

# Climate Proof Cities

---

*Eindrapport*





Eindrapport Climate Proof Cities 2010-2014

Datum: Oktober 2014

Climate Proof Cities consortium<sup>1</sup>

Eindredactie: Vera Rovers, Peter Bosch, Ronald Albers (TNO)



**KvK rapport nr: 129/2014**

Climate Proof Cities is onderdeel van het nationale onderzoeksprogramma Kennis voor Klimaat, mede gefinancierd door het Ministerie van Infrastructuur en Milieu.

<sup>1</sup> <http://www.knowledgeforclimate.nl/climateproofcities>



## Colofon

Aan dit rapport (en onderzoeksprogramma) hebben vele onderzoekers bijgedragen (zie bijlage A). De hoofdredactie van de inhoudelijke hoofdstukken komt van de werkpakkettrekkers:

Hoofdstuk 1	Bert van Hove (Wageningen University)
Hoofdstuk 2	Bert Blocken (TU Eindhoven)
Hoofdstuk 3	Andy van den Dobbelsteen (TU Delft)
Hoofdstuk 4	Tejo Spit, Marjolein Dikmans (Universiteit Utrecht)
Hoofdstuk 5	Peter Bosch (TNO)

De directe invulling van de hoofdstukken (in tekstbijdragen en onderzoeksresultaten) is afkomstig van de volgende personen:

Hoofdstuk	Naam	Instituut
<b>1</b>	Bert van Hove	Wageningen University
	Cor Jacobs	WUR-Alterra
	Bert Heusinkveld	Wageningen University
	Oscar Hartogensis	Wageningen University
	Reinder Ronda	Wageningen University
	Reinder Brolsma	Deltares
	Lisette Klok	TNO
	Patrick Schrijvers	TU Delft
	Ronald Hutjes	WUR-Alterra
<b>2</b>	Bert Blocken	TU Eindhoven
	Hein Daanen	TNO
	Twan van Hooff	TU Eindhoven
	Karin Stone	Deltares
	Frank van der Hoeven	TU Delft
	Alexander Wandl	TU Delft
	Jan Hensen	TU Delft
	Frans van de Ven	Deltares
	William Veerbeek	Unesco-IHE
<b>3</b>	Andy van den Dobbelsteen	TU Delft
	Hamid Montazeri	TU Eindhoven
	Twan van Hooff	TU Eindhoven
	Harry Timmermans	TU Eindhoven
	Wiebke Klemm	Wageningen University
	Toine Vergroesen	Deltares
	Reinder Brolsma	Deltares
	Laura Kleerekoper	TU Delft
	Leyre Echevarría Icaza	TU Delft
	Jan Hofman	KWR
	Chris Zevenbergen	Unesco-IHE
Herbert ter Maat	WUR-Alterra	
<b>4</b>	Tejo Spit	Universiteit Utrecht
	Caroline Uittenbroek	Universiteit van Amsterdam/Universiteit Utrecht
	Anita Kokx †	Universiteit Utrecht
	Liz Root	Radboud Universiteit
	Beitske Boonstra	Universiteit Utrecht/TNO
	Martin Roders	TU Delft
	Marjolein Dikmans	Universiteit Utrecht
<b>5</b>	Peter Bosch	TNO
	Annemarie Groot	Wageningen University
	Cor Jacobs	Wageningen University



## Beleidssamenvatting

*Alle steden in Nederland, groot en klein, zijn kwetsbaar voor de effecten van klimaatverandering. De mate van kwetsbaarheid varieert nogal binnen het stedelijk gebied. Dat betekent dat het vergroten van de klimaatbestendigheid van steden het meest efficiënt kan gebeuren door het nemen van veel relatief kleine en lokale maatregelen. Veel daarvan kunnen tegelijkertijd met groot onderhoud of renovaties worden uitgevoerd. Daarvoor is wel samenwerking met veel en diverse partijen nodig.*

Dit zijn de belangrijkste bevindingen van het onderzoeksprogramma Climate Proof Cities (CPC). Dit programma heeft veel kennis opgeleverd om Nederlandse steden klimaatbestendig te maken, met een focus op hittestress en wateroverlast door piekbuien. Het programma is uitgevoerd door een consortium van tien universiteiten en kennisinstellingen die gedurende vier jaar hebben samengewerkt met gemeenten, waterschappen en de rijksoverheid om antwoorden te geven op praktijkvragen.

### Het stedelijk klimaat verandert

Klimaatverandering leidt tot meer hittegolven, vaker extreme neerslag, en meer droogte perioden. Als steden zich hier niet op voorbereiden, heeft dit invloed op de gezondheid van mensen, leefbaarheid van buurten, comfort in woningen en gebouwen, op de arbeidsproductiviteit, en leidt dit tot economische schade.

Het hoge percentage verharding in de stad gecombineerd met de toenemende kans op extreme neerslag kan leiden tot grotere materiele en financiële schade door verkeershinder, uitval van infrastructuur en kostbare inzet van hulpdiensten. De drempels voor overstroming in de gebouwde omgeving zijn in de afgelopen jaren gelijk gebleven of soms zelfs verlaagd en wateroverlast is in sommige buurten nu al een terugkerend probleem. In de toekomst worden ook meer zomerse en tropische dagen verwacht. Zonder een explosieve toename van koelinstallaties in gebouwen leidt dit tot veel hogere temperaturen in gebouwen in een groot deel van de Nederlandse woningvoorraad. Hittestress kan leiden tot ziekte en extra sterfte onder gevoelige bevolkingsgroepen, zoals ouderen en chronische zieken, maar ook tot verminderde arbeidsproductiviteit en slaapstoornissen.

### Zowel grote als kleine steden zijn kwetsbaar

Tijdens hittegolven is het in iedere stad in Nederland, groot en klein, warmer dan in de omgeving. Dit hitte-eilandeffect is merkbaar op het leefniveau en kan oplopen tot meer dan 7 °C, met name in de avonden. Door klimaatverandering kan het aantal dagen met hittestress in de stad aanzienlijk toenemen. Ook extreme regenbuien kunnen iedere stad treffen.

### De mate van kwetsbaarheid vertoont een grote variatie binnen de stad

Een opvallende conclusie uit het CPC onderzoek is dat er binnen het stedelijk gebied een grote ruimtelijke variatie bestaat in kwetsbaarheid afhankelijk van wijk- en gebouweigenschappen en de verspreiding van gevoelige personen en objecten. Voor de blootstelling aan hitte en wateroverlast zijn de mate van verharding en de bebouwingsdichtheid in een wijk belangrijk. De oververhitting in gebouwen hangt sterk af van de mate van zonwering en gebouwisolatie. Informatie hierover gevoegd bij de locatie van gevoelige groepen (bijvoorbeeld ouderen) en objecten (zoals schakelkastjes en woningen met kelders) vormt de basis voor het identificeren van aandachtsgebieden.

### Aanpassing aan klimaatverandering is een kwestie van de accumulatie van relatief kleine, lokale ingrepen

Omdat de kwetsbaarheid voor klimaateffecten lokaal is bepaald, is de keuze voor maatregelen ook afhankelijk van de lokale context. De inzet van generieke maatregelen voor een hele stad is minder effectief. Er bestaat een grote diversiteit aan aanpassingsmaatregelen variërend van het beïnvloeden van het stedelijk klimaat of het stedelijk watersysteem (bijv. opvang en opslag van neerslag, verkoelende



inrichting van straten en pleinen), het aanpassen van gebouwen en infrastructuur (bijv. aanleg van drempels), het aanpassen van menselijk gedrag en het vergroten van de acceptatie van optredend ongemak en het voorkomen van schade als er toch een extreme gebeurtenis plaatsvindt (bijv. zorg voor ouderen). Verschillende adaptatiemaatregelen dragen bij aan het verminderen van problemen met zowel wateroverlast, hitte en droogte en een integrale aanpak voor deze drie problemen heeft dan ook de voorkeur. Hemelwater uit natte perioden zou bijvoorbeeld kunnen worden geborgen en benut voor droogte- en, via verdamping, voor hitte-bestrijding. Veel maatregelen hebben een positief effect op andere beleidsthema's, zoals mitigatie en biodiversiteit, en/of dragen bij aan de verbetering van de algemene leefbaarheid in gebouwen en in de openbare ruimte. Het CPC onderzoek heeft een aantal nieuwe en soms opzienbarende inzichten over de effectiviteit van maatregelen opgeleverd:

- Traditionele groene daken, die niet uitgevoerd zijn met “geknepen afvoer”, zijn weinig effectief voor zowel het binnenklimaat, het buitenklimaat en de tijdelijke opslag van extreme regenval.
- Het koelend effect van oppervlaktewater in de stad is niet eenduidig: waterpartijen kunnen zelfs bijdragen aan de opwarming van de stad; grotere waterpartijen kunnen afhankelijk van de oriëntatie op de windrichting verkoeling brengen.
- Isolatie van gebouwen zonder aandacht te besteden aan de afscherming van de inkomende zonnestraling kan leiden tot meer warmteoverlast in hete zomers.
- Het planten van loofbomen met grote kronen en in het algemeen het toevoegen van groene elementen in privé en openbare ruimtes leidt tot een beter thermisch comfort en vermindert overlast door extreme regenval.

#### **Veel maatregelen kunnen gemakkelijk worden geïntegreerd in ander beleid, maar vereisen interdisciplinaire samenwerking**

Veel maatregelen vragen samenwerking tussen verschillende actoren: de verschillende afdelingen binnen een gemeente, waterschap, huiseigenaren, soms bedrijven. Integratie van klimaatadaptatie in andere sectoren is echter niet vanzelfsprekend. Beleidskoppelaars kunnen helpen om verschillende doelstellingen met elkaar te verbinden en te zorgen voor breed gedragen oplossingen voor stedelijke ontwikkeling en tegelijkertijd voor kostenbesparingen. Het klimaatbestendig maken van de stad zou een integraal onderdeel moeten vormen van de besluitvorming door allerlei belanghebbenden in de stedelijke omgeving. Slechts wanneer overheden, burgers en private partijen de realisering van een klimaatbestendige stad als een gezamenlijke opgave zien is er een basis voor succes.

#### **Nú de aandachtsgebieden inzichtelijk maken en een strategie ontwikkelen, en in de uitvoering meeliften bij grotere renovatie en herstructureringsprojecten**

Het klimaat verandert langzaam, maar gestaag. Omdat investeringen in de gebouwde omgeving die nu gedaan worden, bijvoorbeeld voor renovatie of nieuwbouw, leiden tot gebouwen en infrastructuren die er over pakweg vijftig jaar nog steeds staan, is het van belang om nu al te overwegen of aanpassingen aan een toekomstig klimaat kunnen worden ingepast. Steeds meer studies, zowel internationaal als nationaal, tonen aan dat de kosten van adaptatie nú gering zijn in vergelijking met de schade die in één dag kan ontstaan door extreme weersomstandigheden.

Omdat klimaatbestendigheid een lange-termijn planning vergt, is het belangrijk om nu al inzichtelijk te maken welke maatregelen in welke gebieden zouden moeten worden toegepast. In beleidstermen geformuleerd: het maken van een klimaatstresstest en het ontwikkelen van een adaptatiestrategie. De uitvoering kan vervolgens de komende decennia gefaseerd plaatsvinden door mee te koppelen met reguliere onderhouds- en renovatiemomenten, zodat de meerkosten worden beperkt. Identificatie van deze “windows of opportunity” voor de inpassing en uitvoering van adaptatiemaatregelen, geeft een implementatietijdspad. Het missen van de mogelijkheden om bij grote transformaties adaptatiemaatregelen in te passen, kan later tot kosten leiden.



## Inhoudsopgave

Beleidsamenvatting.....	3
Inleiding .....	8
1 Hoe werkt het lokale klimaat in Nederlandse steden en hoe beïnvloedt stedelijke inrichting het lokale klimaat? .....	11
Samenvatting.....	11
1.1 Inleiding .....	12
1.2 De interactie tussen stad en platteland.....	17
1.3 De invloed van antropogene warmteproductie .....	19
1.4 Verdamping in de stad.....	20
1.5 Variatie in klimaat binnen de stad .....	23
1.5.1 De variatie in temperatuur .....	23
1.5.2 De invloed van wijk eigenschappen op temperatuur .....	24
1.5.3 De variatie in thermisch comfort.....	30
1.5.4 De invloed van wijk eigenschappen op thermisch comfort.....	31
Conclusies .....	32
2 Hoe kwetsbaar zijn Nederlandse steden voor klimaatverandering? .....	34
Samenvatting .....	34
2.1 Inleiding .....	35
2.2 Hittestress .....	37
2.2.1 Gevoeligheid .....	37
2.2.2 Rol van gebouwen.....	40
2.2.3 Kwetsbaarheidskaarten voor hitte .....	41
2.3 Wateroverlast .....	44
2.3.1 Schadegevoeligheid en drempelwaardes .....	44
2.3.2 Kwetsbaarheidskaarten voor wateroverlast.....	46
2.4 Tools voor beleidsmakers .....	49
2.4.1 3Di gebiedsmodel voor wateroverlast en overstrooming .....	49
2.4.2 HitteDroogte Stress Model .....	50
2.5 Conclusie.....	51



3	Welke maatregelen kunnen genomen worden om steden beter aan te passen aan het klimaat?.....	52
	Samenvatting .....	52
3.1	Inleiding .....	53
3.1.1	Categorisering van klimaatadaptatie .....	53
3.1.2	Beschrijving van de maatregelen .....	54
3.2	Gebouw.....	55
3.2.1	Doel.....	55
3.2.2	Maatregelen.....	56
3.2.3	Ontwerpprincipes .....	61
3.3	Van straat tot wijk.....	63
3.3.1	Doel.....	63
3.3.2	Maatregelen.....	63
3.3.3	Ontwerpprincipes .....	71
3.4	Stad en regio .....	77
3.4.1	Doel.....	77
3.4.2	Maatregelen.....	77
3.4.3	Ontwerpprincipes .....	82
3.5	De Meekoppelmethode .....	83
3.6	Tools voor adaptatieplanning .....	85
3.6.1	Inzet van rekentools voor wateroverlast .....	86
3.6.2	3Di gebiedsmodel voor wateroverlast en overstroming .....	87
3.6.3	Climate Adaptation App.....	88
3.6.4	Adaptation Support Tool.....	88
3.6.5	Hitte en Droogte Stress Model .....	88
3.6.6	Gezondheidsscan .....	89
4	Urban governance: de implementatie van klimaatadaptatie bij stedelijke ontwikkeling .....	90
	Samenvatting .....	90
4.1	Inleiding .....	91
4.2	Gemeenten .....	91
4.2.1	Organisatie.....	91
4.2.2	Financiële instrumenten: de inzet van TIF's .....	94
4.3	Woningcorporaties .....	96
4.4	Burgers.....	97
4.5	Conclusie.....	99



5 Integratie in Bergpolder Zuid .....	100
Samenvatting .....	100
5.1 Inleiding .....	100
5.2 Het begrip integratie binnen CPC .....	100
5.3 Bergpolder Zuid.....	101
5.4 De wensen van stakeholders voor het onderzoek.....	101
5.5 De onderzoeksresultaten.....	102
5.6 Lessen over integratie.....	107
5.7 Conclusies en gerelateerde onderzoeksvragen .....	109
BIJLAGEN .....	110
Bijlage A Onderzoekers CPC.....	111
Bijlage B Bronvermelding.....	114
Bijlage C Thermisch comfort en indicatoren.....	125
Bijlage D Warmteuitwisseling van het stedelijk gebied met de atmosfeer .....	127





## Inleiding

### Het klimaat verandert

Wereldwijde klimaatverandering leidt onder andere tot meer zomerse en tropische dagen en meer dagen met extreme regenbuien in de zomer. De KNMI'14 scenario's<sup>2</sup> geven de hoekpunten waarbinnen de klimaatverandering in Nederland zich waarschijnlijk zal voltrekken (KNMI, 2014). Volgens deze scenario's is in 2050 de gemiddelde zomertemperatuur 1,0 tot 2,3 °C hoger dan in de referentieperiode 1981-2010. Het aantal zomerse dagen (met een max temperatuur  $\geq 25$  °C) neemt in 2050 met 5 tot 15 toe ten opzichte van gemiddeld 21 nu. Hittegolven zullen vaker voorkomen. Afhankelijk van het scenario wordt het droger of juist natter in de zomer. De meest extreme buien in de zomer ontstaan echter door lokale processen en kunnen dan ook niet voorspeld worden met klimaatmodellen. Voor alle scenario's geldt dat opwarming leidt tot meer waterdamp in de lucht, waardoor de kans op zware buien toeneemt.

### Steden zijn kwetsbaar

De concentratie van bevolking en economisch kapitaal maakt steden tot belangrijke centra voor een goed draaiende economie en maatschappij. Tegelijkertijd maakt het steden ook kwetsbaar voor de effecten van klimaatverandering. In Nederland woont 40% van de bevolking in de 36 grootste steden en dit aandeel is groeiende. Deze steden zijn goed voor driekwart van het bruto nationaal product (G32, 2011). Extreme weersomstandigheden, zoals hittegolven en extreme regenval, bedreigen dan ook een groot aantal mensen, vitale infrastructuren en waardeketens. De combinatie van verstedelijking en klimaatverandering vraagt om een proactieve houding van steden in het vergroten van hun veerkracht teneinde een goede kwaliteit van leven voor de burgers te garanderen en hun concurrentiepositie te behouden.

Steden zijn dynamische systemen, die voortdurend in ontwikkeling zijn. De aanpassing aan klimaatverandering is slechts een van de aspecten van die ontwikkeling. Het klimaatbestendig maken van de stad moet dus een integraal onderdeel vormen van de besluitvorming door allerlei belanghebbenden in de stedelijke omgeving.

### Actie voor klimaatbestendigheid is nu nodig

Het klimaat verandert langzaam, maar gestaag. Omdat investeringen in de gebouwde omgeving die nu gedaan worden, bijvoorbeeld voor renovatie of nieuwbouw, leiden tot gebouwen en infrastructuren die er over pakweg vijftig jaar nog steeds staan, is het van belang om nu al te overwegen of aanpassingen aan een toekomstig klimaat kunnen worden ingepast (EEA, 2010). Bovendien tonen steeds meer studies, zowel internationaal (Isoard, 2011; Stern, 2006; Watkiss, 2011) als nationaal (Algemene Rekenkamer, 2012; PBL, 2011) aan dat de kosten van adaptatie nu in vergelijking met de mogelijke schade door klimaatverandering later, laag zijn en de baten hoog. In een aantal gevallen zijn ook nu al aanpassingen in de gebouwde omgeving nodig om overlast en schade door huidige extreme weersomstandigheden te verminderen.

### Climate Proof Cities

Om bestaande structuren verstandig aan te passen aan een veranderend klimaat zijn met kennis onderbouwde beslissingen nodig en een integrale aanpak. Het onderzoeksprogramma Climate Proof Cities (CPC) heeft zich van 2010 tot 2014 ingezet om deze kennis te genereren voor klimaatbestendig stedelijk beleid.

---

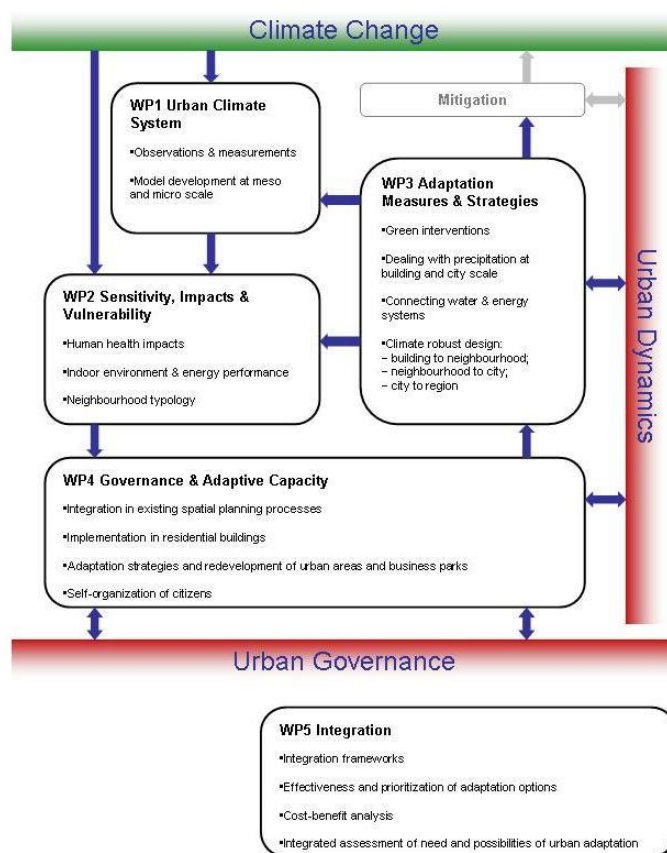
<sup>2</sup> Voor onderzoek binnen CPC is nog vooral gebruik gemaakt van de KNMI'06 scenario's.



Gemeenten en waterschappen hebben aan het begin van het programma de 5 belangrijkste kennisvragen gedefinieerd die het uitgangspunt hebben gevormd voor 5 werkpakketten in CPC (**Figuur 0.1**):

1. Hoe werkt het lokale klimaat in Nederlandse steden en hoe beïnvloedt stedelijke inrichting het lokale klimaat?
2. Hoe kwetsbaar zijn Nederlandse steden voor de effecten van klimaatverandering?
3. Welke maatregelen kunnen genomen worden om steden beter aan te passen aan een toekomstig klimaat?
4. Hoe kunnen deze maatregelen bestuurlijk geïmplementeerd worden?
5. Wat is de uiteindelijke balans van kosten en baten van de aanpassingsmaatregelen?

Deze vijf vragen vormen ook de hoofdstructuur van dit rapport. Ieder hoofdstuk geeft antwoord op één van de vragen. Het vijfde en laatste hoofdstuk gaat vooral in op de integratie van kennis over adaptatie zowel binnen de wetenschap als tussen wetenschap en beleid.



*Figuur 0.1 Hoofdstructuur van het Climate Proof Cities onderzoeksprogramma*

Het onderzoeksprogramma heeft vooral aandacht besteedt aan hitte in de stad en de toenemende risico's van langdurige warme periodes, en aan overlast door frequentere en intensere regenbuien. Water en hitte zijn met elkaar verbonden, bijvoorbeeld doordat langdurige warmte periodes kunnen leiden tot droogte en doordat water door verdampingskoeling de temperatuur kan terugdringen. Het onderzoek was praktisch georganiseerd in een 20-tal deelonderzoeken, uitgevoerd door 9 promovendi, 3 postdoc's en vele onderzoekers van 10 verschillende onderzoeksinstituten. Om de bruikbaarheid van de uitkomsten in de praktijk te vergroten hebben de onderzoekers samengewerkt in 5 case studies in verschillende Nederlandse stedelijke gebieden, te weten: Rotterdam, Haaglanden, Amsterdam, Arnhem/Nijmegen, Utrecht en steden in Noord-Brabant (**Figuur 0.2**).



Figuur 0.2 Case studies binnen het onderzoeksprogramma CPC

### De Deltabeslissing Ruimtelijke Adaptatie

Ongeveer parallel met de opzet van het Kennis voor Klimaat programma, begon ook het bewustzijn van klimaatverandering bij de Nederlandse steden te groeien. Bij het begin van het CPC onderzoeksprogramma betrof het nog een handjevol steden (en individuen) die zich met adaptatie bezighielden. Relaties tussen gemeenten en waterschappen op dit gebied bestonden nog nauwelijks. Mede gestimuleerd door het Deltaprogramma Nieuwbouw en Herstructurering (DPNH) is de laatste jaren een brede beweging ontstaan wat onder andere heeft geleid tot het 'Manifest Klimaatbestendige Stad' en de 'Handreiking Ruimtelijke Adaptatie'<sup>3</sup>. Beide geven adviezen over het klimaatbestendig maken van de stad, geformuleerd rond de 3 stappen;

1. **Weten:** analyse van het gebied (aansluitend bij onderzoeksvraag 1 en 2 van CPC);
2. **Willen:** formuleren van de ambitie (onderzoeksvraag 3), en;
3. **Werken:** toepassing in beleid en regelgeving (onderzoeksvraag 4 en 5).

Op Prinsjesdag 2014 is de Deltabeslissing Ruimtelijke Adaptatie aan de Tweede Kamer aangeboden; deze beoogt het ruimtelijk beleid meer waterrobuust en klimaatbestendig te maken. Dit rapport en alle onderliggende CPC onderzoeken<sup>4</sup> bieden hiervoor ondersteuning.

<sup>3</sup> <http://www.ruimtelijkeadaptatie.nl/>

<sup>4</sup> Alle CPC publicaties zijn terug te vinden onder <http://www.kennisvoorklimaat.nl/publicaties>



## 1 Hoe werkt het lokale klimaat in Nederlandse steden en hoe beïnvloedt stedelijke inrichting het lokale klimaat?

### Samenvatting

Klimaatverandering leidt tot meer zomerse en tropische dagen en meer dagen met extreme neerslag in de zomer. De gemiddelde hoeveelheid neerslag in een stedelijke gebied verschilt niet van die in het omringende buitengebied. Dit geldt echter niet voor de temperatuur. In de stad is het bijna altijd warmer dan in het omringende buitengebied, wat het 'stedelijk hitte-eiland effect' (Urban Heat Island of UHI) wordt genoemd. De uitkomsten van het Climate Proof Cities (CPC) programma bieden meer inzicht in de werking van dit hitte-eiland effect.

Het stedelijk hitte-eiland effect wordt veroorzaakt door absorptie van zonnestraling door (stenige) materialen, het gebrek aan verdamping en de uitstoot van warmte ten gevolge van menselijke activiteiten ('antropogene warmte'). De uitstoot van warmte door industrie, huishoudens, gebouwen, verkeer, mensen en dieren levert een niet te verwaarlozen bijdrage levert aan het ontstaan van het UHI: in Rotterdam ca. 10%. Overdag zijn de temperatuurverschillen tussen stad en platteland gering ( $< 2^{\circ}\text{C}$ ). De verschillen zijn vooral na zonsondergang groot doordat het in de stad langzamer afkoelt dan in het omringende buitengebied. De maximum UHI intensiteiten van Nederlandse steden lopen uiteen van 3 tot meer dan  $7^{\circ}\text{C}$ . Hittestress kan dan ook een belangrijk 'issue' worden indien de mondiale opwarming in de komende decennia doorzet.

Binnen een stedelijk gebied bestaat er een grote ruimtelijke variatie in het UHI. Eigenschappen van de directe omgeving blijken hierop van grote invloed. De meest bepalende factoren zijn de fractie bebouwd oppervlak, verhard oppervlak en de fractie groenoppervlak. Daarnaast heeft de gemiddelde gebouwhoogte een duidelijke invloed. Ook de verhouding tussen gebouwhoogte en straatbreedte beïnvloedt de absorptie van zonnestraling, thermische uitstraling van gebouwen en andere oppervlakken naar de atmosfeer, en het transport van warmte binnen de straat. De optimale verhouding tussen hoogte en breedte lijkt rond de 1 te liggen. Hogere of lager ratio's hebben beide voor en nadelen wat betreft ventilatie en schaduwwerking.

Het uiteindelijke effect van open water op de temperatuur is niet eenduidig en hangt sterk af van de dimensionering (oppervlakte, diepte), de ligging ten opzichte van de windrichting en de ligging ten opzichte van gebouwen en andere structuren in de omgeving.

Het thermisch comfort van de mens varieert nog meer dan de omgevingstemperatuur en is ook afhankelijk van straling, luchtvochtigheid en windsnelheid. Overdag wordt het thermisch comfort in de stad vooral bepaald door de verschillen in windsnelheid; de verschillen in luchtvochtigheid en straling zijn te gering om een merkbaar effect te hebben. Na zonsondergang speelt de temperatuur een meer prominente rol en wordt het thermisch comfort voor een belangrijk deel bepaald door factoren die een invloed hebben op de luchttemperatuur.

Verder zullen door de verandering van het klimaat in de toekomst vaker langdurige, warme en droge periodes overbrugd moeten worden. Kennis over de waterbalans van de stad is essentieel om stedelijk gebied zó in te richten dat koeling door verdamping gewaarborgd blijft met een zo klein mogelijk waterverbruik. Verdamping is echter een grote onbekende. Binnen CPC zijn eerste schattingen gedaan van de verdamping in Rotterdam en Arnhem.



## 1.1 Inleiding

Aansluitend bij de stap 'Weten' van de 'Handreiking Ruimtelijke Adaptatie'<sup>5</sup> is kennis over de werking van het stedelijk klimaat en de interactie van de stad met het regionale klimaat van belang. De gemiddelde hoeveelheid neerslag in een stedelijke gebied verschilt niet van die in de omringende buitengebied<sup>6</sup>. Dit geldt echter niet voor de temperatuur. In de stad is het bijna altijd warmer dan in het omringende buitengebied, wat het 'Urban Heat Island' (UHI) wordt genoemd (zie het tekstkader 'Het stedelijk hitte-eilandeffect'). Dit betekent dat voor steden de kans op extreem hoge temperaturen groter is dan voor de rest van Nederland. Dit hoofdstuk gaat daarom vooral in op de gevolgen van klimaatverandering op hitte en droogte in de stad. Kennis over de wijze waarop steden zelf het stadsklimaat beïnvloeden, levert inzichten voor de keuze van maatregelen tegen extreme hitte.

### *Het stedelijk klimaat en klimaatverandering*

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

Het onderzoek naar het stadsklimaat in Nederlandse steden heeft hierna bijna 30 jaar stil gelegen. De draad is uiteindelijk weer opgepakt in 2009. In de zomer van dat jaar zijn oriënterende metingen in Rotterdam<sup>7</sup> en Arnhem<sup>8</sup> uitgevoerd met mobiele meetplatforms (meteorologische meetinstrumenten gemonteerd op een bakfiets). Ook de resultaten van deze metingen laten een aanzienlijk hitte-eiland effect zien. Na zonsondergang kunnen de temperatuurverschillen tussen dichtbebouwde gebieden en het buitengebied snel oplopen tot meer dan 7 °C, voornamelijk op heldere en windstille zomerse dagen. Overdag zijn de gemeten temperatuurverschillen geringer, met maxima tot 2 °C (Van Hove et al., 2010; Van Hove et al., 2011c; Heusinkveld et al., 2010, 2014). Sindsdien zijn deze gegevens bevestigd door de uitkomsten van het vast monitoring netwerk van CPC in de regio Rotterdam (Van Hove et al., 2011a,b). Een gedetailleerde uitwerking van de meetgegevens volgt onder paragraaf 1.5.

Voor het verkrijgen van een landelijk beeld zijn oppervlaktetemperaturen van satellietbeelden uit de hittegolfperiode in 2006 geanalyseerd (Klok et al., 2012). Uit deze beelden blijkt dat elke stad in Nederland, groot of klein, te maken heeft met een hitte-eiland effect (**Figuur 1.3**). Opgemerkt dient te worden dat het hier het *oppervlakte*-UHI betreft dat vooral overdag aanwezig is. In discussies over het stadsklimaat gaat het bijna altijd over het *atmosferische* UHI van de 'Urban Canopy Layer' vanwege het effect op het leefklimaat (zie ook het tekstkader 'Stedelijk hitte-eiland effect'). Het atmosferische UHI is het verschil in *lucht*temperatuur tussen de stad en het nabijgelegen platteland. In tegenstelling tot de oppervlakte-UHI is het atmosferische UHI overdag gering; een maximum intensiteit ( $UHI_{max}$ ) wordt bereikt na zonsondergang doordat de stad langzamer afkoelt dan het nabijgelegen platteland.

<sup>5</sup> <http://www.ruimtelijkeadaptatie.nl/>

<sup>6</sup> Opvallend is dat in de buurt van grote stedelijke agglomeraties zoals de Rotterdam agglomeratie, meer neerslag valt dan gemiddeld (zie De Bosatlas voor het Klimaat; [www.klimaatatlas.nl](http://www.klimaatatlas.nl)). Mogelijke oorzaken zijn: stuwing van de wind door de bebouwing, de extra opwarming en de aanwezigheid van meer condensatiekernen (fijne deeltjes waar waterdruppeltjes zich op afzetten). Deze factoren zijn bevorderlijk voor wolkenvorming en het ontstaan van neerslag aan de lizijde van steden.

<sup>7</sup> Dit onderzoek vond plaats in het kader van de eerste tranche van KvK (Hittestress in Rotterdam project)

<sup>8</sup> In het kader van het EU Future Cities project



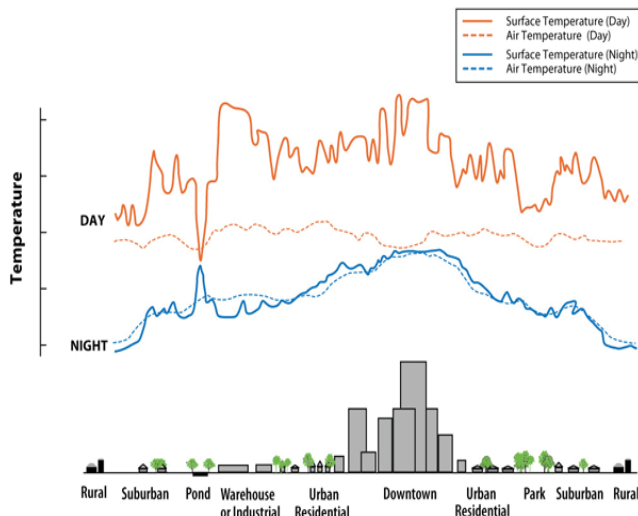
## Het stedelijk hitte-eilandeffect (UHI)

Steden zijn over het algemeen warmer dan het buitengebied. Door de dichte bebouwing en de eigenschappen van het stedelijk materiaal wordt warmte beter vastgehouden in steden en treedt het zogenaamde hitte-eilandeffect op (**Figuur 1.1**). Men kan 3 typen van het stedelijk hitte-eilandeffect (Urban Heat Island (UHI)) onderscheiden:

- Het oppervlakte UHI, het verschil in oppervlaktetemperatuur tussen stad en omringende platteland).
- Het atmosferische UHI, het verschil in luchttemperatuur tussen stad en omringende platteland. Het atmosferische UHI kan worden onderverdeeld in:
  - UHI van de atmosferisch grenslaag boven de stad ('Urban Boundary Layer UHI') waarvan de intensiteit afhangt van de geografische ligging van de stad, algemene configuratie en morfologie .
  - UHI op leefniveau ('Urban Canopy Layer UHI'), waar de aanwezigheid van gebouwen, straatoppervlak, bomen en water een direct, merkbaar effect heeft op het klimaat op leefniveau (microklimaat). In discussies over het stadsklimaat gaat het vooral om dit hitte-eiland effect.

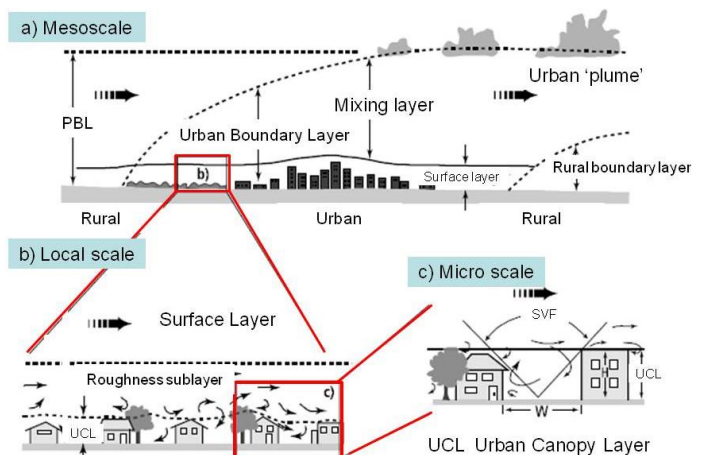
Het oppervlakte UHI is zowel overdag als na zonsondergang aanwezig. Een maximum wordt overdag bereikt wanneer de oppervlakken de zonnestraling absorberen. Na zonsondergang zijn de verschillen kleiner maar kunnen toch nog aanzienlijk zijn. Daarentegen is het atmosferische UHI overdag gering of afwezig. Een maximum wordt na zonsondergang bereikt doordat het platteland sneller afkoelt dan de stad. In de discussies over het stadsklimaat gaat het vooral om het atmosferische UHI van de Urban Canopy Layer, vanwege het effect op het leefklimaat.

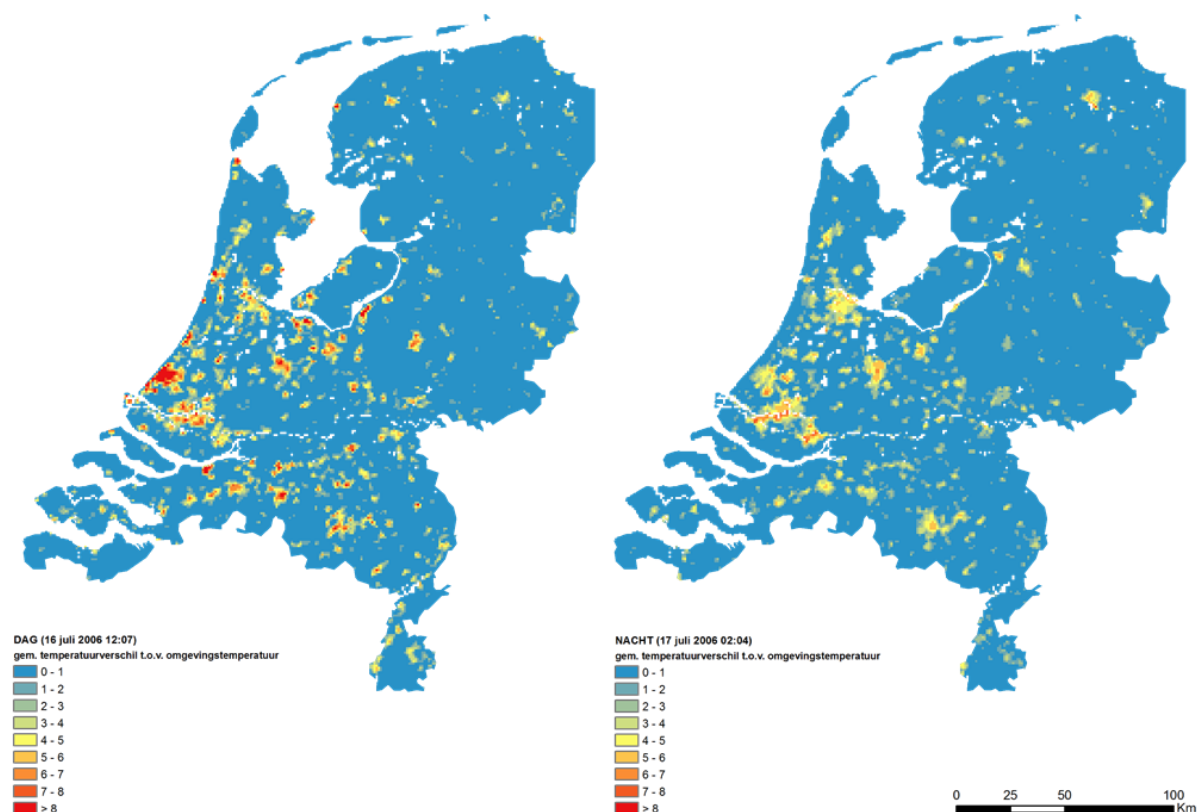
Het lokale klimaat en microklimaat worden beïnvloed door processen die zich op de stadsniveau (de mesoschaal) afspelen en andersom (**Figuur 1.2**). Zo heeft de ruimtelijke inrichting van een stedelijk gebied een effect op lokale windpatronen en hebben de gebruikte materialen van gebouwen in een wijk (bijvoorbeeld het gebruik van materialen met een hoge zonnereflectie) niet alleen een direct effect op het binnenklimaat, maar ook op het klimaat in een gebied rondom die gebouwen. Voor het ontwikkelen van effectieve adaptatiestrategieën en –maatregelen dient men dus rekening te houden met alle schaalniveaus. Vandaar dat in het kader van het CPC programma meteorologische processen op alle schaalniveaus zijn onderzocht.



*Figuur 1.1 Het stedelijk hitte-eiland effect: verschil in lucht- en oppervlaktetemperatuur tussen stad en buitengebied overdag en 's nachts. Bron: <http://www.epa.gov/heatisland/about/ind ex.htm> (laatst geraadpleegd: juli 2014).*

*Figuur 1.2 De horizontale stadsschalen en daaraan gerelateerde verticale atmosferische schalen. De dikke pijlen geven de gemiddelde windrichting aan, de dunne pijlen de turbulente luchtbewegingen. We onderscheiden drie horizontale schalen en daaraan gerelateerde verticale atmosferische schalen: 1. Mesoschaal (stad- en omgeving) en de 'Urban Boundary Layer', 2. Lokale schaal (stadwijk) en 'Urban Boundary Layer'/'Urban Canopy Layer', en 3. Microschaal (straat, huizenblok) en 'Urban Canopy Layer'. PBL-planetary boundary layer, (Bron: Oke, 1976).*



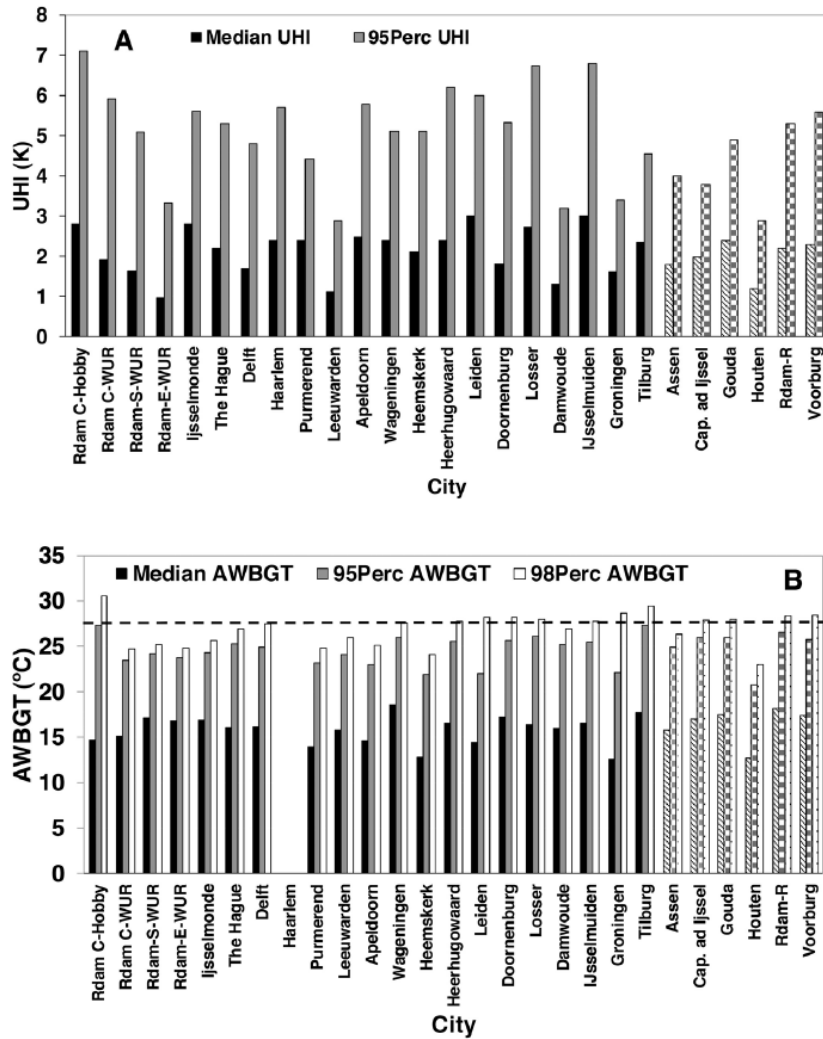


Figuur 1.3. Het oppervlakte hitte-eiland effect van de Nederlandse steden voor de situatie overdag (links) en 's nachts (rechts). De kaarten zijn gebaseerd op twee NOAA-AVHRR satellietbeelden van de oppervlaktetemperatuur opgenomen tijdens de hittegolfperiode van 2006 (bron: Klok et al., 2012).

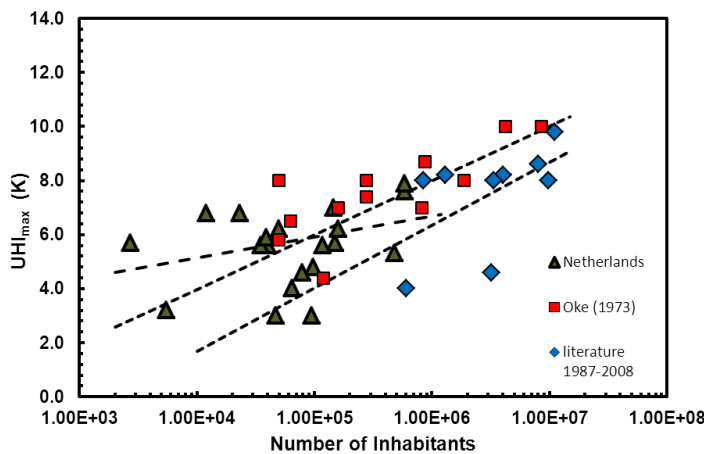
Uit gegevensbestanden van weeramateurs blijkt dat de  $UHI_{max}$ -waarden van Nederlandse steden uiteenlopen van 3 tot meer dan 7 °C (Steenefeld et al., 2011; Wolters en Brandsma, 2012) (Figuur 1.4). Deze waarden zijn vergelijkbaar met UHI waarden die voor andere Europese steden zijn bepaald. Oke (1973) vond een lineaire relatie tussen de  $UHI_{max}$  en het inwoneraantal<sup>9</sup> van een stad. Deze relatie vinden we niet voor Nederlandse steden (Figuur 1.5); ook in kleinere steden en dorpen kan het UHI aanzienlijk zijn. Hieruit blijkt dat lokale eigenschappen sterk bepalend zijn voor de UHI intensiteit.

Figuur 1.4 toont ook het effect op gevoelstemperatuur of thermisch comfort. De berekende 95 percentielwaarden voor thermisch comfort (op basis van de 'Approximated Wet Bulb Globe Temperature' (AWBGT), zie Bijlage C) in dichtbebouwde stedelijke gebieden in Nederland bevinden zich nu nog net onder de drempelwaarde voor hittestress. Dit betekent dat thermisch discomfort en hittestress een belangrijk issue kunnen worden indien de mondiale opwarming in de komende decennia doorzet.

<sup>9</sup> Hij gebruikte de logaritmische waarde van het inwoneraantal



Figuur 1.4. Mediaan en percentielwaarden voor  $UHI_{max}$  en thermisch comfort in Nederlandse steden op basis van AWBGT. De stippellijn is de grenswaarde voor thermisch discomfort. Dakstations zijn gearceerd (bron: Steeneveld et al., 2011).



Figuur 1.5.  $UHI_{max}$  (95 percentielwaarden, in graden Kelvin) voor steden versus het inwoneraantal van steden (logaritmische schaal) voor Europese steden en Nederlandse steden. Stippellijnen zijn lineaire regressielijnen berekend voor de resultaten van Oke (1973), resultaten gepubliceerd in de periode 1987-2006 en voor Nederlandse steden (bron: Van Hove et al. 2011c).





### *Thermisch comfort en andere meteovariabelen*

Het thermisch comfort is niet alleen afhankelijk van de luchttemperatuur, maar ook van andere meteorologische variabelen zoals, luchtvochtigheid, straling en windsnelheid. Met het meetnetwerk zijn ook deze parameters geanalyseerd.

De luchtvochtigheid in de stad is lager dan die van het platteland wat in principe gunstig is voor het thermisch comfort tijdens warme zomerdagen. Echter, de verschillen zijn gering; minder dan 5% voor de *absolute* luchtvochtigheid<sup>10</sup> en 9-15% voor de *relatieve* luchtvochtigheid.

De verschillen in absolute vochtigheid zijn met name overdag aanwezig; door verdamping van de vegetatie bevat de lucht boven het platteland meer waterdamp, terwijl de hoeveelheid waterdamp in de stadslucht min of meer constant blijft. Daarentegen zijn de verschillen in relatieve luchtvochtigheid zowel overdag als 's nachts aanwezig. Overdag is de lagere relatieve luchtvochtigheid in de stad vooral het gevolg van geringere verdamping en gedurende de nacht van de hogere temperatuur.

Ook de gemiddelde globale straling (d.i. de hoeveelheid zonnestraling per oppervlakte-eenheid) in de stad is lager (12 – 24%) in vergelijking met de referentielocatie. Dit is voornamelijk een gevolg van schaduwwerking door gebouwen en andere objecten (bijvoorbeeld bomen) in de buurt van de meetstations. Tijdens zomerse dagen is een lagere hoeveelheid directe straling van de zon gunstig voor het thermisch comfort. Dit geldt overigens ook voor de diffuse straling maar deze is niet apart gemeten.

De gemiddelde gemeten windsnelheid in de stad is aanzienlijk lager (40-65%) dan in het rurale gebied. Vooral tijdens zomerse dagen is het ontbreken van luchtstroming ongunstig voor het thermisch comfort. Dit geldt ook voor de luchtkwaliteit. Beide hebben een ongunstig effect op de gezondheid van mens en dier.

### *Klimaatverandering en het toekomstig stedelijk klimaat*

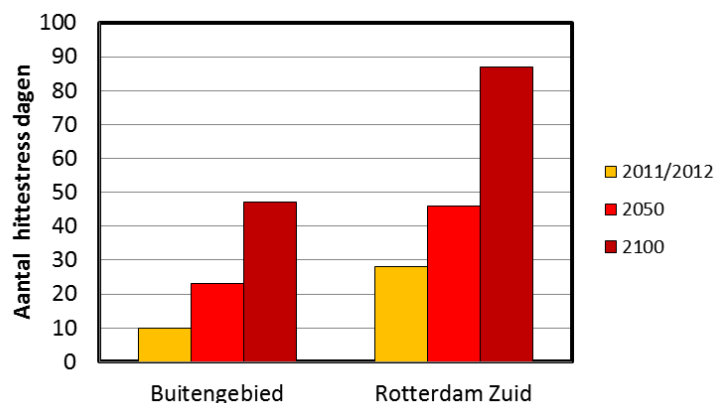
Om een indicatie te krijgen van de urgentie van het hitteprobleem, zijn de temperatuurreksen van het weerstation 'Zuid'<sup>11</sup> in Rotterdam en de referentielocatie getransformeerd naar temperatuurreksen voor 2050 en 2100<sup>12</sup>. Dit gebeurde voor het 'W+'-KNMI'06 klimaatscenario, dat met het oog op de hitteproblematiek als een realistisch "worst case" scenario beschouwd kan worden. Onder dit scenario kunnen we zowel in het buitengebied als in de stad een aanzienlijke toename van het aantal dagen met verminderd thermisch comfort verwachten (**Figuur 1.6**). We benadrukken dat dit een eerste grof resultaat is, waarbij alleen is gekeken naar de verandering in temperatuur. Voor een complete analyse dienen ook variabelen zoals hierboven beschreven te worden meegenomen.

---

<sup>10</sup> De absolute luchtvochtigheid is de hoeveelheid waterdamp per volume lucht. De relatieve luchtvochtigheid is de hoeveelheid waterdamp in de lucht ten opzichte van de maximale hoeveelheid waterdamp die de lucht kan bevatten. I.t.t. de absolute luchtvochtigheid is de relatieve luchtvochtigheid afhankelijk van de luchttemperatuur; lucht met een hogere temperatuur kan meer waterdamp bevatten. We weten nog niet precies of de absolute luchtvochtigheid of de relatieve luchtvochtigheid de bepalende factor is voor thermisch comfort. Beide grootheden komen in de thermische indices voor.

<sup>11</sup> Nabij Zuidplein

<sup>12</sup> [www.knmi.nl](http://www.knmi.nl)



Figuur 1.6. Het aantal dagen met matige tot sterke hittestress (Effectieve Temperatuur, zie **Bijlage C**) voor de locaties buitengebied en 'Rotterdam Zuid', berekend voor de huidige situatie en halverwege en aan het eind van deze eeuw onder het W+ KNMI'06 scenario.

## 1.2 De interactie tussen stad en platteland

Het is bekend dat de stad een invloed heeft op het klimaat van het omringende buitengebied. Andersom zou het landgebruik in het buitengebied een invloed op het klimaat in de stad kunnen hebben. Echter, onduidelijk is hoe groot de reikwijdten ('footprints') van beide effecten zijn. Om hierin meer inzicht te krijgen zijn door CPC vliegtuigmetingen uitgevoerd en is gebruik gemaakt van modelsimulaties.

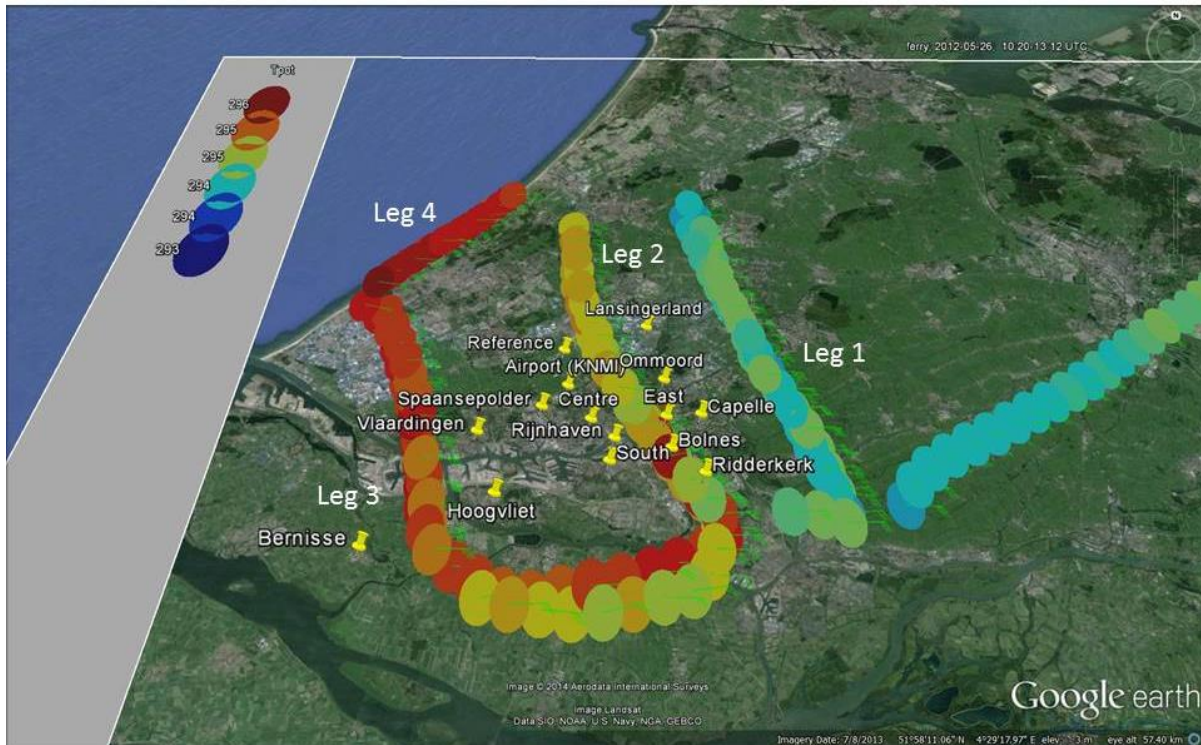
Een zestal vluchten zijn boven Rotterdam en omgeving uitgevoerd waarbij de luchttemperatuur, oppervlaktetemperatuur, luchtvochtigheid en CO<sub>2</sub> concentratie zijn gemeten. De metingen geven inzicht niet alleen inzicht in de horizontale reikwijdte ('footprint') van het UHI effect, maar ook van de verticale reikwijdte. De metingen hebben overdag<sup>13</sup> plaatsgevonden, doorgaans op een hoogte van ongeveer 300m. Daarnaast zijn er verticale profielen (300 - 1700m hoogte) gemeten om de opbouw van de atmosferische grenslaag te karakteriseren (**Figuur 1.7**).

Het UHI effect op 300 m hoogte is gering en moeilijk te onderscheiden van de dagelijkse gang van de gemeten variabelen. Op warme dagen is de lucht op 300m boven de stad ongeveer 1 °C warmer. Even grote verschillen worden overdag ook voor de luchttemperatuur tussen de meetstations in Rotterdam en het referentiestation (ten noorden van Rotterdam) gevonden.

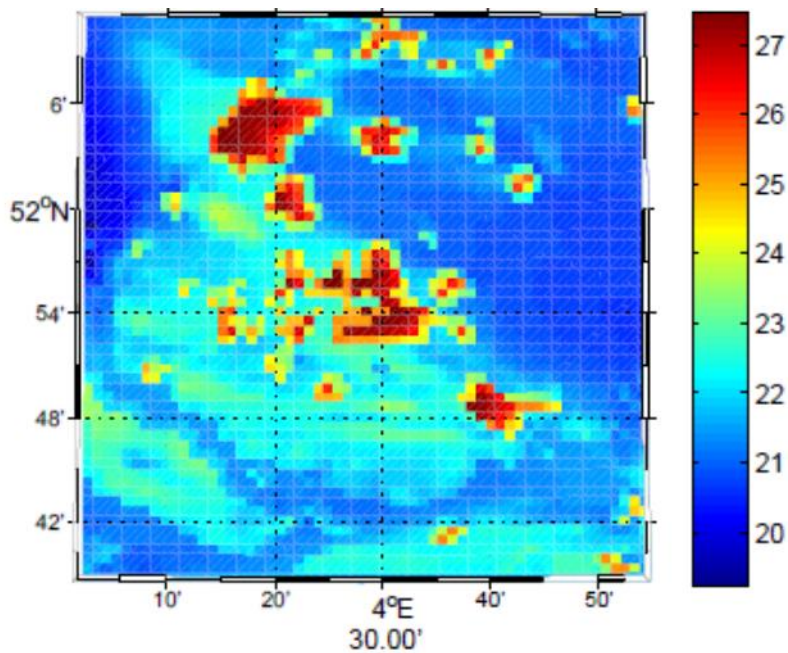
De luchttemperaturen benedenwinds (leg 2-4) zijn hoger (0.2 – 1.0 graden) dan de luchttemperaturen bovenwinds (leg 1). Opvallend zijn ook de hogere luchttemperaturen boven het kassengebied en boven de kustlijn (leg 4). Daarentegen laten de oppervlaktetemperaturen grote contrasten zien, bijvoorbeeld tussen oppervlaktetemperatuur voor water en voor bebouwde oppervlakte (asfalt op wegen of daken). Het verschil kan oplopen tot wel 40°C. De gemeten uitwaaiing van de stedelijke warmte benedenwinds van de stedelijke gebieden wordt ook in modelsimulaties teruggevonden, het zogenaamde 'urban plume'-effect (**Figuur 1.8**) (zie ook Theeuwes et al., 2013).

Het lijkt er dan ook op dat de verticale footprint van de stad beperkt is (zo'n 300 m), maar dat de horizontale footprint tot 10-tallen kilometers ver reikt in het rurale gebied benedenwinds van bebouwde gebieden. Vermeldenswaard is ook dat uit de metingen blijkt dat de lucht boven de stad gemiddeld 4 ppm rijker is aan CO<sub>2</sub> dan de lucht boven de omgeving, met een grote piekwaarde boven het Botlek gebied (ca. 8 ppm verschil).

<sup>13</sup> Er was alleen toestemming om overdag te vliegen



Figuur 1.7 Trajecten en meetresultaten van Lagrangiaanse vluchten boven de zuidelijke Randstad op 300 m hoogte op 26 mei 2012 tussen 10:20 en 13:12 UTC (oosten wind 25-35 kn, helder  $Q_n \sim 600 \text{ W m}^{-2}$ ,  $T_{\text{max}} 26 \text{ }^\circ\text{C}$ ). De grenslaaghoogte (voor uitleg zie **Figuur 1.2**) was ongeveer 1200m op dat tijdstip. Leg 1 is bovenwinds van het stedelijk gebied, leg 2 volgt een traject dwars over de stad (of tussen de stedelijke gebieden door), leg 3 benedenwinds. Tevens zijn metingen langs de kust uitgevoerd (leg 4). De kleur van het traject correspondeert met de gemeten oppervlaktetemperatuur.



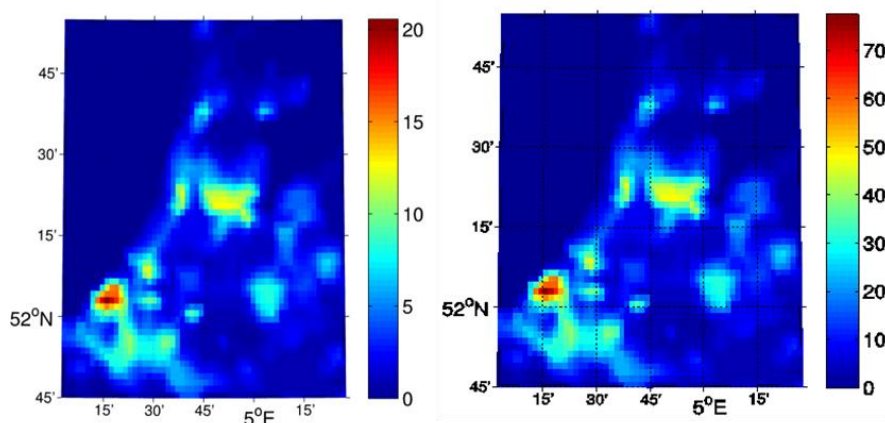
Figuur 1.8 Modelsimulatie van de temperatuurverdeling in de zuidwestelijke Randstad om UT 20:00 (22u00 LT). Temperaturen zijn in  $^\circ\text{C}$  (bron: Ronda et al., 2010).



### 1.3 De invloed van antropogene warmteproductie

Binnen CPC is veel tijd besteed om de representatie van het stedelijk gebied in het meso-schaalmodel WRF ('Weather and Research Forecasting') te verbeteren, onder andere ten aanzien van antropogene warmtebronnen (Ronda et al., 2012). Belangrijke antropogene warmtebronnen zijn bijvoorbeeld: de industrie, individuele huishoudens, gebouwen, het verkeer en mensen en dieren. Tot voor kort waren weinig gegevens beschikbaar over enerzijds, de grootte van de antropogene warmtebronnen op stad- en wijkniveau in Nederlandse steden en anderzijds, de locaties van deze bronnen (Klok et al., 2010). Vandaar dat deze emissies doorgaans niet worden meegenomen in berekeningen van het UHI effect (of alleen op relatief eenvoudige wijze) door mesoschaal-modellen.

Met behulp van het LUCY-model (Large scale Urban Consumption of energy; Lindberg en Grimmond, 2013) is eerst gekeken naar de ruimtelijke variatie in antropogene emissies van de Randstad. Dit gebeurde voor een resolutie van 5 x 5 km. Voor een warme dag in Nederland blijken de lokale verschillen in geëmitteerde antropogene warmte vrij groot te zijn (**Figuur 1.9**): in de stedelijke gebieden rond Den Haag en Rotterdam loopt de emissie van antropogene warmte op tot een waarde van ongeveer  $20 \text{ W m}^{-2}$  gedurende de nacht en van ongeveer  $70 \text{ W m}^{-2}$  gedurende de dag, terwijl in het buitengebied de emissie van warmte veel lager is. Deze ruimtelijke verschillen in antropogene emissies verkregen met het LUCY model zijn vervolgens geïmplementeerd in het WRF model (Ronda et al., 2012).



Figuur 1.9 Antropogene emissies van warmte (in  $\text{W m}^{-2}$ ) voor de Randstad voor 2 uur 's nachts lokale tijd (links) en 12 uur 's middags lokale tijd (rechts) zoals geschat met behulp van versie 3.1 van het LUCY model (Lindberg en Grimmond, 2013).

De belangrijkste conclusies zijn;

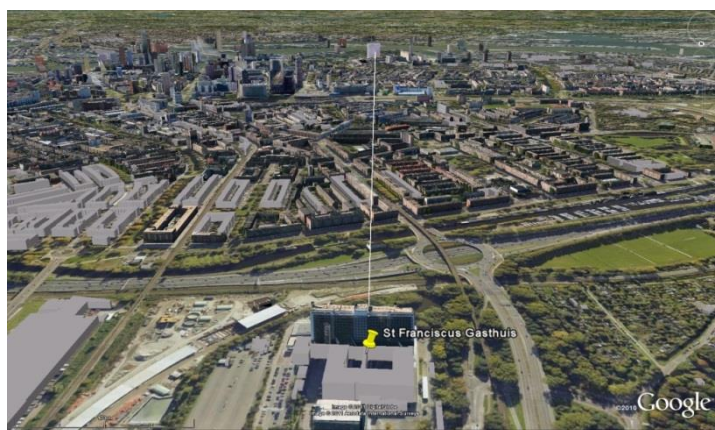
1. in Nederland zijn antropogene emissies van warmte een belangrijke parameter die het UHI effect in Nederlandse steden bepalen. Het inbouwen van antropogene emissies van warmte uit LUCY leidt tot gesimuleerde temperaturen die (lokaal) tot  $0.6 \text{ }^\circ\text{C}$  hoger of tot  $0.3 \text{ }^\circ\text{C}$  lager zijn dan de temperaturen die zijn berekend zonder dat er rekening is gehouden met antropogene emissies van warmte. Deze simulaties suggereren dat antropogene emissies in de Randstad lokaal verantwoordelijk zijn voor 10% extra UHI effect;
2. de ruimtelijk variaties in antropogene emissies hebben een niet te verwaarlozen effect op het lokale klimaat op stad- en wijkniveau in Nederland. Indien in het model er geen rekening wordt gehouden met temporele en ruimtelijke variaties in antropogene emissies wordt de temperatuur lokaal tot ca  $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$  onderschat of tot  $0.6 \text{ }^\circ\text{C}$  overschat. Traditioneel wordt deze ruimtelijke variatie niet meegenomen in mesoschaalmodellen voor de atmosfeer. Dit betekent dat weersverwachtingen gebaseerd op deze modellen voor sommige gebieden een overschatting van de temperatuur berekenen, terwijl voor andere gebieden de temperatuur wordt onderschat.



## 1.4 Verdamping in de stad

Onder invloed van klimaatverandering zullen in de toekomst vaker lange warme en mogelijk droge periodes overbrugd moeten worden. Er zal meer behoefte zijn aan koeling van stedelijk gebied. Tegelijkertijd is het streven om zuinig met water om te gaan, juist in dergelijke periodes, om verdroging van natuurgebieden en daling van grondwaterstanden in stedelijk gebied te voorkomen. Verdamping staat centraal in dit probleem: verdamping kan helpen hitte in de stad te matigen, maar daarvoor is per definitie water nodig.

Over verdamping van water in de stad is relatief weinig bekend. Gegevens over verdamping kunnen helpen bij de invulling van het stedelijk waterbeheer. Een goede schatting van de verdamping tijdens warme, droge periodes kan helpen bij de verdeling van het beschikbare water over verschillende gebruiksbehoeftes (zoals groenbeheer, drinkwater), in relatie tot verschillende beleidsdoelen (zoals koeling van stedelijk gebied en voorkómen van paalrot en zoutindringing) (Brolsma et al., 2012). Inzicht in de werking van verdamping in de stad kan helpen om stedelijk gebied zó in te richten dat koeling door verdamping gewaarborgd is met een zo klein mogelijk waterverbruik. Zo kan bijvoorbeeld de waterbehoefte van vegetatie voor overleven en het in stand houden van verkoelend vermogen beter geschat worden.



*Figuur 1.10 Links: Scintillometerpad tussen het Sint Franciscus Gasthuis (Lat/Lon 51.56478/4.27747, hoogte 51 m) en het Erasmus MC (Lat/Lon 51.54632/4.28128, hoogte 77 m) in Rotterdam. De afstand tussen zender en ontvanger is 3451 m, oriëntatie  $\sim 180^\circ$ . Rechts: opstelling voor verdampingsmetingen boven op een appartementencomplex aan de Ingenieur J.P. van Muijlwijkstraat in Arnhem (51°59'4.97"N, 5°55'5.73"E) <http://www.climatexchange.nl/sites/arnhem/index.htm>. Het meetsysteem bestaat uit 3D ultrasonische anemometer (Gill R3-50) in combinatie met een snelle open-pad infrarood gas analyzer (Li-Cor LI-7500) bevestigd aan de top van een 4 m hoge mast.*

In CPC zijn eerste schattingen van de verdamping in Arnhem en Rotterdam gemaakt (Jacobs et al., 2014). Voor Arnhem zijn hiervoor de resultaten gebruikt van eddy-covariantiemetingen die sinds het voorjaar van 2012 worden uitgevoerd (**Figuur 1.10 rechts**). Voor Rotterdam zijn de 'Large Aperture Scintillometer'-gegevens gebruikt waaruit indirect de verdamping kan worden berekend<sup>14</sup> (**Figuur 1.10 links; Bijlage D**). Bovendien zijn de resultaten van de sapstroommetingen geanalyseerd (Slingerland, 2012), waarmee ook een indicatie gekregen kan worden van het effect van de verdamping door bomen op de waterbalans van de stad.

<sup>14</sup>Recent is door WUR-MAQ in het kader van een STW project een zogenoemde 'microwave' scintillometer ontwikkeld (Hartogensis et al, 2012). Hiermee kan, samen met een optische scintillometer, zowel de gebiedsgemiddelde voelbare warmteflux als de verdamping worden bepaald. Deze ontwikkeling biedt nieuwe mogelijkheden (i.e. routinematige stadsgemiddelde verdampingsschattingen) voor het waterbeheer in de stad.



De resultaten van de scintillometer-metingen in Rotterdam laten een patroon zien waar de grote pieken in verdamping samengaan met relatief zonnige dagen (**Figuur 1.11 boven**). Ongeveer 21% van de gemiddelde neerslag in de zomermaanden in Rotterdam (3.2 mm per dag<sup>15</sup>) wordt weer verdampt (0,67 mm). Deze verdamping komt overeen met een koelsnelheid van  $20 \text{ W m}^{-2}$  (ca. 11% van de inkomende zonnestraling) (**Tabel 1.1**).

In Arnhem is de verdamping sterk gecorreleerd met neerslag (**Figuur 1.11 beneden**). Ongeveer 60% van de gemiddelde neerslag per dag (=24 uur) in de periode april tot en met september (1.44 mm) wordt gebruikt voor verdamping (0.86mm). Dit komt overeen met een koelsnelheid (E) van  $25 \text{ Wm}^{-2}$  per dag; dit is ca. 14% van de gemiddelde dagelijks inkomende zonnestraling in die periode in Arnhem (ca.  $180 \text{ W m}^{-2}$ ).

De samenhang met de neerslag tijdens de zomermaanden is volgens deze metingen in Arnhem duidelijk sterker dan in Rotterdam (**Figuur 1.11**). De verdamping in Arnhem neemt na neerslag ook veel minder snel af. Jacobs et al. (2014) dragen als mogelijke verklaring voor dit verschil aan dat de platte daken rond de meettoeren in Arnhem het water beter en langer vasthouden dan in Rotterdam. Dit zou betekenen dat bouwstijlen of andere maatregelen die helpen om regenwater beter en langer vast te houden de koeling aan het begin van warme, droge periodes bevorderen.

Sapstroommetingen zijn een heel ander type metingen dan de voorgaande metingen. Desondanks vinden we vergelijkbare verdampingssnelheden: 0.72 en 0.98mm per dag, overeenkomend met een koelsnelheid van 21 en  $28 \text{ W m}^{-2}$ . Berekeningen laten zien dat de gemiddelde koelsnelheid per boom varieert van 1.1 kW tot 2.2 kW. Op sommige heldere dagen loopt het uurgemiddelde maximum waterverbruik op tot 12 à 16 liter, wat overeenkomt met uurgemiddelde koelsnelheid van 8.2-10.9 kW per boom.

De waterconsumptie gemiddeld over de 5 onderzochte bomen bedraagt 50 liter per dag (april – september). Rekening houdend met de kroon diameter, berekenen we hieruit een gemiddeld waterverbruik van 0.64 mm per dag. Extrapolatie van dit resultaat naar alle bomen (600.000) in het kerngebied van Rotterdam ( $319 \text{ km}^2$ ) levert een totale verdamping van < 4% van de neerslag in deze periode (386mm). Alhoewel het hier eerste ruwe schattingen betreft, laten deze zien dat de waterconsumptie van het huidige aantal bomen slechts een gering effect heeft op de waterbalans van de stad. Maar plaatselijk kan dit anders zijn, zeker op dagen dat de waterconsumptie van de bomen maximaal is (ca. 170 l per dag).

Omdat metingen aan verdamping in de stad lastig routinematig zijn uit te voeren probeert men deze wel eens af te leiden uit de zogenoemde referentieverdamping. Dat is de verdamping van 'een goed van water voorzien, gezond en actief groeiend grasland' die vervolgens gecorrigeerd wordt voor de eigenschappen van het stadsoppervlak. Dit blijkt echter niet te kunnen: de verdamping in een stad reageert anders op het weer dan die van een grasland. In de stad nam op droge dagen de verdamping af, terwijl de verdamping van grasland of bos toenam (Jacobs et al., 2014).

De verdamping in een stad is veel geringer dan in het landelijke gebied. Ten gevolge daarvan wordt een groot deel van de inkomende zonne-energie omgezet in voelbare warmte. Om het UHI effect te beperken, zou de verdamping opgevoerd moeten worden. Vergroening en meer blauw in de stad dragen hieraan bij. Ook kan de vochtvoorziening van stedelijk groen tijdens droge perioden worden verbeterd, waardoor de verdamping redelijk op peil blijft.

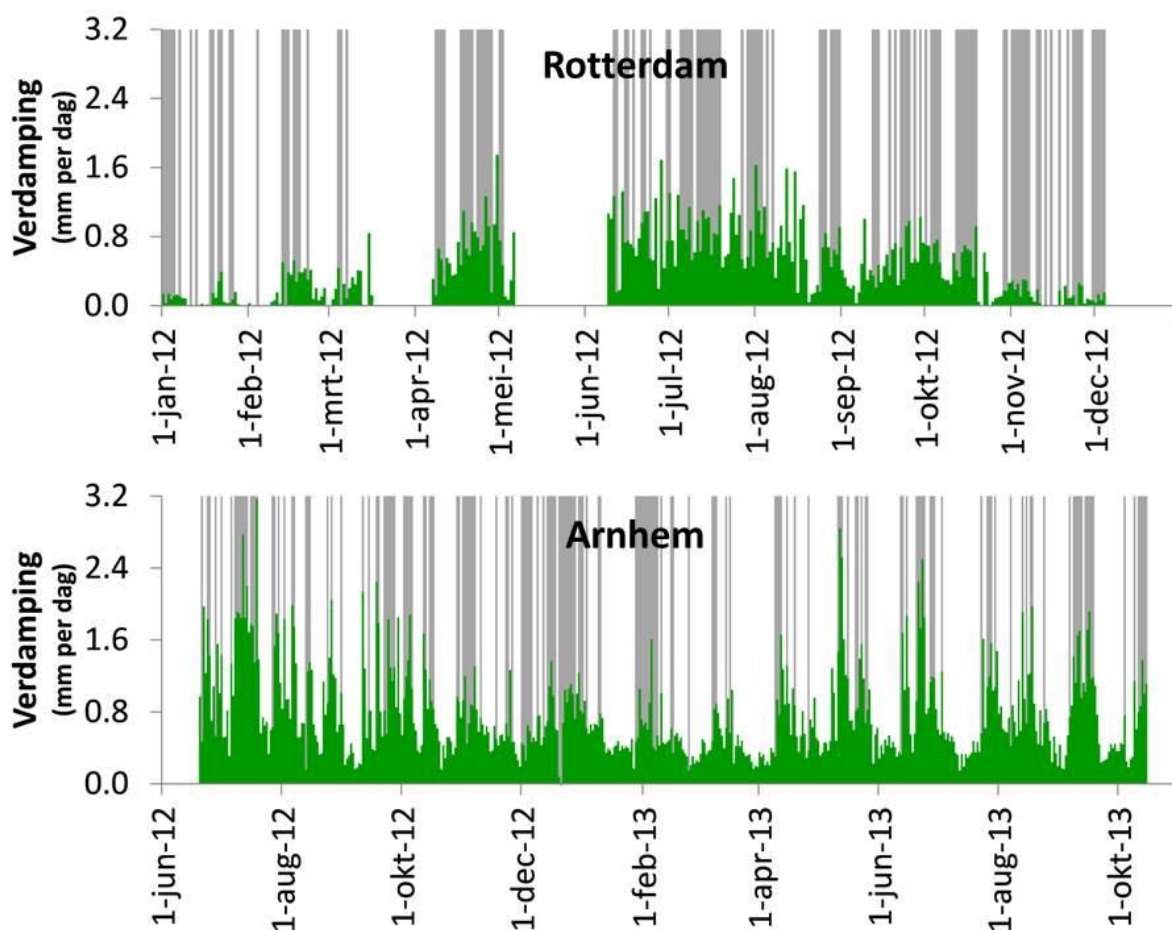
<sup>15</sup> Het betrof hier wel een extreem natte zomer in Rotterdam.



Tabel 1.1 Vergelijking van de daggemiddelde verdamping in Arnhem (Eddy-covariantiemetingen) en in Rotterdam (LAS), en verdamping berekend op basis van sapstroommetingen aan bomen in Rotterdam.  $S_{in}$  kortgolvlige inkomende straling;  $L_{in}$  langgolvlige inkomende straling;  $All_{in}$  som kortgolvlige en langgolvlige inkomende straling;  $E$  evaporatie (bron: Jacobs et al., 2014).

	$S_{in}$ ( $W m^{-2}$ )	$L_{in}$ ( $W m^{-2}$ )	$All_{in}$ ( $W m^{-2}$ )	Verdamping ( $mm dag^{-1}$ )	$E$ ( $W m^{-2}$ )	$E/S_{in}$ (%)	$E/All_{in}$ (%)
Arnhem EC	183	352	535	0.86	25	14	5
Rotterdam LAS	188	354	542	0.68	20	11	4
Sapstroom parkomgeving	190	364	554	0.72	21	11	4
Sapflow straatomgeving	190	364	554	0.98	28	15	5

- Alle stralingsfluxen zijn eigen metingen, op het dak in Arnhem of van het Referentiestation uit het monitoring netwerk van Rotterdam.
- Periode Arnhem EC: juni-september 2012 en april-september 2013
- Periode Rotterdam LAS: april-september 2012
- Sapflowmetingen: juni-september 2012



Figuur 1.11 Gemeten dagelijkse verdamping (groene voorgrond, mm per dag) in Rotterdam in het jaar 2012 (boven) en in Arnhem in de periode juni 2012 – oktober 2013 (beneden). De grijze balken op de achtergrond geven dagen aan waarop meer dan 1 mm neerslag viel (bron: Jacobs et al., 2014).

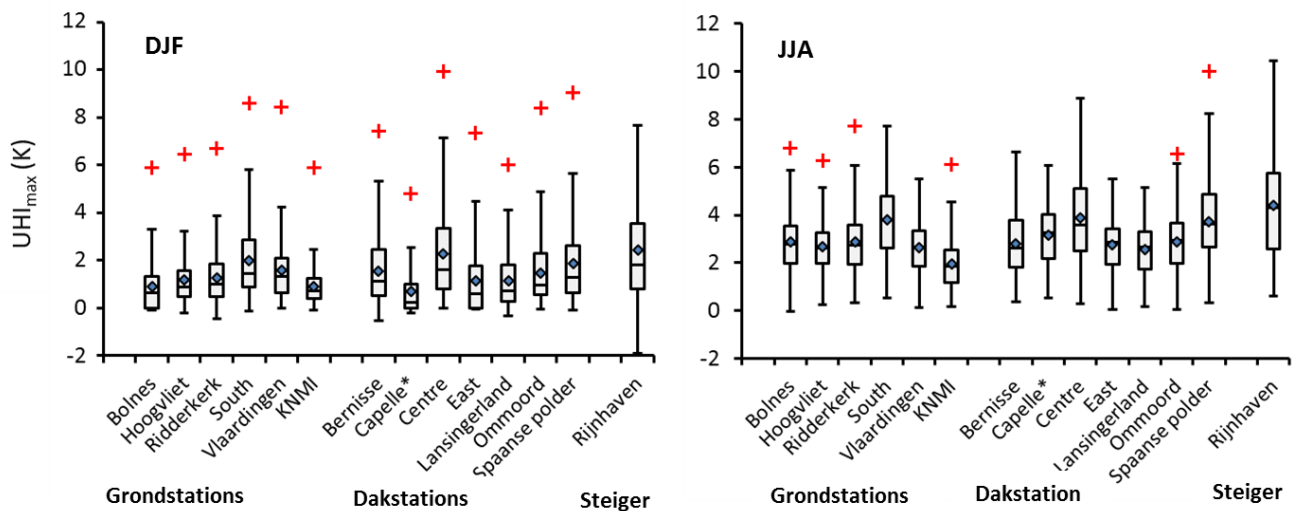


## 1.5 Variatie in klimaat binnen de stad

Onderstaande resultaten van lokale verschillen in stadsklimaat zijn grotendeels gebaseerd op de uitkomsten van het CPC-monitoringnetwerk van Rotterdam (Van Hove et al., 2011b, 2014). Het meetnet maakt het mogelijk om de temporele en ruimtelijke variatie in het lokale stadsklimaat in de agglomeratie meer gedetailleerd te analyseren en te relateren aan wijkeigenschappen. Elk weerstation meet niet alleen de gebruikelijke variabelen (luchttemperatuur, luchtvochtigheid en windsnelheid en -richting) maar ook de globale straling en zwarte-bol-temperatuur. Hiermee kan ook inzicht worden verkregen in de temporele en ruimtelijke variatie in thermisch comfort in de buitenruimte en de invloed van wijkeigenschappen hierop. Let op dat het hier gaat om gebiedsgemiddelde waarden; zeer plaatselijk (op de microschaal) kunnen grote verschillen in thermisch comfort voorkomen. Daarnaast hebben we gebruik gemaakt van resultaten die zijn verkregen uit satellietbeelden (Klok et al., 2012), mobiele metingen (Heusinkveld et al., 2014) en uit modelsimulaties (Schrijvers et al., 2014).

### 1.5.1 De variatie in temperatuur

Het UHI in het stedelijke gebied van Rotterdam kan aanzienlijk zijn: maximum temperatuurverschillen ( $UHI_{max}$ ) tussen de stad en het omringende platteland van 7 graden en meer zijn geen uitzondering (**Figuur 1.12**). Het blijkt dat dit niet alleen voor de zomermaanden geldt, maar ook voor een groot deel van het jaar. In de wintermaanden (DJF) zijn de UHI-intensiteiten over het algemeen gering. Desondanks kan op sommige winterdagen het UHI effect aanzienlijk zijn. Het effect is meestal kortdurend (minder dan 1 dag) en het treedt op als de wind naar het oosten draait en daarbij koude lucht aanvoert. Er treedt dan een scherpe daling van de temperatuur in het rurale gebied op, terwijl de temperatuur in de stad nog enige tijd onveranderd blijft.

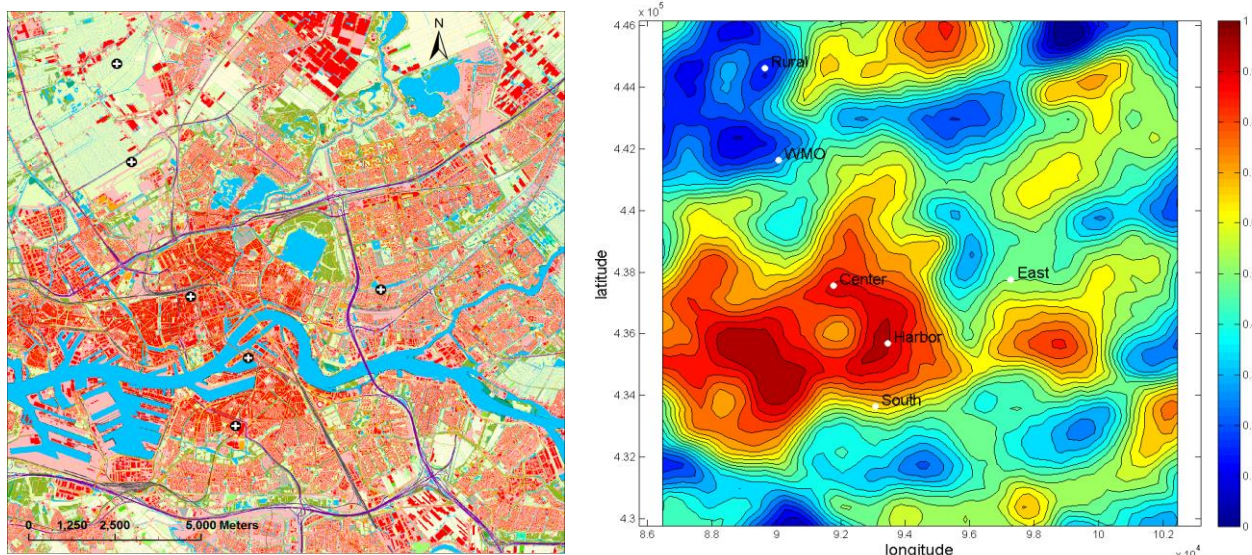


Figuur 1.12 Box-whisker-plot van  $UHI_{max}$  op de meetlocaties in de Rotterdam-agglomeratie. NB:  $UHI_{max}$  is gedefinieerd als het maximale verschil in luchttemperatuur tussen stad en buitengebied gedurende een etmaal. De waarden zijn berekend voor de maanden juni, juli en augustus (JJA) van 2010, 2011 en 2012 en voor de maanden december, januari en februari (DJF) van 2009/2010, 2010/2011 en 2011/2012. Daarbij is een onderscheid gemaakt tussen dak- en grondstations (bron: Van Hove et al., 2014).





De variatie in UHI binnen Rotterdam is aanzienlijk zoals ook **Figuur 1.13** laat zien. De dichtbebouwde locaties 'Centrum', 'Rijnhaven', 'Zuid', en 'Spaanse polder' laten de hoogste UHI intensiteiten zien. Dit geldt voor alle onderzochte jaren (2010-2012) en seizoenen. Verder valt op dat de temperaturen gemeten door het KNMI station op het vliegveld Rotterdam-Haaglanden gemiddeld hoger zijn dan op de referentielocatie in het buitengebied ten noorden van Rotterdam. Een mogelijke oorzaak is het al eerder genoemde 'urban plume'-effect van de stad.



*Figuur 1.13 Topografische kaart (links) en ruimtelijke variatie in UHI (rechts) in Rotterdam en omgeving (14.9 x 14.3 km). Genormaliseerde UHI waarden worden gepresenteerd (UHI Centrum = 1). In de zomer (JJA) zijn de gemiddelde mediaan- en 95 percentielwaarden voor  $UHI_{max}$  in Centrum 4.2 en 7.5 K (Bron: Heusinkveld et al., 2014).*

### 1.5.2 De invloed van wijk eigenschappen op temperatuur

Om een indruk te krijgen van de invloed van wijk eigenschappen op de temperatuur zijn, is gekeken naar het landgebruik, de geometrie en het 'urban canyon'-effect.

#### Stedelijk landgebruik

Zowel voor de oppervlaktetemperatuur als voor de luchttemperatuur worden significante<sup>16</sup> correlaties ( $p < 0.05$ ) gevonden voor de fractie bebouwd oppervlak, de fractie verhard oppervlak en de fractie stedelijk groen. Dit is niet het geval voor de fractie oppervlaktewater (**Tabel 1.2** en **1.3**).

#### Bebouwing en verharding

Stedelijke gebieden met veel bebouwing en verharding hebben een grotere oppervlaktetemperatuur en UHI intensiteit. De fractie bebouwd oppervlak blijkt een sterk bepalende factor te zijn. Bij iedere stap van 10% toename van de bebouwde fractie stijgt de oppervlaktetemperatuur met 1.4 °C. De mediaan waarde voor luchttemperatuur stijgt in dit geval met 0.34 °C en de 95-percentiel waarde met 0.63 °C. Een toename van de fractie totaal verhard oppervlak met 10% geeft een 0.7 °C hogere oppervlaktetemperatuur en een toename van de mediaan en 95-percentiel  $UHI_{max}$  van respectievelijk 0.25 °C en 0.44 °C.

<sup>16</sup> Met de p-waarde wordt beoordeeld of het verband 'significant' is. Bij een p-waarde die kleiner is dan 0.05 (d.i. 5% kans dat de relatie op toeval berust), is een verband statistisch significant.



Tabel 1.2 De invloed van het stedelijk landgebruik en geometrie op de variatie in **oppervlaktetemperatuur** overdag tussen wijken in de Rotterdamagglomeratie. De oppervlaktetemperaturen zijn berekend d uit satellietbeelden. De relaties zijn significant op basis van het 95% betrouwbaarheidsinterval (bron: Klok et al. 2012).

Hittefactor	Range van waarden	Toename/afname in oppervlaktetemperatuur (°C) bij toename van 0.1 (10%)		Pearson correlatie - r	Opmerkingen
<b>Stedelijk landgebruik<sup>1</sup></b>					
Bebouwde fractie	0.00 – 0.39		1.4	0.54	
Totaal verharde fractie	0.00 – 0.96		0.7	0.62	
Groen fractie	0.02 – 0.66		-1.3	-0.83	
Water fractie	0.00 – 0.63		0.2	0.13	geen significante relatie
<b>Stedelijke geometrie<sup>1</sup></b>					
Sky View Factor (SVF)	0.52-1.00		-1.4	-0.61	Bij toename SVF
Gebouwhoogte	3 - 38 m		0.3	0.52	bij toename van 1 m
Albedo	0.06 – 0.16		-0.8	-0.64	bij toename van 0.01
Emissiviteit	0.92 – 1.00		-1.7	-0.90	bij toename van 0.01

1: bepaald voor wijken

Tabel 1.3 De invloed van het stedelijk landgebruik en geometrie op de variatie in  $UHI_{max}()$  binnen de Rotterdamagglomeratie. De  $UHI_{max}$  waarden zijn gebaseerd op **luchttemperatuurgegevens** na zonsondergang. De relaties zijn significant op basis van het 95% betrouwbaarheidsinterval ( $p < 0.05$ ). (Bron: Van Hove et al. 2014).

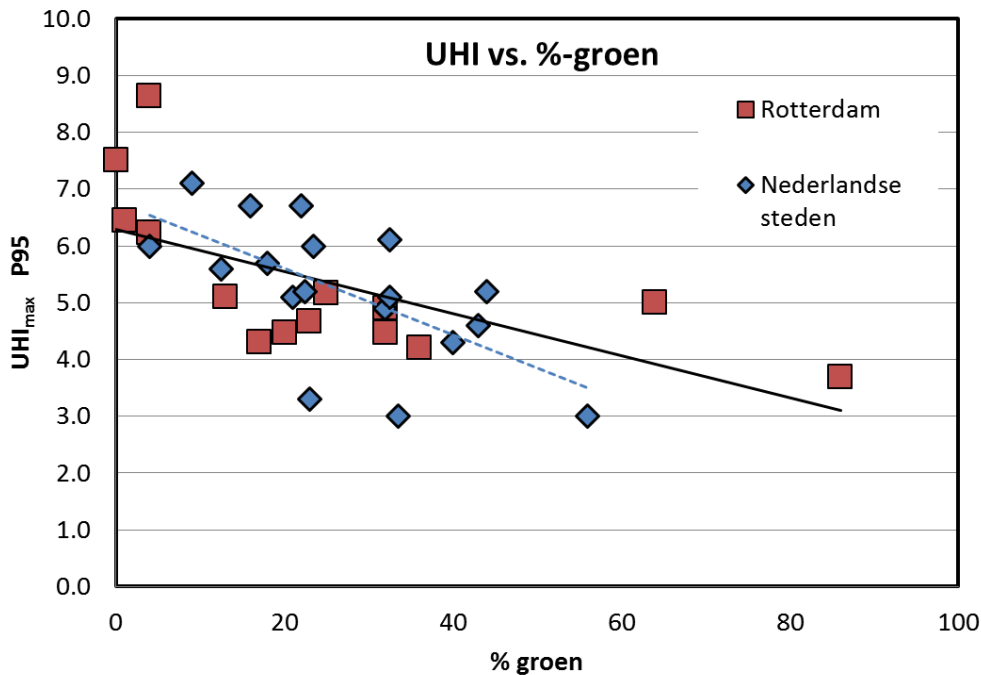
Hittefactor	Range van waarden <sup>2</sup>	Toename/afname in $UHI_{max}$ (in °C) bij toename van 0.1 (10%)				Opmerkingen
		mediaan	$r^2$	P95	$r^2$	
<b>Stedelijk landgebruik<sup>1</sup></b>						
Bebouwde fractie	0.03-0.38	0.34	0.64	0.63	0.60	
Totaal verharde fractie	0.14-0.74	0.22	0.58	0.44	0.60	
Groen fractie	0.01-0.64	-0.33	0.65	-0.62	0.48	
Water fractie	0.00-0.39	Geen significante relatie				zowel toename als afname
<b>Stedelijke geometrie<sup>1</sup></b>						
Sky View Factor (SVF)	0.44-0.78	Geen significante relatie				
Gebouwhoogte	2.3 - 26.6 m	0.08	0.69	0.19	0.80	bij toename van 1 m
Albedo	0.08-0.17	Geen significante relatie				

<sup>1</sup>: bepaald binnen een straal van 250m rondom elk weerstation; <sup>2</sup>excl. Zestienhoven (WMO) en Referentie



## Groen

De fractie groen is vaak omgekeerd evenredig met de fractie totaal verhard oppervlak. Immers, een stijging van de groenfractie gaat in veel gevallen ten koste van het verharde oppervlak<sup>17</sup>. Wanneer 10% van het verharde en bebouwde oppervlak plaats maakt voor groen, daalt de oppervlaktetemperatuur met 1.3 °C. In dit geval daalt de mediaanwaarde voor  $UHI_{max}$  met 0.33 °C en de 95 percentielwaarde met 0.62 °C. De resultaten van mobiele metingen laat een vergelijkbare afname zien (Heusinkveld et al. 2014). Hetzelfde geldt voor de relatie tussen  $UHI_{max}$  waarden van verschillende steden en de fracties groen in die steden (Steenefeld et al., 2011). De relatie tussen  $UHI_{max}$  en groenfractie blijkt dus robuust te zijn (Figuur 1.14).

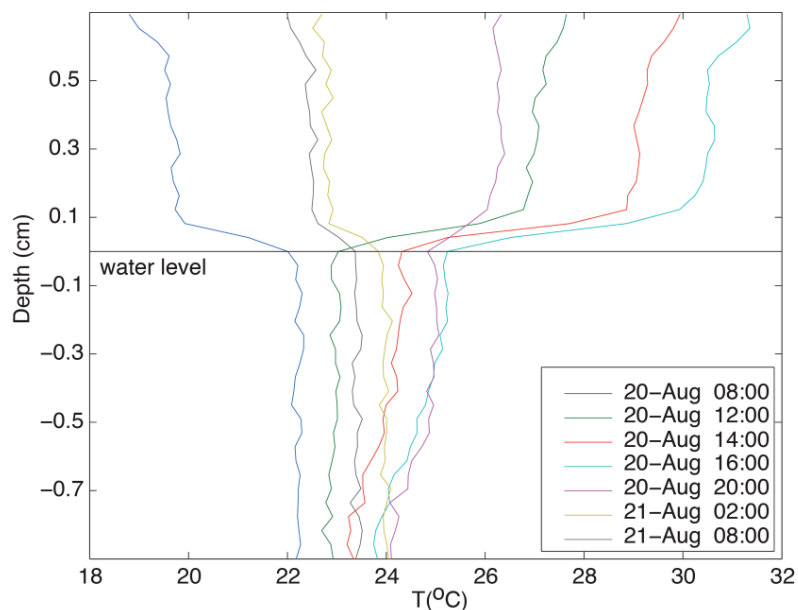


Figuur 1.14 Maximale UHI intensiteit ( $UHI_{max}$  95 percentielwaarden) als functie van het percentage groen in een stedelijk gebied bepaald voor de Rotterdamagglomeratie en Nederlandse steden (bron: Steeneveld et al., 2011).

## Oppervlaktewater

Over het algemeen wordt aangenomen dat in de zomer oppervlaktewater in de stad een verkoelend effect heeft op de aangrenzende omgeving. Dit is echter niet zonder meer het geval. Het verkoelend effect is te danken aan het feit dat een deel van de energie van de zon wordt geabsorbeerd en omgezet in verdamping van het water. Daarnaast vindt er opslag van zonne-energie plaats. Water heeft een grote warmtecapaciteit en kan de opgeslagen energie als warmte weer afstaan. De verkoelende werking van open water hangt dus sterk af van de watertemperatuur in vergelijking met de temperatuur van het aangrenzende gebied. Gedurende de zomer warmt het water geleidelijk aan op waardoor het verkoelend effect op de omgeving afneemt. Na zonsondergang kan dan de temperatuur zelfs hoger zijn dan de temperatuur in de aangrenzende bebouwde omgeving waardoor deze minder snel afkoelt (Figuur 1.15).

<sup>17</sup> Groene daken, gevels en straatbomen vormen hier een uitzondering op.

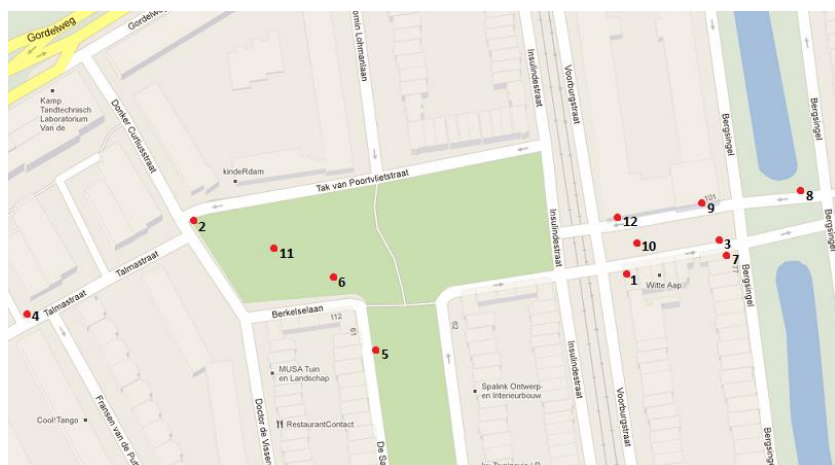


*Figuur 1.15 Variatie van de temperatuur van de lucht en van het water, gemeten in 2010 in de Westersingel in Rotterdam (Brolsma et al., 2011; Slingerland, 2012).*

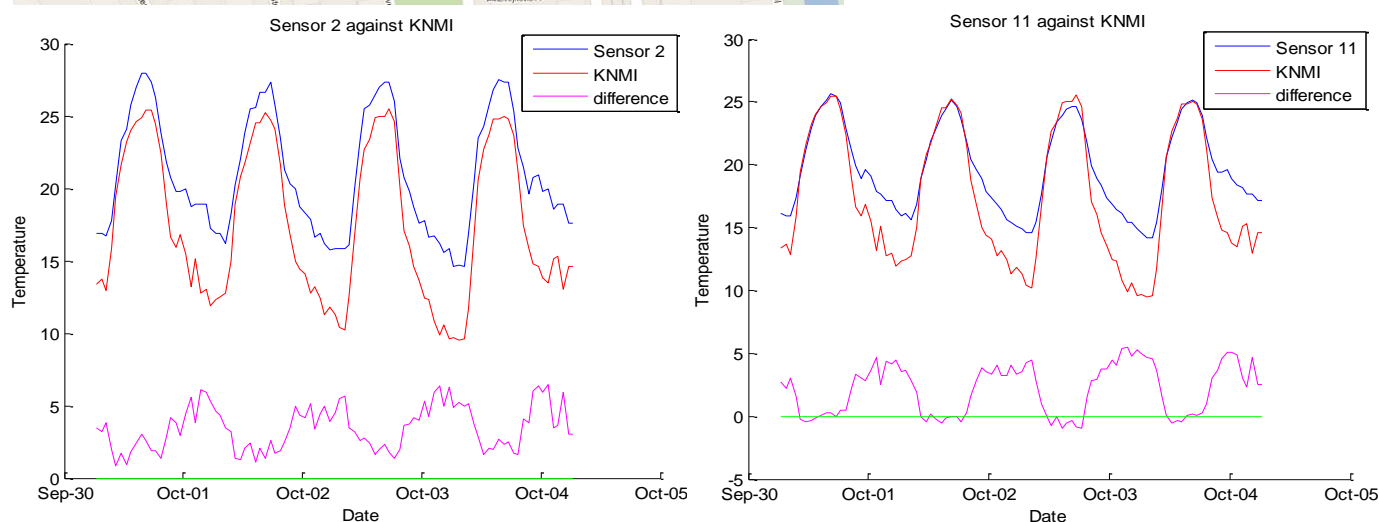
Steenefeld et al. (2014) geeft zelfs een zwakke positieve correlatie tussen UHI intensiteiten in Nederlandse steden en de fractie oppervlaktewater in die steden. Echter, grote wateroppervlakken vormen ook een oppervlak waarover de wind ongehinderd kan waaien. Overdag kan deze natuurlijke ventilatie een gunstige invloed hebben op het thermisch comfort gedurende warme dagen. De wijk 'Rijnhaven' kan als voorbeeld worden genomen voor de tegenstrijdige effecten van stedelijk oppervlaktewater. Voor deze locatie worden de hoogste  $UHI_{max}$  waarden gevonden door het verwarmend effect van het oppervlaktewater na zonsondergang. Overdag is de situatie evenwel anders: de relatief hogere windsnelheid zorgt ervoor dat het op zomerse dagen aangenamer is dan op de andere locaties in Rotterdam.

Het uiteindelijke effect van open water hangt dus sterk af van de dimensionering (oppervlakte, diepte), de ligging ten opzichte van de windrichting en de ligging ten opzichte van gebouwen en andere structuren in de omgeving. Dit 'complexe karakter' van water is ook een verklaring voor de afwezigheid van een duidelijke, sterke correlatie tussen luchttemperatuur en de fractie oppervlaktewater.

Zoals al eerder is opgemerkt, geven de bovenstaande analyses informatie over de invloed van 'gebiedsgemiddelde' eigenschappen op het niveau van een wijk. Daarbinnen (d.w.z. op de microschaal) kunnen de verschillen groot zijn. De resultaten van metingen uitgevoerd in een klein park in Rotterdam illustreren dit. Ze tonen aan dat op zomerse dagen (dagen met een maximum temperatuur tussen 25°C en 30°C) de gemiddelde luchttemperatuur in een park overdag wel tot 3 °C lager kan zijn dan buiten het park (**Figuur 1.16**; uit Slingerland, 2012). De luchttemperatuur is daarmee gelijk aan de temperatuur buiten de stad. Echter, de metingen geven ook aan dat dit 'Park Cool Island' effect slechts een beperkte invloed heeft op de luchttemperatuur in de aangrenzende bebouwde omgeving. Vergelijkbare resultaten zijn gevonden met de mobiele metingen (Heusinkveld et al., 2010).



Figuur 1.16 Temperatuurverloop aan de rand van een park (sensor 2) en in een park (sensor 11) in Rotterdam. Ook worden de verschillen in temperatuur tussen de sensoren en het KNMI weergegeven. KNMI is het meteorostation van vliegveld Zestienhoven aan de rand van Rotterdam (bron: Slingerland, 2012).



### Stadsgeometrie

De ruimtelijke variatie in zowel oppervlaktetemperatuur als luchttemperatuur binnen Rotterdam blijkt gerelateerd te zijn aan lokale verschillen in gemiddelde hoogte van gebouwen en andere obstakels. Vooral voor de  $UHI_{max}$  is dit een sterk bepalende factor ( $r^2 = 0.69-0.80$ ): bij een toename van de gebiedsgemiddelde hoogte met 1 m stijgt de mediaanwaarde met ca. 0.1 °C en de 95-percentielwaarde met ca. 0.2 °C.

De ruimtelijke variatie in oppervlaktetemperatuur blijkt ook gerelateerd te zijn met gebiedsgemiddelde 'Sky View Factor' (SVF) en oppervlakte albedo. Wijken in Rotterdam met een grotere gebiedsgemiddelde SVF en een grotere oppervlakte albedo hebben een lagere oppervlaktetemperatuur. Een verklaring hiervoor is dat bij een hogere SVF en een hogere oppervlakte albedo er minder zonnestraling wordt geabsorbeerd waardoor oppervlakken overdag minder opwarmen. Daarentegen vinden we voor de ruimtelijke variatie in luchttemperatuur binnen Rotterdam geen duidelijke relatie met deze parameters. Blijkbaar spelen na zonsopgang thermische eigenschappen van gebouwen in een gebied zoals 'thermal admittance' (het vermogen om warmte op te slaan en uit te stralen), een grotere rol. Bovendien zijn de verschillen in luchttemperatuur tussen de locaties minder groot dan die in oppervlaktetemperatuur wat een gevolg kan zijn van advectie (zijwaartse aanstroming van lucht).



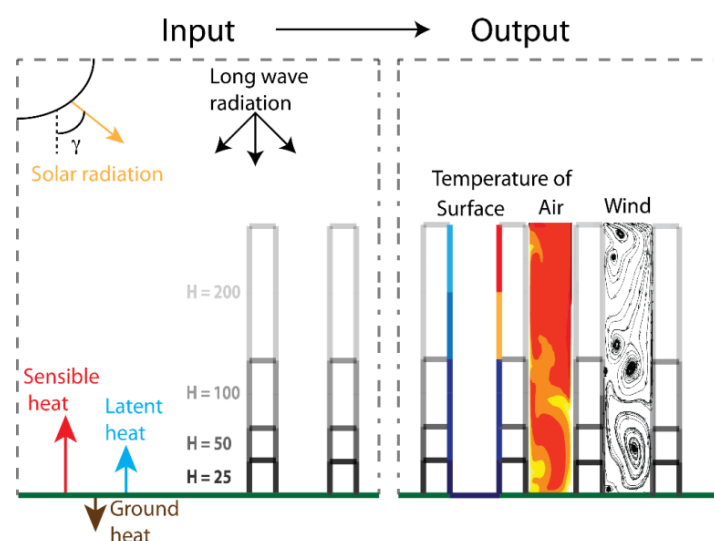
### Urban Canyon Effect

Een belangrijk fenomeen op de microschaal is het zogenaamde ‘Urban Canyon’ effect. Onder een Urban Canyon verstaat men: een nauwe straat met aan weerszijden hoge gebouwen. Binnen CPC is een microklimaatmodel ontwikkeld dat het mogelijk maakt om processen in de Urban Canyon nauwkeuriger te analyseren. Het model combineert processen als stralingstransport (kortgolvig en langgolvig), warmteopslag in de grond en muren, verdamping door middel van een constante Bowen ratio en warmte transport door convectie (luchtstromingen) in de Urban Canyon (**Figuur 1.17**). Dit maakt het model uniek in vergelijking met andere modellen voor het microklimaat (Schrijvers et al., 2014).

Overdag kan men 2 tegengestelde effecten onderscheiden: Hoge gebouwen geven schaduw, met als gevolg dat straat- en muuroppervlakken in de Urban Canyon minder opwarmen. Echter, de modelsimulatie laat ook zien dat invallend zonlicht door ‘multireflectie’ zeer efficiënt wordt geabsorbeerd tussen hoge gebouwen. Er vindt dan een opwarming van straat- en muuroppervlakken in de Urban Canyon plaats. Na zonsondergang remmen de hoge gebouwen de thermische uitstraling van gebouwen naar de atmosfeer (‘long-wave trapping’) waardoor het in de Urban Canyon langer warm blijft.

Daarnaast toont de modelsimulatie aan dat ventilatie, ofwel warmtetransport door convectie, van groot belang is. De verhouding tussen gebouwhoogte en straatbreedte ( $H/W$ ) is hierbij belangrijk. In modelsimulaties met (‘Weather and Research Forecasting’) WRF vinden Theeuwes et al. (2014) een optimum  $H/W$  ratio van ongeveer 1 (de gebouwen zijn even hoog zijn als de straat breed is). Hogere of lagere ratio’s hebben beide voor- en nadelen betreft ventilatie en schaduwwerking.

De beste ventilatie in de straat wordt bereikt bij een  $H/W$  verhouding van 0,5 of lager (de straat is (meer dan) 2 keer zo breed dan de gebouwen hoog zijn). Tot een hoogte-breedte verhouding van 1,0, vindt er nog menging van de lucht op straatniveau met de ‘canopy layer’ (luchtlaag boven de stad) plaats<sup>18</sup>. Bij hogere ratio’s (de gebouwen zijn hoger dan de straat breed is) wordt vooral het bovenste deel van de Urban Canopy gemengd. In dit geval ontstaat er een zeer stabiele lucht-situatie in het onderste deel van de canyon waar de windsnelheden zeer laag zijn en nauwelijks menging van de lucht plaatsvindt. Er is in deze situatie wel meer schaduw en er vindt dus minder opwarming van oppervlakken in de Urban Canopy plaats (al is het niet zo dat er bij een  $H/W$  verhouding van 1 of hoger helemaal geen opwarming door zonnestraling voorkomt) (Kleerekoper 2012).



*Figuur 1.17 Schematische weergave van het ontwikkelde micro-schaal model. Aan de linkerkant de input, met onder meer gebouwen met bijbehorende parameters als hoogte-breedte verhouding, en materiaaleigenschappen zoals albedo en warmtecapaciteit. De verschillende fysische processen kunnen afzonderlijk aan- en uitgezet worden (ventilatie, kort/langgolvig stralingstransport etc.). Aan de rechterzijde de output, met oppervlakte temperatuur, luchttemperatuur en luchtstroming (Schrijvers et al., 2014).*

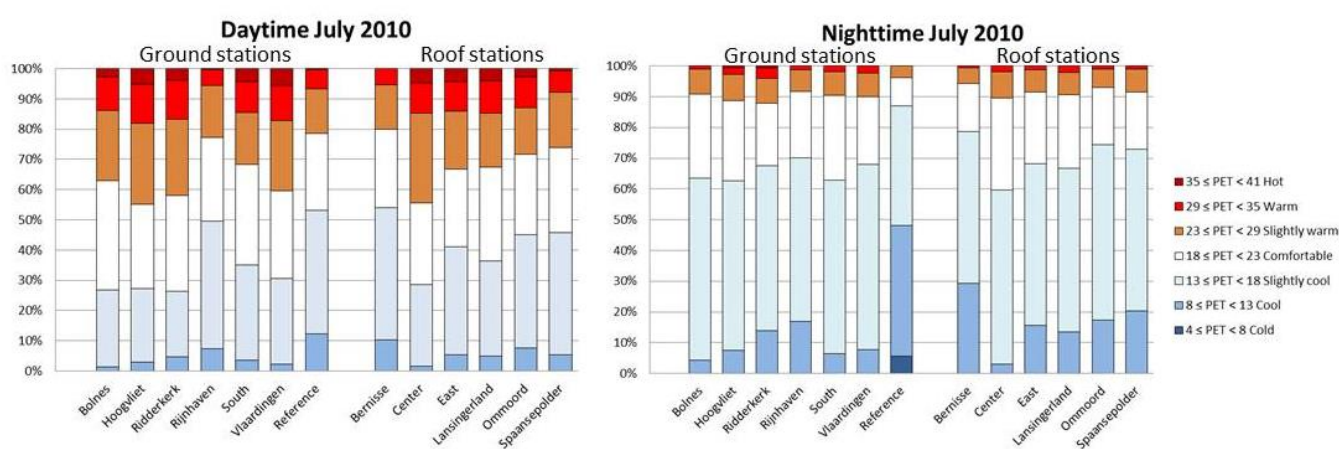
<sup>18</sup> In Nederland zijn de meeste straten breder dan de gebouwen hoog zijn (ratio onder 1).



### 1.5.3 De variatie in thermisch comfort

De variatie in thermisch comfort in de Rotterdam agglomeratie is vastgesteld met behulp van de 'Physiologically Equivalent Temperature' (PET). De berekende PET waarden zijn vervolgens gerelateerd aan fysiologische stress en 'stress'-beleving of perceptie (**Bijlage C**).

Het aantal uren dat kan worden geclassificeerd als uren met matige tot sterke hittestress ( $PET > 23^\circ$ ) is groter op de stadslocaties dan op de referentielocatie in het buitengebied (**Figuur 1.18**). Overschrijding van de drempelwaarde voor thermisch discomfort gebeurde bijna altijd overdag (157 uur op de stadslocaties en 93 uur op de referentielocatie, oftewel 21 en 12.5% van het totaal aantal uren in deze maand). De julimaanden in 2011 en 2012 waren koeler dan gemiddeld. Alhoewel het aantal uren met  $PET > 23^\circ\text{C}$  veel minder was (32 uur in 2011 en 77 uur in 2012), zijn de gevonden relatieve verschillen tussen de locaties vergelijkbaar met die van 2010.



Figuur 1.18 Frequentieverdeling van de verschillende thermisch comfortklassen voor overdag en gedurende de nacht voor juli 2010 voor de verschillende locaties in de stad en voor de referentielocatie (bron: Van Hove et al., 2014).

Het groter aantal uren met verminderd thermisch comfort in de stedelijke gebieden kunnen we voornamelijk toeschrijven aan de lagere windsnelheden. De verschillen in luchttemperatuur tussen de stadslocaties en het buitengebied zijn overdag gering ( $< 2^\circ\text{C}$ ) of zelfs negatief (bijvoorbeeld "Rijnhaven"). Bovendien hebben we gezien dat de directe straling van de zon op de stadslocaties gemiddeld minder is dan in het buitengebied. Hetzelfde geldt voor de luchtvochtigheid. De verschillen in straling en luchtvochtigheid hebben echter geen merkbaar effect op PET.

Ook de variatie in thermisch comfort binnen de agglomeratie blijkt grotendeels gerelateerd te zijn aan verschillen in windsnelheid. Zo is de windsnelheid op de 'Rijnhaven' locatie relatief hoog (ca. 80% van referentie) door de aanwezigheid van een groot oppervlak. Dit verklaart ook dat het aantal uren met verminderd thermisch comfort voor deze locatie relatief klein is. Omgekeerd kan het grote aantal overschrijdingsuren voor Ridderkerk worden verklaard met veel lagere windsnelheden op deze locatie.

De situatie verandert na zonsondergang wanneer het UHI effect een grotere rol speelt. De variatie in PET in het stedelijk gebied wordt dan voor een belangrijk deel bepaald lokale verschillen in temperatuur. Zoals we eerder hebben gezien, heeft Rijnhaven de hoogste maximale UHI waarden, terwijl voor de groene locatie Ridderkerk relatief lage waarden worden gevonden. Een belangrijke conclusie is dan ook dat een grotere  $UHI_{\text{max}}$  voor een bepaalde locatie niet automatisch minder thermisch discomfort overdag betekent.



#### 1.5.4 De invloed van wijkeigenschappen op thermisch comfort

De ruimtelijke variatie in PET overdag wordt grotendeels bepaald door verschillen in gemiddelde windsnelheid tussen de locaties. Er kunnen geen duidelijke, directe relaties met landgebruik of geometrische factoren, zoals gebouwhoogte, worden afgeleid uit de metingen van het meetnet in Rotterdam. Wanneer de situatie verandert na zonsondergang en het UHI effect een meer prominente rol gaat spelen, is het thermisch comfort in de buitenruimte gerelateerd aan stadskenmerken die bepalend zijn voor het UHI effect.

Bij dit resultaat moeten echter een aantal kanttekening geplaatst worden:

- De PET waarden berekend voor de locaties in Rotterdam zijn gebiedsgemiddelde waarden. Zeer plaatselijk (op de microschaal) kunnen er grote verschillen in PET voorkomen. **Figuur 1.19** laat dit mooi zien voor een straat in de wijk Geitenkamp in Arnhem (Heusinkveld et al. 2012). In dezelfde straat zijn er verschillen van 15 graden in PET doordat de zuidelijke straatzijde in de schaduw is (bomen en huizen) en de noordzijde vol in de zon. Wind kan verkoelend werken maar op deze dag was wind geen significante term in de PET-reductie.
- PET is een van de vele thermische comfort indices die zijn ontwikkeld. De gevoeligheid van de verschillende indices voor meteorologische variabelen blijkt sterk te verschillen.
- PET wordt berekend op basis van fysische en fysiologische factoren. De laatste factoren zijn alleen voor een standaard persoon onderzocht. Vervolgens zijn de resultaten uit Duits onderzoek gebruikt om de berekende waarden te relateren aan 'stress'-beleving. Echter, deze relatie kan anders zijn voor Nederlandse burgers, voor Nederlandse weersomstandigheden. Bovendien is er geen rekening gehouden met psychologische factoren. Uit onderzoek van Klemm et al. (2014) blijkt dat deze sterk bepalend zijn voor hoe mensen werkelijk thermisch comfort in een omgeving beleven.



Figuur 1.19 Physiologically Equivalent Temperature (PET) en stralingsbelasting (mean radiant temperature, Tmrt) in de Doctor Schaepmanlaan en Rozendaalseweg in Arnhem. (bron: Heusinkveld et al., 2012).





## Conclusies

Met betrekking tot de kwetsbaarheid van de bebouwde omgeving heeft het CPC-programma de volgende conclusies opgeleverd:

### Hoe werkt het lokale klimaat in Nederlandse steden?

#### Temperatuur

- Elke stad of stadsdeel in Nederland heeft te maken met een stedelijk hitte-eiland effect (UHI) en er kunnen grote verschillen voorkomen in UHI op leefniveau binnen de stad;
- De UHI intensiteit van Nederlandse steden is aanzienlijk en vergelijkbaar met dat van andere Europese steden.;
- De UHI intensiteit is vooral na zonsondergang groot doordat het platteland veel sneller afkoelt dan de stad waar afkoeling pas aan het einde van de nacht plaatsvindt;
- De UHI intensiteit is in de zomermaanden en in het voorjaar het grootst en veel kleiner in de winter. Echter, ook op sommige winterdagen kunnen de nachtelijke verschillen in temperatuur tussen stad en platteland groot zijn. Dit laatste is veelal een kortdurend effect (< 1 dag);
- Het temperatuurverschil tussen stad en platteland is vooral op leefniveau groot; het UHI op grotere hoogte in de grenslaag boven de stad is gering;
- De ontwikkelingen aan het micro-schaalmodel geven aan dat de toegenomen absorptie van kortgolvlige zonnestraling door reflectie tussen hoge gebouwen de drijvende kracht is achter het UHI-effect; verdamping is in dit model voor dicht bebouwde hoogbouw omgevingen niet meegenomen.
- De warmteproductie door menselijke activiteiten levert een bijdrage aan het UHI. In en rond de grote steden Den Haag en Rotterdam zijn de antropogene emissies van warmte maximaal  $20 \text{ W m}^{-2}$  gedurende de nacht en ongeveer  $70 \text{ W m}^{-2}$  gedurende de dag.

#### Thermisch comfort

- Over het algemeen is het aantal dagen met hittestress in stedelijke gebieden groter dan op het platteland. In de komende decennia kunnen thermisch discomfort en hittestress een belangrijk 'issue' voor veel steden worden;
- Een grotere  $\text{UHI}_{\text{max}}$  voor een bepaalde locatie betekent niet altijd minder thermisch discomfort overdag. De waarde van UHI als een proxy of indicator voor thermisch comfort is dus beperkt;
- De ruimtelijke variatie in thermisch comfort overdag lijkt voornamelijk te worden bepaald door verschillen in gemiddelde windsnelheid tussen de locaties, terwijl de ruimtelijke variatie gedurende de nacht in belangrijke mate wordt bepaald door verschillen in maximum temperatuur.

#### Verdamping

- In de periode april tot en met september gaat 20-60% van de gemiddelde neerslag verloren door verdamping; dit zorgt voor een koelsnelheid van gemiddeld  $20\text{-}25 \text{ W m}^{-2}$  per dag (d.i. 11-15% van de inkomende zonnestraling)
- Eerste ruwe schattingen voor Rotterdam laten zien dat de waterconsumptie van bomen slechts een gering effect heeft op de waterbalans; plaatselijk kan dit echter anders zijn.
- De geringe verdamping – deels door verharding van de stad, deels door vochttekort voor evapotranspiratie – zorgt ervoor dat de temperatuur van een stad verhoogd wordt. Hoe groot dit effect is, is nog onbekend. Het is ook nog niet duidelijk wat het effect van verdamping is op het thermisch comfort.



## Wat is de invloed van stedelijke inrichting?

- De relatie tussen UHI en het inwoneraantal van een stad (als proxy voor de grootte van de stad) zoals gerapporteerd door Oke (1973), wordt niet bevestigd in ons onderzoek; andere factoren zoals populatiedichtheid en stad-/wijkeigenschappen, zijn waarschijnlijk meer bepalend zijn voor het UHI;
- De eigenschappen van een stad of wijk lijken ook meer bepalend voor de UHI te zijn dan geografische ligging;
- Zowel de oppervlaktetemperatuur overdag als maximum UHI intensiteit gedurende de nacht vertonen significante (lineaire) relaties met factoren voor het stedelijk landgebruik zoals de fractie bebouwd oppervlak, de fractie verhard oppervlak en de fractie groenoppervlak (zie **Tabel 1.4**).
- De oppervlaktetemperatuur overdag en maximum UHI intensiteit gedurende de nacht vertonen ook een significante relatie met de gemiddelde gebouwhoogte.
- Hoe langer de warmteperiode duurt, hoe minder snel een dichtbebouwde wijk 's nachts afkoelt. In een groene wijk treedt dit accumulerend effect minder op.
- Door transpiratie en schaduwwerking koelt stedelijk groen de omgeving. Daartoe moet dan wel voldoende water aanwezig zijn.
- Op zomerse dagen kan het in een klein park 3 °C koeler zijn dan in het aangrenzende bebouwde gebied. Echter, de invloed van het 'Park Cool Island' effect op de aangrenzende bebouwde omgeving is gering.
- De ratio tussen de gebouwhoogte en straatbreedte (H/W) vertoont een optimum bij H/W=1. Bij H/W <1 is er goede ventilatie, maar weinig schaduw, bij H/W >1 is er meer schaduw, maar vindt er bij de grond geen menging van de lucht meer plaats.
- Door de grote warmtecapaciteit van water, kan oppervlaktewater in de stad zowel een verkoelend als een verwarmend effect op de omgeving hebben. Zo neemt het verkoelend vermogen van oppervlaktewater in de zomermaanden af door een stijging van de watertemperatuur. Het uiteindelijke effect van open water hangt dan ook sterk af van de dimensionering (oppervlakte, diepte), de ligging ten opzichte van de windrichting en de ligging ten opzichte van gebouwen en andere structuren in de omgeving.

Tabel 1.4 Samenvattend overzicht van de invloed van wijkeigenschappen op het  $UHI_{max}$  (luchttemperatuur) (bron: Steeneveld et al., 2011)

Factor	Effect of gemiddelde $UHI_{max}$ zomermaanden
Antropogene warmte	+0.5 °C gemiddeld over Rotterdam (38 W/m <sup>2</sup> ) +2.0 °C industriegebied (200 W/m <sup>2</sup> )
Populatiedichtheid*	+0,1 °C tot +0.3 °C per 1000 inw toename/km <sup>2</sup>
Bebouwd oppervlak	+0,4 °C tot +0.6 °C per 10% toename
Verhard oppervlak	+0,2 °C tot +0.4 °C per 10% toename
Stedelijk groen	-0,3 °C tot -0.6 °C per 10% toename
Open water	geen significatie correlatie
Sky View Factor	geen significatie correlatie
Albedo	geen significatie correlatie
Gebouwhoogte	+0.08-+0.19 °C per toename van 1 m



## 2 Hoe kwetsbaar zijn Nederlandse steden voor klimaatverandering?

### Samenvatting

Het uitgangspunt van een kwetsbaarheidsanalyse vormen de personen of objecten die door het klimaateffect worden beïnvloed. In het geval van hitte zijn het mensen die last hebben van hittestress, voor wateroverlast door extreme regenval zijn het kapitaalgoederen die schade kunnen oplopen. In het kader van het Climate Proof Cities programma is onderzoek gedaan naar de kwetsbaarheid van deze objecten die wordt bepaald door drie factoren; de gevoeligheid voor een klimaatdreiging, de mate van blootstelling en het aanpassingsvermogen, en is daarmee zeer lokaal bepaald.

#### Hittestress

Voorals ouderen boven de 75 zijn gevoelig voor perioden van hitte en kunnen ziek worden of zelfs sterven. Uit onderzoek tijdens een hittegolf in 2010 is gebleken dat bij ouderen veel klachten optraden en de hittebelasting aanzienlijk was. In rust werden lichaamstemperaturen gemeten die bij koorts passen. Acclimatisatie van ouderen aan warmte binnen een waarschuwingsperiode van drie dagen blijkt niet mogelijk. Dit betekent dat deze kwetsbare groep tijdens hittegolven extra aandacht nodig heeft. Ook de arbeidsproductiviteit van werkers in buitenlucht of in niet gekoelde gebouwen neemt af tijdens hittegolven met macro-economische kosten als gevolg.

Gebouwen kunnen de blootstelling aan hitte verminderen door in een koel binnenklimaat te voorzien, maar uit onderzoek op basis van de KNMI'06 klimaatscenario's blijkt dat in de toekomst in een groot deel van de Nederlandse woningen overschrijdingen van de acceptatieniveaus van de binnentemperatuur (de temperatuur waarbij bewoners het 'warm' krijgen) regelmatig voor zal komen. Belangrijke factoren in de opwarming van gebouwen zijn de mate van isolatie en de mate waarin de zon direct het gebouw kan binnen schijnen. Dit laatste is afhankelijk van raamoppervlak op het oosten en westen en de aanwezigheid van zonneschermen.

Door informatie over de wijkeigenschappen, gebouwen en bevolkingsgroepen op een kaart te projecteren kan een kwetsbaarheidskaart worden gemaakt die laat zien welke delen van de stad extra aandacht behoeven. In Rotterdam zijn met het oog op ouderen kwetsbare wijken: Spangen, Bospolder, delen van het oude noorden, Feijenoord, Charlois en andere delen van Zuid. In Amsterdam is een analyse gedaan met betrekking tot de kwetsbaarheid van werkenden, waar het historisch centrum uitspringt met de combinatie van een hoge dichtheid aan arbeidsplaatsen in slecht geïsoleerde gebouwen.

#### Wateroverlast

Objecten die gevoelig zijn voor materiaalschade door wateroverlast zijn met name gebouwen en vooral hun interieur, en schakelkastjes. Verder kan er ook economische schade optreden door onderbreking van bedrijvigheid, verkeershinder en elektriciteitsuitval. Daarnaast zijn er kosten voor het inzetten van hulpdiensten en zijn er sociale implicaties indien ziekenhuizen en dergelijke minder goed bereikbaar zijn en/of functioneren. Risico's en schade door extreme regenval zijn veelal afhankelijk van een drempelwaarde die per object verschilt, bijvoorbeeld de hoogte waarop schakelkastjes gemonteerd zijn. Vermindering van de blootstelling tijdens extreme buien kan lokaal worden bereikt door te zorgen dat het water beneden de drempelwaarde blijft (door vergroten berging en infiltratie) of door de drempelwaarde te verhogen (bijv hogere drempels, hoger bevestigen schakelkasten). Uit analyses van het Climate Proof Cities (CPC) programma blijkt dat in stedelijk gebied een groot aantal kwetsbare en tegelijk vitale objecten en netwerken aanwezig is. Het inventariseren en in kaart brengen hiervan is van groot belang om de kwetsbaarheid van een stedelijk gebied als geheel in beeld te brengen.



In aanvulling op hoofdstuk 1, blijkt uit ook de kwetsbaarheidskaarten dat de kwetsbaarheid voor hitte of wateroverlast in een stad een grote ruimtelijke variatie vertoont. Kwetsbaarheidsanalyses of klimaatstresstests, zoals die genoemd worden door de coalities van het Deltaprogramma Nieuwbouw en Herstructurering (DPNH), zouden aandacht moeten besteden aan de genoemde factoren en kunnen dan inzicht bieden in de kwetsbaarheid van een gebied op zeer lokaal niveau.

## 2.1 Inleiding

Om inzicht te krijgen in welke gebieden meer of minder aandacht behoeven ten aanzien van klimaatverandering kan een kwetsbaarheidsanalyse worden uitgevoerd (de Stap 'Weten' uit de 'Handreiking Ruimtelijke Adaptatie'<sup>19</sup>). Kwetsbaarheid van steden voor klimaatverandering wordt gedefinieerd als de mate waarin het stedelijk systeem ontvankelijk is voor veranderingen in klimaatparameters en niet in staat is de negatieve gevolgen hiervan op te vangen. Binnen het onderzoeksprogramma Climate Proof Cities (CPC) is vooral gekeken naar veranderingen in het klimaat zoals die tot uitdrukking komen in temperatuur en neerslag (zie hoofdstuk 1). Extreem hoge temperaturen en piekbuien kunnen een bedreiging vormen voor de stad en haar inwoners, maar een klimaatdreiging alleen hoeft nog niet tot schade te leiden. De werkelijke kwetsbaarheid wordt namelijk bepaald door drie factoren: de gevoeligheid voor de klimaatdreiging, de mate van blootstelling en het aanpassingsvermogen (IPCC, 2007). Deze kwetsbaarheid bepaalt, samen met de (toenemende) kans op een extreme gebeurtenis van een bepaalde intensiteit, het risico voor een stedelijk systeem. Het tekstkader 'Kwetsbaarheid' geeft een uitleg van deze begrippen. Omdat de blootstelling al behandeld is in hoofdstuk 1 en binnen CPC geen onderzoek is gedaan naar het aanpassingsvermogen, gaat dit hoofdstuk vooral over de gevoeligheid en de resulterende kwetsbaarheid van het stedelijk gebied.

Er kunnen twee typen methodes onderscheiden worden om de kwetsbaarheid te analyseren met elk zijn voor- en nadelen (Veerbeek en Husson, 2013); de *contextuele kwetsbaarheidsanalyse*, een benadering die kijkt naar de achterliggende oorzaken en bepalende factoren van kwetsbaarheid en op basis daarvan gebieden met relatief hogere en lagere kwetsbaarheid identificeert. De *uitkomstenanalyse* richt zich, zoals de naam al zegt, op de potentiële omvang van de effecten van klimaatverandering op enig moment in de toekomst. Veerbeek en Husson (2013) beargumenteren dat er op dit moment het meest behoefte is aan inzicht in de urgentie en ernst van de klimaatdreiging en dat een uitkomstenanalyse hier het beste bij aansluit. Dit wordt bevestigd door input van stakeholders tijdens CPC bijeenkomsten, die aangaven graag informatie te willen hebben over drempelwaardes of knikpunten, liefst uitgezet in de tijd.

Een uitkomstenanalyse vergt echter veel gegevens voor scenario-ontwikkeling, en ruimtelijke details, alsmede overeenstemming over normen en doelstellingen. Voor waterbeheer lijkt deze methode een haalbare kaart en we zullen dit dan ook verder verkennen onder 2.3. Voor hittestress ligt dit veel lastiger. Hoe bepaal je bijvoorbeeld hoeveel hittestress iemand mag ervaren of hoeveel hittedoden nog acceptabel zijn? Voor hitte is dan ook een benadering volgens de contextuele kwetsbaarheidsanalyse aangehouden (2.2). Het hoofdstuk sluit af met een overzicht van beschikbare of in ontwikkeling zijnde tools voor het uitvoeren van kwetsbaarheidsanalyses (2.4) en hoofdconclusies (2.5).

---

<sup>19</sup> <http://www.ruimtelijkeadaptatie.nl/>

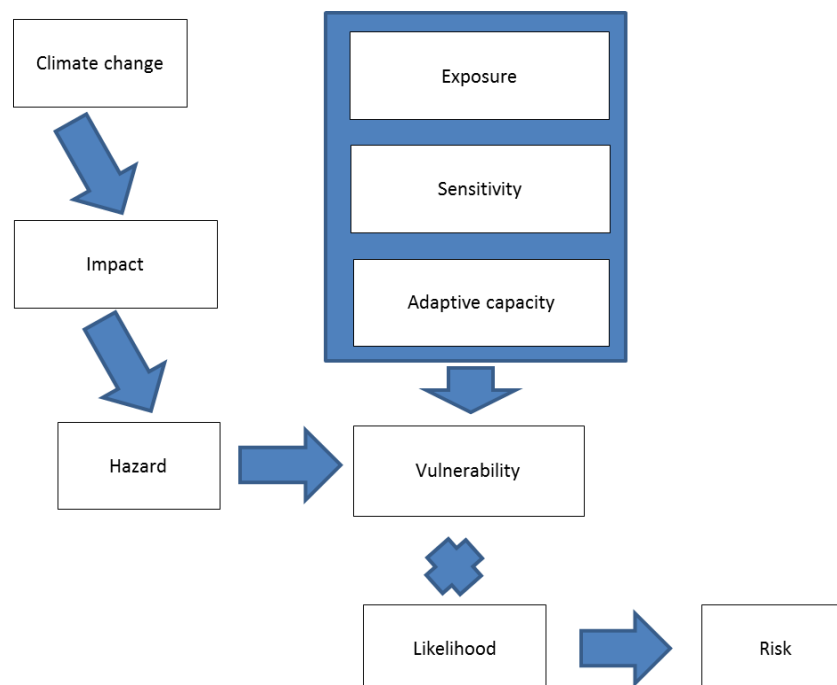


## Kwetsbaarheid

De **blootstelling** aan klimaatverschijnselen heeft simpelweg te maken met de mate waarin het systeem in contact komt met die dreiging. De omgeving van een systeem is hiervoor bepalend: Steden in hoog-Nederland zijn bijvoorbeeld niet blootgesteld aan overstromingen vanuit de zee. Neerslagpatronen zullen binnen een stad niet veel verschillen, maar sommige delen liggen lager dan andere, waardoor de blootstelling van wijk tot wijk kan verschillen. Wijkeigenschappen beïnvloeden wel degelijk de (comfort)temperatuur, zodat de blootstelling aan hoge temperaturen lokaal erg varieert (zie hoofdstuk 1).

De **gevoeligheid** voor een klimaatdreiging betreft de mate waarin een systeem wordt beïnvloed door de veranderende klimaatparameters. In tegenstelling tot blootstelling, heeft gevoeligheid betrekking op de intrinsieke eigenschappen van een systeem. De gevoeligheid van het stedelijk gebied wordt bepaald door het aantal en het type gevoelige elementen in het systeem, zoals personen en objecten, en de gevoeligheid van deze elementen voor impact of schade. Gebouwen in een laaggelegen stadsdeel met veel kelders met daarin kleine werkplaatsen, zijn bijvoorbeeld gevoeliger voor overstromingen dan gebouwen zonder kelders.

Het **aanpassingsvermogen** is het vermogen waarin een systeem (bv een stad) kan omgaan met de effecten van klimaatverandering, mogelijke aanpassingen kan verwezenlijken en de schade kan beperken (Smit et al., 2001). Een goed aanpassingsvermogen kan de algehele kwetsbaarheid voor een klimaatdreiging verminderen en de veerkracht verhogen. Het aanpassingsvermogen is afhankelijk van veel (sociale) factoren die moeilijk te kwantificeren zijn. Het is de vraag in hoeverre de dimensie aanpassingsvermogen van toepassing is op wijkniveau. 'Toegang tot technologie' is bijvoorbeeld vaak niet op wijkniveau georganiseerd.



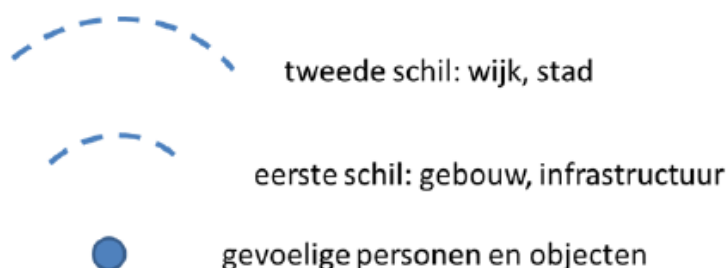
Figuur 2.1 Impact van klimaatverandering op het (stedelijk) systeem (Pásztor en Bosch, 2011)



## 2.2 Hittestress

Voor het uitvoeren van een contextuele kwetsbaarheidsanalyse moeten eerst de gevoelige elementen waar klimaatverandering effect op heeft worden geïdentificeerd. Voor hittegolven zijn dit in eerste instantie de mensen zelf die hittestress ervaren. Een volgende vraag is of er bevolkingsgroepen zijn die gevoeliger zijn voor hittestress dan anderen (2.2.1) en waar deze zich bevinden. Bevinden ze zich in een omgeving waar ze ook worden blootgesteld aan hoge temperaturen?

Voor de blootstelling kan onderscheid worden gemaakt in binnenshuis en buitenshuis, met de respectievelijke terminologie “eerste schil” en “tweede schil” (**Figuur 2.2**). Een gebouw kan als een eerste schil worden gezien die de blootstelling van de mens aan hittestress kan verminderen, afhankelijk van de eigenschappen van het gebouw (2.2.2). Voor het buitenklimaat zijn in hoofdstuk 1 diverse wijk eigenschappen benoemd die de blootstelling kunnen verhogen of verminderen. Zo vermindert de aanwezigheid van bomen in een wijk de blootstelling aan extreme hitte (van gebouwen en van hun bewoners). De elementen voor blootstelling en gevoeligheid worden in 2.2.3 gecombineerd tot kwetsbaarheidskaarten die inzicht geven in zowel de locatie van kwetsbare groepen als de blootstelling aan klimaatinvloeden.

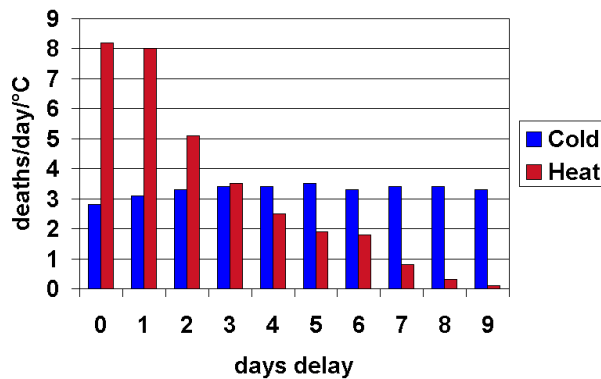


*Figuur 2.2 Eerste en tweede schil rond gevoelige personen en objecten.*

### 2.2.1 Gevoeligheid

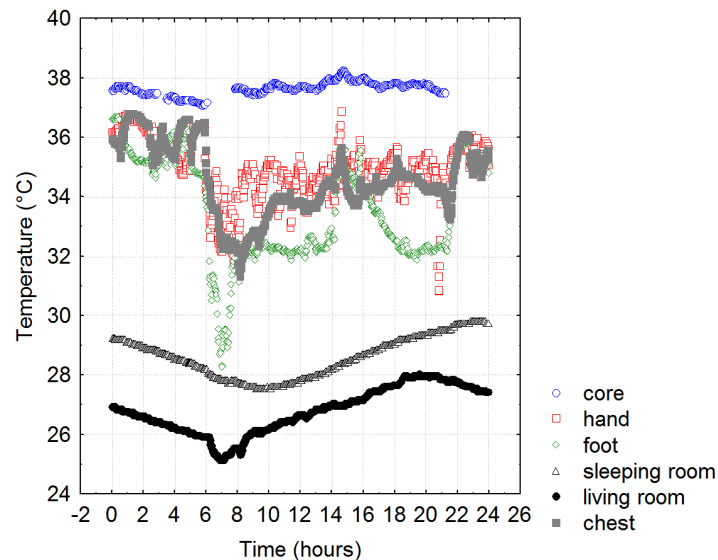
Boven een zekere grens leiden hoge temperaturen tot hittestress. Deze hittestress kan leiden tot een verminderd thermisch comfort, slaapverstoring, gedragsverandering (grotere agressie) en verminderde arbeidsproductiviteit. Hittestress kan echter ook tot serieuze hitte gerelateerde ziekten leiden zoals: huiduitslag, krampen, oververmoeidheid, beroertes, nierfalen en ademhalingsproblemen. Soms kan hittestress zelfs sterfte tot gevolg hebben (Howe en Boden, 2007).

Tijdens hittegolven nemen zowel het bezoek aan ziekenhuizen (voor noodgevallen) en sterfte beduidend toe (Kovats en Hajat, 2008). In Nederland stijgt tijdens hittegolven de sterfte met 12% (ongeveer 40 doden per dag extra) (Huynen et al., 2001). Binnen CPC is een database gemaakt van klimaatgegevens (KNMI) en sterftegegevens (CBS). Hiermee is in kaart gebracht hoe groot de oversterfte is in hitte en koude. **Figuur 2.3** geeft aan dat in de hitte de oversterfte 8 mensen extra bedraagt voor elke graad warmer dan 20°C. Dat is meer dan eerder gedacht. Verder blijkt dat de combinatie van temperatuur en vochtigheid, waarvoor gecombineerde indices bestaan zoals de hitte index en de humidex, een iets betere voorspeller is voor mortaliteit dan temperatuur alleen.



Figuur 2.3 Oversterfte per dag per °C voor hitte en koude gerelateerd aan het aantal dagen na de warme of koude dag.

De meest gevoelige mensen voor hitte-gerelateerde ziekten en sterfte zijn ouderen boven de 75 en chronisch zieken, met name als zij hart-, ademhaling- en nieraandoeningen hebben (Kovats en Hajat 2008; Hajat et al., 2010). Uit een inventariserend CPC onderzoek in Tilburg tijdens een hittegolf in 2010 is gebleken dat bij ouderen veel klachten optraden en de hittebelasting aanzienlijk was. In rust werden lichaamstemperaturen van boven de 38 graden Celsius gemeten (Daanen et al., 2011) (Figuur 2.4).



Figuur 2.4 Typisch temperatuurverloop in huiskamer, slaapkamer, op de huid en in het lichaam van een oudere vrouw tijdens de hittegolf van 2010 (Daanen et al., 2011).

Behalve de hier bovengenoemde factoren, vertonen ouderen vaak een suboptimaal gedrag tijdens hittegolven. Ouderen zijn vaak bang voor tocht, en dat betekent dat ze de ramen dicht houden in de ochtend, terwijl dat een goed moment zou zijn om te ventileren. Ook zullen ze niet snel een airconditioning aanzetten waardoor de temperatuur in huis onnodig hoog oploopt. Door hun verminderde waarneming van temperatuur neigen ze ernaar teveel kleding te dragen.

Gebaseerd op het onderzoek met ouderen in Tilburg, zijn de belangrijkste gedragsfactoren die hittegevoeligheid vergroten:

- Onvoldoende drinken
- Verhinderen ventilatie door het dichthouden van ramen
- Dragen van ongeschikte kleding
- Te veel bewegen
- Te weinig op zoek gaan naar koele plekken



Binnen CPC is ook onderzoek gedaan naar de mogelijkheid van acclimatisatie van ouderen, hetgeen neerkomt op het vergroten van het aanpassingsvermogen van de mensen zelf. Aangezien meteorologische diensten als het KNMI een hittegolf een aantal dagen van te voren kunnen zien aankomen, zou deze periode gebruikt kunnen worden om ouderen fysiek voor te bereiden op de naderende hitteperiode. Gezonde jonge mensen kunnen zich goed aanpassen aan hitte (Strydom et al., 1966). Er zijn onderzoeken geweest waarin de zweetproductie zich in zeven dagen verdubbelde, waardoor het koelvermogen van deze personen toenam. Bij ouderen was het vermogen tot acclimatisatie nog nooit onderzocht.

Aan het CPC-experiment namen acht vrouwen van boven de 75 jaar deel en acht vrouwen in de leeftijdscategorie 20-30 jaar. Onder gecontroleerde omstandigheden hebben ze een aantal dagen lang lichte oefeningen gedaan onder hoge temperaturen, om te kijken of er aanpassingen aan de hitte optraden. De oudere vrouwen hadden een beduidend lagere zweetproductie dan de jongere vrouwen, maar bij geen van beide groepen konden tekenen van acclimatisatie gemeten worden. Mogelijk is een periode van drie dagen tekort voor acclimatisatie (Daanen en Herweijer, 2015).

Bovenstaande inzichten zijn inmiddels ingebracht in het nationale hitteplan (Ministerie VWS, 2007), dat ouderen, familie van ouderen, verzorgenden en zorginstellingen richtlijnen biedt voor hittegolven. Behalve richtlijnen afgeleid van bovengenoemde kwetsbaarheidsfactoren (zoals voldoende drinken, ventileren, of het nemen van een bad of douche om af te koelen) en zorgen dat informatie hierover beschikbaar is, is een belangrijke richtlijn dat hulp aangeboden wordt. Veel bejaarden zijn niet in staat om de genoemde acties zelfstandig uit te voeren.

Hitte leidt ook tot verminderde arbeidsproductiviteit. Bij omgevingstemperaturen hoger dan 25 °C daalt de productiviteit met 2% per graad temperatuurstijging (Seppanen et al, 2004). De stijging van de buitentemperatuur zal niet voor elke sector gelijke consequenties hebben. Mensen die in de buitenlucht werken, zoals in de agrarische sector, zullen het meest direct de temperatuureffecten ervaren. Mensen die in gebouwen werken, beschikken soms over actieve koeling (airconditioning) en kunnen daarmee temperatuur en luchtvochtigheid reguleren. De verhoogde morbiditeit (ziekte) en mortaliteit (sterfte) en afnemende arbeidsproductiviteit tijdens een periode met extreme hitte hebben economische consequenties.

Voor Nederland is in het kader van CPC een model ontwikkeld waarmee hiervan schattingen gemaakt zijn (Daanen, et al. 2013). Op basis van het W+ KNMI'06-scenario (van den Hurk et al., 2006) werd een economische kostenpost geschat van ongeveer 100 miljoen Euro per jaar rond 2050 door klimaatverandering. De belangrijkste factor in de kosten is de verminderde arbeidsproductiviteit als gevolg van hitte. Deze wordt voor een deel gecompenseerd door lagere kosten van verminderde sterfte en ziekenhuisbezoek door minder koude in de winterperiode. Aangezien in Nederland meer mensen sterven van de kou dan van de hitte, leidt ieder van de KNMI'06 scenario's tot een vermindering van het aantal sterfgevallen per jaar. Voor de "warmere" scenario's neemt echter (zonder adaptatie) het aantal hittesterfgevallen toe met hogere gemiddelde temperaturen. Dezelfde relatie geldt voor het temperatuurgerelateerde ziekenhuisbezoek: netto over het jaar neemt dit af, maar in de zomerperiode neemt dit toe (Stone et al., 2013).

Omdat steden zowel ouderen als jongeren, zieke en gezonde mensen huisvesten, is hittegevoeligheid erg lokaal bepaald.

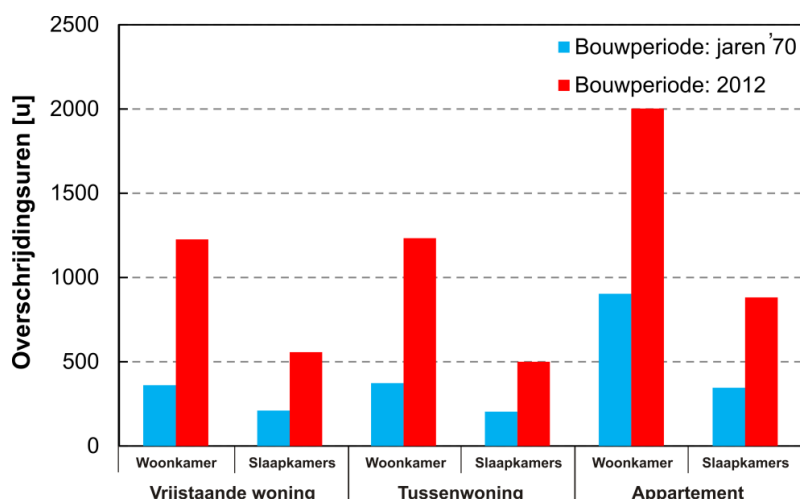




### 2.2.2 Rol van gebouwen

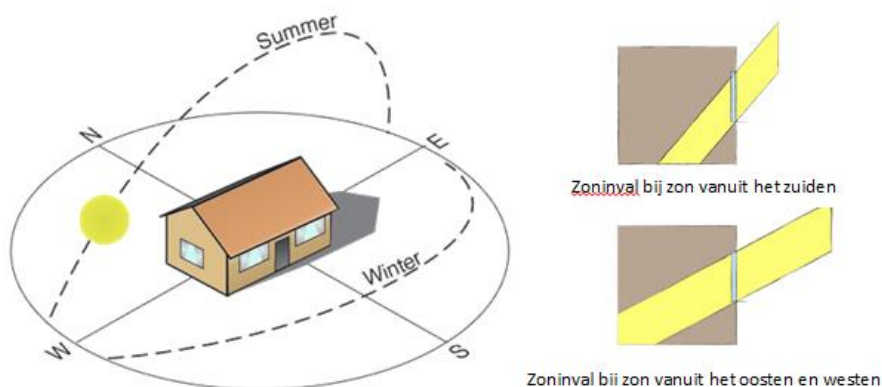
Gebouwen kunnen de blootstelling aan hitte zowel doen afnemen als toenemen. Onderzoek binnen CPC, gebaseerd op de KNMI'06 klimaatscenario's (van den Hurk et al., 2006) toont aan dat oververhitting binnenshuis bij klimaatverandering vaker zal voorkomen en langer zal duren in een groter deel van het Nederlandse residentiële gebouwenbestand (Van Hooff et al., 2014). Hierbij is oververhitting gedefinieerd als het voorkomen van binnentemperaturen die hoger zijn dan de drempelwaarden voor thermisch comfort. Deze drempelwaarde is afhankelijk van de buitentemperatuur.

Het onderzoek richtte zich op vrijstaande woningen, tussenwoningen (rijwoning) en appartementen. De numerieke simulaties werden uitgevoerd met een categorie van modellen die Building Energy Simulation software wordt genoemd (Hensen et al., 2002; Crawley et al., 2001, 2008; Costola et al., 2009). Deze simulaties geven gedetailleerd inzicht in de temperaturen die in elke ruimte van deze huizen voorkomen, gedurende elk uur van het jaar. Uit deze simulaties blijkt dat vrijstaande woningen en rijwoningen minder vaak last hebben van oververhitting dan appartementen (**Figuur 2.5**). Dit geldt zowel voor appartementen onder het dak als meer centraal gelegen in het gebouw.



*Figuur 2.5 Jaarlijks aantal oververhittingsuren voor drie typen woningen en gemiddeld over vier oriëntaties N, O, Z, W per gebouwtype (Building Energy Simulations). Per gebouwtype zijn ook twee verschillende bouwjaren en bijhorende isolatiewaarden beschouwd (1970 en 2012). De simulaties zijn uitgevoerd voor het klimaatjaar 2006 in De Bilt. Dit hittegolfjaar is een jaar dat gezien kan worden als een typisch “toekomstig” jaar met een hete zomer en verschillende hittegevolgen (van Hooff et al., 2014).*

De gebouworientatie is hierin een belangrijke factor: vensters op het oosten en westen zorgen voor een toename in oververhittingsuren door de lagere stand van de zon tijdens de zomer, waardoor er meer zonnestraling het huis binnen kan komen (**Figuur 2.6**).



*Figuur 2.6 Schematische weergave van de zonnebaan in zomer en winter. De figuur rechts laat zien dat de zon in de zomer verder de ruimte binnen komt door ramen op het oosten en westen dan door ramen op het zuiden.*



Verder warmen moderne, en dus beter geïsoleerde huizen (vaak uitgevoerd zonder buitenzonnewering) sneller op dan oudere huizen: ze hebben ongeveer 3x zoveel overschrijdingsuren (**Figuur 2.5** en **Figuur 3.2**). Meer isolatie en toch hitteoverlast lijkt een contradictie, maar dit komt door het serre-effect in combinatie met de mate van isolatie. Het serre-effect betekent dat kortgolvlige zonnestraling langs het glas makkelijk de woning binnenkomt, vervolgens wordt geabsorbeerd door de materialen in de woning, en dan terug wordt uitgezonden als langgolvlige straling. Die langgolvlige straling kan niet door glas, en deze vorm van warmte moet daarom op een andere manier (convectie en geleiding) naar buiten. Bij betere geïsoleerde woningen kan die warmte moeilijker naar buiten dan bij minder goede geïsoleerde woningen. Goed isoleren is belangrijk om warmteverlies in de winter te beperken, maar dezelfde isolatie zorgt ervoor dat in de zomer, een oververhitte ruimte minder snel afkoelt. Zonnewering (vooral buitenzonnewering) en ventilatie zijn daarom zeer belangrijk, zeker bij moderne en goed geïsoleerde woningen (Van Hooff et al., 2014) (zie ook hoofdstuk 3.2).

De rol van gebouwen kan erg verschillend zijn naargelang bouwjaar en typologie. Omdat steden bestaan uit een breed gamma aan verschillende bouwtypes, is ook hier weer hittegevoeligheid erg lokaal bepaald en adaptatie is dan ook een accumulatie van relatief kleine, lokale ingrepen.

### 2.2.3 Kwetsbaarheidskaarten voor hitte

De kwetsbaarheidskaarten die in het kader van CPC zijn opgeleverd voor de steden Amsterdam en Rotterdam<sup>20</sup> brengen de informatie over de blootstelling en gevoeligheid van mens, gebouw en omgeving, zoals in de voorgaande hoofdstukken beschreven, samen (Van der Hoeven en Wandl, 2014). Het combineren van aspecten van de gebouwde omgeving met de mensen die er verblijven biedt inzicht in aandachtsgebieden ("hotspots") en daarmee in prioritering voor beleid.

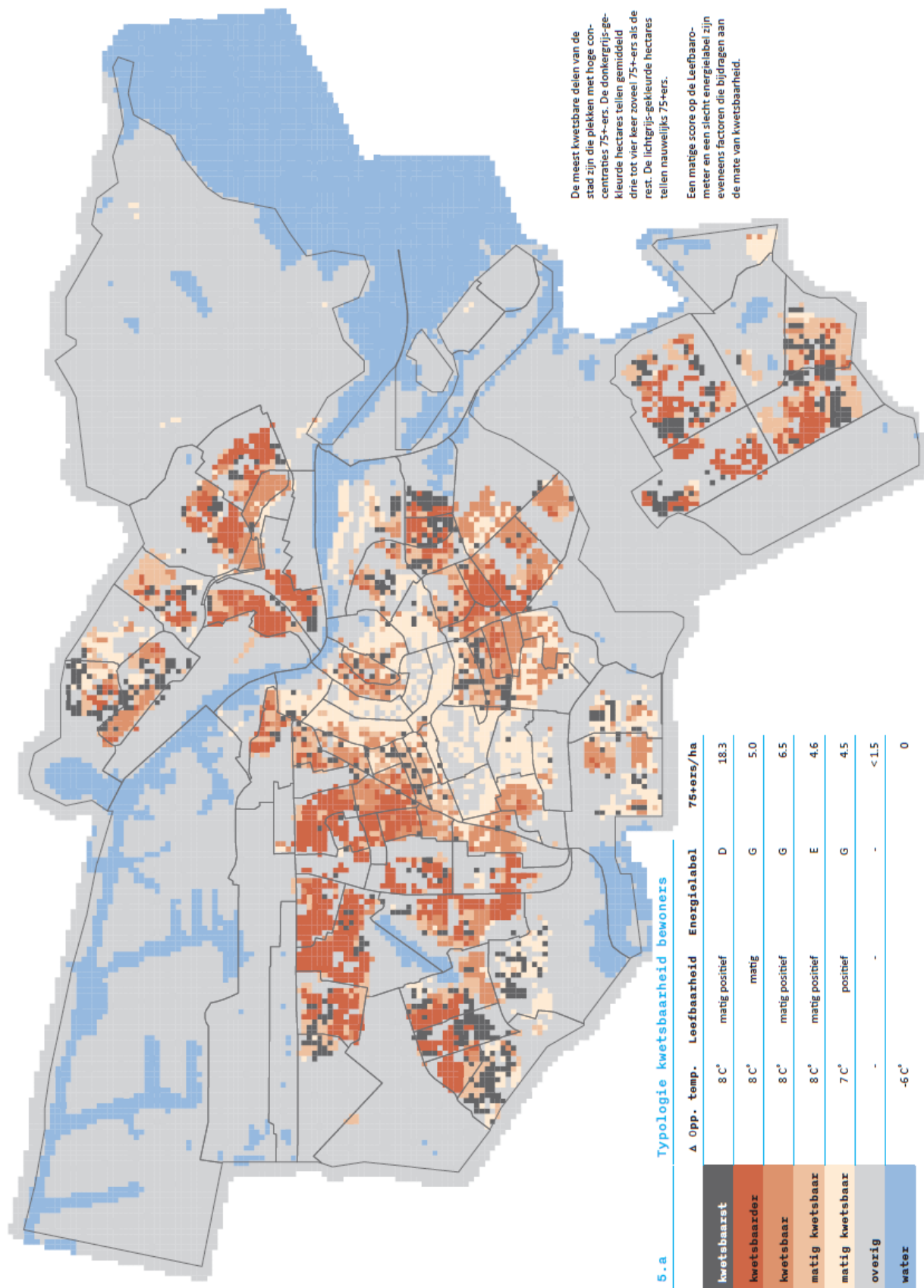
Dit levert verschillende kaarten op: **Figuur 2.7** richt zich op ouderen in Amsterdam en is gebaseerd op de oppervlaktetemperatuur, de leefbaarheid in de buurten, het gemiddelde energielabel van de woningen en het aantal 75-plussers per hectare. Omvangrijke sociale aandachtsgebieden zijn aan te wijzen in met name het westelijk deel van de stad, maar ook in Noord, Oost en Zuidoost. Het kwetsbaarste type wordt gekenmerkt door een bijzonder hoog aantal ouderen per hectare terwijl het gemiddelde energielabel matig is. Daarnaast zijn er delen van de stad waar weliswaar minder 75-plussers wonen maar waar zowel de leefbaarheid als ook het energielabel van de bebouwing te wensen overlaat.

Op basis van de oppervlaktetemperatuur, het gemiddelde energielabel en het aantal werkenden per hectare is voor Amsterdam een kwetsbaarheidskaart gemaakt voor werkenden (**Figuur 2.8**). De veronderstelling hierbij is dat werkplekken met een slecht energielabel in warme delen van de stad slecht scoren in comfort of relatief veel energie gebruiken voor koeling. Met name het historische centrum van Amsterdam (Burgwallen) verdient de aandacht. Hier komt de combinatie van een hoge werkgelegenheidsdichtheid (boven de 1000 arbeidsplaatsen per hectare) en een slechte energieprestatie van de bebouwing (energielabel G) veel voor.

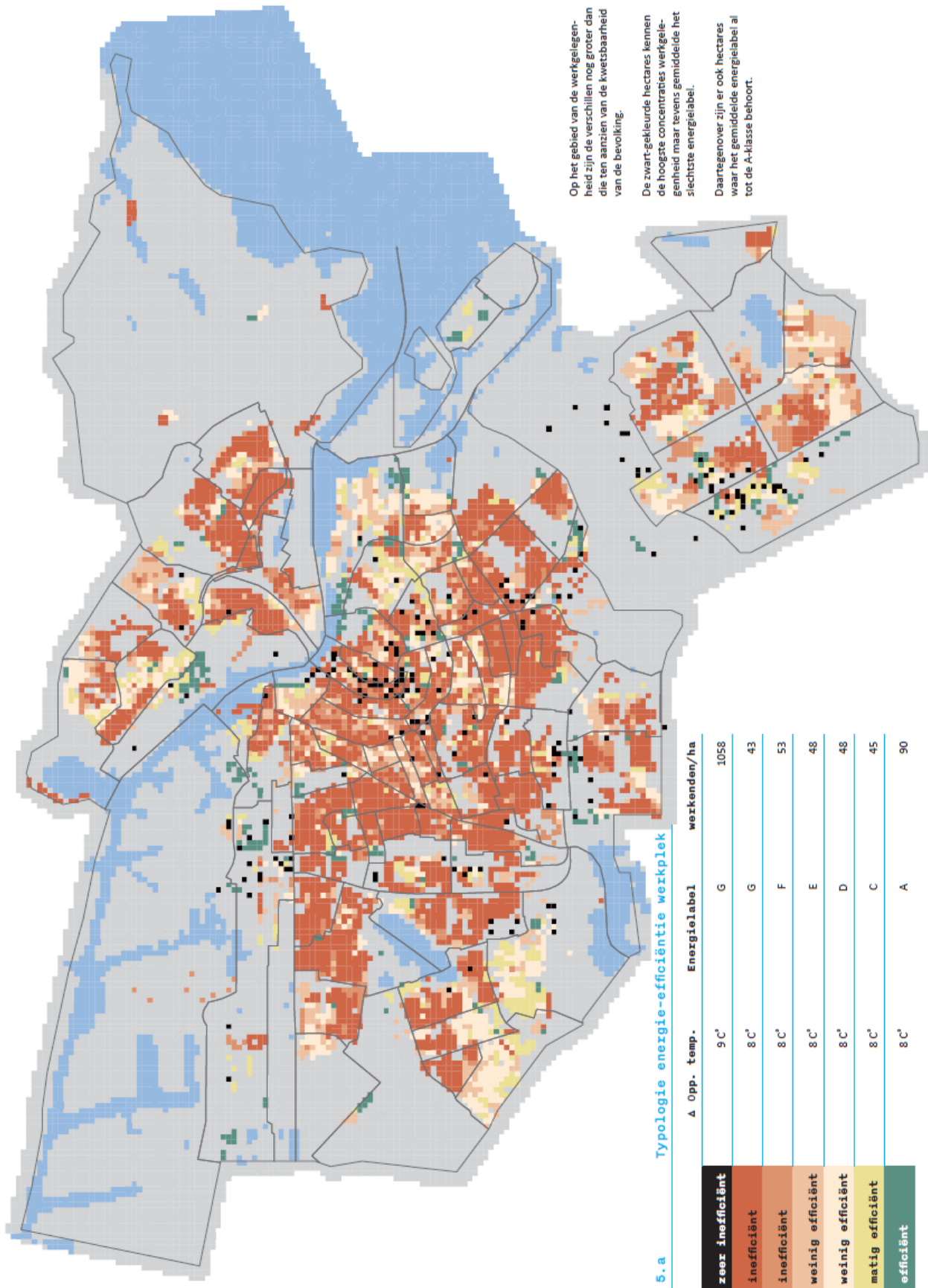
Uit beide kaarten blijkt dat de kwetsbaarheid voor hitte in een stad een grote ruimtelijke variatie vertoont. Binnen een wijk kunnen delen met hoge kwetsbaarheid (lokale "hotspots") afwisselen met minder kwetsbare stukken.

---

<sup>20</sup> De kwetsbaarheidskaart voor Rotterdam is te vinden onder Hoofdstuk 5.



Figuur 2.7 Kwetsbaarheidskaart van de bewoners van Amsterdam gerelateerd aan hittestress. (Van der Hoeven en Wandl, 2014).



Figuur 2.8 Kwetsbaarheidskaart van de werkende bevolking van Amsterdam voor hittestress (Van der Hoeven en Wandl, 2014).



## 2.3 Wateroverlast

De gevoeligheid voor wateroverlast op straat kan met rekeninstrumenten als 3Di (zie 2.4.1) in kaart worden gebracht. Aan de uitkomsten van deze modelberekeningen kunnen kaartlagen worden toegevoegd die de potentiële schade in beeld brengen, volgens het model van een contextuele kwetsbaarheidsanalyse. Voor wateroverlast op straat is ook een uitkomsten-(kwetsbaarheids)analyse mogelijk op basis van de knikpuntenmethode (of 'Adaptation Tipping Point'-methode) (Kwadijk et al, 2010; Veerbeek en Husson, 2013). Een knikpunt is het moment waarop de mate van klimaatverandering zodanig is dat de huidige strategie of beleid niet langer zijn doelen haalt. Op dat moment is ander beleid nodig. De knikpuntenmethode houdt rekening met klimaatonzekerheid, maar zonder afhankelijk te zijn van (steeds nieuwe) klimaatscenario's. Als verkenning is deze methode binnen CPC toegepast op Rotterdam-Noord en Nijmegen (2.3.2). Belangrijke input voor de knikpunten-methode is informatie over de schadegevoeligheid van het stedelijk systeem en drempelwaardes. Hier is binnen CPC apart onderzoek naar gedaan (2.3.1).

### 2.3.1 Schadegevoeligheid en drempelwaardes

Een stad heeft veel verhard oppervlak waardoor er sneller water op straat blijft staan bij piekbuien. Ook in de zomer van 2014 hebben verschillende stedelijke gebieden in Nederland te kampen gehad met wateroverlast waarbij zich schade aan gebouwen voordeed en de brandweer moest uitrukken om kelders, tunneltjes en wegen die geblokkeerd waren voor verkeer leeg te pompen. Door toenemende verharding in het stedelijk gebied, het frequenter voorkomen van extremere neerslag en achterstallig onderhoud worden de ontwerpnormen<sup>21</sup> steeds vaker overschreden. In ruim 90% van de gemeenten treedt nu al wateroverlast op, hoofdzakelijk op een enkele locatie (Luijtelaar, 2008). De kans op extreme neerslag neemt toe door klimaatverandering en kan ervoor zorgen dat stedelijke afwateringssystemen vaker zullen falen. Maar wellicht even belangrijk is de toegenomen schadegevoeligheid van het stedelijk systeem. Door de intensievere en duurdere inrichting van de stedelijke omgeving kan wateroverlast ook meer schade aanrichten dan enkele decennia geleden. Stedelijke gebieden zijn ook om die reden kwetsbaarder geworden voor wateroverlast.

Schadefuncties die de gevolgen van wateroverlast kwantitatief beschrijven zijn een hulpmiddel voor gemeentes om na te gaan welke elementen in de stad het gevoeligst zijn voor wateroverlast. Vervolgens kan worden gekeken welke maatregelen het meeste bijdragen aan het reduceren van de overlast en de schadegevoeligheid. In het kader van het CPC is een eerste versie schadefuncties ontwikkeld die de gevolgen van wateroverlast beschrijven (Stone et al., 2013) .

Uit onderzoek van Spekkers et al. (2012) naar de relatie tussen neerslagintensiteit en schade aan gebouwen en interieur, blijkt dat de variatie in schade niet alleen verklaard kan worden met neerslagkarakteristieken. Ook andere verklarende variabelen zoals gebouwkarakteristieken en eigenschappen van het rioolsysteem kunnen een rol spelen. De door CPC ontwikkelde functies beschrijven de schades in relatie tot verschillende variabelen zoals optredende waterdiepte, de duur van de wateroverlast of de aanwezigheid van kelders.

---

<sup>21</sup> Van oudsher is de riolering ontworpen op een ontwerpbeurt die naar verwachting eenmaal per 2 jaar voor zal komen. Dat wil zeggen dat één keer per twee jaar een bui mag optreden waardoor (nog net geen) water op straat ontstaat. Voor oppervlaktewater in stedelijk gebied wordt een frequentie van overstroomingen gehanteerd van maximaal eenmaal per 100 jaar.



De eerste versie schadefuncties hebben als gemeenschappelijk kenmerk een drempelwaarde (threshold) voor de waterdiepte vanaf waar schade begint op te treden. Tot deze waterdiepte treedt geen schade op. Deze drempelwaarde geeft al inzicht in de gevoeligheid van de verschillende stedelijke elementen. Een stedelijk element met een lage drempelwaarde zal eerder schade ondervinden dan een element met hoge drempelwaarde. Water op straat is de eerste overlast die zich voordoet en bij een waterdiepte van 30 cm ontstaat ernstige hinder voor het autoverkeer ter plaatse. Vooral in gebieden met meer reliëf of depressies (bijvoorbeeld tunneltjes) is deze waterdiepte snel bereikt. Echter, hinder voor verkeer- en vervoerstromen treedt pas op wanneer alternatieve routes weinig tot niet beschikbaar zijn.

Ook elektriciteitsvoorzieningen kennen een drempelwaarde vanaf 30 cm maar deze voorzieningen staan vaak hoger op de stoep tegen de gevels van gebouwen en op deze locaties wordt niet snel een waterdiepte van 30 cm bereikt. Daarentegen wordt aangenomen dat een gebouw met een kelder al vol loopt zodra het water de gevel bereikt. Voor een gebouw zonder kelder blijkt de dorpel vaak een extra drempel te vormen. Water in gebouwen zorgt voor een aanzienlijke schade aan huizen en, in geval van een commerciële gebouw, ook kans op tijdelijke bedrijfsuitval.

De resultaten tonen dat vooral het overstromen van gebouwen (met name kelders) en verkeershinder hogere schades tot gevolg kunnen hebben. Ook de kosten die door de brandweer gemaakt moeten worden zijn aanzienlijk, aangezien deze in geval van wateroverlast altijd ter plekke is. Schades aan elektriciteitsvoorzieningen komen niet zo vaak voor maar hebben wel verstrekkende gevolgen. Een samenvatting van de drempelwaardes en reikwijdte aan neerslagschade is opgenomen in **Tabel 2.1**.

Tabel 2.1 Samenvatting van de drempelwaardes en reikwijdte aan neerslagschade (Stone et al., 2013)

Impact	Urban aspect	Threshold (m)	Average costs per unit (euros 2012) ((min - max)	Unit
<b>Material damage</b>	Houses and interior	0 (basement) 0.1 (w/o basement)	Content : 750 - 1750 House: 400 - 1200	House per event
	Electricity supply	0.3 (low tension) 0,35 (street lights) 0,5 (middle tension)	5000 55.000,	Substation Street light per event
<b>Economic damages</b>	Business interruption	0 (basement) 0.1 (w/o basement)	5,- - 2000,- (2010)	Business per hour
	Traffic disruption	0.3	Transport: 10 – 40 Personal: 1,50 – 6 Commuter traffic: 2 – 8,5 Business traffic: 7,5 – 30 (2006)	Vehicle per 15 – 60 min
	Electricity failure	0.3 (low tension) 0,5 (middle tension)	Households: 0 – 80 Businesses: 80 – 2500 (based on legal compensation)	Per event 1 – 8 hour
<b>Emergency assistance</b>	Fire brigade	0 (house with basement) 0.3 (roads)	250 - 1000	Per turn-out
<b>Social disruption</b>	Accessibility health facilities	0 (basement) 0.1 (w/o basement) 0.3 (roads)	-	Per health facility



Niet in de beschouwing meegenomen zijn de schadelijke effecten van water op straat voor de volksgezondheid. Recent onderzoek (De Man en Leenen, 2014; Sales Ortells en Medema, 2014) geeft aan dat de hoeveelheid ziekteverwekkers in 'water op straat' dermate hoog is dat dit een bedreiging is voor de volksgezondheid. In andere sectoren zijn er rekenmodellen om de gezondheidsrisico's om te zetten een schadefunctie (Kemmeren et al., 2006), maar deze zijn in water (nog) niet toegepast.

De schadegevoeligheid van het stedelijk gebied kan verlaagd worden door de waterdiepte vanaf waar een stedelijk element schade ondervindt te verhogen. Veerbeek en Husson (2013) hebben aangetoond dat een kleine verhoging in dorpelhoogte een groot effect heeft op de schadegevoeligheid van gebouwen. Maar ook het verlagen van de waterdieptes door bijvoorbeeld de straatprofielen aan te passen – te verdiepen - kan hieraan bijdragen. Ook het reduceren van de overlastduur en opruimtijd, vooral waar het wegen en commerciële gebouwen betreft, dragen bij aan het verlagen van de schadebedragen. En met het verminderen van wateroverlast worden altijd de kosten voor uitrukken van de brandweer verlaagd.

### 2.3.2 Kwetsbaarheidskaarten voor wateroverlast

Om te zien of de knikpuntenbenadering geschikt is als kwetsbaarheidsanalyse, is deze in CPC als verkenning toegepast op twee locaties en geanalyseerd met een SWOT<sup>22</sup>-analyse (Veerbeek en Husson, 2013). Deze tests moeten worden gezien als proof-of-concepts, en niet als onderbouwde kwetsbaarheidsanalyses. Hieronder wordt als voorbeeld de case Rotterdam-Noord toegelicht.

De knikpuntenmethode tracht inzicht te geven in het moment waarop een systeem of beleid niet meer voldoet aan een vooraf bepaalde doelstelling of norm voor een reeks toekomstscenario's. De methodiek kan bijvoorbeeld worden gebruikt om in te schatten tot wanneer het huidige hoogwaterbeschermingsbeleid voldoet onder een reeks van scenario's voor klimaatverandering maar ook op kleinere schaal om te onderzoeken tot wanneer een lokaal rioleringsstelsel voldoet aan de gestelde norm bij scenario's voor een veranderend aantal gebruikers of een intensivering van de regenval.

De methodiek is in essentie een gevoeligheidsanalyse waarbij onzekerheden worden ondergebracht in scenario's. Allereerst worden een serie indicatoren gedefinieerd, de daarbij behorende meetmethodiek en de resulterende drempelwaarden die de doelstelling of norm operationaliseren. De indicatoren en drempelwaarden waarvoor de knikpunten worden bepaald op basis van geldende normering of worden in overleg met stakeholders geformuleerd en, afhankelijk van de lokale situatie en ambitie. De indicatoren die voor Rotterdam-Noord zijn gekozen zijn het percentage ondergelopen gebouwen en verkeershinder en wegen in het gebied (zie **Figuur 2.8**) waarbij dus vorm wordt gegeven aan een bredere invulling van wateroverlast ten opzichte van het simpelweg niet accepteren van inundatie.

Drempelwaarden zijn gedefinieerd voor een aantal standaardbuien met verschillende herhalingstijden, waarbij bijvoorbeeld voor een bui die tweemaal per jaar voorkomt het percentage ondergelopen huizen kleiner moet zijn dan 0,1% (hierbij wordt rekening gehouden met drempelhoogtes van entrees). Zo kunnen dus meerdere indicatoren gebruikt worden op basis van verschillende criteria, meetmethodieken en drempelwaarden binnen eenzelfde analyse.

---

<sup>22</sup> Strength-Weakness-Opportunity-Threat



Rainfall event	Return period	Threshold
Bui 8 (T=1/2 year)	2 years	Percentage of flooded houses in neighbourhood < 0,1% Percentage of flooded commercial buildings < 0,1 % Traffic nuisance index = 10%
Bui 50 (T=1/50 year)	50 years	Percentage of flooded houses in neighbourhood < 0,5% Percentage of flooded commercial buildings < 0,5% Traffic nuisance index = 30%
Bui 100(T=1/100 year)	100 years	Percentage of flooded houses in neighbourhood < 1% Percentage of flooded commercial buildings < 1% Traffic nuisance index = 35%

Figuur 2.8 Gekozen drempelwaardes voor Rotterdam-Noord

Door middel van een kwantitatief model worden vervolgens de prestaties van het systeem berekend, op basis van zowel de ontwerpwaarde (bijv. een regenbui met een herhalingstijd van 2 jaar) als een serie toenames van de meest bepalende variabelen (bijv. +5%, 10%, etc.). Deze toenames worden gerelateerd aan een serie scenario's waarbij de waardes worden uitgezet in de tijd, bijvoorbeeld een 5% en 10% toename van de rivierafvoer wordt bereikt in 2040 & 2070 in klimaatscenario A, en in 2060 & 2100 in klimaatscenario B. In de volgende stap wordt bekeken bij welke toename de drempelwaarde wordt bereikt. Aangezien de toenames zijn gerelateerd aan de scenario's, kan voor ieder scenario worden bepaald wanneer de drempelwaarde wordt bereikt: de zogenaamde knikpunten. Voor Rotterdam Noord zijn deze geïllustreerd in **Figuur 2.9** op basis van de G en W KNMI'06 klimaatscenario's. **Figuur 2.10** laat zien welke gebouwen in elk scenario onder zullen lopen. Dit blijken vaak individuele gevallen te zijn en geen groepen gebouwen.

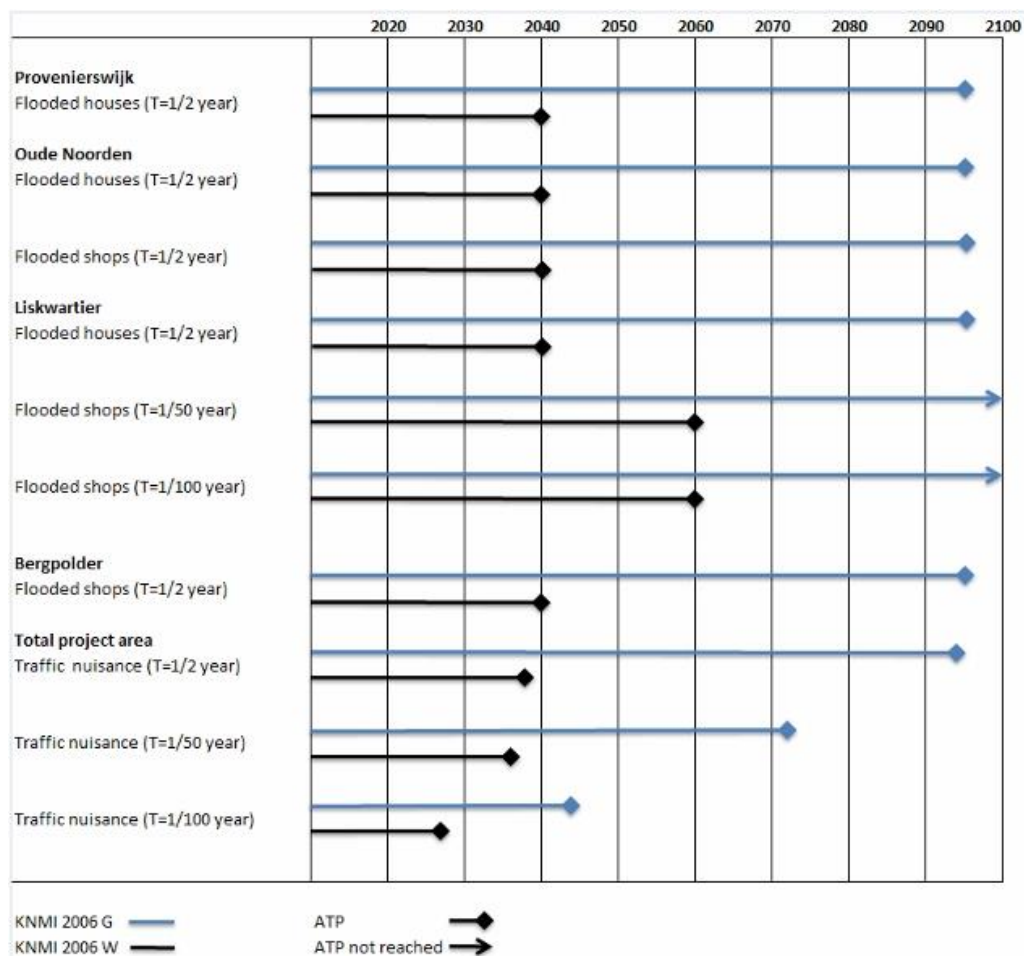
**Figuur 2.9** toont aan dat zowel onder het G als W KNMI'06-scenario geen knikpunt wordt bereikt vóór 2028 (verkeersoverlast Bergpolder, voor Bui van T=50). Voor veel andere indicatoren echter, lijkt het knikpunt onder het W scenario worden bereikt in 2040. Onder G-scenario echter, schuiven de meeste knikpunten op voorbij 2090.

In dit voorbeeld zou deze informatie de gemeente vertellen dat er geen urgente maatregelen nodig zijn en dat de kwetsbaarheid redelijk gelijk is verdeeld tussen de wijken. Veerbeek en Husson (2013) tonen in hun rapport aan dat de resultaten voor de Provenierswijk, het Liskwartier en Bergpolder karakteristiek zijn voor Rotterdam Noord. Vanwege het relatief uniforme karakter van de wijk, zijn er geen hotspots waar maatregelen met extra urgentie moeten worden genomen. Dit is echter niet overal het geval. Voor het case-studiegebied in Nijmegen, dat gekarakteriseerd wordt door meer hoogteverschil, zijn voor het gebied Benedenstad de knikpunten zelfs binnen de huidige condities reeds bereikt.

Vaak worden naast het huidige beleid en bijbehorende systeem (bijv. rioleringsstelsel) ook de knikpunten voor alternatieven berekend. Afhankelijk van de implementatieperiode en de aansluitingsmogelijkheden op het huidige systeem, kunnen zo adaptatiepaden worden gedefinieerd. Deze zogenaamde 'adaptation tipping point method', faciliteert dus flexibele adaptatiestrategieën die hanteerbaar zijn onder verschillende scenario's.

Een belangrijk aspect in de evaluatie van wateroverlast in de stedelijke omgeving is een beter begrip van de kwetsbaarheden. Naast het mogelijk onderlopen van gebouwen en wegen, is het van belang inzicht te krijgen in de kwetsbaarheid van vitale objecten, netwerken en locaties waar grote groepen mensen aanwezig zijn (bijv. kinderdagverblijven of zorgcomplexen). Inzicht in de relatie tot indirecte schades (bijvoorbeeld bedrijfsuitval) is daarbij essentieel, waardoor verdere inventarisatie van kritieke infrastructuur in met name de elektriciteitsvoorziening steeds belangrijker wordt.





Figuur 2.9 De berekende knikpunten (Adaptation Tipping Points, ATP's) voor Rotterdam Noord. De bovenste lijnen bij Provenierswijk geeft bijvoorbeeld aan dat het knikpunt voor ondergelopen woningen wordt bereikt in 2095 onder het KNMI'06 G-klimaatscenario (blauwe lijn) en in 2040 in het W-scenario (zwarte lijn) (Veerbeek en Husson 2013). NB: dit is een Proof-of-Concept, geen onderbouwde kwetsbaarheidsanalyse.



Figuur 2.10 Kaart van Rotterdam-Noord met daarin de gebouwen die minimaal eens per twee jaar onderlopen (Veerbeek en Husson, 2013). NB: dit is een Proof-of-Concept, geen onderbouwde kwetsbaarheidsanalyse.



## 2.4 Tools voor beleidsmakers

Om de stedelijke omgeving meer klimaatrobuust in te richten en effectieve pakketten van maatregelen samen te stellen zijn binnen en in aansluiting op het Climate Proof Cities programma een aantal tools ontwikkeld. Belangrijke drijfveer voor deze ontwikkeling was het onderdeel Nieuwbouw en Herstructurering van het Deltaprogramma. In dat kader zijn handreikingen, procedures en hulpmiddelen ontwikkeld en publiek beschikbaar gesteld<sup>23</sup>. Gemeenten, waterschappen en andere belanghebbende partijen worden door deze procedures en tools gefaciliteerd bij het klimaatbestendiger inrichten van hun gebieden, objecten en netwerken. Onderstaand worden een aantal tools toegelicht.

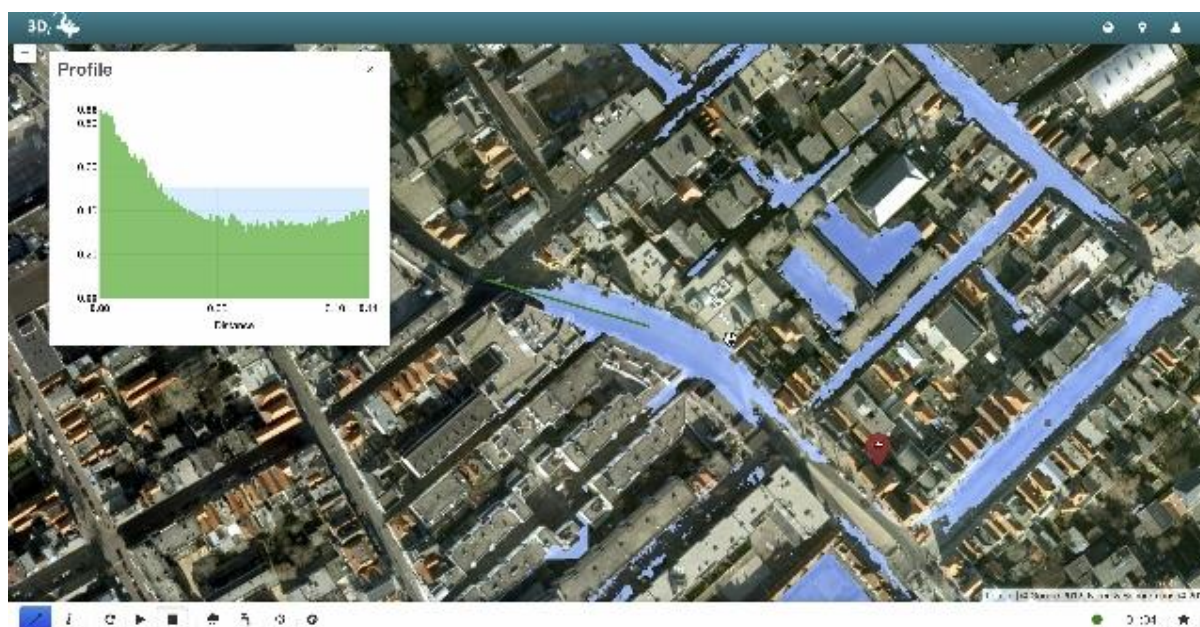
### 2.4.1 3Di gebiedsmodel voor wateroverlast en overstrooming

CPC heeft bijgedragen aan de ontwikkeling van het 3Di gebiedsmodel. Met 3Di kan heel snel, nauwkeurig en gedetailleerd in kaart worden gebracht waar, in welke mate en hoe snel extreme neerslag leidt tot wateroverlast en overstrooming (**Figuur 2.11**). Aan de hand van het zeer gedetailleerde hoogtebestand AHN2 wordt zichtbaar hoeveel water er op wegen, terreinen en tuinen komt staan en waar dit water naar toe gaat stromen. Desgewenst kan dit in 3Di worden gevisualiseerd; virtueel kan met een helikopter over het gebied worden gevlogen om te zien waar de problemen zich concentreren. Zo kan ook worden nagegaan of vitale en kwetsbare objecten, netwerken en groepen door de overlast worden getroffen.

Een 3Di gebiedsmodel is te gebruiken voor een bureaustudie om de kwetsbare plekken te identificeren maar ook als interactief instrument in workshops om te onderzoeken wat de effectiviteit is van bepaalde adaptatiemaatregelen, zie 3.6.2).

Betrokken CPC partner: Deltares.

Meer info: <http://www.3di.nu/>



Figuur 2.11 Screenshot van een kwetsbaarheidsanalyse met het 3Di-gebiedsmodel.

<sup>23</sup> <http://www.ruimtelijkeadaptatie.nl/>



#### **2.4.2 HitteDroogte Stress Model**

Om de eerste fase van beleidsontwikkeling bij gemeenten en waterschappen te ondersteunen, zijn partners in CPC een quickscan-tool aan het ontwikkelen die snel inzicht biedt in gebieden die kwetsbaar zijn voor hitte- en droogtestress, zowel ten aanzien van de blootstelling als de schadegevoeligheid. Ook kan met het model indicatief de effectiviteit van adaptatiemaatregelen worden bepaald. De resulterende hitte/-droogtekaarten geven een zeer gedetailleerde input voor het prioriteren van acties voor klimaatbestendige steden.

Betrokken CPC partners: TNO, Deltares, Wageningen University.



## 2.5 Conclusie

Met betrekking tot de kwetsbaarheid van de bebouwde omgeving heeft het CPC-programma de volgende conclusies opgeleverd:

- De kwetsbaarheid van onze bebouwde omgeving is afhankelijk van de blootstelling, de (schade)gevoeligheid en het aanpassingsvermogen ervan. Het CPC onderzoek heeft zich gericht op de blootstelling (hoofdstuk 1) en gevoeligheid (hoofdstuk 2) voor hitte en wateroverlast.
- De meest gevoelige mensen voor hitte-gerelateerde ziekten en sterfte zijn ouderen boven de 75 en chronisch zieken. Ouderen vaak een suboptimaal gedrag tijdens hittegolven, gedragsfactoren (drinken, kledij, ventileren, bewegen) kunnen de hittegevoeligheid sterk beïnvloeden. Acclimatisatie aan hitte werd niet waargenomen voor periodes tot drie dagen.
- Voor blootstelling aan hitte kan een onderscheid gemaakt worden tussen twee schillen rond de kwetsbare personen of objecten: de eerste schil (gebouw, infrastructuur) en de tweede schil (wijk, stad).
- Hittestress en wateroverlast hebben serieuze gevolgen voor de volksgezondheid en andere consequenties. Wateroverlast is het meest in het oog springend en leidt het snelst en meest direct tot schade. Droogte en hitte zijn meer processen van de lange(re) adem, maar kunnen ook tot vermindering van de leefkwaliteit en enorme schade leiden.
- Gebouwen kunnen de blootstelling, en daarmee de kwetsbaarheid, aan hittestress verminderen. Nieuwbouwwoningen zijn gevoeliger voor hittestress dan oude woningen. Door de betere isolatiewaarden wordt de warmte, als deze eenmaal de woning is binnengekomen, langer vastgehouden. De aanwezigheid van buitenzonwering en spui- of piekventilatie kan een cruciale rol spelen om de opwarming in woningen in het algemeen, en in nieuwbouwwoningen in het bijzonder, te beperken.
- Appartementen warmen sneller op dan rijwoningen en vrijstaande woningen.
- De oriëntatie van gebouwen/gevelopeningen is een belangrijke factor die de mate van overlast door hitte sterk kan beïnvloeden. Een oriëntatie van de gevelopeningen op het oosten-westen zal leiden tot meer oververhitting dan een oriëntatie op het noorden-zuiden.
- De indirecte en vervolgschade door verlies aan arbeidsproductiviteit door hittestress, extra kosten van brandweerinzet bij wateroverlast en dergelijke zijn vaak zeer aanzienlijk en zeker niet verwaarloosbaar;
- Tot op een bepaalde hoogte – letterlijk en figuurlijk – kan waterschade worden voorkomen door de drempelwaarde te verhogen en de gevoeligheid van objecten te reduceren; essentieel is dat ook maatregelen worden getroffen die de schade beperken wanneer deze drempelwaarde wordt overschreden.
- Kwetsbaarheidskaarten voor hitte voor Amsterdam en Rotterdam tonen een grote ruimtelijke variatie van de kwetsbaarheid voor hitte in de stad.
- De kwetsbaarheid is zeer lokaal bepaald door de grote ruimtelijke variatie in blootstelling aan hittestress en wateroverlast en door de locatie van gevoelige bevolkingsgroepen en objecten. Vooral vitale en kwetsbare objecten, netwerken en groepen (ziekenhuis, winkelcentrum, transformatorhuisjes, tunnels, kelders, elektriciteit, wegen, telefoon, ouderen, , ) leiden tot lokaal zeer schadegevoelige plaatsen in het stedelijk gebied;



### 3 Welke maatregelen kunnen genomen worden om steden beter aan te passen aan het klimaat?

#### Samenvatting

Er zijn veel en diverse maatregelen beschikbaar om de klimaatbestendigheid van een stad te vergroten. Het Climate Proof Cities (CPC) onderzoek heeft zich gericht op maatregelen die wateroverlast door extreme regenval of hittestress voorkomen of verminderen. Omdat beide thema's met elkaar verbonden zijn, heeft een integrale aanpak de voorkeur: water uit natte perioden zou bijvoorbeeld niet moeten worden afgevoerd, maar worden geborgen en benut voor droogte- en, via verdamping, voor hittebestrijding. Meer groen heeft een positief effect op beide klimaataspecten. Bij de implementatie van maatregelen is het effect op andere beleidsthema's, zoals klimaatmitigatie, biodiversiteit of luchtkwaliteit dikwijls een belangrijk argument. Omdat de kwetsbaarheid voor klimaateffecten lokaal is bepaald, is de keuze voor maatregelen ook afhankelijk van de lokale context. Meer generieke ontwerprichtlijnen voor 3 schaalniveaus zijn:

#### Gebouw

Zoals in hoofdstuk 2 ook al aan de orde is geweest, is de oriëntatie van een gebouw erg belangrijk; ramen op het zuiden bieden in alle seizoenen het beste binnenklimaat. Ook het toepassen van beweegbare buitenzonwering en het extra ventileren van de woning als de buitentemperatuur lager is dan de binnentemperatuur zijn effectieve maatregelen en kunnen ook opwarming in moderne, goed geïsoleerde woningen bijna volledig voorkomen.

Verder kunnen gebouweigenaren wateroverlast helpen voorkomen door zoveel mogelijk regenwater op te vangen, bijvoorbeeld in een tank of waterzak, of de grond om het gebouw te ontharden zodat het water in de bodem kan infiltreren. Het opvangen water kan worden gebruikt voor bijvoorbeeld toiletspoeling of koeling. Waterberging op kleine schaal is echter relatief duur. Traditionele groene daken, zonder vertraagde afvoer, bieden slechts in beperkte mate capaciteit voor waterberging en hebben weinig isolerend effect voor het gebouw eronder (vanwege de goede isolatiewaarde van moderne gebouwen) en weinig koelend effect op de omgeving. Een "polderdak" met vertraagde afvoer (groen of blauw) is vanuit het oogpunt van waterberging effectiever.

#### Van straat tot wijk

Het toepassen van meer groen in de straat is een goede maatregel tegen het hitte-eilandeffect. Straatbomen zijn het meest effectief in het reduceren van de lokale buitentemperatuur door de combinatie van schaduwwerking en verdampingskoeling. Het type en de plaatsing van de bomen ten opzichte van de zon en windrichting is daarbij belangrijk. Indien de straat van voldoende schaduwelementen is voorzien, is de straat idealiter minimaal 2x zo breed dan de gebouwen hoog zijn om een goede ventilatie te bewerkstelligen. Ook op straat- of wijkniveau kan wateroverlast worden voorkomen door regenwater op te vangen en op te slaan. Omdat het hier om grotere volumes gaat dan op gebouwniveau, zal de berging ook groter moeten zijn. Oplossingen zijn waterpleinen of ondergrondse opslag. Dat laatst maakt hergebruik van water weer mogelijk.

#### Stad en regio

Tijdens hittegolven maken bewoners dankbaar gebruik van stadsparken voor verkoeling. Tijdens hete zomerdagen kan het in de parken gemiddeld 2 °C koeler zijn dan de stad en 5 °C koeler dan het buitengebied (uitgedrukt in thermisch comfort) waardoor het echte cool islands zijn.. Door voldoende parken aan te leggen met verschillende microklimaten kunnen burgers plekken opzoeken waar zij zich comfortabel voelen.



De parken kunnen tegelijkertijd dienen als waterbuffer tijdens piekbuien. Om de waterbergingsfunctie te vergroten kunnen elementen worden ingezet, zoals wadi's, infiltratiegreppels, -kratten en -putten, en maaiveldaanpassingen. Bij open waterberging moet wel rekening worden gehouden met de kwaliteit van het water en mogelijke gezondheidseffecten. Verder kunnen coolspots net buiten de stad worden gecreëerd die voor koele lucht in de stad kunnen zorgen.

Kijkend naar deze ontwerprichtlijnen lijkt adaptatie een accumulatie te zijn van relatief kleine, lokale ingrepen. Door al in de planfase rekening te houden met deze richtlijnen en beschikbare adaptatiemaatregelen, kan worden meegekoppeld met onderhouds- en renovatiemomenten en kunnen de meerkosten worden beperkt.

## 3.1 Inleiding

### 3.1.1 Categorisering van klimaatadaptatie

Omdat de kwetsbaarheid erg lokaal bepaald is, zal adaptatie ook afhangen van de lokale context. Er is een scala aan adaptatiemaatregelen beschikbaar, maar welke maatregelen tegen wateroverlast en stedelijke opwarming zijn effectiever ten opzichte van andere en welke maatregelen zijn het best in te passen in een bepaalde stedelijke context? Dit is de centrale vraagstelling van dit hoofdstuk in het Climate Proof Cities (CPC) programma en sluit aan bij de stap 'Willen' van de 'Handreiking Ruimtelijke Adaptatie'<sup>24</sup>.

Opwarming in en rondom stedelijke agglomeraties was tot dusverre in Nederland nog tamelijk onontgonnen en onverklaard, waardoor in de gepresenteerde onderzoeken veel aandacht is gegaan naar de effecten van maatregelen op warmte in de stad. Waterbeheer in stedelijk gebied heeft een veel langere voorgeschiedenis en er is veel meer kennis over beschikbaar. Het inrichten van een stedelijk watersysteem dat piekbuien direct kan afvoeren via het riool is echter technisch gezien misschien mogelijk, maar uit financieel oogpunt niet wenselijk. Een afwegingskader waarin ook alternatieve opties worden beschouwd is hier belangrijk.

Bovendien kunnen tal van geschikte maatregelen om wateroverlast in stedelijk gebied te bestrijden leiden tot toename van verdroging en hitte-stress in datzelfde gebied. Maatregelen om steden beter aan te passen aan het klimaat moeten er daarom op gericht zijn het wateroverschot zo langzaam af te voeren dat er voldoende water aanwezig is om droge en warme perioden probleemloos te overbruggen. Ook is het belangrijk om te kijken in hoeverre adaptatiemaatregelen kunnen bijdragen aan het mitigatievraagstuk of aan andere beleidsthema's. Aanpassen van steden aan het (veranderende) klimaat vereist daarom in de meeste gevallen een integrale probleemaanpak.

In dit hoofdstuk geven we een overzicht van adaptatiemaatregelen die in het CPC-programma zijn onderzocht op 3 schaalniveaus: gebouw (3.2), van straat tot wijk (3.3) en stad & regio (3.4). Van een aantal maatregelen wordt een korte beschrijving gegeven van hun werking en effectiviteit ten aanzien van wateroverlast en/of hittestress. De volledige analyses zijn te vinden in de diverse rapporten en publicaties waar in de tekst naar wordt verwezen. Tenslotte worden voor elk schaalniveau ontwerprichtlijnen uiteengezet. Klimaatverandering gaat geleidelijk over een periode van tientallen jaren. Dat biedt de mogelijkheid om maatregelen gefaseerd en tegen geringe meerkosten mee te koppelen met activiteiten als onderhoud, renovatie, nieuwbouw en herstructurering, en stadsontwikkeling (3.5). Het laatste hoofdstuk tenslotte biedt een overzicht van beschikbare of in ontwikkeling zijnde tools die helpen bij het vormgeven van de adaptatiestrategie.

<sup>24</sup> <http://www.ruimtelijkeadaptatie.nl/>



### 3.1.2 Beschrijving van de maatregelen

Er zijn heel veel verschillende aanpassingen aan een veranderend klimaat mogelijk in stedelijk gebied. Deze lopen uiteen van het aanpassen van de klimaathuishouding (water en temperatuur) en het aanpassen van gebouwen en infrastructuur tot het aanpassen van menselijk gedrag en het vergroten van de acceptatie van optredend ongemak. Ook de kosten van de maatregelen die worden genoemd kunnen sterk uiteenlopen, zowel de kosten van aanleg als die van beheer en onderhoud. Ook de partij(en) die deze kosten dragen en de baten genieten verschillen sterk per maatregel. Aangezien adaptatiemaatregelen in een stedelijke omgeving divers en veelal context bepaald zijn, moet de kosten-baten analyse vanuit de lokale situatie worden opgebouwd. Voor een gebiedsgerichte benadering, waarin de nadruk ligt op co-benefits, is echter een uitsplitsing van de kosten die specifiek voor klimaatadaptatie gemaakt worden, minder nodig.

Belangrijke aspecten die de geschiktheid van een maatregel bepalen zijn het primaire doel van de maatregel, de effectiviteit, de inzetbaarheid. In de overzichtstabel aan het begin van elk schaalniveau wordt met letters en symbolen aangegeven hoe de maatregel scoort op deze eigenschappen.

#### *Doel*

Het CPC onderzoek heeft zich gericht op maatregelen die hittestress (H) of het optreden van of de schade ten gevolge van wateroverlast door extreme regenval (W) voorkomen of verminderen. Sommige maatregelen, zoals groen, hebben effect op beide klimaataspecten (H/W).

Alle hittemaatregelen die beschreven worden zijn erop gericht om de blootstelling van de mens aan hoge (comfort)temperaturen te verminderen. De gevoeligheid van mensen voor hittestress is een intrinsieke eigenschap. Ook alle maatregelen die in dit hoofdstuk worden benoemd om wateroverlast te voorkomen zijn gericht op het verminderen van de blootstelling. Er zijn wel maatregelen die de schadegevoeligheid van een stedelijk element kunnen verlagen, zoals het verhogen van de drempel van een gebouw of een elektriciteitskast hoger plaatsen of waterproof maken, maar deze maatregelen zijn niet binnen CPC onderzocht (zie ook hoofdstuk 2 en Van de Ven et al. (2009)). Binnen CPC is met name gekeken naar maatregelen om water op straat in het algemeen te voorkomen, zoals waterberging, -infiltratie en -afvoer (vertraagd of juist versneld), en zodoende de blootstelling van schadegevoelige objecten aan wateroverlast te verminderen.

#### *Effectiviteit*

##### **Wateroverlast**

Om een eerste orde schatting van de effectiviteit van de maatregelen tegen wateroverlast te maken, is per maatregel berekend hoeveel areaal (per ha) nodig is voor het verwerken van 10 mm extra netto-neerslag op het naar de maatregel toestromende gebied (Vergroesen, 2013). Per ha is daarbij uitgegaan van 0,20 ha dakoppervlak, 0,10 ha straatoppervlak, 0,20 ha overig verhard oppervlak, 0,45 ha onverhard oppervlak en 0,05 ha oppervlaktewater. Dit betekent dat er 50 m<sup>3</sup> extra water moet worden geborgen per hectare.

De kentallen die hieruit volgen geven een indruk van de benodigde omvang van een maatregel. Echter, alvorens opnieuw 10 mm neerslag kan worden verwerkt, dient de berging in deze voorziening weer volledig beschikbaar te zijn. Daarom is ook de globale ledigingstijd van de maatregel gegeven. Hoe langer de ledigingstijd van een maatregel, des te lager de effectiviteit van de maatregel. In de overzichtstabel is de effectiviteit van een maatregel dan ook met ++ aangegeven wanneer deze binnen een dag weer beschikbaar is, en met een + wanneer de ledigingstijd langer dan 24 uur is.



### Hittestress

De effectiviteit van maatregelen om de binnentemperatuur te verlagen is berekend met computersimulaties en uitgedrukt in het aantal uren dat de temperatuur van de woning boven een grenswaarde uit komt. Het bepalen van de effectiviteit van maatregelen op het buitenklimaat is complexer. Enerzijds kan men kijken naar daadwerkelijke fysieke verkoeling; bijvoorbeeld door te kijken naar het effect van maatregelen op de comforttemperatuur, berekend in PET of UTCI<sup>25</sup> (zie **Bijlage C**), luchttemperatuur of stralingstemperatuur. Anderzijds kan men kijken naar het psychologisch effect van maatregelen op de menselijke (temperatuur)beleving: bijvoorbeeld, hoe ervaart men warmte in een groene straat of in een verharde straat? Beide aspecten zijn van belang om de effectiviteit van maatregelen op de beleving van hitte en thermisch comfort allesomvattend te beschrijven (Nikolopoulou 2003; Klemm et al., 2014a; Klemm et al., 2014b in review). Er bestaat echter geen standaardschaal waarop de effectiviteit van een maatregel kan worden afgelezen. De indeling in de overzichtstabel is dan ook een inschatting van de onderzoekers en kan variëren van negatief (-), weinig tot geen effect (+/-), tot heel positief (++).

### Type

Naast de directe effectiviteit, kan ook onderscheid worden gemaakt in het type maatregel wat betreft de inzetbaarheid:

De maatregel is generiek (G) toepasbaar, wat inhoudt dat de gevonden effecten algemeen geldig zijn, ongeacht de stedelijke of gebouwtypologie en ook onafhankelijk van een specifieke context.

Het is typologie-gekoppeld (T), hetgeen betekent dat de gevonden effecten gelden voor een bepaalde stedelijke of architectonische typologie, onafhankelijk van een specifieke context.

Het is contextafhankelijk (C), dat wil zeggen dat de effecten van deze maatregelen zo afhankelijk zijn van de lokale omstandigheden dat ze alleen voor elke afzonderlijke situatie moeten worden bepaald.

## 3.2 Gebouw

### 3.2.1 Doel

Maatregelen op gebouwniveau hebben betrekking op het binnenklimaat van gebouwen of op de waterverwerking op en direct rond gebouwen:

#### 1. Voorkomen van opwarming binnenshuis of actieve koeling (H)

Een koel binnenklimaat kan de blootstelling van mensen aan hoge temperaturen verminderen. Dit kan worden bereikt door het voorkomen van opwarming binnenshuis, zogenaamde passieve maatregelen. Hoofdstuk 2.2.2 geeft inzicht in de karakteristieken van een gebouw die sneller voor oververhitting zorgen, zoals het type gebouw, de oriëntatie en de mate van isolatie. Een gebouw kan ook actief gekoeld worden, bij voorkeur op een manier die geen fossiele energie gebruikt en bijdraagt aan klimaatverandering. Verdampingskoeling, bijvoorbeeld door het nat houden van dak en/of gevel(s), is daar een vorm van.

---

<sup>25</sup> PET: Physical Equivalent Temperature; UTCI: Urban Thermal Comfort Index (zie ook **Bijlage C**).





## 2. Infiltratie en opvang van regenwater in en om gebouwen (W)

Gebouwen en bestrating eromheen voorkomen infiltratie van water. Ze vangen het water op dat in steden vaak wordt afgevoerd via riool. Gebouwen kunnen ook worden ingezet om water te bergen en/of vertraagd af te voeren tijdens piekbuien. Een contraproductieve trend is het bestraten van tuinen waardoor het verhard oppervlak toeneemt en meer water sneller wegstroomt. Door middel van 'rainwater harvesting', het opvangen en benutten van regenwater op, in of bij het gebouw, kan wateroverlast worden voorkomen en kan water worden verzameld om nuttig te worden gebruikt.

### 3.2.2 Maatregelen

**Tabel 3.1** geeft een overzicht van de gebouwmaatregelen die binnen CPC zijn onderzocht. Een aantal maatregelen wordt hieronder kort toegelicht. Meer informatie is te vinden in CPC publicaties zoals Vergroesen (2013), Van Hooff et al. (2014) en Brolsma (2013).

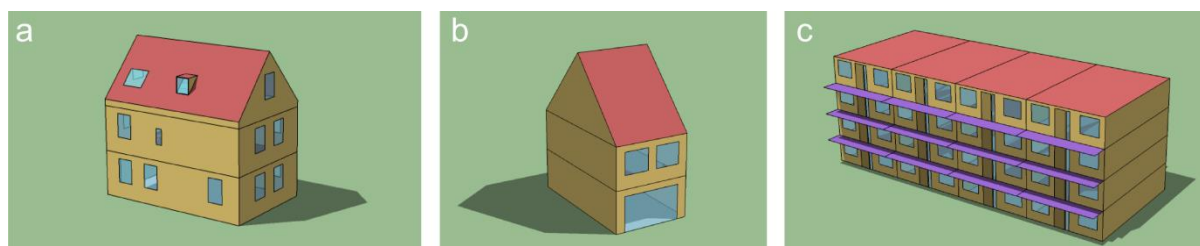
Tabel 3.1 Overzicht maatregelen 'Gebouw'

Maatregel	Doel	Effectiviteit	Type
Zonwering	H	++	G
Thermische massa	H	+/-	G
Ventilatie	H	++	G
Albedo	H	+	G
Gebouworientatie	H	++	G
Groen dak (extensief; traditioneel)	H/W	+/-, +/-	T
Groen dak (intensief; vertraagde afvoer)	H/W	+/-, +	T
Blauw dak	W	+	T
Regenton/opslagtank	W	+	G
Waterberging in kruipruimte	W	++	T
Groene gevels	H/W	+/-	G
Waterberging in gebouwen, tuinen en hofjes	W	++	
Ontharding particulier tuinen	W/H	+/>++	G
Actieve koeling	H	++	

H: voorkoming van hittestress; W: voorkoming schade door wateroverlast

G: Generiek; T: Typologiegebonden; C: Contextafhankelijk

Met Building Energy Simulations zijn binnen CPC zes klimaatadaptatiemaatregelen voor hittestress onderzocht voor een typische Nederlandse vrijstaande woning, rijwoning, en appartement (volgens Agentschap NL (2013)) (**Figuur 3.1**). Er zijn berekeningen uitgevoerd voor woningen gebouwd in twee verschillende bouwperiodes; woningen gebouwd volgens de richtlijnen en bouwpraktijk in de jaren '70 van de vorige eeuw, en woningen gebouwd volgens de eisen uit het Bouwbesluit van 2012. In het onderzoek is gekeken naar het aantal uren dat de temperatuur in de woning boven een bepaalde grenstemperatuur komt (= temperatuuroverschrijdingsuren) (Van Hooff et al., 2014). Deze grenstemperatuur is variabel en afhankelijk van de buitentemperatuur.



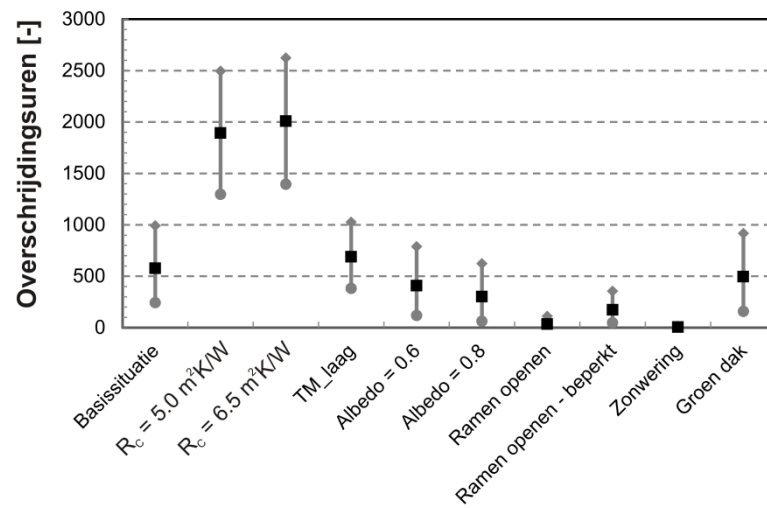
Figuur 3.1: De drie onderzochte woningtypen: (a) vrijstaande woning; (b) rijwoning; (c) appartement (galerij/portiek).



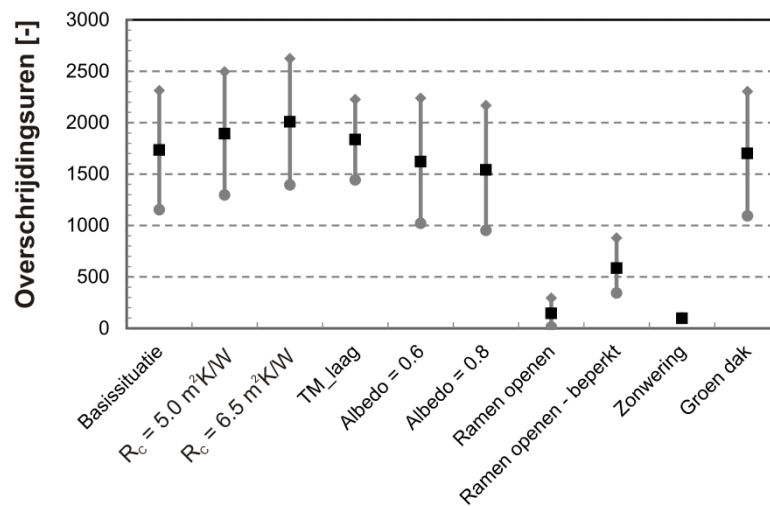
De gebouwprestatiesimulaties zijn uitgevoerd voor het klimaatjaar 2006 (KNMI, 2014). Het jaar 2006 kende een zomer met bovengemiddeld veel warme en tropische dagen en kan daarom worden gezien als een jaar zoals die in de toekomst meer zullen voorkomen ten gevolge van de klimaatverandering. De resultaten van de simulaties worden weergegeven in **Figuur 3.2**.

Over het algemeen kan geconcludeerd worden dat het toepassen van een extensief groen dak weinig effect heeft op de binnentemperaturen in de woningen. Het toepassen van beweegbare buitenzonwering en het extra ventileren van de woning als de buitentemperatuur lager is dan de binnentemperatuur heeft het meeste effect en kan ook opwarming in moderne, goed geïsoleerde woningen bijna volledig voorkomen (zie ook paragraaf 2.2.2). De algemene bevindingen zijn generiek te noemen, alhoewel de absolute effecten af zullen hangen van het gebouwtype, de omgeving, het gebruiksgedrag etc.. De maatregelen albedo, groene daken, openen van ramen en zonwering worden hieronder kort toegelicht.

a



b



**Figuur 3.2** Totaal aantal jaarlijkse overschrijdingsuren in de rijwoning voor de basissituatie en voor de verschillende adaptatiemaatregelen. (a) Rijwoning uit de jaren '70 (lage thermische weerstand). (b) Rijwoning met thermische isolatie volgens Bouwbesluit 2012 (hoge thermische weerstand), waarbij ■ staat voor het gemiddelde aantal, ● voor het minimum aantal, en ◆ voor het maximum aantal overschrijdingsuren voor de vier doorgerekende oriëntaties (noord, oost, zuid, west) (gebaseerd op van Hooff et al., 2014)



### Albedo-waarden (H)

Het verhogen van de albedo-waarden (reflectiefactor kortgolvlige zonnestraling) van de gebouwschil beperkt de opwarming van muren en dak door zonnestraling en resulteert dan ook in minder overschrijdingsuren. Voor een rijwoning is de afname van het gemiddeld aantal overschrijdingsuren ongeveer 50% (woning uit jaren '70) tot 14% (woning uit 2012). De absolute grootte van het effect is afhankelijk van de thermische weerstand van de gebouwschil en van het type woning. Het effect is veel groter naarmate de isolatiegraad van de gebouwschil lager is. In de winter zal een hogere albedo-waarde echter leiden tot een groter energieverbruik voor verwarming. Voor een rijwoning zal deze toename rond de 2% zijn voor een woning uit 2012 en rond de 7% voor een rijwoning uit de jaren '70.

### Groene daken (H/W)



Een groen dak wordt extensief genoemd als het groeimedium maximaal 15 cm dik is. Tussen de 15 en ca. 30 cm dikte wordt gesproken van een intensief groen dak. Daarboven spreekt men van daktuinen.

Extensieve groene daken met een groeimedium van maximaal 15 cm (sedumdak, grasdak, etc.) zouden het warmtetransport van buiten naar binnen moeten reduceren als gevolg van (1) een veranderde reflectiefactor voor kortgolvlige straling (albedo-waarde); (2) een toename van de dikte van de isolatielaag; (3) een toename van het convectief warmtetransport; (4) evapotranspiratie. Het toepassen van een extensief groen dak heeft echter in de simulatiestudie slechts een zeer beperkt effect op het aantal overschrijdingsuren binnenshuis; het aantal overschrijdingsuren blijft nagenoeg gelijk. De positieve effecten worden tegengewerkt door het nadelige effect dat extra isolatie met zich meebrengt. Het effect van het toepassen van een groen dak is groter naarmate de isolatiegraad van de gebouwschil lager is.

Vergroesen (2013) heeft gekeken naar de inzet van groene daken voor berging van het water dat op het dak valt. De bergingscapaciteit van groene daken is beduidend lager dan de porositeit, en neemt (relatief) af met toenemende dikte. Praktijk wijst uit dat voor extensieve groene daken een effectieve berging mag worden verwacht van 5 – 20 mm. De effectiviteit van groene daken hangt voornamelijk af van de verdamping, die bepaalt hoe snel de berging in het groeimedium weer beschikbaar komt. De effectiviteit van een groen dak is in de zomer dan ook een stuk hoger dan in de winter.

Een groen dak bergt alleen het water dat op het dak zelf valt. Uitgaande van een dakoppervlak van 2000 m<sup>2</sup> per hectare en de bergingscapaciteit van 15 mm van een extensief dak, kan er maximaal 30 m<sup>3</sup> worden geborgen, waar 50 m<sup>3</sup> nodig is (zie 3.1.2 voor de een uitleg van de uitgangspunten). De benodigde tijd om de berging opnieuw in te kunnen zetten, hangt sterk af van de optredende verdamping, en kan variëren van drie dagen in de zomer tot bijna drie weken in de winter. Een intensief groen dak met een minimale dikte van 15 cm (bv een daktuin) heeft een grotere marge in de bergingscapaciteit. Verder kunnen tijdelijke opslag van doorgesijpeld water in de drainagelaag onder het groeimedium en het vertraagd afvoeren van dat water de effectiviteit van groene daken als maatregel tegen wateroverlast met factoren verhogen.



### Openen van ramen (H)

Door het openen van ramen kan er ventilatie plaatsvinden als toevoeging op de duurventilatie zoals die gedurende de gehele dag plaatsvindt. Door te ventileren als het buiten koeler is dan binnen kan overmatige warmte worden afgevoerd. De ramen dienen enkel geopend te worden als het buiten koeler is dan binnen, anders levert het openen van ramen een averechts effect op. Uit het onderzoek is gebleken dat het toepassen van additionele natuurlijke ventilatie door het openen van de ramen boven een bepaalde binnentemperatuur, en enkel wanneer de buitentemperatuur lager is dan de binnentemperatuur, het aantal overschrijdingsuren significant vermindert (tot bijna 0), voor alle woningtypen.

### Zonwering (H)

De zon is één van belangrijkste oorzaken van hoge binnentemperaturen in woningen. De zonnestraling die door transparante geveldelen de woning binnen komt warmt de ruimte sterk op (zie ook hoofdstuk 2.2.2). Deze sterke opwarming kan worden voorkomen door zonwering toe te passen voor de ramen. Uit deze studie blijkt dat de ramen voorzien van beweegbare verticale buitenzonwering en deze laten zakken zodra de totale zonnestraling op het raam groter is dan  $150 \text{ W/m}^2$  een zeer groot effect heeft op het aantal overschrijdingsuren per jaar in de drie soorten woningen. Voor de vrijstaande woning en de rijwoning kan het aantal overschrijdingsuren tot ongeveer 0-100 worden gereduceerd, terwijl voor het appartement het aantal in de meeste gevallen tot de rond de 200 kan worden teruggebracht.

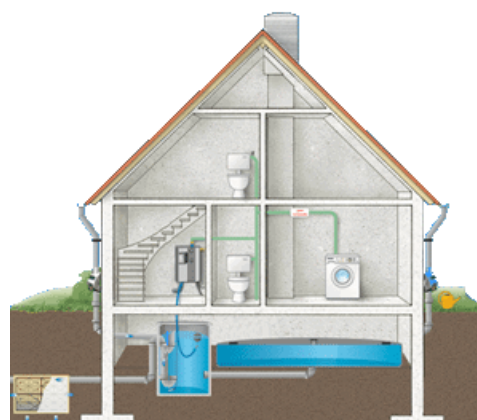
### Actieve koeling (H)

Gebouwen kunnen ook actief gekoeld worden tijdens warme periodes om een aangenaam binnenklimaat te creëren. Binnen CPC is onderzocht of open water in de wijk zou kunnen voorzien in de levering van warmte en koude aan gebouwen in Nederland, waarbij met name de levering van warmte de grootste uitdaging vormt vanwege de relatief grote warmtevraag in de winter en beperkte koudevraag in de zomer. Deze balans wordt in de toekomst gunstiger door klimaatverandering.

Uit een casestudy in de Watergraafsmeer blijkt dat het zeker mogelijk is om de hoeveelheid warmte die op dit moment wordt gebruikt voor de verwarming van gebouwen in deze wijk uit het watersysteem en de waterketen te verkrijgen (Brolsma et al., 2013). Omdat de warmte veelal wordt gewonnen in de zomer en gebruikt in de winter, is er opslag nodig. Ook de capaciteit van warmte-koudeopslag in de ondergrond van Watergraafsmeer is voldoende om in de piekvraag te voldoen.

### Waterberging in een waterzak in de kruipruimte (W)

Afstromend regenwater kan worden opgevangen in een tank of zak in de kelder of de kruipruimte van woningen en andere gebouwen. Dit 'geogste' water (*rainwater harvesting*) kan gebruikt worden voor toiletspoeling en het irrigeren van tuinen en daken (groen, blauw of grijs) in droge, warme periodes<sup>26</sup>. Afhankelijk van de toepassing van het water kan het nodig zijn om een zuiveringsstap in te zetten. Ook is het vanuit kwaliteitsoogpunt aan te bevelen om het eerste water na een droge periode (de zgn. 'First flush') niet in de tank op te slaan.



<sup>26</sup> Het Drinkwaterbesluit (2011) staat momenteel opgevangen regenwater toe als huishoudwater, met uitsluitend toiletspoeling als toepassing: zie <http://wetten.overheid.nl/BWBR0030111>



Uitgaande van een diepte van 50 cm, is er 100 m<sup>2</sup> kruipruimte per hectare nodig om 50 m<sup>3</sup> water te bergen (zie 3.1.2 voor een uitleg van de uitgangspunten) (Vergroesen, 2013). Dit komt overeen met ongeveer 4 woningen. Voor het legen van de waterzak is ervan uitgegaan dat de waterzak zo nodig sneller leeggepompt kan worden dan nodig is voor het gebruik van dit water in het huis of in de tuin. Met een pompcapaciteit van 4 m<sup>3</sup>/uur is de ledigingstijd 12 uur.

Een studie binnen CPC wijst verder uit dat opslag en gebruik van regenwater op woningniveau relatief duur is (Hofman en Paalman, 2014). Als de kosten voor een dergelijk systeem worden afgezet tegen gebruik van drinkwater, is het niet mogelijk om de investering terug te verdienen. Indien toch gekozen wordt voor deze oplossing, zal de economische afweging in een breder kader moeten plaatsvinden, gerelateerd aan vermeden schade door wateroverlast. Bovendien zal het voor huiseigenaren aantrekkelijk gemaakt moeten worden om over te gaan tot de aanschaf van deze systemen, bijvoorbeeld via subsidies of korting op rioolheffing. Toepassing van systemen met een grotere schaalgrootte lijkt wel economisch haalbaar te zijn.

### *Ontharden particuliere tuinen (W/H)*

De ‘verstening’ van particuliere tuinen wordt vaak genoemd als (mede) oorzaak van de klimaatproblemen doordat meer water moet worden afgevoerd via de riolering en de waterbalans in de ondergrond wordt verstoord. Acties als ‘Operatie Steenbreek’<sup>27</sup> zijn gericht op het ontharden van particuliere tuinen. Toch past hier enige nuancering van het probleem en de oplossingsrichting. Veel van die verharde tuinen voeren het afstromend regenwater af naar onverhard gebied, waar het zal infiltreren. De verharding heeft dan weinig negatieve gevolgen voor de waterhuishouding. Verder zijn veel van de verhardingen grind of kleinere klinkers. Die behouden een zekere mate van doorlatendheid, waardoor de natuurlijke aanvulling van het grondwater goeddeels behouden blijft. Verhardingen van asfalt, beton en oude tegel- en klinkerverhardingen zijn echter niet tot zeer beperkt doorlatend. Uitgaande van 25 % particuliere tuin in de voorbeeld-woonwijk van 1 hectare zou een totale verstening van alle tuinen een bergingsverlies in de ondergrond opleveren van circa 25-37 m<sup>3</sup>. Die tuinen geven extra afvoer naar de riolering.

Minder berging van regenwater in de grond van particuliere tuinen kan negatieve effecten hebben op straatbomen of ander openbaar groen in de directe omgeving van particuliere tuinen. Door meer onverharde oppervlakten en waterberging in de nabijheid kunnen straatbomen droge perioden beter doorstaan. Daarnaast dragen groene (ontharde) voortuinen bij aan een betere beleving van thermisch comfort van passanten in de straat (zie ook 3.3.2) (Klemm et al., 2013a; Klemm et al., 2014b in review). In het verlengde van het ontharden van particuliere tuinen is het zaak onverharde oppervlaktes in steden te koesteren. Hoe meer verharding hoe hoger de temperaturen oplopen (**Tabel 1.4**, Van Hove et al. 2014; **Tabel 3.3**, Kleerekoper in review a).

Parallel hieraan is winst te halen op industrieterreinen en bij grote winkelcentra waar grote terreinen zijn verhard voor parkeren en voor opslag van materialen. Ontharden van die terreinen of ze ten minste voorzien van een doorlatende verharding levert een forse verbetering op van de lokale waterbeheersing. En worden die terreinen vergroend dan levert dit ook een reductie op van de kans op hittestress.

---

<sup>27</sup> ‘Operatie Steenbreek’ is een landelijke actie waarbij natuurorganisaties en ecologen van onder meer de universiteiten in Groningen en Wageningen de strijd aan gaan met de verharding in Nederlandse tuinen.

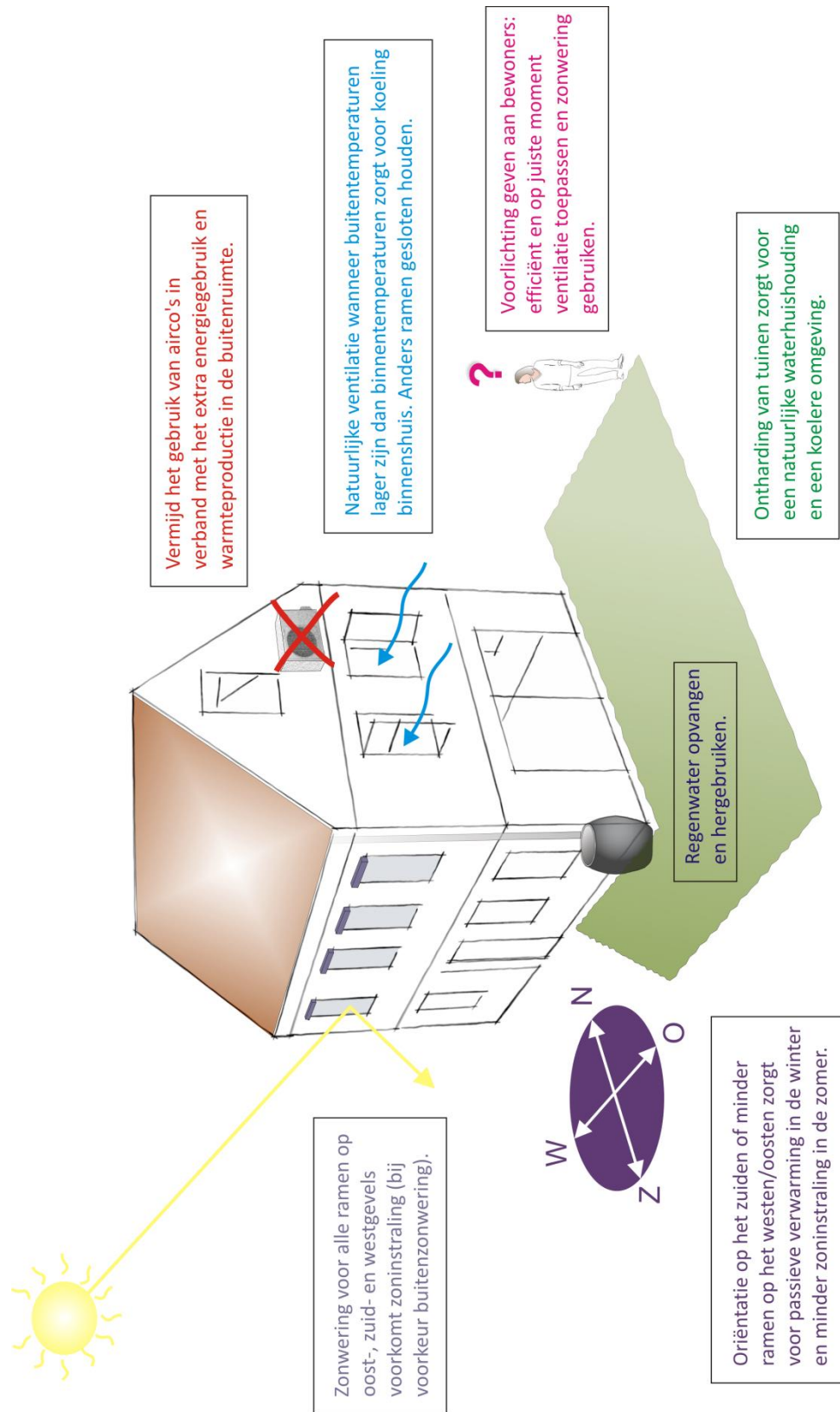


### 3.2.3 Ontwerpprincipes

Aangezien van het vastgoed in 2030 nu al 90% gebouwd is, is het zaak bestaande gebouwen goed te analyseren op hun zwakten ten aanzien van hitte en wateroverlast en daar gericht maatregelen op te treffen. Voor hitte kan stapsgewijs worden gewerkt van het voorkomen van opwarming binnen, passief koelen en ten slotte actief koelen. Een aantal algemene richtlijnen wordt hieronder gegeven en samengevat in **Figuur 3.3**.

#### Algemene richtlijnen

- Buitenzonwering is belangrijk voor het voorkomen van oververhitting binnenshuis, in het bijzonder bij goed geïsoleerde moderne gebouwen, maar ook bij oudere gebouwen.
- Oriëntatie van ramen op het zuiden draagt bij aan passieve verwarming in de winter en het voorkomen van opwarming binnenshuis in de zomer. Het hebben van minder ramen op het westen of oosten zorgt namelijk voor minder zoninstraling (oververhitting) in de zomer. Een op het zuiden gericht dakvlak is ook gunstig voor de opbrengst van zonnepanelen.
- Zorg voor goede luchtverversingsmogelijkheden in huis (spuiventilatie in aanvulling op duurventilatie) zodat warmte (en vocht) goed weggeventileerd kan worden wanneer het buiten kouder is dan binnen.
- Afstromend regenwater zo veel mogelijk opslaan ('oogsten'), in, onder of bij gebouwen en hergebruiken.
- Het ontharden van tuinen en grote parkeer- en opslagterreinen draagt bij aan een meer gebalanceerde waterhuishouding, aan verbeterde temperatuurbeleving voor passanten en aan de verkoeling van een stedelijk gebied.
- Maak een goede afweging bij de keuze voor groene daken: Traditionele groene daken – zonder vertraagde afvoer – bieden slechts in beperkte mate extra waterberging en isolatie.
- Ga na of warmte- en koelbehoefte van een wijk lokaal kan worden gedekt door warmte en koude die gewonnen wordt uit het stedelijk oppervlaktewater, het grondwater en de waterketen ter plaatse.
- Vermijd het gebruik van airco's wanneer er gekoeld dient te worden. Ze werken negatief vanwege de warmteproductie in de stedelijke omgeving en gebruiken energie waardoor ze weer bij kunnen dragen aan klimaatverandering.
- Geef voorlichting aan bewoners hoe ze opwarming in huis kunnen voorkomen: efficiënt en op juiste moment spuiventilatie toepassen en zonwering gebruiken.



Figuur 3.3 Ontwerprichtlijnen klimaatbestendige woning



### 3.3 Van straat tot wijk

#### 3.3.1 Doel

Maatregelen op straat- en wijkniveau zijn gericht op beperking van de opwarming van de buitentemperatuur, verbetering van de temperatuurbeleving (thermisch comfort) en het op lokale schaal water kunnen bergen, infiltreren of afvoeren:

#### 1. Beperken van opwarming buitentemperatuur en verbetering van de temperatuurbeleving (thermisch comfort) t.o.v. buitengebied (H)

In hoofdstuk 1 zijn de wijkkenmerken aan de orde gekomen die bijdragen aan het hitte-eilandeffect. Hieruit bleek dat het percentage bebouwd/verhard/groen oppervlak en de hoogte van de gebouwen de belangrijkste factoren zijn. Maatregelen in dit hoofdstuk sluiten hierop aan.

#### 2. Waterberging, infiltratie en transport (W)

Het grote percentage verharding binnen het stedelijk gebied zorgt ervoor dat neerslag tijdens extreme buien niet snel genoeg kan infiltreren of worden afgevoerd waardoor lokaal wateroverlast kan ontstaan en tot schade en verkeershinder kan leiden (zie ook hoofdstuk 2). Er is een scala aan maatregelen beschikbaar voor waterberging, infiltratie of transport.

#### 3.3.2 Maatregelen

**Tabel 3.2** geeft een overzicht van maatregelen op straat- en wijkniveau die binnen CPC zijn onderzocht. Een aantal maatregelen wordt hieronder kort toegelicht. Meer informatie is te vinden in CPC publicaties zoals door Vergroesen (2013), Kleerekoper (2012), Klemm (2013a, 2014b in review) en Montazeri et al. (2015).

Tabel 3.2 Overzicht maatregelen 'Straat en wijk'

Maatregel	Doel	Effectiviteit	Type
Straatbomen	H/W	++/+	T/C
Groene gevels	H	+/-	C
Groene daken	H/W	+/-	C
Groene tuinen	H/W	+/-	G
Lichte daken	H	+/-	G
Waterverreveling	H	++	G
Hoogte/breedte verhouding	H	+	
Riolering vergroten	W	++	G/C
Doorlatende verharding	W	+ / ++	G
Ondergrondse bergingstanks	W	+ / ++ *	G
Berging op bestaand oppervlaktewater	W	++	G
Verdiepte wegen/verhoogde stoepanden	W	++	G
Berging in/onder wegen	W	+ / ++ *	G
Waterplein	W	++	G
Infiltratie-units/-kratten	W	+ / ++ *	T
Infiltratieputten (diep/ondiep)	W	+	T
Infiltratiegreppels	W	+	T
Infiltratie-transportriolen	W	+	T
Infiltratie-drainageriolen	W	+	T
Wadi's	W	+ / ++ *	T
Maaveld aanpassen	W	+	C
Afkoppelen riolering	W	+ / ++ *	C

H: voorkoming van hittestress; W: voorkoming schade door wateroverlast

G: Generiek; T: Typologiegebonden; C: Contextafhankelijk

\* De effectiviteit hangt af van de omvang van de berging en/of de lokale situatie.





### Hittemaatregelen algemeen (H)

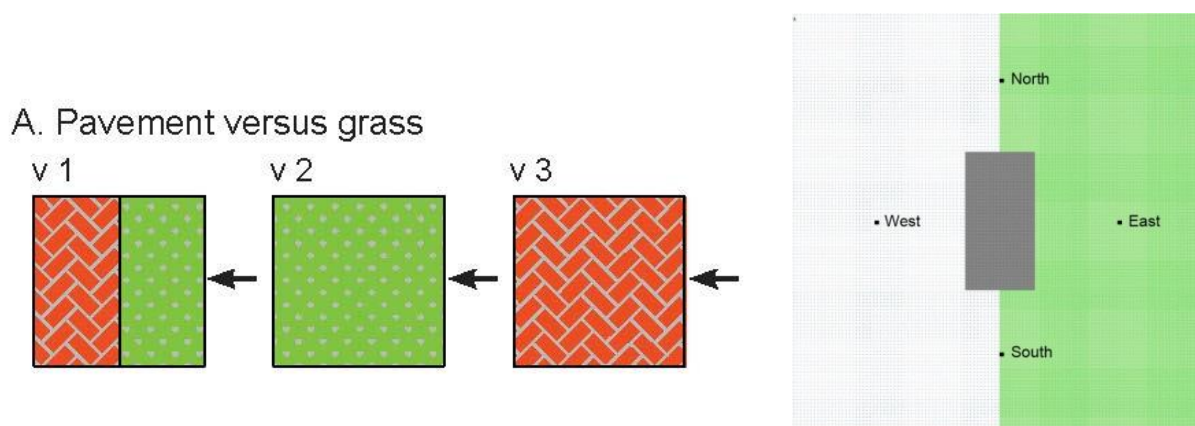
Voor het microklimaat zijn er veel parameters van belang zoals mate van verharding, materiaalsoort en -kleur, hoeveelheid en type vegetatie, hoeveelheid en type water, hoogte en breedte van de straten en binnen gebieden, openheid, oriëntatie, bebouwingsvorm, grondgebruik (woongebied, gemengde stedelijke functies, industrie, stadscentrum, kantorenpark, landbouw, sport- en recreatiegebied) en dichtheid (inwoners per ha, woningen/ha, FSI, GSI, hoogte/breedteverhouding). Bij de keuze voor een specifieke maatregel spelen alle bovengenoemde kenmerken een rol.

Om de effectiviteit van hittemaatregelen ten opzichte van elkaar te kunnen vergelijken kunnen de bestaande onderzoeken met metingen en/of simulaties nauwelijks naast elkaar worden gelegd. Dit komt omdat deze allemaal verschillende condities kennen: verschillende klimaatzones, weersomstandigheden en andere stedelijke context. Daarbij verschillen de meetmethoden en simulaties in meetlocaties (met namen de hoogte)en worden er verschillende indicatoren gebruikt om comfort uit te drukken, zoals de luchttemperatuur, stralingstemperatuur, de oppervlakte temperatuur, thermisch comfort (PET, UTCI), etc. (zie ook **Bijlage C**).

Door modelberekeningen uit te voeren in het microklimaatmodel ENVI-met zijn onder vergelijkbare condities en met vergelijkbare meetmethode de verschillen in effecten van diverse maatregelen op het thermisch comfort onderzocht binnen CPC (Kleerekoper et al., onder review a en b). Er is naar effecten gekeken in een specifieke stedelijke context en in een vrij veld waar de complexiteit langzaam wordt opgebouwd. Door telkens één aspect aan te passen wordt duidelijk welk effect deze maatregel heeft (**Figuur 3.4**). In **Tabel 3.3** hieronder is te zien welke maatregelen zijn bestudeerd en wat het berekende effect is. Er is in vier punten gemeten op één meter hoogte (Kleerekoper et al., onder reviewb).

Deze studie naar generieke effecten van maatregelen heeft geleid tot de conclusie dat ontwerpmaatregelen en weersinvloeden die zonnestraling en wind beïnvloeden een groot effect hebben op het lokale thermisch comfort. Daarentegen hebben maatregelen die luchttemperatuur en luchtvochtigheid beïnvloeden een kleiner absoluut effect in graden, maar een grotere actieradius.

In de simulaties is de verdamping vanuit de bodem en door vegetatie meegenomen. Er is niet gekeken naar verdampingskoeling door bijvoorbeeld verneveling. Hiervan kan een lokaal effect worden verwacht, maar dit komt dan door de directe verdamping en niet door een hogere luchtvochtigheid.



*Figuur 3.4 Voorbeeld van een vrij veld waar het effect gras vs verharding wordt geanalyseerd (links); en de 4 meetpunten in dit veld (rechts) (Kleerekoper et al., onder review b).*



Tabel 3.3 Het maximale effect in PET gemeten in een van de vier meetpunten en het gemiddelde effect in PET over de vier meetpunten (Kleerekoper et al., onder review b).

	Maximale effect in PET gemeten in een van de vier meetpunten (°C)	Gemiddelde effect in PET over de vier meetpunten (°C)
A. Gras vs verharding	-8	-5.5
B. Vrijstaand gebouw van 20*40*8 m (l*b*h) met klinker bestrating vs leeg veld met klinker bestrating	-8	-0.6 – 0.7
C. Windrichting (Noord, Zuid, Oost, West, Noord-Oost en Zuid-West)	3	0.0 – 0.9
D. Windsnelheid van 1 naar 6 m/s	-12.4	-11.6
E. Grid size		
F. Area rotation		
G. Twee gebouwen vs 1 gebouw	10	3.5 – 4.2
H. Twee gebouwen met verschillende hoogtes vs twee gebouwen met dezelfde hoogte	-3.5 and 4.5	-1.1 – 0.9
I. Halfgesloten gebouw met binnenplaats vs twee rechthoekige gebouwen	0.2	0.1
J. vrijstaand gebouw met bomen vs gebouw zonder bomen	-20	-5.8 – 0.3
K. Halfgesloten gebouw met binnenplaats en bomen vs binnenplaats zonder bomen	-16	-0.5 – -0.1
L. Vrijstaand gebouw met heggen vs gebouw zonder heggen	-13	-2.9 – 3.5
M. Vrijstaand gebouw van 20m hoogte vs gebouw van 8m hoogte	-1.5 en 3.5	0.5

### Groene elementen in de straat (H/W)

Uit internationale literatuur is bekend dat stedelijk groen het stadsklimaat kan verbeteren door de schaduwwerking van de boomkroon en het verkoelend effect van evapotranspiratie (Bowler et al., 2010). Het doel van het onderzoek binnen CPC naar groene infrastructuren is dan ook de rol van stedelijk groen op het stadsklimaat – met name op het thermisch comfort van hun bewoners – in warme zomerperiodes in beeld te brengen. Gegevens hierover zijn verzameld via micrometeorologische metingen, Computational Fluid Dynamics (CFD) simulaties en straatinterviews met inwoners.

Daarnaast kunnen groene infrastructuren een rol spelen bij de buffering en infiltratie van overtollig regenwater. Het effect van straatgroen op wateroverlastreductie wordt in beeld gebracht met behulp van het rekenmodel 3Di. In 3Di kan worden nagegaan wat het effect is van een of meer adaptatiemaatregelen op de omvang en de ernst van de wateroverlast (zie hoofdstuk 3.5.2).

### Straatbomen en groene tuinen

(Bakfiets)metingen op straatniveau in Utrecht tonen een gering verkoelend effect voor straatbomen wat betreft luchttemperatuur ( $T_{air}$ )<sup>28</sup>, maar een duidelijke vermindering van de stralingstemperatuur (*mean radiant temperature*,  $T_{mrt}$ ), met name door grote boomkronen. De gemiddelde  $T_{mrt}$  in een straat met 54% oppervlakte aan boomkronen was 4,5°C lager dan in een straat zonder bomen. 10% meer boomkronen in

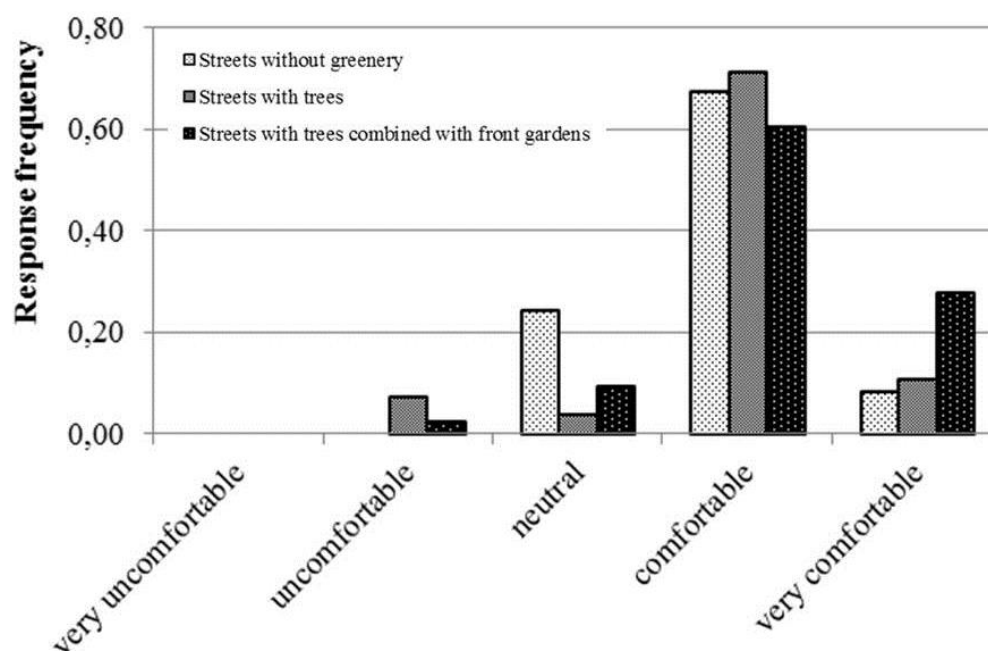
<sup>28</sup> Vermoedelijk mede door het feit dat de metingen in het midden van de straat hebben plaatsgevonden en niet direct in de schaduw onder de bomen.



de straat leidt tot een afkoeling van 1 K  $T_{mrt}$  (stralingstemperatuur) (Klemm et al., 2013a; Klemm et al., gepland in 2014). De metingen tonen een beperkt invloed van groene tuinen op de fysieke klimaatcondities in de buitenruimte, zoals luchttemperatuur of stralingstemperatuur; natuurlijk met uitzondering van grote bomen die schaduw geven.

Met CFD simulaties voor de J.P. van Muijlwijkstraat in het stadscentrum van Arnhem (gebaseerd op warme zomerdag van 16 juli 2003) werd voor straatbomen een reductie in de gemiddelde en maximale luchttemperatuur van respectievelijk 0.6°C en 1.6°C berekend, in vergelijking met de situatie zonder de bomen in de straat (**Figuur 3.6 en 3.7**) (Gromke et al., 2015).

Groene tuinen tonen een significant positieve invloed op de temperatuurbeleving van passanten (**Figuur 3.5**). Door het zien van groene elementen op verschillende hoogtes (lage bodembedekkers, hagen, boomkronen) wordt hitte voor mensen draaglijker en waarderen zij straten ook meer vanuit het esthetische oogpunt (Klemm et al., 2013a; Klemm et al., gepland 2014).



Figuur 3.5 Temperatuurbeleving van passanten in drie type straten (Klemm, 2013a).

Naast de vergroening (ontharding) van tuinen kunnen bijvoorbeeld ook boomspiegel vergroend worden. Alle onverharde (of halfverharde) ruimtes in de straat dragen zodanig bij aan de verbetering van de temperatuurbeleving door passanten, de infiltratie van regenwater en het bergen van regenwater voor irrigatie voor vegetatie in de straat.

### Groene gevels

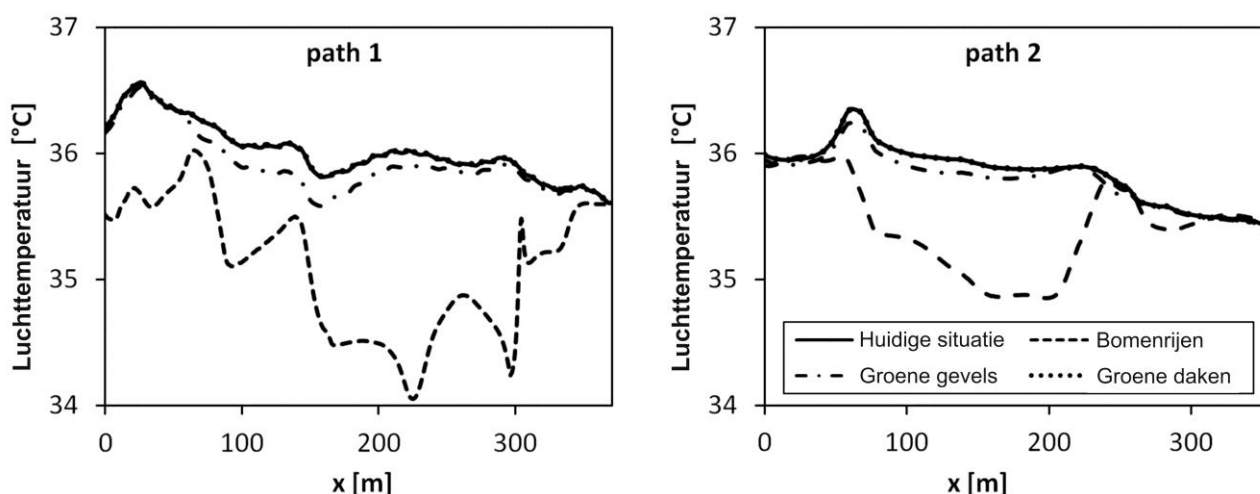
Uit de CFD simulaties blijkt dat het toepassen van groene gevels resulteert in relatief lage reducties in de luchttemperatuur in de straat: gemiddeld 0,1°C en maximaal 0,3°C (**Figuur 3.5 en Figuur 3.6**) (Gromke et al., 2015). Het effect van groene gevels op de buitentemperatuur is sterk afhankelijk van de type groene gevel, maar voor elk geveltype geldt dat het effect alleen heel dicht bij de gevel is waar te nemen. In een studie in Singapore waarbij is gekeken naar verschillende groene gevels, blijkt dat het groen op zo'n 30 cm van de gevel een verlaging van zo'n 2°C geeft (Wong et al 2010). Hierbij blijken de gevels met een goede substraat laag het meest effectief.



Om opwarming van gebouwen binnenshuis te voorkomen is een groene gevel ook zeker niet de meest effectieve maatregel. Er is een beperkt effect voor slecht geïsoleerde gebouwen en het effect is verwaarloosbaar voor goede geïsoleerde gebouwen (van Hooff et al., 2014). Groene gevels spelen ook geen rol als maatregel tegen regenwateroverlast (Vergroesen, 2013). Groene gevels of klimconstructies voor planten dragen door hun visuele impact wel bij aan een betere temperatuurbeleving in de buitenruimte (Klemm et al., 2013a; Klemm et al., gepland 2014).

### Groene daken

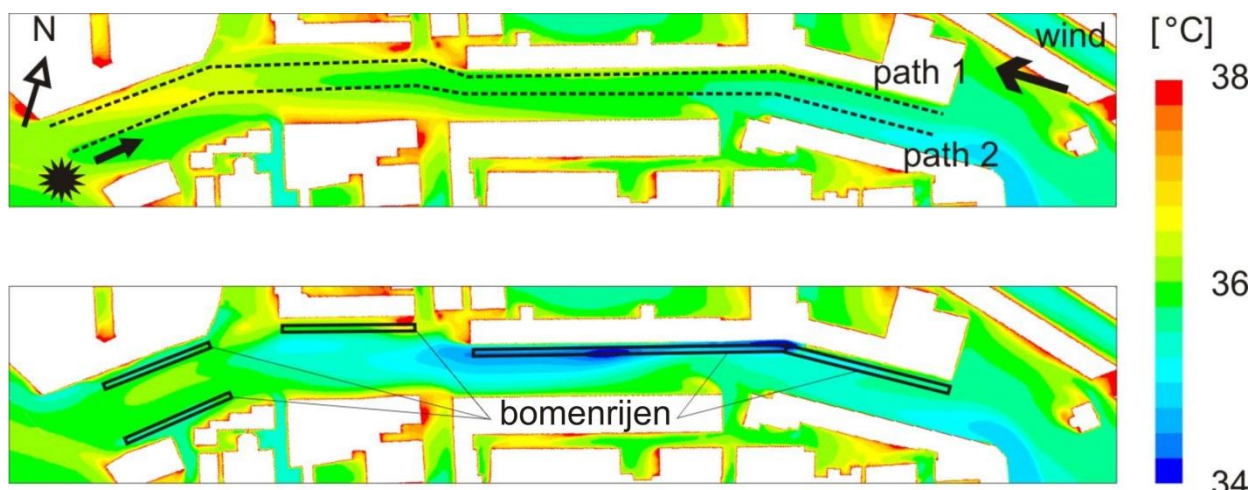
Het toepassen van groene daken in CFD-simulaties resulteerde niet in een merkbare reductie van de luchttemperaturen op loopniveau in de straat (**Figuur 3.6** en **Figuur 3.7**) (Gromke et al., 2015). Over het algemeen waren de koeffecten beperkt tot een afstand van enkele meters van de vegetatie. Deze resultaten zijn in goede overeenkomst met gemeten temperatuurverschillen in eerdere studies (bijv. Alexandri & Jones 2008, Errel et al. 2009). Groene daken kunnen wel een rol spelen in de berging van water tijdens piekbuien (zie ook hoofdstuk 3.2.1 en Vergroesen (2013)). Groene daken hebben verder weinig effect op de binnentemperatuur (zie ook paragraaf 3.2.2).



Figuur 3.6 Luchttemperatuur op een hoogte van 2 m boven de grond in de J.P. van Muijlwijkstraat in Arnhem op lijn 1 en 2, zoals weergegeven in Figuur 3.6, voor zowel de huidige situatie als voor de drie verschillende alternatieve vegetatiescenario's (Gromke et al., 2015).

Samengevat heeft met name het plaatsen van bomen (door het toevoegen van schaduw) langs de straat een positief effect op de fysieke condities van thermisch comfort, namelijk lucht- en stralingstemperatuur. De verdamping van bomen kan bovendien een significant deel van de inkomende kortgolvlige zonnestraling wegnemen; energie die zich niet meer vertaalt in een stijging van de luchttemperatuur in de stad. Straatbomen zijn een effectief middel om thermisch comfort in bestaande straten met veel zonsinval te verbeteren. Maar straatbomen zijn ook niet overall nodig; afhankelijk van de oriëntatie van de straat of het straatprofiel (hoogte-breedte verhouding) kunnen ook de gebouwen zelf voor schaduw van passanten zorgen. In straten met hoge verkeersdruk kunnen te veel bomen door het dichte kroondak juist een negatieve werking hebben: de boomkronen veroorzaken dan een 'tunneleffect' waardoor lucht niet kan circuleren en de uitlaatgassen in het straatprofiel blijven hangen.

Daarnaast hebben alle groene elementen in de straat, zoals groene voortuinen, gevels, boomspiegels, een psychologisch effect, namelijk dat passanten groen waarnemen en daardoor thermisch comfort aangenamer beleven en hitte draaglijker vinden.



Figuur 3.7 Luchttemperatuur op voetgangershoogte (2 m boven de grond) in de J.P. van Muijlwijkstraat in Arnhem voor de huidige situatie (boven) en voor het scenario met bomenrijen in de gehele straat (onder). De bomenrijen zijn weergegeven door de zwarte rechthoeken (Gromke et al., 2015).

#### Verhoging albedo/lichte daken

Satellietbeelden laten zien dat een hogere albedo (en daarmee een hogere reflectiewaarde) leidt tot een lagere oppervlaktetemperatuur (paragraaf 1.3.2), maar het effect op de luchttemperatuur op straatniveau is niet eenduidig. De meetresultaten van Van Hove et al. (2014) (paragraaf 1.3.2) laten geen duidelijke relatie zien tussen albedo en luchttemperatuur in Rotterdam. Hier moet bij worden vermeld dat de albedo-waarde is vastgesteld als een gebiedsgemiddelde rond de meetapparatuur.

Kleerekoper (in review a) geeft als resultaat van een simulatiestudie dat de transformatie van een zwart naar een wit dak op 9 m hoogte wel een verkoeling van 0,5-1°C geeft op 2 meter hoogte. Deze verkoeling wordt verkregen in 50% van een radius van ongeveer 15 meter in en om het bouwblok. Diverse buitenlandse studies beschrijven ook een koelend effect van albedo op de luchttemperatuur (Taha et al., 1988; Sailor, 1995).

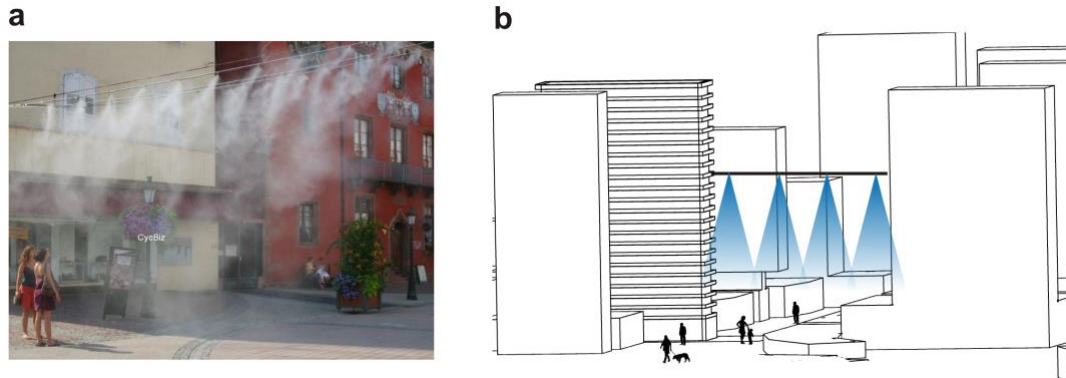
CPC onderzoek wees uit dat hoge albedowaarden bij gevels in ieder geval niet wenselijk zijn, omdat de gereflecteerde straling richting de mensen in de straat kan worden gereflecteerd en het thermisch comfort/de temperatuurbeleving van passanten op leefniveau negatief kan beïnvloeden.

#### Hoogte/breedteverhouding

De verhouding tussen gebouwhoogte en straatbreedte (H/W) is belangrijk. In modelsimulaties met het 'Weather and Research Forecasting'-model vinden Theeuwes et al. (2014) een optimale H/W-ratio van ongeveer 1 (gebouw is net zo hoog als de straat breed is) (zie ook 1.3.2 – Urban Canyon Effect). Een breder straatprofiel (lage H/W) heeft echter de voorkeur vanwege een betere ventilatie; voldoende schaduw kan vervolgens worden bereikt door een goede indeling van bladverliezende bomen. In de winter heeft de straat bovendien juist een voordeel van de zonnestraling.

#### Waterverneveling (H)

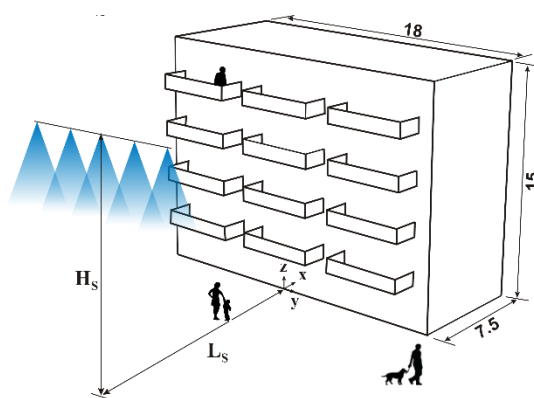
Watervernevelingssystemen worden in toenemende mate gebruikt als systeem voor lokale koeling en thermische comfortverbetering in de gebouwde omgeving (Figuur 3.8a en b). Doordat de fijne waterdruppels de warmte opnemen en verdampen koelt de lucht eromheen af. Om legionella te voorkomen dient de toepassing van watervernevelingssystemen met de grootste zorg plaats te vinden, enkel met zuiver water dat gekoeld opgeslagen is geweest.



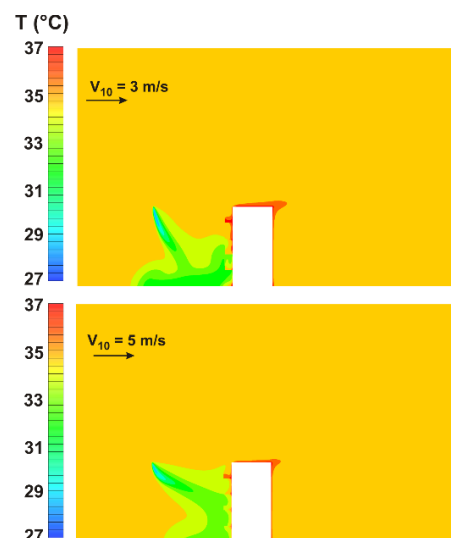
Figuur 3.8 (a) Directe verdampingskoeling (door watervernevelaars) in een stedelijk gebied. (b) Schematische weergave van een case studie inclusief de spuitmonden van het watervernevelingssysteem

Binnen CPC zijn hoge-resolutie numerieke modellen ontwikkeld om de prestatie van verdampingskoeling door watervernevelingssystemen in stedelijke gebieden te analyseren (Figuur 3.8b) (Montazeri et al., 2015). De evaluatie met behulp van Computational Fluid Dynamics (CFD) is gebaseerd op een rastersensitiviteitsanalyse en op een validatiestudie aan de hand van windtunnelmetingen door Sureshkumar et al. (2008).

De simulatie bestaat uit vernevelingssystemen met holle-kegelsproeiers op voetgangersniveau en op balkons van een middelhoog gebouw (Figuur 3.9). De studie is uitgevoerd voor verschillende windsnelheden en eigenschappen van de waternevel om de prestatie van het vernevelingssysteem met betrekking tot het reduceren van hittestress te evalueren (gebaseerd op UTCI, zie ook Bijlage C). Een van de evaluaties laat zien dat bij lagere windsnelheden het systeem vooral op voetgangersniveau blijkt te koelen en bij hogere windsnelheden worden de gevels meer gekoeld (Figuur 3.10). De resultaten tonen aan dat de windsnelheid stroomopwaarts een belangrijk effect heeft op de koelprestaties van het vernevelingssysteem op voetgangersniveau en op de balkons. Verder tonen de eerste resultaten aan dat de UTCI lokaal met zo'n 2°C kan dalen als gevolg van het gebruik van het vernevelingssysteem, en de effecten zijn merkbaar tot 10-20 meter van het systeem (Montazeri et al., 2015).



Figuur 3.9 Weergave van de holle-kegel spuitmonden voor het generieke gebouw met balkons (bron: Montazeri et al., 2015).



Figuur 3.10 Contouren van de luchttemperaturen rondom het gebouw als een vernevelingssysteem wordt toegepast voor twee verschillende windsnelheden op 10 m hoogte ( $V_{10}$ ) (bron: Montazeri et al., 2015).



### Waterplein (W)

Een waterplein zoals het Benthemplein in Rotterdam, is een plein dat in eerste instantie bedoeld is om water te bergen tijdens piekbuien in ondiepe constructies. In droge perioden onderscheidt een waterplein zich niet van een gewoon plein. Als het niet regent, staat het plein droog en is het begaanbaar en bruikbaar voor allerlei recreatieve doelen.

Om 50 m<sup>3</sup> water te bergen bij een gemiddelde waterdiepte van 30 cm is een oppervlak van 167 m<sup>2</sup> per hectare nodig (zie 3.1.2 voor een uitleg van de uitgangspunten) (Vergroesen et al., 2013).



Figuur 3.11 Benthemplein Rotterdam

Het opvangen water kan met een pomp afgevoerd worden naar de riolering of men kan het water infiltreren. Dat laatste zal afhangen van de ondergrond en het ontwerp van het plein. De ledigingstijd bij een pompcapaciteit 4 m<sup>3</sup>/uur is een 0,5 dag. Bij infiltratie kan de ledigingstijd variëren van 0,5-5 dagen. Infiltratie kan verdroging tegen gaan en kan lokaal voor maximaal 20 mm verlaging van het vochttekort zorgen.

Bij toepassing van infiltratie in de diepe ondergrond kan het water voor langere tijd worden opgeslagen en worden opgepompt voor hergebruik. Een goed voorbeeld hiervan is een praktijkproef in het Westland, waar regenwater van de daken van kassen wordt opgevangen en in de bodem geïnfilterd. Hierdoor kan in de bovengrondse bassins bij de kassen een laag niveau worden gehandhaafd, zodat bij intensieve regenval voldoende waterberging beschikbaar is om overlast te voorkomen en bovendien altijd water van voldoende kwaliteit voor de tuinbouw beschikbaar is in de ondergrondse voorraad. Een dergelijk systeem zou in stedelijke omgeving ook gerealiseerd kunnen worden, waarbij de ondergrondse watervoorraad kan worden ingezet voor laagwaardige watertoepassingen in de stad (toiletspoeling, bluswater, koeling, etc.) (Hofman en Paalman, 2014).

### Doorlatende verharding (W)

Doorlatende verharding is erop gericht het neerslagwater op locatie te laten infiltreren in de onderliggende ondergrond. Water infiltreert door de voegen van de klinkers of tegels of in het granulaat van ZOAB. Klinker- en tegelverhardingen zijn vooral effectief bij buien met een lage intensiteit, terwijl de hoge doorlatendheid van ZOAB ervoor zorgt dat ook bij hoge intensiteit relatief veel water geborgen kan worden. Doordat meer water in het gebied wordt vastgehouden verbetert de waterbalans en neemt de kans op overlast door verdroging af.



Uitgaande van een wegoppervlak van 1000 m<sup>2</sup> en een zandonderlaag met een effectieve porositeit van 25% is een diepte van 20 cm vereist om 50 m<sup>3</sup> neerslag te kunnen bergen (zie de uitgangspunten in paragraaf 3.1.2) (Vergroesen, 2013). De benodigde tijd om de berging opnieuw in te kunnen zetten, varieert van een paar uur tot ongeveer een dag, afhankelijk van de doorlatendheid van de onderliggende bodem.



### Verdiepte wegen/verhoogde stoepranden (W)



Water kan tijdelijk op een gecontroleerde manier geborgen worden op straten en in wegbermen, vooral buiten de hoofdwegen. Dit is het meest effectief in een combinatie van een kleine afvoercapaciteit en verdiepte wegen waardoor meer afstromend water tijdelijk wordt geborgen en rustig afstroomt. Compartimentering van de weg, bv. met verkeersdrempels, voorkomt dat water (te snel) wegvloeit naar lagere gebieden die gevoelig zijn voor overstroming door neerslag. Deze maatregel is vooral geschikt in relatief vlakke gebieden.

Om 50 m<sup>3</sup> water te bergen met een diepte van 5 cm is 1000 m<sup>2</sup> straatoppervlak nodig per hectare. De ledigingstijd via het riool is een 0,5 dag (Vergroesen, 2013). Als infiltratie mogelijk is, bijvoorbeeld via doorlatende verharding, kan de maatregel ook een effect hebben op verdroging.

Wegen en trottoirs worden aangelegd op een cunet van zand. Infiltratiekragen en andere vormen van waterberging onder wegen – vaak in combinatie met drainage om te hoge grondwaterstanden in het wegcunet te voorkomen – kunnen ondergronds extra waterberging bieden.

Wegbermen zijn vaak zeer geschikt om water te bergen, beter dan om het regenwater op straat te laten staan. Door bermten te verlagen en zo mogelijk ruimte te maken voor een infiltratiegreppel of -sleuf of daar infiltratiekragen onder te leggen kan er veel ruimte voor waterberging worden gecreëerd. Zo nodig wordt voor de beheersing van de grondwaterstanden ter plaatse en voor het waarborgen van de ledigingstijd wat extra drainage in deze strook aangebracht.

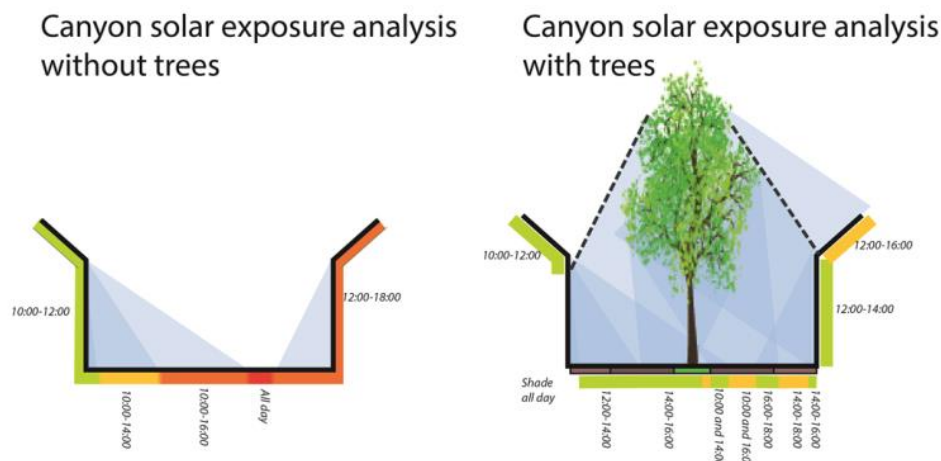
#### 3.3.3 Ontwerpprincipes

Wanneer men kijkt naar een straat of plein is de lokale context bepalend: waar is zon/schaduw en waar beschutting/ventilatie gewenst? Daarbij zijn de fysieke omstandigheden bepalend voor het effect van bijvoorbeeld groen. Ook op dit schaalniveau kunnen verschillende relatief kleine, lokale ingrepen de straat/wijk minder kwetsbaar maken voor klimaatverandering. Een aantal algemene richtlijnen wordt hieronder gegeven en samengevat in **Figuur 3.14**.

#### Algemene richtlijnen

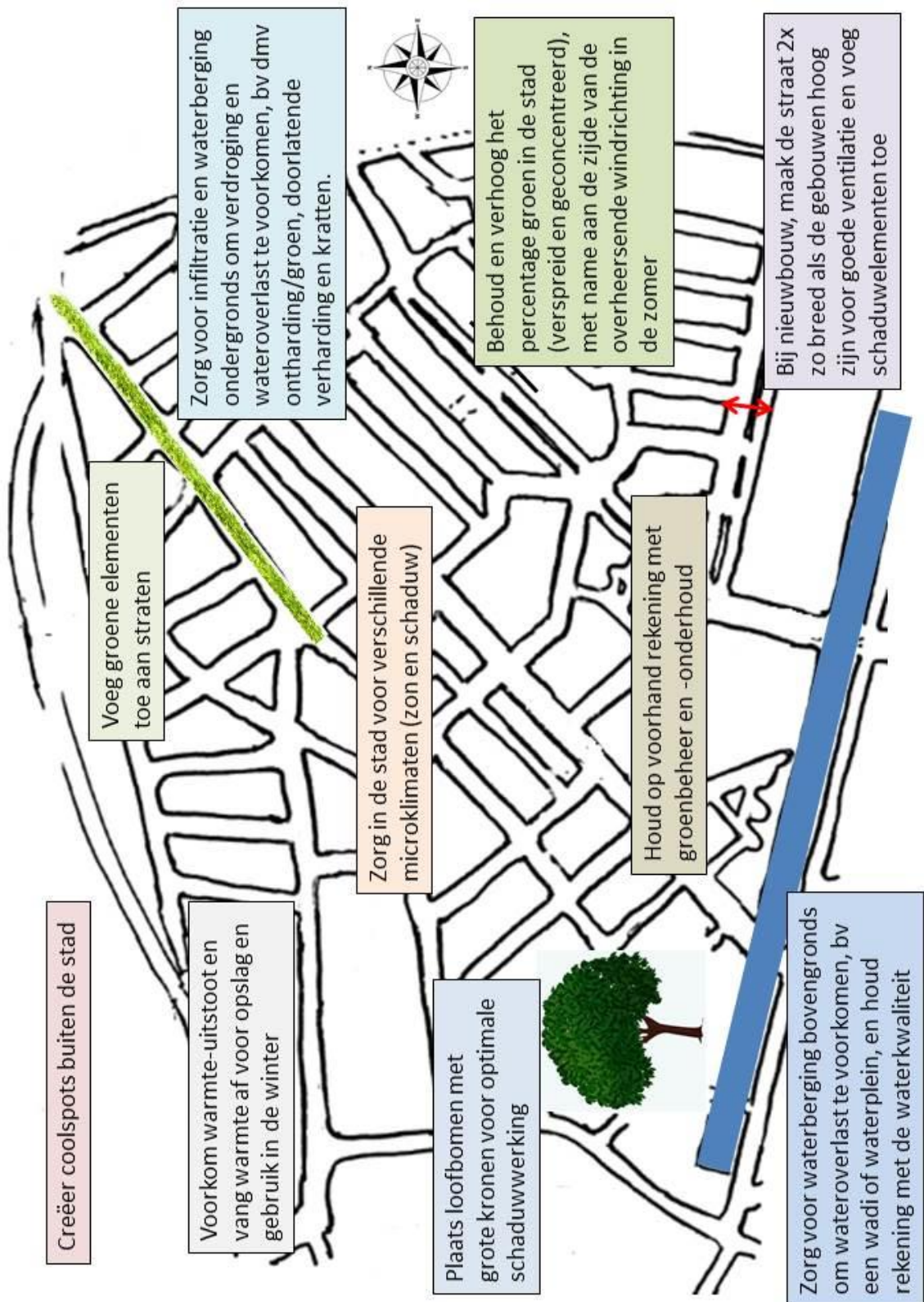
- Voeg groene elementen (in privé en openbare ruimtes) toe, bij voorkeur op zo veel mogelijk verschillende hoogtes en met verschillende microklimaten. (Straat)groen zorgt voor schaduw en verdampingskoeling en wordt gewaardeerd vanuit esthetisch oogpunt. Voor het voorkomen van opwarming van de stedelijke omgeving is verspreid groen effectiever, echter voor het bieden van koele plekken, beleving, recreatie en biodiversiteit zijn parken heel belangrijk. Om de inwoners zelf te laten kiezen wat zij aangenaam vinden, is het creëren van verschil in microklimaten (zon en schaduw) van belang bij de inrichting van de stad. Meer groen zorgt ook voor een betere infiltratie in de ondergrond.
- Voeg bomen met grote kronen toe in straten, in parken of op pleinen met veel zon-inval. Aangezien het schaduweffect van (grote) boomkronen een grote rol speelt (op straten en pleinen, **Figuur 3.12**), zou bij ontwerpogaven specifiek naar de locatie van bomen, boomsoorten en onderhoudsbeleid moeten worden gekeken, om bomen zo effectief mogelijk neer te zetten: Geef daarom aandacht aan optimale schaduwwerking en aan voldoende onderhoud (irrigatie). Gebruik met name loofbomen: schaduw in de zomer/ zon en lichtinval in de winter.





Figuur 3.12 Bezonningsanalyse met en zonder bomen (Hotkevica, 2013)

- Zorg door middel van infiltratie voor voldoende vocht in de bodem voor vegetatie. In veel steden met een schrale ondergrond van ophoogzand wordt van nature weinig water vastgehouden zodat in droge perioden vochttekorten optreden en het effect van verdampingskoeling door groen wordt beperkt. Door hemelwater niet direct af te voeren, maar te laten infiltreren en vast te houden in de bodem kan in droge perioden helpen om de verdamping van de vegetatie op peil te houden. De infiltratie kan worden bevorderd door bijvoorbeeld minder verharding toe te passen of door te werken met doorlatende verharding. Maatregelen tegen hittestress en wateroverlast kunnen worden gekoppeld.
- Creëer ruimte voor ondergrondse en bovengrondse waterberging. Ondergronds kan worden gedacht aan infiltratiekragen en bovengronds kan water worden gebogen door plaatselijk het maaiveld te verlagen zoals van wegen en wegbermen maar ook van gazons en groenstroken, opdat het overtollig regenwater zich daar kan verzamelen zonder schade of hinder te veroorzaken. Waterpleinen en waterparken (laagten in een park, *artificial wetlands*) zijn multifunctionele ruimten voor waterberging, recreatieve activiteiten en natuurontwikkeling die door bewoners in het algemeen hoog gewaardeerd worden. Bij bovengrondse waterberging is het wel belangrijk om het risico van blootstelling aan infectieziekten in acht te nemen.
- Idealiter is de straat minstens 2x zo breed als de gebouwen hoog zijn voor een goede ventilatie, mits er voldoende schaduelementen in de straat aanwezig zijn.
- Voorkom warmte-uitstoot en vang warmte af voor opslag en gebruik in de winter. Antropogene warmtebronnen zorgen voor een significante toename van het hitte-eilandeffect en dienen zoveel mogelijk te worden beperkt (paragraaf 1.3). Door slim om te gaan met het teveel aan warmte in de zomer en deze af te vangen en op te slaan in de ondergrond, kan het weer worden benut in de winter.
- Aanleggen voor groenbeheer. Het functioneren van genoemde adaptatiemaatregelen staat of valt met een goede aanleg én een goed beheer. Bij ontwerp en aanleg moet dus al nadrukkelijk rekening gehouden worden met de beheerbaarheid van de voorziening. Veel van de voorzieningen zullen op openbaar terrein liggen en moeten passen in de onderhoudsschema's voor groen, wegen, drainage, riolering en watergangen van gemeenten en waterschappen.



Figuur 3.14 Ontwerprichtlijnen voor klimaatbestendige wijken. De ontwerprichtlijnen voor stad en regio (3.4) zijn ook in deze figuur verwerkt.



### Richtlijnen voor een hittebestendige wijk

Het indelen van wijken in een categorie kan op vele kenmerken berusten. De belangrijkste parameters waarin de Nederlandse wijktypen zich van elkaar onderscheiden in relatie tot de mate van opwarming zijn in **Tabel 3.4** weergegeven.

Tabel 3.4 Categorisering van bebouwingstypologieën in relatie tot het microklimaat (gebaseerd op Berghauser Pont & Haupt, 2009)

Bouwhoogte	Type bebouwing	Percentage groen/blauw
Laag (tot 3 lagen)	Stroken	Weinig groen (0-20%)
Middelhoog (4-6 lagen)	Open bouwblok	Matig groen (20-40%)
Hoog (7-10 lagen)	Gesloten bouwblok	Veel groen (40-70%)
Hoogbouw (9 en meer lagen)	Verspreid	Zeer veel groen (70-100%)

Ook zonder uitgebreide kennis van microklimaat processen of simulatie modellen is het mogelijk om tot een verantwoorde keuze te komen in adaptatiemaatregelen voor een verbetering van het thermisch comfort. Een wijk kan worden ingedeeld in een microklimaatcategorie op basis van de wijktypologie in combinatie met type inrichting. Deze categorisering kan eenvoudig door stedenbouwkundigen en beleidsmakers zelf worden geïdentificeerd. Vervolgens is er een set aan maatregelen beschikbaar die passend zijn voor die categorie (Kleerekoper, in voorbereiding).

De wijktypologie die binnen CPC is opgezet wordt beschreven in **Tabel 3.5**. Zo behoren de historische binnensteden tot de categorie *middelhoog gesloten bouwblok met weinig groen* en de tuinsteden in Amsterdam West tot de categorie *laag open bouwblok met matig tot veel groen*.

Tabel 3.5 Van wijktypologie naar microklimaatcategorie

Typologie	Periode	Footprint	Hoogte	Groen
Historische binnenstad	voor 1910	gesloten bouwblok	middelhoog	weinig groen
Tuinwijk/dorp	'10-'30	gesloten bouwblok	laag	matig tot veel groen
Woonwijk	'30-'40	gesloten bouwblok	laag	weinig groen
Tuinsteden laag	'45-'55	open bouwblok	laag	matig tot veel groen
Tuinsteden hoog	'50-'60	open bouwblok	middelhoog/hoog	matig tot veel groen
Bloemkoolwijk	'75-'80	stroken open bouwblok	laag	weinig tot matig groen
Vinex	'90-'05	stroken gesloten bouwblok	laag	matig groen
Hoogstedelijk centrumgebied	'60-heden	verspreid	hoogbouw	weinig groen



Historische binnenstad (middelhoog gesloten bouwblok met weinig groen)

- Tijdelijke en flexibele maatregelen zoals katoenen doeken over straten en pleinen, het vernevelen van water op hoogte van voetgangers, het bewateren van de straat om de stralingswarmte van de stenen te verminderen, zitelementen die zomers voor een schaduw plek zorgen en in de winter beschermen tegen de wind en elementen aanbrengen die de ventilatie in de straat bevorderen;
- Vaste en robuuste maatregelen zoals pergola's die begroeid zijn met bladverliezende klimmers, arcades langs zuidgevels, een overdekt deel (of looppad) van de straat, waterstroompjes in de straat (zie voorbeeld Freiburg), fontein, witte daken, groene daken, gevel begroeiing (klimplanten) of groene gevel (ook worteling van planten in de gevel).

Tuinwijk/tuindorp (laag gesloten bouwblok met matig tot veel groen )

- Bevorderen van groen in privétuinen: door bijvoorbeeld bewoners te inspireren en voorlichting te geven over alle belangen en voordelen dat groen heeft.
- Bevorderen van aanleg van regenwateropvang en –hergebruik in woningen. Via de waterschaps- of gemeentebelasting kunnen heffingen worden aangepast aan de mate van verharding in tuinen of wanneer hemelwaterafvoer op eigen terrein wordt opgevangen dit met minder heffing te belonen;
- Straatbomen toevoegen op een strategische plaats.

Woonwijk (laag gesloten bouwblok met weinig groen)

- Geveltuintjes en gevel groen;
- Type verharding: half-verharding, waterdoorlatende verharding, lichte kleuren;
- Parkeeroplossing in combinatie met een constructie voor klimplanten;
- Platte daken inzetten voor thermisch comfort op straatniveau: een witte reflecterende coating, groene daken met een voldoende dikke substraat laag
- Ventilatie bevorderen: wanneer er geen mogelijkheid van meer groen is kan het bevorderen van ventilatie extra belangrijk zijn. Dit kan bijvoorbeeld door meer hoogteverschillen in de bebouwing aan te brengen of door te werken met 'hete' en 'koele' plekken waartussen de lucht zich zal gaan verplaatsen (thermische trek);
- Parkeeroplossing trachten te vinden: de straten kunnen worden ingericht met een enkele rij bomen die de zuid-, oost- of westzijde beschaduwen. Bij autovrije straten kan zelfs een dubbele bomenrij worden ingezet. In sommige gevallen kunnen leibomen een uitkomst bieden wanneer de positie van de boom niet ver genoeg van de gevel kan worden gekozen.

Tuinstad laag (laag open bouwblok met matig tot veel groen)

- Bevorderen van groen in privétuinen;
- Waarde verhogen van semi-openbaar groen: kwaliteit van het groen verbeteren en meerdere functies koppelen aan de groengebieden. De semi-openbare binnen gebieden hebben een groen middenveld van ongeveer 30\*50 m. De functies die hieraan worden verbonden kunnen niet uitsluitend voor de bewoners zijn, omdat dan het openbare karakter verloren gaat. Maar ook publieke functies zijn hier minder op zijn plek omdat de bewoners dat als inbreuk op hun privacy kunnen ervaren, het betreft immers hun achtertuin. Wanneer een sociale functie van rustige aard is en een gering aantal mensen tegelijk aantrekt zal dit minder frictie geven. Dit kan bijvoorbeeld een wandel of honden uitlaatrouten zijn, waterberging, vlinder- en bijentuin, fruit- en notenboomgaard, etc.



Tuinstad hoog (middelhoog/hoog open bouwblok met matig tot veel groen)

- Bevorderen van groen in privétuinen;
- Waarde verhogen van semi-openbaar en openbaar groen. De grote maat (70\*100) van de semi-openbare binnen gebieden lenen zich voor bijzondere functies, zoals waterzuiveringsgebied met rietplanten en waterlopen, gemengde teelt (stadslandbouw of moestuinen), kinderboerderij, waterspeeltuin, hondentrainingsveld, ligweide/evenementen terrein met vaste BBQ's en vergunning voor ijsjes-, friet-, oliebollekar. Door de wijk heen: wandel paden, geasfalteerd pad voor fietsers en skeelers, parcours voor mountainbikers.

Bloemkoolwijk (lage strokenbouw en open bouwblok met weinig tot matig groen)

- In bloemkoolwijken is het grote aantal auto's vaak een probleem. Oplossingen om de auto in te passen zou hand in hand gaan met groen en schaduw elementen. Het aantal auto's verminderen is hier geen optie omdat de wijken vaak op grote afstand van het centrum liggen. Wel zou je kunnen denken aan (elektrische)deelauto's of parkeervoorzieningen aan de rand van de wijk. Wanneer er hiermee weer meer ruimte in de wijk komt kan deze worden ingezet voor meer speelplekken, meer bomen, regenwateropvang en infiltratie doormiddel van wadi's, regenwateropslag in diepe ondergrond;
- Gevelgroen;
- Witte daken.

VINEX (lage strokenbouw en gesloten bouwblok met matig groen)

- Bevorderen van groen in privétuinen, ook de trend van antracieten plavuizen als verharding zien te keren;
- Oplossingen om de auto in te passen in combinatie met groen en schaduw elementen.

Hoogstedelijk centrumgebied (hoogbouw met weinig groen)

- Diversiteit aan plekken aanbieden: beschutte plekken uit de wind, schaduwrijke plekken, zonnige plekken en wellicht plaatsen uit de regen;
- Grote mate van verharding verminderen door bijvoorbeeld dak parken te realiseren;
- Inzetten op het omzetten van zonne-energie in de vorm van warmte of elektra met de grote dak en gevel oppervlakken.



## 3.4 Stad en regio

### 3.4.1 Doel

In dit hoofdstuk kijken we naar maatregelen die het niveau van afzonderlijke gebouwen, straten en wijken overstijgen. Op het schaalniveau van de stad en stadsregio is onderzocht hoe de ruimtelijke planning invloed kan hebben op hittestress en wateroverlast in de stad. Hoe kan de stad en het buitengebied zo worden ingericht dat:

#### 1. de buitentemperatuur in de stad niet veel oploopt t.o.v. het buitengebied en hittestress wordt beperkt (H)

Indien goed uitgevoerd, kunnen koelte-eilanden in de stad en koele plekken net buiten de stad een positieve invloed uitoefenen op de temperatuur binnen de stad.

#### 2. hemelwater goed wordt verwerkt en wateroverlast en droogte in de stad kan worden beperkt (W).

Mogelijkheden voor waterberging en infiltratie rond de stad kunnen bijdragen aan het stedelijk waterbeheer. Randvoorwaarde voor deze maatregelen is dat ze veilig en gezond zijn voor de omwonenden.

### 3.4.2 Maatregelen

**Tabel 3.6** geeft een overzicht van maatregelen op stad- en regioniveau die binnen CPC zijn onderzocht. Een aantal maatregelen wordt hieronder kort toegelicht. Meer informatie is te vinden in CPC publicaties zoals door Vergroesen (2013), ), Klemm 2013b, 2014a Kleerekoper et al. (onder review a) Echevarria et al., gepland in 2014 b)

Tabel 3.6 Overzicht maatregelen 'Stad en regio'

Maatregel	Impact	Effectiviteit	Type
Parken	H/W	++/++	G
Koelewindcorridor	H	onbekend	C
Oppervlaktewater	H/W	+/-, +	C
Berg-bezinkvoorziening	W	+	T
Extra drooglegging/ophoging	W	+	T
Vorbemalen/versneld afvoeren	W	+	T

#### *Parken in de stad (H/W)*

Het effect van groen op straatniveau is onder 3.3.2 besproken. In het volgende kijken we naar grotere oppervlakten van groen in de vorm van parken (op stadsniveau tot 8 hectare). Resultaten van (bakfiets)metingen op stadsniveau in Utrecht in het kader van CPC tonen een gemiddeld verschil in luchttemperatuur van een park tot zijn directe bebouwde omgeving van 1°C (gemeten in de middaguren op een hete zomerdag) (**Tabel 3.7**). Gekeken naar het thermisch comfort (PET) zijn parken gemiddeld 2 °C koeler dan de stad en 5 °C koeler dan het buitengebied. 10% meer boomkronen in een park leidt tot een afkoeling van 3,2 °C  $T_{mrt}$  (stralingstemperatuur). Dit maakt parken overdag tot cool islands in de stad (Klemm et al. 2013b, Klemm et al. 2014a).



Tabel 3.7 Gemiddelde en dagelijkse maxima voor  $T_a$ ,  $T_{mrt}$  en PET waarden in 13 onderzochte parken in Utrecht, het stadscentrum en boven open grasland buiten de stad op 24 juli 2012 (12:00 - 17:00 UTC) (bron: (Klemm et al., 2013b, Klemm et al., 2014a).

	Gemiddeld (12-17:00 UTC)			Dagelijkse maxima		
	$T_a$ [C°]	$T_{mrt}$ [C°]	PET [C°]	$T_a$ [C°]	$T_{mrt}$ [C°]	PET [C°]
<b>13 parken</b>	27.4	42.7	32.3	27.7	46.4	34.0
<b>Stadscentrum</b>	28.2	44.4	34.2	28.5	47.6	35.1
<b>Open grasland</b>	27.1	56.3	37.3	27.5	60.0	39.2

Groenfractie aan de loefzijde (de zijde waar de wind vandaan komt) verbetert de luchttemperatuur in parken overdag en 's nachts (Klemm et al.2014a; Heusinkveld et al. 2014). Dit houdt in dat niet alleen grote groene ruimtes in de stad bijdragen aan een verlaging van de luchttemperatuur, maar dat ook het geaccumuleerde effect van alle groene plekken (bestaande uit privé en openbare groene ruimtes en elementen) een positief effect heeft. Een goede vochtvoorziening van dit groen is belangrijk omdat het verkoelende effect deels wordt verkregen door de verdamping (evapotranspiratie) van deze vegetatie.

Daarnaast ervaren mensen stedelijke groene ruimtes als meer thermisch comfortabel dan ruimtes met hoofdzakelijk water of verharding. Circa 800 interviews met passanten in Utrecht, Rotterdam en Arnhem laten zien dat stedelijk groen een belangrijke rol speelt wat betreft thermisch comfort en recreatie op warme zomerdagen. 91% van alle ondervraagden geeft aan parken en ander grote groenstructuren aangenaam te vinden, 70% vindt parken zelf belangrijk. De favoriete plekken die men op warme zomerdagen opzoekt, zijn dan ook het Wilhelminapark (Utrecht), het Kralingse bos (Rotterdam) en het Sonsbeekpark (Arnhem) (Drost, 2013; Klemm, 2014a). Groene ruimtes in de stad worden ook meer geprefereerd voor buitenverblijf op warme zomerdagen dan omgevingen met water of verharde omgevingen in de stad. Groene ruimtes zijn dus van groot belang voor buitenrecreatie op warme zomerdagen (Klemm, 2014a), zie **Tabel 3.8**.

Tabel 3.8 Geprefereerde stedelijke ruimtes met betrekking tot thermisch comfort

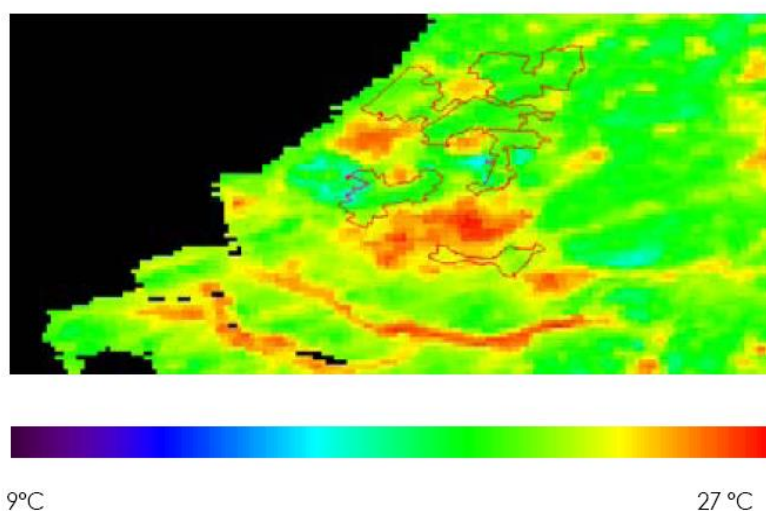
Omgevingstype	Aantal keren genoemd
Groen	399 (59.4%)
Water	171 (25.4%)
Bebouwd	102 (15.2%)
<i>Totaal</i>	<i>672 (100%)</i>

Grotere groene infrastructures in steden zoals parken en groenstroken zorgen ook voor infiltratie van hemelwater, zodat het niet hoeft te worden afgevoerd, en kunnen gebruikt worden voor het bergen van water. De eenvoudigste implementatie is afstromend regenwater van paden en wegen direct af te voeren naar het naastgelegen groen. Om de waterbergingsfunctie te vergroten kunnen elementen worden ingezet, zoals wadi's, infiltratiegreppels, -kratten en -putten, en maaiveldaanpassingen (Vergroesen, 2013) (Echevarria et al., gepland in 2014 b).



### Coolspots buiten de stad (H)

Binnen CPC zijn met satellietbeelden coolspots geïdentificeerd en geanalyseerd voor Zuid-Holland. Coolspots zijn de gebieden met koelere oppervlaktetemperaturen gedurende hittegolven. Hiervoor zijn landoppervlaktebeelden van de nacht van 18 juli 2006 gebruikt (de heetste nacht van de hitte golf van 2006). **Figuur 3.14** geeft de coolspots aan in Zuid-Holland die gemiddeld 4-5 °C koeler zijn dan de stadscentra (Echevarria et al., gepland in 2014 b).



*Figuur 3.14 Satellietbeeld van de nachtelijke oppervlaktetemperatuur op 18 juli 2006 in Zuid-Holland. Satelliet: Modis 11A1 (Echevarria et al., gepland in 2014 b).*

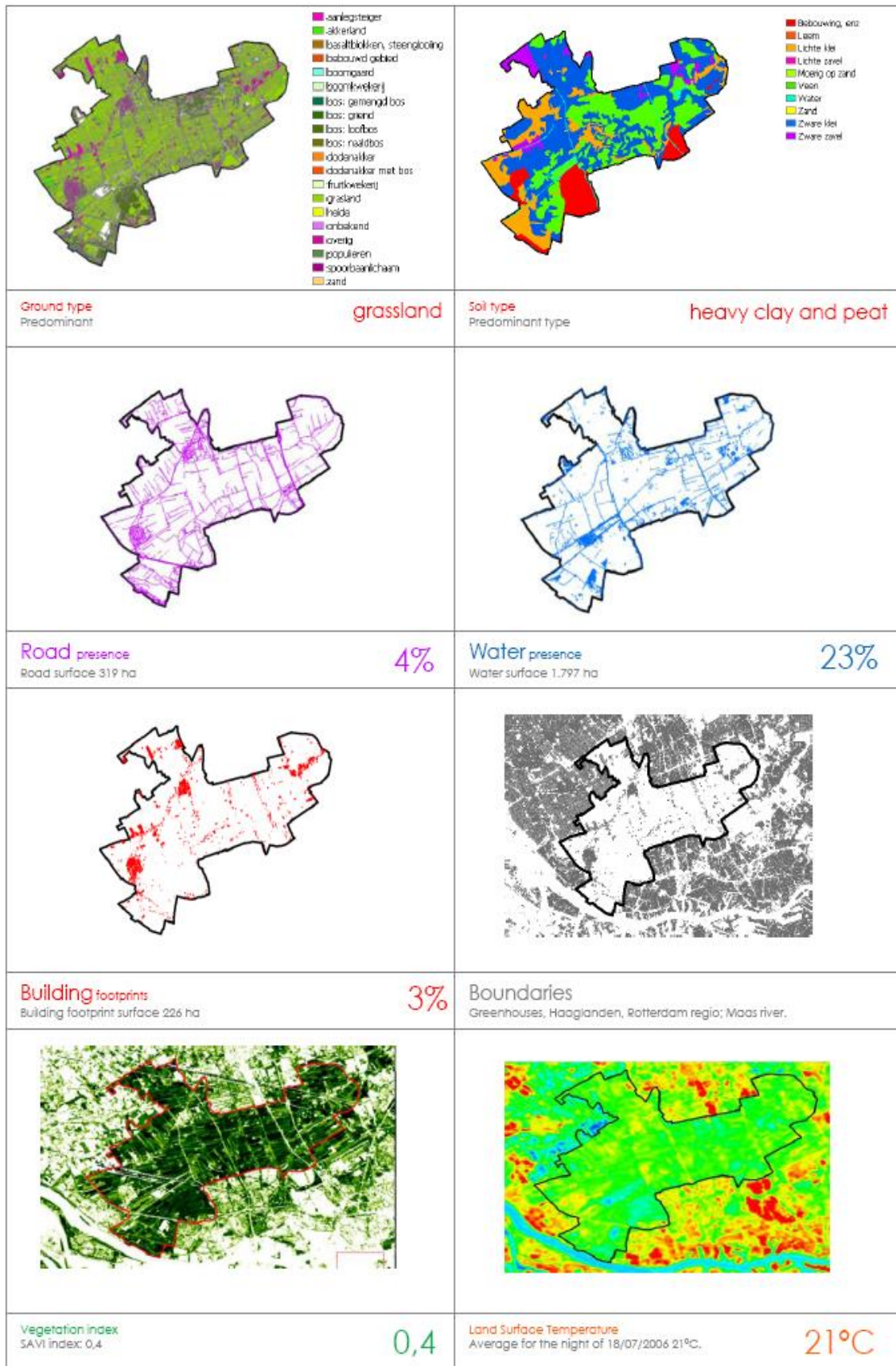
Om de karakteristieken van een coolspot te bepalen is elke coolspot geanalyseerd op grondsoort, landgebruik, bodemtype, vegetatie-index, topografie, gebouwhoogte, grondwaterpeil en uiteraard de nachtelijke oppervlaktetemperatuur (**Figuur 3.15**)

Uit analyse blijkt dat coolspots van Zuid-Holland over het algemeen een hoge vegetatie-index hebben en doorgaans in gebruik zijn als gras- of akkerland. De Vegetatie Index (SAVI) varieert van 0,36 tot 0,47. De maximale hoeveelheid weg- en bebouwingsdekking is niet meer dan 10% van het totale bufferoppervlak (Echevarria et al., gepland in 2014 b). De grootte van de geanalyseerde coolspots varieert van 3.700 ha tot 10.600 ha. Verder lijkt lichte en zware zavel en lichte en zware klei hitte te accumuleren, terwijl zand en veengronden vaak verbonden zijn aan gebieden met lagere nachtelijke oppervlaktetemperaturen tijdens hittegolven. Vrije circulatie van de wind heeft ook een potentieel positief effect op de koelcapaciteit van het landschap.





**MIDDEN DELFLAN** ..... **7.866 ha**

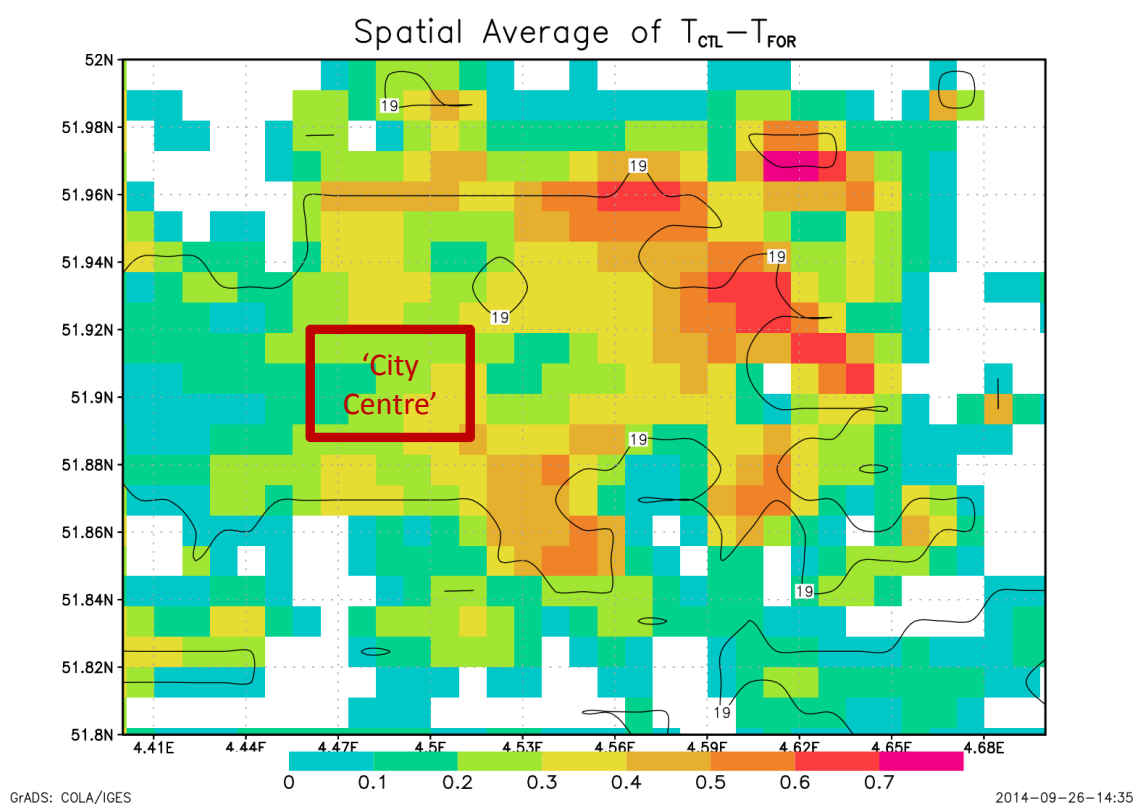


Figuur 3.15 Coolspotanalyse van Midden Delfland (Echevarria et al., gepland in 2014 b).



Ook zijn modelsimulaties voor Rotterdam gedaan om te kijken wat het verschil in temperatuur in de stad zou zijn tussen het huidige landgebruik, voornamelijk grasland, en wanneer Rotterdam omringd zou zijn door bossen. Deze modelsimulaties zijn uitgevoerd met een fijnmazig regionaal atmosferisch model (RAMS) dat gekoppeld is met een uitgebreid model voor het stedelijk gebied (TEB/LEAF-3) (Ter Maat et al., 2014). Overdag maakt het vrijwel niet uit of de stad omringd is door grasland of door bos, maar 's nachts zou het in de stad 0,3-0,8 °C koeler zijn wanneer de stad omringd zou zijn door bossen.

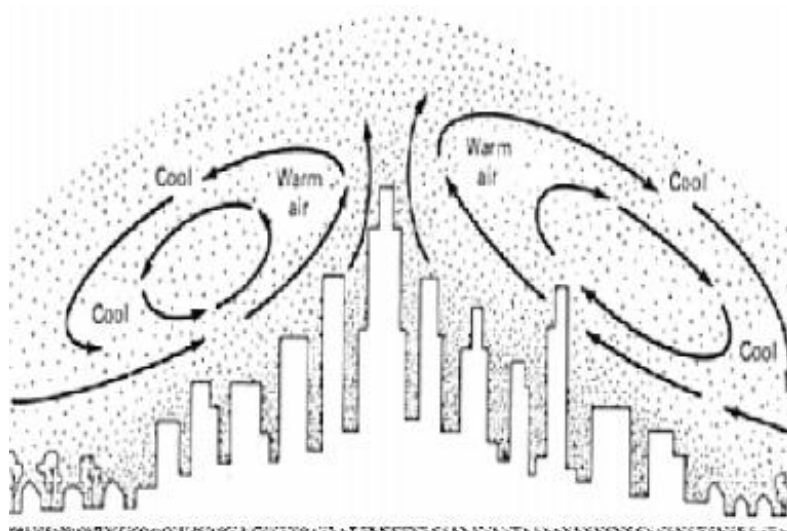
Het effect is het best merkbaar aan de randen van de stad dicht bij het bos, maar de invloed reikt ook tot het centrum (**Figuur 3.16**). Het temperatuurverschil in het oosten is groter dan in het westen en heeft te maken met de heersende windrichting, die tijdens een hittegolf veelal uit oostelijke richting komt. Daarnaast heeft er westelijk van de stad niet heel veel landgebruiksverandering plaats gevonden.



*Figuur 3.16 Het verschil in nachttemperatuur (°C) in de stad Rotterdam (zwarte omtrek) voor het huidige landgebruik (voornamelijk grasland) in de omgeving ( $T_{CTL}$ ) en wanneer Rotterdam omringd zou zijn door bossen ( $T_{FOR}$ ) (bron: Ter Maat et al., 2014).*

### **Koelewindcorridors (H)**

Koelewindcorridors kunnen ervoor zorgen dat de koele lucht van coolspots die net buiten de stad liggen wordt getransporteerd naar hotspots binnen de stad. Het zogenaamde 'urban plume'-effect kan erbij helpen dat koele lucht van koele plekken naar warme plekken wordt verplaatst (**Figuur 3.17**; zie ook **Figuur 1.8**). Eerdere studies voor grote buitenstedelijke parken tonen aan dat groene gebieden tot op grote afstand een koelend effect kunnen hebben: tot 4 kilometer van het park voor Seoul (Choi et al., 2012) en tot 2 kilometer in het geval van het 500 hectare grote Chapultepec Park in Mexico City (Jauregui, 1990). Meer informatie over de afstand tussen de coolspot en hotspot en identificatie van bestaande windroutes, evenals diepgaandere windsimulaties en andere studies, is echter nodig om de koelewindcorridors in detail te kunnen ontwerpen.



Figuur 3.17 Het 'urban-plume' effect: Warme lucht stijgt boven de hotspots waardoor koele lucht vanuit de hotspots wordt aangetrokken via de 'urban canopy' laag op straatniveau. De warme lucht circuleert vervolgens weer van de hotspots naar de coolspots via de 'urban boundary' laag. Wanneer er wind staat waaiert de warme lucht van de stad uit over het buitengebied (gewijzigd van: Oke, 1976) (zie ook het tekstkader 'Stedelijk hitte-eiland effect').

### 3.4.3 Ontwerpprincipes

#### Algemene richtlijnen Stad en Regio

- Behoud en zo mogelijk verhoog het percentage groen in de stad, met name aan de zijde van de overheersende windrichting in de zomer. Groenfractie aan de zijde waar de wind vandaan komt verbetert de luchttemperatuur in parken. Dit houdt in dat niet alleen grote groene ruimtes in de stad bijdragen aan een verlaging van de luchttemperatuur, maar dat ook het geaccumuleerde effect van alle groene plekken (bestaande uit privé en openbare groene ruimtes en elementen) een positief effect heeft (Klemm, 2014a; Heusinkveld, 2014). Een goede vochtvoorziening van dit groen is belangrijk omdat het verkoelende effect deels wordt verkregen door de verdamping (evapotranspiratie) van deze vegetatie. Ook zorgt meer groen voor een betere infiltratie van regenwater in de bodem en voorkomt daarmee verdroging.
- Leg coolspots rond de stad aan. Ondanks het feit dat er meer onderzoek nodig is naar de werking en toepassing van cool wind corridors, verdient het de aanbeveling om te kijken naar de mogelijkheden om coolspots aan te leggen rond de stad. Coolspots bestaan voor 90% of meer uit vegetatie (bv. gras, akkerland of bos). Het meeste effect hebben coolspots aan de loefzijde van de stad, zodat de wind de koele lucht de stad in blaast. De overheersende windrichting in de Bilt tijdens hittegolven is hoofdzakelijk noordoostenwind (Kleerekoper et al., onder review a). Echter, tijdens hittegolven is het vaak (bijna) windstil. Door het 'urban-plume' effect kan nog steeds koude lucht uit de omgeving worden aangetrokken, maar is de positie ten opzichte van de windrichting minder van belang.



### 3.5 De Meekoppelmethode

Adaptatiemaatregelen zullen bijna altijd onderdeel zijn van het ‘meekoppelen’ met andere projecten. CPC heeft bijgedragen aan de ontwikkeling van de ‘meekoppelmethode’; een nieuwe, integrale benadering voor het identificeren van het optimale meekoppelmomenten voor adaptatiemaatregelen binnen de stedelijke dynamiek (Van Herk et al., 2012; Gersonius et al., 2013). Deze methode is een dialoog-ondersteunende tool. Zij beoogt de samenwerking te stimuleren tussen actoren op lokaal niveau, waardoor (lokale) belangen en kennis worden meegenomen. Per definitie ambieert stedelijke vernieuwing diverse sociale, economische en fysieke doelen die afgewogen en verbonden moeten worden door verschillende actoren. Bovendien ondersteunt de meekoppelmethode de communicatie met en tussen bestuurders. De kansen van het meekoppelen met stedelijke vernieuwing, de integratie van doelen en de houdbaarheid van strategieën worden begrepen als concept en stimuleren een discussie over de ambitie ten aanzien van klimaatbestendigheid. De nieuwe benadering helpt in een transitie van sectorale naar integraal waterbeheer en ruimtelijke ontwikkeling.

*Voorbeeld: met meer inzicht in het functioneren van het stedelijk watersysteem kunnen gemeenten kosteneffectievere keuzes maken. Het knikpunt in de riolering kan bijvoorbeeld in de tijd opgeschoven worden met maatregelen elders in het watersysteem, bijvoorbeeld in de openbare ruimte. Deze uitruil van maatregelen in verschillende deelsystemen van het watersysteem vraagt wel om een goed inzicht in het gehele stedelijk watersysteem. Zo kunnen goed afgestemde keuzes met betrekking tot het wel of niet afkoppelen van regenwater van afvalwater, het type buizen, de maatregelen in de openbare ruimte en de hoeveelheid oppervlaktewater leiden tot grote kostenbesparingen en meer klimaatbestendigheid van het gehele watersysteem. Met de knikpuntenbenadering kan de gemeente zien, of de maatregelen het systeem klimaatbestendiger maken (i.e., of het knikpunt verplaatst).*

De meekoppelmethode bestaat uit drie onderdelen: (1) Analyse van adaptatiekansen, (2) Analyse van knikpunten (Adaptation Tipping Points, ATP) en (3) Bepalen van optimale meekoppelmomenten (AMM) (zie **Figuur 3.18**).

#### **1. Identificeer de adaptatiekansen in de stad (Stap 1+2, AMM)**

In stedelijke gebieden biedt de doorlopende stroom van stedelijke vernieuwing, zoals herstructureringsprojecten, onderhoud en beheer projecten van openbare ruimte, en onderhoud en beheer van gebouwen kansen voor implementeren van adaptatiemaatregelen (**Figuur 3.19**). Vanuit dit perspectief kan de stedelijke dynamiek gezien worden als aanjager voor het inbouwen van adaptief vermogen van de stad. Wanneer er nog geen inzicht is in toekomstige vernieuwingen, renovaties of onderhoud kan een analyse gemaakt worden van de autonome vernieuwing, revitalisatie en ontwikkelingscycli voor infrastructuur, gebouwen en openbare ruimte (bijv. rioolvernieuwing, herstel wijk, stedelijke vergroening). Een eenvoudige, maar praktische manier om dit te doen is, door gebruik te maken van voorspellingen van de verwachte fysieke levensduur van diverse objecten in stedelijk gebied.

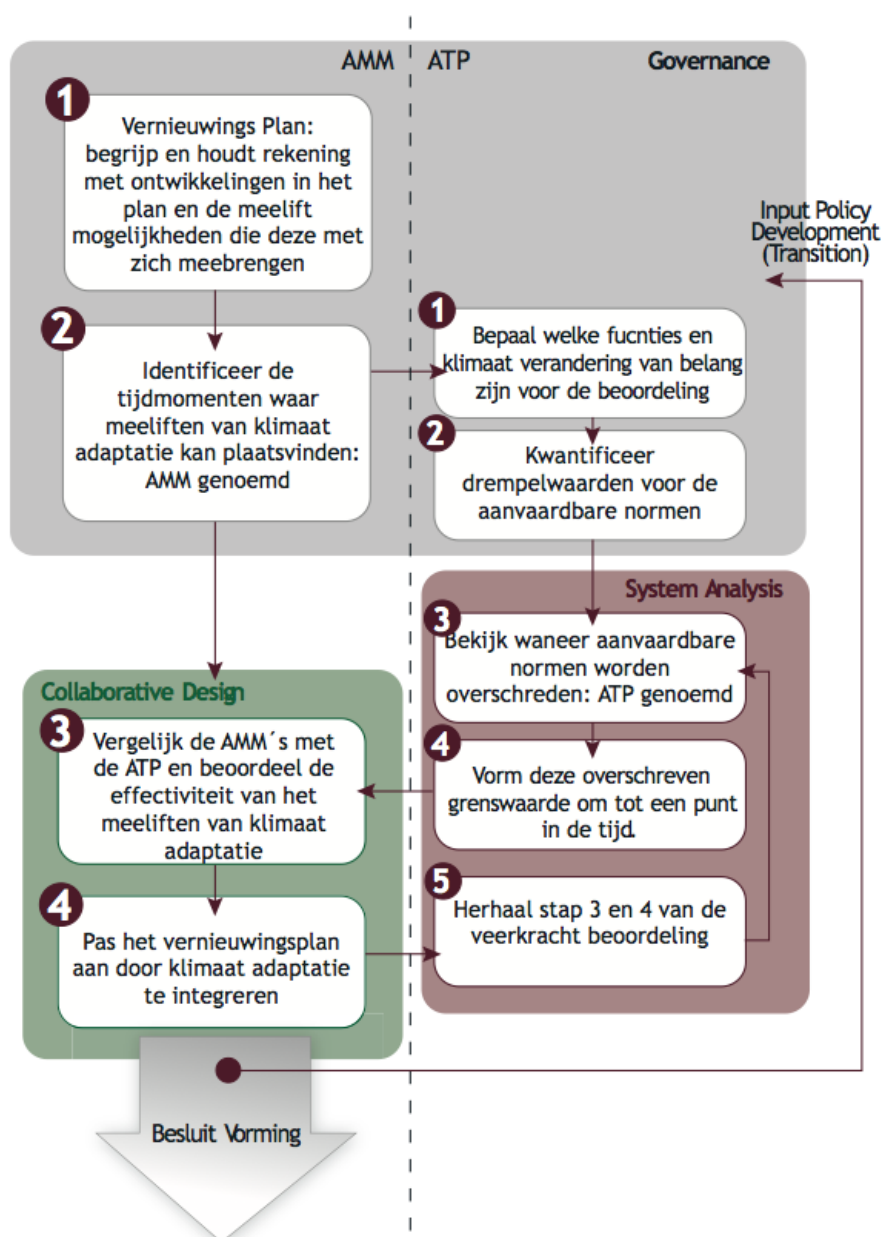
#### **2. Voer knikpuntenanalyse uit (Stap 1 t/m 5, ATP)**

De knikpuntenanalyse zoals beschreven in paragraaf 2.3.2 wordt uitgevoerd om de gevolgen van klimaatverandering in beeld te brengen en de robuustheid van maatregelen te testen. De analyse bestaat uit meerdere stappen en kan gebruikt worden om te laten zien hoeveel klimaatverandering (verhoging neerslagintensiteit) het stedelijk systeem aan kan. De te volgen stappen zijn hier niet verder uitgewerkt. Hiervoor wordt onder andere verwezen naar paragraaf 2.3.2.



### 3. Identificeer optimale meekoppelmomenten (Stap 3+4, AMM)

De meest geschikte meekoppelmomenten worden bepaald aan de hand van een analyse van zowel de kritische knikpunten als de adaptatiekansen op basis van de planning voor het (groot) onderhoud- en beheerprojecten en herstructureringsprojecten in de stad. Wanneer een knikpunt voor het systeem later op treedt dan een adaptatiekans, doet zich een meekoppelmoment voor waarin adaptatiemaatregelen kunnen worden meegenomen. Met deze informatie aangevuld met informatie over andere opgaven in de wijk kunnen maatregelenpakketten geformuleerd worden die zowel het knikpunt voor het watersysteem verleggen en ook optellen bij andere opgaven in de stad. Een analyse van de potentiële adaptatiemaatregelen en het analyseren van de belangrijkste knikpunten (aantal keer herhalen van stap 3 en 4) resulteert in een aantal adaptieve strategieën. De kritische knikpunten zullen (in de tijd) verschuiven door de implementatie van de gekozen strategie.



Figuur 3.18 Gecombineerde aanpak adaptatiekansen en knikpunten: de meekoppelmethode (Van Herk et al., 2012).



*Waterdoorlatende bestrating op parkeerplaatsen bergt regenwater onder de grond en maakt een groene vormgeving mogelijk van de grote aantallen nieuwe parkeervoorzieningen die in Wielwijk moeten worden gemaakt (bron: Hesper Landschapsarchitectuur en Stedenbouw)*



*Filtering van het afgekoppelde regenwater dat valt op een nieuwe te maken weg wordt gekoppeld aan de aanleg van natuurvriendelijke oevers (bron: Rijnbout Architectuur, Stedenbouw en Landschap)*



*Een 'waterveranda' die functioneert als super regenton en als bijzonder woonelement kan worden toegepast in zowel de nieuwbouw- als renovatieprojecten in de wijk (bron: Faro Architecten)*



*Een 'groene goot' bestaat uit hoogteverschillen in het groen die tijdelijke waterberging mogelijk maken. Deze maatregel kan worden geïntegreerd in de aanleg van de nieuwe parkzone in het hart van de wijk (bron: Hesper Landschaps-architectuur en Stedenbouw)*



*Figuur 3.19 Selectie uit de fotomontages van kansrijke maatregelen*

### 3.6 Tools voor adaptatieplanning

Om de stedelijke omgeving meer klimaatrobust in te richten en effectieve pakketten van maatregelen samen te stellen zijn binnen en in aansluiting op het Climate Proof Cities (CPC) programma een aantal tools ontwikkeld. Belangrijke drijfveer voor deze ontwikkeling was het onderdeel Nieuwbouw en Herstructurering van het Deltaprogramma. In dat kader zijn handreikingen, procedures en hulpmiddelen ontwikkeld en publiek beschikbaar gesteld<sup>29</sup>. Voor het identificeren en prioriteren van probleemgebieden is een stresstest ontwikkeld; deze test sluit af met een doelgerichte adaptatieplanning.

<sup>29</sup> <http://www.ruimtelijkeadaptatie.nl/>



Gemeenten, waterschappen en andere belanghebbende partijen worden door deze procedures en tools gefaciliteerd bij het klimaatbestendiger inrichten van hun gebieden, objecten en netwerken, Onderstaand worden een aantal tools toegelicht, na een algemene introductie over de inzet van rekenmodellen. De onderstaande paragraaf over de inzet van rekentools voor wateroverlast geldt, *mutatis mutandis*, evenzeer voor de inzet van rekentools voor andere klimaatrisico's.

### 3.6.1 Inzet van rekentools voor wateroverlast

Om de verwerking van extreme neerslag in goede banen te leiden worden rekentools ingezet. Het stedelijke afwateringssysteem wordt met behulp van die rekentools gedimensioneerd en later ook gecontroleerd. Ook het combineren met waterverbruiksmoedellen in gebouwen geeft inzicht in de toepassingsmogelijkheden van opvangen regenwater. Rekentools worden ook ingezet om het effect te voorspellen van maatregelen die de robuustheid van het afwateringssysteem vergroten.

Onder rekentools in dit document het hele scala verstaan, lopend van gezond verstand tot complexe numerieke modellen. Het spreekt voor zich dat gezond verstand in combinatie met gebiedskennis en ervaring altijd gebruikt moet worden. Bij gebruik van numerieke modellen echter, wordt bij toenemende complexiteit het risico groter dat het gezonde verstand wordt uitgeschakeld en de resultaten klakkeloos voor juist en exact worden aangenomen (Vergroesen 2013).

Algemeen kan worden gesteld dat naarmate de rekentools complexer worden, de noodzaak van het gebruik daarvan minder vaak optreedt, terwijl de hoeveelheid benodigde data om die tools goed te kunnen gebruiken groter wordt en ook de vereiste kwaliteit van die data hoger wordt. We kunnen drie onderzoek niveaus onderscheiden, waarbij ook de orde van de benodigde rekentools verschillend is. Onderstaande tabel geeft een overzicht van de beschikbare rekentools (**Tabel 3.9**).

Tabel 3.9 Relatie tussen onderzoeksniveau en inzet van rekentools (Vergroesen 2013).

Onderzoeksniveau	Benodigde rekentools
Oriënterend onderzoek naar werking van het stedelijke afwateringssysteem of naar het effect van maatregelen op dat afwateringssysteem.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– gezond verstand</li> <li>– gebiedskennis en ervaring</li> <li>– kentallen</li> <li>– modellen 1<sup>e</sup> orde: <ul style="list-style-type: none"> <li>• waterbalansen</li> <li>• bakjesmodellen</li> <li>• maaiveldanalyses (GIS)</li> </ul> </li> <li>– reeds aanwezige modellen</li> </ul>
Onderzoek naar de werking van specifieke delen van het stedelijke afwateringssysteem of naar het effect van “geen spijt” maatregelen op dat deel van het afwateringssysteem, waarbij de wisselwerking met andere delen van het afwateringssysteem verwaarloosbaar is.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– gezond verstand</li> <li>– gebiedskennis en ervaring</li> <li>– reeds aanwezige modellen</li> <li>– modellen 2<sup>e</sup> orde: <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1D rioleringsmodellen</li> <li>• 1D oppervlaktewatermodellen</li> <li>• 2D overstromingsmodellen</li> <li>• 3D grondwatermodellen</li> </ul> </li> </ul>
Onderzoek naar de werking van het totale stedelijke afwateringssysteem of naar het effect van kostbare maatregelen op dat afwateringssysteem, waarbij de wisselwerking tussen de verschillende onderdelen van het afwateringssysteem optreedt.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– gezond verstand</li> <li>– gebiedskennis en ervaring</li> <li>– reeds aanwezige modellen</li> <li>– modellen 3<sup>e</sup> orde: <ul style="list-style-type: none"> <li>• gekoppelde stromingsmodellen</li> <li>• integrale stromingsmodellen</li> </ul> </li> </ul>



### 3.6.2 3Di gebiedsmodel voor wateroverlast en overstroming

Het 3Di gebiedsmodel dat met hulp van CPC is ontwikkeld is in 2.4.1 al besproken als een tool die inzicht geeft in de kwetsbaarheid van een gebied voor wateroverlast. 3Di kan ook gebruikt worden als een afwegingsinstrument waarbij de effecten van ingrepen in het systeem interactief kunnen worden getoond op een touchtable tijdens een werksessie (Leeuwen en Schuurmans, 2014). Omdat de ruimtelijke resolutie erg hoog is en de rekensnelheid een factor 1000 sneller is dan vergelijkbare instrumenten, kan 'aan tafel' tijdens het beslissingsproces worden gerekend. Het feit dat berekeningen kunnen worden gepauzeerd, aangepast, en weer kunnen worden gestart, maakt dat alle betrokken, ook niet-waterspecialisten klimaatadaptieve maatregelen kunnen 'uitproberen'. Zo ontstaat snel consensus over nut en noodzaak van maatregelen en een scheiding tussen zinvolle en zinloze maatregelen.



Figuur 3.20 Interactieve werksessie met 3Di op de touchtable

Uit de in het kader van CPC gehouden workshops blijkt dat:

- Klimaatadaptatie minder een communicatie- dan een informatieprobleem is. Problemen in ontwerpessies met water die tot voor kort door ons als communicatieproblemen werden gezien, blijken achteraf vooral informatieproblemen te zijn geweest. Wanneer namelijk de juiste informatie ter plekke kan worden aangeleverd door effectiviteitsberekeningen met een touchtable, blijken moeizame discussies snel beslecht.
- Werken met 3Di model betekent in de praktijk samen naar de effecten kijken om met draagvlak besluiten te kunnen nemen. In een werksessie samen ontwerpen, wat ooit het idee achter 3Di was, blijkt niet te kunnen, ook al omdat de meeste actoren geen ontwerpers zijn.
- 3Di stimuleert het werken van fijn naar grof (in plaats van andersom). Bij het opstellen van een adaptatiestrategie wordt vaak gewerkt van grof naar fijn, van oplossingsrichtingen naar maatregelen. Het werken met 3Di maakt echter duidelijk dat het effect van maatregelen zo zeer afhangt van de details dat dit eigenlijk niet werkt. Uit de detaileffecten wordt een strategie afgeleid.

Meer info: <http://www.3di.nu/>





### 3.6.3 Climate Adaptation App

De Climate Adaptation App is een tool die door alle betrokkenen bij de start van het planproces gebruikt kan worden. Op basis van een beperkt aantal eigenschappen van het projectgebied en afhankelijk van de klimaatproblemen die men verwacht wordt een lijst van meer dan 100 mogelijke maatregelen gerangschikt. Maatregelen die waarschijnlijk goed toepasbaar zijn komen bovenaan de lijst.

Het effect van deze tool is in de praktijk dat betrokkenen een veel breder palet aan mogelijke adaptatiemaatregelen gaan onderzoeken dan voordat ze de tool gebruikten; zij zien méér mogelijkheden om tot een robuustere inrichting te komen. De creativiteit van de groep wordt gestimuleerd en de dialoog over mogelijke oplossingen wordt verbreed.

Van alle maatregelen die in de tool zijn opgenomen is een korte beschrijving beschikbaar waarin naast een technische beschrijving ook de effecten en effectiviteit worden belicht. De CAPP is vrij beschikbaar.

Referenties: [www.climateapp.org](http://www.climateapp.org) of in de app-stores

Betrokken CPC partner: Deltares

### 3.6.4 Adaptation Support Tool

De Adaptation Support Tool wordt ontwikkeld voor stedenbouwkundige ontwerpers die samen met de waterbeheerders en andere betrokkenen interactief de effecten van blauw-groene en grijzere maatregelen in hun projectgebied willen kwantificeren. Daarvoor wordt gebruik gemaakt van een ontwerptafel (Matable) waarmee de effecten van maatregelen tegen wateroverlast, droogte en hittestess worden geschat. Dit gebeurt aan de hand van kentallen; resultaten als extra verkregen berging, piekafvoerreductie, waterkwaliteitseffecten, kosten en baten worden weergegeven op een 'dashboard' het is vervolgens aan de mensen rond te ontwerptafel om te bepalen welke varianten zij de voorkeur geven en op basis van welke criteria. De vrijheid van ontwerpen blijft daarbij gehandhaafd; alternatieven kunnen worden besproken en afgewogen.

Betrokken CPC partner: Deltares, WUR/Alterra

Meer info: <http://bgd.org.uk/>

### 3.6.5 Hitte en Droogte Stress Model

Het Hitte en Droogte Stress Model (HDSM) bestaat uit twee modules om een analyse te maken van de plaatsen die gevoelig zijn voor hittestress en voor droogte. De hittestress-module bepaalt aan de hand van de aanwezigheid van bomen, groen, water, schaduw, het albedo en enkele andere factoren in hoeverre elke plek in de stad relatief warm of koel zal zijn. De droogtemodule omvat een waterbalansberekening voor (extreem) droge jaren, zodat de verandering van de grondwaterstanden en van de verdamping van een stedelijk gebied wordt bepaald. Die verdamping van bomen en groen is van invloed op de hittestress; de lage grondwaterstanden zijn bepalend voor bodemdaling en – als die aanwezig zijn – de mogelijke aantasting van houten paalfunderingen van gebouwen. HDSM wordt ingezet voor het identificeren van de kwetsbare plekken in de stad en, in de fase van de adaptatieplanning, voor het bepalen van de effecten van mogelijke adaptatiemaatregelen.

Betrokken CPC partners: TNO, Deltares



### 3.6.6 Gezondheidsscan

Binnen CPC is ook een tool ontwikkeld om klimaatadaptatiemaatregelen te scannen op hun effect op de gezondheid voor omwonenden via gastro-intestinale ziekten (**Tabel 3.10**) (Sales Ortells en Medema, 2014). Deze Gezondheidsscan is gericht op maatregelen voor lokale hemelwater opvang, zoals wadi's, en opslag van hemelwater in lokaal oppervlaktewater, en op de koppeling van klimaatadaptatiemaatregelen met lokale (water)recreatieve voorzieningen zoals waterpleinen of waterspeelplaatsen. De gezondheidsscan is ontwikkeld als iteratief en flexibel afwegingsinstrument in drie stappen (expert evaluatie, scan en analyse). Voor de afweging zijn ook referentiewaarden voor gezonde watersystemen voorgesteld.

Tabel 3.10 Stappen in de gezondheidsscan van adaptatiemaatregelen (bron: Sales Ortells en Medema, 2014).

Niveau	Benodigde informatie	Opbrengst
<b>1. Expert evaluatie</b>	“Sanitary survey”: beschrijving van maatregel / site, verontreinigingsbronnen en inschatting mate van blootstelling van de bevolking	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grove scan op mogelijke gezondheidseffecten, Onderscheid sites van mogelijk tot geen risico</li> <li>- Prioritering voor volgende niveaus</li> </ul>
<b>2. Scan</b>	Selectie van literatuurgegevens over waterkwaliteit en intensiteit blootstelling van de bevolking.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inschatting van gezondheidsrisico's van de adaptatiemaatregelen / sites.</li> <li>- Prioritering van sites met hoger vs lager risico.</li> <li>- Weging van risico's ten opzichte van referentiewaarden.</li> </ul>
<b>3. Analyse</b>	Locatiespecifiek onderzoek naar waterkwaliteit en blootstelling	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Locatiespecifiek onderbouwde gezondheidsscan.</li> <li>- Locatiespecifiek begrip van verontreinigingsbronnen, gezondheidsrisico's en interventie maatregelen.</li> <li>- Locatiespecifieke weging van risico's ten opzichte van referentiewaarden.</li> </ul>

Verschillende soorten water, verschillende soorten van blootstelling van de mens aan water en verschillende effecten op de gezondheid kunnen met de Gezondheidsscan worden gewogen. De Gezondheidsscan is getest op watersystemen en klimaataanpassingsmaatregelen in een stedelijk gebied (Watergraafsmeer). Daarbij is veel informatie verzameld uit de literatuur over waterkwaliteit en blootstelling die in andere steden ook in de gezondheidsscan gebruikt kan worden. Uit de Gezondheidsscan bleek voor een aantal watersystemen de jaarlijkse kans op gastro-intestinale ziekte voor de blootgestelde populatie dicht bij of hoger dan de referentiewaarden lagen (zwemmen en roeien in oppervlaktewater dat verontreinigd wordt met huishoudelijk afvalwater; waden in water op straat afkomstig van een gecombineerde overstort; en waarschijnlijk ook voor waden in de wadi's). Dit is reden voor een betere risicobeheersing op deze watersystemen. Het inzicht over de gezondheidsrisico's geeft ook handvatten voor aanbevelingen om deze risico's in te perken.

Betrokken CPC partner: KWR, Waternet



## 4 Urban governance: de implementatie van klimaatadaptatie bij stedelijke ontwikkeling

### Samenvatting

Klimaatbestendige ontwikkelingen vragen om een andere dan de traditionele benaderingswijze bij stedelijke ontwikkeling. Klimaatverandering vormt in de huidige situatie een zwak belang in vergelijking met de vele andere belangen in de lokale stedelijke ruimtelijke ordening. Om het belang 'klimaat adaptatie' te vervlechten binnen de stedelijke ruimtelijke ontwikkeling, heeft het Climate Proof Cities (CPC) programma andere manieren van werken onderzocht voor de belangrijkste actoren: gemeenten, woningbouwcorporaties en burgers (Spit en Kokx, 2015). Om het klimaatbelang binnen de gemeentelijke organisatie op een goede manier te waarborgen is het essentieel om gebruik te maken van een combinatie van een 'dedicated approach' en 'mainstreaming'. Aan beide benaderingen kleven na- en voordelen. Door beide benaderingen te combineren is het mogelijk om doelstellingen aan elkaar te verbinden en voor voldoende draagvlak te zorgen (en nadelen te compenseren). Voor het verbinden van verschillende doelstellingen is het van belang om zogenoemde 'beleidskoppelaars' te hebben binnen de organisatie, die door hun netwerkvaardigheden klimaat kunnen verbinden aan ruimtelijke ontwikkelingen of beleidsdoelstellingen.

Ook binnen de werkwijze van de woningcorporaties blijkt dat één benadering onvoldoende bijdraagt aan de verandering naar een klimaatbestendige wijze van handelen. De introductie van ketensamenwerking, waarbij woningcorporaties in samenwerking met, onder andere, de bouwsector verantwoordelijk zijn voor de realisatie van woningen, leidt niet standaard tot klimaatbestendige innovaties. Echter, in combinatie met financiële stimuleringsmiddelen, het formuleren van beleid en de 'framing' van de klimaatbestendige oplossingen kan ketensamenwerking leiden tot implementatie van adaptatiemaatregelen. Ook kan samenwerking gezocht worden met andere actoren die invloed kunnen hebben op de fysieke kenmerken van de woningvoorraad en omgeving, zoals waterschappen en gemeenten. Verder kunnen ook burgers bijdragen aan de realisering van klimaatbestendige stad. Dit vergt een andere benaderingswijze van gemeenten in de richting van burgers. Om burgerinitiatieven te kunnen koppelen aan de klimaatbelangen van publieke partijen is het essentieel het publieke planproces flexibel te houden en actief te communiceren met bewoners.

Om de implementatie van klimaatmaatregelen succesvol te laten zijn is het vooral van belang dat er niet alleen verbindingen worden gelegd tussen de verschillende partijen binnen het proces, maar dat deze ook (dynamisch) worden onderhouden. Slechts wanneer overheden (inclusief waterschappen), burgers en private partijen de realisering van een klimaatbestendige stad als een gezamenlijke opgave zien is er een basis voor succes. Het verbinden van het publiek domein met het private domein kan mogelijk blijvend betere resultaten afwerpen, de zogenaamde capacity-building (Hartmann en Spit, 2014). Door gebruik te maken van de kennis, kunde, netwerken en middelen van alle betrokken actoren bij de stedelijke inrichting komt de klimaatbestendige stad dichterbij.



## 4.1 Inleiding

De extreme weersomstandigheden en klimaatverandering, zoals beschreven in de voorgaande hoofdstukken, maken het noodzakelijk om de ruimtelijke inrichting van de stedelijke omgeving aan te passen aan deze omstandigheden. De toepassing van klimaatbestendige maatregelen kunnen de sociale en fysieke kwaliteiten van stedelijke gebieden aanmerkelijk verbeteren. Ondanks het onderzoek naar de problematiek rondom de verandering van het klimaat en de effectiviteit van de oplossingen, blijft de implementatie van lokaal beleid gering (Kabat et al., 2005).

Weliswaar hebben veel steden in Nederland een ambitie om klimaatadaptatie in hun beleid mee te nemen en heeft zich dat vertaald in de ontwikkeling van een adaptatie-strategie of formulering van een visie, echter implementatie van maatregelen blijft veelal beperkt tot aansprekende pilots en demonstratie projecten in de zogenaamde koplopers steden. Voor een deel is dit te verklaren door een gebrek aan urgentie alsook het ontbreken van een kosten-baten analyse die de klimaatbestendige maatregelen rechtvaardigen. Daarnaast is onvoldoende kennis en kunde beschikbaar op lokaalniveau om deze maatregelen in daadwerkelijke projecten om te zetten of te vervlechten. De financiële en economische crisis heeft tenslotte ook hier een niet te onderschatte rol gespeeld. Zo is onder ander de vraag naar woningen en commercieel vastgoed in de laatste 5 jaar sterk afgenomen, waardoor dure bouwgrond zijn waarde heeft verloren. Veel gemeenten zijn daardoor in de rode cijfers terecht gekomen en als gevolg hiervan heeft de bouwsector vanaf 2009 jaarlijks een krimp te zien gegeven van zo'n 10%. Deze trend zet zich nog steeds door. De consequentie hiervan is dat er niet alleen veel minder is (en nog steeds wordt) gebouwd, maar ook dat de meer complexe, integrale gebiedsontwikkelingsprojecten, aanzienlijk kleiner van omvang zijn en veel meer tijd vragen om tot realisatie te komen. Het zijn juist de projecten uit deze laatste categorie die door hun integrale karakter zich bij uitstek lenen voor de toepassing van klimaatbestendige maatregelen.

De realisatie van de klimaatbestendige stad is in toenemende mate afhankelijk van de decentrale partijen zoals gemeenten, burgers en woningbouwcorporaties. Zoals uit het bovenstaande blijkt, zijn er in de huidige situatie diverse belemmeringen aan te wijzen die met name voor deze partijen de implementatie van de klimaatbestendige oplossingen in de weg staan. Bovendien dragen de doelstellingen en de handelingswijze van deze partijen niet altijd bij aan de implementatie van de klimaatbestendige oplossingen. Vandaar dat hier binnen het Climate Proof Cities (CPC) programma meer onderzoek naar is gedaan en wordt er in de volgende paragrafen (4.2-4.4) verder ingegaan op de manieren waarop de belangrijkste actoren van stedelijke ontwikkeling (gemeenten, woningcorporaties en burgers) adaptatiemaatregelen in hun beleid en/of proces kunnen doorvoeren. Uiteindelijk worden in de laatste paragraaf (4.5) de conclusies in een praktisch kader gepresenteerd. Dit hoofdstuk sluit aan bij de stap 'Werken' uit de 'Handreiking Ruimtelijke Adaptatie'<sup>30</sup>.

## 4.2 Gemeenten

### 4.2.1 Organisatie

Het implementeren van klimaatbestendige oplossingen in het stedelijke gebied vormt geen vanzelfsprekende opgave voor gemeenten. Om de klimaatbestendige doelstelling op te nemen in het beleid is er binnen CPC gekeken naar het gebruik van verschillende strategieën, waaronder de specifiek op klimaat adaptatie gerichte (en politiek ondersteunde) benadering (dedicated approach) en integrale aanpak (mainstreaming) (Uittenbroek et al., 2013).

<sup>30</sup> <http://www.ruimtelijkeadaptatie.nl/nl/>



### **Mainstreaming versus een dedicated approach**

In een *dedicated approach* is er expliciete (politieke) aandacht voor klimaatadaptatie. Dit betekent dat er beleidsmakers specifiek bezig zijn om klimaatadaptatie te adresseren, waarbij ze beschikken over eigen gelden. Een voorbeeld van een overheid die een toegewijde aanpak hanteert is de stad Rotterdam. In de afgelopen vier jaar heeft het Rotterdamse klimaatbureau, in samenwerking met onder andere watermanagers van het Rotterdams Waterloket, diverse klimaatadaptatiemaatregelen gerealiseerd, bijvoorbeeld de waterpleinen op het Benthemplein en Bellamyplein (Uittenbroek et al., 2014a).

Specifieke aandacht voor klimaatadaptatie is echter niet altijd mogelijk of wordt politiek-bestuurlijk niet gesteund. In die gevallen wordt er vaak gesproken over *mainstreaming* als een alternatief. Hierbij zijn de beleidsdomeinen zich bewust van het feit dat klimaatverandering hun beleidsdomein raakt en zoeken zij wegen om klimaatadaptatiemaatregelen te borgen in het bestaande beleid dan wel te koppelen aan doelen in beleidsprocessen. Klimaatverandering wordt niet gezien als het ultieme doel, maar als toegevoegde waarde (Root et al., 2014). Het zoeken naar verschillende koppelingen binnen beleidsdomeinen wordt ingevuld door een beleidskoppelaar. In de stad Amsterdam zijn in de periode 2010-2014 via *mainstreaming* aanpak diverse klimaatadaptatieprojecten opgezet, zoals het Polderdak (Uittenbroek et al. 2014a).

Toch kleven er aan beide strategieën zowel voor- als nadelen. Zo zal een ‘*dedicated approach*’ eerder leiden tot een werkelijke realisatie van adaptatiemaatregelen, doordat er geld en mankracht beschikbaar is. Wanneer deze specifieke (politieke) aandacht echter verdwijnt, is het de vraag maar of andere beleidsdomeinen zich dan geroepen voelen (dan wel de financiële middelen hebben) om klimaatadaptatie te realiseren. Een ‘*dedicated approach*’ zal er wel toe leiden dat er in korte tijd bewustwording en mogelijk zelfs urgentie voor klimaatadaptatie ontstaat binnen de overheidsorganisatie, dan wel in de maatschappij. *Mainstreaming* richt zich daarentegen meer op de langere termijn. Een beleidsdomein gaat namelijk zelf op zoek naar mogelijkheden om klimaatadaptatie te borgen in hun beleid, waardoor de realisatie afhankelijk is van bestaande structuren en middelen. Hierdoor ontstaat er een leerproces dat kan leiden tot structurele verandering in het handelen. Het kan echter ook zo zijn dat er geen koppeling gemaakt kan worden tussen klimaatadaptatie en de bestaande structuren/middelen. In dat geval is wellicht extra (politieke) aandacht c.q. ‘*dedicated approach*’ gewenst (Uittenbroek et al. 2014a), waaruit blijkt dat in de praktijk de twee aanpakken elkaar zullen afwisselen in plaats van naast elkaar bestaan (Uittenbroek et al., *submitted*).

### **Barrières en stimuli**

Het mainstreamen van klimaatadaptatie in bestaand stedelijk beleid is niet altijd even vanzelfsprekend. Er zijn diverse barrières en stimuli te vinden in de literatuur en in de praktijk die dit proces kunnen beïnvloeden, waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen de drie beleidsfasen: begrijpen, plannen en uitvoeren (Uittenbroek et al., 2013).

In de eerste beleidsfase ‘begrijpen’ kunnen er sociale, cognitieve, organisatorische en/of institutionele barrières voorkomen. Het mainstreamen van klimaatadaptatie in bestaand beleid, dan wel nieuwe projecten, gebeurt op basis van welwillendheid. Al deze typen barrières kunnen dan opduiken. Er is immers in het geval van mainstreamen geen regelgeving of politieke aansturing die vereist dat klimaatadaptatie wordt meegenomen. Ideeën over het probleem, risico’s, urgenties, verantwoordelijkheden en mogelijke oplossingen zullen bepalend zijn voor de beantwoording van de vraag waarom een beleidsdomein wel of niet kiest voor het integreren van klimaatadaptatie in hun beleid. Onderzoek in drie Nederlandse steden (Amsterdam, Rotterdam en Den Haag) bevestigt dat klimaatadaptatie wordt gezien als een belangrijk onderwerp. Ook op het gebied van risico’s en mogelijke oplossingen is er eensgezindheid.



De verschillen liggen vooral in de ideeën die gerelateerd zijn aan opvattingen over urgentie en verantwoordelijkheid. Er zijn beleidsdomeinen die klimaatadaptatie niet zien als onderdeel van hun takenpakket. Daarnaast zijn er beleidsdomeinen die wel willen handelen voor klimaatadaptatie, maar officieel maar weinig tijd krijgen om dit te doen. Zonder politieke steun is er in de organisatiestructuur namelijk geen ruimte om klimaatadaptatie te adresseren. Om toch aandacht te krijgen voor klimaatadaptatie, worden vaak andere of aanvullende termen gebruikt om klimaatadaptatie relevant te maken en te verbinden aan het bestaande beleid, zoals waterveiligheid, ruimtelijke kwaliteit en leefbaarheid. Doordat het belang van klimaatadaptatie en de mogelijke effecten voor stedelijk beleid vanuit verschillende invalshoeken worden belicht, vormt zich een verhaal dat past op de politieke agenda (Uittenbroek et al. 2014b).

In de tweede beleidsfase ‘plannen’ gaat het om het vertalen van de urgentie voor klimaatadaptatie naar beleid. In deze fase kunnen er financiële, organisatorische en institutionele barrières voorkomen. Bij mainstreaming kan het onderwerp klimaatadaptatie meeliften op de politieke steun die er is voor de andere beleidsdoelen van het beleidsdomein. Het gebrek aan politieke steun wordt vaak als barrière genoemd door onderzoekers, omdat er dan geen nieuwe middelen (geld en/of mankracht) beschikbaar zijn om klimaatadaptatiebeleid te maken en uit te voeren. Uit onderzoek blijkt echter dat mainstreaming toch kan zonder expliciete steun, waarbij een belangrijke rol is weggelegd voor “beleidskoppelaars”. De beleidskoppelaars hebben een rol als pionier om de beleidsmakers te overtuigen van het nut en belang van klimaatadaptatie. Hierbij moeten ze ook hun netwerkvaardigheden inzetten om bruggen te slaan en om actoren aan te trekken die nieuwe middelen en vaardigheden meebrengen (Uittenbroek et al. 2014a; Uittenbroek et al. submitted).

Ondanks dat klimaatadaptatie is opgenomen in beleidsplannen, betekent dit niet dat dit ook werkelijk tot uitvoering van klimaatadaptatiemaatregelen leidt. In de derde beleidsfase ‘uitvoeren’ hebben beleidsmakers vaak te maken met financiële, technische en organisatorische barrières. De bestaande organisatiestructuren waarin de interactie en coördinatie tussen beleidsmakers en uitvoerders is vastgelegd, ondersteunen het mainstreamen van klimaatadaptatie soms niet. Het is belangrijk dat de beleidsuitvoerders de aanpassingen in de structuren legitiem vinden, dat wil zeggen de nieuwe routines moeten minstens even (of meer) effectief en efficiënt zijn. Alleen dan vindt er een structurele verandering in de relatie tussen beleid en uitvoering plaats die mogelijk het mainstreamen van klimaatadaptatie ten goede komt. Het veranderen van huidige routines vergt doorzettingsvermogen van de beleidskoppelaars en beleidsuitvoerders, evenals flexibiliteit en tijd. Het mainstreamen van klimaatadaptatie in beleidsprocessen zal zeker bij de eerste pogingen een tijdrovend en zoekend proces zijn (Uittenbroek et al., in review; Uittenbroek et al., submitted).

De bovenstaande bevindingen leiden tot een tweetal inzichten die belangrijk zijn voor de (beleids)praktijk. Ten eerste, lijkt een combinatie van een dedicated approach en mainstreaming approach het meest veelbelovend voor het realiseren van klimaatadaptatiemaatregelen in de stad. Hoewel beide benaderingen hun positieve en negatieve kenmerken hebben, kunnen de aanpakken elkaar versterken. Ten tweede, het mainstreamen van klimaatadaptatie is meer op de lange(re) termijn gericht en kan niet of nauwelijks worden afgedwongen. Alle actoren binnen een overheidsorganisatie hebben een functie en de daar bijhorende routines. Het veranderen van deze routines vergt tijd en verschillende ‘verhalen’ om te overtuigen. Hierbij is het belangrijk dat er iemand (een beleidskoppelaar) een overzicht heeft van welke actoren en vaardigheden belangrijk zijn voor het mainstreamen van klimaatadaptatie en wanneer deze nog ontbreken op zoek gaat naar deze actoren en vaardigheden. Dit is een leerproces dat mogelijk kan leiden tot een structurele verandering in het handelen.



#### 4.2.2 Financiële instrumenten: de inzet van TIF's

Zoals hierboven aangegeven, wordt het gebrek aan financiële middelen vaak genoemd als een belangrijke barrière voor de implementatie van klimaatbestendige maatregelen. Toch laat onderzoek zien dat preventie (nu) aanmerkelijk minder kosten met zich mee brengt dan de (ingeschatte) totale schade in de toekomst, waarbij het niet alleen draait om materiële schade maar ook om economische en sociale ontwrichting (Watkiss, 2011; Stern, 2006). Bovendien wordt het gebrek aan financiële middelen in de literatuur gezien als een te algemene verklaring voor de beperkte investeringen in klimaatbestendige maatregelen. De vraag is daarmee relevant of de huidige planning tools bruikbaar zijn om het financiële gat te overbruggen of dat er andere middelen geïntroduceerd moeten worden. Hierbij is het essentieel om na te gaan hoe actoren in de ruimtelijke ordening tegen deze verandering aankijken.

TIF ('Tax Increment Finance') biedt -tenminste in theoretische zin- mogelijkheden om deze innovatie te faciliteren. Uit literatuur blijkt dit een veelbelovende lokale financieringsconstructie te zijn (Heurkens, 2012; van der Krabben and Jacobs, 2013; Offerman en Van de Velde, 2004). De constructie maakt gebruik van het vigerende belastingstelsel en is gebaseerd op toekomstige OZB-meer-inkomsten. Deze worden teruggerekend in termen van contante waarde en kunnen vervolgens (deels) worden ingezet om investeringen nu, voor bijvoorbeeld klimaatmaatregelen, te faciliteren. Bij deze werkwijze investeert de gemeente in harde, publieke maatregelen in een afgebakend gebied. Meestal zijn dit investeringen op het gebied van infrastructuur, groene ruimte en maatschappelijke faciliteiten. De veronderstelling is dat door deze investeringen de waarde van het aangrenzende vastgoed stijgt en daarmee de hieraan verbonden OZB (Squires, 2012). De hieruit voortvloeiende meerwaarde aan OZB kan worden ingezet om de investeringen te bekostigen. TIF is voornamelijk gericht op het lokale niveau en de lange termijn, waarbij de kosten en baten worden verdeeld over de huidige en toekomstige gebruikers. Hierdoor lijkt deze benadering een uitermate geschikte methode te vormen voor de adaptatie gericht op de toekomstige verandering van het klimaat en is hier binnen CPC onderzoek naar gedaan.

Technisch mogelijk is het mogelijk om dit instrument te introduceren binnen het huidige planningsstelsel, waarbij (toekomstige) inkomsten bestemd worden voor lokale investeringen nu. De OZB is een lokale inkomstenpost en is flexibel in te zetten onder lokale bevoegdheden (gemeenteraad). De toepassing van TIF is echter ook afhankelijk van de sociaal-politieke ontwikkelingen binnen de organisatie op de lange termijn (*interne bezwaren*) (Root, *gepland*).

- Ten eerste, kan door de introductie van nieuwe samenwerkingsverbanden, andere belangen of politieke stromingen de ingeslagen weg veranderen, hetgeen van invloed kan zijn op de verwachte OZB-inkomsten.
- Ten tweede wordt het innen van belastingen niet altijd direct gekoppeld aan de 'harde' infrastructurele investeringen van overheidspartijen. 'Weglekken' als proceskosten komt ook voor. De belastingbetaler ziet hierdoor niet wat er gedaan wordt met de geïnde bedragen, hetgeen het draagvlak voor de maatregel kan aantasten.
- Als derde, geldt dat bij de toepassing van TIF het financiële risico nog steeds door de overheid wordt gedragen, hetgeen strijdig lijkt met de huidige opvatting in de ruimtelijke ordening dat marktrisico's ook zo veel mogelijk door de markt moet worden gedragen.



Is dit instrument echter ook geschikt voor de implementatie van klimaatbestendige maatregelen? Idealiter is er bij de inzet van TIF sprake van een heldere administratie, waarbij de inkomsten uit een gebied worden omgezet in investeringen. Zoals reeds is aan gegeven is deze stroom van middelen afhankelijk van de meerdere ontwikkelingen, zowel op sociaal, als op politiek gebied. Hierdoor is het essentieel om in te zetten in zowel het maatschappelijk debat, als het politieke debat om alle actoren te (blijven) overtuigen en te blijven interesseren voor investeringen in klimaatbestendige maatregelen. Echter ook in maatschappelijke zin op lange termijn kent de inzet van TIF's enkele (*externe*) bezwaren:

- Ten eerste, is het Nederlandse systeem van openbaar bestuur gebaseerd op basis van gelijkwaardige verdeling, waarbij iedereen in principe toegang moet hebben tot bepaalde diensten. De inzet van TIF kan hiermee als strijdig worden ervaren. Binnen de methodiek TIF profiteert namelijk degene die betaalt.
- Ten tweede, is het vaststellen van de relatie tussen het doen van investeringen in klimaatbestendige maatregelen en het verhogen van de OZB-inkomsten lastig vast te stellen. Dit kan derhalve op bezwaren stuiten van maatschappelijke partijen.

Uit het overzicht in **Tabel 4.1** blijkt dat er verschillende ideeën bestaan over het gebruik van TIF binnen het huidige governance proces om het financiële tekort op te lossen. Volgens praktijkvertegenwoordigers heeft TIF beperkte toepassingsmogelijkheden voor de financiering van klimaatadaptatie. Deze aarzeling is gerelateerd aan redenen als onzekerheid over toekomstige waarde, de planperiode en indirecte baten.

Tabel 4.1 Tax Increment Financing en klimaatadaptatie: een overzicht (Root, gepland)

TIF: Karakteristieken	Algemeen	Klimaatadaptatie		
Marktgericht	+	Maatwerk voor langzaam/organisch groeiende ontwikkelingen	-	Verwacht wordt dat klimaatbestendige maatregelen niet zullen leiden tot hogere marktwaarden.
	-	Speculaties met betrekking tot toekomstige inkomsten is politiek gevoelig	-	De markt is gericht op de korte termijn en klimaatadaptatie is gericht op de langere termijn
Gebruik van vermogensbelasting	+	De inkomstenstroom kan worden gecombineerd met andere budgetten en programma's om de markt te stimuleren	-	Onvoldoende inkomsten als instrument voor investeringen in 'harde' maatregelen.
	-	Risico dat de nationale overheid het belastingssysteem verandert		
Aangewezen gebieden	+	TIF kan gesloten gebieden openbreken	-	TIF kan 'winnaars en verliezers' creëren tussen buurgemeenten.
	-	Is aantrekkelijk voor projecten/bestemming zonder voldoende financiële basis	-	TIF zal zich richten op 'één gebied tegelijkertijd' waardoor de schaal zeer beperkt is.
Oormerken van middelen	+	Integreren met bestaande planninginstrumenten om te komen tot specifieke investeringen	-	De voordelen van klimaatbestendige maatregelen worden niet herkend door de belastingbetaler of de investeerders.
	-	Dit systeem kan de flexibiliteit van het budget tijdens het project verkleinen		
Verschillende financiële middelen	+	Ontwerp een model om het financiële risico te spreiden onder degene die ervan profiteren	+/-	Gemeenten nemen het risico op zich voor de specifieke klimaatbestendige investeringen
	-	Een analyse is nodig om te bekijken of de investeringen van gemeenten leiden tot besparingen elders in de gemeentelijke begroting		





### 4.3 Woningcorporaties

Woningcorporaties beheren met relatief weinig organisaties (ca. 400 corporaties) relatief veel woningen (30% van de Nederlandse woningvoorraad). In het kader van CPC is gekeken hoe deze partijen kunnen worden gestimuleerd om adaptatiemaatregelen toe te passen, zodat een groot deel van de woningvoorraad meer klimaatbestendig wordt.

#### Bewustzijn

Uit de inhoudsanalyse van de jaarverslagen en beleidsplannen van woningcorporaties blijkt, dat zij weinig bewustzijn vertonen van klimaatverandering. Dit betekent echter niet dat de woningvoorraad niet daarop aangepast wordt. Sommige corporaties hebben wel degelijk adaptatiemaatregelen geïmplementeerd, maar niet onder de noemer 'klimaatadaptatie' (Rodgers et al., 2012a). Het over het algemeen lage adaptatiebewustzijn in de beleidsdocumenten en van de medewerkers, betekent dat de implementatie van maatregelen momenteel niet of nauwelijks structureel plaatsvindt, hoewel dit op basis van hun sociale doelstellingen wel een pro-actievare houding van corporaties verwacht zou mogen worden. Verschillende maatregelen hebben immers een positieve invloed op het binnenklimaat van de woning en daarmee op het comfort van de bewoners (Rodgers et al., 2013).

#### Ketensamenwerking

Om de corporaties te ondersteunen in het doorvoeren van adaptatiemaatregelen, zijn diverse instrumenten in te zetten die gebaseerd zijn op informatievoorziening, financiële of politieke prikkels en regelgeving. Om uiteenlopende redenen zijn niet alle instrumenten inzetbaar, waardoor er gekeken is of er op andere manieren kansen gecreëerd kunnen worden om klimaatadaptaties door te voeren. Omdat het gaat om fysieke ingrepen aan woningen c.q. de gebouwde omgeving, liggen er kansen om de bouwsector te betrekken bij het zoeken naar oplossingen. Om het huidige bouwproces te verbeteren, worden projecten in ketensamenwerking uitgevoerd. Ketensamenwerking is: "(...) de samenwerking tussen partners, betrokken bij het bouwproces, met als doel de prestatie van de gehele keten te optimaliseren" (Chao-Duivis en Wamelink, 2013). Doordat de efficiency binnen een dergelijk proces toeneemt, ontstaat er financiële ruimte om adaptatiemaatregelen te financieren en doordat de uitvoerende partijen vroeg in het project betrokken worden, kunnen zij hun expertise inbrengen om het ook technisch mogelijk te maken om maatregelen door te voeren.

De basis voor ketensamenwerking ligt in het *vertrouwen* dat partijen hebben in elkaar. Een aantal belangrijke succesfactoren die dit vertrouwen kunnen versterken zijn *leiderschap*, de projecten moeten worden ondersteund door de directies van de ketenpartners; *communicatie*, een duidelijke overlegstructuur moet worden opgezet; en *partnercapaciteiten*, onder- en nevenaannemers dienen niet zozeer op prijs geselecteerd te worden, maar op basis van hun kwaliteiten. *Coördinatie* is een succesfactor die betrekking heeft op het afstemmen van belangen van de diverse partijen en het streven naar een gemeenschappelijk belang. Verder dienen partijen *commitment* te tonen en zich voor langere tijd aan een project en/of medepartners te willen binden. Belangrijk is ook, dat partijen op voorhand een *conflictbeheersingssysteem* afstemmen, zodat meningsverschillen tijdig gesignaleerd en opgelost worden, voordat ze escaleren (Rodgers et al., 2012b).

Ketensamenwerking leidt echter niet automatisch tot innovaties op het gebied van betere woningen en waarschijnlijk ook niet tot de realisatie van adaptatiemaatregelen (Rodgers et al., *in voorbereiding*). Sector breed gekeken, wordt de invoering van klimaatadaptaties door de corporaties in de nabije toekomst nog niet als vanzelfsprekend ervaren vanwege hun huidige financiële situatie en de lage prioriteit van klimaatadaptatie op hun beleidsagenda. Echter, de combinatie van het opnemen van klimaatadaptatie in het beleid, het betrekken van externe actoren (bijvoorbeeld gemeenten, verzekeraars en waterschappen)



om kosten te delen en het toepassen van ketensamenwerking worden door een aantal corporaties wel onderkend als succesvolle manieren om tot adaptatie te komen. Wat ook belangrijk blijkt, is de juiste positionering ('framing') van adaptatiemaatregelen, omdat het invoeren van maatregelen op zich haalbaar is gebleken, alleen niet vanuit het oogpunt van klimaatadaptatie, maar vanuit het oogpunt van energiebesparing of verbetering van de luchtkwaliteit (Rodgers en Straub, 2014).

#### 4.4 Burgers

Door trends rondom de terugtrekkende overheid en de economische crisis, zijn overheden die klimaatadaptatie maatregelen willen doorvoeren in toenemende mate afhankelijk van investeringen door andere partijen, waaronder ook initiatieven van burgers. Niet alleen spelen burgers een rol in het meedenken in het proces rondom het klimaatbeleid en klimaatadaptatie projecten, ze kunnen zelf ook initiatief nemen, zoals de aanleg van geveltuinen en groene daken. Dit kan op individueel niveau, waarbij iedere bewoner zijn eigen initiatief neemt, maar ook in collectief verband. Dergelijke initiatieven passen in de trend van 'actief burgerschap', ook wel 'participatie maatschappij' genoemd. Gezien de hoeveelheid burgerinitiatieven die de afgelopen jaren zijn opgekomen in het ruimtelijke domein en de media aandacht die aan dit soort initiatieven wordt gegeven, lijkt er inderdaad sprake te zijn van een maatschappelijke verandering. Dit betekent een significante trendbreuk met de routines die zijn ontstaan uit decennia top-down stedelijke planning, waarbij professionele partijen zoals gemeenten, Rijk, woningcorporaties, ontwerpbureaus en ontwikkelaars leidend waren. Daarom is er nog weinig bekendheid met het planologisch instrumentarium (juridisch, procesmatig, financieel etc.) en werkwijzen die een adequaat antwoord bieden op deze verandering. Binnen CPC is hier dan ook verder onderzoek naar gedaan.

Huidige planningsstrategieën gericht op actieve burgers beperken zich vaak tot het uitnodigen om overheidsbeleid mede te bepalen of mede uit te voeren (participatie). Ook zijn er planningsstrategieën ontwikkeld die zich richten op het stellen van raamwerken waarbinnen initiatieven kunnen plaatsvinden. Beide strategieën stellen echter het overheidsperspectief centraal, en sluiten daarmee onvoldoende aan op de potentie en de dynamiek die vanuit de maatschappij zelf kan ontstaan (Boonstra en Boelens, 2011, Boonstra en Specht, 2012). Dit heeft vooral te maken met de manier van werken van beide partijen. Overheden werken voornamelijk vanuit plannen, die voortkomen uit visies en beleid, die gericht zijn op het creëren van eenduidigheid en (rechts)zekerheid, waarborging van publieke waarden en gelijkheid tussen burgers. Actieve burgers daarentegen werken vanuit zelforganisatie, waarbij ze vanuit een eigen belang zoeken naar medestanders en middelen om hun initiatief te realiseren, daarbij gedreven door lokale, specifieke momenten en toevalligheden (Boonstra en Boelens, 2011, Boonstra et al., 2014, Boonstra, 2013). Wanneer het overheidsperspectief leidend blijft, blijft het daarom lastig om planningsstrategieën te ontwikkelen die aansluiten op de trend van echt 'actief burgerschap'.

Wel overlappen de werelden van burgerinitiatief en overheid: In het onderzoek werden vier verschillende manieren, ofwel planningsstrategieën aangetroffen, die tegelijkertijd door zowel de initiatieven als overheden kunnen worden ingezet. Ten eerste het **benoemen van algemene principes**, die uiteenzetten wat nagestreefd dient te worden in de ontwikkeling van een stad of locatie. Deze principes dienen niet te gedetailleerd maar juist flexibel te zijn naar veranderende vragen. Ook een burgerinitiatief doet er goed aan om bij aanvang duidelijk te maken naar welke principes gehandeld gaat worden, zonder dat er meteen een gedetailleerd plan ligt.



Een tweede planningsstrategie is het voortdurend **leggen van verbindingen**. Professionele partijen kunnen actief interveniëren en participeren in een initiatief (zonder het over te nemen) door te sturen met kennis, door verbindingen tussen actoren te leggen, technologie of locaties aan te dragen, te onderhandelen etc.. Vanuit een initiatief is van belang dat gericht wordt op het vinden van medestanders, in plaats van het overtuigen van tegenstanders. Vanuit beide werelden (publiek en privaat) geldt dat de inzet van mensen die over de grenzen heen kunnen kijken ('boundary spanners') en de wederzijdse bereidheid tot aanpassen en heroverwegen van rollen en verantwoordelijkheden, erg succes bevorderend werkt.

Een derde strategie is het **organiseren van ingangen en contactpunten**. Burgerinitiatieven worden vaak getrokken door slechts één of enkele personen, die zwaar leunen op een persoonlijk netwerk. Professionele partijen kunnen hierin ondersteunen door vaste en zichtbare contactpersonen te bieden. Daarnaast kunnen ze uit hun ervaringen met burgerinitiatieven logica proberen te halen en deze vertalen naar nieuwe procedures om onzekerheden en belemmeringen uit de weg te helpen. Te denken valt aan gebiedsgericht werken, loketten, uitnodigingsstrategieën, aangevuld met juridisch instrumentarium dat zowel rechtszekerheid als flexibiliteit biedt.

Een vierde strategie is het inzetten op en voortbouwen (inclusief het leren) van reeds gerealiseerde initiatieven. Hierbij worden beleid en initiatieven voortdurend aangepast aan elkaars realiteit, ook wel **co-evolutie** genoemd: het wederzijds aan elkaar aanpassen door de tijd heen, zonder de eigenheid te verliezen. Initiatieven springen vaak in een 'gat' dat professionele partijen hebben doen vallen, en andersom kan dit heel goed succesvol zijn. Professionele partijen proberen dan met hun beleid voort te bouwen en een aanvulling te geven op initiatieven die reeds plaatsvinden, en vinden een eigen complementaire rol in het veranderende netwerk (Boonstra en Specht, 2012, Van Meerkerk et al., 2013, Boonstra et al., 2014).

Voor een overheid die klimaatadaptatie maatregelen wil doorvoeren in procesmatige zin, zou een succesvolle planningsstrategie er als volgt uit kunnen zien. Ten eerste een vertaling van klimaatadaptatie naar een algemene principe, zoals 'vergroening in de stad is goed'. Van groot belang is om vervolgens een brede en bij voorkeur interactieve inventarisatie te maken van wat er (al) allemaal gebeurt in een stad. Waar nemen burgers initiatief, waar draaien deze initiatieven om, en hoe kan de overheid mogelijkwijs bijdragen om hun ontwikkeling te stimuleren? Pas daarna komt de uitwerking in termen van visie en beleid. Kan de overheid burgerinitiatieven stimuleren door het leggen van verbindingen en het organiseren van ingangen en contactpunten en kan de overheid middels eigen investeringen in co-evolutie voortbouwen op een brede beweging van initiatieven gericht op vergroening? Pas als deze stappen zijn doorlopen, kan een overheid een klimaatadaptatiestrategie uitrollen die optimaal aansluit op het zelforganiserende vermogen van de maatschappij.



## 4.5 Conclusie

Waarom zijn zorgvuldige ‘governance arrangements’ zo waardevol bij klimaatadaptatie in stedelijke gebieden? Het antwoord op deze vraag ligt verborgen in de weerbaarheid van het bestaande ruimtelijk beleid tegen het indringen van nieuwe belangen daarin. Het is immers betrekkelijk gebruikelijk dat het (beleids)systeem zich verzet tegen elk belang dat zich daarin een plek probeert te veroveren (‘externe integratie’). Naarmate een belang zich daarin zwakker manifesteert, zal het systeem succesvoller zijn bij het afslaan van datzelfde belang. Met andere woorden, indien er zich een nieuw belang aandient dat betrekkelijk zwak is, zoals klimaatadaptatie, zal de wijze waarop dat belang zich organiseert belangrijk zijn voor het veroveren van een plek bij stedelijke (her)inrichting. Om succesvol te kunnen zijn moeten klimaatbelangen zich niet alleen zo structureel mogelijk verbinden met de belangrijkste actoren binnen stedelijke (her)inrichtingsprocessen, zoals woningbouwcorporaties en burgers, maar ook in het stedelijk beleid van de betrokken gemeenten. Het CPC onderzoek laat zien dat dit niet eenvoudig is. Vooral niet omdat de verankering van klimaatbelangen een lange(re) termijn belang vertegenwoordigt. De achtergrond van de dynamiek in het stedelijk gebied bij (her)ontwikkeling en de telkens verschuivende belangen van de betrokken actoren daarbinnen, bemoeilijkt dit aanzienlijk.

Toch lijkt het niet onmogelijk. Mainstreaming, bijvoorbeeld, kan zorgen voor enige consistente inbreng van klimaatbelangen in het beleid van een belangrijke actor, zoals een gemeente. Gecombineerd met enige politieke prioritering (‘een dedicated approach’), kan ook de urgentie daarvan geaccentueerd worden. Indien vervolgens ook andere belangrijke actoren, zoals burgers en woningbouwcorporaties erin slagen om klimaatbelangen te integreren bij de uitvoering van stedelijk ontwikkelingsbeleid, dan lijkt het recept voor succes klaar te liggen. De kernvraag is telkens in welke mate klimaat adaptatie in staat is haar eigen zwakke kanten (lange termijn belang en een zwakke financiële positie) weet te organiseren in stedelijke (her)ontwikkelingsprocessen. Ofschoon gemeenten structureel een belangrijke rol zullen blijven spelen in de implementatie van adaptatie, wordt het meer en meer duidelijk dat in de (mate van) betrokkenheid van andere actoren de sleutel voor succes verborgen zit.

De praktijk heeft laten zien dat stedelijke inrichting toch vooral een pragmatisch proces is waarin vele belangen zich moeten verenigen, waarbij elk belang streeft naar optimalisering. In dat opzicht is steun van elke actor in dit proces welkom om het ontwikkelen van klimaatbestendige steden tot een succes te maken. Ofschoon de weg hiernaar toe lang lijkt, is het een spannende uitdaging waarin de actoren uit de praktijk dit gestalte moeten geven. Maar ook wetenschappers kunnen hier een belangrijke rol in spelen door op tijd en op de juiste wijze nieuwe inzichten aan te reiken.



## 5 Integratie in Bergpolder Zuid

### Samenvatting

CPC onderzoekers hebben samengewerkt met lokale partijen uit Rotterdam om inzichten uit hun onderzoek te integreren en bruikbaar te maken voor lokaal beleid en beheer. Dit is gebeurd in de “case” Bergpolder Zuid, een deel van de grotendeels 19<sup>e</sup> eeuwse wijk Het Oude Noorden. Onderzoekers hebben bijgedragen aan het in kaart brengen van de kwetsbaarheid van de wijk en de verschillende mogelijkheden om het Masterplan voor de renovatie van de wijk meer klimaatbestendig te maken. Belangrijke factoren die de mate van succes van deze case studie hebben bepaald, zijn:

- de bereidheid van de onderzoekers om over de grenzen van hun discipline te kijken;
- de onmogelijkheid om de effectiviteit van adaptatiemaatregelen met elkaar te vergelijken;
- de timing van het beschikbaar komen van onderzoeksresultaten;
- de match tussen vraag en aanbod van informatie;
- de rol van “grenswerkers”, die de interactie tussen onderzoekers en stakeholders faciliteerden;
- het Masterplan voor Bergpolder Zuid als katalyserend element

Voor een meer complete integratie van onderzoeksuitkomsten om beleid te ondersteunen is verder onderzoek nodig naar de effectiviteit van maatregelen en hun kosten, samen met de door maatregelen vermeden schade bij verschillende klimaatscenario's.

### 5.1 Inleiding

Bij onderzoek naar klimaatadaptatie is ‘integratie’ een veelgebruikt begrip. Zo ook in Climate Proof Cities. Het begrip lijkt vooral normatief gebruikt te worden: integratie is iets positiefs. Het blijkt echter vaak onduidelijk wat precies bedoeld wordt met integratie, welke elementen geïntegreerd worden en wat nu wél en niet goed werkt om integratie te bevorderen. In dit hoofdstuk beschrijven we hoe ‘integratie’ binnen CPC heeft plaatsgevonden, bevorderd is en welke lessen er geleerd zijn. We baseren ons hierbij vooral op ervaringen in Bergpolder Zuid in Rotterdam.

### 5.2 Het begrip integratie binnen CPC

Omdat CPC nu eenmaal een onderzoeksprogramma is, komt het begrip integratie in eerste instantie tot uiting in een geïntegreerde onderzoekbenadering. Zo wordt ‘integratie’ gebruikt voor het koppelen van inzichten uit de onderzoeksthema's waarbij een proces wordt gevolgd van metingen -> identificatie van kwetsbaarheid -> (modellering van) mogelijke maatregelen -> onderliggende principes voor stedelijk ontwerpen -> (beleids)instrumenten voor implementatie. Integratie wordt binnen CPC ook gebruikt voor het koppelen van inzichten op verschillende schaalniveaus zoals gebouw, straat, wijk of regio's. In beide gevallen gaat het om het verbinden van disciplinaire kennis (bijv. klimaatwetenschap, hydrologie, bestuurskunde), methoden, modellen en data. Binnen het thema governance wordt het begrip integratie ook gebruikt voor het inpassen van klimaatadaptatie in andere sectoren of beleid. ‘Last but not least’ wordt integratie ook gehanteerd voor het afstemmen en koppelen van het CPC onderzoek aan de behoeften en interesses van de betrokken stakeholders.



In CPC is een aantal activiteiten uitgevoerd om voorwaarden te scheppen voor het bereiken van een integratie in onderzoeksresultaten. Een visie op integratie in het onderzoeksproject is gepresenteerd tijdens een consortiumbijeenkomst (Döpp en Bosch, 2011). Er is een poging gedaan om te komen tot een gemeenschappelijk gebruik van dezelfde “taal” rond klimaatverandering en kwetsbaarheid (Pasztor en Bosch, 2011). In een nieuw onderzoeksgebied zoals klimaatadaptatie in de stad ontbreken conventies voor het meten van effectiviteit van maatregelen: waar meet je, wanneer, onder welke condities en in welke eenheden? CPC heeft een eerst aanzet tot een richtlijn hiervoor gemaakt (Bosch, 2014). Deze handreikingen zijn toegepast in de wijk Bergpolder Zuid.

### 5.3 Bergpolder Zuid

Bergpolder Zuid is een typisch 19<sup>e</sup> eeuwse wijk in Rotterdam-Noord. De wijk bestaat uit een mengeling van oudere woonhuizen en modernere bedrijfs- en kantoorgebouwen. Er is weinig groen in de wijk en geen open water. Het gebied is dichtbevolkt en populair onder studenten en starters die de wijk na een paar jaar weer verlaten. De openbare ruimtes worden over het algemeen als niet aantrekkelijk en weinig comfortabel ervaren. De woningen staan dicht op elkaar, er is relatief weinig groen en de luchtkwaliteit is matig vanwege de nabijheid van de A20. In 2007 is Bergpolder- Zuid aangewezen als “Krachtwijk”, een gebied dat dringend behoefte heeft aan verbetering, zowel wat betreft de bebouwing als in socio-economische zin. De woningcorporatie Vestia, die het grootste deel van de woningen in bezit heeft, was de drijvende kracht achter de ontwikkeling van een Masterplan voor de verbetering van de wijk. Door de crisis bij Vestia in 2012 is uitvoering van dit plan op de lange baan geschoven.

### 5.4 De wensen van stakeholders voor het onderzoek

Toen CPC in 2011 met onderzoek in Bergpolder Zuid begon, was Vestia nog actief en was het doel van het project om het Masterplan te verbeteren door maatregelen toe te voegen die de klimaatbestendigheid van de wijk zouden verbeteren. Na een aantal discussies op gemeenteniveau, is in april 2012 door de onderzoekers een bijeenkomst gehouden met verschillende stakeholders van de wijk Bergpolder Zuid, zoals de woningcorporatie, de GGD, het waterschap, de Deelraad Noord, en verschillende afdelingen van de gemeente Rotterdam. Op deze bijeenkomst zijn verschillende onderzoeksvragen en -wensen voor CPC geïdentificeerd zoals:

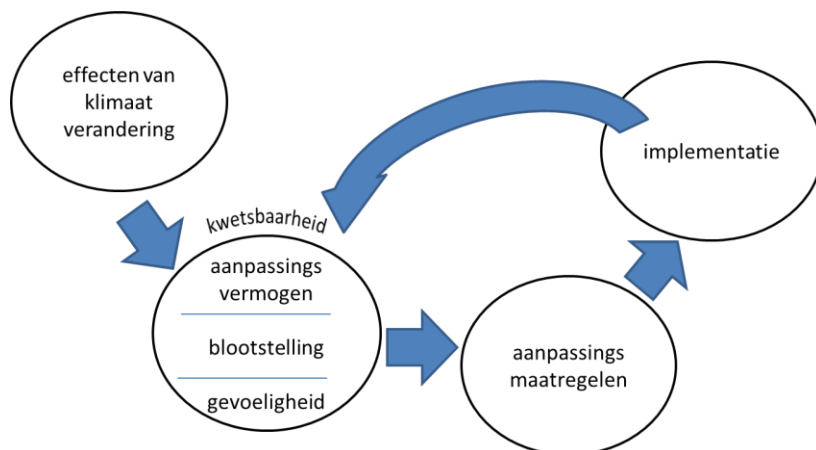
- Wat is de kwetsbaarheid van Bergpolder Zuid (in de huidige situatie, bij uitvoering van het Masterplan en na implementatie van een Masterplan+ (het Masterplan met extra adaptatiemaatregelen)?
- Probeer de kwetsbaarheid tastbaar te maken door het kiezen van aansprekende variabelen, bijvoorbeeld het aantal mensen met slaapproblemen vanwege hitte in de stad. Bestaan er hiervoor grenswaarden?
- Presenteer de resultaten als aansprekende visualisaties, bijvoorbeeld in de vorm van herkenbare kaarten.
- Wat zijn mogelijke “quick win” adaptatie maatregelen?
- Bestaat er een definitie van en doelwaarde voor klimaatbestendigheid?
- Draag voor beleid bruikbare resultaten zo snel mogelijk over, ook als die onzeker zijn. Geef daarbij het type en de mate van onzekerheid wel goed aan.

Bovenstaande ‘wensen’ zijn in vervolgbijeenkomsten waarin voorlopige onderzoeksresultaten zijn bediscussieerd, verder gespecificeerd. Het wegvallen van Vestia, en daarmee de implementatie van het Masterplan, maakte dat de focus in het project geleidelijk aan vervaagde. Er kwam meer nadruk te liggen op de bruikbaarheid van het onderzoek voor de stad Rotterdam als geheel.



## 5.5 De onderzoeksresultaten

De CPC onderzoeksresultaten voor kwetsbaarheid en klimaatbestendigheid worden gekoppeld en gepresenteerd met behulp van onderstaand logisch kader (**Figuur 5.1**). Het EVAI model verbindt kwetsbaarheid en adaptatie aan effecten van klimaatverandering. De implementatie van adaptatiemaatregelen is in de Bergpolder Zuid niet aan de orde geweest.



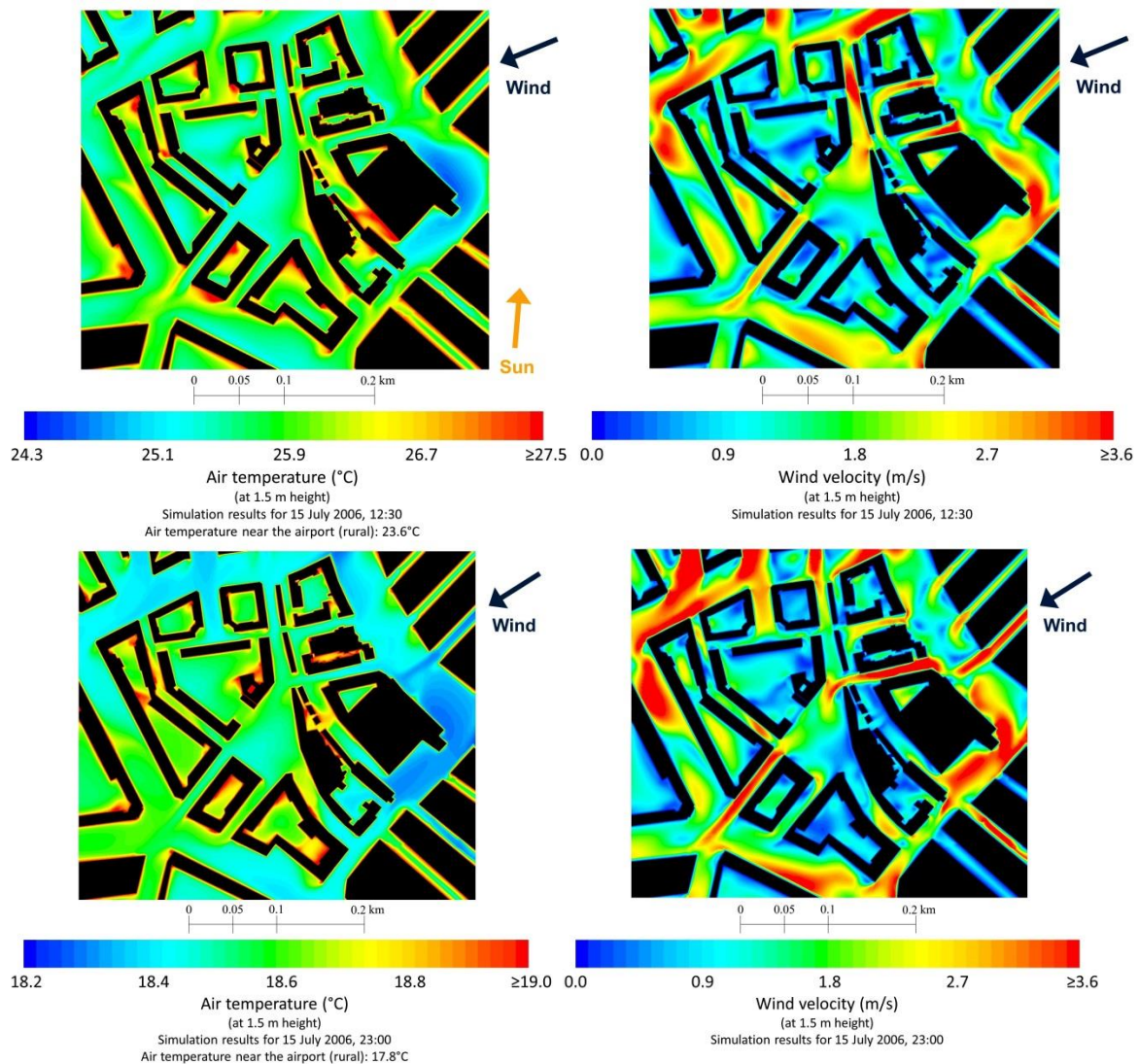
*Figuur 5.1 Het EVAI model (Effect –Vulnerability–Adaptation – Implementation).*

Voor ieder van de elementen in dit model zijn passende informatieproducten ontwikkeld om de uitkomsten van het onderzoek te delen met de stakeholders.

De **effecten van klimaatverandering** zijn in eerste instantie niet specifiek voor Bergpolder Zuid. Daarom is gebruik gemaakt van al bestaande uitkomsten, zoals de **tabellen** met de verandering in klimaatparameters, zoals gemiddelde temperatuur, aantal zomerse dagen (maximum temperatuur hoger dan 25°C), of verandering in de gemiddelde hoeveelheid neerslag (zoals in KNMI, 2014). De **kaarten** uit de interactieve klimaat(effect)atlas voor Rotterdam (Gemeente Rotterdam, 2013) zijn gebruikt in discussies met stakeholders om de effecten van klimaatverandering (wateroverlast, hitte, droogte) te laten zien in vergelijking met andere wijken.

Om de **kwetsbaarheid** van de Bergpolder zuid in beeld te brengen is gebruik gemaakt van verschillende methoden die vooral gericht waren op blootstelling en gevoeligheid voor hitte (zie paragraaf 2.2 voor uitleg van deze begrippen): modellering van de temperatuur (Toparlar et al., 2014), gevoeligheidsprofielen voor straten (Hotkevica, 2013) en kwetsbaarheidstypologie van wijken (Van der Hoeven en Wandl, 2014). Via deze methoden is de kwetsbaarheid van Bergpolder Zuid voor de effecten van klimaatverandering weergegeven op verschillende **kaarten (Figuren 5.2 t/m 5.5)**.

De meteorologische metingen die binnen CPC zijn uitgevoerd waren niet direct gericht op Bergpolder Zuid. Daarom is het de temperatuur met behulp van modellen in kaart gebracht (**Figuur 5.2**). Hierbij zijn in een aantal gevallen resultaten van metingen in andere wijken vertaald naar Bergpolder Zuid. De modellen laten duidelijk zien dat gebouwen in de wijk overdag warmte vasthouden en in de nacht weer uitstralen. Binnentuinen en straten loodrecht op de windrichting zijn gevoeliger voor de opwarming door het ontbreken van koeling door ventilatie.

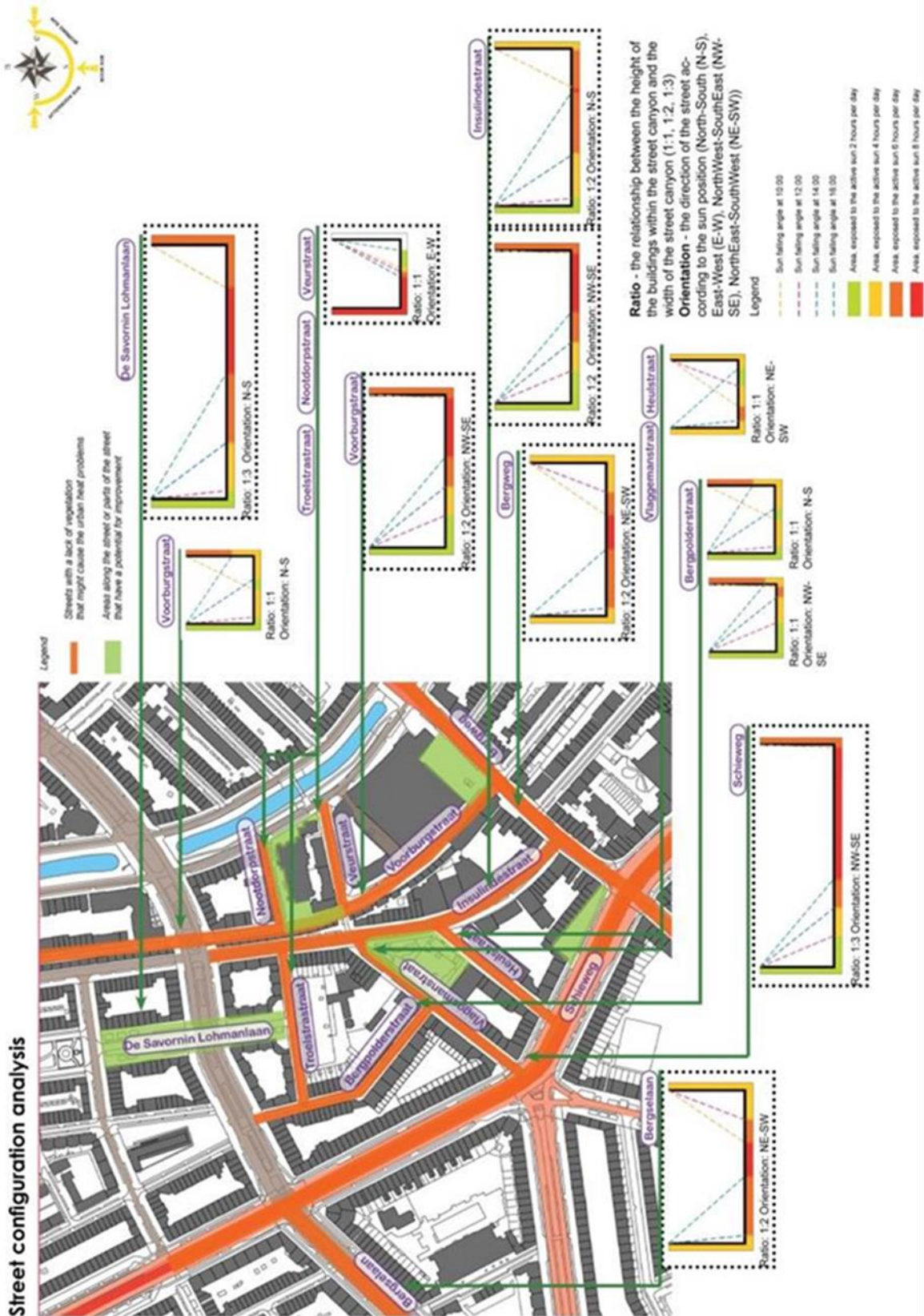


*Figuur 5.2: Resultaat van de modelstudie: luchttemperatuur (links) en windsnelheid (rechts) overdag (boven) en 's nachts (onder) in Bergpolder Zuid (Toparlar et al., 2014).*

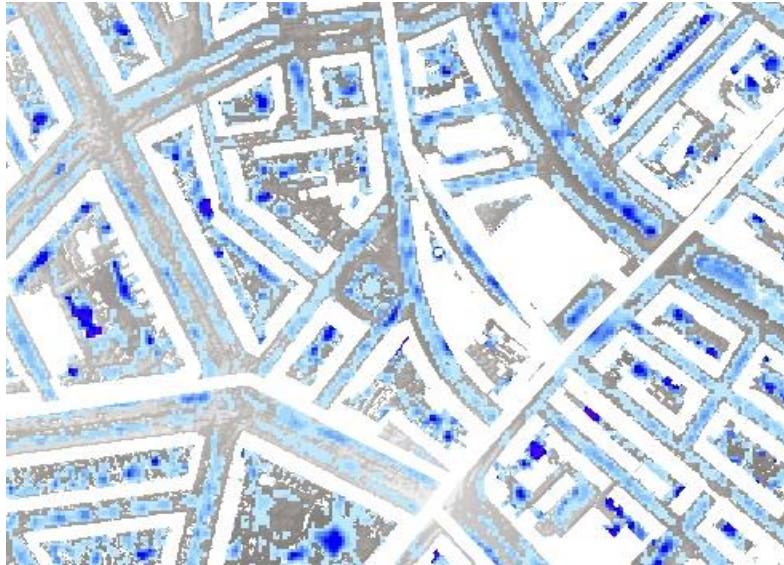
Overdag bepaalt de straling van de zon grotendeels het comfort op straat. Een detailanalyse (**Figuur 5.3**) laat zien welke straten (bijvoorbeeld Schieweg) en welke delen van een straat gevoelig zijn voor hitteoverlast. Vooral de bovenste appartementen aan de zonkant van de straat zijn gevoelig voor opwarming binnenshuis door de grotere instraling van de zon.

Er zijn geen historische gebeurtenissen bekend met wateroverlast in de wijk. Extreme regenbuien komen echter weinig voor en zijn heel plaatselijk. Als er echter in de Bergpolder Zuid een bui zou vallen van meer dan 20 mm in een uur dan zou het riool overlopen (Vergroesen, 2013) en hinder ontstaan door water op straat. Modelleringsresultaten laten zien dat vooral de laaggelegen binnentuinen blootgesteld zijn aan wateroverlast (**Figuur 5.4**, Veerbeek en Husson, 2013). Overigens blijkt uit praktijkervaringen in Amsterdam en Kopenhagen dat de werkelijke gevoeligheid voor het optreden van schade afhankelijk is van heel lokale factoren, zoals de aanwezigheid van drempels, kelders en andere gebouwkenmerken.

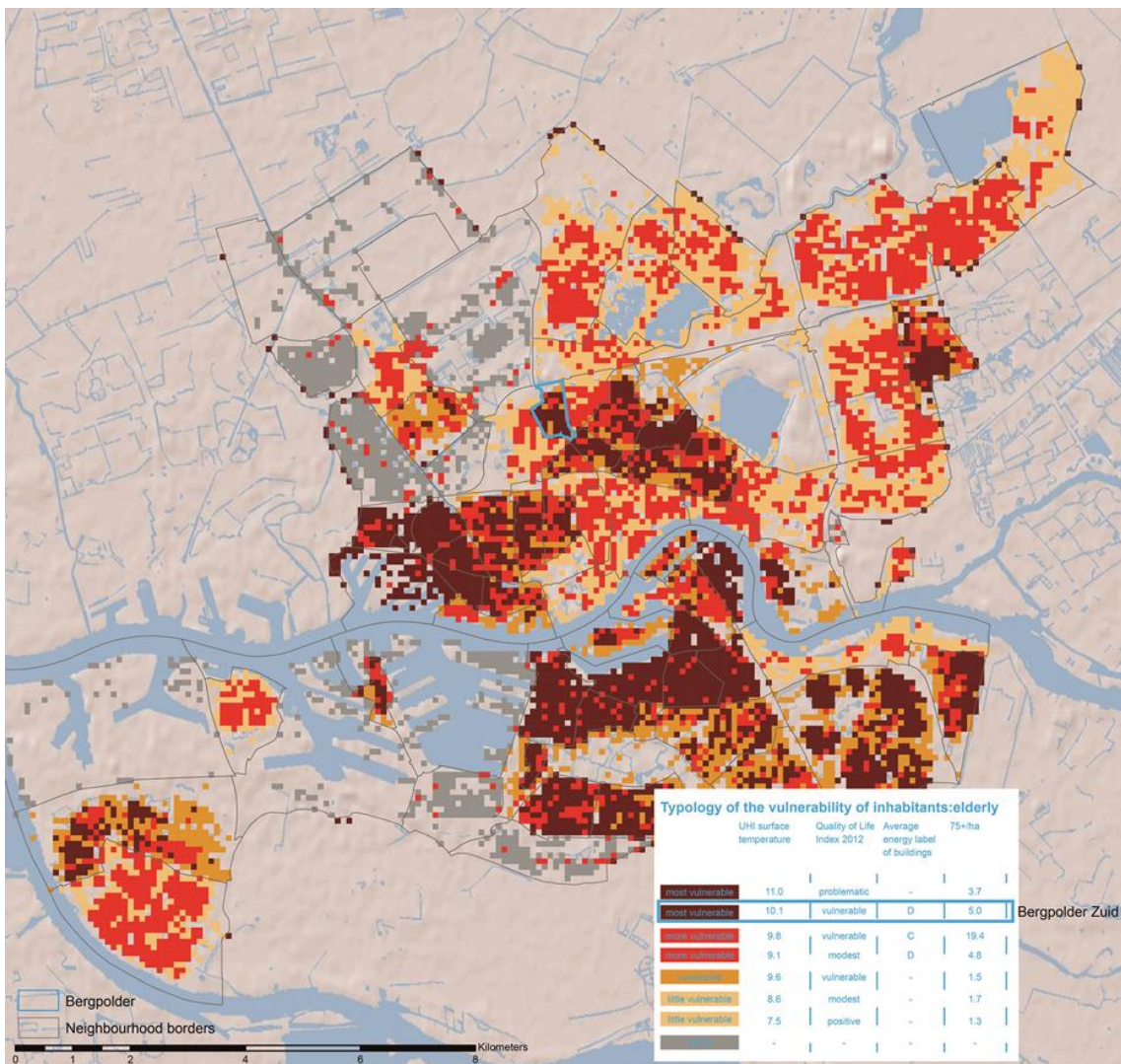




Figuur 5.3 Gevoeligheidsprofielen voor straten in Bergpolder Zuid, Rotterdam. In de gekleurde straatprofielen is het aantal uren met directe zonstraling in de straat en op façades weergegeven (bron: Hotkevica, 2013).



Figuur 5.4 Overstromingskaart van Bergpolder Zuid voor een regenbui die eens in de 10 jaar voorkomt en waarbij in een uur 35 mm neerslag valt). Hoe donkerder de blauwe kleur, hoe dieper het water (Veerbeek en Husson, 2013).



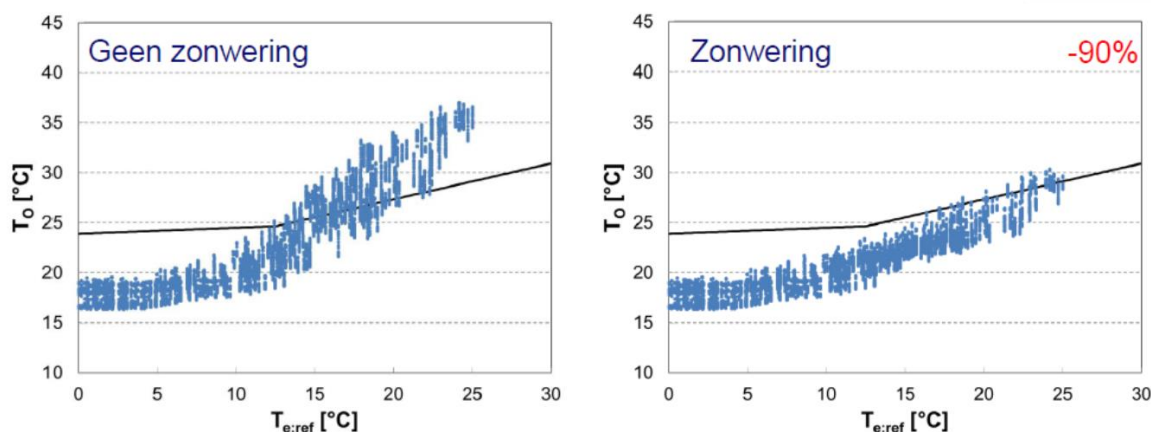
Figuur 5.5 Kwetsbaarheidskaart voor hitte voor ouderen, Rotterdam (Van der Hoeven en Wandl, 2014).



**Figuur 5.5** brengt de verschillende elementen samen in een kwetsbaarheidskaart (in dit geval voor hitte, voor heel Rotterdam) (Van der Hoeven en Wandl, 2014). De kwetsbaarheid wordt bepaald door wijkeigenschappen, kwaliteit van de gebouwen, aanwezigheid van ouderen (als erg gevoelige groep) en de leefbaarheid per buurt. Bergpolder Zuid komt uit deze kaart naar voren als een van de meest kwetsbare buurten in Rotterdam door de karakteristieken van de wijk (veel verharding, hoge bebouwingsdichtheid, weinig groen) en de kwaliteit van de gebouwen. De wijk behoort daarmee tot de kwetsbaarste wijken voor hittestress in Rotterdam en vertoont een gemiddeld beeld wat betreft wateroverlast op straat. Binnen Bergpolder Zuid zijn het vooral de meest verharde open ruimtes, de spoordriehoek en oost-west georiënteerde smalle straten en woonblokken die het meest zijn blootgesteld aan hitte.

Doordat de verschillende resultaten op heel verschillende momenten beschikbaar kwamen was het niet mogelijk de uitkomsten te combineren in één integrale en gedetailleerde kwetsbaarheidskaart voor Bergpolder Zuid. Evenmin was het mogelijk om de effecten van de uitvoering van het masterplan op de kwetsbaarheid integraal weer te geven.

Voor de discussie met stakeholders over **adaptatiemaatregelen** en quick wins is als werkmateriaal een ideeënboekje samengesteld. Vooral effecten van maatregelen op gebouwniveau en van groene maatregelen zijn in kaart gebracht. Voor het type galerijwoning dat frequent voorkomt in Bergpolder Zuid blijken het openen van ramen als de buitentemperatuur lager is dan de binnentemperatuur en het toepassen van beweegbare zonwering te resulteren in de grootste afname van het aantal uren met oncomfortabel hoge binnentemperatuur (**Figuur 5.6**) (Van Hooff et al., 2014). Woningisolatie zal moeten samengaan met, bijvoorbeeld, een van de hiervoor genoemde maatregelen, omdat het anders in hete zomers zal leiden tot een verslechtering van het binnenklimaat. Groene daken lijken nauwelijks te leiden tot verandering in het aantal oncomfortabele uren.



*Figuur 5.6 Het toepassen van beweegbare zonwering resulteert in 90% afname van het aantal oververhittingsuren in een galerijwoning. Op de horizontale as de buitentemperatuur, op de verticale as de hierbij optredende binnentemperatuur, ieder stipje geeft een uurwaarde aan. Punten (uren) boven de zwarte lijn zijn oncomfortabel warm (voor meer uitleg zie paragraaf 2.2.2) (Van Hooff et al., 2014).*

Een combinatie van problemen met betrekking tot het afstemmen van de verschillende deelonderzoeken, het vergelijkbaar maken van de uitkomsten en de gegevensverzameling over kosten en baten van de afzonderlijke adaptatiemaatregelen maakte een systematische en kwantitatieve vergelijking van de maatregelen onmogelijk. Als alternatieve methode is een ontwerpatelier georganiseerd. In dit atelier hebben stakeholders en onderzoekers gewerkt aan een schets voor een klimaatbestendige Bergpolder Zuid (**Figuur 5.7**).



Figuur 5.7 Schets van de mogelijkheden voor klimaatadaptatie in Bergpolder Zuid gemaakt tijdens het ontwerpatelier met de stakeholders.

De voorlopige resultaten van het CPC onderzoek en de gebieds- en beleidskennis van de stakeholders vormden hiervoor de basis. Deze activiteit bleek erg goed te werken om kennis van stakeholders boven water te halen over, bijvoorbeeld, conditie van de ondergrond, opvattingen van bewoners, locatie van kabels en riolen. Tegelijkertijd bood het een uitstekende gelegenheid om CPC kennis over, bijvoorbeeld, de effectiviteit van groene maatregelen in te brengen. Verschillende maatregelen werden met elkaar vergeleken waarbij 'wenselijkheid' en 'uitvoerbaarheid' als belangrijke criteria werden gebruikt naast 'effectiviteit'.

Het ontwerpatelier bracht ook verschillen tussen de diverse stakeholders aan het licht: waar de gemeentevertegenwoordigers over het algemeen meer bomen in de wijk wilden, was de wijkcoördinator heel expliciet over de wensen en klachten van bewoners over zulke plannen en wees op de moeilijkheden bij de praktische realisatie ervan.

## 5.6 Lessen over integratie

Ook al is het een en ander bereikt in de studie over Bergpolder Zuid, veel van onze ambities bleken niet haalbaar. Belangrijke factoren die het succes van deze case studie hebben bepaald, zijn:

-De *bereidheid van de onderzoekers om over de grenzen van hun discipline te kijken*. De deelname aan de case en de discussies over Bergpolder Zuid illustreren dat bij veel onderzoekers de bereidheid hiertoe in hoge mate aanwezig is. De disciplinaire oriëntatie van de universitaire groepen en de noodzaak en druk om uiteindelijk een dissertatie binnen een vakgebied op te leveren, vormen echter belemmeringen voor intensieve samenwerking.



- *De timing van het beschikbaar komen van onderzoeksresultaten.* In het Climate Proof Cities onderzoeksprogramma werden allerlei onderwerpen gelijktijdig onderzocht. Dit betekende dat pas na verloop van tijd informatie beschikbaar was over, bijvoorbeeld, kwetsbaarheid, terwijl degenen die maatregelen en ontwerpen bestudeerden al veel eerder behoefte hadden aan zulke informatie. De tijd die nodig is om voldoende meetgegevens te verzamelen en te verwerken wordt vaak onderschat. Hierdoor was het lastig om informatie voor strategische documenten zoals de Rotterdam Adaptatie Strategie tijdig aan te leveren in een voor de gemeente bruikbare vorm.
- *De mogelijkheden tot sturing in termen van timing en focus.* Aan het begin van het vierjarige onderzoeksprogramma zijn deelonderzoeken gedefinieerd die door verschillende universitaire groepen en instituten zouden worden uitgevoerd. Dit past bij een wetenschappelijk onderzoeksprogramma. Maar daarbij blijken de mogelijkheden van een centrale sturing of aanpassing achteraf gering. Een dergelijk sturing of aanpassing is nodig om goed aan te sluiten bij nieuwe onderzoeksvragen of om in te spelen op nieuwe wensen van belanghebbenden.
- *De onmogelijkheid om de effectiviteit van adaptatiemaatregelen met elkaar te vergelijken.* In een relatief jong onderzoeksgebied zoals klimaatadaptatie in de stad ontbreken conventies. Zo is niet vastgelegd waar, wanneer, in welke eenheden en ten opzichte van welke referentie het effect wordt bepaald. . Bovendien bemoeilijkt de variatie aan aanpassingsmaatregelen de onderlinge vergelijking. In CPC is een poging tot harmonisatie gedaan (Bosch, 2014), maar deze bleek niet eenvoudig na te leven
- *De match tussen vraag en aanbod van informatie.* De case Bergpolder Zuid draaide in de praktijk vooral om deze match. Er ontstonden levendige discussies over de vraag welke mate van nauwkeurigheid genoeg is, de tijdigheid van informatie voor beleid, welke informatie precies nodig is en in welke vorm. In dit proces van afstemming is evenwicht in de rol van de vragende beleidsmaker (zijn het werkbare vragen?) en die van de aanbiedende onderzoeker (sluit het antwoord aan bij de vraag?) belangrijk.
- *De rol van "grenswerkers", die de interactie tussen onderzoekers en stakeholders faciliteren.* Voor de organisatie en facilitering van het proces zijn grenswerkers nodig die in staat zijn om een integratie binnen de wetenschap en tussen wetenschap en praktijk te bevorderen. Dat is een aparte vaardigheid die veel verder gaat dan het vertalen van onderzoeksresultaten in begrijpelijk Nederlands. Het vergt inzicht in de stand van de wetenschap en in de praktijk van de gebruiker van klimaat(adaptatie)kennis. Daarnaast is expertise nodig in toepassen van methoden die integratie bevorderen, en inzicht in welke uitkomsten al dan niet bruikbaar zijn in het beleid.
- *Het Masterplan voor Bergpolder Zuid als katalyserend element.* Het gemeenschappelijke referentiepunt (in Tabel 5.1 "boundary object" genoemd) in de vorm van het Masterplan gaf een gevoel van relevantie en urgentie voor zowel onderzoekers als stakeholders. Toen Vestia afhaakte en de implementatie van het Masterplan onzeker werd, verminderde de focus in het proces.



Tabel 5.1 Lessen over integratie (Groot et al., 2015)

	Integratiemiddel	Bruikbaar	Beperkend
Binnen de wetenschap	Een gezamenlijk doel	De CPC onderzoeksagenda omvatte het hele spectrum van klimaatverandering tot governance van adaptatie	De onderzoekers hadden aan het begin van het onderzoek weinig inzicht in hun resultaten en de mogelijkheden om deze te integreren
	Onderling begrip	CPC Guideline "Vulnerability terminology", "effectiveness" en bijeenkomsten van onderzoekers	
	Theoretisch model	EVAI model	Geen ontwikkeling nieuwe gemeenschappelijke concepten
	Methode	Onderlinge discussies over de gemeenschappelijke analyse en rapportage eenheden	Toepassen van gemeenschappelijke eenheden in de verschillende disciplines
	"Boundary object"	Masterplan was een belangrijke stimulus	
	Produkt	Overzicht adaptatie maatregelen, kwetsbaarheidskartering	Voor verschillende andere produkten die door aparte onderzoekers zijn gemaakt hebben we kansen om te integreren gemist
Tussen wetenschap en praktijk	Een gezamenlijk doel	werd geformuleerd in de verschillende bijeenkomsten	
	Onderling begrip	Workshops, presentaties, discussies	Rapporten
	Theoretisch model	"meekoppelen"	
	Methode	Bijeenkomsten stakeholders & onderzoekers, design workshop	Gedetailleerde wetenschappelijke uitkomsten zijn moeilijk te vertalen in informatie bruikbaar voor beleid
	"Boundary object"	Masterplan was een belangrijke stimulus	
	Produkt	Onderzoeksagenda, (vrijblijvende) schetskaart	

NB: een "boundary object" is iets dat in staat is om groepen bij elkaar te brengen en daarmee aan een gemeenschappelijke taak te werken. "meekoppelen" is het aansluiten bij bestaande ontwikkelingen in een gebied, vaak gebruik makend van initiatieven uit het gebied zelf (zie paragraaf 3.5).

## 5.7 Conclusies en gerelateerde onderzoeksvragen

Ook al heeft CPC onderzoek bijgedragen tot een vergroting van de kennis over stedelijke aanpassing aan klimaatverandering, de case Bergpolder Zuid laat zien dat voor de integratie en toepassing van deze kennis in de (beleids)praktijk nog meer nodig is:

- Een koppeling met de uitkomsten van klimaatscenario's (zoals KNMI'14) vereist een systematische opbouw van een onderzoeksprogramma met aan elkaar gekoppelde modellen;
- Voor de vergelijking van verschillende adaptatiemaatregelen is (veel meer) harmonisatie van de bepaling van de effectiviteit nodig, daarnaast ontbreekt een overzicht van de kosten en baten van maatregelen;
- Er is behoefte aan meer inzicht in de methoden en processen die effectief zijn voor het integreren van : 1) het werk van onderzoekers van verschillende disciplines en 2) maatschappelijke behoeften en wetenschappelijk onderzoek.



## **BIJLAGEN**



## Bijlage A Onderzoekers CPC

Project	voornaam		achterbaan	Instituut	Rol
<b>WP 1 Urban Climate System</b>	<b>Bert</b>	<b>van</b>	<b>Hove</b>	<b>Wageningen University</b>	<b>werkpakkettrekker</b>
<b>1.1 observations</b>	Bert	van	Hove	Wageningen University	projectleider
	Bert		Holtslag	Wageningen University	projectleider
	Cor		Jacobs	WUR-Alterra	onderzoeker
	Lisette		Klok	TNO	onderzoeker
	Bert		Heusinkveld	Wageningen University	onderzoeker
	Jan		Elbers	WUR-Alterra	onderzoeker
	Rogier		Westerhof	Deltares	onderzoeker
	Reinder		Brolsma	Deltares	onderzoeker
	Reinder		Ronda	Wageningen University	postdoc
	Oscar		Hartogensis	Wageningen University	onderzoeker
	Henk		Verhagen	Wageningen University	onderzoeker
<b>1.2 meso model</b>	Bert		Holtslag	Wageningen University	projectleider
	Bert	van	Hove	Wageningen University	projectleider
	Reinder		Ronda	Wageningen University	postdoc
	Sytse		Koopmans	Wageningen University	postdoc
<b>1.3 micro model</b>	Harm		Jonker	TU Delft	projectleider
	Patrick		Schrijvers	TU Delft	AIO
	Sasa		Kenjeres	TU Delft	onderzoeker
	Stephan	de	Roode	TU Delft	onderzoeker
<b>WP 2 Vulnerability</b>	<b>Bert</b>		<b>Blocken</b>	<b>TU Eindhoven</b>	<b>werkpakkettrekker</b>
<b>2.1 indoor performance buildings</b>	Jan		Hensen	TU Eindhoven	projectleider
	Mike	van der	Heijden	TU Eindhoven	AIO
	Mohamed Hamdy		Hassan Mohamed	TU Eindhoven	postdoc
	Bert		Blocken	TU Eindhoven	onderzoeker
	Twan	van	Hooff	TU Eindhoven	postdoc
<b>2.2 human health impacts</b>	Hein		Daanen	TNO	projectleider
	Ries		Simons	TNO	onderzoeker
	Lydia		Kistemaker	TNO	onderzoeker
<b>2.3 sensitivity &amp; vulnerability</b>	Frans	van de	Ven	Deltares	projectleider
	Matthieu		Spekkers	TU Delft	onderzoeker
	Karin		Stone	Deltares	onderzoeker
	Rianne	van	Duinen	Deltares	onderzoeker
	Hein		Daanen	TNO	onderzoeker
	Chris		Zevenbergen	Unesco-IHE	onderzoeker
	William		Veerbeek	Unesco-IHE	onderzoeker
	Sonja		Döpp	TNO	onderzoeker
	Wouter		Jonkhoff	TNO	onderzoeker
	Wouter	van	Riel	Deltares	onderzoeker
<b>2.4 neighbourhood typology</b>	Frank	van der	Hoeven	TU Delft	projectleider
	Andy	van den	Dobbelsteen	TU Delft	projectleider
	Nico		Tillie	TU Delft	onderzoeker
	Alexander		Wandl	TU Delft	onderzoeker
	Stefan	van der	Spek	TU Delft	onderzoeker
	Maarten		Tjon Sie Fat	TU Delft	AIO





Project	voornaam		achterbaan	Instituut	Rol
<b>WP 3 Measures and strategies</b>	<b>Andy</b>	<b>van den</b>	<b>Dobbelsteen</b>	<b>TU Delft</b>	<b>werkpakkettrekker</b>
<b>3.1 green interventions</b>	Sanda		Lenzholzer	Wageningen University	projectleider
	Wiebke		Klemm	Wageningen University	AIO
	Adri	van den	Brink	Wageningen University	onderzoeker
	Ingrid		Duchhart	Wageningen University	onderzoeker
<b>3.2 rainfall interception, building and street</b>	Bert		Blocken	TU Eindhoven	projectleider
	Jan		Hensen	TU Eindhoven	onderzoeker
	Hamid		Montazeri	TU Eindhoven	AIO
<b>3.3 rainfall interception, cities</b>	Frans	van de	Ven	Deltares	projectleider
	Jan		Hofman	KWR	projectleider
	Toine		Vergroesen	Deltares	projectleider
	Eelco		Verschelling	Deltares	onderzoeker
	Daniel		Tollenaar	Deltares	onderzoeker
	Gertjan		Medema	KWR	onderzoeker
	Marthe	de	Graaff	KWR	onderzoeker
	Elgard	van	Leeuwen	Deltares	reviewer
	Hanneke	van der	Klis	Deltares	onderzoeker
<b>3.4 water &amp; energy systems</b>	Reinder		Brolsma	Deltares	projectleider
	Daniel		Tollenaar	Deltares	onderzoeker
	Roel		Brand	TNO	onderzoeker
	Jan	de	Wit	TNO	onderzoeker
	Marthe	de	Graaff	KWR	onderzoeker
	Matthijs		Bonte	KWR	onderzoeker
<b>3.5 adaptive building envelopes</b>	Harry		Timmermans	TU Eindhoven	projectleider
	Twan	van	Hooff	TU Eindhoven	postdoc
	Bert		Blocken	TU Eindhoven	onderzoeker
	Anika		Haak	TU Eindhoven	onderzoeker
	Wendy		Janssen	TU Eindhoven	onderzoeker
	Christof		Gromke	TU Eindhoven	onderzoeker
	Yasin		Toparlar	TU Eindhoven	onderzoeker
	Jan		Hensen	TU Eindhoven	onderzoeker
<b>3.6 urban climate design</b>	Andy	van den	Dobbelsteen	TU Delft	projectleider
	Laura		Kleerekoper	TU Delft	AIO
	Truus		Hordijk	TU Delft	onderzoeker
	Machiel	van	Dorst	TU Delft	onderzoeker
<b>3.7 metropolitan areas</b>	Frank	van der	Hoeven	TU Delft	projectleider
	Leyre		Echevarria Icaza	TU Delft	AIO
	Andy	van den	Dobbelsteen	TU Delft	onderzoeker
	Maarten		Tjon Sie Fat	TU Delft	AIO
<b>WP 4 Governance</b>	<b>Tejo</b>		<b>Spit</b>	<b>Utrecht University</b>	<b>werkpakkettrekker</b>
<b>4.1 external integration</b>	Tejo		Spit	Utrecht University	projectleider
	Willem		Salet	University of Amsterdam	projectleider
	Hens		Runhaar	Utrecht University	co-supervisor
	Caroline		Uittenbroek	University of Amsterdam Utrecht University	AIO
	Leonie		Janssen-Jansen	University of Amsterdam	onderzoeker
<b>4.2 self organization</b>	Luuk		Boelens	Utrecht University	projectleider
	Beitske		Boonstra	TNO	AIO



Project	voornaam		achterbaan	Instituut	Rol
<b>4.3 residential buildings</b>	Henk		Visscher	TU Delft	projectleider
	Ad		Straub	TU Delft	projectleider
	Martin		Roders	TU Delft	AIO
<b>4.4 redevelopment urban areas</b>	Tejo		Spit	Utrecht University	projectleider
	Anita		Kokx	Utrecht University	postdoc
	Marjolein		Dikmans	Utrecht University	onderzoeker
	Thomas		Hartmann	Utrecht University	onderzoeker
<b>4.5 financial instrument</b>	Tejo		Spit	Utrecht University	projectleider
	Erwin	van der	Krabben	Radboud University Nijmegen	projectleider
	Liz		Root	Radboud University Nijmegen	AIO
<b>WP 5 Integration</b>	<b>Peter</b>		<b>Bosch</b>	<b>TNO</b>	<b>werkpakkettrekker</b>
<b>5.1 effectiveness assessment</b>	Eddy		Moors	Wageningen University	projectleider
	Annemarie		Groot	WUR-Alterra	onderzoeker
	Herbert	ter	Maat	WUR-Alterra	onderzoeker
	Peter		Bosch	TNO	onderzoeker
	Cor		Jacobs	WUR-Alterra	onderzoeker
	Anikó		Pásztor	TNO	onderzoeker
	Sonja		Döpp	TNO	onderzoeker
	Vera		Rovers	TNO	onderzoeker
<b>5.2 integration frameworks</b>	Peter		Bosch	TNO	projectleider
	Chris		Zevenbergen	Unesco-IHE	onderzoeker
	William		Veerbeek	Unesco-IHE	onderzoeker
	Jeroen		Rijke	Unesco-IHE	onderzoeker
	Sonja		Döpp	TNO	onderzoeker
	Anikó		Pásztor	TNO	onderzoeker
<b>5.3 integrated assessment report</b>	Vera		Rovers	TNO	onderzoeker
	Peter		Bosch	TNO	projectleider
	Vera		Rovers	TNO	onderzoeker



## Bijlage B Bronvermelding

### Inleiding

**Algemene Rekenkamer** (2012). Aanpassing aan klimaatverandering: strategie en beleid. kst-33470-1. ISSN 0921 – 7371. 's-Gravenhage.

**EEA** (2010). The European Environment – State and Outlook 2010. Adapting to climate change. Copenhagen: European Environment Agency.

**G32** (2011). Werkprogramma 2011. Pijler Fysiek G32-Stedennetwerk

**Isaord, S.** (2011). Perspectives on Adaptation to Climate Change in Europe. In: Ford, J.D., and L. Berrang-Ford (eds), Climate change adaptation in Developed Nations. Springer.

**PBL** (2011). Een delta in beweging. Bouwstenen voor een klimaatbestendige ontwikkeling van Nederland. Den Haag. Planbureau voor de Leefomgeving.

**Stern, N.** (2006). The Economics of Climate Change. The Stern Review. Cambridge: Cambridge University Press.

**Watkiss, P.** (ed) (2011). The ClimateCost Project. Final Report. Volume 1: Europe. Published by the Stockholm Environment Institute, Sweden. ISBN 978-91-86125-35-6.

### Hoofdstuk 1

**Brolsma R, Buma J, Van Meerten H, Dionisio M, Elbers J.** (2012). Effect van droogte op stedelijk gebied. Kennisinventarisatie. Utrecht: Knowledge for Climate.

**Brolsma, R.J, G. Verhoeven, E. Foka** (2011). Invloed stedelijk oppervlaktewater op omgevingstemperatuur. Deltares, 1200473.

**Conrads, L.A.** (1975). Observations of meteorological urban effects. The heat island of Utrecht. PhD thesis University Utrecht. 84 pp.

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

**Heusinkveld, B., van Hove, B. Jacobs, C.** (2012). Ruimtelijke analyse van het stadsklimaat in Arnhem. 24pp. WUR publicatie.

**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. DOI: 10.1002/2012JD019399.

**Jacobs, C., Elbers, J., Brolsma, R., Hartogensis, O., Moors, E., Rodríguez-Carretero Márquez, M-T, and van Hove, B.** (2014). Assessment of 1 evaporative water loss from Dutch cities. Building and Environment. Available online 10 July 2014. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.07.005



- Klemm, W.**, Heusinkveld, B.G., Lenzholzer, S., Jacobs, M.H., Van Hove, B. (2014). Psychological and physical impact of urban green spaces on outdoor thermal comfort during summertime in The Netherlands. *Building and Environment* <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.05.013>.
- Klok, E.J.**, Broeke, H. ten, Harmelen, T. v., Verhagen, H., Kok, H., en Zwart, S. (2010). Ruimtelijke verdeling en mogelijke oorzaken van het hitte-eiland effect. TNO publicatie, TNO-034-UT-2010-01229\_RPT-ML, 78 pp..
- Klok, L.**, Zwart, S., Verhagen, H., Mauri, E. (2012). The surface heat island of Rotterdam and its relationship with urban surface characteristics. *Resources, Conservation and Recycling* 64, 23-29.
- KNMI** (2014). KNMI'14-klimaatscenario's voor Nederland; Leidraad voor professionals in klimaatadaptatie, KNMI, De Bilt, 34pp.
- Lindberg, F.**, Grimmond, C.S.B. (2013). Global to City Scale Anthropogenic Heat Flux model: The LUCY Model. User manual –Version 2013a, [Online].  
<[http://geography.kcl.ac.uk/micromet/Manuals/LUCY\\_Manual.pdf](http://geography.kcl.ac.uk/micromet/Manuals/LUCY_Manual.pdf)> (accessed 25.02.13).
- Matzarakis, A.** & Amelung, B. 2008. Physiological Equivalent temperature as indicator for impacts of climate change on thermal comfort of humans. *Seasonal Forecasts, Climatic Change and Human Health*. Springer
- Memon, R.A.**, Leung, D.Y.C., Liu, C.-H. (2009). An investigation of urban heat island intensity (UHII) as an indicator of urban heating. *Atmospheric Research* 94, 491-500.
- Oke TR.** (1973). City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* 7: 769–779.
- Oke TR.** (1976). The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands. *Atmosphere*, Volume 14, Issue 4, pp 268-277.
- Ronda R.**, Steeneveld, G.J., van Hove, B. (2010). Modelsimulaties van het stadsklimaat van Rotterdam. WUR publicatie 27 pp.
- Ronda, R.J.**, Steeneveld, G.J., van Hove, L.W.A., Holtslag, A.A.M. (2012): Anthropogenic heat release and urban heat island effects in Rotterdam, the Netherlands. *Urban Environmental Pollution 2012*, Amsterdam, the Netherlands
- Roodenburg J.** (1983). Adaptation of rural minimum temperature forecasts to an urban environment. *Archives for Meteorology Geophysics and Bioclimatology*; 32: 395-401;
- Schrijvers, P.J.C.**, H.J.J. Jonker, S. Kenjereš, S.R. de Roode (2014). Breakdown of the nighttime urban heat island energy budget. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.08.012
- Slingerland, J.** (2012). Mitigation of the urban heat island effect by using water and vegetation. MSc thesis TUDelft. 87 pp.
- Steeneveld, 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, 14pp., doi: 10.1029/2011 JDO15988.



- Steenefeld, G.J.,** Koopmans, S., Heusinkveld, B.G., Theeuwes, N.E. (2014). Refreshing the role of open water surfaces on mitigating the maximum urban heat island effect. *Landscape and Urban Planning* 121; 92–96
- Ter Maat, H.W.,** C.M.J. Jacobs, R.W.A. Hutjes, E.J. Moors (2014 - to be submitted). Quantifying local impacts of regional adaptation measures in the urban environment.
- Theeuwes N.E.,** Solcerová A. and Steeneveld G.J. (2013). Modeling the influence of open water surfaces on the summertime temperature and thermal comfort in the city. *J. Geophys. Res. Atmos.*; 118: 15pp. DOI: 10.1002/jgrd.50704
- Theeuwes, N.E.,** Steeneveld, G.J, Ronda, R.J., Heusinkveld, B.G., van Hove, L.W.A. and Holtslag, A.A.M. (2014). Seasonal dependence of the urban heat island on the street canyon aspect ratio. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* (2014) DOI:10.1002/qj.2289
- Van Hove, B.,** Steeneveld, G-J, Jacobs, C., H. ter Maat, H., Heusinkveld, B., Elbers, J., Moors, E., Holtslag, B. (2010). Modelling and observing urban climate in the Netherlands. KVR 020/10.
- Van Hove, L.W.A.,** Elbers, J.A., Jacobs, C.M.J., Heusinkveld, B.G., Jans, W.W.P. (2011a). Stadsklimaat in Rotterdam; Eerste analyse van de meetgegevens van het meteorologische meetnet. Alterra, Wageningen. Alterra-rapport 2192. 32 pp.
- Van Hove, L.W.A.,** Jacobs, C.M.J., Heusinkveld, B.G., Elbers, J.A., Steeneveld, G-J, Koopmans, S., Moors, E.J. and Holtslag, A.A.M. (2011b). *Exploring The Urban Heat Island Intensity Of Dutch Cities. In: City Weathers, meteorology and urban design 1950-2010.* Edited by Michael Hebbert, Vladimir Jankovic & Brian Webb. Published 2011 by Manchester Architecture Research Centre, University of Manchester. ISBN: 978-1-907120-98-5 <http://www.sed.manchester.ac.uk/research/marc>
- Van Hove, L.W.A.,** Steeneveld, G-J, Jacobs, C., Heusinkveld, B.G., Elbers, J. and Holtslag, A.A.M. (2011c). Exploring the Urban Heat Island Intensity of Dutch cities. Assessment based on a literature review, recent meteorological observations and datasets provided by hobby meteorologists. Alterra, Wageningen. Alterra report 2170. 62 pp. ISSN 1566-7197.
- Van Hove, L.W.A.,** Jacobs, C.M.J., Heusinkveld B.G., Elbers, J.A., van Driel, B.L., and Holtslag, A.A.M. (2014). Temporal and spatial variability of urban heat island and thermal comfort within the Rotterdam agglomeration. *Building and Environment* . DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.08.029
- Wolters, D. and** Brandsma, T. (2012). Estimating the Urban Heat Island in Residential Areas in the Netherlands Using Observations by Weather Amateurs. *J.App.Meteorol.Climatol.* 51; 711-721.



## Hoofdstuk 2

**Costola D, Blocken B, Hensen JLM.** 2009. Overview of pressure coefficient data in building energy simulation and airflow network programs. *Building and Environment* 44(10): 2027-2036.

**Crawley DB, Lawrie LK, Winkelmann FC, Buhl WF, Juang YJ, Pedersen CO, Strand RK, Liesen RJ, Fisher DE, Witte MJ, Glazer J.** (2001). EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings* 33(4): 319-331.

**Crawley DB, Hand JW, Kummert M, Griffith BT** (2008). Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *Building and Environment* 43(4): 674-685.

**Daanen, H. A. M., Heusinkveld, B., Van Hove, B., & Van Riet, N.** (2011). Heat strain in elderly during heat waves in the netherlands. In S. Kounalakis, & M. Koskoulou (Eds.), *Abstract book XIV international conference on environmental ergonomics, Nafplio, Greece, 2011* (pp. 168-170)

**Daanen, H. A. M., Jonkhoff, W., Bosch, P., & Ten Broeke, H.** (2013). The effect of global warming and urban heat islands on mortality, morbidity and productivity in the Netherlands. *Environmental Ergonomics XV Conference Proceedings*. Queenstown New Zealand, ISBN 978-0-473-2281-7, , 6-9.

**Daanen, H. A. M., & Herweijer, J. A.** (2015). Effectiveness of an indoor preparation program to increase thermal resilience in elderly for heat waves. *Building and Environment*, DOI:10.1016/j.buildenv.2014.04.010

**De Man H, Leenen I.** (2014). Water in de openbare ruimte heeft risico's voor de gezondheid. Rapport 2014/28, STOWA/RIONED, ISBN 97 890 73645 44 8

**Hajat, S., O'Connor, M., & Kosatsky, T.** (2010). Health effects of hot weather: From awareness of risk factors to effective health protection. *The Lancet*, 375(9717), 856-863.

**Hensen JLM, Lamberts R, Negrao COR.** (2002). A view of energy and building performance simulation at the start of the third millenium. *Energy and Buildings* 34(9): 853-855.

**Howe, A. S., & Boden, B. P.** (2007). Heat-related illness in athletes. *American Journal of Sports Medicine*, 35(8), 1384-1395.

**Hurk, B. van den, Klein Tank, A.K., Lenderink, G., Ulden, A. van, Oldenborgh, G.J. van, Katsman, C., Brink, H. van den, Keller, F., Bessembinder, J., Burgers, G., Komen, G., Hazeleger, W., Drijfhout, S.** (2006). *KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands*. KNMI, De Bilt, The Netherlands

**Huynen, M.M.T.E., Martens, P. Schram, D., Weijenberg, M.P., Kunst, A.E.** (2001). The impact of heat waves and cold spells on mortality rates in the Dutch population: *Environmental Health Perspectives*, v. 109, p. 463-470.

**IPCC** (2007). *Impacts, Adaptation and Vulnerability, Contribution of Working Group II*. In: Perry, M., Canziani, O., Palutikof, J., Van der Linden, P., Hanson, C. (eds), *Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. Polsky et al. (2007).

**Kemmeren, J.M., M.-J.J. Mangan, Y.T.H.P. van Duynhoven, A.H. Havelaar** (2006). Priority setting of foodborne pathogens. Disease burden and costs of selected enteric Pathogens. Report 330080001, RIVM



**Kovats**, RS, S Hajat, 2008, Heat stress and public health: a critical review: Annual Review of Public Health, v. 29, p. 41-55

**Kwadijk**, J. C. J., Haasnoot, M., Mulder, J. P. M., Hoogvliet, M. M. C., Jeuken, A. B. M., Van Der Krogt, R. A. A., Van Oostrom, N. G. C., Schelfhout, H. A., Van Velzen, E. H., Van Waveren, H. & De Wit, M. J. M. 2010. Using adaptation tipping points to prepare for climate change and sea level rise: a case study in the Netherlands. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 1, 729-740.

**Luijtelaar**, H. van (2008). Regenwateroverlast in de bebouwde omgeving Inventariserend onderzoek onder gemeenten. In opdracht van Stichting RIONED.

**Ministerie van Volksgezondheid, Welzijn & Sport (VWS)** (2007). Nationaal Hitteplan.

**Pásztor**, A., Bosch, P. (2011). Guideline Vulnerability terminology. KfC report nr 108/2013.

**Sales Ortells** H, Medema G. (2014) Health impact assessment of urban climate change adaptations. Kennis voor Klimaat / KWR / TU Delft

**Seppänen**, O., Fisk W.J., Faulkner, D. (2004). Control of temperature for health and productivity in offices. Report NBNL-55448, [www.osti.gov](http://www.osti.gov).

**Smit**, B., Pilifosova, O., Burton, I., Challenger, B., Huq, S., & Klein, R. (2001). Adaptation to climate change in the context of sustainable development and equity. In McCarthy, J. et al. (eds), Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press.

**Spekkers**, M. H., Ten Veldhuis, J. A. E., Kok, M., & Clemens, F. H. L.R. (2011). Analysis of pluvial flood damage based on data from insurance companies in the Netherlands. In Zenz, G., Hornich, R. (eds), Urban Flood Risk Management Conference (pp. 461–466). Graz (Austria).

**Stone**, K., Daanen, H., Jonkhoff, W., Bosch, P. (2013). Quantifying the sensitivity of our urban systems Impact functions for urban systems Revised version; Knowledge for Climate; Deltares project number: 1202270.008

**Strydom**, N. B., Wyndham, C. H., Williams, C. G., Morrison, J. F., Bredell, G. A. G., Benade, A. J. S., & Von Rahden, M. (1966). Acclimatization to humid heat and the role of physical conditioning. Journal of Applied Physiology, 21(2), 636-642.

**Van der Hoeven**, F., Wandl, A. (2014). Amsterwarm: Mapping the landues, health and energy-efficiency implications of the Amsterdam urban heat island. Building Serv Eng Res Technol.

**Van Hooff**, T., Blocken, B., Hensen, J.L.M., Timmermans, H.J.P. (2014). On the predicted effectiveness of climate adaptation measures for buildings. Building and Environment 82: 300-316

**Veerbeek**, W., Husson, H. (2013). Vulnerability to Climate Change: Appraisal of a vulnerability assessment method in a policy context. KfC report number: 98/2013 (Unesco-IHE OR/MST/177).



### Hoofdstuk 3

**Agentschap NL** (2013). Referentiewoningen nieuwbouw 2013. Agentschap NL, Sittard, the Netherlands.

**Alexandri E., Jones P.,** (2008) Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates, *Building and Environment* 43, 480-493.

**Berghauser Pont & Haupt** (2009). *Spacematrix. Space, Density and Urban Form*. NAI, Rotterdam.

**Bowler, D.E., et al.** (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 2010. 97(3): p. 147-155.

**Brolsma, R.J., Boderie, P., de Graaff, M., Bonte, M., Brand, R., de Wit, J., Hofman, J.** (2013). Combining water and energy supply. Deltares.

**Choi H., Lee W., Byun W.** (2012). Determining the Effect of Green Spaces on Urban Heat Distribution Using Satellite Imagery. *Asian Journal of Atmospheric Environment* Vol. 6-2, 127-135.

**Drost, A.** (2013). Mental maps describing thermal comfort in the urban environment - A GIS methodology to analyse spatial variables defining places of thermal comfort. Master-thesis Centre for Geo-Information. WUR. Supervisors: R. van Lammeren, W. Klemm, et al..

**Echevarría Icaza L., van der Hoeven F., van den Dobbelsteen A.A.F.** (gepland in 2014 a). The Urban Heat Island Effect in Dutch city centres – identifying relevant indicators and first explorations-.

**Echevarría Icaza L., Carter J., Gill S., Butlin T., Van der Hoeven, F.** (gepland in 2014 b). Climate change adaptation in urban areas: enhancing the role of hinterland spaces as 'climate buffers'.

**Errel E., Shashua-Bar L., Pearlmutter D.** (2009). The cooling efficiency of urban landscape strategies in a hot dry climate. *Landscape and Urban Planning* 92, 179-186.

**Gromke CB, Blocken B, Janssen WD, Merema B, van Hooff T, Timmermans HJP.** (2015). CFD analysis of transpirational cooling by vegetation: Case study for specific meteorological conditions during a heat wave in Arnhem, Netherlands. *Building and Environment*. doi:10.1016/j.buildenv.2014.04.022.

**Heusinkveld, B. G., G. J. Steeneveld, et al.** (2014). "Spatial variability of the Rotterdam urban heat island as influenced by urban land use." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*: 2012JD019399.

**Hofman J & Paalman M,** (2014). Rainwater harvesting, a sustainable solution for urban climate adaptation? *Kennis voor Klimaat / KWR*

**Hotkevica, I.** (2013). Green elements in street canyons - Research by design for heat mitigation and thermal comfort in urban areas. Master thesis Landscape Architecture, Wageningen University and Research Centre. Supervisors: Wiebke Klemm, Sanda Lenzholzer, et al..

**Jauregui, E.** (1990). Influence of a large urban park on temperature and convective precipitation in a tropical city. *Energy Build.* 15(16) 457–463.

**Kleerekoper L., van Esch, M., Salcedo, T. B.,** (2012) How to make a city climate-proof, addressing the urban heat island effect, *Resources, Conservation and Recycling*. 64, 30-38.





**Kleerekoper**, L., Dobbelsteen, A.A.J.F. v. d., Bruin-Hordijk, T.D., Dorst, M.J. v. (in review a), "Climate adaptation strategies: Achieving insight in microclimate effects of redevelopment options". Submitted to the Journal of Smart and Sustainable Built Environments.

**Kleerekoper**, L., Taleghani, M., Dobbelsteen, A. A. J. F. v. d., Hordijk, T. D. (in review b), "Urban measures for hot weather conditions in the Netherlands: an extensive theoretical comparative study". Submitted to Solar Energy.

**Kleerekoper**, L., (in voorbereiding). Climate adaptation measures in specific Dutch neighbourhood typologies. Thesis Chapter 6, TU Delft.

**Klemm**, W., Lenzholzer, S., Heusinkveld, B., Hove, B. van (2013a). Towards green design guidelines for thermally comfortable streets. In PLEA 2013.

**Klemm**, W., Heusinkveld, B., Lenzholzer, S., Hove, B.v. (2013b). Thermal and perceived impact of urban green on thermal comfort on warm summer days in Utrecht, The Netherlands.  
[http://www.regklam.de/ccrr-2013/programme-contents/parallel-session-2/?tx\\_sbtabs\\_pi1\[tab\]=315](http://www.regklam.de/ccrr-2013/programme-contents/parallel-session-2/?tx_sbtabs_pi1[tab]=315).  
Geraadpleegd op 21-09-2013.

**Klemm**, W.; Heusinkveld, B. G.; Lenzholzer, S.; Jacobs, M. H.; Van Hove, B. (2014a). "Psychological and physical impact of urban green spaces on outdoor thermal comfort during summertime in the Netherlands." Building and Environment 82.

**Klemm**, W., Lenzholzer, S., Heusinkveld, B., Hove, B. van (2014b, in review). Street greenery and its physical and psychological impact on thermal comfort. Landscape and Urban Planning.

**KNMI** (2014). KNMI weather data. Available from:  
[http://www.knmi.nl/climatology/daily\\_data/download.html](http://www.knmi.nl/climatology/daily_data/download.html) (accessed 28-01-2014).

**Montazeri** H., Blocken B., Hensen J.L.M. (2015). Evaporative cooling by water spray systems: CFD simulation, experimental validation and sensitivity analysis. Building and Environment.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.022>.

**Nikolopoulou**, M. and K. Steemers (2003). "Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces." Energy and Buildings 35(1): 95-101.

**Sailor**, D.J. (1995). Simulated Urban Climate response to modification in surface albedo and vegetative cover. Journal of applied meteorology 34 (7) 1694-1704.

**Sales Ortells**, H., Medema, G. (2014). Health impact assessment of urban climate change adaptations. Kennis voor Klimaat / KWR / TU Delft

**Sureshkumar**, R., Kale, S.R., Dhar, P.L. (2008). Heat and mass transfer processes between a water spray and ambient air- I. Experimental data. Applied Thermal Engineering 28: 349-360.

**Taha** H., Akbari H., Rosenfeld A.H. and Huand Y.J. (1988). Residential cooling loads and the urban heat island. The effects of albedo. Building and Environment 23. 271-283.

**Van de Ven**, F., E. Luyendijk, M. de Gunst, E. Tromp, M. Schilt, L. Krol, B. Gersonius, C. Vlaming, L. Valkenburg, R. Peeters (2009). Waterrobuust Bouwen; de kracht van kwetsbaarheid in een duurzaam ontwerp. SBR Artikelnr 604.08 Beter Bouw- en Woonrijp Maken / SBR, Rotterdam, ISBN 9789053674963



**Van Hooff**, T., Blocken, B., Hensen, J.L.M., Timmermans, H.J.P. (2014). On the predicted effectiveness of climate adaptation measures for buildings. *Building and Environment* 82: 300-316.

**Van Leeuwen**, E., W. Schuurmans (2014). 3Di- techniek en mogelijkheden van een geïntegreerd omgevingsmodel voor water in de stad. In: RIONED, 2014. Ervaringen met de aanpak van regenwateroverlast in gebouwd gebied, voorbeelden en ontwikkelingen anno 2014. RIONED reeks 18.

**Vergroesen**, T., Brolsma, R., Tollenaar, D. (2013). Verwerking van extreme neerslag in stedelijk gebied. Deltares report 1202270-009.

**Wong** N.H., Kwang Tan, AY (2010). Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Building and Environment* 45, 663-672.

## Hoofdstuk 4

**Boonstra**, B., Vogel, R. en Slob, A. (2014). Van organisch ontwikkelen naar organisch organiseren – lessen over zelforganisatie uit Almere. In: G. Bouma, E. Vanempen, C. Uitenbroek (eds.), *Regie en loslaten. Bijdragen aan de Plandag 2014*. BNSP en VRP.

**Boonstra**, B. (2013). Co-housing as self-organization in spatial development: mapping the trajectories of becoming of four Danish co-housing initiatives. Paper presented at the 11th meeting AESOP's thematic group on Complexity & Planning – Self-organization and spatial planning: in-depth analysis. Aveiro, 2-3 May 2013

**Boonstra**, B. & L. Boelens (2011). Self-organization in urban development: towards a new perspective on spatial planning. *Urban Research & Practice*, Vol.4(2): 99-122.

**Boonstra**, B. & M. Specht (2012). The Appropriated City: self-organization as rehearsal spaces for future urban governance, the case of Rotterdam. Paper presented at the 'Spatial Planning in Transition' Conference, Ministry of Infrastructure and Environment, 6th November 2012, The Hague.

**Chao-Duivis**, M.A.B., & Wamelink, J.W.F. (2013). 'Juridische aspecten van ketensamenwerking, naar een multidisciplinaire benadering', Den Haag: Instituut voor Bouwrecht.

**Gersonius**, B., Nasruddin, F., Ashley, R., Jeuken, A., Pathirana, A. & Zevenbergen, C. (2012) Developing the evidence base for mainstreaming adaptation of stormwater systems to climate change. *Water Research*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2012.03.060>

**Hartmann**, T. & T. Spit, (2014), Capacity Building for Integrating Climate Adaptation into Urban Planning Processes: the Dutch Experience. *American Journal of Climate Change*. (forthcoming).

**Heurkens**, E. (2012). Private Sector-Led Urban Development Projects: Management, Partnerships and Effects in the Netherlands and the UK Delft: TU Delft.

**Janssen-Jansen**, L., Lloyd, G., Peel, D., & van der Krabben, E. (2012). Planning in an Environment Without Growth. Invited essay for the Raad voor de leefomgeving en infrastructuur [Dutch Council for Living Environment and Infrastructure]. The Netherlands: Raad voor de leefomgeving en infrastructuur (Rli)

**Kabat**, P., W. van Vierssen, J. Veraart, P. Vellinga & J. Aerts (2005). Climate proofing the Netherlands. *Nature*, Vol. 438(7066): 283-284.



- Offerman, R., & van de Velde, D. (2004).** Value Capturing: potentieel financieringsinstrument voor Nederland? [Value Capturing: a potential financial instrument for the Netherlands?]. In E. U. Rotterdam (Ed.). Rotterdam: Erasmus University.
- Roders, M., Straub, A. & Visscher, H. (2012a)** 'Awareness of climate change adaptations among Dutch housing associations', *Open House International*, 37(4), pp. 61–71.
- Roders, M., Straub, A. & Gruis, V. (2012b)** 'Interpersonal aspects of partnering in housing renovation', in Michell, K., Bowen, P., and Cathell, K. (eds.) *Delivering value to the community*. Cape Town: University of Cape Town, pp. 180–186.
- Roders, M., Straub, A. and Visscher, H. (2013)** 'Evaluation of climate change adaptations by Dutch housing associations', *Structural Survey*, 31(4), pp. 267–282. doi: 10.1108/SS-01-2013-0009.
- Roders, M., Straub, A. and Visscher, H. (2014).** Assessment of the likelihood of implementation strategies for climate change adaptation measures in Dutch social housing. *Building and Environment*.
- Roders, M., Straub, A. and Gruis, V. (In voorbereiding)** 'Lessons from partnering in housing refurbishment and implications for policymaking'.
- Root, L., E. van der Krabben & T. Spit (2014),** Bridging the Financial Gap in Climate Adaptation: Dutch Planning and Land Development Through a New Institutional Lens. *Journal of Environment Planning and Management*.
- Root, L. E. van der Krabben & T. Spit (gepland).** Between Structures and Norms: Assessing Tax Increment Financing for the Dutch Spatial Planning Toolkit. *Town Planning Review*.
- Savini, F., Salet, W., & Majoor, S. (2014).** Dilemmas of planning: intervention, regulation, and investment. *Planning Theory*, 1473095214531430.
- Spit, T. & A. Kokx † (2015),** Tracing Climate Adaptation in a Hard Planning Process. The Dutch experience. In: Edward Ng & Chao Ren (2014) *The Urban Climatic Map for Sustainable Urban Planning*. London: Routledge: Taylor & Francis Group. (forthcoming)
- Squires, G. (2012).** 'Dear Prudence': an overview of tax increment financing. *Journal of Urban Regeneration and Renewal*, 5(4), 1-12.
- Stern, N. (2006).** The Economics of Climate Change. The Stern Review. Cambridge: Cambridge University Press.
- Uittenbroek, C.J., Janssen-Jansen, L.B., Runhaar H.A.C. (2013)** Mainstreaming climate adaptation into urban planning: overcoming barriers, seizing opportunities and evaluating the results in two Dutch case studies. *Regional Environmental Change*. Vol. 13, No. 2, pp. 399-411.
- Uittenbroek, C.J., Janssen-Jansen, L.B., Spit, T.J.M., Salet, W.G.M., Runhaar H.A.C. (2014a)** Political commitment in organizing municipal responses to climate adaptation: the dedicated approach versus the mainstreaming approach. *Environmental Politics*. DOI:10.1080/09644016.2014.920563
- Uittenbroek, C.J., Janssen-Jansen, L.B., Spit, T.J.M., Runhaar H.A.C. (2014b)** Organizational values and the implications for mainstreaming climate adaptation in Dutch municipalities: Using Q methodology. *Journal of Water and Climate Change*. DOI:10.2166/wcc.2014.048



**Uittenbroek, C.J., Janssen-Jansen, L.B., Runhaar, H.A.C. (submitted)** Stimuli for municipal responses to climate adaptation: insights from Philadelphia – an early adapter. *Submitted in June 2014.*

**Uittenbroek, C.J. (in review)** Organizational barriers and the implications for mainstreaming climate adaptation in urban planning processes. *Resubmitted in May 2014.*

**Van der Krabben, E., and H. Jacobs.** 2013. “Public Land Development as a Strategic Tool for Redevelopment: Reflections on the Dutch Experience.” *Land Use Policy* 30 (1): 774–783.

**Van Herk, S., Kelder, E.T.G., Bax, J.H., Gersonius, B en Hulsebosch, M. (2012),** Meekoppelmethode voor het klimaatbestendig maken van bestaand stedelijk gebied, Pilot: Wielwijk Klimaatbestendig, MARE.

**Van Meerkerk, I. van, Boonstra, B. and Edelenbos, J. (2013),** Self-organization in urban regeneration – a two case comparative research, *European Planning Studies*, 21:10, 1630-1652

**Watkiss, P. (ed) (2011).** The ClimateCost Project. Final Report. Volume 1: Europe. Published by the Stockholm Environment Institute, Sweden. ISBN 978-91-86125-35-6.

## Hoofdstuk 5

**Bosch, P. (2014).** Guideline Effectiveness of Adaptation Measures. KfC report

**Döpp, S., Bosch, P. (2011).** Climate Proof Cities: an integrated research framework, KfC report 109/2013.

**Gemeente Rotterdam (2013).** Rotterdamse adaptatiestrategie.

**Groot A.M.E., et al. (2015).** Integration in urban climate adaptation: Lessons from Rotterdam on integration between scientific disciplines and integration between scientific and stakeholder knowledge, *Building and Environment* 83, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.07.023>.

**Hotkevica, I. (2013).** Green elements in street canyons - Research by design for heat mitigation and thermal comfort in urban areas. Master thesis Landscape Architecture, Wageningen University and Research Centre. Supervisors: Wiebke Klemm, Sanda Lenzholzer, et al..

**KNMI (2014).** KNMI'14-klimaatscenario's voor Nederland; Leidraad voor professionals in klimaatdaptatie, KNMI, De Bilt, 34pp.

**Passtor, A., Bosch, P. (2011).** Guideline Vulnerability terminology, KfC report 108/2013.

**Toparlar, Y., Blocken, B., Vos, P., van Heijst, G.J.F., Janssen, W.D., van Hooff, T., Montazeri, H., Timmermans, H.J.P. (2014).** CFD simulation and validation of urban microclimate: A case study for Bergpolder Zuid, Rotterdam. *Building and Environment* 82.

**Van der Hoeven, F., Wandl, A. (2014).** Amsterwarm: Mapping the landues, health and energy-efficiency implications of the Amsterdam urban heat island. *Building Serv Eng Res Technol*.

**Van Hooff, T., Blocken, B., Hensen, J.L.M., Timmermans, H.J.P. (2014).** On the predicted effectiveness of climate adaptation measures for buildings. *Building and Environment* 82: 300-316

**Veerbeek, W. Husson, H. (2013).** Vulnerability to Climate Change: Appraisal of a vulnerability assessment method in a policy context. KfC report number: 98/2013 (Unesco-IHE OR/MST/177).



**Vergroessen, T.** (2013). Afvoer in stedelijk gebied. Deltares, presentatie.

## Bijlagen

**Baranowska M., Gabryl B.** (1981). Biometeorological norms as tolerance interval of man to weather stimuli. *Int J Biometeorol* 25:123–126.

**Bröde, P. & D. Fiala, K. Błażejczyk, I. Holmér, G. Jendritzky, B. Kampmann, B. Tinz, G. Havenith** (2012). Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *Int J Biometeorol* (2012) 56:481–494. DOI 10.1007/s00484-011-0454-1.

**Höppe, P.** (1999). The physiological equivalent temperature—a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *Int J Biometeorol* 43:71–75.

**Matzarakis, A. & Amelung, B.** 2008. Physiological Equivalent temperature as indicator for impacts of climate change on thermal comfort of humans. *Seasonal Forecasts, Climatic Change and Human Health*. Springer.



## Bijlage C Thermisch comfort en indicatoren

De gevoelstemperatuur (d.i. de temperatuur die de mens ervaart) verschilt van de werkelijke luchttemperatuur. Dit verschil heeft te maken met de energiehuishouding van ons lichaam. Net als ieder zoogdier is de mens warmbloedig. Bij het metabolisme in ons lichaam komt energie vrij in de vorm van warmte. In rust produceert een mens hierdoor ongeveer 80-100 W, terwijl bij inspanning zoals sporten dit op kan lopen tot 900 W. Bovendien ontvangt het lichaam –als we ons in de zon begeven– ook kortgolvlige straling. Het lichaam kan die energie op drie manieren afvoeren:

- door warmtetransport naar de lucht rond het lichaam (zolang de lucht kouder is dan het lichaam);
- door het verdampen van zweet (de latente warmte die daarvoor nodig is wordt onttrokken aan het lichaam);
- door het uitstralen van extra langgolvlige straling (door een verhoging van de lichaamstemperatuur);

De gevoelstemperatuur wordt dus bepaald door de energie-uitwisseling met de omgeving. En die hangt af van een aantal meteorologische factoren:

- de luchttemperatuur (temperatuurverschil tussen lichaam en omgeving)
- de luchtvochtigheid
- de windsnelheid (bepalend voor uitwisseling van zowel warmte als waterdamp tussen lichaam en omgeving);
- de hoeveelheid directe straling van de zon.

Wanneer de luchttemperatuur veel lager is dan de lichaamstemperatuur kan het gebeuren dat er meer energie wordt afgevoerd dan het lichaam zelf produceert: het lichaam koelt dan af en krijgt het koud. Wanneer de luchttemperatuur hoog is en verdamping van zweet niet voldoende energie aan het lichaam onttrekt, kan het lichaam zijn energie maar moeilijk kwijt en dan kan oververhitting het gevolg zijn.

De gevoelstemperatuur hangt echter niet alleen af van bovenstaande fysische factoren, maar ook van fysiologische factoren (mate van inspanning, gezondheid, leeftijd), gedrag (kleding, werktijden etc.) en psychologische factoren (bijvoorbeeld: gewenning aan warmte/koude, temperatuurervaring in voorgaande periode, invloed van de omgeving).

Er zijn wereldwijd veel verschillende indicatoren voor het ervaren 'thermisch comfort' door de mens ontwikkeld waarbij de nadruk vooralsnog ligt op de fysische factoren. Grofweg kan onderscheid worden gemaakt tussen directe en indirecte indicatoren. De directe indicatoren voor thermische comfort worden m.b.v. experimentele relaties berekend uit gegevens voor de luchttemperatuur, luchtvochtigheid en windsnelheid. De indirecte indicatoren zijn gebaseerd op de energiebalans van het menselijk lichaam. Modellen ("tools") zijn ontwikkeld om deze indicatoren te berekenen.

Binnen het CPC onderzoek zijn 4 indicatoren gebruikt:

### *'Effective Temperature'*

De Effectieve Temperatuur (ET) is een directe maat voor thermisch comfort die met behulp van een experimentele relatie wordt berekend uit luchttemperatuur, luchtvochtigheid en windsnelheid. De mens ervaart meer warmtestress bij een ET-waarde groter dan 21 °C (bron: Baranowska en Gabryl, 1981).



### 'Approximated Wet Bulb Globe Temperature'

De 'Approximated Wet Bulb Globe Temperature' (AWBGT) is een vereenvoudigde 'Wet Bulb Globe Temperature' (WBGT) (Bureau of Meteorology, Australian government). Het is een directe indicator die is gebaseerd op luchttemperatuur, luchtvochtigheid en windsnelheid. Hittestress wordt ervaren indien  $AWBGT > 27,5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 'Physiologically Equivalent Temperature'

'Physiologically Equivalent Temperature' (PET) is een indirecte indicator die is gebaseerd op de warmtebalans van het menselijk lichaam (Höppe 1999). PET wordt berekend op basis van fysische en fysiologische factoren. In het CPC onderzoek zijn de berekeningen uitgevoerd met het Raymann model voor een standaard persoon: een gezonde man van 35 jaar, met een gewicht van 75 kg en lengte van 1.75m, met een kleedfactor van 0.9, die licht werk uitvoert (80 W).

In gematigde klimaatstreken ervaren mensen matige tot sterke hittestress bij een  $PET > 23 \text{ }^\circ$ .

Tabel C.1. PET als indicator voor menselijk comfort (Matzarakis en Amelung, 2008)

PET	Thermal perception	Grade of physiological stress
4°C	Very cold	Extreme cold stress
8°C	Cold	Strong cold stress
13°C	Cool	Moderate cold stress
18°C	Slightly cool	Slight cold stress
23°C	Comfortable	No thermal stress
29°C	Slightly warm	Slight heat stress
35°C	Warm	Moderate heat stress
41°C	Hot	Strong heat stress
	Very hot	Extreme heat stress

### 'Universal Thermal Climate Index'

Recent is in het kader van een COST actie van de EU (COST 730) een nieuwe (indirecte) indicator ontwikkeld, de 'Universal Thermal Climate Index' (UTCI) ([www.utci.org](http://www.utci.org)). De UTCI is vergelijkbaar met de PET, met een 10 punten schaal van extreme hittestress tot extreme koude stress (Tabel C.2).

Table C.2 UTCI equivalent temperature ranges and perceived thermal stress (source: Bröde et al. 2012).

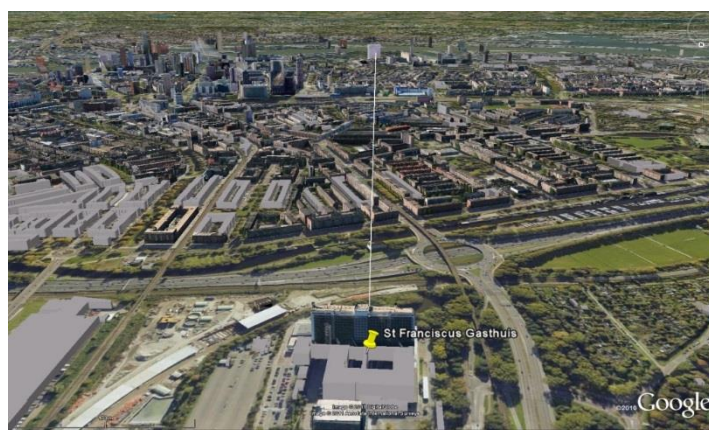
UTCI range (°C)	Stress categorie
Above +46	Extreme hittestress
+38 to +46	Zeer ernstige hittestress
+32 to +38	Ernstige hittestress
+26 to +32	Gematigde hittestress
+9 to +26	Geen thermische stress
+9 to 0	Matige koudestress
0 to -13	Gematigde koudestress
-13 to -27	Ernstige koudestress
-27 to -40	Zeer ernstige koudestress
Below -40	Extreme koudestress



## Bijlage D Warmteuitwisseling van het stedelijk gebied met de atmosfeer

Binnen CPC is ook onderzoek uitgevoerd om de energiebalans van de stad beter in beeld te brengen door middel van inzicht in fluxen (Jacobs et al., 2014). Ook zijn deze gegevens gebruikt om de modellen te valideren. Het onderzoek heeft zijn nut bewezen door extra input/berekeningsmethode te bieden voor verdamping (zie hoofdstuk 1.2.3).

Het meten van turbulente fluxen over een complex landschap als een stad met zijn extreme topografie is een enorme uitdaging. De 'Large Aperture Scintillometer' (LAS)<sup>31</sup> (LAS) biedt voor deze toepassing grote voordelen. De metingen worden geïntegreerd over een groot gebied dat overeenkomt met de schaal van de stad zelf. Vanaf eind mei 2011 meet een LAS continu de warmteuitwisseling van het stedelijk gebied van Rotterdam met de atmosferische grenslaag (Urban Boundary Layer) tussen het Sint Franciscus Gasthuis en het Erasmus MC (**Figuur D.1**).



*Figuur D.1 Scintillometerpad tussen het Sint Franciscus Gasthuis en het Erasmus MC in Rotterdam. NB: Sint Franciscus Gasthuis Lat/Lon 51.56478/4.27747, hoogte 51 m), Erasmus MC (Lat/Lon 51.54632/4.28128, hoogte 77 m). De afstand tussen zender en ontvanger is 3451 m, oriëntatie ~180°.*

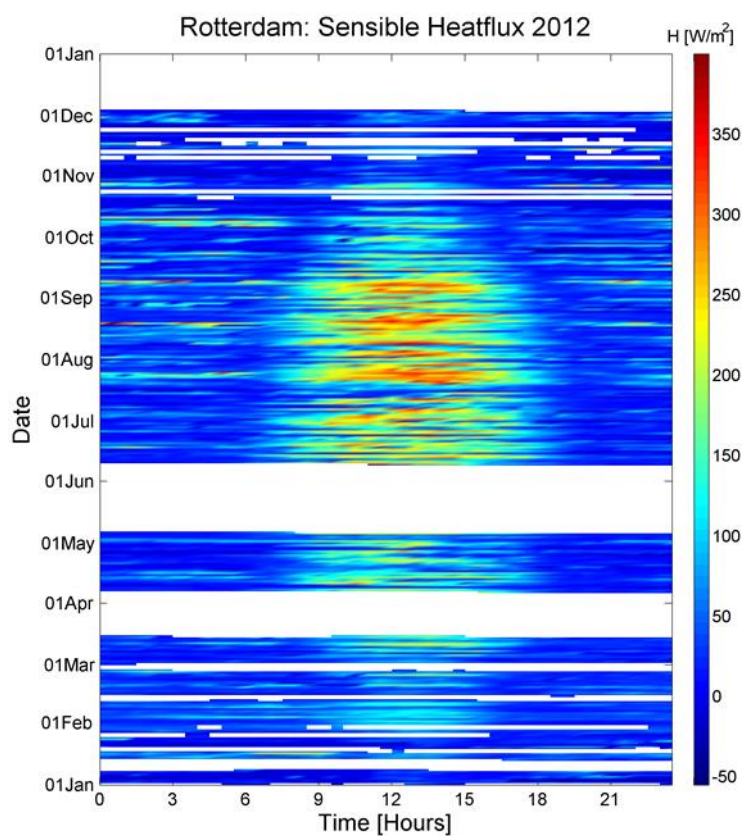
Met de scintillometer kan een thermisch comfort parameter worden afgeleid die geldt voor de schaal van de gehele stad. Ter illustratie hiervan toont **Figuur D.2** een seizoenoverzicht van de voelbare warmteflux voor het jaar 2012.

Op de x-as is de dagelijkse gang weergegeven, op de y-as de dagen. De kleurcodes geven de warmteflux weer. Een positieve warmteflux is gedefinieerd als een warmteflux van het oppervlak naar de atmosfeer. Te zien valt dat in de winter de fluxen overdag laag zijn ( $50-100 \text{ W m}^{-2}$ ). In de zomer springen de zonnigste periodes eruit als die met de hoogste lokaal gegenereerde warmteflux. Verder valt op dat de fluxen ook 's nachts vaak positief blijven. Dit is een gevolg van de overdag opgeslagen warmte in steenmassa die 's nachts weer vrij komt in combinatie met de relatief korte nachten die we kennen op onze breedtegraad.

Meer onderzoek is nodig om te kijken hoe deze warmtemaat (het is geen index) zich verhoudt tot de luchttemperatuur en thermisch comfort.

<sup>31</sup> Het trillen van de lucht boven een hete asfaltweg is een voorbeeld van een fenomeen dat scintillatie heet. Dit verschijnsel wordt veroorzaakt door dichtheidsverschillen in de lucht ten gevolge van het turbulente transport (transport door wervels) van warmte en vocht. Een scintillometer is een meetinstrument bestaande uit een zender en een ontvanger dat de intensiteit van deze luchttrillingen registreert om hieruit, indirect, oppervlaktefluxen te kunnen bepalen over afstanden van 100 m tot 10 km.





Figuur D.2 Seizoen overzicht de scintillometer warmteflux voor Rotterdam over het jaar 2012. NB: In 2012 zijn er gedurende 2 periodes problemen geweest met het modem waardoor er een aantal weken in de maanden april en mei data verloren is gegaan.

