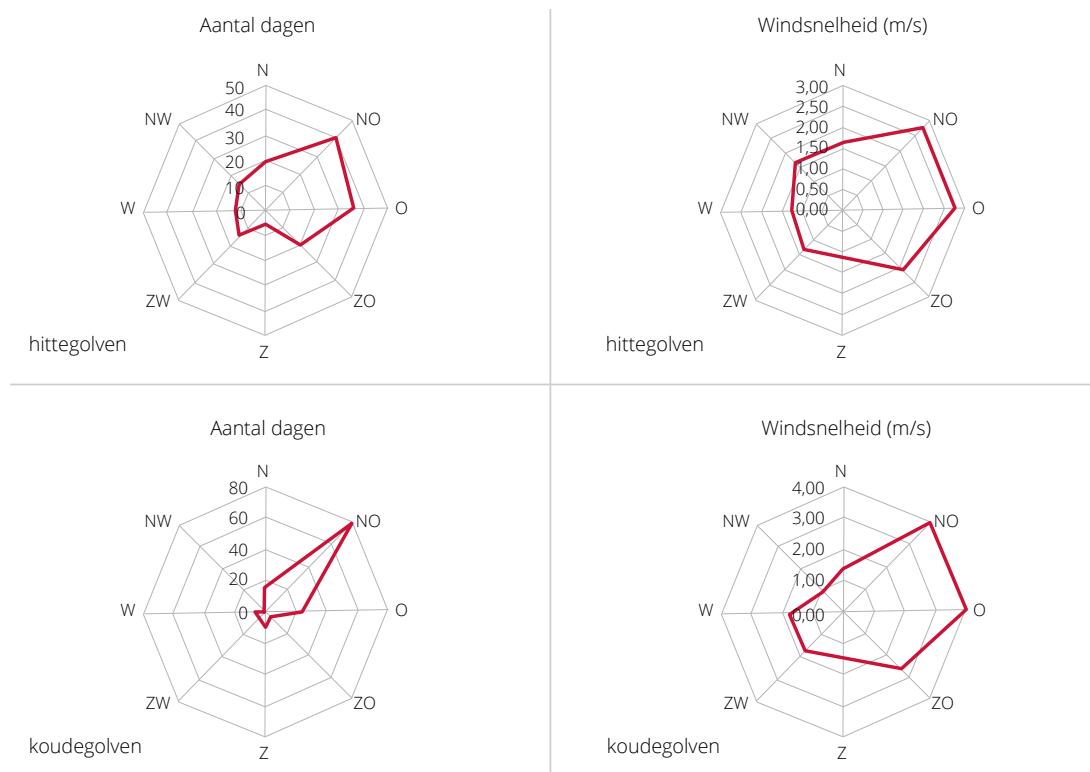


Figuur 3.4 Het verschil tussen verschillende schaduwelementen – bomen in het geel en andere schaduwvoorzieningen in het oranje – uitgedrukt in de stralingstemperatuur (Tmrt). De rechterkolom bevat het aantal metingen gedaan in Phoenix, Arizona. Figuur van Schneider et al. (2019).

### 3.2.5 Ventilatie

Het doorlaten van wind in steden zorgt voor zowel de afvoer van warme lucht als verversing met mogelijk koelere lucht van elders. Daarnaast heeft wind een directe invloed op de gevoelstemperatuur. Het is niet eenvoudig om voor meer ventilatie te zorgen in steden. De logische aanpak is voorkomen dat bestaande windcorridors worden geblokkeerd en gebruikmaken van grote open groenblauwe structuren in de stad. Een lang recht (water)oppervlak zonder grote obstakels, bijvoorbeeld een relatief rechte rivier of een kanaal, kan ventilatie bevorderen. Een klein briesje, langs de oever van een rivier kan een plek prettig koel maken, zeker in combinatie met schaduw en vegetatie. Op kleinere schaal kunnen bijvoorbeeld voetbalvelden, parkeerplaatsen of lange rechte wegen voor ventilatie zorgen.

Het is belangrijk te beseffen dat de wind zowel tijdens hittegolven als in koude periodes in Nederland voornamelijk uit oostelijke richting komt (figuur 3.5) en dat er veel minder wind is tijdens een hittegolf. Windsnelheid en het aantal dagen met noordoostenwind zijn 's winters hoger dan 's zomers (Kleerekoper, 2016). Dit betekent dat als we wind in steden kunstmatig bevorderen, we de situatie tijdens hittegolven slechts marginaal zullen verbeteren, en mogelijk verslechteren tijdens koude periodes in de winter.



Figuur 3.5. Windroos met het aantal dagen (links) en de gemiddelde windsnelheid (rechts) per windstreek tijdens hittegolven (boven) en in koude periodes (beneden) tussen 1950 en 2011, gebaseerd op KNMI-data (Kleerekoper, 2016). Let op de verschillen in de schaalverdeling voor windsnelheid.

### 3.2.6 Reflectie

Elk oppervlak heeft een bepaalde albedo, 'witheid', ofwel reflectiefactor. Deze variabele representeert de hoeveelheid zonnestraling die het oppervlak reflecteert vergeleken met de hoeveelheid die het ontvangt. Witte oppervlakken hebben een albedo van bijna 100%, omdat ze bijna al het licht reflecteren. Zwarte oppervlakken zitten dicht bij 0%. Oppervlakken in de stedelijke omgeving hebben gemiddeld een albedo van slechts 5%, terwijl landelijke gebieden gemiddeld uitkomen op zo'n 25% (Oke et al., 2017). Dit verschil zorgt ervoor dat steden veel minder energie van de zon reflecteren dan landelijk gebied. Het verhogen van de albedo (i.e. meer reflectie) vermindert de opwarming van een oppervlak. Daarom voelt het koeler aan in een wit T-shirt dan in een zwart T-shirt.

Het verhogen van de albedo is een goede maatregel voor horizontale oppervlakken als daken. Witte daken warmen minder op dan traditionele daken. Daarnaast zorgt een wit dak ervoor dat de ruimte onder het dak koeler is dan onder een zwart dak. Een hogere albedo heeft ook voordelen op straat, omdat het zorgt voor een lagere oppervlaktetemperatuur. Als je in de buurt van zwart asfalt staat, kun je de warmte voelen die het uitstraalt. Dat is bijvoorbeeld niet het geval voor lichtgekleurd beton.

Hoewel een hogere albedo de oppervlaktetemperatuur – en daarmee de warmtestraling van onderaf – kan verlagen, kan men toch bedrogen uitkomen. Een parelwitte stad zou letterlijk verblindend zijn voor haar inwoners. Bovendien zorgt de extra weerkaatsing van de zonnestraling ervoor dat het lichaam netto meer straling zou kunnen ontvangen, waardoor de gevoels temperatuur juist stijgt. Een hogere albedo is vooral effectief voor horizontale oppervlakken waaronder brede straten. In straten met een hoogte-breedteverhouding groter dan 1 (smalle straten) wordt de straling vanaf het trottoir gereflecteerd in de richting van de aanliggende gevels.

## 3.3 Resultaten modellering: maatregelen op stadsschaal

Omdat nog onvoldoende duidelijk is welke maatregelen het effectiefst zijn en welke maatregelen de professionals dus zouden moeten kiezen om de luchttemperatuur op stadsschaal te reduceren, hebben we het effect van verschillende maatregelen doorgerekend. De focus van dit deel van het onderzoek lag vooral op maatregelen die, op de schaal van een wat grotere Nederlandse stad, via meer verdamping voor verkoeling zorgen. Grootschalige vergroening is een dergelijke maatregel, bedoeld om de temperatuur van de stad tot op leefniveau te verlagen. Extra verdamping van bomen, struiken, gras en andere vegetatie zorgt ervoor dat er minder van de binnenkomende energie wordt omgezet in direct voelbare of in gebouwen opgeslagen warmte. Dit beperkt de opwarming van de lucht zowel overdag als 's nachts. Deze paragraaf beschrijft beknopt de uitkomsten van dit deel van het onderzoek, meer details staan in bijlagen 4, 5 en 6.

### 3.3.1 Keuze van representatieve stad: Breda

De effecten van maatregelen tegen hitte zijn gekwantificeerd voor Breda, een stad die op grond van belangrijke eigenschappen voor de opbouw van hitte als een 'gemiddelde' Nederlandse stad kan worden beschouwd.

De hittebepalende kenmerken die we als selectiecriteria hebben gekozen voor een 'gemiddelde' stad zijn de groenfractie en de mate van verharding binnen de gemeentegrenzen. Op grond van een vergelijking van deze kenmerken tussen Nederlandse gemeenten met 100.000 of meer inwoners kwam Breda als modelstad uit de bus.

### 3.3.2 Maatregelen op stadsschaal: grootschalige vergroening

Eerder onderzoek op basis van metingen in Nederland heeft uitgewezen dat een toename van de fractie groen op wijk- of stadsschaal met 10 procentpunten<sup>12</sup> tot een verkoeling van ongeveer 0,5°C leidt (Steenefeld et al., 2011; Heusinkveld et al., 2014; Van Hove et al., 2015). Deze mate van verkoeling via vergroening wordt als een voor Nederland geldende vuistregel beschouwd (Gehrels et al., 2016). De vuistregel betreft in Nederland vooral verkoeling in de nacht door een daling van de luchttemperatuur.

Via modellering is deze vuistregel later in grote lijnen bevestigd. Steenefeld et al. (2018) hebben effecten van vergroening doorgerekend voor grote wijken van een geïdealiseerd modeltype, onder omstandigheden als tijdens de hittegolf van 15-19 juni 2006. Zij constateerden een daling van de gemiddelde temperatuur van ongeveer 0,25°C per 10% extra groen (alleen goed verdampend gras). Deze daling kwam vrijwel volledig doordat de intensiteit van het hitte-eiland afnam, dus doordat de nachttemperatuur daalde; overdag was het effect veel kleiner (Witteveen & Bos, 2014). Voor diezelfde hittegolf hebben Kleerekoper et al. (2018) een vergroeningsscenario voor de stad Haarlem doorgerekend. Volgens die berekeningen zouden de nachten, over heel Haarlem en over de hele periode gemiddeld, ongeveer 0,5°C koeler worden bij 10 procentpunten extra groen (het aandeel bomen plus plantsoenoppervlak plus goed verdampende groene daken nam toe van 18% tot 28% van het oppervlak). Ook de dagen werden volgens die berekeningen koeler, bijna 1,5°C. Tijdens de warmste dag en nacht in die periode liep de berekende verkoeling op sommige plekken in de stad op tot respectievelijk 3,5°C en 1,5°C.

In het huidige onderzoek (de hittebestendige stad) hebben wij soortgelijke berekeningen uitgevoerd voor de regio Breda (stad en buitengebied). We hebben daarbij twee scenario's met extra groen doorgerekend en een met juist minder groen (zie bijlage 6 voor een uitgebreide beschrijving van de scenario's):

- > In het scenario 'Groener' nam de groenfractie met 10 procentpunten toe ten opzichte van de referentie en werd 12,5% van het dakoppervlak vervangen door groene daken.
- > In het scenario 'Groenst' nam de groenfractie met 20 procentpunten toe en veranderde 25% van het dakoppervlak in een groen dak.
- > In het scenario 'Grijzer' nam de groenfractie juist af met 10 procentpunt en waren er geen groene daken.

De modelberekeningen zijn uitgevoerd voor de periode 23 juli – 6 augustus 2018, een periode met een hittegolf waarbij de luchttemperatuur (gemeten op een KNMI-station buiten de stad) op twee dagen opliep tot boven 36°C en gedurende vier nachten niet onder de 20°C kwam.

De resultaten voor de warmste dag en nacht in de periode (27 juli) zijn samengevat in tabel 3.1 en gelden voor het domein zonder het 'buitengebied' van Breda (zie ook bijlage 6).

<sup>12</sup> Procentpunt: eenheid voor het absolute verschil tussen waarden die in procenten worden uitgedrukt. Voorbeeld: een stijging van vier naar vijf procent is een stijging van één procentpunt, of een stijging van 25%.

Tabel 3.1. Berekende temperatuurverschillen voor de drie scenario's. Het verschil kan positief (verwarming) of negatief (verkoeling) zijn.

|                              |                                           | Senario |         |         |
|------------------------------|-------------------------------------------|---------|---------|---------|
|                              |                                           | Grijzer | Groener | Groenst |
| Maximumtemperatuur (overdag) | Gemiddeld <b>verschil</b> in °C           | +0,071  | +0,086  | -0,14   |
|                              | Maximale <b>verkoeling</b> (lokaal) in °C |         | 0,57    | 0,64    |
| Minimumtemperatuur (nacht)   | Gemiddeld <b>verschil</b> in °C           | +0,056  | -0,024  | -0,077  |
|                              | Maximale <b>verkoeling</b> (lokaal) in °C |         | 0,26    | 0,38    |

De groenere scenario's leverden enige verkoeling op, 'Groenst' iets meer dan 'Groen', terwijl 'Grijzer' gemiddeld voor enige verwarming zorgde. Deze rangorde in verkoeling voor de drie scenario's is conform de verwachting, maar de vastgestelde effecten zijn opmerkelijk klein in deze berekeningen. Op de warmste dag waren de maximale luchttemperaturen gemiddeld 0,14°C lager bij 'Groenst' dan in de referentiesituatie. De verkoeling liep zeer lokaal op tot maximaal 0,64°C. Iets dergelijks geldt voor de minimumtemperatuur 's nachts. Voor de warmste nacht was het sterkste effect bij 'Groenst' een gemiddelde verkoeling van 0,077°C, zeer lokaal oplopend tot 0,38°C. Gemiddeld over de hele periode zijn de verschillen nog kleiner, zowel 's nachts als overdag. De maximale lokale verkoeling bij 'Grijzer' is te sterk afhankelijk van lokale verschillen in landgebruik en is hier niet gegeven. Zie bijlage 6 voor een uitgebreidere beschrijving van de resultaten.

Er kunnen legio redenen zijn waarom de vergroening in de huidige berekeningen een dergelijk klein effect heeft, slechts 10-15% van de verkoeling van de 0,5°C volgens de vuistregel. Om de oorzaken hiervan te achterhalen is er veel extra onderzoek nodig, dat we in dit project niet konden uitvoeren. Voorlopig bevelen we daarom aan grootschalige verkoeling door vergroening in te schatten op basis van de vuistregel: vermeerdering van de groenfractie op wijk- of stadsschaal leidt tot een verkoeling van ongeveer 0,5°C per 10 procentpunten extra groenbedekking (dus bij 20 procentpunten extra zou een verkoeling van 1°C worden bereikt, enzovoort). Vervolgonderzoek zal moeten uitwijzen hoe duurzaam deze vuistregel is. Het kan zijn dat droogte een rol speelt, omdat er voor extra verdamping nu eenmaal extra water nodig is.

### 3.4 Resultaten modellering: maatregelen op lokale schaal

Er zijn meerdere manieren om een straat of buurt anders in te richten om de gevolgen van hitte tegen te gaan en lokaal koelteplekken te creëren. Van de genoemde principes in paragraaf 3.2 is schaduw het effectiefst. Dat kan met bomen. Bomen zorgen lokaal voor schaduw en verdampen daarnaast aanzienlijke hoeveelheden water – tot wel 170 liter per dag (Waternet, 2019). Focus van dit modelonderzoek was daarom om op lokale schaal het verkoelende effect van groene maatregelen en dan vooral van bomen te bepalen.

Bomen zijn de perfecte maatregel voor buurten met relatief brede straten of binnenhoven zoals in naoorlogse woonwijken en tuinsteden. In sommige wijktypen, zoals de volkswijk, zijn straten echter vaak smal en is het aantal parkeerplaatsen beperkt. Bomen worden dan als onhandig gezien, omdat ze veel ruimte innemen. In een volkswijk zijn geveltuintjes, groene gevels en schaduwvoorzieningen daarom betere opties. In de volgende

paragrafen worden verschillende groene maatregelen voorgesteld voor drie verschillende buurten: een naoorlogse woonwijk, een naoorlogse tuinstad hoogbouw en een volkswijk. Met modelberekeningen laten we zien hoe effectief de maatregelen zijn in het creëren van koelteplekken met een lagere gevoelstemperatuur (PET).

Om de effectiviteit van deze hittemaatregelen te bepalen, hebben we gebruik gemaakt van het micrometeorologisch model UMEP (Lindberg et al., 2018). De output van UMEP is de gemiddelde stralingstemperatuur ( $T_{mrt}$ ), waarmee we de PET hebben berekend. Op deze manier hebben we de schaduwpatronen en het effect van verschillende groene ingrepen op de gevoelstemperatuur geanalyseerd. We hebben verschillende straatorientaties en verschillende positioneringen van bomen doorgerekend en onderzocht hoe boomhoogte en doorlatendheid van de kroon van invloed zijn op de gevoelstemperatuur.

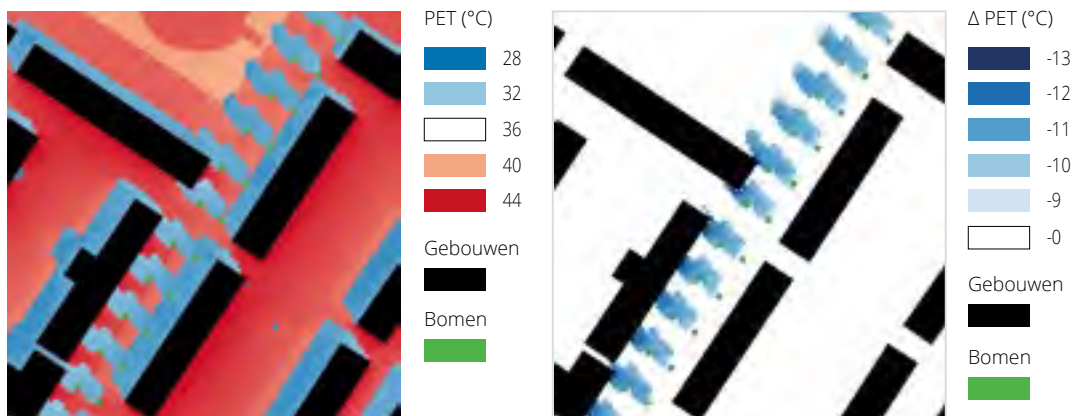
Voor de modellering hebben we een warme zomerdag gekozen: 2 augustus 2018 om 12:00 uur. Het was toen 27°C, zonnig, onbewolkt en er was relatief weinig wind (1 m/s). De resultaten hebben we ook vergeleken met die van andere zomerdagen. De effecten van vegetatie zijn nagenoeg hetzelfde voor verschillende luchttemperaturen. Op dagen met minder zonnestraling neemt vooral het effect van de schaduw van vegetatie af. Hierna presenteren we alleen de resultaten voor 2 augustus 2018.

### **3.4.1 Naoorlogse woonwijk**

Dit wijktype kenmerkt zich door eengezinswoningen met zowel een voor- als een achtertuin. De huizen hebben twee of drie verdiepingen en de straten zijn relatief breed (zo'n 20 meter), vaak met veel parkeerruimte. Voortuinen zijn echter vaak verhard en bieden geen enkele verkoeling op warme dagen. De straatorientatie bepaalt het schaduwpatroon gedurende de dag.

Om het effect van bomen bij verschillende schaduwpatronen door gebouwen te onderzoeken, hebben we twee loodrechte straatorientaties doorgerekend: van zuidwest naar noordoost en van zuidoost naar noordwest. Voor beide oriëntaties beschrijven we op basis van onze modelresultaten:

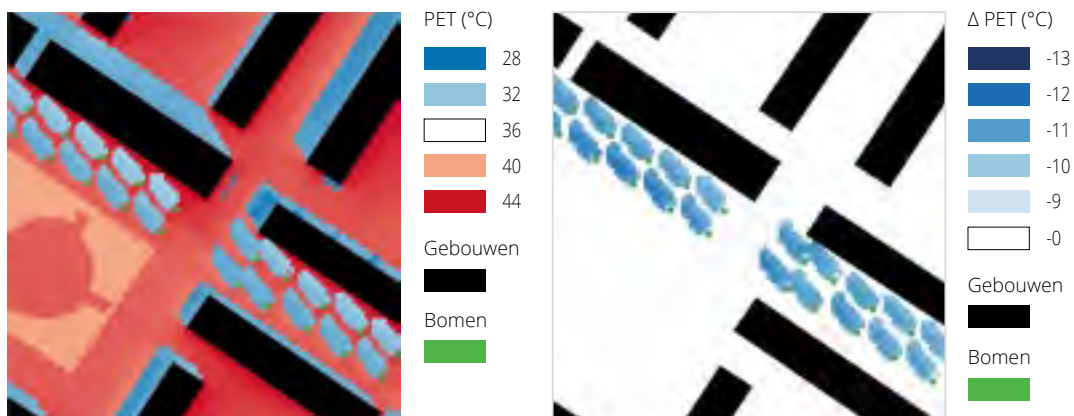
- > de schaduwpatronen in het algemeen,
- > de beste manier om bomen aan te planten voor maximale verkoeling en
- > het uiteindelijke gemodelleerde verkoelende effect.



Figuur 3.6 De gevoelstemperatuur (links) en het verkoelende effect van bomen (rechts) in een van zuidwest naar noordoost georiënteerde straat.

Van zuidwest naar noordoost georiënteerde straat (zie ook Figuur 3.6)

- > ZW-NO-georiënteerde straten hebben wat schaduw in de ochtend aan de westkant, maar bijna geen schaduw gedurende de middag.
- > Aanplant van bomen heeft voordelen aan beide kanten van de straat, met een lichte voorkeur voor de westkant: 's ochtends en aan het begin van de middag bieden de bomen aan de westkant schaduw op het trottoir en op de gevels, terwijl de bomen aan de oostkant alleen voor schaduw op straat zorgen. Gedurende de middag (14-17 uur) valt de schaduw parallel aan de gevels. Om schaduw te bieden op het trottoir heeft de boomkroon daarom een voldoende grote diameter nodig.
- > Het verkoelende effect van de boom is tussen 10 en 13°C PET. De sterkste verkoeling is dicht bij de gevel te vinden, want wanneer de gevel wordt beschaduwde, straalt hij ook minder warmte uit naar de omgeving.



Figuur 3.7 De gevoelstemperatuur (links) en het verkoelende effect van bomen (rechts) in een van zuidoost naar noordoost georiënteerde straat.

#### Van zuidoost naar noordwest georiënteerde straat (zie ook figuur 3.7)

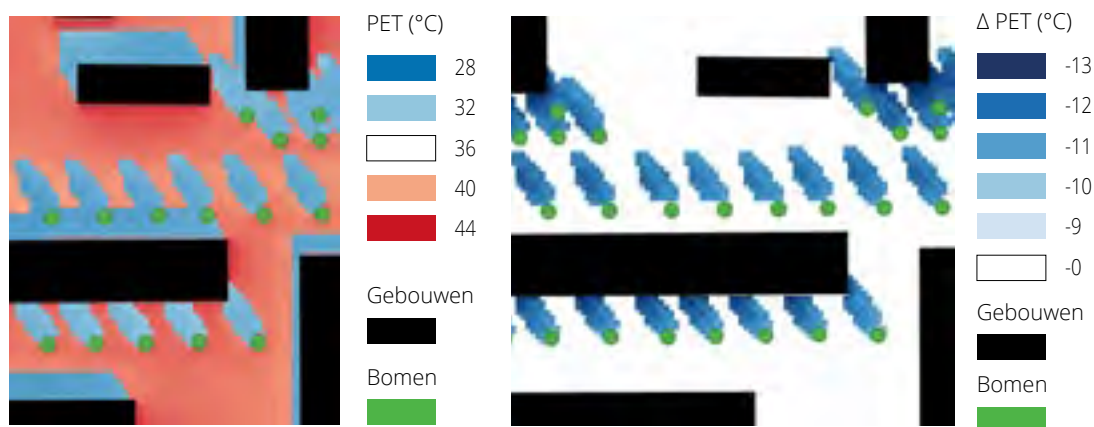
- > ZO-NW-georiënteerde straten hebben bijna geen schaduw in de ochtend. Later op de dag zorgen de gebouwen voor schaduw op het trottoir aan de zuidwestkant van de straat.
- > Als er geen gebouwen zijn aan de zuidwestkant is de straat gedurende de hele dag blootgesteld aan de zon.
- > De aanplant van bomen heeft vooral voordelen aan de noordoostkant van de straat. Ze bieden 's middags schaduw op het trottoir en de gevels.
- > Het verkoelende effect is tussen 10,5 en 11,5°C PET. In de onderzochte situatie valt de schaduw niet op de gevel. Het verkoelende effect is daarom verder van de muur sterker en er is geen uitstraling van warmte die de gevoelstemperatuur beïnvloedt.

### 3.4.2 Naoorlogse tuinstad hoogbouw

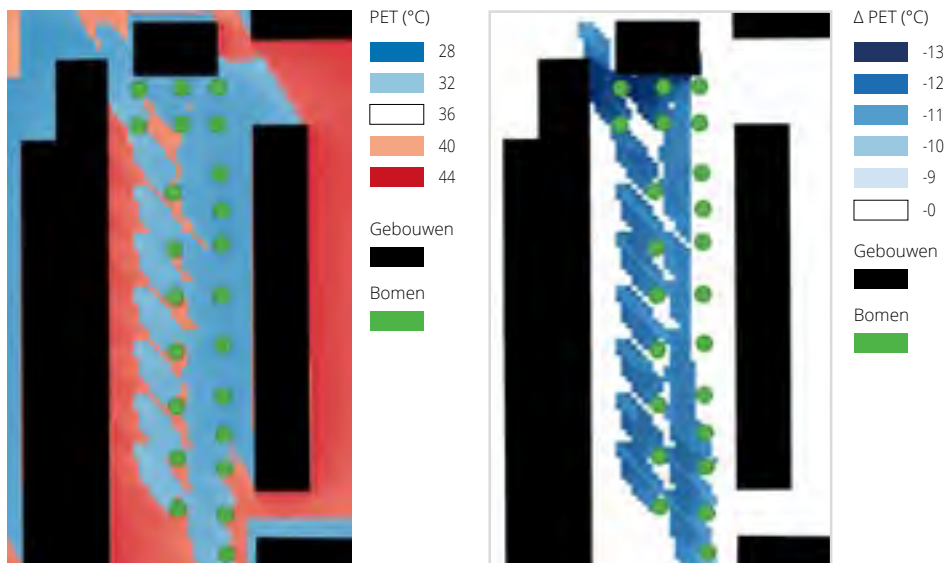
De naoorlogse tuinstad hoogbouw is een wijktype met open bouwblokken van vier tot zes verdiepingen met veel vegetatie tussen de blokken. In de straat is er echter vaak een gebrek aan vegetatie en binnenhoven zijn soms ook bestraat om te kunnen parkeren. De huizen hebben geen eigen tuin en daarom is het belangrijk om bewoners koele buitenruimtes te bieden.

Koele buitenruimtes kunnen worden gecreëerd door slim bomen te plaatsen, maar ook met bankjes aan de noordkant van de gebouwen of op andere locaties in de schaduw van de bebouwing. De verkoeling van bomen is het efficiëntst als ze schaduw werpen op zowel het trottoir als de gevel. Gevels in de schaduw stralen zoals gezegd minder warmte uit en voelen daardoor koeler aan.

Voor dit wijktype hebben we twee loodrechte oriëntaties onderzocht; van oost naar west en van noord naar zuid.



Figuur 3.8 De gevoelstemperatuur (links) en het verkoelende effect van bomen (rechts) in een van oost naar west georiënteerde straat.



*Figuur 3.9 De gevoelstemperatuur (links) en het verkoelende effect van bomen (rechts) in een van noord naar zuid georiënteerde straat.*

*Van oost naar west georiënteerde straat (zie ook figuur 3.8)*

- > Het trottoir aan de zuidkant van deze straten ligt bijna altijd in de schaduw van de gebouwen.
- > De aanplant van bomen heeft voordelen aan de noordkant van de straat, waar de bomen schaduw bieden op het trottoir en de gevels.
- > Het verkoelende effect van de bomen om 12:00 varieert tussen 11°C PET aan de rand van de schaduw (onder de boom) en 13°C PET nabij de gevel.

*Van noord naar zuid georiënteerde straat (zie ook figuur 3.9)*

- > Van noord naar zuid georiënteerde straten ontvangen 's ochtends wat schaduw aan de oostkant en aan het eind van de middag wat schaduw aan de westkant. Tijdens de warmste uren van de dag (13-17 uur) is er zeer weinig schaduw.
- > De aanplant van bomen is nodig om gedurende de hele dag schaduw te bieden. Dat kan aan beide kanten van de straat. Bomen die te dicht bij de oostelijke gevel staan, bieden alleen schaduw aan de gevel zelf.
- > Het verkoelende effect is 13°C dicht bij de gevel aan de oostzijde van de straat en 10,5°C onder de bomen.

### 3.4.3 Volkswijk

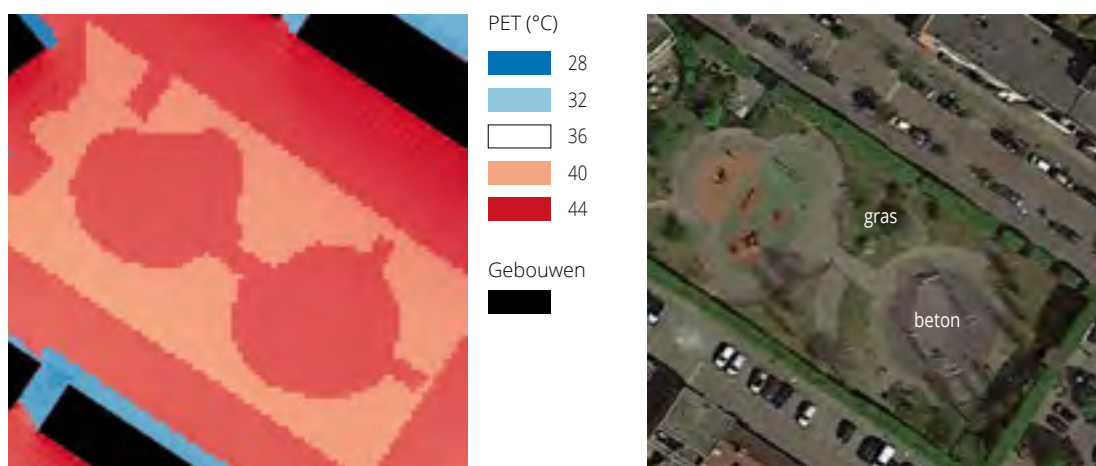
Voor de volkswijk presenteren we geen aparte modelberekeningen. We beschrijven de effecten van de voorgestelde maatregelen op basis van de inzichten uit de voorgaande paragrafen. Volkswijken zijn voornamelijk gebouwd tussen 1910 en 1940. De huizen hebben geen voortuin en hebben twee of drie verdiepingen. Er is zeer weinig gemeentelijk groen. De straten zijn relatief smal en bieden daarom weinig ruimte aan bomen. Voor dit wijktpe is het daarom belangrijk om kruispunten te gebruiken en andere open locaties voor het creëren van koele plekken.

Allereerst kunnen in deze wijk bomen worden geplaatst op zoveel mogelijk locaties. Onze modelresultaten uit de voorgaande paragrafen laten zien dat de schaduw van een enkele boom op een warme zomerdag een lokale verkoeling tot 12°C van de gevoelstemperatuur kan bieden.

Op plaatsen waar de ruimte te klein is om bomen te planten, adviseren we andere schaduw biedende voorzieningen, zoals pergola's, parasols of doeken. Pas als dat niet kan, adviseren wij geveltuintjes en gras. Onze modelresultaten laten namelijk zien dat geveltuintjes met lage vegetatie (goed verdampend gras) slechts een beperkte verkoelende invloed hebben op de gevoelstemperatuur, tot 0,6°C PET in de directe nabijheid.

Hoewel laag groen in de straat weinig effect heeft op de gevoelstemperatuur kan het toch sterk bijdragen aan het aangenamer en aantrekkelijker maken van een straat. Maar ook vegetatie die niet veel schaduw geeft, kan effectief zijn. Heesters en kleine bomen en groene gevels zijn vooral effectief omdat ze de oppervlaktetemperaturen van gevels verkoelen; tot 15,5°C aan de buitenmuur en 1,7°C aan de binnenmuur (Hoelscher et al., 2016). Koelere gevels stralen minder warmte uit en dragen meer bij aan een comfortabele omgeving. Deze maatregelen kunnen ook worden gebruikt in andere wijktypen met smalle straten en weinig vegetatie, bijvoorbeeld in winkelstraten.

Zoals groene gevels de buitenmuur kunnen koelen, kan gras de oppervlaktetemperatuur verminderen. Vergeleken met betonnen bestrating kan de oppervlaktetemperatuur van gras 24°C lager zijn (Armson et al., 2012). Zoals figuur 3.10 laat zien beïnvloedt het gazon (oranje) ook de gevoelstemperatuur. Ons model geeft verschillen tot 3°C PET (op 1,5 m boven het gras). Dat komt overeen met zowel model- als meetstudies uit de literatuur die effecten van gras laten zien tussen 1 en 3°C PET (Lobaccaro en Acero, 2015; Klok et al., 2019). Naarmate een gazonoppervlak kleiner is, koelt het minder efficiënt. Zoals eerder benoemd, zal een één meter brede strook (gemodelleerd als geveltuintje) slechts een effect van 0,6°C geven.



*Figuur 3.10 Effect van gras op gevoelstemperatuur (PET, °C). In het midden van het grasveld ligt een betonnen speeltuin.*

### 3.4.4 Doorlatendheid en grootte van bomen

Uiteindelijk kunnen we uit bovenstaande paragrafen concluderen dat het verkoelende effect van volgroeide bomen vrijwel gelijk is voor verschillende wijktypen en straatorientaties. Het effect is vooral afhankelijk van de positie van de boom ten opzichte van de gevel. Maar wat gebeurt er als de boom zeer klein is of dun van blad, waardoor de boom meer zonlicht doorlaat? Om deze vragen te beantwoorden hebben we voor de naoorlogse tuinstad hoogbouw een aantal extra modelberekeningen uitgevoerd met verschillende bomen.

Allereerst hebben we gevarieerd met de mate waarin de boom zonlicht doorlaat (transmissiviteit). De twee geteste waarden voor de transmissiviteit waren 10% en 3%. Een transmissiviteit van 3% wordt vaak in modellen gebruikt als standaard (Lindberg et al., 2018, Konarska et al., 2013). Normaal gesproken laten loofbomen 's zomers 1% (tamme kastanje) tot 5% (kers) van het zonlicht door (Konarska et al., 2013). Daarom is 3% representatief voor een volwassen en gezonde boom. Een transmissiviteit van 10% is dan vrij hoog en vertegenwoordigt een boom met relatief weinig bladeren, bijvoorbeeld een honingboom.

Daarnaast hebben we het effect van de boomgrootte onderzocht. Over het algemeen duurt het een tiental jaren voordat een boom zijn maximale grootte heeft bereikt, maar ook kleine bomen bieden schaduw en dragen door verdamping bij aan stadsbrede verkoeling. Grote bomen (17 meter hoog, 6 meter brede kroon, de groene lijn in figuur 3.12) hebben in principe hetzelfde effect als kleine bomen (6 meter hoog, 3 meter brede kroon, de gele lijn in figuur 3.12), namelijk schaduw. De omvang van schaduw is alleen veel groter.

#### Het effect van de doorlatendheid van de boomkroon

- > Het verkoelende effect van een boom die 10% zonlicht doorlaat is tussen 9,5°C en 12°C PET (dicht bij de gevel). Een boom die 3% van het zonlicht doorlaat geeft ongeveer 1°C PET meer aan verkoelend effect.

#### Het effect van de grootte van de bomen (figuur 3.11)

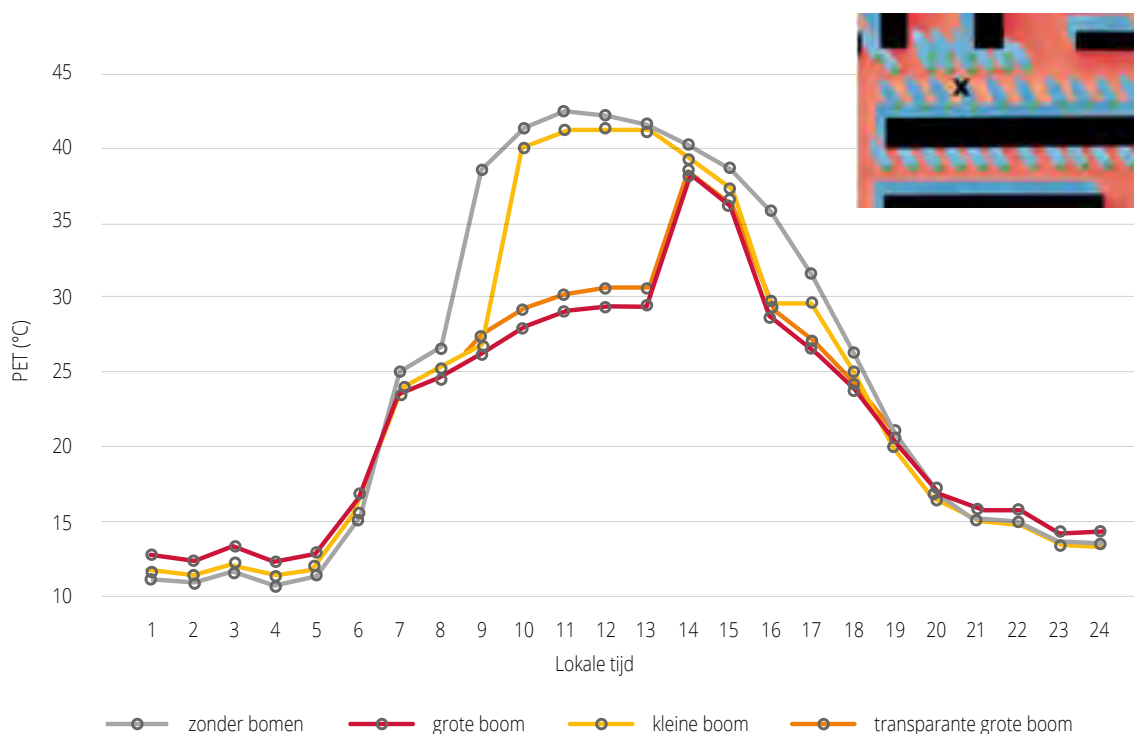
- > Het verkoelende effect van kleine bomen is beperkt, omdat er maar een klein gebied wordt beschaduwd.
- > De resultaten laten een verkoelend effect van 11,5°C zien.



Figuur 3.11 Het verkoelende effect van kleine bomen in een van oost naar west georiënteerde straat op de gevoelstemperatuur (PET, °C).

Figuur 3.12 toont over de dag de effecten van de boomgrootte en van de doorlatendheid van de boomkroon op de gevoelstemperatuur op één plek. Zolang er schaduw is, geven de simulaties zeer kleine verschillen in gevoelstemperatuur (tot 1°C PET) voor de bomen met verschillende doorlatendheden. Figuur 3.12 laat ook zien dat de PET-waarden in de schaduw circa 10°C lager zijn dan in de zon en dat de kleine boom (gele lijn) minder lang schaduw geeft dan de grote boom (rode en oranje lijn).

NB Een in Arizona uitgevoerde meetstudie laat grotere verschillen tussen verschillende bomen zien (10°C Tmrt, omgerekend zo'n 4,5°C PET, Schneider et al., 2019). Dit kan te verklaren zijn doordat Arizona een ander klimaat heeft dan Nederland, maar dit zou moeten worden geverifieerd.



Figuur 3.12 Dagelijks verloop van de gevoelstemperatuur op één plek (locatie x). De lijnen stellen verschillende boomhoogtes en kroondoorlatendheden voor.

Omdat de schaduwval gedurende de dag verandert, is het belangrijk om de positie van de bomen in een straat of buurt te optimaliseren, zodanig dat tijdens de heetste momenten van een dag banken, speeltuinen en andere vaak bezochte plaatsen zich in de schaduw bevinden. Zo is er in figuur 3.12 bijvoorbeeld in geen enkele situatie (met kleine noch grote bomen) schaduw tussen 14:00 en 15:00. Aan de andere kant zijn in de koelere perioden bankjes in de zon juist erg aantrekkelijk.

Het goede nieuws is dat het verkoelende effect van bomen ook zichtbaar is op de momenten dat er geen schaduw is. Deze verkoeling vlak bij de boom loopt toch nog op tot 2 °C PET overdag voornamelijk als gevolg van de lagere oppervlaktetemperatuur en het feit dat oppervlakken die eerder wel in de schaduw lagen minder warmte uitstralen. Zie bijvoorbeeld in Figuur 3.12 het verschil tussen de grijze en de gele lijn midden op de dag.

### 3.5 Maatregelenoverzicht

In deze paragraaf presenteren we een overzicht van inrichtingsmaatregelen die hitte in de stad tegengaan en voor een verlaging van de lucht- of gevoelstemperatuur kunnen zorgen. Tabel 3.2 presenteert ze in drie groepen:

- > groen – maatregelen gebaseerd op het toevoegen van vegetatie
- > blauw – maatregelen waarin water de basis vormt
- > grijs – niet-natuurgerelateerde maatregelen, zoals technische constructies

We geven ook aan of de maatregel juist overdag of 's nachts effectief is en op welke schaal het effect merkbaar is. Een fontein heeft bijvoorbeeld een zeer lokaal effect op straatniveau en draagt niet bij aan verkoeling op stadsschaal. Aan de andere kant is het effect van een groen dak niet merkbaar op straatniveau, maar als het overal in de stad wordt toegepast, kan er een verkoeling tot circa 2°C van de luchttemperatuur worden bereikt (zie tabel 3.2)

Tabel 3.2 geeft per maatregel het soort en de omvang van het verkoelende effect aan. Het effect wordt meestal gegeven in de vorm van een bandbreedte, omdat de exacte temperatuurverandering afhankelijk is van vele factoren, waaronder het lokale microklimaat en specifieke eigenschappen van de maatregel. Als de maatregel geen effect heeft op de luchttemperatuur of de gevoelstemperatuur, of als het effect te verwaarlozen is, dan noteren we geen waarde (--). Als we een effect verwachten, maar er is geen onderzoek gevonden, bevat de cel vraagtekens (??). Dit is voornamelijk het geval bij gevoelstemperatuur, omdat onderzoek op dit gebied veel minder vaak voorkomt dan onderzoek naar de effecten op de luchttemperatuur. Ten slotte geven we voor elke maatregel het overheersende verkoelingsprincipe aan en literatuurverwijzingen.

Sommige maatregelen hebben een sterk effect op de oppervlaktetemperatuur, bijvoorbeeld albedoverlaging, groene gevels of een waterdak. Koelere oppervlakken stralen dan minder energie terug en helpen de gevoelstemperatuur te verlagen. Wat mogelijk nog belangrijker is, is dat koele daken en gevels helpen tegen hoge binnentemperaturen. Effecten op de binnentemperatuur vallen in principe buiten het bestek van dit onderzoek, maar inrichtingsmaatregelen die ook voor een koeler binnenklimaat zorgen, zijn natuurlijk ook onderdeel van een hittebestendige stad. Alle temperatuurwaarden in de tabel presenteren dus het effect op de buitenomgeving.

Tabel 3.2. *Overzicht van verkoelende groene, blauwe of grijze inrichtingsmaatregelen die door hun verkoelingsprincipe effectief zijn op het schaalniveau van de stad of lokaal en de lucht- of gevoelstemperatuur vooral overdag of 's nachts verlagen. De opgenomen temperatuureffecten komen uit verschillende wetenschappelijke studies en presenteren waarden die op verschillende momenten op de dag, hoogtes, en afstanden tot de maatregel kunnen zijn gemeten of gemodelleerd (-- betekent een te verwaarlozen effect, ?? betekent geen waarde gevonden in de literatuur).*

| Soort | Maatregel                                    | Verkoelings-principe     | Maatregel vooral voor |       | Typisch schaal-niveau waarop maatregel effectief is |        | Verkoelende effecten gevonden in literatuur |           |                              | Extra informatie                                                                                                                                                                                                      |
|-------|----------------------------------------------|--------------------------|-----------------------|-------|-----------------------------------------------------|--------|---------------------------------------------|-----------|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|       |                                              |                          | Dag                   | Nacht | Stad                                                | Lokaal | Luchttemperatuur [°C]                       |           | Gevoels-temperatuur [°C PET] |                                                                                                                                                                                                                       |
|       |                                              |                          |                       |       |                                                     |        | Stad                                        | Lokaal    | Lokaal                       |                                                                                                                                                                                                                       |
| Groen | <b>Bomen/leibomen</b>                        | verdamping, beschaduwing | X                     |       | X                                                   | X      | 0,2 - 2,7                                   | 0,7 - 2,7 | 3,4 - 19,0                   | Effect afhankelijk van boomtype en -grootte en het lokale klimaat. Referenties zie voetnoot <sup>13</sup>                                                                                                             |
|       | <b>Gras/Struiken</b>                         | verdamping, reflectie    | X                     | X     | X                                                   | X      | 0,1 - 1,1                                   | 0,9 - 1,2 | 0,4 - 4,9                    | Effect van een gezond goed verdampend grasveld. Gras heeft ook effect op oppervlakte-temperatuur (tot 20°C kouder dan beton). Referenties zie voetnoot <sup>14</sup>                                                  |
|       | <b>Grasbeton-tegels</b>                      | verdamping               | X                     | X     |                                                     | X      | --                                          | --        | --                           |                                                                                                                                                                                                                       |
|       | <b>Groene gevels</b>                         | verdamping               | X                     | X     |                                                     | X      | 0 - 1,9                                     | 0,2 - 1,5 | ??                           | Hoe smaller de straat, hoe groter het effect op de luchttemperatuur. Groter effect voor gevels met meer zonnestraling. Referenties zie voetnoot <sup>15</sup>                                                         |
|       | <b>Groene daken (extensief)</b>              | verdamping               |                       | X     | X                                                   |        | 0 - 1,8                                     | 0 - 0,8   | --                           | Een met sedum bedekt groen dak geeft weinig verkoeling 's nachts (vergeleken met een wit dak). Effect op stadsniveau is als 100% van alle daken in de stad groen zijn. Referenties zie voetnoot <sup>16</sup>         |
|       | <b>Groene daken (intensief)</b>              | verdamping               | X                     | X     | X                                                   |        | 0 - 1,7                                     | 1,0 - 1,6 | --                           | Effect op stadsniveau is als 100% van alle daken in de stad groen zijn. Referenties zie voetnoot <sup>17</sup>                                                                                                        |
|       | <b>Park/groene wiggen/vingers in de stad</b> | verdamping, beschaduwing | X                     | X     | X                                                   |        | ??                                          | 1,1 - 2,0 | 1,9 - 4,2                    | Effect afhankelijk van vegetatietype (boom versus gras), boomgrootte, grootte van het park en het lokale klimaat. Effect op PET gemeten in schaduw is groter dan hier genoemd. Referenties zie voetnoot <sup>18</sup> |

13 Nouri & Matzarakis (2019); Klok et al. (2019); Lee et al. (2016); Amani-Beni et al. (2018); Wong & Jusuf (2010); Skelhorn et al. (2014); Spangenberg et al. (2008); Abreu-Harbach et al. (2015).

14 Takebayashi & Moriyama (2009); Lee et al. (2016); Amani-Beni et al. (2018); Yang et al. (2018); Klemm et al. (2015); Xi et al. (2012); Chatzidimitriou & Yannas (2016); Cheng & Ng (2013); Lobaccaro & Acero (2015).

15 Hoelscher et al. (2016); Djedjig et al. (2015); Djedjig et al. (2017); Wong et al. (2010); Herath et al. (2018).

16 Solcerova et al. (2017); Santamouris (2014); Sun et al. (2016); Peng & Jim (2013); Ouldboukhitine et al. (2014); Alcazar et al. (2016); Berardi (2016); Herath et al. (2018).

17 Santamouris (2014); Peng & Jim (2013); Speak et al. (2013); Lee & Jim (2019); Jin et al. (2018).

18 Amani-Beni et al. (2018); Klok et al. (2019); Jansson et al. (2006); Klemm et al. (2015); Spangenberg et al. (2008).

| Soort | Maatregel                       | Verkoelings-principe      | Maatregel vooral voor |       | Typisch schaal-niveau waarop maatregel effectief is |        | Verkoelende effecten gevonden in literatuur |           |                              | Extra informatie                                                                                                                                   |
|-------|---------------------------------|---------------------------|-----------------------|-------|-----------------------------------------------------|--------|---------------------------------------------|-----------|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|       |                                 |                           | Dag                   | Nacht | Stad                                                | Lokaal | Luchttemperatuur [°C]                       |           | Gevoels-temperatuur [°C PET] |                                                                                                                                                    |
|       |                                 |                           |                       |       |                                                     |        | Stad                                        | Lokaal    | Lokaal                       |                                                                                                                                                    |
| Blauw | Vijvers                         | verdamping                | X                     |       |                                                     | X      | 0,5 - 1,3                                   | 0,5 - 0,7 | 0,6 - 3,6                    | Effect afhankelijk van het temperatuurverschil tussen water en lucht en de grootte van het waterlichaam.<br>Referenties zie voetnoot <sup>19</sup> |
|       | Meer                            | verdamping                | X                     |       | X                                                   |        | 1,0 - 2,0                                   | 0,5 - 1,6 | ??                           | Effect afhankelijk van het temperatuurverschil tussen water en lucht en de grootte van het waterlichaam.<br>Referenties zie voetnoot <sup>20</sup> |
|       | Singels/<br>grachten/<br>sloten | verdamping                | X                     |       |                                                     | X      | ??                                          | 0,1 - 0,8 | 0,2 - 2,0                    | Effect afhankelijk van het temperatuurverschil tussen water en lucht en de grootte van het waterlichaam.<br>Referenties zie voetnoot <sup>21</sup> |
|       | Rivier                          | verdamping,<br>ventilatie | X                     |       | X                                                   |        | ??                                          | 0,5 - 4,0 | 1,0 - 4,0                    | Effect afhankelijk van het temperatuurverschil tussen water en lucht en de grootte van het waterlichaam.<br>Referenties zie voetnoot <sup>22</sup> |
|       | Fontein                         | verdamping                | X                     |       |                                                     | X      | --                                          | 1,0 - 4,7 | 1,0 - 5,0                    | Referenties zie voetnoot <sup>23</sup>                                                                                                             |
|       | Vernevelings-<br>installaties   | verdamping                | X                     |       |                                                     | X      | --                                          | 0,7 - 3,0 | ??                           | Data zijn van Japanse studies.<br>Referenties zie voetnoot <sup>24</sup>                                                                           |
|       | Besprenkeling<br>straten        | verdamping                | X                     |       |                                                     | X      | --                                          | 0,8 - 3,0 | ??                           | Referenties zie voetnoot <sup>25</sup>                                                                                                             |
|       | Polderdaken                     | verdamping                | X                     |       | X                                                   |        | ??                                          | --        | --                           | Effect vergelijkbaar met dat van een intensief groendak.<br>Referenties zie voetnoot <sup>26</sup>                                                 |

19 Klok et al. (2019); Jacobs et al. (2020); Syafii et al. (2017); Taleghani & Berardi (2018); Taleghani et al. (2014); Fung & Jim (2020).

20 Theeuwes et al. (2013); Saaroni & Ziv (2003); Huang et al. (2008).

21 Klok et al. (2019); Jacobs et al. (2020).

22 Klok et al. (2019); Völker et al. (2013); Hathway & Sharples, (2012).

23 Jacobs et al. (2020); Nishimura et al. (1998); Xue et al. (2015); Gómez et al. (2013).

24 Ishii et al. (2009); Farnham et al. (2011); Yamada et al. (2006); Yamada et al. (2008)

25 Solcero et al. (2018); Hendel et al. (2016).

26 Andersen et al. (2018).

| Soort | Maatregel                                                                                  | Verkoelings-principe     | Maatregel vooral voor |       | Typisch schaal-niveau waarop maatregel effectief is |        | Verkoelende effecten gevonden in literatuur |           |                              | Extra informatie                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-----------------------|-------|-----------------------------------------------------|--------|---------------------------------------------|-----------|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|       |                                                                                            |                          | Dag                   | Nacht | Stad                                                | Lokaal | Luchttemperatuur [°C]                       |           | Gevoels-temperatuur [°C PET] |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|       |                                                                                            |                          |                       |       |                                                     |        | Stad                                        | Lokaal    | Lokaal                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Grijs | <b>Parasols/<br/>doeken/per-<br/>gola's/arcades/<br/>loggia's/luifels/<br/>schuttingen</b> | beschaduwung             | X                     |       |                                                     | X      | --                                          | 0 - 1,0   | 2,0 - 17,0                   | Genoemde effecten betreffen alleen schaduw door gebouwen.<br>Referenties zie voetnoot <sup>27</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|       | <b>Zonneschoor-<br/>steen</b>                                                              | ventilatie               | X                     |       |                                                     | X      | --                                          | ??        | ??                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|       | <b>Windcorridors</b>                                                                       | ventilatie               | X                     |       | X                                                   | X      | ??                                          | ??        | ??                           | Windcorridors verhogen de windsnelheid tot 1,5 m/s. Effect op luchttemperatuur en PET is niet gekwantificeerd.<br>Referenties zie voetnoot <sup>28</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|       | <b>Grote oppervlaktes</b>                                                                  | ventilatie               | X                     | X     | X                                                   |        | ??                                          | ??        | ??                           | De openheid wordt weergegeven door de SVF (sky view factor). Een lage SVF leidt in de zomer tot een hogere temperatuur vanwege het blootgestelde oppervlak en het gebrek aan schaduw. Een 10% hogere SVF zorgt ook voor een toename van de windsnelheid met 8%. Totaaleffect van SVF op temperatuur of PET hangt ook af van albedo, aanwezigheid van vegetatie en hoogte-breedte verhouding straten.<br>Referenties zie voetnoot <sup>29</sup> |
|       | <b>Hoogte-breedte verhouding straten</b>                                                   | ventilatie, beschaduwung | X                     |       |                                                     | X      | --                                          | ??        | ??                           | Studies richten zich vaak op droge en hete klimaatzones, niet passend bij de Nederlandse context.<br>Referenties zie voetnoot <sup>30</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|       | <b>Oriëntatie straten</b>                                                                  | ventilatie, beschaduwung | X                     |       |                                                     | X      | --                                          | max 0,4   | max 10,2                     | Referenties zie voetnoot <sup>31</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|       | <b>Lichte gevels</b>                                                                       | reflectie                | X                     |       |                                                     | X      | --                                          | 0,1 - 0,7 | ??                           | Referenties zie voetnoot <sup>32</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|       | <b>Lichte bestrating</b>                                                                   | reflectie                | X                     |       |                                                     | X      | --                                          | max 1,9   | ??                           | Het wordt aanbevolen om reflecterende trottoirs alleen te gebruiken als als de hoogte-breedte verhouding van de straat niet groter is dan 1,0, anders wordt de straling gereflecteerd naar de gevels.<br>Referenties zie voetnoot <sup>33</sup>                                                                                                                                                                                                |
|       | <b>Witte daken</b>                                                                         | reflectie                | X                     |       | X                                                   |        | max 0,9                                     | --        | --                           | 0,1-0,3 °C per 10% albedo verhoging<br>Referenties zie voetnoot <sup>34</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |

27 Nouri et al. (2018); Martinelli et al. (2015); Watanabe et al. (2014); Paolini et al. (2014).

28 Loibl et al. (2010).

29 Yang et al. (2013).

30 Bijvoorbeeld Shashua-Bar et al. (2004); Johansson (2006); Ali-Toudert & Mayer (2006); Andreou (2013).

31 Taleghani et al. (2015).

32 Nazarian et al. (2019); Zhang et al. (2018); Shashua-Bar et al. (2012).

33 Santamouris et al. (2012); Taleghani et al. (2014); Taleghani & Berardi (2018).

34 Santamouris (2014).

Uit tabel 3.2 kunnen we opmaken dat het verkoelende effect van bomen sterk kan variëren, maar ook dat van alle mogelijke maatregelen bomen het sterkst kunnen verkoelen.

Kleine stedelijke watervormen, zoals grachten en vijvers, zijn over het algemeen geen effectieve verkoelende maatregelen. Ze verlagen de lucht- of de gevoelstemperatuur maar in geringe mate (Jacobs et al., 2020).

Er zijn echter ook watervormen die wel voor verkoeling kunnen zorgen. Dat zijn maatregelen waarbij water in contact komt met de huid, zoals schone grachten om in te zwemmen en fontein en of bedriegertjes om in te spelen. Ook kunnen op lokale schaal en voor kortere periodes vernevelingsinstallaties de luchttemperatuur merkbaar verlagen. Daarnaast biedt de omgeving rond stedelijke waterelementen vaak de gelegenheid om een verkoelende groene, schaduwrijke omgeving met bomen te creëren of de natuurlijke ventilatie te vergroten.

### 3.6 Conclusies

Inrichtingsmaatregelen voor een hittebestendige stad zijn onder te verdelen in 1) maatregelen die stadsbreed zorgen voor een verlaging in de luchttemperatuur en 2) maatregelen die lokaal de gevoelstemperatuur verlagen, waarmee op straat- of buurtschaal koele plekken kunnen worden gecreëerd. Bijna alle maatregelen zijn gebaseerd op vier verkoelende principes: verdamping, beschaduwing, reflectie en ventilatie, die ieder op een eigen manier zijn gekoppeld aan de stedelijke energiebalans en de energiebalans van het lichaam, die de uiteindelijke lucht- en gevoelstemperatuur bepalen.

Toename van verdamping door het aanleggen van zoveel mogelijk groene en blauwe oppervlakken is op stadsschaal de effectiefste manier om de luchttemperatuur naar beneden te krijgen. Hoe meer vegetatie en water er is, hoe meer energie er van het invallende zonlicht wordt gebruikt voor verdamping en hoe minder energie er overblijft om de stad en de lucht op te warmen. Op basis van metingen in Nederland (Steenefeld et al., 2011; Heusinkveld et al., 2014; Van Hove et al., 2015) kunnen we voor Nederlandse steden stellen dat een toename van de fractie groen op wijk- of stadsschaal met 10 procentpunten zal leiden tot een verkoeling van ongeveer 0,5°C. Ook reflectie van zonnestraling terug de atmosfeer in door het gebruik van witte daken, andere reflecterende stedelijke materialen zorgen ervoor dat er minder energie beschikbaar is om de lucht op te warmen, waardoor de luchttemperatuur stadsbreed omlaag gaat. Een verlaging van de luchttemperatuur met 1°C (door 20 procentpunt meer groen) is overigens niet veel als het meer dan 30°C is. Om hitteproblemen overdag te beperken dient men de gevoelstemperatuur te beperken.

Van alle verkoelende principes hebben schaduw en wind het sterkste effect op de gevoelstemperatuur en kunnen er met schaduw en ruimte voor wind lokaal koele plekken worden gecreëerd. Schaduw zorgt ervoor dat ons lichaam minder wordt opgewarmd en wind bevordert de warmteuitwisseling tussen lichaam en omgeving, waardoor de gevoelstemperatuur lager blijft.

Onze modelresultaten laten een verkoelend effect van bomen op de gevoelstemperatuur zien tussen 9,5 en 13°C PET. De sterkste verkoeling vinden we bij de schaduw van een boom die ook nog de gevel beschaduw



Het verkoelende effect van kleine bomen is ongeveer gelijk aan dat van grote bomen, maar ze bieden wel geringere schaduwoppervlakken. Daardoor zal de plek nabij de boom, met of zonder bankje, maar voor kortere tijd in de schaduw liggen.

Bomen met een minder dichte kroon blijken een verkoelend effect te hebben dat tot  $1^{\circ}\text{C}$  PET lager ligt dan dat van bomen met een volle kroon. Zo'n klein verschil komt niet overeen met eerdere studies die een veel groter belang van kroondichtheid laten zien, zo'n  $4,5^{\circ}\text{C}$  PET. Dit zou nader kunnen worden onderzocht.

We hebben in dit hoofdstuk ook een overzicht gegeven van de effectiviteit van verschillende inrichtingsmaatregelen. Zowel onze modelresultaten als de literatuur wijzen bomen aan als de effectiefste maatregel voor een hittebestendige inrichting. Toch sluiten we andere adaptatiemaatregelen niet uit. Gras vermindert bijvoorbeeld de oppervlaktetemperatuur en koelt ook de luchttemperatuur op stadsschaal. Aan de andere kant droogt gras snel uit en kan het zelfs zorgen voor een lichte verhoging van de luchttemperatuur. Tabel 3.2 geeft een overzicht van het effect van andere maatregelen tegen hittestress.



Meer informatie over de meest gebruikte maatregelen is terug te vinden in de Ef-Fact checker<sup>35</sup>. Hierin beantwoorden we vragen over het effect van inrichtingsmaatregelen op zowel de lucht- als gevoelstemperatuur. Daarnaast gaan we in op praktische vragen zoals 'Wat zijn de beste bomen als we hittestress willen tegengaan?' of 'Is het verkoelende effect van een groendak merkbaar op straatniveau?'.

In het volgende hoofdstuk nemen we onze bevindingen over hittemaatregelen en verkoelingsprincipes mee in een voorstel voor ontwerprichtlijnen die bijdragen aan een stadsbrede verlaging van de luchttemperatuur of aan de realisatie van voldoende koele plekken.

35 [www.hva.nl/klimaatbestendigestad...](http://www.hva.nl/klimaatbestendigestad...)

# Hitterichtlijnen





4

## 4. Hitterichtlijnen

Voor een hittebestendige inrichting van de buitenruimte zijn ontwerprichtlijnen nodig die helpen bij het kiezen en toetsen van de inrichting. De vraag die centraal staat is: *welke ontwerprichtlijnen werken in de praktijk?*

Dit hoofdstuk maakt op basis van uitkomsten uit hoofdstuk 2 en 3 keuzes ten aanzien van richtlijnen. Deze leiden tot het antwoord op de centrale hoofdvraag van het onderzoek: *wanneer is een (ontwerp van een) stad, wijk of straat voldoende hittebestendig?*

Richtlijnen moeten zo worden gekozen dat gemeenten ermee kunnen bepalen wat zij hittebestendig vinden en waaraan ze ontwerpen kunnen toetsen. Bovendien dienen de richtlijnen haalbaar te zijn. De afgelopen twee jaar hebben we richtlijnen verkend en besproken met de twaalf gemeentelijke consortiumpartners en bij zeven van hen getoetst. Hieruit kwamen drie ontwerprichtlijnen naar voren.

In onderstaande paragrafen beschrijven we allereerst de werkwijze en keuzes van gemeenten op het gebied van hittebestendigheid. Dan volgt een verdieping in een van de richtlijnen (afstand tot koelte), omdat er behoefte bestond aan inzicht in effectiviteit en bruikbaarheid van deze richtlijn. De laatste paragraaf presenteert de drie ontwerprichtlijnen.

### 4.1 Richtlijnen hitte, tussen visie en temperatuurwaarde

Uit verschillende werksessies<sup>36</sup> die we afgelopen jaren bij gemeenten hebben gehouden, komt naar voren dat een ruime meerderheid behoefte heeft aan concrete richtlijnen. Als je bedacht hebt dat je in je inrichting rekening wilt houden met hitte, heb je namelijk een manier nodig om ervoor te zorgen dat het ook zo in de (her)inrichting terecht komt.

In de aanloop naar de eis dat in de toekomst iedere gemeente hittebestendig ingericht moet zijn, zijn een aantal gemeenten al voorzichtig begonnen met het formuleren van een hittebestendig beleid. De doelstelling van een hittebestendige inrichting wordt door gemeenten op verschillende wijzen benaderd en is in wezen in drie varianten op te splitsen: 1) een doelstelling voor hitte in de vorm van een visie, 2) een cijfermatige aanpak in de vorm van een temperatuurwaarde of 3) met een richtlijn. Tabel 4.1 toont voor elke wijze van benaderen een aantal doelstellingen. We hebben hier telkens de implicaties voor meetbaarheid, toetsbaarheid, handhaving en ontwerp aangegeven. Een overzicht van het hittebeleid van gemeenten en provincies staat in bijlage 7, tabel b.3. De manier waarop gemeenten en provincies hitte in beleid opnemen verschilt en kan in de loop van de tijd veranderen.

<sup>36</sup> Werksessies bij gemeenten: Amsterdam op 25-09-2018 en 27-06-2019, RIVUS op 30-10-2018 en 26-03-2019, Beverwijk-Heemskerk op 16-05-2019, Eindhoven op 08-07-2019 en Haarlem op 13-09-2018.

Tabel 4.1 Wijze van benadering hittebeleid door gemeenten en provincies in doelstellingen en de implicaties daarvan voor meetbaarheid, toetsing, handhaving en ontwerp.

|                              | Doelstelling                                        | Meetbaar met                                                           | Toets                                                                                       | Uitvoering handhaving                                       | Implicaties voor ontwerp                                                                                                 |
|------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>1. Visie</b>              | Meer groen                                          | Groenindex                                                             | Geen                                                                                        | Eenvoudig                                                   | Veel vrijheid                                                                                                            |
|                              | Leefbaarheid verbeteren tijdens hitte               | Interviews                                                             | Geen                                                                                        | Interviews kosten veel tijd                                 | Veel vrijheid                                                                                                            |
| <b>2. Temperatuur-waarde</b> | Stedelijk hitte-eilandeffect met 2°C omlaag brengen | Meerjarig monitoringsprogramma of met regionaal weermodel voor-spellen | Geen, de bijdrage van individuele ontwikkelingen zijn moeilijk te vertalen naar stadsschaal | Complex                                                     | Onduidelijk hoeveel een ontwerp zou moeten bijdragen aan de doelstelling                                                 |
|                              | Loop- en verblijfsgebieden niet warmer dan 41°C PET | GIS-analyse of ENVI-met modellering                                    | Max 41°C PET op 1,5 m hoogte<br>Let op: resulteert dit in een comfortabele openbare ruimte? | Complex: wat als de PET in de schaduw de 41°C overschrijdt? | Resulteert in 100% schaduw op loop- en verblijfsgebieden omdat deze PET op hete dagen alleen in de schaduw wordt gehaald |
|                              | Reeks warme nachten kleiner dan 7                   | Meerjarig monitoringsprogramma of GIS-analyse                          | Geen, de bijdrage van individuele ontwikkelingen zijn moeilijk te vertalen naar stadsschaal | Complex                                                     | Onduidelijk hoeveel een ontwerp zou moeten bijdragen aan de doelstelling                                                 |
| <b>3. Richtlijn</b>          | Afstand tot koelte kleiner dan XX meter             | GIS-analyse op basis van PET-kaart                                     | Loopafstand tot en omvang van koele plek meten                                              | Strategische locaties voor koele plekken kiezen             | Vrijheid van inrichting koele plek, mits voldoende schaduw                                                               |
|                              | Verdampingsindex van groen > XX of % groen > XX     | GIS-analyse op basis NDVI                                              | Methode % groen vaststellen                                                                 | Maakt kiezen van realistische doelstelling mogelijk         | Manier en plaats van vergroening vrij                                                                                    |
|                              | 50% oppervlakken verkoelend inrichten               | GIS-analyse op basis van nader te bepalen verkoelend oppervlak         | Methode % verkoelende oppervlakken vaststellen                                              | Redelijk eenvoudig                                          | Afhankelijk van de definitie van een verkoelend oppervlak                                                                |
|                              | % schaduw > XX                                      | GIS-analyse op basis schaduwkaart                                      | Methode % schaduw vaststellen                                                               | Alleen op logische plekken deze richtlijn toepassen         | Kan met technische en natuurlijke middelen                                                                               |

De volgende paragrafen lichten de drie manieren van benaderen nader toe.

#### 4.1.1 Visie als doelstelling

Wanneer hittebestendigheid een plek in een omgevingsvisie heeft, wordt dit vaak als onderdeel van een leefbare stad genoemd. Meer bomen en groen en daarmee minder verharding vervullen een sleutelrol op de weg naar een hittebestendige stad. Veel gemeenten zetten hitte ook in als extra argument voor het vergroenen van de stad.

De vragen die zich opdringen bij het gebruik van een visie als doelstelling zijn echter: *hoeveel groen? Welke soorten groen zijn belangrijk? En hoe is de verdeling van dat groen over de stad en de buurten?* Deze vragen worden vaak niet gespecificeerd. Wel worden sfeerbeelden gegeven van mogelijke vergroening van straten ter inspiratie. Plannen vanuit dergelijke visies kunnen worden vergeleken op hun bijdrage in mate van vergroening, maar er wordt geen ondergrens of streefwaarde duidelijk. De meeste gemeenten hebben juist een doorvertaling van de visie in concrete doelstellingen nodig om projecten en ontwerpen op hittebestendigheid te toetsen. Dat kan middels een temperatuurwaarde of richtlijn zoals in de volgende paragrafen is te lezen.

***Ontwerpers hebben behoefte aan voldoende vrijheid, gemeenten aan duidelijke doelstellingen om te kunnen toetsen.***

#### 4.1.2 Temperatuurwaarde als doelstelling

De temperatuurwaarde als doelstelling kan bijvoorbeeld bestaan uit een maximale lucht- of gevoelstemperatuur op een bepaalde tijd van de dag, of in de vorm van een maximaal stedelijk hitte-eilandeffect<sup>37</sup>. Een andere mogelijkheid is om een maximale waarde binnen een vastgesteld tijdsinterval te stellen, zoals een reeks warme nachten. Een logische grenswaarde is een PET van 35 of 41°C, omdat daarboven mensen sterke respectievelijk extreme mate van hittestress ervaren (Matzarakis et al., 1999). Maar bij een doelstelling in temperatuurwaarde zul je moeten bepalen in welke situatie en hoe vaak een drempelwaarde of de tijdsduur dat men daaraan wordt blootgesteld mag worden overschreden. We hebben geen onderbouwingen voor dit soort keuzes kunnen vinden.

Bij het gebruik van een temperatuurwaarde als doelstelling komen er nog meer vragen op: *geldt de gestelde temperatuurwaarde voor de hele stad of voor bepaalde gebieden? Alleen op het maaiveld of ook op de daken? Hoe ga je om met zomerse dagen die relatief vaak voorkomen en weersextremen die zich slechts eens in de zoveel tijd voordoen (zoals de zomer van 2019 met luchttemperaturen boven de 40°C)?* En voor het beleidsveld een belangrijk punt: *Hoe kun je ieder ontwerp of iedere situatie beoordelen op een effect in graden?* Met welke methode of welk model moeten ontwerpen worden getoetst?

Voor bovenstaande vragen kan in principe een gestandaardiseerde methode worden gekozen, net zoals bij stresstesten wordt gedaan. Het opnemen van en voldoen aan een maximale temperatuurwaarde betekent echter nog niet dat mensen voldoende comfort of koelte hebben, het betekent alleen dat er geen extreem hete plekken zijn.

<sup>37</sup> Het stedelijk hitte-eilandeffect is het verschil in de temperatuur in de stad en een meetpunt buiten de stad [zie voor uitleg paragraaf 2.1.3]

### 4.1.3 Richtlijnen als doelstelling

De beperkingen van een visie of van een temperatuurwaarde als doelstelling voor een hittebestendig ontwerp, roept de vraag op of het ook anders kan. Gemeenten in het onderzoekconsortium gaven aan behoefte te hebben aan richtlijnen die niet te vrijblijvend zijn of een waarde nastreven die niet te toetsen of handhaven is. Figuur 4.1 presenteert een schematische weergave van de doelstellingen voor hitte.

Het gaat om richtlijnen die:

- > eenvoudig te meten en te toetsen zijn;
- > een minimale grenswaarde aangeven;
- > een streefwaarde aangeven;
- > ruimte laten voor ontwerpers en ontwikkelaars.



*Figuur 4.1 Van visie en temperatuurwaarden naar richtlijnen.*

Naast deze uitgangspunten voor de richtlijnen is er ook behoefte aan ruimtelijke variatie binnen een richtlijn. Daarmee wordt bedoeld dat grenswaarden zouden kunnen verschillen per gemeente, per wijktype, per mate van verstedelijking of gebruik van het gebied.

In de sessies met gemeenten zijn verschillende mogelijke richtlijnen besproken. De drie richtlijnen die de meeste potentie lijken te hebben, zijn de volgende:

1. afstand tot koelte;
2. percentage schaduw op loopgebieden;
3. percentage groen per wijktype.

Paragraaf 4.3 geeft een beschrijving van deze drie richtlijnen.

Om klimaatadaptatiemaatregelen tot uitvoering te brengen zijn er duidelijke afspraken nodig met ontwerpers en bouwers. Richtlijnen kunnen daarbij helpen. Als opdrachtgever kies je een benadering die past bij de opgave en de gemeentelijke organisatie. Is dat een benadering van verleiding, waarmee meer innovatieve oplossingen tot stand kunnen komen, of een van dwang, waarmee prestatienormen worden behaald? Hitte is

een meekoppelthema maar kan met een duidelijke richtlijn worden geborgd in verschillende contractvormen. Voorbeelden uit de praktijk (Heijningen et al., 2019) geven aan dat in zowel bestek, design & contract als prestatiecontract een eenvoudige richtlijn de kans op realisatie vergroot. Wat je niet expliciet vraagt, wordt niet geleverd.

## 4.2 Koele plekken

Voordat de drie richtlijnen uit de vorige paragraaf verder kunnen worden ontwikkeld tot een richtlijn met grenswaarden, is er voor de richtlijn afstand tot koelte meer inzicht nodig in het gebruik van koele plekken. De centrale vragen zijn: *worden koele plekken in de stad gebruikt tijdens hete dagen?* en *hoe kunnen we koele plekken in de stad het best inrichten en definiëren?*

Op twee zomerdagen in 2019 is onderzoek gedaan op koele plekken in de wijk Middenmeer in Amsterdam. Er zijn temperatuurmetingen uitgevoerd, interviews gehouden en observaties gedaan, die samen inzicht geven in de vraag wat een koele plek voor mensen aantrekkelijk maakt op hete dagen. De metingen zijn gedaan op de twee warmste dagen van het jaar: 23 en 25 juli 2019. Met op 25 juli 2019 zelfs hiterrecords van boven de 40°C op acht meetstations in Nederland. In Amsterdam (Schiphol) werd het ruim 32°C.

### 4.2.1 Aanpak

De selectie van de koele plekken is gemaakt op basis van een aantal criteria. De afstand-tot-koeltekaart gemaakt door Tauw met GIS is het eerste uitgangspunt, zie figuur 4.2. De kaart geeft de contouren van plekken met een gevoelstemperatuur (PET) onder 35°C. Een koele plek is geselecteerd als meetlocatie wanneer deze groter is dan 200m<sup>2</sup> en toegankelijk is (gemaaid grasveld, paden of bankjes). De grootte van minimaal 200 m<sup>2</sup> is gekozen omdat deze maat voor een significant koeleffect kan zorgen (Bacci et al., 2003) en minimaal nodig is om bijvoorbeeld een evenwichtig ecosysteem te vormen (Verploegh, 2016). Deze definitie is een werkdefinitie en behoeft nadere verkenning. Daarom hebben we naast drie koele locaties volgens deze definitie ook twee locaties gekozen die onze onderzoekers als koel zouden beoordelen op basis van de hoeveelheid schaduw, maar die niet als koele plek op de GIS-kaart staan. Dit zijn een fontein (meetpunt 1) en een groene binnentuin (meetpunt 3) van een open bouwblok. Figuur 4.2 toont de locaties van de meetpunten en de omvang van de koele plekken. Bijlage 8 toont foto's van de koele plekken.



*Figuur 4.2 Kaart met koele plekken (Tauw) en de meetlocaties in Middenmeer, Amsterdam.*

Op elke locatie zijn de volgende data verzameld:

- > De meteodata benodigd om de gevoelstemperatuur in de zon en de schaduw te berekenen: luchttemperatuur, relatieve luchtvochtigheid, stralingstemperatuur (zwarte bol) en de windsnelheid<sup>38</sup>;
- > De ervaren temperatuur (via een enquête);
- > De mening van de bezoekers over inrichting, frequentie van het gebruik en de afstand tot de woning (via een enquête);
- > Het aantal mensen en waar zij verblijven: in de zon of de schaduw.

De gebruikte enquête- en observatieformulieren zijn op aanvraag beschikbaar.

### Meetapparatuur

Er zijn drie Kestrels 5400 op statief als meetstation gebruikt: een als referentiestation en per locatie een in de zon en een in de schaduw. Het referentiestation stond in de zon op een terras aan de Linnaeusstraat 29 in Amsterdam, zie meetpunt 6 in figuur 4.2. Dit referentiepunt is geheel verhard met klinkers en heeft een hoge bakstenen gevel aan de meetkant en een gracht aan de andere kant. Deze locatie is daarmee bewust een voorbeeld van een warme locatie met weinig groen.

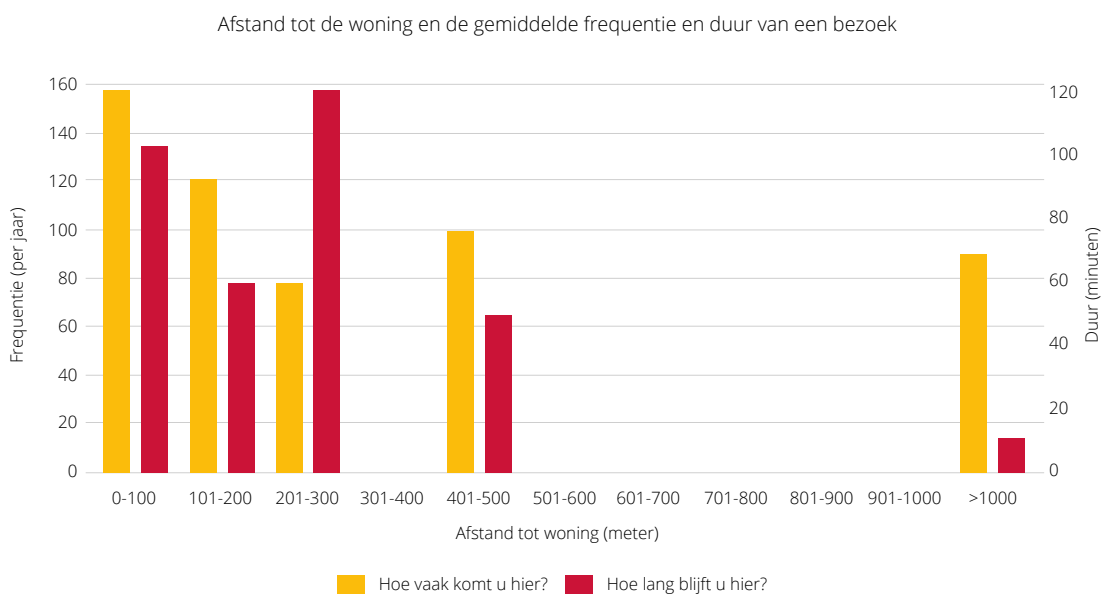
#### 4.2.2 Observaties en enquêtes

Op de twee meetdagen zijn in totaal 21 enquêtes afgenomen. Voor alle deelnemers geldt dat zij meer dan 2 à 3 minuten op de locatie aanwezig waren alvorens de enquête werd afgenomen. Deze tijd is nodig voor een representatieve inschatting van de thermische beleving (Lau et al., 2019). Beide meetdagen vielen in de zomervakantie en de respondenten gaven aan dat er op de locaties normaal veel meer kinderen waren dan nu het geval was.

<sup>38</sup> Op de eerste meetdag (23-07-2019) is de windsnelheid van de Kestrels niet juist geregistreerd. In plaats van de gemeten windsnelheid is de PET voor deze dag berekend met de uurgemiddelde windsnelheid op Schiphol.

Uit de observaties en enquêtes gepresenteerd in figuur 4.3 blijkt dat mensen een koele plek het vaakst bezoeken wanneer deze binnen 200 meter van de woning ligt. Bij een afstand boven de 500 meter van de woning neemt het aantal bezoekers en de verblijfsduur op een koele plek sterk af. De afstand tot de woning is niet hemelsbreed gerekend maar betreft de lengte van het tracé. In de enquête is gevraagd naar de reistijd en afstand van de woning tot de koele plek. In de schatting van de ondervraagden is de reistijd omgerekend naar de afstand tot de woning, omdat de inschatting van looptijd nauwkeuriger werd geschat dan de afstand.

Opvallend is dat bezoekers die meer dan een kilometer bij een locatie vandaan wonen weer vaker op de koele plek komen met maar een korte verblijfsduur. De verklaring hiervoor is dat koele plekken ook worden gebruikt door fietsers die er even uitrusten.



*Figuur 4.3 De gemiddelde frequentie en duur van het bezoek ten opzichte van de afstand tot de woning op 23 en 25 juli 2019 tussen 13:00 en 17:00 uur.*

De koele plek met de hoogste bezoekersaantallen is de Linnaeusparkweg, zoals te zien in figuur b.6 in bijlage 8. Op deze locatie zoekt met name de leeftijdsgroep onder de 16 jaar verkoeling bij de fontein, die goed te betreden is. De locatie is geheel verhard, met een aantal grote bomen en bankjes rondom de fontein. Ook is er aan de overkant van de straat een horecagelegenheid. De overige koele plekken hebben een gemengde samenstelling van bomen, struiken en gras. Het Galileiplantsoen heeft de grootste oppervlakte en wordt vaak aangedaan als onderdeel van een wandel- of fietsroute.

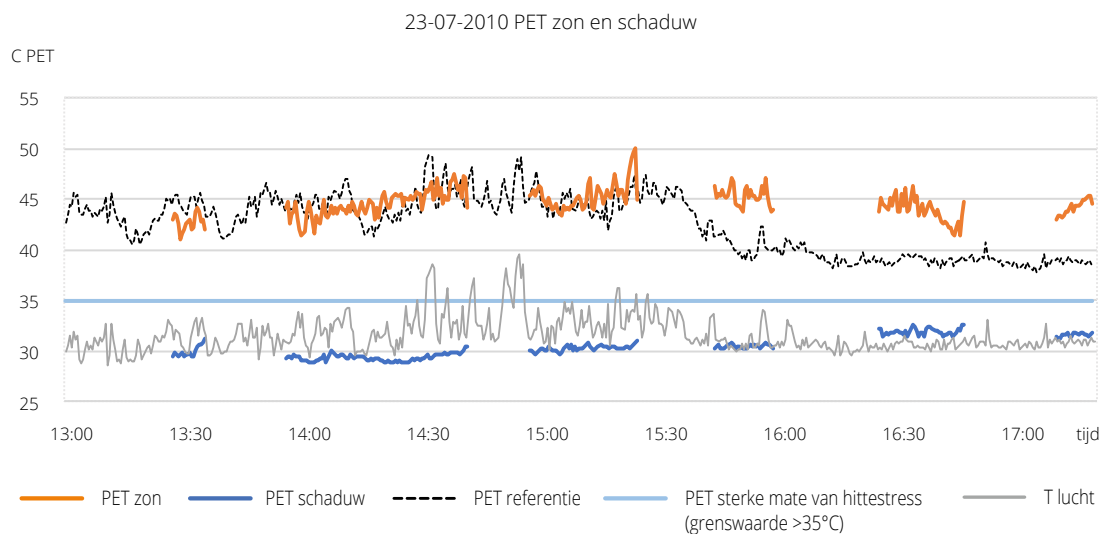
Een derde van de bezoekers van koele plekken geeft aan dat de groene inrichting en de sfeer de locatie aantrekkelijk maakt. Desondanks geeft iets minder dan een derde aan meer bankjes op de betreffende koele plek te wensen. Respondenten geven ook aan meer groen en schaduw te wensen.

Van alle respondenten geeft 81% aan koele plekken belangrijk te vinden om de hete dagen door te komen. Voor 52% van deze groep is het zelfs zeer belangrijk.

### 4.2.3 Metingen

De eerste meetdag op 23 juli 2019 geeft de potentie van koele plekken goed weer. Op alle locaties is het in de schaduw duidelijk koeler dan in de zon, zoals te zien is in figuur 4.4. De gevoelstemperatuur blijft in de schaduw onder de grens van 35°C PET (sterke hittestress), terwijl de locaties in de zon boven de grens van 41°C PET (extreme hittestress) komen. Tussen de zon en de schaduw is het verschil 9 tot 19°C in gevoelstemperatuur met een gemiddelde van 14°C. Het verschil tussen de metingen in de zon en de schaduw zijn het grootst tussen 14:00 en 16:00 uur, daarna neemt de zonnestraling wat af en wordt de gevoelstemperatuur in de schaduw hoger, terwijl die over de rest van de metingen vrij constant blijft. Een verklaring voor het stijgen van de temperatuur in de schaduw kan zijn dat de opwarming van de straten en gevels ertoe gaan bijdragen.

Figuur 4.4 toont ook dat de metingen in de zon ongeveer gelijk zijn aan die van het referentiepunt, totdat rond 15:45 uur de gevel naast het referentiepunt (niet het meetstation) in de schaduw komt. Het referentiestation staat op een plek met uitsluitend verharding, terwijl de twee mobiele meetstations op locaties met groen en water staan. Het lijkt alsof groen en water in de zon de PET niet verlagen. Deze conclusie kunnen we op dit kleine aantal metingen echter niet trekken en de metingen zijn ook niet opgezet om deze correlatie te bestuderen.

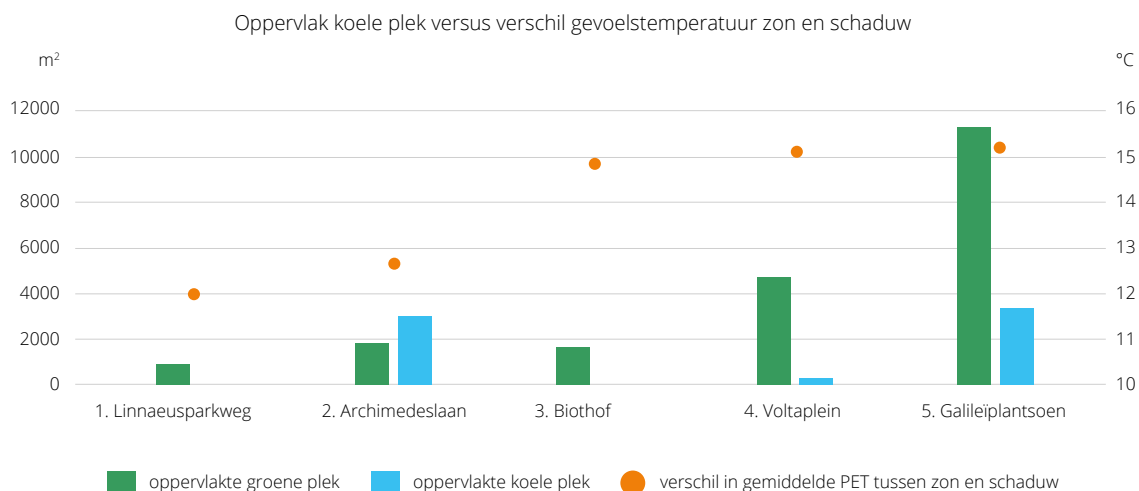


Figuur 4.4 Metingen op de koele plekken in Middenmeer in Amsterdam met drie mobiele meetstations in de zon, de schaduw en op een referentiepunt op 23-07-2019.

#### 4.2.4 Verschillen tussen koele plekken

De koele plek met het grootste schaduw- en totaaloppervlak (zie tabel b.4 in bijlage 8) is het Galileiplantsoen. Zoals figuur 4.6 laat zien, is voor deze plek het verschil in PET tussen zon en schaduw het grootst: 15°C PET. Het onderlinge verschil tussen de locaties is overigens niet meer dan 3°C PET. Zelfs de kleinste koele plek in dit onderzoek van slechts 260 m<sup>2</sup> brengt de gevoelstemperatuur onder de 35°C. Dit geldt ook voor de locaties die volgens de analyse niet als koele plek naar voren komen (de fontein op Linnaeusparkweg en de binnentuin van Biothof). De minimale afmeting om een koele plek te creëren kunnen we hier niet mee vaststellen. Daarom blijven we bij de eerder in paragraaf 4.2.1 gestelde 200 m<sup>2</sup> als minimale maat vanwege de bruikbaarheid, de ecologische kwaliteit en de mogelijkheid om er een aantrekkelijke verblijfsplek van te maken.

NB over het algemeen is de groene plek aanzienlijk groter dan de koele plek. Groene stedelijke ruimtes worden meestal niet geheel beschaduwde, omdat er in minder warme periodes ook behoefte aan zon is. Er is daardoor meer groene ruimte nodig om tot een koele plek te komen dan de afmeting van de koele plek zelf. De locatie Linnaeusparkweg met fontein en zes bomen is met in totaal 900 m<sup>2</sup> groen de kleinste groene plek waar we gemeten hebben.



Figuur 4.5 Het verschil in de gemeten gevoelstemperatuur in PET per locatie tussen zon en schaduw op 23-07-2019. De staafdiagrammen geven het oppervlak van de groene plekken (groen) en het oppervlak van de koele plekken (blauw).

#### Bruikbare eisen voor een koele plek op basis van de metingen en enquêtes:

1. Een koele plek moet een aantrekkelijke verblijfsplaats zijn met zitgelegenheid in de schaduw en aantrekkelijk groen en er moet een gevoel van rust, gezelligheid en veiligheid van uitgaan.
2. Al het oppervlak dat onder de gevoelstemperatuur van 35°C PET blijft tijdens een gemiddelde warme zomerdag is potentieel onderdeel van een koele plek. Een afmeting van 200 m<sup>2</sup> is groot genoeg voor verkoeling, maar voor een aangename verblijfsplek is meestal een groter oppervlak nodig.
3. Zwemplekken en (te betreden) fontein op een koele plek zorgen voor extra verkoeling en worden zeer gewaardeerd.

### 4.3 Ons advies: drie ontwerprichtlijnen voor een hittebestendige stad

De doelstelling voor een hittebestendige openbare ruimte zal uiteindelijk door het bestuur van een gemeente moeten worden geformuleerd. Evenzo is de na te streven mate van veiligheid in het verkeer een politieke keuze. Met ons volgende voorstel denken we een pakket bruikbare en effectieve richtlijnen te bieden om het stedelijk gebied hittebestendig in te richten. De richtlijnen gepresenteerd in figuur 4.6 kunnen afzonderlijk worden toegepast, maar indien gecombineerd elkaar ook versterken.

#### ***Afstand tot koelte:***

- Afstand van woning tot koele plek < 300 m
- Oppervlak > 200m<sup>2</sup> (ingericht als aantrekkelijke verblijfsplek)



#### ***% schaduw op loopgebied***

- > 40% op belangrijke looproutes
- > 30% per buurt



#### ***% groen per wijk***

- Van voldoende tot onvoldoende



Figuur 4.6 Drie ontwerprichtlijnen voor de inrichting van een hittebestendige stad.

In de volgende paragrafen worden de richtlijnen nader toegelicht.

#### 4.3.1 Afstand tot koelte<sup>39</sup>

De metingen en interviews die in de zomer van 2019 werden uitgevoerd, ondersteunen de gedachte dat koele plekken in de stad van groot belang zijn tijdens hitte. Deze houden de stad leefbaar, zodat mensen buiten kunnen verblijven in plaats van naar binnen te vluchten. Zoals in de vorige paragraaf staat beschreven, geven koele schaduwrijke plekken gemiddeld 14°C verkoeling van de gevoelstemperatuur op een hete dag. Een dergelijke koele plek heeft een andere functie dan de bomenrij in de straat. Koele plekken kunnen op strategische locaties veel mensen dienen. Waar veel mensen worden verwacht, moet daar in het ontwerp rekening mee worden gehouden.

De afstand die men in de hitte kan overbruggen is tijdgebonden. Voor ouderen – de meest kwetsbare groep – is de tijd van actieve beweging (looptijd) bepalend. Ouderen lopen met een gemiddelde snelheid van 3,5 km/u (Coffin & Morrall, 1995; Fitzpatrick et al., 2006). In 5 minuten legt een ouder persoon 292 meter af tegen 350 meter voor een gemiddeld persoon. De richtlijn van 300 meter loopafstand tot koelte is dus geschikt voor ouderen (Nuijten, 2008).

Ook blijkt dat de aanwezigheid van groen binnen 300 meter van de woning het gebruik ervan vergroot en de kans op obesitas verkleint (Toftager, 2011). In het buitenland wordt de richtlijn toegepast voor de inrichting van groen in de stad, bijvoorbeeld in Groot-Brittannië (Handley et al., 2003). Ons onderzoek naar koele plekken was niet omvangrijk genoeg voor harde conclusies. Maar figuur 4.3 van paragraaf 4.2.2 maakt aannemelijk dat het gebruik van de koele plekken toeneemt als de afstand tot een koele plek beperkt blijft tot 200 meter en dat het gebruik sterk terugloopt bij meer dan 500 meter. Bij een grotere stedelijke dichtheid is een kleinere afstand beter voor aantrekkelijke stadsnatuur, zoals een studie van Daams et al. (2017) uitwijst.

Een koele plek definiëren wij als een plek van minimaal 200 m<sup>2</sup> waar de gevoelstemperatuur koeler dan of gelijk aan 35°C PET is (daarboven spreekt men over sterke hittestress), en die als een aantrekkelijke verblijfplaats is ingericht. Een koele plek ontstaat door schaduw van bomen, gebouwen of doeken. De metingen op koele plekken uit paragraaf 4.2 geven geen aanleiding om een andere omvang te kiezen.

Afstand-tot-koeltekaarten geven inzicht in de spreiding van koele plekken in de stad, zie figuur 4.7. De kaarten zijn gebaseerd op een gevoelstemperatuurkaart. In één oogopslag valt op een kaart te zien waar een tekort is aan koele plekken. Ook geeft een kaart inzicht in de hoeveelheid huizen die baat hebben bij één strategisch gekozen koele plek. Een combinatie van afstand-tot-koeltekaarten met een kaart waarop kwetsbare groepen worden aangeduid kan de urgentie van gebieden zichtbaar maken. De afstand-tot-koeltekaart kan dus helpen om strategische locaties te kiezen voor vergroening.

39 Deze paragraaf is voor een groot deel gebaseerd op het eerder verschenen artikel 'Een verfrissende blik op hitte' (Kleerekoper et al., 2019).



*Figuur 4.7 Afstand-tot-koeltekaart (Tauw).*

De koeltezones zijn in deze analyse nog niet op hun toegankelijkheid beoordeeld. Toegankelijkheid van het groen is natuurlijk essentieel om de beoogde effecten van een koele verblijfspot te bereiken. Ten eerste dient het groen openbaar toegankelijk te zijn. Ten tweede dienen er geen obstakels te zijn zoals watergangen (zonder oversteekplaats) en spoor. Ten derde dient het groen ook toegankelijk te zijn door de aanwezigheid van een (wandel)pad, een zitgelegenheid in de schaduw of een activiteit. De kaarten die hierna volgen zijn gebaseerd op de loopafstand in plaats van de hemelsbrede afstand; er is dus rekening gehouden met barrières zoals watergangen.

De afstand-tot-koeltekaart kan worden ingezet als tool bij (her-)inrichtingen. Door in het beleid een maximale afstand tot koelte als ontwerprichtlijn vast te leggen kunnen ontwerpers aan de tekentafel zorgen dat groen en koelte voor iedereen dichtbij is.

Meerdere gemeenten hebben al een afstand-tot-koeltekaart laten maken, als aanvulling op lucht- en gevoelstemperatuurkaarten. De gemeente Nijmegen is een stap verder gegaan met de ontwikkeling van een looptijd-tot-koeltekaart. Hierop is de looptijd naar koele plekken te zien, berekend over een netwerk van wegen en paden (figuur 2.5 in paragraaf 2.4.1). Nijmegen definieert hierin de koele plek pas als zodanig wanneer het oppervlak van de koele plek groter is dan 5000 m<sup>2</sup>, om het aannemelijk te maken dat er ook gerecreëerd kan worden.

Uit de kaart van Nijmegen blijkt dat als je uitgaat van een gemiddelde loopsnelheid (4 km/u) al veel wijken voldoen aan een looptijd van minder dan 5 minuten tot een koele plek, met uitzondering van delen van de historische binnenstad en volkswijken. De afstand-tot-koeltekaarten zijn makkelijk in te zetten voor meerdere doelen en doelgroepen. Een expert van de gemeente Nijmegen vertelt: *'Tot nu toe hebben we de looptijd-tot-*

*koeltekaarten gebruikt voor interne bewustwording. Ook hebben we ze opgenomen in onze Stadsatlas. Later in het proces gaan we de kaarten inzetten in een risicodialog over het lokale hitteplan.'*

In Tilburg (figuur 4.7) vormt de afstand-tot-koeltekaart de basis voor een dialoog over de ambitie van Tilburg ten aanzien van hittestress, omdat de kaart voor mensen uit verschillende disciplines eenvoudig te begrijpen blijkt te zijn, makkelijker dan bijvoorbeeld een gevoelstemperatuurkaart. *'Bij een gevoelstemperatuur- of luchttemperatuurkaart vraag je je toch af hoe erg die rode gedeelten in de kaart nu daadwerkelijk zijn. Bij de afstand-tot-koeltekaart spreekt het onmiddellijk tot de verbeelding'*, aldus een professional van gemeente Tilburg.

Ook de gemeente Apeldoorn onderzoekt een passende definitie en grenswaarden voor de afstand-tot-koelterichtlijn. Een manier is om alle mogelijke koele plekken te bezoeken en te beoordelen. Daarvoor is Apeldoorn te groot. Voor Apeldoorn werd een eerste selectie van koele plekken in GIS gemaakt. Volgens een eerste analyse met gebruik van de meest recente landelijk gestandaardiseerde PET-kaart zijn er heel veel koele plekken in de stad en liggen vrijwel alle panden binnen 300 meter van een koele plek (zie de linker kaart in figuur 4.8). De definitie van koele plekken behoefde een aanpassing.

Daarom zijn in de tweede analyse koele plekken in smalle stroken groen en in een buffer langs grote wegen buiten beschouwing gelaten omdat die ongeschikt zijn als verblijfsplek. Ook koele plekken op privaat terrein zijn buiten beschouwing gelaten. Tot slot zijn alleen plekken met gemeentelijke zitbank meegenomen. Als gevolg daarvan lichten er op de middelste kaart van figuur 4.8 verspreid over de stad veel gebieden op waar de afstand tot koele verblijfsplekken met voldoende verblijfskwaliteit (bankjes) te groot is.



*Alle koele plekken*

*Koele plekken met bankjes*

*Koele plekken met minimaal 1000 m² groen*

*Figuur 4.8 Afstand-tot-koeltekaarten voor de gemeente Apeldoorn met alle koele plekken (links), alleen de koele plekken met bankjes (midden) en koele plekken met minimaal 1000 m² groen (rechts) (Touw).*

Voor een derde analyse van de verblijfskwaliteit is de eis toegevoegd dat een koele plek in of aan een groene plek van minimaal 1000 m² moet liggen. In Apeldoorn komen met name gebieden rond het centrum als onvoldoende naar voren wanneer het groen nabij de koele plek minimaal 1000 m² dient te beslaan (zie rechter kaart in figuur 4.8). De gemeente Apeldoorn koos uiteindelijk voor deze derde variant.

### 4.3.2 Schaduw op loopgebieden

#### Historische binnenstad



Figuur 4.9 Doeken over de weg hebben geen ruimtebeslag op het maaiveld.

#### Volkswijk



Figuur 4.10 Pergola geeft schaduw op loopgebied zonder ruimtebeslag op parkeerplekken.

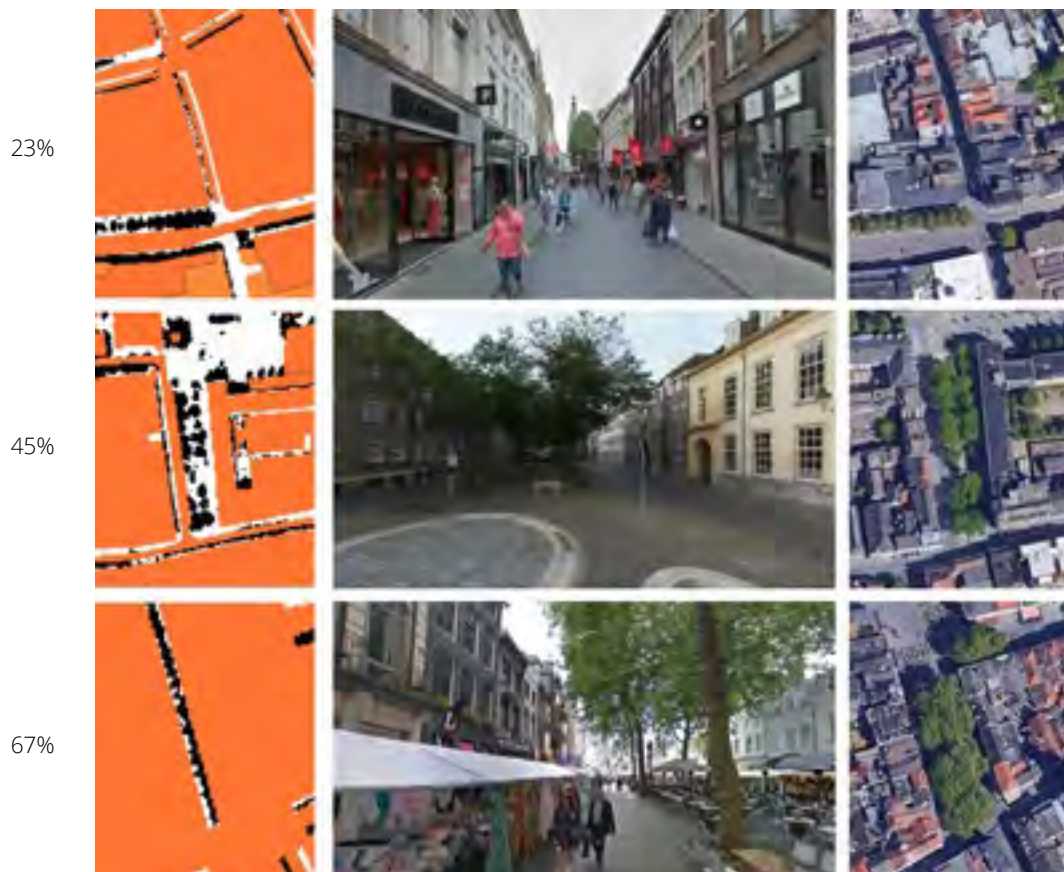
Belangrijke routes door de stad moeten ook tijdens hitte aangenaam zijn. Dit zijn bijvoorbeeld looproutes van, naar en op het station, het marktplein en de belangrijke winkelstraten. Daarop richt zich de tweede richtlijn voor schaduw op loopgebieden.

Voor deze richtlijn geldt niet 'hoe meer hoe beter'. Door variatie in persoonlijke voorkeuren en de variabele weersomstandigheden in Nederland is zonnestraling in de zomer ook vaak gewenst (Klemm et al., 2015). Het is belangrijk variatie op verblijfsplekken te creëren en niet te streven naar zoveel mogelijk schaduw. Met een doelperscentage schaduw op voetpaden kan worden getoetst of de route voldoende schaduw bevat. Maar hoe kies je die doelwaarde?

We hebben getracht een logische keuze te maken door ten eerste te bekijken wat de huidige percentages zijn en ons vervolgens te baseren op het gemiddelde en de spreiding van deze percentages. Hiervoor hebben we eerst gekeken naar het percentage schaduw op belangrijke voetgangersgebieden in specifieke straten. Daarna hebben we ook de percentages per buurt onderzocht, zowel gemiddeld als per wijktipe. De analyses hebben we uitgevoerd voor het moment dat de zon ongeveer het hoogst staat (14:00 op 21 juni).

### Schaduw op belangrijke looproutes

Om een voorbeeld te geven van de uitwerking van een schaduwpercentage in het straatbeeld toont figuur 4.11 drie historische binnensteden met noord-zuidoriëntatie. Met vrijwel geen bomen in de straat kom je hier al snel boven de 20% en in een straat met grote volwassen bomen die vrijwel de hele breedte van de straat beslaan rond de 65%. Het middelste voorbeeld geeft naar ons idee voldoende schaduw (expertinschatting). **Voor een belangrijke looproute is minimaal 40% schaduw op loopgebieden daarom een bruikbaar streven.**



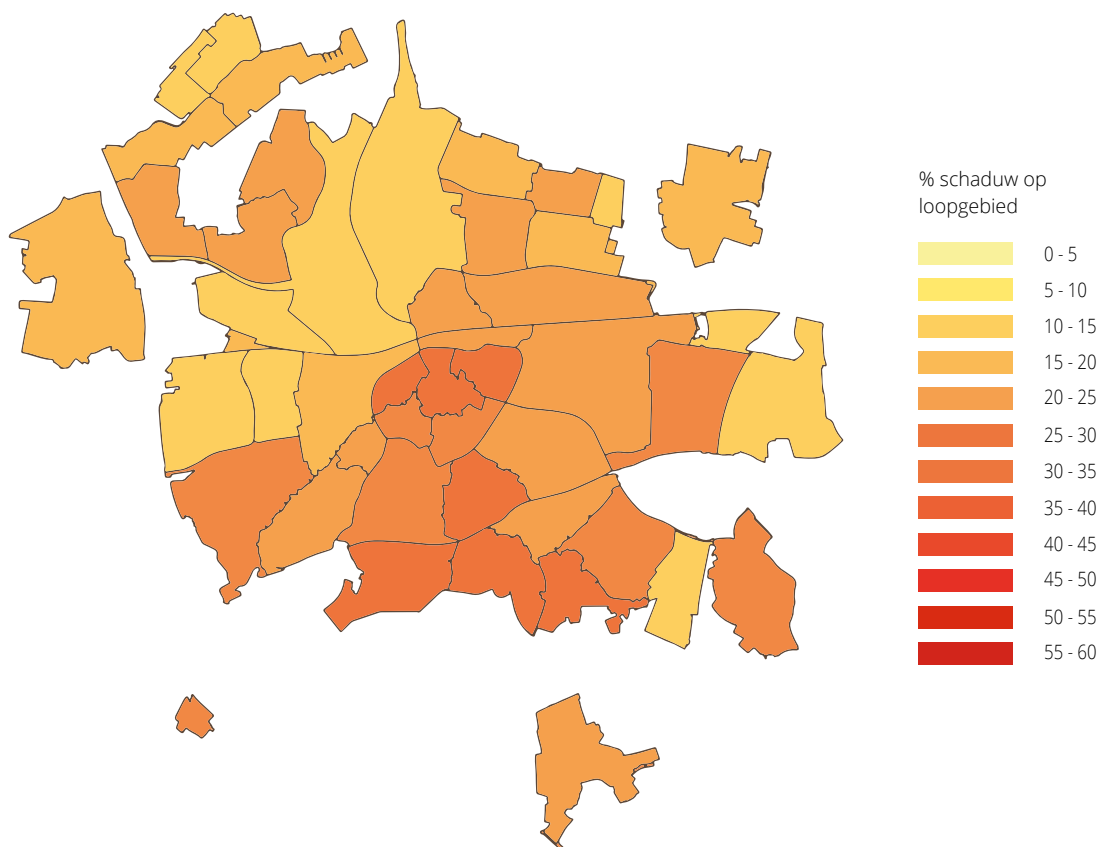
*Figuur 4.11 Percentage schaduw op loopgebieden op 21 juni om 14:00 uur, met per straat het resultaat van de schaduwanalyse (links) – wit is loopgebied, zwart is schaduw, oranje is overig – en een foto op ooghoogte (midden) en vanuit de lucht (rechts).*

### Schaduw per buurt

De percentages schaduw hebben we vervolgens ook bepaald per buurt. In de praktijk komt het percentage schaduw op loopgebieden op buurtniveau lager uit dan dat op straatniveau.

Voor drie steden (Amsterdam, Haarlem en Breda) hebben we de schaduw op trottoirs bepaald. Uit een analyse van schaduw per buurt blijkt dat het percentage schaduw op loopgebieden om 14:00 op 21 juni tussen 5 en 45% ligt. Zie bijvoorbeeld figuur 4.12. De buurten met veel schaduw zijn ofwel de dichtstbebouwde delen van de stad met smalle straatjes en historische en hoge bebouwing, ofwel de groenste buurten van de stad met relatief veel schaduw door bomen. Op basis van het in de praktijk voorkomende percentage schaduw stellen wij voor: **Een streefwaarde voor het percentage schaduw op loopgebieden op buurtniveau is 30%.** Minder dan 25% schaduw rond het middaguur is onvoldoende.

Opvallend in figuur 4.12 is de grotere hoeveelheid schaduw in de binnenstad. Deze plekken lichten op de temperatuurkaarten op als hete plekken en dus als mogelijke probleemgebieden. Echter, de dichtbebouwde centrumgebieden zijn met de ruime mogelijkheid om in de schaduw te lopen minder problematisch dan de temperatuurkaart aangeeft. Het neemt niet weg dat de plekken in de zon in de binnenstad warmer zijn dan in andere stadsdelen het geval is.



*Figuur 4.12 Percentage schaduw op loopgebieden op 21 juni om 14:00 uur per buurt binnen de bebouwde kom van Breda.*

*De percentages schaduw hebben we ook bepaald per wijktype. De gemiddelde waarde per wijktype liggen tussen 19 en 37% schaduw op loopgebied. Daarbij is de standaardafwijking van het gemiddelde per wijktype relatief groot en dus de voorspellende waarde klein. Zie tabel b.5 in Bijlage 8. We hebben er daarom voor gekozen geen percentage schaduw per wijktype als doelstelling voor te stellen. Een streefwaarde voor alle (typen) wijken ineens maakt de richtlijn niet onnodig complex maar geeft wel sturing.*

Schaduw kan op verschillende manieren tot stand komen. In woonstraten zijn met name bomen en pergola's een geschikt middel om schaduw te creëren, zie figuur 4.10. Dit zijn robuuste elementen die vele andere voordelen met zich meebrengen voor de buurt. Met loofbomen of bladverliezende klimplanten krijg je een seizoensvariabele schaduw. Op belangrijke looproutes kunnen flexibele maatregelen uitkomst bieden, zoals in figuur 4.9. Door doeken te spannen heb je als gemeente eigen regie en veel keuzevrijheid in transparantie en locatie. Vaste schaduwelementen zoals arcades, overstekken en overkapte buitenruimtes bieden naast schaduw in de zomer ook bescherming tegen regen. Ze houden in de winter echter ook de zon tegen.

Voor meer comfort in de stad kan een aanvullende richtlijn op 'schaduw op loopgebieden' zijn: voldoende verkoeling langs belangrijke loop- en fietsroutes in de stad. Bijvoorbeeld bankjes in de schaduw met een watertap-punt.

Belangrijk bij het percentage schaduw is ook de spreiding van de schaduw. De vraag is: welke afstand tussen schaduwgebieden is op zonnige dagen acceptabel? Het gaat om comfort, maar het is ook essentieel dat ouderen zonder oververhitting de route kunnen afleggen. Dit onderdeel willen we nader onderzoeken in een vervolgstudie. We zullen ons dan specifiek richten op de kwetsbare doelgroep en de fysieke reacties meten.

#### 4.3.3 Percentage groen per wijktype

##### Volkswijk



*Figuur 4.13 Met een groene loper is de uitgangssituatie groen, alleen bestraten wat nodig is. Dit kan alleen wanneer er een andere toekomst voor mobiliteit wordt gekozen.*

## Naoorlogse woonwijk



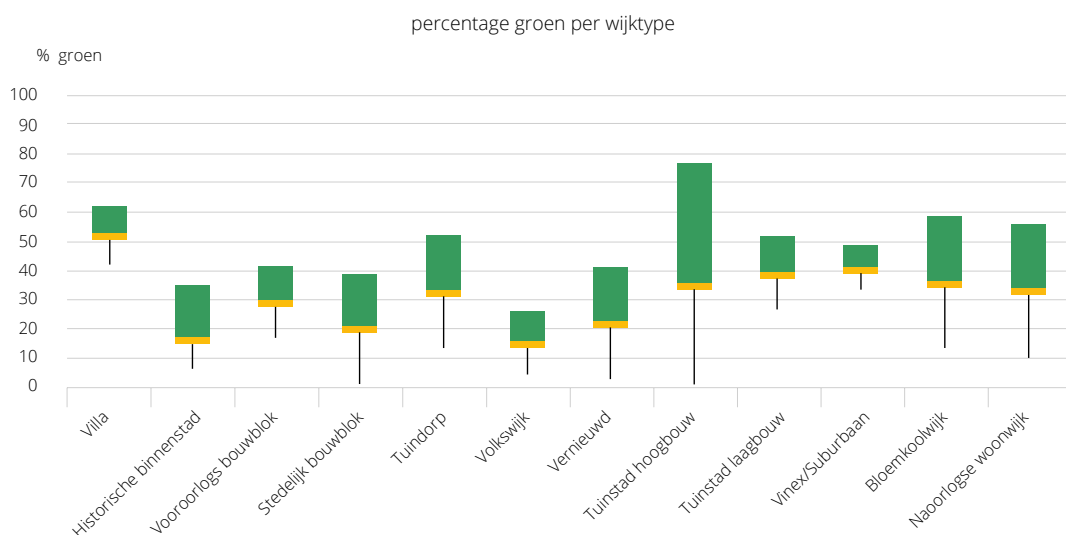
*Figuur 4.14 Boven: bestaande situatie; midden: bomen in het straatbeeld geven al een heel ander aanzien en zijn het effectiefst tegen hitte; onder: een groene loper met daarin nog slechts enkele parkeerhavens geeft een geheel andere beleving.*

Zoals aangegeven in hoofdstuk 3 is voldoende groen van belang om de stadstemperatuur omlaag te brengen en zo het aantal hete nachten te beperken. Ter indicatie gaan we uit van 0,5°C verkoeling bij 10 procentpunt meer groen. Maar hoeveel groen in de stad heb je nodig voor een aangenaam microklimaat? Deze vraag wordt vaak gesteld. Vanwege allerlei onzekerheden over de omvang van dit verkoelende effect en de vraag in hoeverre de problemen door deze verkoeling worden gereduceerd, hebben we ervoor gekozen een richtlijn te kiezen op basis van de mogelijkheden voor vergroening in de praktijk.

De hoeveelheid groen is op veel verschillende manieren te meten, wat het niet eenvoudig maakt een eenduidige richtlijn op te stellen. Of je bomen opneemt in verharding of in het groen, kan veel uitmaken voor het percentage groen. En in hoeverre tellen groene daken als volwaardig groen? Het is van belang tot een standaardisatie in groenanalyses te komen om streefwaarden te kunnen aangeven. Groenspecialisten en beleidsmakers voeren aan dat een streefgetal nodig is om te voorkomen dat groen alleen als aankleding en sluitstuk wordt opgenomen, waardoor het zijn andere mogelijke functies niet kan vervullen.

Om een voorstel te doen voor de richtlijn 'Percentage groen', zijn we uitgegaan van de in de praktijk voorkomende percentages groen. Hiervoor is één gemiddeld percentage over alle wijktypen niet geschikt. In een binnenstad kan moeilijk eenzelfde percentage groen als in een woonwijk worden gerealiseerd. Bijlage 8 geeft een beschrijving van de manier waarop we het percentage groen per wijktipe hebben bepaald.

Figuur 4.15 geeft de in de praktijk voorkomende percentages groen voor twaalf wijktypen in vier Nederlandse steden (Amsterdam, Utrecht, Haarlem en Breda). Wij stellen voor het gemiddelde plus de standaarddeviatie als streefwaarde te hanteren. Bij de herinrichting van een buurt kan het percentage groen worden vergeleken met de streefwaarde om te zien hoe groen de buurt is ten opzichte van andere buurten met dezelfde typologie.



Figuur 4.15 Het percentage groen per wijktipe op basis van vier steden (Amsterdam, Utrecht, Haarlem en Breda) met het gemiddelde percentage (geel) en de standaarddeviatie. De standaarddeviatie naar boven is in groen aangegeven.

De buurtinrichting, straatprofielen en mogelijkheden voor groen zijn ongeveer gelijk in buurten met hetzelfde wijktype. Zit de buurt dicht bij de ondergrens, dan is er ruimte voor verbetering. Per straat kunnen er verschillen zijn, maar het gemiddelde percentage is haalbaar op buurtniveau. De bovengrens is bepaald op basis van PC6-niveau en geeft de uitersten aan binnen een typologie. De spreiding van het percentage groen is binnen het wijktype Tuinstad hoogbouw het grootste. Voor een wijktype met een kleine spreiding zoals de volkswijken is er minder variatie in de hoeveelheid groen.

Voor de keuze van vergroeningsmaatregelen is het van belang om te weten of het groen privaat of openbaar is. Daarom wordt in bijlage 8, tabel b.5 per wijktype informatie gegeven over de verhouding tussen privaat en openbaar groen. Zo is af te lezen dat in tuindorpen het percentage groenoppervlak ten opzichte van de oppervlakte privaat eigendom vrijwel gelijk is aan het percentage groenoppervlak ten opzichte van het openbaar oppervlak. Het oppervlak privaat groen is echter bijna twee keer zoveel als het oppervlak openbaar groen.

In de tuinsteden (hoogbouw) is de situatie totaal anders. Hier is het openbare groen veel belangrijker dan het groen in eigendom van private partijen.

Vergroenen draagt bij aan de stadsbrede verkoeling. Wanneer bijvoorbeeld een buurt van het wijktype 'stedelijk bouwblok' nu een groenpercentage van 10% heeft, is dat voor dat type laag. Wanneer hier het groen met 15 procentpunt wordt verhoogd naar 25%, komt de buurt binnen de streefwaarde. Wanneer we uitgaan van de in hoofdstuk 3 aangegeven verkoeling door meer groen, betekent dat een 0,75°C afkoeling van de luchttemperatuur.

Het percentage groen per wijktype maakt het mogelijk streefwaarden in het beleid op te nemen en zo het groen dat in het algemeen voor een specifiek wijktype haalbaar is te maximaliseren. Op dit moment wordt er in de wijken nog weinig groen op daken en gevels toegepast en wordt er vaak uitgegaan van verharding als basis en groen waar het kan. Maar het kan ook anders: groen als basis en verharding waar nodig, zoals in figuur 4.13 en figuur 4.14.

We hebben in deze paragraaf laten zien hoeveel het percentage groen per buurt kan toenemen voor specifieke wijktypen. In deze analyse is vooralsnog geen onderscheid gemaakt in soorten groen. Omdat bomen tijdens warme en vooral droge perioden een grotere bijdrage aan de verdamping leveren dan gras, kan er aan de soorten groen een weging worden toegekend. Deze variatie in verdamping hebben we getest voor een weging van 100-60-30% voor boom-heester-gras. Er blijkt echter nog te veel onzekerheid te bestaan over de verschillen in verdamping om de weging nu te kunnen toepassen. Bovendien zijn ontwerpers vaak van mening dat het niet om de hoeveelheid moet gaan, maar om het type en de juiste invulling van het groen.



#### 4.4 Conclusies

In dit hoofdstuk concluderen we dat ontwerprichtlijnen met concrete en controleerbare grenswaarden het meest geschikt zijn om een hittebestendige inrichting te realiseren. We kiezen bewust niet voor een visie als doelstelling omdat deze vaak niet gekwantificeerd is (bijvoorbeeld 'meer groen') en ook niet voor een temperatuurwaarde als grens, omdat die moeilijk te definiëren en te toetsen is.

Ons advies is samengevat in drie ontwerprichtlijnen:

1. Afstand tot koelte
2. Percentage schaduw op loopgebieden:
  - a. van belangrijke looproutes
  - b. per buurt
3. Percentage groen per wijktipe

De eerste richtlijn *afstand tot koelte* waarborgt dat er voldoende en goed bereikbare koele plekken in de stad zijn. Ons onderzoek wijst uit dat 80% van de gebruikers koele plekken belangrijk vinden om de hete perioden door te komen. We stellen voor dat elk huis binnen 300 m van een aangename koele plek dient te liggen. Deze dient minimaal 200 m<sup>2</sup> groot te zijn maar vooral ook bereikbaar te zijn en als aangename verblijfsplaats te zijn ingericht.

De tweede richtlijn *percentage schaduw op loopgebieden* is belangrijk om a) essentiële functies in de stad via de belangrijke looproutes goed bereikbaar te houden en b) ook per buurt voldoende comfort in de buitenruimte te bieden om functies als een buurtsuper of een koele plek te bereiken.

Terwijl de twee eerste richtlijnen met name lokaal comfort overdag nastreven, beoogt de derde richtlijn een effect op grotere schaal over de dag én de nacht. Meer groen verhoogt ook de verdampingscapaciteit en daarmee de verkoeling van de stad. Om meer groen te kunnen realiseren is een duidelijke ambitie onontbeerlijk. Groen krijgt zo een prominentere plek in de inrichting, vergelijkbaar met de norm voor parkeren of voldoende plek voor kabels en leidingen. Niet in iedere buurt is een gelijke hoeveelheid groen realistisch, daarom is er per type wijk een percentage groen voorgesteld.

De richtlijnen zijn enerzijds toetsbaar en concreet, anderzijds bieden ze ontwerpers de vrijheid. Ze vertalen de vage doelstelling 'een hittebestendige stad' in iets concreets, zonder maatregelen voor te schrijven.



**Conclusies**



5

## 5. Conclusies

In twee jaar tijd hebben we met meer dan 10 onderzoekers en 12 gemeenten onderzoek gedaan naar het hittebestendig inrichten van straten, wijken en steden. Het doel van het onderzoek was vooral gemeenten te helpen bij het **hitebestendig inrichten van de buitenruimte**. Dit doel hebben we onderzocht aan de hand van een aantal praktijkvragen over het definiëren van de hitteopgave, over hittemaatregelen en uiteindelijk over hiterichtlijnen. De conclusies en adviezen op basis van ons onderzoek voor deze praktijkvragen zijn:

### Hitteopgave

Ten aanzien van de onderzoeksvragen *Wat is de hitteopgave van een stad, wijk of straat* en *Welke data en kennis geven hier inzicht in?* concluderen wij dat er geen eenduidige definitie is van wat de hitteopgave is van een stedelijk gebied. Anders dan bij wateroverlast is er voor de vele gevolgen van hitte geen gelijke grenswaarde (maximale temperatuur) te definiëren. Om de hitteopgave te bepalen van een specifiek gebied met focus op ruimtelijke adaptatie helpt inzicht in:

- > de frequentie van hete perioden zoals hittegolven, zomerse dagen en tropische nachten, nu en in de toekomst;
- > de grootte van het stedelijk hitte-eilandeffect in het gebied, dat inhoudt dat de temperatuur vooral tijdens de avond en nacht enkele graden hoger kan zijn;
- > de niet-acceptabele gevolgen van hitte in de stad, weergegeven op de mindmap, die kunnen worden tegengegaan met aanpassingen in de buitenruimte.

We adviseren het gebruik van drie typen hittekaarten om de hitteopgave in de buitenruimte in kaart te brengen:

- 1. Temperatuurkaarten** om aan te geven waar het heet is, zoals de twee basiskaarten uit de gestandaardiseerde stresstest: een kaart met het aantal hete nachten en een kaart met de gevoelstemperatuur (PET-index) overdag;
- 2. Hiterisicokaarten** om aan te geven waar hitte een groot probleem is in combinatie met de plaatsen waar de meest kwetsbare mensen of objecten zich bevinden;
- 3. Toetsings- of maatregelenkaarten** om te verkennen welke maatregelen of ontwerprichtlijnen nodig zijn voor een hittebestendig ontwerp, want zonder handelingsperspectief is het niet zinvol een opgave te benoemen.

### Hittemaatregelen

Ten aanzien van de onderzoeksvragen *Welke maatregelen in de buitenruimte zijn het effectiefst en efficiëntst?* en *Welke maatregelen zijn toepasbaar?* komen twee soorten maatregelen naar voren: enerzijds **maatregelen om de gemiddelde luchttemperatuur op stadsschaal te verlagen**, anderzijds **maatregelen om de gevoelstemperatuur te verlagen** voor een aangenaam leefklimaat overdag **op lokaal niveau** (op het plein, in de straat). De belangrijkste verkoelingsprincipes voor deze twee schaalniveaus zijn respectievelijk **verdamping** en **schaduw**. Op basis van eigen berekeningen en literatuuronderzoek hebben we een tabel samengesteld met de effectiviteit van allerlei hittemaatregelen in de buitenruimte. Daarin hebben we aangegeven of de maatregelen op zeer lokale schaal of buurniveau werken en of deze de gemiddelde luchttemperatuur of juist de gevoelstemperatuur verlagen. In grote lijnen geeft verdamping 0,5°C verkoeling

van de luchttemperatuur per 10 procentpunt meer groen. Dit werkt dus vooral op stadsschaal en draagt onder andere bij aan de vermindering van het aantal hete nachten. De maatregelen voor meer schaduw reduceren de gevoelstemperatuur PET met 10 tot 20°C ten opzichte van plekken in de zon en kunnen daarmee op locatie het verschil maken tussen wel of geen ernstige hittestress. We concluderen op basis van micromodelstudies dat bomen een groter effect hebben op de gevoelstemperatuur als ze ook schaduw op de gevel werpen.

## Hitterichtlijnen

Ten aanzien van de onderzoeksvragen *Hoe vertaal je de hitteopgave en maatregelen naar ontwerprichtlijnen?* en *Welke ontwerprichtlijnen werken in de praktijk?* hebben wij drie **concrete, haalbare en toetsbare richtlijnen** opgesteld die ruimte geven aan de ontwerper:

- > Om lokaal voldoende koele plekken te creëren:

### 1. Afstand tot koelte

Elke woning is maximaal 300 m verwijderd van een aangename, koele verblijfsplek in de buitenruimte.

### 2. Schaduw op loopgebieden

- Er is op het heetst van de dag voldoende schaduw (minimaal 40%) op belangrijke looproutes, zodat essentiële functies in de stad voor iedereen bereikbaar blijven.
- Er is op het heetst van de dag ook op loopgebieden in buurten voldoende schaduw (minimaal 30%), zodat de buurten aantrekkelijk blijven.

- > Om stadsbreed de luchttemperatuur te verlagen:

### 3. Percentage groen

Het percentage groen binnen een buurt is groter dan een ondergrens die afhankelijk is van het wijktype. We hebben per wijktype een ondergrens en een streefwaarde aangegeven op basis van de situatie in de praktijk.

Deze richtlijnen zijn enerzijds toetsbaar en concreet, anderzijds bieden ze ontwerpers de vrijheid. Ze vertalen de vage doelstelling 'een hittebestendige stad' in iets concreets, zonder maatregelen voor te schrijven.

We hebben in de afgelopen twee jaar veel geleerd, maar we hebben ook veel vragen laten liggen. Enkele onderwerpen voor vervolgonderzoek die wij zien zijn:

- > De uitwerking en implementatie van de voorgestelde richtlijnen en met name van de voorgestelde grenswaarden in de praktijk. Zijn de gekozen grenswaarden de meest effectieve, haalbare en acceptabele?
- > Het effect van groen op verdamping en de bijdrage hiervan aan stadsbrede verkoeling. Er zijn aanzienlijke verschillen tussen resultaten van verschillende modelonderzoeken naar het effect van vergroening van de stad op stadsschaal.
- > Het meten met de mobiele sensor. Nader onderzoek is nodig om betrouwbaarheid en bruikbaarheid te verbeteren.
- > Het model voor de berekening van de PET volgens de gestandaardiseerde hittestresstest. Nader onderzoek is nodig naar de gevoeligheid van de resultaten voor een aantal modelaannames, o.a. wat betreft wind.
- > De afstand tussen schaduwplekken op loopgebieden zodat ouderen op hete dagen zonder oververhitting een looproute kunnen afleggen.



Literatuur



6

## 6. Literatuur

- Abreu-Harbach, L.V., Labaki, L.C. & Matzarakis, A. (2015). Effect of tree planting design and tree species on human thermal comfort in the tropics. *Landscape and Urban Planning*, 138, 99-109.
- Alcazar, S.S., Olivieri, F. & Neila, J. (2016). Green roofs: experimental and analytical study of its potential for urban microclimate regulation in Mediterranean – continental climates. *Urban Climate*, 17, 304-317.
- Ali-Toudert, F. & Mayer, H. (2006). Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Building and Environment*, 41, 94-108.
- Amani-Beni, M., Zhang, B., Xie, G. & Xu, J. (2018). Impact of urban park's tree, grass and waterbody on microclimate in hot summer days: A case study of Olympic Park in Beijing, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 32, 1-6.
- Andenæs, E., Kvande, T., Muthanna, T.M. & Lohne, J. (2018). Performance of blue-green roofs in cold climates: A scoping review. *Buildings*, 8(4), 55.
- Andreou, E. (2013). Thermal comfort in outdoor spaces and urban canyon microclimate. *Renewable Energy*, 55, 182-188.
- Armson, D., Stringer, P. & Ennos, A.R. (2012). The effect of tree shade and grass on surface and globe temperatures in an urban area. *Urban Forestry & Urban Greening* 11(3), 245-255.
- Bacci, L., Morabito, M., Raschi, A. & Ugolini, F. (2003). Thermohygrometric conditions of some urban parks of Florence (Italy) and their effects on human well-being. *Trees*, 6, 49.
- Berardi, U. (2016). The outdoor microclimate benefits and energy savings resulting from green roofs retrofits. *Energy and Buildings*, 121, 217-229.
- Brandsma, T. & Wolters, D. (2012). Modelling of the urban heat island of the city of Utrecht (the Netherlands). *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 51(6), 1046-1060. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0206.1>
- Caverzam Barbosa, E. & Klok, E.J. (2020). *Thermal walk in practice – Marineterrein June 18, 2019: Conclusions & interpretations*. Hogeschool van Amsterdam. 24 pp
- Chatzidimitriou, A. & Yannas, S. (2016). Microclimate design for open spaces: Ranking urban design effects on pedestrian thermal comfort in summer. *Sustainable Cities and Society*, 26, 27-47.
- Chen, L. & Ng, E. (2013). Simulation of the effect of downtown greenery on thermal comfort in subtropical climate using PET index: a case study in Hong Kong. *Architectural Science Review*, 56(4), 297-305.
- Coffin, A. & Morrall, J. (1995). Walking speeds of elderly pedestrians at crosswalks. *Transportation Research Record*, 1487, 63.
- Daams, M.N. & Veneri, P. (2017). Living near to attractive nature? A well-being indicator for ranking Dutch, Danish, and German functional urban areas. *Social indicators research*, 133(2), 501-526.
- Daniels, E., Lenderink, G., Hutjes, R. & Holtslag, A. (2016). Relative impacts of land use and climate change on summer precipitation in the Netherlands, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 20, 4129-4142. <https://doi.org/10.5194/hess-20-4129-2016>
- Deltaprogramma Ruimtelijke adaptatie (2014). Deltabeslissing Ruimtelijke adaptatie: Het Deltaprogramma: een nieuwe aanpak. De Haag: Ministerie van Infrastructuur en Milieu en Ministerie van Economische Zaken. [www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/deltaprogramma/inhoud/vijf-deltabeslissingen](http://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/deltaprogramma/inhoud/vijf-deltabeslissingen)

- De Wit, A., Boomsma, C., Smit, W. & De Wit, A. (2019) Weerkrachtig Zuid-Holland. Provincie Zuid-Holland, Archiveringsnummer: 181003690, Bijlage A.1 Programma van Eisen.
- Djedjig, R., Belarbi, R. & Bozonnet, E. (2017). Green wall impacts inside and outside buildings: experimental study. *Energy Procedia*, 139, 578-583.
- Djedjig, R., Bozonnet, E. & Belarbi, R. (2015). Experimental study of the urban microclimate mitigation potential of green roofs and green walls in street canyons. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 10, 34-44.
- Döpp, S. (red.) (2011). *Kennismontage Hitte en Klimaat in de Stad*. Climate Proof Cities Consortium.
- Echevarria Icaza, L. (2017). Urban and regional heat island adaptation measures in The Netherlands. *A+BE | Architecture And The Built Environment*, 20, 1-308. doi:10.7480/abe.2017.20.1874
- European Environment Agency (EEA) (2002). Corine land cover 2000. [www.eea.europa.eu/data-and-maps](http://www.eea.europa.eu/data-and-maps)
- Farnham, C., Nakao, M., Nishioka, M., Nabeshima, M. & Mizuno, T. (2011). Study of mist-cooling for semi-enclosed spaces in Osaka, Japan. *Procedia Environmental Sciences*, 4, 228-238.
- Fitzpatrick, K., Brewer, M.A. & Turner, S. (2006). Another look at pedestrian walking speed. *Transportation Research Record*, 1982(1), 21-29.
- Fung, C.K.W. & Jim, C.Y. (2020). Influence of blue infrastructure on lawn thermal microclimate in a subtropical green space. *Sustainable Cities and Society*, 52, 101858.
- Gehrels, H., Van der Meulen, S., Schasfoort, F., Bosch, P., Brolsma, R., Van Dinther, D., Geerling, G., Goossens, M., Jacobs, C., De Jong, M., Kok, S., Massop, H., Osté, L., Pérez-Soba, M., Rovers, V., Smit, A., Verweij, P., De Vries, B., Weijers, E. (2016). *Designing green and blue infrastructure to support healthy urban living*. TO2-federatie. <http://www.adaptivecircularcities.com/downloads>
- Gemeente Amsterdam (2020). Strategie Klimaatadaptatie Amsterdam. [https://assets.amsterdam.nl/publish/pages/937006/200218\\_def\\_webklaar\\_strategie\\_klimaatadaptatie\\_amsterdam\\_lowres.pdf](https://assets.amsterdam.nl/publish/pages/937006/200218_def_webklaar_strategie_klimaatadaptatie_amsterdam_lowres.pdf).
- Gemeente Amsterdam (2015). *Amsterdam Duurzaam. Agenda voor duurzame energie, schone lucht, een circulaire economie en een klimaatbestendige stad*. Amsterdam: auteur.
- Gemeente Arnhem (2012) Hitte-attentiekarta van Arnhem, versie april 2012. Arnhem: auteur. [https://groenarnhem.nl/wp-content/uploads/2015/11/2015.0.076.335-Hitte-aanbevelingen\\_kaart\\_van\\_Arnhem\\_april-20121.pdf](https://groenarnhem.nl/wp-content/uploads/2015/11/2015.0.076.335-Hitte-aanbevelingen_kaart_van_Arnhem_april-20121.pdf)
- Gemeente Eindhoven (2018). *Bijlagenrapport Gemeentelijk Rioleringsplan Eindhoven*, Bijlage 5 Beleidsregel 'Klimaat robuust [sic] (her)inrichten en ruimtelijk ontwikkelen', 5. Eindhoven: auteur.
- Gemeente Eindhoven (2016). *Klimaatplan 2016–2020. Verminderen van CO<sub>2</sub> uitstoot [sic] en aanpassen aan klimaatverandering*. Eindhoven: Ruimtelijke Expertise, Verkeer en Milieu.
- Gemeente Haarlem (2017). Klimaatadaptatieagenda Haarlem, versie 19. [www.gemeentebestuur.haarlem.nl/bestuurlijke-stukken/2017257496-2-Bijlage-Klimaatagenda.pdf](http://www.gemeentebestuur.haarlem.nl/bestuurlijke-stukken/2017257496-2-Bijlage-Klimaatagenda.pdf)
- Gemeente Nieuwegein (2019) Afstudeeratelier klimaatbestendige stad 2018-2019: Project Nieuwegein. Opleiding Built Environment, Faculteit Techniek, Hogeschool van Amsterdam.
- Gemeente Nieuwegein (2018) Visie Klimaatadaptatie. Nieuwegein: auteur.
- Gómez, F., Cueva, A.P., Valcuende, M. & Matzarakis, A. (2013). Research on ecological design to enhance comfort in open spaces of a city (Valencia, Spain). Utility of the physiological equivalent temperature (PET). *Ecological Engineering*, 57, 27-39.
- Handley, J., Pauleit, S., Slinn, P., Barber, A., Baker, M., Jones, C. & Lindley, S. (2003). Accessible natural green

- space standards in towns and cities: a review and toolkit for their implementation. English nature research reports, 526. Peterborough, VK: English Nature.
- Hathway, E.A. & Sharples, S. (2012). The interaction of rivers and urban form in mitigating the Urban Heat Island effect: A UK case study. *Building and Environment*, 58, 14-22.
- Havenith, G. (1999). Heat balance when wearing protective clothing. *Annals of occupational Hygiene*, 43(5), 289-296.
- Hazeu, G.W., Schuiling, C., Dorland, G.J., Oldengarm, J. & Gijsbertse, H.A. (2010). Landelijk grondgebruiksbestand Nederland versie 6 (LGN6); vervaardiging, nauwkeurigheid en gebruik. Alterra-Rapport 2012. Wageningen, Alterra, 132 pp.
- Hazeu, G.W., Schuiling, C., Dorland, G.J., Roerink, G.J., Naeff, H.S.D. & Smidt, R.A. (2014). Landelijk Grondgebruiksbestand Nederland versie 7 (LGN7); Vervaardiging, nauwkeurigheid en gebruik. Alterra-rapport 2548. Wageningen: Alterra Wageningen UR (University & Research centre), 86 pp.
- Hendel, M., Gutierrez, P., Colombert, M., Diab, Y. & Royon, L. (2016). Measuring the effects of UHI mitigation in the field: Application to the case of pavement-watering in Paris. *Urban Clim*, 16, 43-58.
- Herath, H.M.P.I.K., Halwatura, R.U. & Jayasinghe, G.Y. (2018). Evaluation of green infrastructure effects on tropical Sri Lankan urban context as an urban heat island adaptation strategy. *Urban Forestry & Urban Greening*, 29, 212-222.
- Heusinkveld, B.G., Steeneveld, G.J., Van Hove, L.W.A., Jacobs, C.M.J. & Holtslag, A.A.M. (2014). Spatial variability of the Rotterdam urban heat island as influenced by urban land use. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 677-692.
- Heusinkveld, B. & Holtslag, A. (2010). Use of a mobile platform for assessing urban heat stress in The Netherlands. *7<sup>th</sup> Conference on Biometeorology*, Freiburg, april 2010, 433-438.
- Hoelscher, M.T., Nehls, T., Jänicke, B. & Wessolek, G. (2016). Quantifying cooling effects of facade greening: Shading, transpiration and insulation. *Energy and Buildings*, 114, 283-290.
- Höppe, P. (1999). The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, 43, 71-75.
- Huang, L., Li, J., Zhao, D. & Zhu, J. (2008). A fieldwork study on the diurnal changes of urban microclimate in four types of ground cover and urban heat island of Nanjing, China. *Building and Environment*, 43, 7-17.
- Iacono, M.J., Delamere, J.S., Mlawer, E.J., Shephard, M.W., Clough, S.A. & Collins, W.D. (2008). Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *Journal of Geophysical Research*, 113(D13), 8 pp. doi:10.1029/2008JD009944
- IPCC (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. & Midgley, P.M. (Eds.)]. Cambridge, VK & New York, VS: Cambridge University Press, Cambridge, VK en New York, NY, VS, 1535 pp.
- IPCC (2012). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. *A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [Field, C.B., Barros, V., Stocker, T.F., Qin, D., Dokken, D.J. Ebi, K.L., Mastrandrea, M.D. Mach, K.J., Plattner, G.K., Allen, S.K., Tignor, M. & Midgley P.M. (Eds.)]. Cambridge, VK & New York, VS: Cambridge University Press, 582 pp.
- Ishii, T., Tsujimoto, M., Yoon, G. & Okumiya, M. (2009). Cooling system with water mist sprayers for mitigation

- of heat-island. In *Proceedings of the Seventh International Conference on Urban Climate (ICUC)*, Yokohama, Japan, 29 June – 3 July 2009.
- Jacobs, C., Klok, L., Bruse, M., Cortesão, J., Lenzholzer, S. & Kluck, J. (2020). Are urban water bodies really cooling? *Urban Climate*, 32, 100607.
- Janjić, Z.I. (1994). The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further Developments of the Convection, Viscous Sublayer, and Turbulence Closure Schemes. *Mon. Wea. Rev.*, 122, 927-945. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1994\)122%3C0927:TSMECM%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122%3C0927:TSMECM%3E2.0.CO;2)
- Jansson, C., Jansson, P.E. & Gustafsson, D. (2006). Near surface climate in an urban vegetated park and its surroundings. *Theoretical and Applied Climatology*, 89, 185-193.
- Jin, C., Bai, X., Luo, T. & Zou, M. (2018). Effects of green roofs' variations on the regional thermal environment using measurements and simulations in Chongqing, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 29, 223-237.
- Jin, J., Miller, N.L. & Schlegel, N. (2010). Sensitivity Study of Four Land Surface Schemes in the WRF Model. *Advances in Meteorology*, 2010.
- Johansson, E. (2006). Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco. *Building and Environment*, 41, 1326-1338.
- Kennis voor Klimaat (2011). Hittestress in Rotterdam. KVK-rapportnummer KvK/039/2011. ISBN: 978-94-90070-44-1. Utrecht: auteur.
- Kleerekoper, L., Wilschut, L. & Kluck, J. (2019). Afstand tot koelte: Een verfrissende blik op hitte. *Stadswerk*, 6, 10-12.
- Kleerekoper, L., Jacobs, C., Van der Kuur, J., Kluck, J. & Wilschut, L. (2018). *Baten van een groener Haarlem. Baten in euro's, graden verkoeling en leefbaarheid*. Hogeschool van Amsterdam.
- Kleerekoper, L. (2016). Urban Climate Design: Improving thermal comfort in Dutch neighbourhoods. A+BE: *Architecture and the Built Environment*, 6. 10.7480/abe.2016.11. 424 p. <https://doi.org/10.7480/abe.2016.11>
- Klemm, W., Heusinkveld, B.G., Lenzholzer, S., Jacobs, M.H. & Van Hove, B. (2015). Psychological and physical impact of urban green spaces on outdoor thermal comfort during summertime in the Netherlands. *Building and Environment*, 83, 120-128.
- Klok, L., Rood, N., Kluck, J. & Kleerekoper, L. (2019). Assessment of thermally comfortable urban spaces in Amsterdam during hot summer days. *International Journal of Biometeorology*, 63(2), 129-141. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1644-x>
- Klok E.J. & Kluck, J. (2018). Reasons to adapt to urban heat (in the Netherlands), *Urban Climate*, 23, 342-351. [www.klimaateffectatlas.nl/nl/kaartverhaal-hitte](http://www.klimaateffectatlas.nl/nl/kaartverhaal-hitte) (Klimaateffectatlas, 2019)
- Kluck, J., Kleerekoper, L., Klok, E.J., Loeve, R., Bakker, W.J. & Boogaard, F.C. (2017). *De klimaatbestendige wijk: Onderzoek voor de praktijk*. Hogeschool van Amsterdam, Onderzoeksprogramma Urban Technology, nummer 10. ISBN 978-94-92644-02-2
- KNMI (2015). *KNMI'14-klimaatscenario's voor Nederland; Leidraad voor professionals in klimaatadaptatie*, De Bilt: KNMI, 34 pp.
- Konarska, J., Lindberg, F., Larsson, A., Thorsson, S. & Holmer, B. (2013). Transmissivity of solar radiation through crowns of single urban trees—application for outdoor thermal comfort modelling. *Theoretical and Applied Climatology*, 117, 1-14.
- Kusaka, H. & Kimura, F. (2004). Thermal effects of urban canyon structure on the nocturnal heat island:

- Numerical experiment using a mesoscale model coupled with an urban canopy model. *Journal of Applied Meteorology*, 43(12), 1899-1910.
- Kusaka, H., Kondo, H., Kikegawa, Y., & Kimura, F. (2001). A Simple Single-Layer Urban Canopy Model For Atmospheric Models: Comparison With Multi-Layer And Slab Models. *Boundary-Layer Meteorology*, 101(3), 329-358.
- Lau, K.K., Shi, Y. & Ng, E.Y. (2019). Dynamic response of pedestrian thermal comfort under outdoor transient conditions. *International Journal of Biometeorology*, 1-11.
- Lee, L.S.H. & Jim, C.Y. (2019). Urban woodland on intensive green roof improved outdoor thermal comfort in subtropical summer. *International Journal of Biometeorology*, 63, 895-909.
- Lee, H., Mayer, H. & Chen, L. (2016). Contribution of trees and grasslands to the mitigation of human heat stress in a residential district of Freiburg, Southwest Germany. *Landscape and urban planning*, 148, 37-50.
- Lindberg, F., Grimmond, C.S.B., Gabey, A., Huang, B., Kent, C.W., Sun, T., Theeuwes, N., Järvi, L., Ward, H., Capel-Timms, I., Chang, Y.Y., Jonsson, P., Krave, N., Liu, D., Meyer, D., Olofson, F., Tan, J.G., Wästberg, D., Xue, L. & Zhang, Z. (2018). Urban Multi-scale Environmental Predictor (UMEP) – An integrated tool for city-based climate services. *Environmental Modelling and Software*, 99, 70-87. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.09.020>
- Lobaccaro, G. & Acero, J.A. (2015). Comparative analysis of green actions to improve outdoor thermal comfort inside typical urban street canyons. *Urban Climate*, 14, 251-267.
- Loibl, W., Andreas, J., Knoflacher, M., Köstl, M., & Züger, J. (2010). Urban streetscapes responding to changing climate conditions – Effects of street layout on thermal exposure. *Third German-Austrian Building Performance Simulation in a Changing Environment Conference*, 420-427.
- Martilli, A., Krayenhoff, E. S. & Nazarian N. (2020). Is the Urban Heat Island intensity relevant for heat mitigation studies? *Urban Climate*, 31, 100541.
- Martinelli, L., Lin, T.P. & Matzarakis, A. (2015). Assessment of the influence of daily shadings pattern on human thermal comfort and attendance in Rome during summer period. *Building and Environment*, 92, 30-38.
- Matzarakis, A., Mayer, H. & Iziomon, M.G. (1999). Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. *International journal of biometeorology*, 43(2), 76-84.
- Mureau, R., Wesseling J. & Zijp H. (2018). Het belang van de minimumtemperatuur bij een hittegolf – kan ik mijn huis nog wel koelen? *Meteorologica*, 3, 18-20.
- Nazarian, N., Dumas, N., Kleissl, J. & Norford, L. (2019). Effectiveness of cool walls on cooling load and urban temperature in a tropical climate. *Energy and Buildings*, 187, 144-162.
- Nishimura, N., Nomura, T., Iyoda, H. & Kimoto, S. (1998). Novel water facilities for creation of comfortable urban micrometeorology. *Solar Energy*, 64(4-6), 197-207.
- Nouri, A.S. & Matzarakis, A. (2019). The maturing interdisciplinary relationship between human biometeorological aspects and local adaptation processes: An encompassing overview. *Climate*, 7(12), 134.
- Nouri, A.S., Costa, J.P., Santamouris, M. & Matzarakis, A. (2018). Approaches to outdoor thermal comfort thresholds through public space design: A review. *Atmosphere*, 9(3), 108.
- Nuijten, D. (2008). Dwingend vergroenen? : Onderzoek naar de toepassing van het richtgetal van 75 m<sup>2</sup> groen per woning uit de Nota Ruimte en de relatie met de kwaliteit van het groen in de stad. Afstudeerscriptie Sociaal-Ruimtelijke Analyse, SAL-80436, Wageningen Universiteit, 117pp.

- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A. & Voogt, J. A. (2017). *Urban climates*. Cambridge University Press.
- Ouldboukhitine, S.E., Belarbi, R. & Sailor, D.J. (2014). Experimental and numerical investigation of urban street canyons to evaluate the impact of green roof inside and outside buildings. *Applied Energy*, 114, 273-282.
- Panda, J. & Sharan, M. (2012). Influence of land-surface and turbulent parameterization schemes on regional-scale boundary layer characteristics over northern India. *Atmospheric Research*, 112, 89-111.
- Paolini, R., Mainini, A.G., Poli, T. & Vercesi, L. (2014). Assessment of thermal stress in a street canyon in pedestrian area with or without canopy shading. *Energy Procedia*, 48, 1570-1575.
- PBL (2016). *Richting geven – Ruimte maken, Balans van de Leefomgeving*. Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.
- PBL (2015). *Aanpassen aan klimaatverandering – Kwetsbaarheden zien, kansen grijpen*. Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.
- Peng, L.L.H. & Jim, C.Y. (2013). Green-roof effects on neighbourhood microclimate and human thermal sensation. *Energies*, 6, 598-618.
- Pineda, N., Jorba, O., Jorge, J. & Baldasano, J.M. (2004). Using NOAA AVHRR and SPOT VGT data to estimate surface parameters: application to a mesoscale meteorological model. *International Journal of Remote Sensing*, 25(1), 129-143.
- Provincie Zuid-Holland (2018). *Ontwerpprincipes Klimaat- en bodemdalingbestendig, verstedelijken & verdichten*. Thema: Adaptieve Delta, voorbereid op weersextremen en bodemdaling, Den Haag: auteur.
- Nijs, T., Bosch, P., Brand, E., Heusinkveld, B., Van der Hoeven, F., Jacobs, C., Klok, L., Kluck, J., Koekoek, A., Koopmans, S., Van Nieuwaal, K., Ronda, R. & Steeneveld, G. (2019). *Ontwikkeling Standaard Stresstest Hitte*. 10.21945/RIVM-2019-0008. Bilthoven: RIVM, 127pp.
- Ren, C., Ng E.Y. & Katzschner L. (2011). Urban climatic map studies, a review. *Int. J. Climatol.* 31(15), 2213-2233.
- Ronda, R.J., Steeneveld, G.J., Heusinkveld, B.G., Attema, J.J. & Holtslag, A.A.M. (2017). Urban Finescale Forecasting Reveals Weather Conditions with Unprecedented Detail. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 98, 2675-2688.
- Saaroni, H. & Ziv, B. (2003). The impact of a small lake on heat stress in a Mediterranean urban park: the case of Tel Aviv, Israel. *Int J Biometeorol*, 47, 156-165.
- Santamouris, M. (2014). Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*, 103, 682-703.
- Santamouris, M., Ding, L., Fiorito, F., Oldfield, P., Osmond, P., Paolini, R. & Synnefa, A. (2017). Passive and active cooling for the outdoor built environment–Analysis and assessment of the cooling potential of mitigation technologies using performance data from 220 large scale projects. *Solar Energy*, 154, 14-33.
- Santamouris, M. (2014). Cooling the cities–a review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar energy*, 103, 682-703.
- Santamouris, M., Gaitani, N., Spanou, A., Saliari, M., Giannopoulou, K., Vasilakopoulou, K., & Kardomateas, T. (2012). Using cool paving materials to improve microclimate of urban areas – Design realization and results of the flisvos project. *Building and Environment*, 53, 128-136.
- Sass, R.L. (2019). It´s not cool to be hot in Houston. Department of Ecology & Evolutionary Biology, Rice University. [www.ruf.rice.edu/~sass/UHL.html](http://www.ruf.rice.edu/~sass/UHL.html)
- Schneider, F.A., Middel, A., AlKhaled, S., Hagen, B. & Coseo, P. (2019). 50 Grades of Shade – Assessment of

- Engineered and Natural Shade in Hot Dry Communities. *Geophysical Research Abstracts* (21), EGU2019-12452.
- Shahidan, M. F., Shariff, M. K., Jones, P., Salleh, E. & Abdullah, A. M. (2010). A comparison of *Mesua ferrea* L. and *Hura crepitans* L. for shade creation and radiation modification in improving thermal comfort. *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 168-181.
- Shashua-Bar, L., Tsiros, I.X. & Hoffman, M. (2012). Passive cooling design options to ameliorate thermal comfort in urban street of a Mediterranean climate (Athens) under hot summer conditions. *Building and Environment*, 57, 110-119.
- Shashua-Bar, L., Tzamidis, Y. & Hoffman, M.E. (2004). Thermal effects of building geometry and spacing on the urban canopy layer microclimate in a hot-humid climate in summer. *International Journal of Climatology*, 24, 1729-1742.
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Liu, Z., Berner, J., Huang, X., Wang, W., Huang, X. (2019). *A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4*. NCAR Technical Note NCAR/TN-556+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA, 145p. doi:10.5065/1dfh-6p97
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D., Duda, M.G., Huang, X., Wang, W., Powers, J.G. (2008). *A Description of the Advanced Research WRF Version 3*. NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA. doi:10.5065/D68S4MVH
- Skelhorn, C., Lindley, S. & Levermore, G. (2014). The impact of vegetation types on air and surface temperatures in a temperate city: A fine scale assessment in Manchester, UK. *Landscape and Urban Planning*, 121, 129-140.
- Solcerova, A., Van Emmerik, T., Hilgersom, K., Van de Ven, F. & Van de Giesen, N. (2018). Uchimizu: A cool(ing) tradition to locally decrease air temperature. *Water*, 10(6), 741.
- Solcerova, A., Van de Ven, F., Wang, M., Michiel, R. & Van de Giesen, N. (2017). Do green roofs cool the air? *Building and Environment*, 111, 249-255.
- Spangenberg, J., Shinzato, P., Johansson, E. & Duarte, D. (2008). Simulation of the influence of vegetation on microclimate and thermal comfort in the city of São Paulo. *Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana*, 3(2), 1-19.
- Speak, A.F., Rothwell, J.J., Lindley, S.J. & Smith, C.L. (2013). Reduction of the urban cooling effects of an intensive green roof due to vegetation damage. *Urban Climate*, 3, 40-55.
- Steenefeld, G.J., Klompaker, J.O., Groen, R.J. & Holtslag, A.A. (2018). An urban climate assessment and management tool for combined heat and air quality judgements at neighbourhood scales. *Resources, Conservation and Recycling*, 132, 204-217.
- Steenefeld, G.J., Koopmans, S., Heusinkveld, B.G., Van Hove, L.W.A. & Holtslag, A.A.M. (2011). Quantifying urban heat island effects and human comfort for cities of variable size and urban morphology in the Netherlands. *J. Geophys. Res.*, 116, D20129, doi:10.1029/2011JD015988
- Sun, T., Grimmond, C.S.B., & Ni, G.H. (2016). How do green roofs mitigate urban thermal stress under heat waves? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121, 5320-5335.
- Syafii, N.I., Ichinose, M., Kumakura, E., Jusuf, S.K., Chigusa, K. & Wong, N.H. (2017). Thermal environment assessment around bodies of water in urban canyons: A scale model study. *Sustainable Cities and Society*, 34, 79-89.
- Takebayashi, H. & Moriyama, M. (2009). Study on the urban heat island mitigation effect achieved by converting to grass-covered parking. *Solar Energy*, 83(8), 1211-1223.

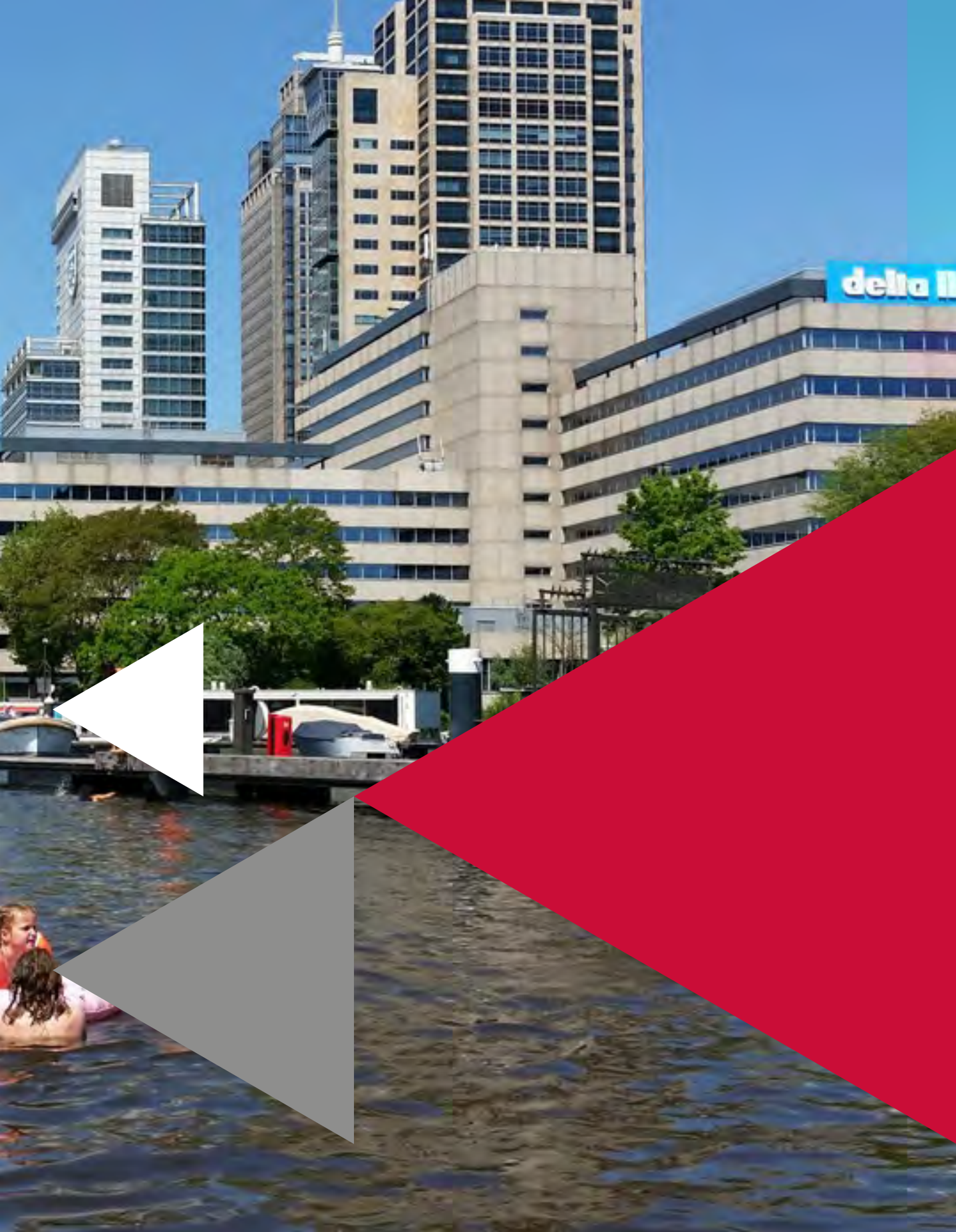
- Taleghani, M. & Berardi, U. (2018). The effect of pavement characteristics on pedestrians' thermal comfort in Toronto. *Urban Climate*, 24, 449-459.
- Taleghani, M., Kleerekoper, L., Tenpierik, M. & van den Dobbelsteen, A. (2015). Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands. *Building and Environment*, 83, 65-78.
- Taleghani, M., Sailor, D.J., Tenpierik, M. & Van den Dobbelsteen. (2014). Thermal assessment of heat mitigation strategies: The case of Portland State University, Oregon, USA. *Building and Environment*, 73, 138-150.
- Tauw (2019) *Nieuwe Klimaattoets 1.0 toetst leefomgeving op klimaatbestendigheid*. [www.tauw.nl](http://www.tauw.nl)
- Tewari, M., Chen, F., Wang, W., Dudhia, J., LeMone, M.A., Mitchell, K., Ek, M., Gayno, G., Wegiel, J., Cuenca, R.H. (2004). Implementation and verification of the unified NOAA land surface model in the WRF model. In *20<sup>th</sup> conference on weather analysis and forecasting/16th conference on numerical weather prediction*, 11-15.
- Theeuwes, N.E., Solcerová, A. & Steeneveld, G.J. (2013). Modeling the influence of open water surfaces on the summertime temperature and thermal comfort in the city. *Journal of Geophysical Research*, 118, 8881-8896.
- Thompson, G., Field, P.R., Rasmussen, R.M. & Hall, W.D. (2008). Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part II: Implementation of a New Snow Parameterization. *Mon. Wea. Rev.*, 136, 5095-5115. <https://doi.org/10.1175/2008MWR2387.1>
- Tiedtke, M. (1989). A Comprehensive Mass Flux Scheme for Cumulus Parameterization in Large-Scale Models. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 1779-1800, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1989\)117<1779:ACMFSF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<1779:ACMFSF>2.0.CO;2)
- Toftager, M., Ekholm, O., Schipperijn, J., Stigsdotter, U., Bentsen, P., Grønbaek, M., Randrup, T., Kamper-Jørgensen, F. (2011). Distance to green space and physical activity: A Danish national representative survey. *Journal of Physical Activity and Health*, 8(6), 741-749. <https://doi.org/10.1123/jpah.8.6.741>
- Van Heijningen, A., Kleerekoper, L., & Schenk, S. (2019). *Klimaat slimme [sic] verstedelijking*. Impactproject van het Deltaprogramma Ruimtelijke adaptatie.
- Van Hove, L.W.A., Jacobs, C.M.J., Heusinkveld, B.G., Elbers, J.A., Van Driel, B., Holtslag, A.A.M. (2015). Temporal and spatial variability of urban heat island and thermal comfort within the Rotterdam agglomeration. *Build. Environ.*, 83, 91-103.
- Vasilikou C. & Nikoloulou, M. (2013). Thermal Walks: Identifying pedestrian thermal comfort variations in the urban continuum of historic city centres. In: *Proceeding of PLEA2013 - 29th Conference, Sustainable Architecture for a Renewable Future*, Munich, Germany 10-12 September 2013.
- Vasilikou C., & Nikoloulou, M. (2015). Thermal notations as a design tool – evaluating the thermal comfort of pedestrians moving in spatial sequences. In: *Proceeding of ICUC9- 9th International Conference on Urban Climate*, Toulouse, France, 20-24 July 2015.
- Verenigde Naties (2015). *Paris Agreement*. Beschikbaar op: [https://unfccc.int/files/essential\\_background/convention/application/pdf/english\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf)
- Verploegh, T. (2016). Kleine wildernis: oerbos in de stad. *Stadswerk magazine*, maart 2016, 14-15.
- Völker, S., Baumeister, H., Classen, T., Hornberg, C. & Kistemann, T. (2013). Evidence for the temperature-mitigating capacity of urban blue space – A health geographic perspective. *Erdkunde*, 67(4), 355-371.
- Watanabe, S., Nagano, K., Ishii, J. & Horikoshi, T. (2014). Evaluation of outdoor thermal comfort in sunlight, building shade, and pergola shade during summer in a humid subtropical region. *Building and Environment*, 82, 556-565.
- Waternet (12 augustus 2019). Transpiratie van bomen. [www.waternet.nl/innovatie/klimaatadaptatie/transpiratie-van-bomen/](http://www.waternet.nl/innovatie/klimaatadaptatie/transpiratie-van-bomen/)

- Witteveen+Bos (2014). *UCAM: Urban Climate Assessment & Management* eindrapport, Rapport GV1102-2/14-023.839. [https://ruimtelijkeadaptatie.nl/publish/pages/114614/ucam\\_eindrapport.pdf](https://ruimtelijkeadaptatie.nl/publish/pages/114614/ucam_eindrapport.pdf)
- Wong, N.H. & Jusuf, S.K. (2010). Study on the microclimatic condition along a green pedestrian canyon in Singapore. *Architectural Science Review*, 53, 196-212.
- Wong, N.H., Tan, A.Y.K., Chen, Y., Sekar, K., Tan, P.Y., Chan, D., Chiang, K., Wong, N.C. (2010). Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Building and Environment*, 45, 663-672.
- Xi, T., Li, Q., Mochida, A. & Meng, Q. (2012). Study on the outdoor thermal environment and thermal comfort around campus clusters in subtropical urban areas. *Building and Environment*, 52, 162-170.
- Xue, F., Li, X., Ma, J. & Zhang, Z. (2015). Modeling the influence of fountain on urban microclimate. *J. Build. Simul.*, 8(3), 285-295.
- Yamada, H., Yoon, G., Okumiya, M. & Okuyama, H. (2008). Study of cooling system with water mist sprayers: Fundamental examination of particle size distribution and cooling effects. *J. Build. Simul.*, 1, 214-222.
- Yamada, H., Okumiya, M., Tsujimoto, M. & Harada, M. (2006). Study on Cooling Effect with Water Mist Sprayer: Measurement on Global Loop at the 2005 World Exposition. *Architectural Inst. of Japan Congress*. Kanto. p. 677. [in Japanese]
- Yang, W., Lin, Y. & Li, C.Q. (2018). Effects of landscape design on urban microclimate and thermal comfort in tropical climate. *Advances in Meteorology. Article ID 2809649*.
- Yang, F., Qian, F. & Lau, S.S.Y. (2013). Urban form and density as indicators for summertime outdoor ventilation potential: A case study on high-rise housing in Shanghai. *Building and Environment*, 70, 122-137.
- Zhang, J., Mohegh, A., Li, Y., Levinson, R. & Ban-Weiss, G. (2018). Systematic comparison of the influence of cool wall versus cool roof adoption on urban climate in the Los Angeles Basin. *Environ Sci Technol*, 52, 11188-11197.
- Zhang, C., Wang, Y. & Hamilton, K. (2011). Improved Representation of Boundary Layer Clouds over the Southeast Pacific in ARW-WRF Using a Modified Tiedtke Cumulus Parameterization Scheme. *Mon. Wea. Rev.*, 139, 3489-3513. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-10-05091.1>



# Bijlagen





## Bijlage 1: Hitterisico-voor-de-menskaart

Ongeveer 50% van de geïnterviewde gemeenten gaf in 2018 aan behoefte te hebben aan een hittekaart die een prioritering (in tijd of ruimte) mogelijk maakt op basis van hitterisico's voor de mens. Wij ontwikkelden daarom een hitterisicokaart op gemeenteschaal waarmee je op buurniveau een prioritering zou kunnen maken.

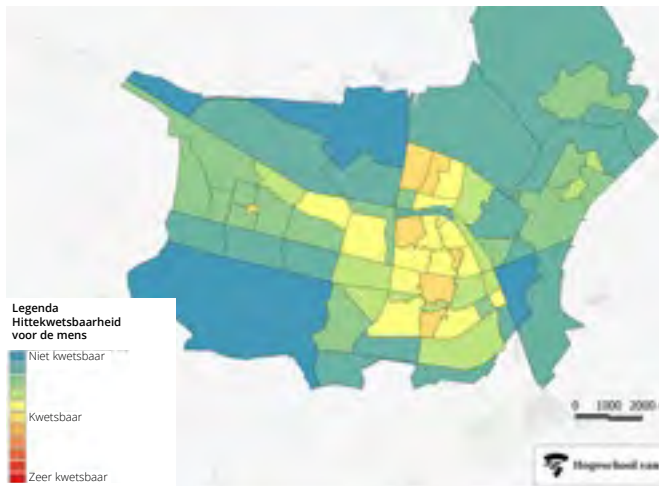
Er zijn meerdere informatiebronnen nodig om het hitterisico weer te geven. Voor het weergeven van de klimaatgebeurtenis gebruik je temperatuurkaarten. Hiervoor zijn de twee basiskaarten uit de gestandaardiseerde stresstest geschikt (paragraaf 2.4.2). De blootstelling is te bepalen met inwoneraantallen en functies van gebouwen (in gebouwen met airco zijn mensen overdag niet blootgesteld aan hitte). De gevoeligheid bepaal je door de gevoelige groepen (bijvoorbeeld eenzamen, ouderen, daklozen) in kaart te brengen. De mate van aanpassingsmogelijkheid hangt af van opleidingsniveau (mogelijkheid om gedrag aan te passen) en inkomen (mogelijkheid om zonwering aan te schaffen) en is in kaart te brengen met statistieken op wijk- of buurniveau.

In dit onderzoek hebben we een hittekwetsbaarheid-voor-de-menskaart (figuur b.1) ontwikkeld, gebaseerd op vier factoren die bijdragen aan de hittekwetsbaarheid:

- 1) Gevoelstemperatuur overdag buiten (blootstelling)
- 2) Aantal inwoners (blootstelling)
- 3) % inwoners > 65 jaar (gevoeligheid)
- 4) % inwoners met inkomen onder sociaal minimum (vermogen tot adaptatie)

Deze factoren zijn geschaald van 1:10 en vervolgens gelijk gewogen. Als uitbreiding kun je bijvoorbeeld ook de gebouwen met kwetsbare functies per aantal inwoners weergeven. Kwetsbare functies zijn bijvoorbeeld bepaalde onderwijsgebouwen (scholen, kinderopvang, etc.) of gebouwen die gebruikt worden voor de zorg (ziekenhuizen, verzorgingshuizen, etc.).

Figuur b.1 geeft een beeld van de manier waarop het hitterisico voor de mens ruimtelijk verdeeld is. De kaart geeft aanknopingspunten om verder over de hitteopgave na te denken. De kaart kan bijvoorbeeld gebruikt worden om een prioritering te maken van buurten waar moet worden geflyerd over de risico's van een hittegolf. Ook kan de kaart dienen als aanknopingspunt voor discussie over de aanpak van hitte.



*Figuur b.1 Voorbeeld van een hiterisico-voor-de-menskaart voor Tilburg op buurniveau.*

## Bijlage 2: De thermal walk

Een thermal walk is een onderzoeksmethode die inzicht geeft in stedelijke hitte door deze te meten en te ervaren. Een thermal walk kan antwoord geven op vragen als: *hoe heet of koel is een winkelstraat, een woonwijk, een bepaalde looproute door de stad of een stationsgebied? Welke aanpassingen zijn nodig voor meer verkoeling? Welke factoren bepalen of de buitenruimte heet of koel is, en welk van deze factoren kunnen worden meegenomen in een hittebestendig ontwerp?* Een thermal walk kan eigenlijk op twee manieren professionals helpen die werken aan een hittebestendige inrichting van stedelijk gebied:

1. De methode geeft inzicht in het fenomeen hitte in de stad en in de principes en factoren die leiden tot een koele inrichtingsvorm.
2. De methode brengt de hittebestendigheid van een specifiek gebied in kaart en laat zien welke aanpassingen kunnen helpen bij het hittebestendig inrichten ervan.

### Methodiek

De thermal walk onderzoekt de invloed van stedelijke inrichting op de thermische beleving van voetgangers die zich verplaatsen door een bepaald gebied. Het is een systematische aanpak om de manier waarop mensen de stedelijke buitenruimte ervaren te analyseren. De thermal walk is afgeleid van de methode *sense walking* (zintuigenwandeling) waarmee verschillende ervaringen zoals geluid of geur in kaart kunnen worden gebracht. De thermal walk helpt te begrijpen hoe verschillende factoren van invloed zijn op de ervaren temperatuur, dus of iemand het heet of koud heeft. De methodiek is grotendeels ontwikkeld door onderzoekers uit Engeland (Vasilikou & Nikolopoulou, 2013 en Vasilikou & Nikolopoulou, 2015). Tijdens een thermal walk bezoeken de deelnemers een aantal locaties in een bepaald gebied en onderzoeken zij de thermische situatie op deze locaties aan de hand van meteorologische metingen en een vragenlijst.

De meteorologische metingen worden opgeslagen of direct ingetekend op een grafiek in de vragenlijst en brengen de lucht- en gevoelstemperatuur van het gebied in kaart. Vooral de gevoelstemperatuur (in het Engels *thermal sensation*) is een bepalende indicator voor een koele plek. Van belang is bijvoorbeeld of een locatie in de zon of schaduw ligt, of het er waait en of er asfalt of gras ligt. Al deze factoren bepalen het microklimaat van de locatie en worden gemeten als luchttemperatuur, straling, windsnelheid en luchtvochtigheid. Hiermee wordt de gevoelstemperatuur berekend. De gevoelstemperatuur neemt over het algemeen toe bij minder wind en meer zonnestraling. Er bestaan sensoren die al deze meteorologische variabelen meten en die tijdens een thermal walk eenvoudig kunnen worden meegenomen, bijvoorbeeld de Kestrel 5400.

Naast luchttemperatuur en gevoelstemperatuur richt de thermal walk zich op de thermische beleving – dus hoe de deelnemers een bepaalde locatie thermisch gezien ervaren. Op elke locatie noteren de deelnemers de antwoorden op vragen uit de vragenlijst die gericht zijn op thermische beleving, zoals:

- > Hoe warm voelt het aan? Antwoord in °C.
- > Hoe voel je je op deze locatie: koud, fris, neutraal, warm, heet?
- > Hoe ervaar je deze omgeving thermisch gezien: aangenaam, onaangenaam, erg onaangenaam?
- > Welke factoren beïnvloeden je thermische beleving van de omgeving?

Door de metingen en vragenlijsten te analyseren en met elkaar te bespreken, krijgen de deelnemers inzicht in de manier waarop een omgeving koeler en aangener kan worden ingericht.

### **Thermal walk in Amsterdam**

Tijdens het festival WeMakeThe.City 2019 gebruikten we de thermal walk om de hittebestendigheid van de looproutes op het Marineterrein in Amsterdam nader te onderzoeken en om de aanwezige deelnemers inzicht te geven in de principes en factoren die leiden tot een hittebestendige inrichting. In groepen van 10 onderzochten de deelnemers de thermische situatie op vier verschillende locaties op dit terrein: op een steiger aan het water, in een schaduwrijk parkje, onder een boom op straat en in een verharde zonnige omgeving. Onder de deelnemers waren beleidsadviseurs, ruimtelijk ontwerpers en klimaatexperts. Uit hun reacties bleek dat de thermal walk een goed middel is om stedelijk ontwerpers te laten verkennen en ervaren wat de invloed van groen, water en ruimte kan zijn op de luchttemperatuur, de gevoelstemperatuur en de thermische beleving. Eye-openers voor de aanwezigen waren dat de luchttemperatuur op de verschillende locaties niet sterk van elkaar verschilde en dat schaduw de gevoelstemperatuur sterk kan verlagen. De deelnemers waren verrast dat het water niet als koelste plek gemeten en ervaren werd. Hier speelde mee dat deze locatie in de volle zon lag en er weinig wind stond.

Daarnaast bleek uit de reacties dat de thermal walk een mooi instrument kan zijn om het onderwerp hitte met collega's en gemeentebesturen te verkennen en de risicodialoog te starten. Kortom, de thermal walk is een nuttige tool die kan bijdragen aan de realisatie van de hittebestendige stad. Meer resultaten van deze thermal walk zijn terug te lezen in het rapport van Caverzam Barbosa en Klok (2020).



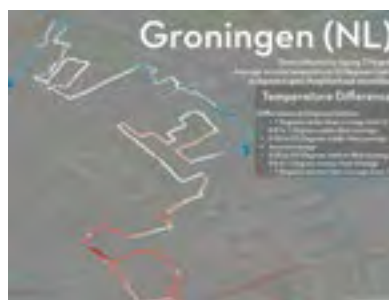
### Bijlage 3: Mobiele metingen

Onderzoekers en studenten van Hanzehogeschool Groningen hebben van 2017 tot 2019 een mobiele meetset ontwikkeld (zie figuur b.2a) waarmee studenten het fenomeen hitte in de stad kunnen onderzoeken. Deze fietssensor kan worden gebruikt om al rondrijdend de luchttemperatuur, infraroodtemperatuur, lichtintensiteit, luchtvochtigheid en windsnelheid te meten. Het uiteindelijke doel is de ontwikkeling van een meetset om data te verkrijgen waarmee hittemodellen kunnen worden gevalideerd en het verkoelende effect van maatregelen kan worden vastgesteld.

Een vroeg prototype van deze sensor (dat alleen luchttemperatuur en luchtvochtigheid meet) is in het voorjaar van 2018 gebruikt door een groep studenten van de RUG om onderzoek te doen naar gezonde en ongezonde plekken in verschillende wijken en naar de verkoelende effecten van blauw-groene maatregelen. In de zomer van 2018 is een volgende versie van de sensor gebruikt door een student van het Global Centre on Adaptation om voor de warmste dag van het jaar (25 juni 2018) data te verzamelen om hittemodellen te kunnen verifiëren. Deze versie van de mobiele sensor registreerde ook lichtintensiteit en luchtvochtigheid. Op basis van de metingen is een schatting gemaakt van de PET-waarden. Nader onderzoek is nodig naar hoe goed de PET-waarden zijn bepaald. Daarnaast zijn deze sensoren gebruikt om verschillende groepen studenten kennis te laten maken met het fenomeen hitte in de stad en het meten van hitte. Zo is de sensor gebruikt om in Rotterdam doorsneden van stedelijke hitte te maken en is de sensor ingezet om in Malmö en Peru lokale kennispartners te helpen met het in kaart brengen van lokale hitteproblematiek. Figuur b.2b,c,d geeft een indicatie van de meetresultaten.



A. Hittesensor



B. Hittepatronen in Groningen



C. Hittepatronen in Malmö



D. Hittepatronen in Rotterdam

Figuur b.2 Hittesensor (A) en hittepatronen in Groningen (B), Malmö (C) en Rotterdam (D).

De metingen met de fietssensoren in de stad Groningen bieden de mogelijkheid om snel enig inzicht te krijgen in de stedelijke hitte. De fietssensor is makkelijk en op elke fiets aan te brengen, en biedt daardoor ook mogelijkheden voor participatie en burgerwetenschap. Tijdens workshops omtrent hittestress kan het een verfrissende manier zijn om onderzoekers, lokale professionals en bewoners bij elkaar te laten komen en gezamenlijk data te verzamelen. Dat vergroot niet alleen hun kennis en bewustzijn, maar biedt ook de kans om een sterke relatie met lokale gemeenschappen op te bouwen. De ervaringen in Groningen, Rotterdam, Malmö en Peru tot nu toe laten zien dat het gezamenlijk in kaart brengen van het probleem de relaties tussen de deelnemers versterkt. Tegelijkertijd kunnen deelnemers een sterkere band met de lokale omgeving opbouwen. Dit kan helpen om de discussie tussen verschillende actoren te bevorderen, en tot gezamenlijk gedragen oplossingen te komen.

## Bijlage 4: Selectie gemeente

### Selectie van een representatieve gemeente om het effect van hittemaatregelen te kwantificeren: Breda

Effecten van maatregelen tegen hitte zijn gekwantificeerd voor een stad die op grond van belangrijke eigenschappen voor de opbouw van hitte als een 'gemiddelde' Nederlandse stad kan worden beschouwd. De hittebepalende kenmerken die we daarvoor hebben gekozen zijn de groenfractie en de mate van verharding binnen de gemeentegrenzen.

De gegevens komen uit de database van de Europese Urban Atlas 2012, met data over de periode 2011-2013 (<https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas/urban-atlas-2012>). Deze atlas bevat betrouwbare en op Europese schaal vergelijkbare gegevens met een hoog oplossend vermogen, voor gemeenten met een bevolkingsomvang van 100.000 of meer. De fracties zijn bepaald aan de hand van hoogwaardige satellietgegevens, aangevuld met lokale data over gebiedsfuncties (bijvoorbeeld wegen, openbare voorzieningen, nutsbedrijven) en beschikbaar kaartmateriaal.

Voor Nederland gaat het om 50 gemeenten; voor 37 daarvan zijn er in deze versie van de atlas gegevens beschikbaar over de groenfractie en verharding.

De groenfractie en de mate van verhardingen zijn gesorteerd naar grootte (zie tabel b.1). Vervolgens is voor beide kenmerken bepaald welke gemeenten zich zowel qua groenfractie als qua verharding rond de middelste waarde bevinden. Ongeveer 50% van de gemeenten heeft een grotere waarde voor het kenmerk en de andere 50% een kleinere. Omdat normaal gesproken geen enkele stad precies de middelste waarde voor beide kenmerken zal vertegenwoordigen, is gezocht naar gemeenten in een wat grotere groep rond dit 50%-punt voor de twee kenmerken, namelijk tussen het 40%- en 60%-punt.

Van de onderzochte 37 gemeenten zaten Breda, 's-Hertogenbosch en Velsen voor zowel groenfractie als mate van verharding in de groepen rond de middelste waarde. Omdat Velsen direct aan de kust ligt is deze gemeente minder representatief. Uiteindelijk is er voor Breda gekozen als representatieve stad op het gebied van hitte, omdat de gegevens van deze stad die voor de berekeningen nodig zijn goed beschikbaar waren.

*Tabel b.1 Groenfractie en verhardingsgraad in 37 Nederlandse gemeenten met een bevolkingsomvang van 100.000 of meer. De tabel is gesorteerd op beide kenmerken. De met blauw gemarkeerde namen geven gemeenten aan in de middelste 20 procent van een kenmerk, rond het 50%-punt. Donkerblauw gemarkeerde gemeenten komen voor beide kenmerken vóór in de groep van de middelste 20 procent. Er is sprake van enige (negatieve) correlatie tussen groen en verharding, maar die is zeker niet perfect, omdat delen die niet groen zijn niet verhard hoeven zijn (bijvoorbeeld water, kale grond, sommige stukjes groen in stadsdelen die op macroniveau als verhard worden beschouwd). Daarom ook is groenfractie + verhardingsgraad niet gelijk aan 100%.*

| Gemeente                | Groenfractie | Gemeente                | Verharding |
|-------------------------|--------------|-------------------------|------------|
| Amstelveen              | 39.08        | Ede                     | 17.11      |
| Hilversum               | 38.33        | Amstelveen              | 30.12      |
| Apeldoorn               | 37.68        | Lelystad                | 30.87      |
| Deventer                | 36.61        | Apeldoorn               | 31.03      |
| Ede                     | 36.23        | Deventer                | 32.76      |
| Zwolle                  | 35.70        | Arnhem                  | 35.95      |
| Alphen aan den Rijn     | 33.02        | Zwolle                  | 37.80      |
| Arnhem                  | 32.85        | Haarlemmermeer          | 38.97      |
| Bergen op Zoom          | 32.71        | Enschede                | 39.13      |
| Middelburg              | 32.23        | Bergen op Zoom          | 39.22      |
| Enschede                | 32.15        | Almere                  | 39.59      |
| Lelystad                | 30.52        | Hilversum               | 39.62      |
| Venlo                   | 30.28        | Alphen aan den Rijn     | 39.89      |
| Alkmaar                 | 29.62        | Roosendaal              | 40.75      |
| Almelo                  | 29.02        | <b>Breda</b>            | 41.50      |
| <b>'s-Hertogenbosch</b> | 28.95        | <b>Velsen</b>           | 42.03      |
| <b>Breda</b>            | 28.53        | Nijmegen                | 42.72      |
| Roosendaal              | 28.03        | <b>'s-Hertogenbosch</b> | 43.24      |
| Amersfoort              | 27.84        | Middelburg              | 43.55      |
| Heerlen                 | 26.82        | Zaanstad                | 43.89      |
| Dordrecht               | 26.65        | Leeuwarden              | 44.33      |
| <b>Velsen</b>           | 25.88        | Purmerend               | 44.34      |
| Almere                  | 25.79        | Dordrecht               | 44.42      |
| Hengelo                 | 25.14        | Amsterdam               | 44.53      |
| Purmerend               | 23.95        | Amersfoort              | 45.65      |
| Tilburg                 | 23.82        | Venlo                   | 46.55      |
| Nijmegen                | 22.62        | Tilburg                 | 47.42      |
| Leeuwarden              | 22.46        | Alkmaar                 | 48.47      |
| Zaanstad                | 22.45        | Hengelo                 | 48.61      |
| Gouda                   | 22.40        | Almelo                  | 48.79      |
| Maastricht              | 22.32        | Maastricht              | 50.28      |
| Haarlem                 | 20.76        | Gouda                   | 51.48      |
| Amsterdam               | 20.33        | Hoorn                   | 52.30      |
| Hoorn                   | 19.90        | Heerlen                 | 53.21      |
| Haarlemmermeer          | 19.37        | Haarlem                 | 53.61      |
| Leiden                  | 19.05        | Leiden                  | 53.71      |

## Bijlage 5: Technische beschrijving van weermodel WRF

Voor de berekeningen op stadsschaal hebben wij het *Weather Research and Forecasting model* (WRF) gebruikt. De hier toegepaste versie (Advanced Research WRF, ARW, versie 3.7.1) is een zogenoemd niet-hydrostatisch weermodel met een hoog oplossend vermogen in het aandachtsgebied, in dit geval de regio Breda. De principes van WRF zijn beschreven door Skamarock et al. (2008). Het model wordt vaak ingezet in onderzoek naar stadsklimaat. In Nederland zijn onlangs de mogelijkheden verkend van weersverwachtingen voor stedelijk gebied op basis van WRF (Ronda et al., 2017). Van de reken-infrastructuur die daarvoor nodig is (model setup, krachtige computer met landgebruiksdatabase Nederland en omgeving, databases stedelijk gebied), is in deze studie gebruikgemaakt.

WRF zoomt in op Breda door vanuit een buitendomein dat een groot deel van de regio rond deze stad omspannt, via een middendomein naar een zogeheten binnendomein te werken met hoog oplossend vermogen (zie figuur b.3). Het oplossend vermogen in het buitendomein is 2,4 km, toenemend naar 0,6 km in het middendomein en 0,15 km in het binnendomein. Door van dit zogeheten *nesting*-principe gebruik te maken kan WRF rekening houden met de weersfactoren buiten de stad, zoals de aanvoer van lucht vanuit andere landsdelen of vanuit de zee.

De omstandigheden aan de randen van het buitendomein en aan het aardoppervlak moeten ook bekend zijn. Deze zijn gespecificeerd op basis van weergegevens uit het archief van het Europese Centrum voor Weersverwachtingen op de Middellange Termijn (ECMWF, in Reading). Deze zesuurlijkse gegevens vormen een slimme combinatie van verschillende soorten waarnemingen met berekeningen van het weermodel van het ECMWF. Dit weermodel wordt algemeen beschouwd als het beste weermodel ter wereld. Al met al ontstaat een zeer betrouwbaar beeld van de toestand van de atmosfeer in een gegeven periode. Deze toestand vertaalt WRF vervolgens vanuit de randen van het buitendomein naar het binnendomein rond Breda.

In WRF kun je kiezen tussen verschillende rekenschema's. De keuze voor een bepaald schema kan de resultaten beïnvloeden (Jin et al., 2010; Panda en Sharan, 2012). Wij hebben hier de CONUS-set gebruikt, die intensief is getest en ontwikkeld voor onder andere de hier gebruikte versie van WRF (Skamarock, 2019). De CONUS-set bestaat uit een aantal gekoppelde rekenschema's voor verschillende interacties en processen die het weer uiteindelijk meebepalen. Hieronder vallen een rekenschema voor de berekening van het transport van bijvoorbeeld warmte en waterdamp in de onderste lagen van de atmosfeer (Janjic, 1994), een schema om zeer kleinschalige processen te kunnen doorrekenen (Thompson et al., 2008), berekeningen van zonnestraling en warmtestraling (Iacono et al., 2008), berekeningen van wolkenvorming en neerslag (Tiedtke, 1989; Zhang et al., 2011) en een model om de interactie tussen de atmosfeer en het landoppervlak te beschrijven (Tewari et al., 2004). Het model voor landoppervlakprocessen dat we hier hebben gebruikt (Unified Noah Land Surface Model) maakt het mogelijk om per oppervlaktecel verschillende soorten landoppervlak te onderscheiden en de invloed daarvan op de atmosfeer te wegen. Hier onderscheiden we maximaal 3 typen per cel.

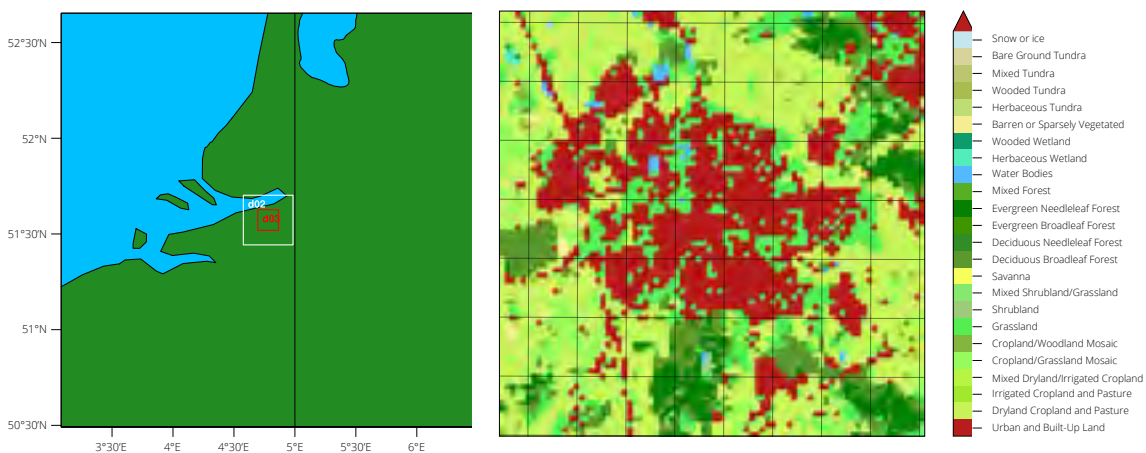
Voor stedelijk gebied is gerekend met het Single Layer Urban Canopy Model (SLUCM). SLUCM beschrijft gebouwd gebied op basis van één verticale laag en van gemiddelde kenmerken per roostervlak (Kusaka & Kimura, 2004; Kusaka et al., 2001). Stedelijke kenmerken zijn dus zeer vereenvoudigd. Binnen stedelijk gebied berekent het model effecten van:

- > schaduwwerking van gebouwen;
- > reflectie en absorptie van straling;
- > de wind en het verloop daarvan met de hoogte;
- > warmteoverdracht tussen lucht en gebouwen (wanden, daken) en lucht en straten.

Verder is er een optie om het effect van groene daken door te rekenen.

Voor de definitie van landgebruik buiten Nederland is de Corine-database gebruikt (EEA, 2002). Landgebruik binnen Nederland is gebaseerd op LGN6 (Hazeu et al., 2010) en LGN7 (Hazeu et al., 2014). De landgebruiksdata kunnen niet rechtstreeks worden gebruikt in WRF, omdat de landgebruiksclassificering in WRF niet overeenkomt met die van Corine en LGN. De Corine-data zijn daarom gereclassificeerd volgens Pineda et al. (2004), de LGN-data volgens de methode van Daniels et al. (2016).

In plaats van overal de standaardclassificatie voor bebouwd gebied te gebruiken, onderscheiden we urbaan en suburbaan gebied in het midden- en binnendomein. Dit komt overeen met de categorieën voor urbaan gebied die in WRF beschikbaar zijn. Voor de modelberekeningen hebben we bepaald welk type in elke modelcel voorkomt. Het onderscheid tussen de urbane gebieden hebben we gemaakt door Breda te classificeren in termen van wijktypen volgens Kleerekoper (2016) en op basis van de groenfractie in de wijk. Voor elke modelcel van 150 m x 150 m is het dominante wijktype bepaald, samen met de groenfractie. Dat laatste is gebeurd aan de hand van de landgebruikskaart van Nederland, LGN6 voor peiljaar 2007 (Hazeu et al., 2010; zie figuur b.3).



Figuur b.3 Inzoomen op Breda met weermodel WRF.

Het oplossend vermogen van de LGN-kaarten is met 25 m hoog in vergelijking met het oplossend vermogen van WRF (150 m). De vertaling van Nederlands landgebruik naar landgebruik voor WRF is dus relatief goed. Desondanks wordt de werkelijke fractie groen in urbane gebieden onderschat, omdat bijvoorbeeld individuele bomen en tuintjes binnen stukjes van 25 m x 25 m wegvallen binnen gebieden die in LGN als urbaan zijn geclassificeerd. Deze onderschatting van groen in gebouwd gebied hebben we gecorrigeerd door een

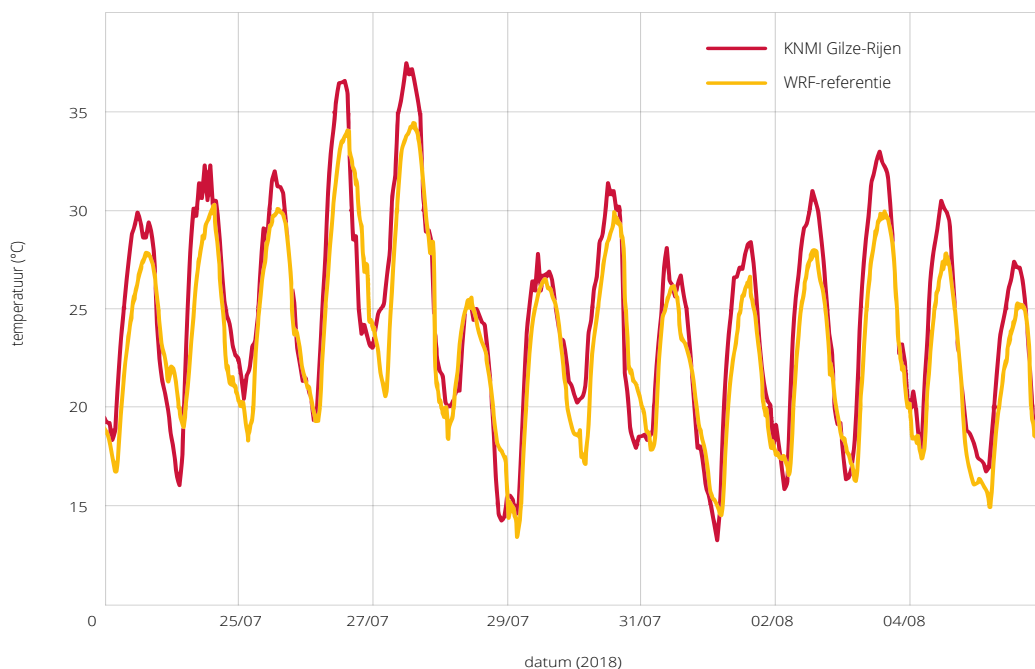
percentage groen binnen zulk gebied aan te nemen. De fracties worden opgeteld bij de groenfractie die binnen een WRF-roostervlak via de LGN-landgebruikskaart is bepaald.

De gekozen scenario's voor de modelberekeningen verschillen in de hoeveelheid groen (vegetatie) die in de urbane, suburbane en rurale gebieden aanwezig is en in de fractie groene daken (zie bijlage 6).

Figuur b.4 vergelijkt voor het referentiescenario de door WRF berekende luchttemperatuur op een hoogte van 2 m met de waargenomen temperatuur op KNMI-station Gilze-Rijen. De maximumtemperatuur was in de hele doorgerekende periode hoger dan 25°C. Op 9 van de 14 dagen bereikte de temperatuur maxima van 30°C of hoger, waarvan op twee dagen hoger dan 35°C volgens de waarnemingen. Minima waren vooral aan het begin vaak 20°C of hoger en in de nacht van 26 op 27 juli bleef het kwik zelfs steken op ruim 23°C.

Over het algemeen worden de temperatuurtrends door het model realistisch berekend. Dag-tot-dagverschillen worden door het model goed gevolgd. De maximumtemperaturen lijken echter systematisch te worden onderschat, met verschillen variërend tussen 0 en ongeveer 3°C. Zo worden maxima van 35°C volgens het model niet bereikt. De minima worden soms onderschat en soms overschat.

De verschillen zijn acceptabel. Naast onvermijdelijke onvolkomenheden in het model kan ook het verschil in locatie tussen het referentiepunt ten zuidoosten van Breda en Gilze-Rijen tot afwijkingen tussen model en waarnemingen leiden, bijvoorbeeld door verschillen in de bodem en vegetatie. Verder zijn mogelijke systematische afwijkingen minder relevant zodra niet de absolute waarden maar de verschillen in temperatuur tussen scenario's worden geanalyseerd.



*Figuur b.4 Vergelijking tussen de door WRF gesimuleerde luchttemperatuur (referentiescenario) en de waarnemingen van KNMI-station Gilze-Rijen, voor 23 juli – 6 augustus 2018.*

## Bijlage 6: Scenarioberekeningen voor Breda met WRF

### Ontwikkeling van de scenario's

Modelberekeningen zijn uitgevoerd voor de periode 23 juli – 6 augustus 2018. Dit was een extreem warme periode in Nederland (zie ook bijlage 5, technische beschrijving van WRF). Alle hierna beschreven scenario's gaan uit van precies dezelfde weerkundige situatie en andere achtergrondgegevens voor deze periode. Modelresultaten zijn beschikbaar per kwartier maar voor ons doel gemiddeld over langere periodes.

Het stadsmodel van WRF onderscheidt, naast het type "ruraal", twee typen stedelijk gebied, "urbaan" en "suburbaan". Het onderscheid tussen de urbane gebieden is gemaakt door Breda te classificeren in termen van wijktypes volgens Kleerekoper (2016) en op basis van de groenfractie in de wijk (zie tabel b.2).

*Tabel b.2 Vertaling van wijktype volgens Kleerekoper (2016) en uit landgebruik geschatte groenfractie naar in het model gebruikt urbaan type. Niet alle door Kleerekoper (2016) onderscheiden wijktypes komen voor in Breda. Deze zijn uit de tabel weggelaten.*

| Dominante wijktype     | Fractie groen | Type      |
|------------------------|---------------|-----------|
| Historische binnenstad | 30%           | Urbaan    |
| Vooroorlogs bouwblok   | 23%           | Urbaan    |
| Tuindorp               | 39%           | Suburbaan |
| Volkswijk              | 17%           | Urbaan    |
| Naoorlogse woonwijk    | 42%           | Suburbaan |
| Bloemkoolwijk          | 43%           | Suburbaan |
| Hoogbouw               | 24%           | Urbaan    |
| Vinex                  | 56%           | Suburbaan |
| Villawijk              | 60%           | Suburbaan |
| Bedrijventerrein       | 59%           | Suburbaan |
| Buitengebied           | 89%           | Ruraal    |

De in de tabel gegeven fractie groen is uit landgebruikskaarten (LGN6; Hazeu et al., 2010) gehaald en weegt alleen grote groene stukken zoals parken en sportvelden mee. Voor als urbaan of suburbaan geclassificeerde stukjes houden we daarbij rekening met de aanwezigheid van kleine stukjes groen zoals bomen en tuintjes via een extra fractie groen die per type aan het begin van de berekeningen wordt vastgelegd. De scenario's voor de modelberekeningen verschillen in deze fractie voor kleine vegetatie binnen de urbane types. Verder voegen we in de twee groenere scenario's groene daken toe:

- 1. Referentie:** Fractie groen in urbane gebieden is 15% en in suburbane gebieden 30%; er zijn geen groene daken.
- 2. Groener:** Fractie groen in urbane gebieden is 25% en in suburbane gebieden 40%; 12,5% van de daken is groen.

- 3. Groenst:** Fractie groen in urbane gebieden is 35% en in suburbane gebieden 50%; 25% van de daken is groen.
- 4. Grijzer:** deze zijn gebaseerd op een ander landgebruik, LGN7 voor peiljaar 2012 (Hazeu et al., 2014), waarin juist meer gebouwd gebied is te vinden in de regio Breda dan in 2007. Fractie groen in urbane gebieden is 5% en in suburbane gebieden 20%; er zijn geen groene daken.

Effecten van de scenario's op hitte in en rond Breda zijn geëvalueerd aan de hand van de luchttemperatuur op 2m hoogte. Deze hoogte is de standaardhoogte voor temperatuurwaarnemingen op weerstations buiten de stad. De analyses betreffen vooral de warmste dag uit de gesimuleerde periode, 27 juli 2018. Voor die dag vergelijken we de maximum- en minimumtemperaturen van de gemodelleerde scenario's. Daarbij geven we het ruimtelijk beeld van de verschillen in luchttemperatuur over het hele binnenste domein van WRF.

## Resultaten

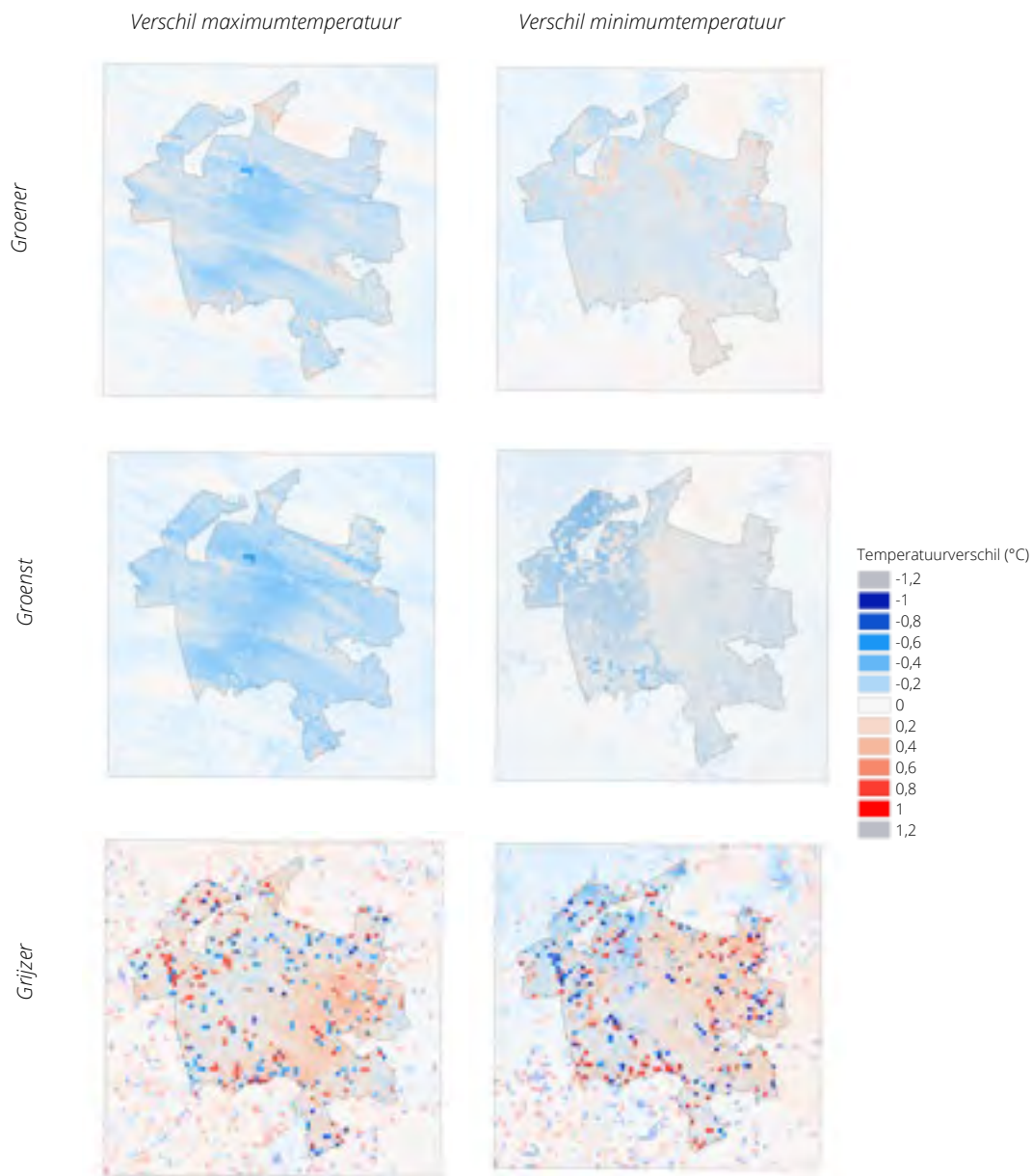
Figuur b.5 laat de patronen van de berekende temperatuurverschillen tussen het referentiescenario en de andere scenario's (Groener, Groenst en Grijzer) zien voor 5 uur 's nachts en 15 uur 's middags op 27 juli. Deze tijdstippen zijn representatief voor respectievelijk de minimum- en maximumtemperatuur. Negatieve verschillen geven verkoeling aan. De resultaten suggereren dat vergroening weliswaar verkoeling oplevert, maar dat de grootte van de effecten opmerkelijk gering is (zie paragraaf 3.3.2). In de verschillen is geen duidelijk door verschillen in stedelijke eigenschappen verklaarbaar patroon zichtbaar. Dit komt waarschijnlijk door atmosferische menging, zowel horizontaal als verticaal.

De verlaging van de maximumtemperatuur bedraagt zeer lokaal maximaal 0,58°C in Groener en 0,64°C in Groenst. Het is verrassend dat in beide scenario's de temperatuur op sommige plekken (20% van het domein bij Groen, 7,7% van het domein bij Groenst) enigszins toeneemt, tot maximaal 0,31°C bij Groener en 0,18°C bij Groenst. Het gemiddelde verschil in de maximumtemperatuur, berekend over het hele binnenste modeldomein zoals getoond in de figuur, bedraagt -0,06°C in Groener scenario en -0,11°C in Groenst. Als we alleen in het meer bebouwde gebied van Breda kijken (heldere uitsnede in de figuren) zijn de verschillen gemiddeld -0,09 voor Groener en -0,14 voor Groenst, met een ongeveer gelijke maximale lokale verkoeling, maar een iets kleinere maximale opwarming (0,19 °C bij Groener, 0,15 bij Groenst).

Ook het verschil in de nachttemperatuur, beoordeeld aan de hand van de minimumtemperatuur, blijft beperkt. Het gemiddelde verschil, berekend over het hele domein, bedraagt volgens WRF slechts -0,03°C in Groener en -0,07°C in het Groenst, met lokale uitschieters van -0,40°C en +0,38°C bij Groener en van -0,38°C en +0,27°C bij Groenst. Enige opwarming treedt op in een groter deel van het domein dan in het geval van de maxima (respectievelijk 36% en 18% bij Groener en Groenst). Binnen gebouwd gebied zijn de verschillen: gemiddelde -0,024 °C bij Groener en -0,077 °C bij Groenst. Uitersten zijn: -0,24 °C tot + 0,27 °C bij Groener en -0,38 °C tot + 0,18 °C bij Groenst.

Het Grijzer scenario laat enige opwarming zien. Dit is consistent met de resultaten volgens Groener en Groenst. Gemiddeld over het domein bedraagt het verschil in de maximumtemperatuur 0,07°C en in de minimumtemperatuur 0,02°C. In dit scenario verschilt ook het landgebruik via de onderliggende verschillen in landgebruikskaart. Op sommige plekken is dat verschil erg groot. Op zulke plekken komen

temperatuurverschillen van enkele graden voor, tot ruim 7°C verkoeling of opwarming. Dit is bijvoorbeeld het geval wanneer water is vervangen door gebouwd gebied, of omgekeerd. In de figuren zijn zulke extreme verschillen met een grijze kleur aangegeven omdat het achterliggende patroon anders teveel verstoord zou raken.



*Figuur b.5 Door WRF berekende ruimtelijke patronen van de temperatuurverschillen tussen de verschillende scenario's en de referentiesituatie, op 27 juli 2018. Van boven naar beneden: Groener, Groenst en Grijzer; Links: verschillen voor maximumtemperatuur; rechts, verschillen voor minimumtemperatuur. Negatieve verschillen duiden op verkoeling.*

## Bijlage 7: Voorbeelden hittebeleid

Het hittebeleid van gemeenten en provincies kan verschillen en is aan verandering onderhevig door de ontwikkelingen in klimaatscenario's en adaptatiebeleid vanuit de Rijksoverheid. Het Nationaal Deltaprogramma Ruimtelijke adaptatie schrijft vanaf begin 2020 voor aan alle gemeenten beleid op hitte te hebben doorgevoerd en dit uit te voeren. Hite is een relatief nieuw onderwerp, waar geen landelijke regels voor zijn. Tabel b.3 geeft enige voorbeelden van hittebeleid en veranderingen in de tijd.

Tabel b.3 Voorbeelden van richtlijnen voor een hittebestendige stad van gemeenten en provincies.

| Overheid                | Beleid                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Visie | Richtlijn | Temperatuur |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-----------|-------------|
| Gemeente Amsterdam 2020 | <p>Strategie Klimaatadaptatie Amsterdam</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; "Het bepalen of streefwaarden op het gebied van hitte realistisch/noodzakelijk zijn;</li> <li>&gt; Verbanden onderzoeken tussen hitteproblematiek en de problematiek vanuit de andere thema's (droogte, wateroverlast en overstromingen). Op basis daarvan prioriteiten en knelpunten bepalen en oplossen;</li> <li>&gt; Effecten van hittestress voor objecten/panden met een vitale functie zoals ziekenhuizen en scholen in beeld brengen en de grootste knelpunten onderscheiden;</li> <li>&gt; Inzet op het vergroenen van de buitenruimte, daken en gevels, in het bijzonder op plekken waar overlast door hitte het meest voorkomt (versteende en schaduwarne gebieden) om zo op natuurlijke wijze (i.p.v. mechanisch) te koelen;</li> <li>&gt; Lokale "koele plekken/postzegelparken" (waaronder zwemlocaties zoals het Marineterrein) waar buurtbewoners kunnen afkoelen;</li> <li>&gt; Communicatie om Amsterdammers bewust te maken van de problematiek rondom hitte, koele plekken in de stad en de maatregelen die zij zelf kunnen treffen in en rondom hun huis.</li> <li>&gt; Inzet op materiaalsoorten die hittestraling niet opnemen (en dus ook niet later afgeven);</li> <li>&gt; Hitebestendig bouwen en inrichten als eis bij het opstellen van stedenbouwkundige plannen en bij het ontwerpen van nieuwe gebouwen en buitenruimte".</li> </ul> <p>(Amsterdam, 2020)</p> | x     |           |             |

| Overheid                | Beleid                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Visie | Richtlijn | Temperatuur |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-----------|-------------|
| Gemeente Amsterdam 2019 | <ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; Goede en koele verbindingen met koele scheggen;</li> <li>&gt; Schaduwrijke koele plekken creëren binnen verdichtende stad;</li> <li>&gt; Koele plek binnen 300 meter van woning;</li> <li>&gt; Grachten en plassen in zomer niet geschikt voor zwemmen, maar (afhankelijk van grootte, positie en groene inrichting) wel als koele plekken;</li> <li>&gt; Bij stedenbouwkundig ontwerp moet rekening worden gehouden met mogelijkheden voor ventilatie;</li> <li>&gt; Gebruik van materialen in de openbare ruimte die minder warmte vasthouden. (Werk sessie Amsterdam 23-03-2019 o.l.v. Mirjam Koevoet)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | x     | x         |             |
| Gemeente Amsterdam 2015 | “De gemeente Amsterdam heeft met de Structuurvisie Amsterdam 2040 vastgesteld actief samen te gaan werken aan een stedelijk gebied dat in de toekomst beter bestand is tegen wateroverlast door extreme regenval, door overstromingen en tegen toename van langere perioden van hitte en droogte.” (gemeente Amsterdam, 2015)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | x     |           |             |
| Gemeente Eindhoven 2018 | <p>Zorg dat de straat niet onnodig opwarmt en dat er voldoende plekken voor verkoeling zijn op het heetst van de dag. (een van de drie beleidsregels ‘Klimaatrobust (her)inrichten en ruimtelijk ontwikkelen’</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; “Tenminste 50% schaduw op het gedeelte van de weg waar gelopen wordt, op het heetste moment van de dag rekening houdend met de schaduwstand in zomer: met voorkeur voor natuurlijke schaduw (planten en bomen) in plaats van bouwkundige constructies (o.a. luifels);</li> <li>&gt; Hoeveelheid schaduw op totale straat en/of plein, afhankelijk van gebruiksfunctie langzaam of snel verkeer en verblijfmogelijkheid;</li> <li>&gt; Bij de materiaalkeuze aandacht voor kleur en dichtheid in verband met opwarming en warmteafgifte en albedo-effect: Onderscheid is daarbij in gevel en vloer met aandacht voor weerspiegeling;</li> <li>&gt; Binnen het plangebied natuurlijke koele verblijfsplekken realiseren die maximaal 300 meter uit elkaar liggen op basis van de werkelijke loopafstand. Deze norm is gebaseerd op de kwetsbare groep (beperkt mobiele ouderen) en hoge intensiteit van de plek;</li> <li>&gt; In een woongebied verminderen van hitte gedurende de nacht binnenshuis door aangepaste bouw waardoor hitte-eiland effect wordt beperkt.” (gemeente Eindhoven, 2018)</li> </ul> | x     | x         |             |
| Gemeente Eindhoven 2016 | “Verdamping stimuleren: Water dat in de bodem infiltreert verdampt tijdens droge perioden via de vegetatie (bomen, struiken en andere bodembedekkers). Verdamping draagt weer bij aan het verlagen van de luchttemperatuur, zodat hittestress wordt beperkt.” (gemeente Eindhoven, 2016)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | x     |           |             |

| Overheid                            | Beleid                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Visie | Richtlijn | Temperatuur |
|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-----------|-------------|
| Gemeente Haarlem 2017               | <p>“Voor perioden van droogte en/of hitte en lage grondwaterstanden delen partijen de ambitie dat in 2050 aantasting van funderingen, ongelijkmatige zetting en schade aan groen, aantasting van de gezondheid van mensen en van de leefbaarheid van de stad zoveel mogelijk wordt voorkómen en de stedelijke infrastructuur zoveel mogelijk blijven functioneren.”</p> <p>(Gemeente Haarlem, 2017)</p>                                                      | x     |           |             |
| Provincie Zuid-Holland 2019         | <ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; Tenminste 50% schaduw in het plangebied op de hoogste zonnestand voor verblijfsplekken en gebieden waar langzaam verkeer zich verplaatst;</li> <li>&gt; Opwarming van stedelijk gebied verminderen: 40% van alle oppervlakken wordt warmtewerend ingericht;</li> <li>&gt; Koeling van gebouwen leidt niet tot opwarming van de (verblijfs)ruimte in de directe omgeving.</li> </ul> <p>(De Wit et al., 2019)</p> |       | x         | x           |
| Provincie Zuid-Holland 2018         | <ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; “Comfortabel buitenklimaat nieuwbouw: nieuwbouw + omgeving is gemiddeld 2°C koeler dan vergelijkbare oudbouw-omgeving;</li> <li>&gt; Comfortabel binnenklimaat nieuwbouw: de nachttemperatuur binnen komt bij 7 aaneengesloten warme dagen niet boven 21°C;</li> <li>&gt; De openbare ruimte levert verkoeling en heeft geen plekken die onnodig opwarmen.”</li> </ul> <p>(Provincie Zuid-Holland, 2018)</p>     | x     |           | x           |
| Gemeente Nieuwegein 2019            | <ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; Klimaatadaptatie meekoppelen met andere ruimtelijke opgaven, zoals onderhoud en herstructurering van de openbare ruimte, onderhoud van groen en infrastructuur;</li> <li>&gt; Uitgangspunt is een toelaatbaar verschil in temperatuur met het platteland op hete dagen van 3 tot 5°C;</li> <li>&gt; Schaduw op maximaal 1 minuut loopafstand</li> </ul> <p>(gemeente Nieuwegein, 2019)</p>                       | x     |           | x           |
| Gemeente Nieuwegein 2018            | <p>In bestemmingsplannen met verruimde reikwijdte en omgevingsplannen worden normen en beleidsregels opgenomen voor het omgaan met regenwater, en voor hittebestendig en waterrobuust bouwen”</p> <p>(gemeente Nieuwegein, 2018)</p>                                                                                                                                                                                                                         | x     |           |             |
| Klimaattoets Noord-Brabant 1.0 2019 | <p>De Klimaattoets 1.0 is ontwikkeld om ontwerpen – in welke fase dan ook – te toetsen aan de mate van klimaatbestendigheid (Tauw, 2019)</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |       | x         | x           |

## Bijlage 8: Achtergronden hiterichtlijnen

### Koele plekken

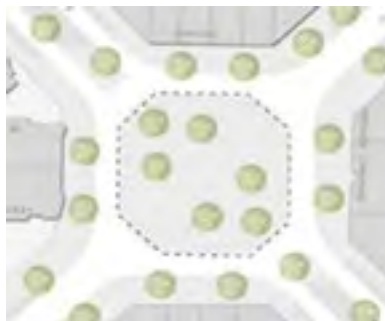
Deze bijlage ondersteunt paragraaf 4.2.3 met een overzicht van de meetlocaties en hun eigenschappen in tabel b.4, een overzicht van het aantal en leeftijd van de bezoekers per meetlocatie in figuur b.6 en de metingen die zijn uitgevoerd op 25-07-2019 in figuur b.7.

*Tabel b.4 Meetlocaties met afmeting, plattegrond en een locatiefoto.*

#### 1. Fontein

##### Linnaeusparkweg

- > Oppervlak koelte:  
geen koele plek volgens  
GIS-analyse
- > Oppervlak totaal:  
900 m<sup>2</sup>



#### 2. Archimedeslaan

- > Oppervlak koelte:  
3000 m<sup>2</sup>
- > Oppervlak totaal:  
1900 m<sup>2</sup>



#### 3. Biothof

- > Oppervlak koelte:  
geen koele plek volgens  
GIS-analyse
- > Oppervlak totaal:  
1700 m<sup>2</sup>



#### 4. Voltaplein

- > Oppervlak koelte: 300 m<sup>2</sup>
- > Oppervlak totaal: 4800 m<sup>2</sup>



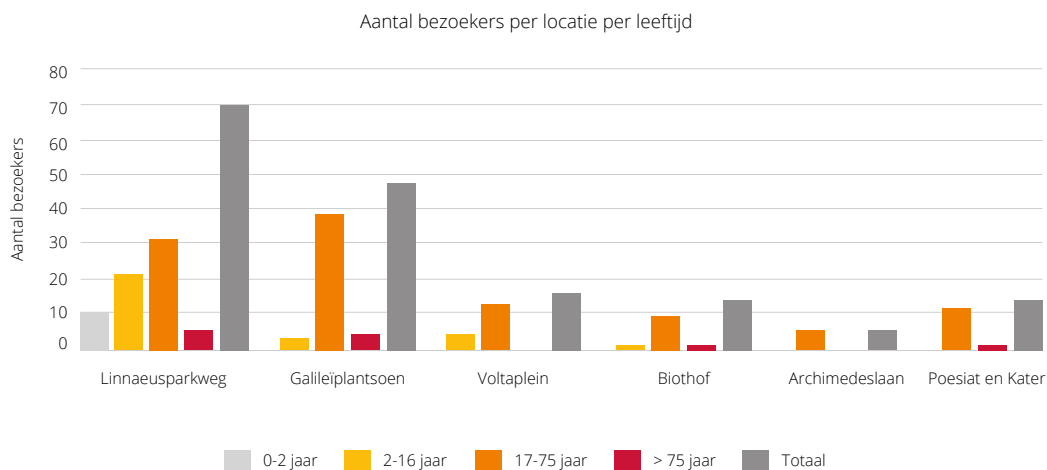
#### 5. Galileiplantsoen

- > Oppervlak koelte: 3400 m<sup>2</sup>
- > Oppervlak totaal: 11.300 m<sup>2</sup>



#### 6. Referentiestation

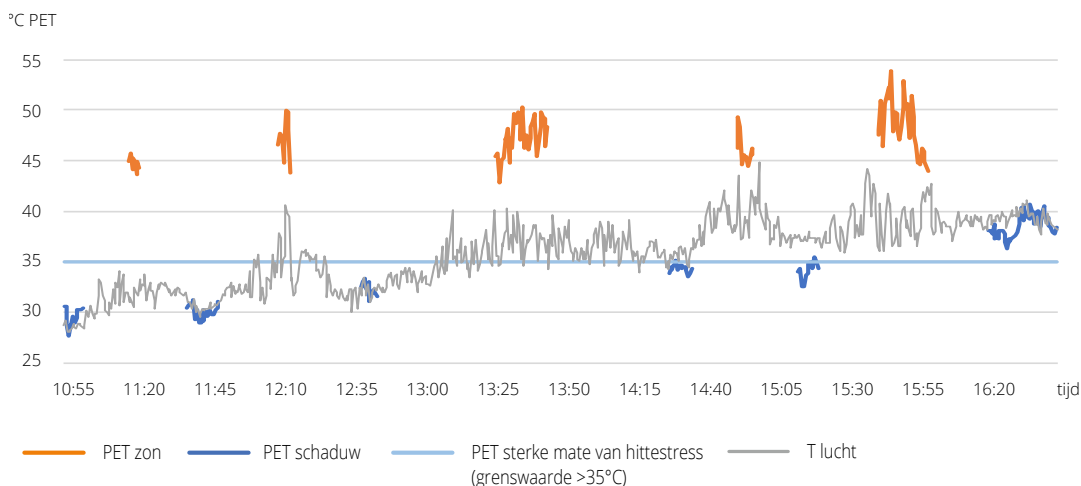




Figuur b.6 Het aantal bezoekers per koele plek, onderverdeeld in leeftijd en als totaal op 23 en 25 juli 2019 tussen 13:00 en 17:00 uur.

### Metingen van 25 juli 2019

Op de heetste dag van de eeuw, 25 juli 2019, hebben we met maar één mobiel meetstation kunnen meten, zie figuur b.7. Omdat de meetdata van het referentiepunt op deze dag ontbreken, is deze dag niet meegenomen in de analyse van de interviews en observaties. Toch zijn de metingen van het ene meetstation interessant omdat dit een extreem hete dag was. De metingen geven aan dat zelfs op zulke hete dagen, rond het middag uur, als de gevoelstemperatuur PET in de zon al 45°C is, de PET in de schaduw onder de 35°C PET blijft. Later in de middag (vanaf 15:00 uur) komt de PET hier wel bovenuit, net als bij de metingen op 23 juli. Dit valt mogelijk te verklaren door de opwarming van de verharding.



Figuur b.7 Metingen op de koele plekken in Middenmeer in Amsterdam met één mobiel meetstation in de zon en de schaduw op 25-07-2019.

## Schaduw op loopgebieden

Tabel b.5 Percentage schaduw per wijktypologie op basis van drie steden (Amsterdam, Haarlem en Breda).

| wijktype               | gemiddeld % schaduw op loopgebied | Standaard deviatie* (%) |
|------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| Villa                  | 23                                | 13                      |
| Historische binnenstad | 36                                | 7                       |
| Vooroorlogs bouwblok   | 33                                | 7                       |
| Stedelijk bouwblok     | 37                                | 7                       |
| Volkswijk              | 22                                | 8                       |
| Tuindorp               | 27                                | 4                       |
| Vernieuwd              | 19                                | 9                       |
| Hoogbouw centrum       | 28                                | 8                       |
| Tuinstad hoogbouw      | 29                                | 12                      |
| Vinex                  | 21                                | 12                      |
| Bloemkoolwijk          | 23                                | 11                      |
| Naoorlogse woonwijk    | 24                                | 10                      |
| Tuinstad laagbouw      | 24                                | 8                       |
| Totaal stad            | 27                                |                         |

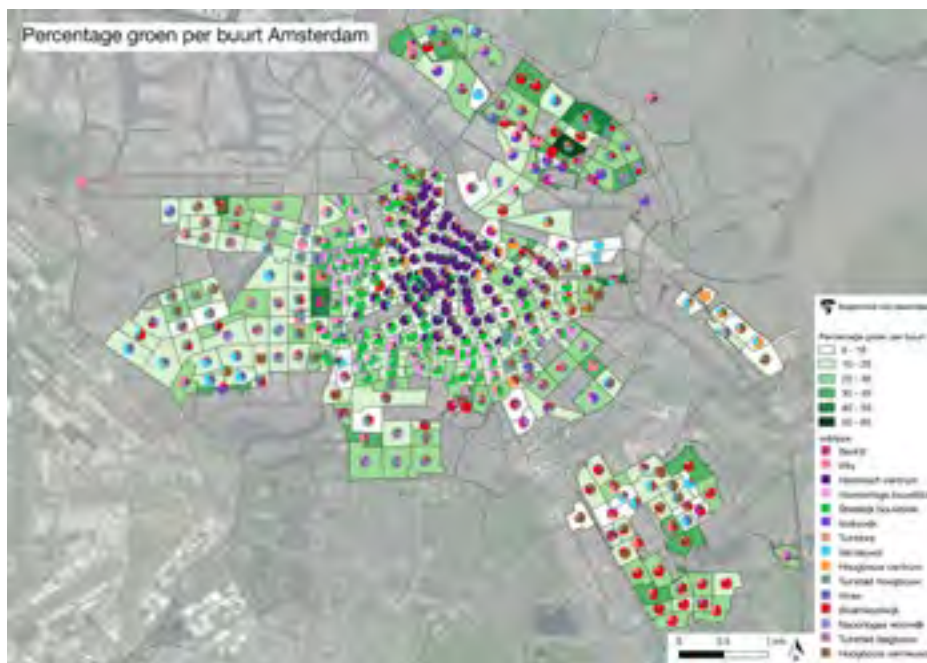
\* Om een inzicht te geven in de spreiding van schaduw binnen een wijktype is de standaard deviatie berekend. Ondanks de niet geheel normaal verdeelde data geeft dit een eerste inzicht.

## Percentage groen per wijktype

### Methode

Voor dit onderzoek hebben we een methode ontwikkeld om het percentage groen per buurt vast te stellen. De zogenaamde vegetatiescan bestaat uit een infraroodluchtfoto waarmee de groenindex NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) is vastgesteld. Met AHN-data is de ruwheid van de gebieden gebruikt om groen te identificeren per buurt en postcode-6-gebied (PC6). Het percentage groen dat representatief is voor een wijktype bevat geen parken en hoofdwegen. Dat zijn voorzieningen die niet specifiek tot een wijktype van een buurt behoren. Wel is er een buffer van 10 meter binnen de rand rondom de hoofdwegen en parken meegenomen, omdat beplanting aan de rand van een park en langs wegen wel onderdeel uitmaakt van de buurt.

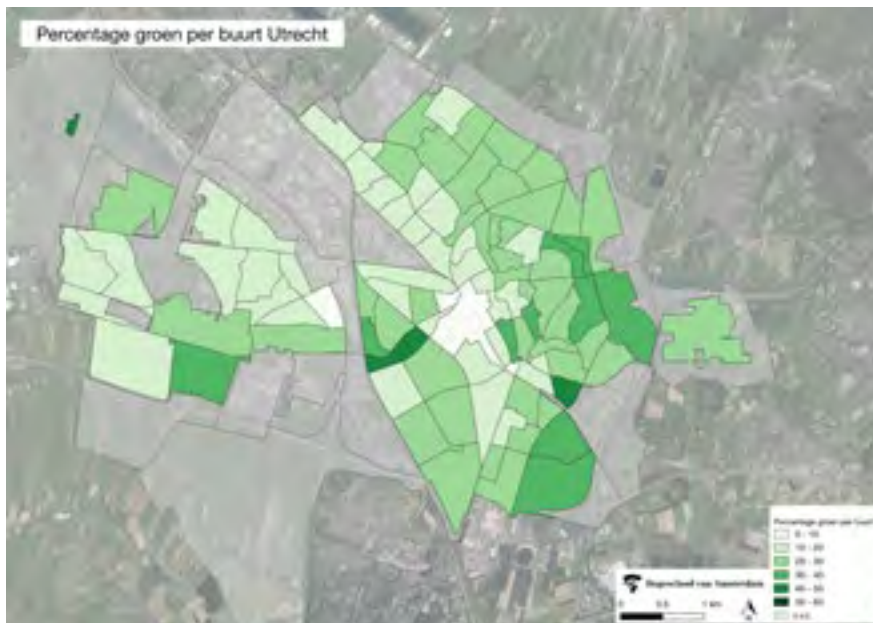
De analyse van het groenpercentage per wijktype hebben we zowel op PC6- en buurtniveau uitgevoerd, omdat we de verschillen in uitkomsten wilden zien. Voor PC6-gebieden is namelijk het wijktype veelal eenduidiger dan een buurt omdat een buurt vaak al een mix van verschillende typen is. Figuur b.8 geeft voor de stad Amsterdam het percentage groen en de variatie in wijktypen per buurt. Figuren b.8 t/m b.11 tonen het percentage groen per buurt voor de vier geanalyseerde steden. Elke buurt is onderverdeeld in PC6-gebieden. De groenwaarden die uit de PC6-analyse komen zijn het zuiverst. De verschillen tussen groenpercentage per wijktype op basis van PC6 of buurt blijken klein te zijn. Daarom hebben we besloten dat het groenpercentage per buurt voldoende nauwkeurig is voor deze eerste inschatting.



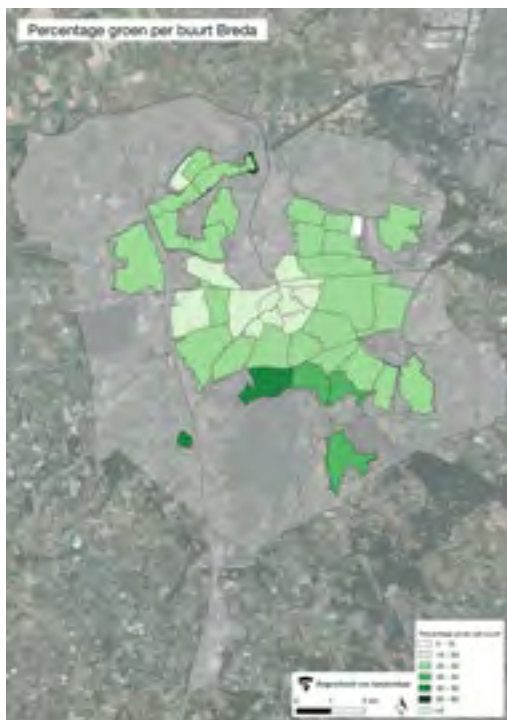
Figuur b.8 Gemiddeld percentage groen per buurt met verdeling van wijktype binnen de buurt.

Tabel b.6 Percentage groen per wijktypologie op basis van vier steden (Amsterdam, Utrecht, Haarlem en Breda) met daarin het aandeel groen op privaat en openbaar terrein.

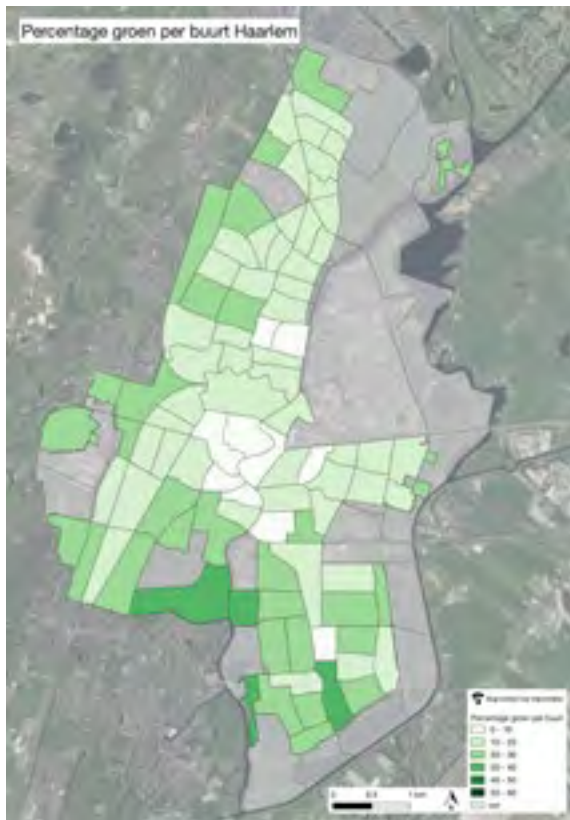
| wijktype               | Gemiddeld % groen per wijktype | % in openbaar gebied | % in privaat gebied |
|------------------------|--------------------------------|----------------------|---------------------|
| Villa                  | 52                             | 40                   | 12                  |
| Historische binnenstad | 16                             | 6                    | 10                  |
| Vooroorlogs bouwblok   | 29                             | 11                   | 18                  |
| Stedelijk bouwblok     | 20                             | 6                    | 14                  |
| Tuindorp               | 33                             | 12                   | 21                  |
| Volkswijk              | 15                             | 6                    | 10                  |
| Vernieuwd              | 22                             | 12                   | 10                  |
| Hoogbouw centrum       | 11                             | 7                    | 4                   |
| Tuinstad hoogbouw      | 35                             | 29                   | 7                   |
| Vinex                  | 41                             | 24                   | 17                  |
| Bloemkoolwijk          | 36                             | 22                   | 14                  |
| Naoorlogse woonwijk    | 33                             | 19                   | 14                  |
| Tuinstad laagbouw      | 39                             | 22                   | 18                  |



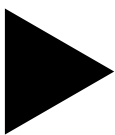
Figuur b.9 Percentage groen per buurt voor de stad Utrecht.



Figuur b.10 Percentage groen per buurt voor de stad Breda.



*Figuur b.11 Percentage groen per buurt voor de stad Haarlem.*



Een van de gevolgen van de klimaatcrisis is dat we steeds meer hittegolven krijgen. In de afgelopen zomers zijn Nederlandse hittestatistieken keer op keer gebroken. Steden worden steeds vaker onaangenaam heet. Dit heeft grote gevolgen voor de leefbaarheid van de stad. Daarom is het belangrijk dat bij de herinrichting van de buitenruimte in stedelijk gebied rekening wordt gehouden met het creëren van voldoende koele plekken, schaduw en groen. Deze publicatie geeft een koele kijk op dit onderwerp en handvatten om de stedelijke buitenruimte hittebestendig in te richten.