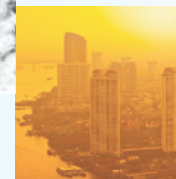
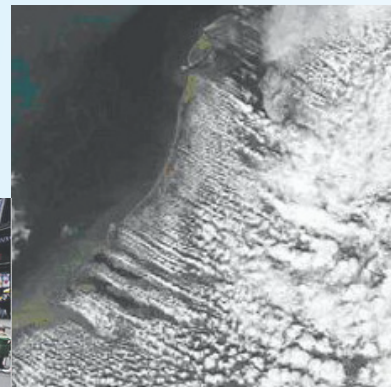


Hitte in de stad

Rekenen aan stedelijke hitte



Leander Timmer
Peter Visser
7 juni 2012
Afstudeerscriptie
Versie: Definitief

Colofon

Titel

Hitte in de stad

Ondertitel

Rekenen aan stedelijke hitte

Auteurs

Leander Timmer 0809207
leandertimmer@hotmail.com

Peter Visser 0826502
petervisser1990@hotmail.com

Afstudeercommissie

Maarten Schäffner *bedrijfsbegeleider, Witteveen+Bos*
Michaël Meijer *1e lezer, Hogeschool Rotterdam*
Rob te Grotehuis *2e lezer, Hogeschool Rotterdam*
Stef van der Gaag *extern deskundige, Urbis*

Datum

7 juni 2012

Plaats

Rotterdam

Opdrachtgevers

Witteveen+Bos
Initiatief & Haalbaarheid
van Twickelostraat 2
7400 EA Deventer



Hogeschool Rotterdam
Ruimtelijke Ordening & Planologie
G.J. de Jongweg 4-6
3015 GG Rotterdam



Voorwoord

Deze scriptie is tot stand gekomen in het kader van onze afstudeeropdracht bij het ingenieursbureau Witteveen+Bos. De opdracht is uitgevoerd ter afsluiting van onze studie Ruimtelijke Ordening & Planologie aan de Hogeschool Rotterdam. De scriptie is bestemd voor de afstudeercommissie en overige geïnteresseerden.

Dit rapport heeft als doel de afstudeercommissie een beeld te geven van de verworven kennis en gemaakte producten tijdens het afstudeertraject. Daarnaast kan dit rapport dienst doen als kennisdocument voor opdrachtgevers van Witteveen+Bos.

Onze dank gaat uit naar onze bedrijfsbegeleider Maarten Schöffner, onze begeleider vanuit de Hogeschool, Michaël Meijer en overige betrokkenen die input hebben geleverd voor de tot standkoming van dit product.

Rotterdam, 7 juni 2012, Leander Timmer en Peter Visser

Begrippen

Achtergrondtemperatuur	Term gebruikt om de luchttemperatuur van het landelijke gebied uit te drukken (ook wel omgevingstemperatuur)
Albedo	Een maatstaf voor het reflecterend vermogen van een materiaal, afhankelijk van kleur en/ of samenstelling ^I
Antropogene warmtebronnen	Warmtebronnen die door de mensen veroorzaakt worden, zoals verkeer, energieverbruik, industrie.
Emissiviteit	Het vermogen van een materiaalsoort om warmte te absorberen, afhankelijk van kleur en/ of samenstelling ^{II}
Gevoelstemperatuur	De temperatuur die ervaren wordt door een individu, afhankelijk van individuele- en omgevingsfactoren
Hittecentrum	De locatie in een stad waar het stedelijk hitte eiland het hoogst is
Hittestress	Het bereiken van een gevoelstemperatuur die schadelijk is voor de gezondheid en/ of het functioneren van een individu
Hoogte-breedte ratio	De hoogte van een straat (bepaald door de gebouwen die er langs staan) gedeeld door de breedte van de straat
Luchttemperatuur	De temperatuur van de lucht, gemeten op 1,5 meter hoogte
Omgevingsadressendichtheid (oad)	Het aantal adressen binnen een cirkel met een straal van één kilometer rondom een adres, gedeeld door de oppervlakte van de cirkel. Deze dichtheid beoogt de mate van concentratie van menselijke activiteiten (wonen, werken, schoolgaan, winkelen, uitgaan etc.) ^{III}

I. Nijhuis, I. & Streng, J. (2011). *Hittestress in Rotterdam, Kennis voor Klimaat Rapport*. Alterra Wageningen UR & Climate Proof Cities Consortium, p. 37
II. Nijhuis, I. & Streng, J. (2011). *Hittestress in Rotterdam, Kennis voor Klimaat Rapport*. Alterra Wageningen UR & Climate Proof Cities Consortium. p. 37
III. Centraal Bureau voor de Statistiek. <http://www.cbs.nl/nl-NL/menu/methoden/begrippen/default.htm?conceptid=499>, geraadpleegd op 29 mei 2012

Begrippen

Oppervlaktetemperatuur (SHI)	De temperatuur van een bepaald oppervlak (Surface Heat Island)
Oversterfte	Het aantal extra sterfgevallen, binnen een bepaalde tijdseenheid, die afwijkt van de norm in voorgaande jaren (ook wel 'extra sterfte')
Ruraal gebied	Een rastervierkant van 1 bij 1 kilometer wordt tot ruraal gebied gerekend als de adresdichtheid minder dan 1000 adressen bevat ^{IV}
Stedelijke hitte	Stedelijke hitte is de extra hitte die ontstaat doordat de gebouwde omgeving in de stad niet alle straling van de zon terugkaatst of verwerkt maar opslaat en later uitstraalt
Stedelijk hitte eiland (SHE)	Het verschil in luchttemperatuur tussen een urbaan en ruraal gebied
Sky view factor	Vermogen van een bepaald punt in de stad om de hemel te 'aanschouwen'. Hoe meer deze 'luchtschouw' verhinderd wordt door bebouwing e.d. hoe kleiner de sky view factor
Thermisch comfort	Toestand die de tevredenheid met de thermische omgeving uitdrukt ^V
Urbaan gebied	Een rastervierkant van 1 bij 1 kilometer wordt tot urbaan gebied gerekend als de adresdichtheid 1500 of meer adressen bevat ^{VI}

IV. Centraal Bureau voor de Statistiek. <http://www.cbs.nl/nl-NL/menu/methoden/begrippen/default.htm?conceptid=2377>, geraadpleegd op 14 maart 2012

V. A. Jacobs (2009). *Presentatie over thermisch comfort*, pagina 5

VI. Centraal Bureau voor de Statistiek. <http://www.cbs.nl/nl-NL/menu/methoden/begrippen/default.htm?conceptid=2384>, geraadpleegd op 28 februari 2012

Samenvatting

1. Inleiding

Binnen het ingenieursbureau Witteveen+Bos is interesse naar een afstudeeropdracht waarbij enerzijds literatuuronderzoek gedaan wordt naar stedelijke hitte en anderzijds gewerkt wordt AAN rekenmodellen om de kans op stedelijk hitte in te schatten en de oorzaken hiervan bloot te leggen. Om Witteveen+Bos meer inzicht te geven in dit thema en omdat het bedrijf dit onderwerp wil gaan integreren in zijn advieswerk, is deze afstudeeropdracht ontstaan.

Doelstelling

Het verzamelen en produceren van kennis omtrend het thema stedelijke hitte, in de vorm van literatuurstudies en het maken rekenmodellen, in een tijdsbestek van zeventien weken.

Onderzoeksvraag

In hoeverre is stedelijke hitte inzichtelijk en berekenbaar te maken?

2. Literatuurstudie

Stedelijke hitte is een gevolg van het feit dat de zon het stedelijke oppervlak opwarmt. Doordat verharde oppervlaktes in een stad (denk aan wegen, daken, gebouwen) vaak bestaan uit materialen die warmte absorberen, wordt straling van de zon tijdelijk opgeslagen. Doordat deze opgeslagen warmte op een later moment weer vrij komt wordt de lucht extra opgewarmd. Deze extra opwarming van de lucht, in een stad, wordt stedelijke hitte genoemd.

Om stedelijke hitte specifiek te maken wordt er in deze scriptie gebruik gemaakt van de begrippen stedelijk hitte eiland (SHE) en hittestress.

Hittestress

In dit document wordt een definitie van hittestress gehanteerd waarbij de gezondheid en het functioneren van de mens centraal staat (ook wel lichamelijke hittestress genoemd): het bereiken van een gevoelstemperatuur die schadelijk is voor de gezondheid en/ of het functioneren van een individu.

Stedelijk hitte eiland

Het SHE wordt als volgt gedefinieerd: het luchttemperatuurverschil van een stedelijk gebied ten opzichte van het landelijke gebied daaromheen. Een verschil in luchttemperatuur boven een bebouwd en onbebouwd gebied komt in principe voor boven elke bebouwde omgeving (dan spreekt men over een hitte eiland). Het verschil met het SHE is dat dit temperatuurverschil in de zomer voor problemen zorgt (denk aan hittesterte, beroertes). Het SHE komt in principe op elk moment van het jaar voor, maar verschilt per stad en per situatie (denk aan weersomstandigheden e.d.). Het is waarschijnlijk dat opwarming van het klimaat leidt tot meer doden ten gevolge van hitte in de zomer, daarom is het noodzakelijk om hittedregerende maatregelen toe te passen. Tegelijkertijd zal de sterfte in de winter afnemen, aangezien de koude gerelateerde sterfte in de winter veel hoger is dan hittedregerende sterfte in de zomer.

Gevolgen

Uit data van het CBS blijkt dat er een sterke relatie is tussen sterfte en hoge temperaturen, zo was juli 2006 één van de warmste maanden sinds jaren en bedroeg de oversterfte rond de 1000 personen. Naast sterfte heeft hitte een negatief effect op thermisch comfort, slaapkwaliteit, slaapkwantiteit, arbeidsproductiviteit en verkeersveiligheid.

Naast gevolgen op het gebied van gezondheid heeft stedelijke hitte ook gevolgen voor energiegebruik en brengt het SHE risico's met zich mee voor het functioneren van materialen als staal en hout. Deze laatste twee materialen zetten bijvoorbeeld uit als het warmer wordt waardoor bepaalde problemen kunnen ontstaan (denk bijvoorbeeld aan het uitzetten van treinsporen of het vergroten van de kans op brand).

Oplossingen

Bij het kijken naar reductiemaatregelen voor stedelijke hitte is op drie schaalniveaus gekeken (stadsniveau, wijkniveau en straatniveau). Omdat geen enkele stad exact vergelijkbaar is met een andere en voor elke stad weer andere combinaties aan oorzaken voor het SHE gelden, blijft aanbevelingen doen maatwerk. In zijn algemeenheid zijn de volgende oplossingen vrijwel altijd toepasbaar:

1. Het toevoegen van meer groen;
2. Het toevoegen van meer water;
3. Het toepassen van materialen met meer weerkaatsingsvermogen;
4. Het toepassen van materialen met minder absorptievermogen.

Stadsspecifieke oplossingen kunnen zijn:

- Het autoluw maken van binnensteden;
- Het inrichten van straten met een juiste H-W ratio;
- Windgericht ontwerpen (het vermijden van hoogbouw aan de rand van de stad);
- Het vermijden van woonfuncties voor ouderen uit het hittecentrum.

3. Rekenmodellen

Stedelijke hitte is vanuit verschillende schaalniveaus te benaderen, vanwege datagebrek op stedelijk niveau is er alleen gewerkt aan rekenmodellen op wijk- en straatniveau. Daarnaast wordt er niet gerekend aan hittestress (gevoelstemperatuur), maar aan oppervlaktetemperatuur (SHI) en luchttemperatuur. Met de gevonden data uit de literatuurstudie zijn twee rekenmodellen gevormd, één model is op buurtniveau toepasbaar en het andere model is op straatniveau toepasbaar.

Rekenmodel 1 (buurtniveau)

Beleidsmakers die op buurtniveau werkzaam zijn kunnen met rekenmodel 1 aan de hand van een aantal basisgegevens inzicht krijgen in de kans op hittegevoeligheid. Het Excel-model is gebaseerd op vijftien satellietbeelden van 57 Rotterdamse wijken uit verschillende jaren (1987 tot en met 2007) en geven de oppervlaktetemperaturen van 12 uur in de middag weer. Deze oppervlaktetemperaturen zijn per buurt gekoppeld aan verschillende ruimtelijke factoren, demografische factoren en materiaaleigenschappen. Voor het rekenmodel moeten de volgende factoren worden ingevoerd: percentage verhard oppervlak, het percentage groen oppervlak, percentage bebouwing oppervlak en de omgevingsadressendichtheid)

Rekenmodel 1 maakt het mogelijk om aan de hand van de bovenstaande factoren een indicatie van een buurt te geven of deze hittegevoelig is of niet. Het model maakt ook inzichtelijk waar de hitte door veroorzaakt wordt zit en welke factoren verlaagd moeten worden om de hitte te verminderen.

Rekenmodel 2 (straatniveau)

Met rekenmodel 2 kan men het verschil in luchttemperatuur tussen een bepaald stedelijk oppervlak en het buitengebied (achtergrondtemperatuur), rond 12 uur in de middag, berekenen. Het model is gebaseerd op het landgebruik (wegen, groen, woningen) van de desbetreffende locatie en maakt gebruik van verschillende cellen die het stedelijk oppervlak vertegenwoordigen. Elke cel heeft een bepaalde waarde, die afgeleid is uit een rapport van UNESCO-IHE (i.s.m. Deltares, Kennis voor Klimaat en Klimaat voor Ruimte) waar uit satellietbeelden van Rotterdam per soort

landgebruik een gemiddelde luchttemperatuur is bepaald.

De waarde van elke cel wordt in een formule (bedacht door Tygron, ontwikkelaar klimaat simulatiespellen) geplaatst waarin de luchttemperatuur van het buitengebied en een SHE-compensatiefactor een rol spelen (deze laatste factor is afgeleid uit een adviesrapport van adviesbureau VITO voor gemeente Tilburg over stedelijk hitte, waarin een formule staat die de relatie tussen oppervlaktetemperatuur en luchttemperatuur beschrijft). Uit de formule komt per cel een getal rollen. Het model telt alle cellen op en deelt ze door het aantal cellen zodat de gemiddelde luchttemperatuur wordt berekend.

Op deze manier wordt het verschil in luchttemperatuur voor overdag (rond 12 uur in de middag) weergegeven. De effecten van wind en schaduw zijn niet meegenomen in dit model.

4. Conclusie & Aanbevelingen

Conclusie

Stedelijke hitte enerzijds door middel van de twee rekenmodellen berekenbaar te maken is. Met deze modellen kan Witteveen+Bos zijn opdrachtgevers adviseren omtrent:

- de kans op stedelijke hitte (model 1);
- de mate van stedelijke hitte (model 2);
- effect van veranderingen in het stedelijk landgebruik (beide modellen).

Daarnaast is stedelijke hitte ook inzichtelijk te maken doordat in dit document verschillende oorzaken, gevolgen en oplossingen beschreven worden die deels wetenschappelijk zijn onderbouwd.

Anderzijds is de koppeling van stedelijke hitte naar gezondheid, economische voordelen en maatschappelijke kosten-baten lastig berekenbaar te maken, hiervoor ontbreekt nog veel onderzoek/data. Ook is er nog geen totaal inzicht te bieden in de oorzaken achter de fenomenen SHE en hittestress, zo is het formuleren van hoofdoorzaken voor het SHE lastig en is het onduidelijk hoe hittestress berekend kan worden.

Aanbevelingen

De volgende punten dienen nog wel aanbeveling:

- Rekenmodel 1 zou meer representatief zijn als er gebruik werd gemaakt van meer data als input voor het model (nu data van 57 wijken).
- Rekenmodel 2 is momenteel gemaakt in Office Excel het zou waardevol zijn wanneer dit model omgezet wordt naar GIS of een driedimensionaal programma zodat het model een representatiever uiterlijk krijgt, er makkelijker wijzigingen in doorgevoerd kunnen worden en er een groter gebied ingevoerd kan worden (nu 3600 m²).
- Rekenmodel 2 dient aangevuld te worden met de effecten van wind, tijd en schaduw.

Inhoudsopgave

Voorwoord	v	3.4 Uitkomsten model 2	45
Begrippen	vii	4. Conclusies & Aanbevelingen	49
Samenvatting	xi	4.1 Deelvragen	51
1. Inleiding	1	4.2 Conclusies	53
1.1 Opdracht	3	4.3 Aanbevelingen	55
1.2 Kader	5		
2. Literatuurstudie	7		
2.1 Stedelijke hitte & hittestress	9		
2.2 Stedelijk hitte eiland	11		
2.3 Gevolgen	15		
2.4 Dataset stedelijke hitte	17		
2.5 Oplossingen <i>straatniveau</i>	19		
2.6 Oplossingen <i>wijkniveau</i>	21		
2.7 Oplossingen <i>stadsniveau</i>	27		
3. Rekenmodellen	31		
3.1 Rekenmodel 1	33		
3.2 Uitkomsten dataset Rotterdam	39		
3.3 Rekenmodel 2	41		

1. Inleiding

1.1 Opdracht

Context

Wereldwijd gaan steeds meer mensen in een stad wonen (zie figuur 1). Momenteel leeft de helft van de wereldbevolking in een stad, terwijl dit rond 1950 nog maar 35% was.¹ Volgens onderzoekers zet deze urbanisatie door en de verwachting is dat in 2030 ongeveer 80% van de wereldbevolking in een stad woont.

Voor professionals in de stedenbouw/ ruimtelijke ordening brengt deze 'trek naar de stad' kansen met zich mee. Er zal naar alle waarschijnlijkheid meer vraag komen naar innovatieve manieren om de fysieke stad en zijn vervoerssystemen vorm te geven. Naast fysieke inrichting van steden zal de urgentie van het leefbaar houden van stedelijke gebieden vergroten.

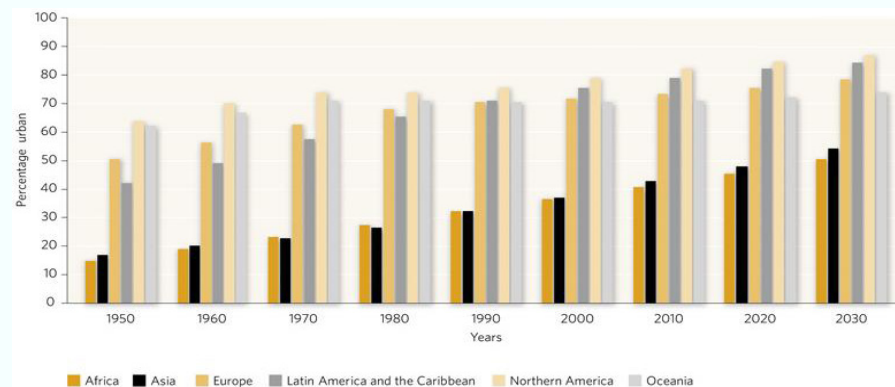
Aanleiding

Binnen het ingenieursbureau Witteveen+Bos is interesse naar een afstudeeropdracht waarbij enerzijds literatuuronderzoek gedaan wordt naar stedelijke hitte en anderzijds gewerkt wordt naar rekenmodellen om de kans op stedelijk hitte in te schatten en de oorzaken hiervan bloot te leggen. Om Witteveen+Bos meer inzicht te geven in dit thema en omdat het bedrijf dit onderwerp met het oog op de toekomst wil gaan integreren in zijn advieswerk, is deze afstudeeropdracht ontstaan.

Opdrachtomschrijving

De focus in de afstudeeropdracht ligt op de volgende twee punten:

1. Ten eerste is er vanuit Witteveen+Bos interesse naar een literatuurstudie over oorzaken, gevolgen en oplossingen omtrent stedelijke hitte.
2. Ten tweede heeft het afstudeerbedrijf de ambitie om op verschillende schaalniveaus advies over stedelijke hitte uit te brengen. Om die reden zijn één of meerdere rekenmodellen waarmee de mate van hitte berekend kan worden gewenst.



Figuur 1. Voorspellingen wereldwijde urbanisatie. Bron: United Nations (2006)

1. UN population funds (2007). Geraadpleegd op 13-02-'12, <http://www.unfpa.org/swp/2007/english/introduction.html>

1.2 Kader

Doelstelling

Het verzamelen en produceren van kennis omtrend het thema stedelijke hitte, in de vorm van literatuurstudies en het maken rekenmodellen, in een tijdsbestek van zeventien weken.

Onderzoeksvraag

In hoeverre is stedelijke hitte inzichtelijk en berekenbaar te maken?

Deelvragen

1. Wat is stedelijke hitte?
2. Welke effecten heeft stedelijk hitte?
3. Wat zijn oplossingen voor stedelijke hitte?
4. Op welke manier is stedelijke hitte te berekenen?

Projectgrenzen

De volgende werkzaamheden zijn meegenomen in het afstudeertraject:

- Het doen van literatuurstudie over stedelijk hitte
- Het interviewen van externe experts over stedelijk hitte
- Het maken van rekenmodellen (gebaseerd op oppervlakte- en luchttemperatuur)
- Het doen van aanbevelingen over de rekenmodellen

Het volgende aspect kon wegen datagebrek niet worden meegenomen in het afstudeertraject:

- Het maken van een rekenmodel op basis van gevoelstemperatuur
Dit rekenmodel bleek achteraf buiten onze mogelijkheden te liggen. De rekenmodellen die gemaakt zijn en in de scriptie worden toegelicht zijn niet gebaseerd op gevoelstemperatuur maar op luchttemperatuur en oppervlaktetemperatuur.

2. Literatuurstudie

In dit hoofdstuk wordt antwoord gegeven op de deelvragen:

- Wat is stedelijke hitte?
- Welke effecten heeft stedelijk hitte?
- Wat zijn oplossingen voor stedelijke hitte?

Dit hoofdstuk is gebaseerd op bronnen als geschreven literatuur, internetbronnen en interviews met wetenschappers/ klimatologen die op het gebied van stedelijke hitte werkzaam zijn. Het hoofdstuk heeft als de doel de lezer een globaal inzicht te geven over oorzaken van stedelijke hitte (2.1 & 2.2), gevolgen van stedelijke hitte (2.3) en oplossingen van het SHE (2.4 t/m 2.6).

2.1 Stedelijk hitte & hittestress

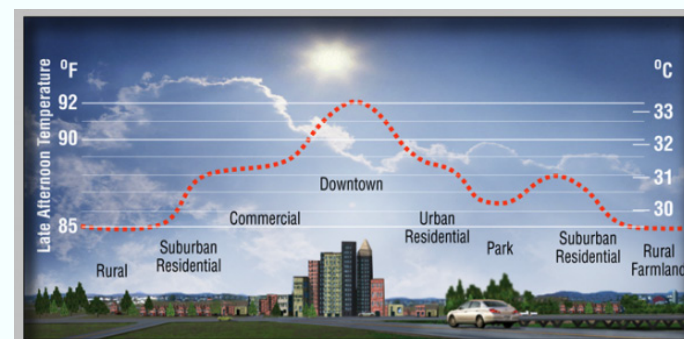
Stedelijke hitte

Stedelijke hitte is een gevolg van het feit dat de zon het stedelijke oppervlak opwarmt. Doordat verharde oppervlaktes in stad (denk aan wegen, daken, parkeerplaatsen) vaak bestaan uit materialen die warmte absorberen wordt de straling van de zon tijdelijk opgeslagen. Doordat deze opgeslagen warmte op een later moment weer vrij komt wordt de lucht extra opgewarmd. Vooral in een stad is deze extra opwarming van de lucht door de uitstraling van materialen groot omdat een stad veel verharde oppervlaktes bevat. Deze extra opwarming van de lucht wordt stedelijke hitte genoemd, om dit specifiek te maken wordt er in deze scriptie gebruik gemaakt van de begrippen SHE (figuur 2) en hittestress (figuur 3).

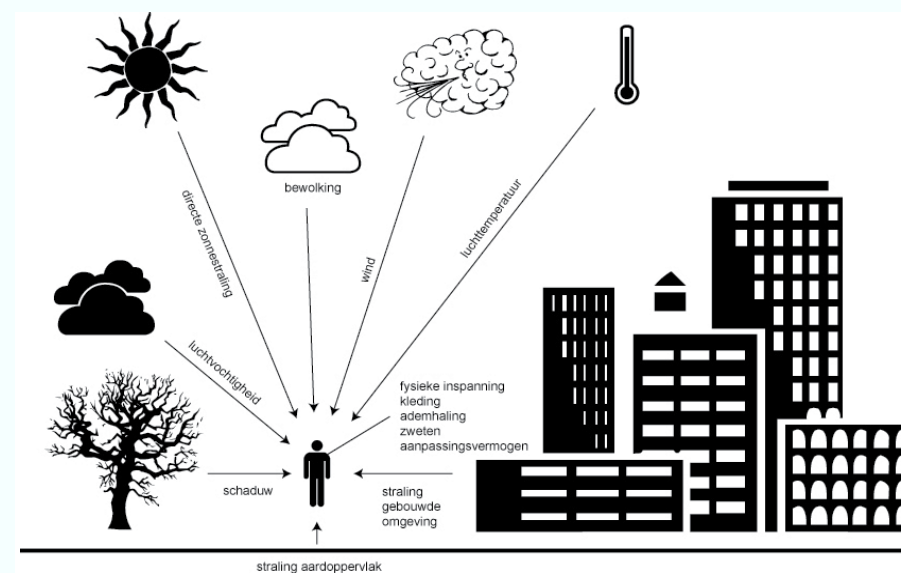
Hittestress

In deze scriptie wordt een definitie van hittestress gehanteerd waarbij de gezondheid/ het functioneren van de mens centraal staat (ook wel lichamelijke hittestress genoemd): het bereiken van een gevoelstemperatuur die schadelijk is voor de gezondheid en/ of het functioneren van een individu. Er zijn veel formules voor het uitrekenen van gevoelstemperatuur: de ene formule bestaat uit luchttemperatuur en windsnelheid, de andere uit de hiervoor genoemde twee factoren plus luchtvochtigheid en de derde uit luchttemperatuur, windsnelheid en zwarteboltemperatuur (stralingstemperatuur). Uit interviews met wetenschappers van Wageningen Universiteit (dr. ir. L.W.A. van Hove & dr. ir. G.J. St Steeneveld) blijkt dat er nog veel onderzoek gaande is op het thema gevoelstemperatuur en dat de formule die vaak wordt gebruikt (met de factoren luchttemperatuur en windsnelheid) niet compleet is.

Uit verschillende literatuurbronnen blijkt dat de in figuur 3 weergegeven factoren ook meespelen bij het veroorzaken van gevoelstemperatuur, terwijl deze niet in de meest gangbare formules terugkomen. Al met al is er dus nog weinig onderzoek gedaan naar de oorzaken achter gevoelstemperatuur en is er geen eenduidig antwoord te geven op de vraag hoe deze ontstaat en hoe de factoren uit figuur 3 samen hangen.



Figuur 2. Verklaring van het stedelijk hitte eiland. Bron: The Heat Island Group (2009)



Figuur 3. Factoren van invloed op gevoelstemperatuur. Bron: eigen werk (Leander)

2.2 Stedelijk hitte eiland

Inleiding

In dit rapport wordt het begrip SHE als volgt gedefinieerd: het stedelijk hitte eiland is het luchttemperatuurverschil van een stedelijk gebied ten opzichte van het landelijke gebied daaromheen. Een verschil in luchttemperatuur boven een bebouwd en onbebouwd gebied komt in principe voor boven elke bebouwde omgeving (dan spreekt men over een hitte eiland). Het verschil tussen een hitte eiland en het SHE is dat dit temperatuurverschil voor problemen zorgt (zie verder paragraaf 2.3.). Het SHE wordt veroorzaakt door vele factoren (zie figuur 4). Dit zijn ruimtelijke, meteorologische en antropogene factoren en zijn per stad verschillend. Nederlandse wetenschappers hebben nog geen resultaten over hoe de oorzaken van het SHE in Nederlandse steden zijn verdeeld. In hoofdstuk 3.2 is door de auteurs, op basis van een data-analyse, een aanname hierover gedaan.

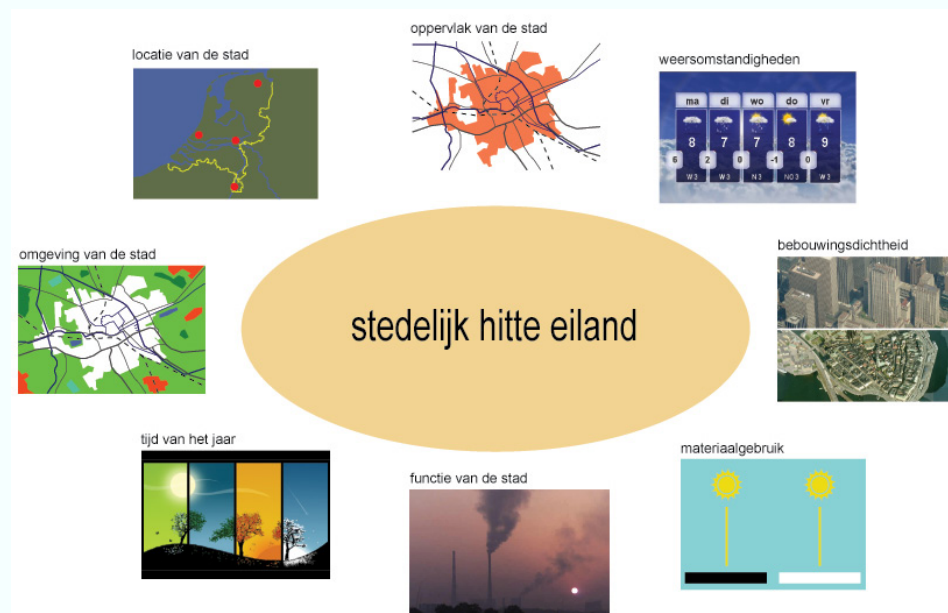
Weersomstandigheden

Wind

Op zomerse windstille dagen is het SHE het grootst in Nederland.² Nederland heeft vaak profijt van een koele zeewind die tot zo'n 80 kilometer landinwaarts reikt. Dit zorgt in de zomer voor verkoeling en aanvoer van frisse lucht. Wind vanuit het oosten en zuiden zorgt in de zomer meestal voor de aanvoer van warme lucht. In stedelijke gebieden is de gemiddelde windsnelheid beduidend lager (zo'n 50%)³ dan landelijke gebieden. Wind is een meteorologische factor.

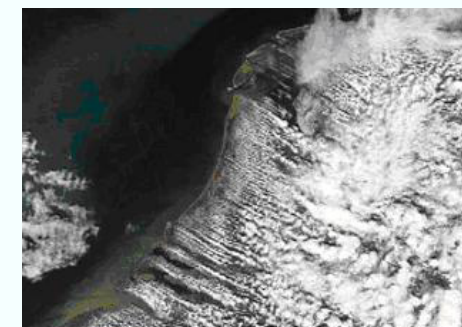
Bewolking

In diverse rapporten van TNO/ WUR wordt geconcludeerd dat het SHE het grootst is tijdens onbewolkte warme dagen met weinig wind.⁴ Dit komt doordat de stad de hele dag flink wordt opgewarmd en de warmte in de nacht niet weggevoerd wordt door de wind. Een hoge bewolgingsgraad heeft wel een reducerend effect op de mate van stedelijke hitte.⁵ Dat komt omdat er overdag minder zonnestraling de stad bereikt en er dus ook minder hitte geabsorbeerd wordt.



Figuur 4. Factoren van invloed op het stedelijk hitte eiland. Bron: eigen werk (Leander)

Figuur 5. Ruimtelijk klimatologische verschillen binnen Nederland. Bron: KNMI (2011)

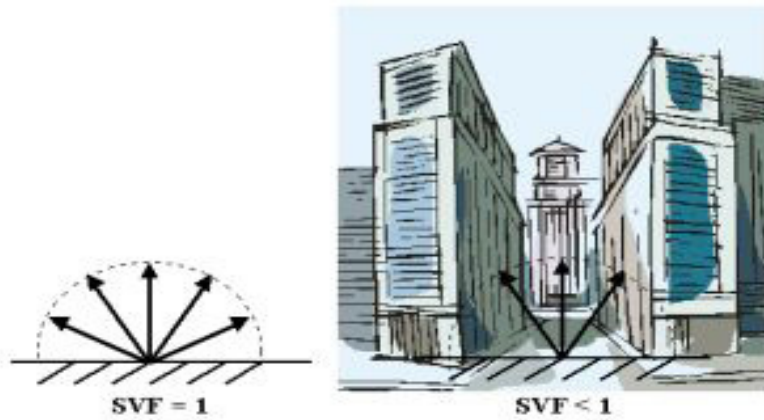


2. Döpp S. (2011). *Kennismontage. Hitte en klimaat in de stad*. TNO & Climate Proof Cities Consortium. p. 8

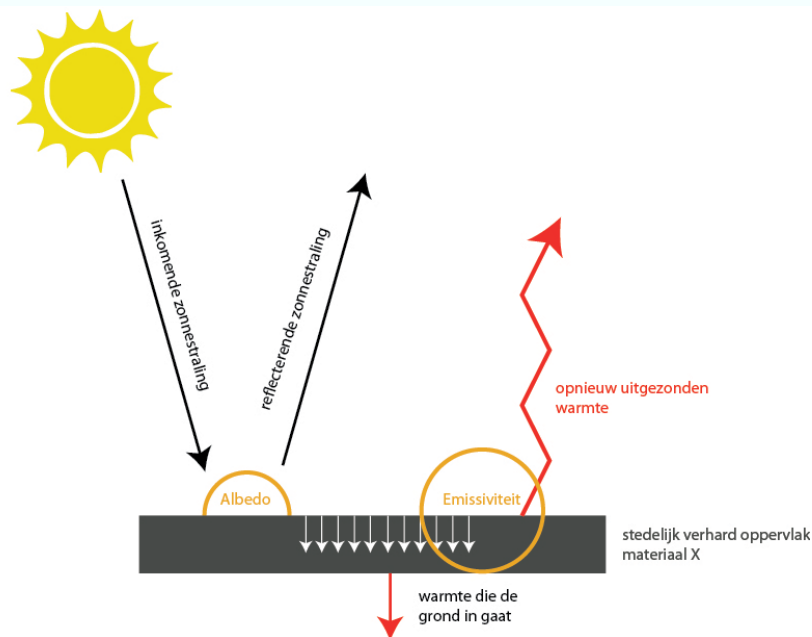
3. Nijhuis, I. & Streng, J. (2011). *Hittestress in Rotterdam, Kennis voor Klimaat Rapport*. Alterra Wageningen UR & Climate Proof Cities Consortium. p. 24

4. Heusinkveld, L. Hove C. van, & Jacobs. C. (2010). *Ruimtelijke analyse van het stadsklimaat in Rotterdam*. Alterra Wageningen. p. 12

5. Blijkt uit mailcontact met prof. G. Steeneveld (16 april 2012). Wageningen Universiteit. zie bijlage...



Figuur 6. Sky View Factor. Bron: Sebastian Wypych (after Oke, 1987)



Figuur 7. De werking van albedo en emissiviteit. Bron: eigen werk (Leander)

Aan de andere kant kan bewolking in de nacht ook zorgen voor een warm deken over de stad. Een hoge bewolgingsgraad zorgt er voor dat de stad minder snel opwarmt maar ook minder snel afkoelt. Als een stad een te hoge albedo heeft, dan kan het weerkaatsingsvermogen volgens dr. ir. F.D. van der Hoeven zo groot worden, dat er nog maar weinig wolken boven ontstaan. Voor Dr. Ir. G.J. Steeneveld is het nog te vroeg om hier stellige uitspraken over te doen: 'Over wolkenvorming en neerslag boven de stad door eigenschappen van de stad is niet veel bekend. Daar wordt nog actief onderzoek naar gedaan.' (uit bijlage 4.2.2) Bewolking is een meteorologische factor.

Bebouwingsdichtheid

Een andere factor die invloed heeft op het SHE is de mate van bebouwendichtheid. Veel hoge bebouwing en of smalle straten zorgen voor een lage sky view factor (het vermogen van een punt om de lucht te aanschouwen, zie figuur 6). Door een lage sky view factor wordt het voor de uitstralende warmte van een stad moeilijker om de lucht te bereiken en blijft hierdoor langer hangen, met als gevolg dat de stad langzamer afkoelt. Naast een lage sky view factor, als gevolg van een hoge bebouwendichtheid, is het aannemelijk dat de wind minder invloed heeft op plekken waar veel bebouwing staat. Bebouwendichtheid is een ruimtelijke factor.

Materiaalgebruik

Het materiaalgebruik in de stad heeft een grote invloed op de temperatuur van bebouwde oppervlakken en de warmte-uitstraling hiervan (figuur 7). Bij materiaalgebruik zijn met name de mate van weerkaatsing (albedo) en de mate van absorptie (emissiviteit) van belang. Emissiviteit en albedo zijn tegenpolen van elkaar: als de albedo hoog is dan is de emissiviteit laag en vice versa. Het verschil in albedo tussen een wit en zwart materiaal kan temperatuurverschillen opleveren van maximaal 8-17°C.⁶ Over het algemeen kan gesteld worden dat hoe lager de albedo van een materiaal is, hoe meer warmte dat materiaal absorbeert. Op een gegeven moment moet het materiaal deze warmte kwijt. Materiaalgebruik is een ruimtelijke factor.

6. Kleerekoper L. (2009). *A heat robust city. Case study designs for two neighbourhoods in the Netherlands*. Delft University of Technology, p.6

Funcities

De ruimtelijke functies binnen een stad zijn van invloed op het SHE. Een havenstad zal over het algemeen warmer zijn, omdat dit type steden vaak meer transportbewegingen bevatten en dus meer te maken krijgen met warme uitlaatgassen of zware industrie. Ook functies als industrieterreinen en fabrieken (denk aan de warmte-uitstoot van machines) dragen met hun antropogene warmte bij aan het SHE. Hoeveel deze bijdrage is ligt per stad anders. Functies zijn een ruimtelijke factor binnen de oorzaken voor het SHE.

Energiegebruik

Ons dagelijks energieverbruik is verantwoordelijk voor een klein deel van de stedelijke warmteproductie. Uit onderzoek in Rotterdam is gebleken dat warmte-uitstoot van antropogene hittebronnen (verkeer, industrie, woningen, kantoorpanden) in zomerse perioden kan ophopen en op die manier een significante bijdrage aan het SHE kan hebben. Uit dit onderzoek blijkt dat industrie en verkeer veel meer bijdragen aan de stedelijke hitte dan woningen.

De mate waarin het energieverbruik van invloed is op het SHE wordt momenteel nog door WUR onderzocht. Voor Rotterdam is vastgesteld dat de totale warmteproductie 34 W/m^2 is waarvan 22 W/m^2 vrijkomt in de vorm van voelbare warmte op leefniveau. Dit is laag in vergelijking met andere steden zoals Amerikaanse steden (gemiddeld 60 W/m^2) en Tokyo (meer dan 200 W/m^2).⁷ Het toepassen van airconditioners (zie figuur 8) lijkt een goede oplossing maar is het niet. Het gebruik van airconditioners heeft een driedelig negatief effect: ze onttrekken koele lucht uit de buitenruimte, stoten warme lucht in de buitenruimte uit en gebruiken erg veel energie. Energiegebruik is een antropogene factor binnen de oorzaken voor het SHE.

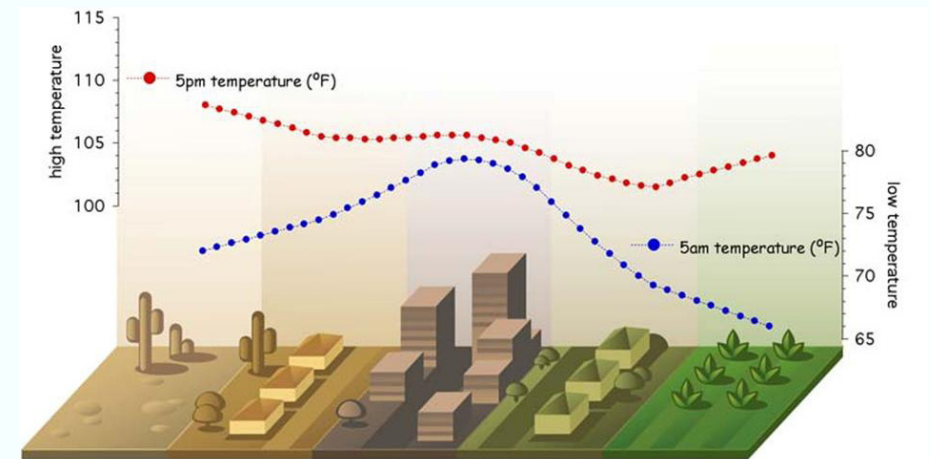
Tijd

Dag en nacht

Wanneer de zon onder is, is het SHE het grootst (zie figuur 9). De rurale omgeving houdt minder warmte vast en koelt sneller af, doordat wind meer invloed heeft.⁸ Onderzoek in Rotterdam heeft uitgewezen dat het SHE in de nacht een verschil kan hebben van 7 á 8°C, terwijl in de morgen de stad zelfs een paar graden kouder kan zijn dan de rurale omgeving. Overdag is



Figuur 8. Aircogebruik in Singapore. Bron: fotograaf Alexander de Graaf (2005)



Figuur 9. Verschil tussen SHE dag en nacht (in Fahrenheit). Bron: NOAA/Glueck (2006)

7. Klok, L, Broeke, H. ten, Harmelen, T. van, e.a. (2010). *Ruimtelijke verdeling en mogelijke oorzaken van het hitte-eiland effect*. TNO & Waterwatch, p. 69-70

8. Kleerekoper L. (2009). *Design principles for Urban Heat Management*. Delft University of Technology, p.6

9. Heusinkveld, L. Hove C. van, & Jacobs. C, (2010). *Ruimtelijke analyse van het stadsklimaat in Rotterdam*. Alterra Wageningen UR, p.4

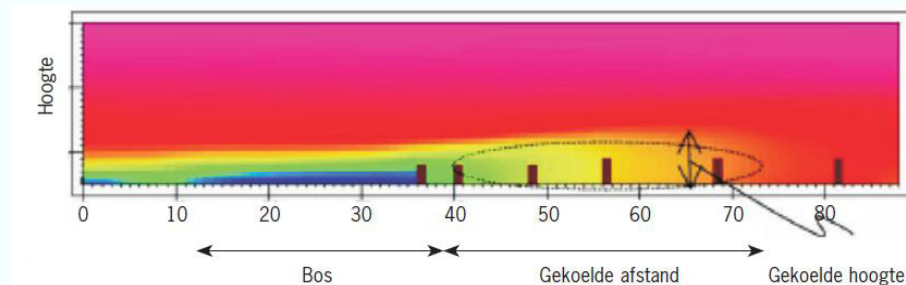
het verschil met het platteland het kleinst. In Rotterdam is gemeten dat de opwarming dan beperkt bleef tot 2°C.⁹ Tijd is een meteorologische factor binnen de oorzaken voor het SHE.

Seizoen

De mate van SHE hangt af van het seizoen. In de zomer worden de hoogste temperaturen gemeten en is de stad in de nacht het warmst. Het SHE-effect speelt ook in de winter. In de winter heeft het SHE-effect zelfs een positief resultaat op de gezondheid, omdat sterfte door kou hierdoor tegengegaan wordt.¹⁰ Seizoen is een meteorologische factor binnen de oorzaken voor het SHE.

Omgevingsfactoren

De omgeving (zowel ruraal als urbaan) van een stad heeft effect op het stadsklimaat en dus ook het SHE. Veel vegetatie of reliëf kan voor de aanvoer van koele lucht zorgen waardoor het SHE wordt gereduceerd (zie figuur 10). Zo zorgen de groene heuvels rondom Arnhem voor een verkoelende wind in de stad. Een stad als Dusseldorf is zelfs zo gebouwd dat natuurlijke windstromen niet worden verstoord en optimaal worden benut. Uit interview met Gert-Jan Steeneveld (9 maart 2012) bleek ook dat steden die dicht bij elkaar liggen, als Rotterdam en Den Haag zorgen voor elkaars opwarming. Omgevingsfactoren vallen onder ruimtelijke factor binnen de oorzaken voor het ontstaan van het SHE.



Figuur 10. Het koelingseffect van bossen. Bron: Chenn (2006)

Locatie

De temperatuur van de stad wordt beïnvloed door het lokale klimaat. Dit klimaat wordt beïnvloed door de landschappelijke en klimatologische elementen. De ligging en omgeving van een stad hebben grote invloed op het SHE. Wanneer een stad aan zee ligt is de kans groot dat er meer kans is op verkoelende wind uit zee. Wanneer een stad zuidelijker ligt in Nederland is er kans op meer zonuren per jaar. De locatie van een stad is een klimatologische factor.

Oppervlak van de stad

Grootte

Het is zeer waarschijnlijk dat er een directe relatie is tussen de grootte van een stedelijk gebied en de intensiteit van het SHE. Voor Nederlandse steden is dit nog niet wetenschappelijk bewezen. De Amerikaanse wetenschapper T.R. Oke stelde in 1987 in het rapport "Layer Climates", een relatie tussen het aantal inwoners en de temperatuur van de stad. Deze formules zijn echter niet op Nederlandse steden van toepassing. Omdat Nederlandse steden totaal anders zijn van morfologie en massa. In Nederlandse steden is het aantal inwoners niet inherent aan de grootte van het SHE. In Nederland is de mate waarin het SHE effect heeft vooral gerelateerd aan bebouwingsdichtheid percentages groen/ water in de stad. Ook kleine dorpen kunnen last hebben van het SHE. Een verschil van 4°C kan al optreden in plaatsen met 10.000 inwoners.

Samenstelling

Groen in de stad zorgt voor een vermindering van de warmte. Stedelijke gebieden met minder groen zullen gemiddeld warmer zijn dan steden met veel groen. Groen zorgt voor opname van warmte en geeft verdamping waardoor er verkoeling komt, verder geven bomen schaduw wat op een zeer plaatselijke schaal voor verkoeling zorgt. Kleine en verspreide hoeveelheden groen koelen de omgeving meer dan grote parken met dezelfde grote. Als een park meer dan 50% verhard is, dan is de kans groot dat het park zelf een warmtebron is. Stads grootte en samenstelling vallen onder ruimtelijke factoren binnen de oorzaken voor het ontstaan van het SHE. In hoofdstuk 3.2, wordt op basis van een data-analyse een inschatting gedaan in hoeverre verschillende factoren in zijn algemeenheid bijdragen aan het SHE.

10. Bosch, P. Hoogvliet, H. & Hoeven, F. van der e.a. (2011). *Fysieke bouwstenen voor de knelpuntenanalyse nieuwbouw en herstructurering*. Climate Proof Cities Consortium, p.10

2.3 Gevolgen

Inleiding

Stedelijke hitte kan schadelijke gevolgen geven op verschillende vlakken, in deze paragraaf volgt een uiteenzetting van de gevolgen naar soort.

Thermisch comfort

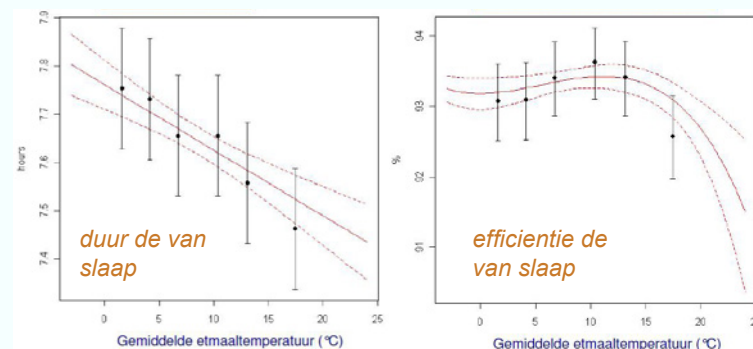
Met thermisch comfort wordt een aangename gevoelstemperatuur bedoeld die past bij een bepaalde handeling. Dit comfort is zoals eerder beschreven per persoon en activiteit verschillend. Zo is het thermisch comfort voor kantoorwerk bij een omgevingstemperatuur van 22°C voor de meeste werknemers het meest optimaal en zorgt een omgevingstemperatuur van 30°C zorgt voor een daling van 8,9% van de arbeidsproductiviteit.¹¹ Wanneer persoonlijke comfortwaarden overschreden worden kunnen hittegerelateerde klachten ontstaan. Lichte hitte klachten als vermoeidheid, concentratieproblemen, huidandoeningen, ademhalingsproblemen en slaapproblemen kunnen al snel optreden.

Dr. ir. L.W.A. van Hove is er van overtuigd dat gezondheidsgevolgen door een te hoge gevoelstemperatuur per persoon vanaf een andere waarde spelen.¹² Vooral de relatie tussen stedelijke hitte en slaapproblemen is een interessante kwestie (zie figuur 11) omdat hiermee economisch voordeel behaald kan worden (denk aan het voorkomen van vermindering van arbeidsproductiviteit door een betere slaap). Hierbij ontbreekt alleen nog wetenschappelijk onderzoek naar de effecten van slaapkwaliteit op arbeidsproductiviteit.

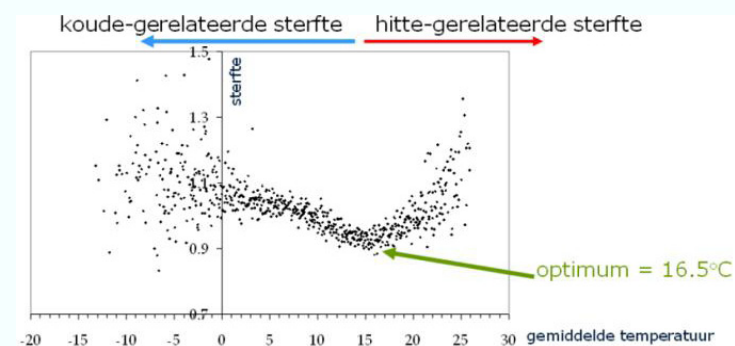
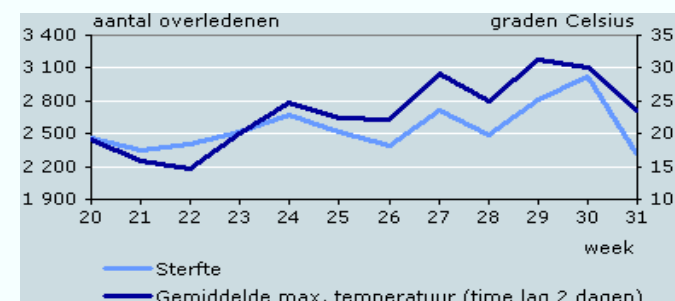
Hitte sterfte

Uit cijfers van het CBS is op te maken dat er een directe relatie is tussen hoge temperaturen in de zomer en het aantal sterfgevallen in de zomer (figuur 12). Voor heel Nederland neemt de oversterfte tijdens hittegolven met zo'n 12% toe. Uit CBS-onderzoek blijkt dat een stijging van de luchttemperatuur met één graad leidt tot 25 à 35 oversterfte per week.¹³ In juli 2006 bleek de oversterfte met alle voorgaande juli-maanden op duizend te

Figuur 11. Het effect van warmte op slaap (onderzocht bij ouderen). Bron: H. Daanen, M. Simons en S. Janssen (2010)



Figuur 12. Hittesterte als gevolg van hittegolf 2006. Bron: CBS/ Carel Harmsen (2006)



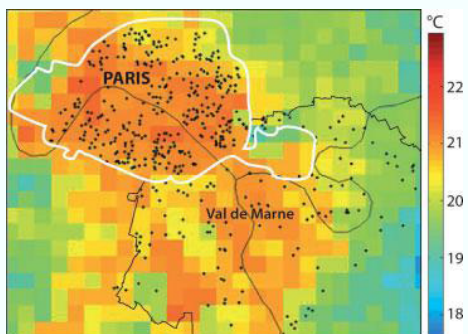
Figuur 13. Relatie tussen gemiddelde dagtemperatuur en oversterfte. Bron: Kennis voor Klimaat/ gemeentewerken Rotterdam (2011)

11. Seppänen, O. Fisk, W. J. & Lei, Q. H. (2006). *Effect of temperature on task performance in office environment*. Helsinki University of Technology, p.2

12. Hove, L. van, Elbers, J. & Jacobs C. e.a. (2010). *Het stadsklimaat in Rotterdam, Eerste analyse van de meetgegevens van het meteorologische meetnet*. Alterra Wageningen. p. 16

13. <http://www.cbs.nl/nl-NL/menu/themas/gezondheid-welzijn/publicaties/artikelen/archief/2004/2004-1495-wm.htm>, geraadpleegd op 28 februari 2012

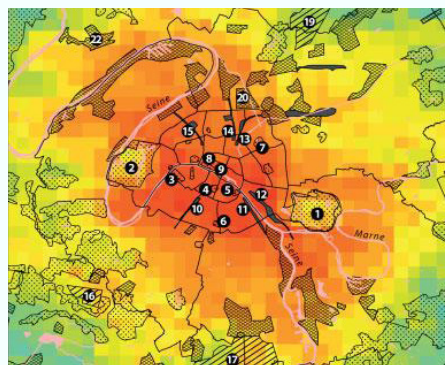
liggen, het is niet bekend of deze sterfgevallen in de procentueel het meest in de stad of op het platteland hebben plaatsgevonden. Het is waarschijnlijk dat opwarming van het klimaat leidt tot meer doden ten gevolge van hitte in de zomer, daarom is het noodzakelijk om hittedregerende maatregelen toe te passen. Tegelijkertijd zal de sterfte in de winter afnemen, aangezien de koude gerelateerde sterfte in de winter veel hoger is dan hittedregerende sterfte in de zomer.¹⁴ Uit onderzoek uit Parijs, tijdens de hittegolf van 2006, bleek dat in de wijken waar het in de nacht het warmst was de meeste sterfgevallen waren (figuur 14). Opvallend is dat de wijken die overdag het warmst zijn niet in de nacht het warmst zijn (figuur 15 en 16). Daarnaast bleek dat bij een temperatuurverhoging van 0.5°C tijdens de hittegolf, de kans op overlijden verdubbelde.¹⁵



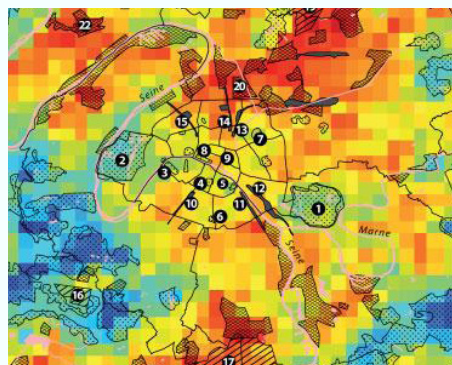
Figuur 14. Relatie tussen nachttemperaturen en sterfte Parijs 2006. Bron: RmetS (2011)

Extreme warmte kan onder andere leiden tot een toename van gezondheidsproblemen zoals uitdroging, vermoeidheid, concentratie- en ademhalingsproblemen, slaapproblemen en allergieën. Daarnaast ondervindt een veelvoud van dat aantal hinder van de

Daarnaast ondervindt een veelvoud van dat aantal hinder van de



Figuur 15. Hitte in Parijs 'nacht. Bron: RmetS (2011)



Figuur 16. Hitte in Parijs dag. Bron: RmetS (2011)

warmte door bijvoorbeeld vermoeidheid, concentratieproblemen, huidaandoeningen, uitputting door uitdroging, hittekramp, hitte-syncope (problemen met de bloeddoorstroming met onder andere flauwvallen tot gevolg) en hitteberoertes (zoals een zonnesteek).

Overige gevolgen

Naast gevolgen op het gebied van gezondheid levert stedelijke hitte ook problemen op het gebied van verkeersveiligheid, energie, het functioneren van apparaten en het uitdrogen van waterkerende elementen in en rond de stad. Verder heeft stedelijke hitte effecten op materialen als ijzer en hout (die krimpen in of zetten uit tijdens hitte) wat voor bepaalde constructies problemen met zich mee kan brengen.

Verkeer

Uit onderzoek is gebleken dat de luchtkwaliteit, als gevolg van uitlaatgassen, daalt wanneer er stedelijk hitte optreedt. Daarnaast blijkt uit onderzoek van TNO dat uitlaatgassen andersom ook een effect op het SHE hebben:

1. Uitlaatgassen (zie figuur 17) zijn per definitie warm en dragen zo direct bij aan het stedelijk hitte eiland¹⁶ (volgens berekeningen van TNO wordt de omgevingstemperatuur gemiddeld per jaar met 3,2 Watt per m² opgewarmd door de uitlaat van gemotoriseerd verkeer)¹⁷
2. Doordat er zwarte roetdeeltjes in uitlaatgassen zitten kan een smoglaag ontstaan, hierdoor wordt het voor warmtestraling van de zon nog lastiger om terug te weerkaatsen naar de hemel.

Tot slot is in België onderzocht dat de verkeersveiligheid vanaf 25°C afneemt bij hogere temperaturen.¹⁸ Volgens de VAB is het rijgedrag van een persoon met een temperatuur van 35 graden in de auto vergelijkbaar met een persoon die 5 promille alcohol in zijn bloed heeft.¹⁹



Figuur 17. De productie van warmte door verkeer in Rotterdam (in Watt). Bron: TNO (2010)

14. Nijhuis, L en Streng, J., (2011): Hittestress in Rotterdam, Kennis voor Klimaat Rapport KvK/039/2011 pag. 32

15. Dousset, B. Gourmelon, F. & Laaidi, K. e.a. (2010). *Satellite monitoring of summer heat in the Paris metropolitan area*. International Journal of Climatology, p. 322

16. VITO/ B. Maiheu (2010). *Hittekaart voor Tilburg*, p. 2

17. Klok, L, Broeke, H. ten, Harmelen, T. van, e.a. (2010), Ruimtelijke verdeling en mogelijke oorzaken van het hitte-eiland effect. TNO & Waterwatch, p. 46

18. Via Secura (2011). *Invloed van het weer op de verkeersveiligheid*, SWOV, p. 18

19. <http://www.vab.be/nl/actueel/dossiers/dossiartekst.aspx?id=31>, geraadpleegd op 28-02-2012

2.4 Dataset stedelijke hitte

In hoofdstuk 2.2 wordt aangetoond dat het SHE door een breed scala aan oorzaken veroorzaakt. In Rotterdam is door onderzoekers van TNO een data-analyse gemaakt op basis van 15 satellietbeelden. De gegevens voor deze data-analyse werden verkregen van TNO Utrecht (Jan Duyzer). De gegevens werden verzameld in het kader van een onderzoek in opdracht van de provincie Zuid Holland. Deze data-analyse is door de auteurs verder uitgebreid (zie voor de verschillende gebiedskenmerken bijlage 8 en voor de complete dataset bijlage 10.1). Figuur 18 is een samenvatting van deze analyse. Het geeft een inzicht in de relatie tussen de oppervlaktetemperatuur en verschillende gebiedskenmerken. In hoofdstuk 3 wordt met deze dataset verder gerekend.

Buurtten naar typologie	opp. temp. in °C	verschil ruraal	% water	% groen	% verharding	% verkeers-terrein	Oad	% bebouwd	inwonerdichtheid per ha.	gebouwhoogte	albedo	emissiviteit	sky view factor
1. Centrummix hoogstedelijk	30,10	10,6	11,1%	12,7%	76,3%	22%	5475	20%	65	16,1	0,09	0,95	0,69
2. Stadswijk vooroorlogs	28,79	9,2	6,6%	13,7%	79,8%	10%	5315	2%	141	2,3	0,09	0,96	0,66
3. Groenstedelijk vooroorlogs	24,43	4,9	21,7%	26,7%	51,3%	7%	1859	11%	27	7,7	0,10	0,98	0,89
4. Tuindorp jaren '30	27,05	7,6	1,0%	27,0%	50,0%	9%	2150	17%	53	7,0	0,10	0,97	0,79
5. Tuinstad '60/'70	26,64	7,1	8,7%	28,2%	61,5%	6%	3328	15%	79	8,8	0,10	0,97	0,75
6. Bouw na 1985	25,87	6,4	9,7%	31,0%	59,3%	8%	2360	13%	64	7,3	0,12	0,98	0,78
7. Haven & Industrie	30,40	10,9	38,9%	12,9%	48,3%	11%	696	6%	0	10,0	0,09	0,96	0,82
8. Bedrijventerrein	29,36	9,9	6,8%	27,4%	65,8%	17%	1866	17%	5	8,2	0,11	0,96	0,80
9. Park & Recreatie	23,57	4,1	19,3%	53,0%	21,0%	9%	1436	2%	2	5,0	0,11	0,99	0,90
10. Dorps	26,00	6,5	14,0%	36,0%	50,3%	14%	1074	10%	31	6,0	0,11	0,97	0,85
11. Landelijk	22,65	3,2	7,5%	58,5%	5,5%	6%	87	1%	6	4,0	0,15	0,99	1,00

Figuur 18. Typologieën met oppervlaktetemperatuur gerelateerd aan verschillende gebiedskenmerken. Bron: eigen werk (Peter)

2.5 Oplossingen - straatniveau

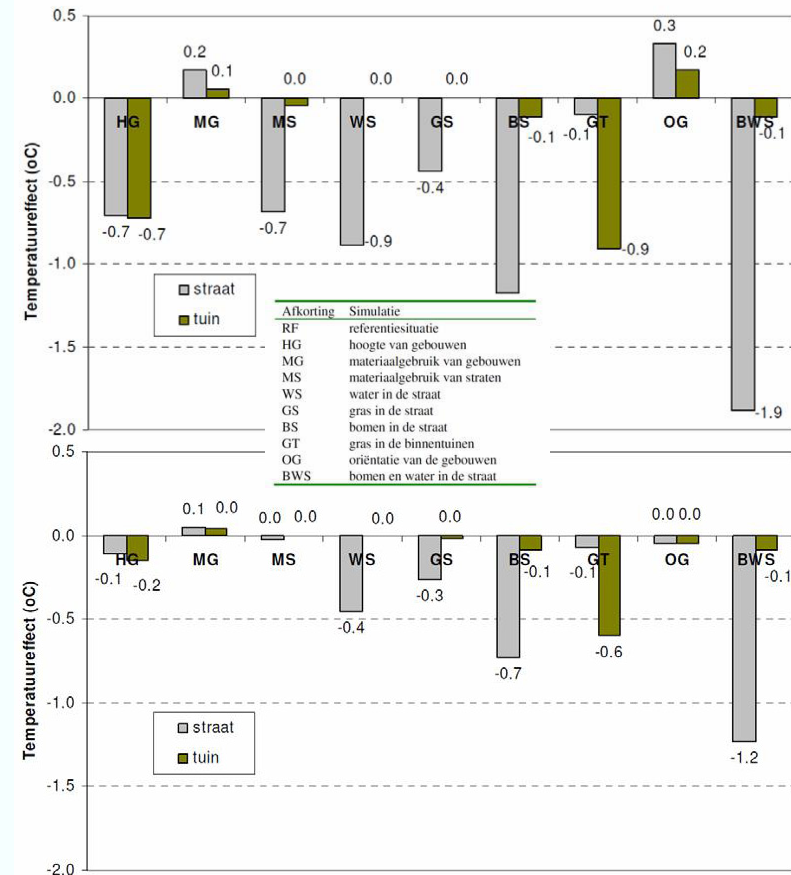
Op straatniveau zijn veel oplossingen te bedenken om hitte in te perken. In deze paragraaf worden er een aantal beschreven (zie voor beschrijving van verschillende schaalniveaus bijlage 11).

Groen en water

Uit resultaten van Kennis voor Klimaat²⁰ blijkt dat bomen op straatniveau de meest verkoelende werking hebben: 'Zo bieden bomen met hun schaduw niet alleen aangename beschutting: ze hebben ook een verlagend effect op de luchttemperatuur.' Uit hetzelfde onderzoek blijkt dat een toename van 10% in het percentage groenoppervlak (bomen, struiken, gras) in de buurt de oppervlaktetemperatuur met ongeveer 1°C verlaagt.

Uit hetzelfde onderzoek van Kennis voor Klimaat blijkt (zie figuur 18 & 19), dat het gemiddelde effect van groen 1,2°C om 15:00 uur en 0,7°C om 00:00 uur is. Ook de aanleg van een brede watergeul in het midden van de straat is een effectieve maatregel, met een verkoelende werking van 0,9°C om 15:00 en 0,4°C om middernacht. Het meest effectief is een combinatie van de twee, met een verkoelende werking in de middag van 1,9°C en in de nacht 1,2°C.

Een negatieve kant aan de oplossing water is dat water aan het eind van de zomer (eind augustus, september) de luchttemperatuur kan verwarmen. Dit komt doordat naarmate de zomer vordert het water steeds meer opwarmt en op een gegeven moment een punt bereikt dat het water warmer is dan de lucht (met name in de ochtend). Als tegenargument kan gesteld worden dat de temperatuur aan het eind van de zomer over het algemeen lager is dan aan het begin/ midden in de zomer en dat de verwarmende bijdrage van water aan de luchttemperatuur hierdoor waarschijnlijk geen schadelijke gevolgen voor de mens zal hebben.



Figuur 19. Het effect van negen maatregelen. Onder is s' nachts, boven overdag. Bron: Kennis voor Klimaat/ hittestress in Rotterdam (2011)

20. Nijhuis, I. & Streng, J. (2011). *Hittestress in Rotterdam, Kennis voor Klimaat Rapport*. Alterra Wageningen UR & Climate Proof Cities Consortium, p.46

Gebouwen

Uit literatuur blijkt dat op gebouwniveau een vergroting van het gebouw-albedo van 9% naar 70% de koeling op jaarbasis met 19% vermindert kan worden. Simulaties van TNO hebben een besparing van 62% op energiekosten voor koeling laten zien bij een combinatie van verhoging van stads-albedo en gebouw-albedo.²¹

Daken

Door water vast te houden op daken warmt een dak minder op, het dakoppervlak blijft het dak 33°C koeler dan zwarte daken en 16°C koeler dan witte daken.²² Vegetatie op daken is nog beter, een plat bitumendak (zie figuur 20) is bijvoorbeeld vergelijkbaar met een grasdak. In de zomer kan de temperatuur op het bitumendak oplopen tot 70°C, terwijl de temperatuur op het grasdak niet verder oploopt dan zo'n 32°C.²³

De universiteit van Michigan, deed een vergelijkend onderzoek naar het verschil in kosten tussen een 1950m² groen dak en een traditioneel dak. Er werd ook gekeken naar bijkomende voordelen zoals NO^x (stikstofoxiden) absorptie, volksgezondheid en regenwateropvang. Het groene dak kostte \$464,000 om te bouwen. De kosten voor het traditionele dak bedroegen \$335,000. Over de gehele levensduur van het dak bespaart het groene dak \$200,000. Bijna 2/3 van de kostenbesparing komt voort uit energiebesparingskosten.

In New York is door dezelfde universiteit berekend wat het effect zou zijn als alle daken in de stad omgetoverd zouden worden tot groene daken. Er werd op 2m boven het dakoppervlak een gemiddelde temperatuurdaling van 0,2°C (over de gehele dag) berekend. Rond 15:00 was dit effect -0,4°C.²⁴ Dit effect is niet heel groot, maar er kan aangenomen worden dat in het geval van New York andere factoren meer van invloed zijn op stedelijke hitte (materiaalgebruik, bebouwingsdichtheid, verkeer). Een groen dak en groene gevel koelen de buitentemperatuur om het gebouw met 0.2 tot 1.2 °C (Yukihiro, et al 2006).



Figuur 20. Bitumendak. Bron: dakweb.nl



Figuur 21. Groen dak. Bron: greenroofing.com

21. Döpp S. (2011). *Kennismontage. Hitte en klimaat in de stad*. TNO & Climate Proof Cities Consortium p. 40

22. Kleerekoper L. (2009). *A heat robust city. Case study designs for two neighbourhoods in the Netherlands*. Delft University of Technology. p. 5

23. Kuypers, V. & Vries, B. de, (2008). *Groen voor klimaat: www.kennisvoorklimaat.nl*. p. 3

24. Wong, E. (2008). *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies*. Green Roofs. Climate Protection Partnership Division. p. 11

2.6 Oplossingen - wijkniveau

Inleiding

In deze paragraaf wordt beschreven hoe op lokale schaal kan worden ingegrepen om het SHE te reduceren (zie voor beschrijving van verschillende schaalniveaus bijlage 11).

Groen

Groen, in welke vorm dan ook, heeft drie effecten: verkoelen door verdamping, schaduw geven en het reflecteren van zonlicht. Alleen al verdamping koelt op een zonnige dag met een kracht gelijk aan 20-30 kW. Dit is vergelijkbaar met een vermogen/verbruik van 10 airconditioners.

Vergroening op lokaal niveau leidt tot een gemiddelde temperatuurverlaging van 0,2-2°C in de nabije oppervlaktetemperatuur en resulteert in een energiebesparing van 4-40%.²⁵ Een toename van 10% totaalgroen levert, op wijkniveau, een temperatuurdaling van 1,3°C op. Bij een verandering van 10% van verhard oppervlak naar onverhard oppervlak daalt het buurtgemiddelde oppervlaktetemperatuur met 1°C. Op straatniveau is dit groter; hier wordt geen onderscheid gemaakt tussen bomen en gras.²⁶

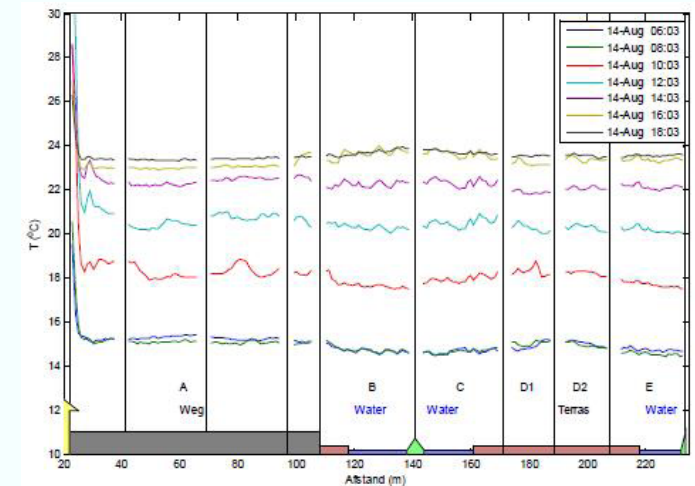
Tot slot is de gemiddelde dagelijkse oppervlaktetemperatuur van groene oppervlaktes 10°C lager dan bestrating, met een maximum van 30°C in de zomer.

Bebouwing

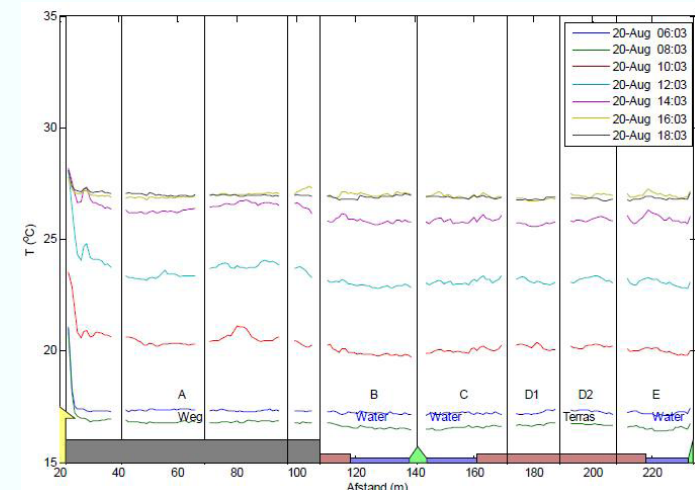
Materiaalgebruik heeft invloed op stedelijke hitte. In hoofdstuk 2 werd al genoemd dat een materiaal t.o.v. stedelijke hitte twee eigenschappen heeft: albedo en emissiviteit.

Uit onderzoek van Deltares wordt goed inzichtelijk hoeveel warmte woningen op straatniveau uitstoten (zie figuur 22 en 23). De figuur geeft de reducerende werking van water neer en laat tevens zien dat bebouwing hitte uitstoot. Om woningen minder hitte uit te laten stoten kan de albedo worden verlaagd door de materiaalsoort te veranderen. Een voorbeeld hiervan is het toepassen van groene daken. Het toepassen van 10% groene daken

Figuur 22. De invloed van stedelijk water op oppervlaktetemperatuur. Bron: Deltares/Reinder Brolsma (2011)



Figuur 23. De invloed van stedelijk water op oppervlaktetemperatuur. Bron: Deltares/Reinder Brolsma (2011)



25. Kleerekoper L. (2009). *Design principles for Urban Heat Management*. Delft University of Technology. p. 21

26. Klok, L, Broeke, H. ten, Harmelen, T. van, e.a. (2010). *Ruimtelijke verdeling en mogelijke oorzaken van het hitte-eiland effect*. TNO & Waterwatch. p. 6



Figuur 24. Groene wand Musée du quai Branly, Jean Nouvel

Model	Color	Initial solar reflectance	Solar reflectance after 3 years
Weathered Green Blend		0.43	0.49
Natural Red		0.43	0.38
Brick Red		0.42	0.40
White Buff		0.68	0.56
Tobacco		0.43	0.41
Peach Buff		0.61	0.48

Figuur 25. Het reflectievermogen van diverse dakmateriaalsoorten. Bron: conference "Passive and Energy Cooling for the Built Environment" (2005)

leidt tot een verlaging van het SHE met 1 tot 2°C. Een toepassing van 50% groene daken kan tot een nog verdere verlaging van wel enkele graden leiden.²⁷

Wanden

Uit recent onderzoek (Ottelé, 2011) aan de TU is gebleken dat de bekleding van een muur met plantenbakken kan zorgen voor een temperatuurverschil van 10°C tussen de lucht voor en achter de bakken.²⁸ Daarnaast is ook berekend dat dit effect in de winter andersom werkt, bij een buitentemperatuur van -5 is de temperatuur achter de groene wand 5°C. Het hierboven beschreven onderzoek toont aan dat groene wanden groene bakken aan de muur wel degelijk economische voordelen heeft voor het gebouw zelf. Maar uit Japans onderzoek blijkt dat een groen dak en/ of groene gevel de buitentemperatuur om het gebouw koelt met 0.2 tot 1.2°C (Yukihiro, et al 2006), wat niet significant is.

Materiaalgebruik

Een verhoging van het weerkaatsingsvermogen van bouwmaterialen kan leiden tot verkoeling. Hoe meer licht er weerkaatst wordt hoe minder er opgevangen wordt zie figuur 25 voor een aantal voorbeelden over welk kleurgebruik op daken het meest gunstig is.

Het temperatuurverschil tussen donker- en lichtgekleurde materialen is groot, witte materialen kunnen 8 tot 17°C koeler zijn. Het toepassen van lichte materialen is vaak wel goedkoper maar lichte gevels kunnen door de reflecterende eigenschappen extra warmtelast opleveren voor de andere materialen, personen in de straat of het tegenoverstaande gebouw extra opwarmen. Daarnaast zijn lichte gevels niet altijd het gewenste architectonische beeld. Voor daken is het toepassen van licht materiaalgebruik wel een effectief middel.²⁹

Het voordeel van groene wanden of daken is dat deze in de winter voor verwarming zorgen, dit is bij witte materialen op de wand en/ of het dak niet het geval. Het nadeel is dat groene daken/ wanden vaak duurder zijn in aanschafprijs.

Uiteindelijk concludeert Laura Kleerekoper ook in haar scriptie dat er beter ingegrepen kan worden op daken en wegen dan op muren. Muren dragen

27. Duyzer, J. Klok, L. Verhagen, H. (2011). *Hoge temperaturen ten gevolge van het stedelijk hitte-eiland effect nu en in de toekomst*. TNO. p. 42

28. http://nl.odemagazine.com/blogs/editors_blog/14283/houd_het_hoofd_koel_met_groen, geraadpleegd op 7 mei 2012

29. Kleerekoper L. (2009). *A heat robust city. Case study designs for two neighbourhoods in the Netherlands*. Delft University of Technology. p. 16

in zijn totaliteit niet veel bij aan het SHE omdat er simpelweg minder zon op schijnt. Dit in tegenstelling tot daken en wegen.

Onderzoek van verschillende Amerikaanse wetenschappers (o.a. Akbari, Oke e.a.) in de afgelopen decennia heeft veel informatie opgeleverd over welke materialen geschikt zijn en welke niet. Hieruit is te concluderen dat:

- Vooral de lichte kleuren en spiegelende materialen het goed doen als het om weerkaatsingsvermogen (albedo) gaat.
- Vooral oneffen/ natuurlijke materialen het goed doen als het om absorptievermogen (emissiviteit) gaat.³⁰

In Rotterdam is gemeten dat een verhoging van albedo of emissiviteit met 0,01 een verlagend effect op de oppervlaktetemperatuur van 0,8 en 1,7°C heeft. Voor de stadsregio Rotterdam Den Haag is berekend dat verhoging van de albedo met factor twee, leidt tot een verlaging van het UHI met bijna 3°C.³¹ Zie de onderstaande lijsten voor het verschil in eigenschappen

Material	α	ϵ
Asphalt	0.05-0.20	0.95
Concrete	0.3	0.71-0.94
Red brick	0.3	0.90
Building brick	-	0.45
Concrete tiles	-	0.63
Wood (freshly planed)	0.4	0.90
White paper	0.75	0.95
Tar paper	0.05	0.93
White plaster	0.93	0.91
Bright galvanized iron	0.35	0.13
Bright aluminium foil	0.85	0.04
White pigment	0.85	0.96
Grey pigment	0.03	0.87
Green pigment	0.73	0.95
White paint on aluminum	0.80	0.91
Black paint on aluminum	0.04	0.88
Aluminum paint	0.80	0.27-0.67
Gravel	0.72	0.28
Sand	0.24	0.76
Grass: long to short	0.16-0.26	0.90-0.95
Soil: wet to dry	0.05-0.40	0.98-0.90

van materiaalsoorten. Wanneer een bepaalde stad zijn albedo wil verhogen kan er bijvoorbeeld beter gebruik aluminium materialen dan van ijzeren materialen.

	Surface	Albedo	
Streets	Asphalt (fresh 0.05, aged 0.2)	0.05 - 0.2	
Walls	Concrete	0.10 - 0.35	
	Brick/stone	0.20 - 0.40	
	White washed stone	0.80	
	White marble chips	0.55	
	Light-coloured brick	0.30 - 0.50	
	Red brick	0.20 - 0.30	
	Dark brick and slate	0.20	
	Limestone	0.30 - 0.45	
Roofs	Smooth-surface asphalt (weathered)	0.07	
	Asphalt	0.10 - 0.45	
	Tar and gravel	0.08 - 0.18	
	Tile	0.10 - 0.35	
	Slate	0.10	
	Thatch	0.15 - 0.20	
	Corrugated iron	0.10 - 0.16	
	Highly reflective roof after weathering	0.60 - 0.70	
	Paints	White, whitewash	0.50 - 0.90
		Red, brown, green	0.20 - 0.35
Black		0.02 - 0.15	
Urban areas	Range	0.10 - 0.27	
	Average	0.15	
Other	High-coloured sand	0.40 - 0.60	
	Dry grass	0.30	
	Average soil	0.30	
	Dry sand	0.20 - 0.30	
	Deciduous plants	0.20 - 0.30	
	Deciduous forests	0.15 - 0.20	
	Cultivated soil	0.20	
	Wet sand	0.10 - 0.20	
	Coniferous forests	0.10 - 0.15	
	Wood (oak)	0.10	

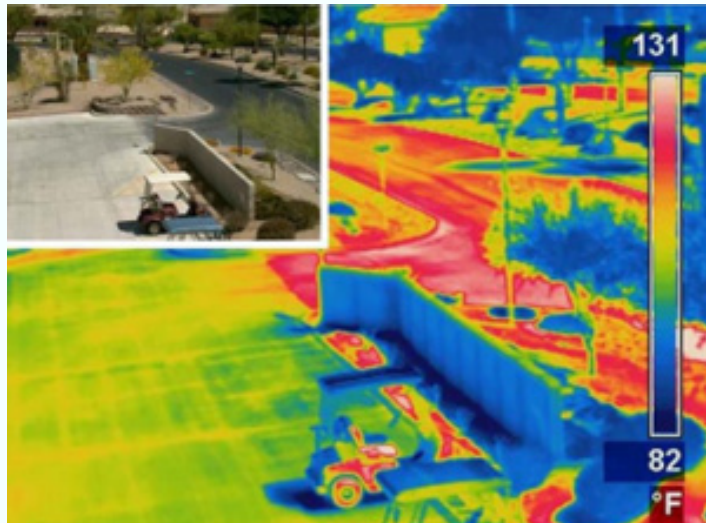
Figuur 26. Albedo (α) en Emissiviteit (ϵ) van verschillende materialen. Bron: Alterra/Wageningen (2011), after Oke (1957)

30. Levinson, R. Akbari, H. & Berdahl, P. (2009). *A novel technique for the production of cool colored roofing materials*. Heat Island Group, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA USA., p. 2-3

31. Duyzer, J. Klok, L. Verhagen, H. (2011). *Hoge temperaturen ten gevolge van het stedelijk hitte-eiland effect nu en in de toekomst*. TNO, p. 42



Figuur 27. Het reflectievermogen van koel asfalt. Bron: Heat Island Group (2011)



Figuur 28. Koel asfalt. Bron: Heat Island Group (2011)

Wegen

Klinkers

Vervanging van asfaltbestrating en stoeptegels door gele klinkers levert overdag een temperatuurdaling op van 0,7°C op straatniveau. In de nacht heeft deze maatregel geen effect.³²

Bij een verandering van 10% van verhard naar onverhard oppervlak daalt het buurtgemiddelde oppervlaktetemperatuur met 1°C. Op straatniveau is dit groter, hier is geen onderscheid gemaakt tussen bomen en gras.³³

Asfalt

Door lichtgekleurd plaveisel op asfaltwegen aan te brengen kan de albedo van asfaltwegen worden verhoogd. Dit koele asfalt kan zo met 30-40% meer warmte reflecteren dan zwart asfalt.³⁴

Vervanging van asfaltbestrating en stoeptegels door gele klinkers is ook een redelijk effectieve maatregel. Overdag levert dit een temperatuursdaling op van 0,7°C. In de nacht heeft deze maatregel geen effect.³⁵

Uit afbeelding 28 is op te maken dat lichter asfalt meer hitte reflecteert en dus minder bijdraagt aan stedelijke hitte. Uit literatuur valt ook op te maken dat nieuw asfalt over het algemeen meer bijdraagt aan het SHE dan ouder asfalt.³⁶

32. Nijhuis, I. & Streng, J. (2011). Hittestress in Rotterdam, Kennis voor Klimaat Rapport. Alterra Wageningen UR & Climate Proof Cities Consortium. p. 48

33. Heusinkveld, L. Hove C. van, & Jacobs. C. (2010). Ruimtelijke analyse van het stadsklimaat in Rotterdam. Alterra Wageningen UR, p. 6

34. Hitchcock D. (2004). Cool Houston Plan. A plan for cooling the region. HARC., p.10

35. Nijhuis, I. & Streng, J. (2011). Hittestress in Rotterdam, Kennis voor Klimaat Rapport. Alterra Wageningen UR & Climate Proof Cities Consortium, p. 46

36. Hove, B. van, Steeneveld, G. Jacobs C. e.a. (2011). *Exploring the urban island heat intensity of Dutch cities*. Alterra Wageningen UR & Climate Proof Cities Consortium, p. 29

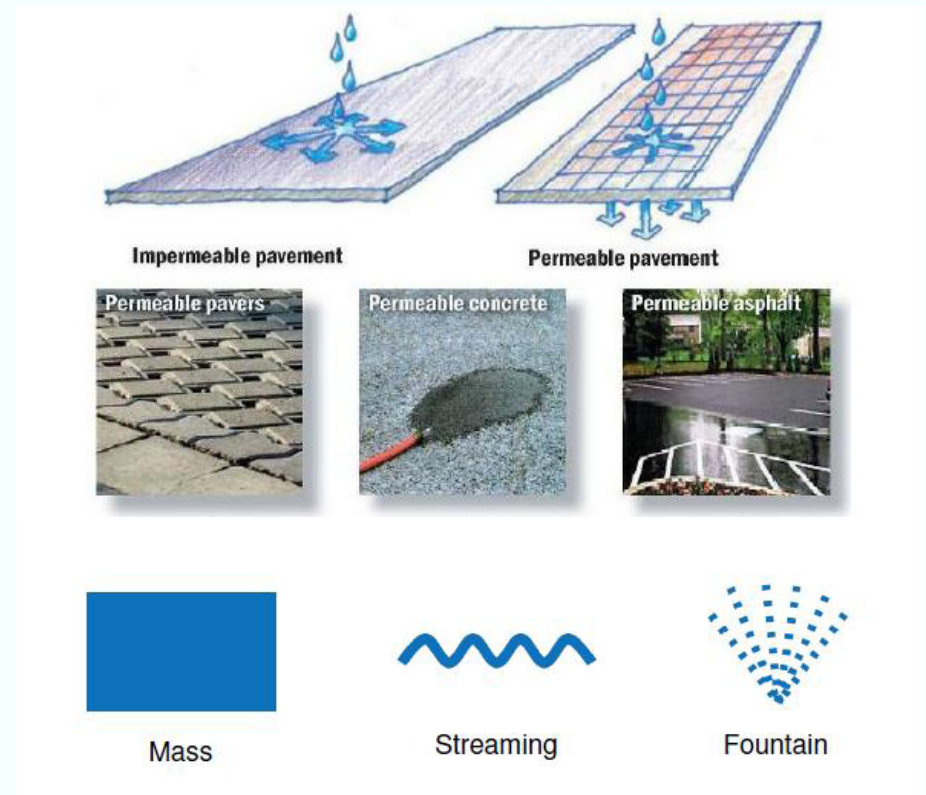
Water

Ondanks dat hitte in Nederland vaak gepaard gaat met hoge luchtvochtigheid is het een misverstand te denken het koelen van wijken met water geen zin heeft.³⁷ Water heeft een verkoelend effect op de stad en kan het SHE doen terugdringen. Uit onderzoek van TNO is gebleken dat water geen significante invloed heeft op de oppervlaktetemperatuur.³⁸ Dit is te verklaren in de zin dat water, doordat het verdampt, alleen de luchttemperatuur doet afkoelen.

Water heeft een gemiddelde verkoeling van 1-3°C met een bereik van ongeveer 30-35m. Een groter koelingseffect is mogelijk bij een grotere watermassa, stroming of bij verspreiding zoals bij een fontein.³⁹ Water is vooral in het voorjaar en aan het begin van de zomer een koeltebron. Water warmt erg langzaam op, hierdoor kan water in de loop van de zomer zelfs een warmtebron zijn.

Met regenwater kan erg veel worden bereikt, er kunnen plekken in de stad worden gecreëerd waar water kan worden opgevangen (zoals waterpleinen/ wadi's/ daken) of men gebruik maken van meer doorlaatbare straatbekledingsmaterialen (zie figuur 29). Qua effect zijn de mogelijkheden om te koelen met water als volgt gerangschikt:

1. Vijver/ waterplas (mate van effect neemt toe met de grootte van oppervlak, een brede watergeul in het midden van de straat levert een verkoeling op van 0,9°C om 15:00 en 0,4°C om middernacht (luchttemperatuur op leefniveau 1,8 meter))⁴⁰
2. Stromend water
3. Verspreidend water zoals een fontein (dit levert een koeling op van 3°C wat merkbaar is tot 35m omtrek (Blijkt uit een onderzoek in Japan uit 1981)).³⁷



Figuur 29. Waterafvoer en koeling door water. Bron: *The Chicago Green Alley Handbook*

37. Kleerekoper L. (2009). *A heat robust city. Case study designs for two neighbourhoods in the Netherlands*. Delft University of Technology, p. 21-22

38. Klok, L., Broeke, H. ten, Harmelen, T. van, e.a. (2010). Ruimtelijke verdeling en mogelijke oorzaken van het hitte-eiland effect. TNO & Waterwatch, p. 29

39. Kleerekoper L. (2009). *A heat robust city. Case study designs for two neighbourhoods in the Netherlands*. Delft University of Technology, p. 5

40. Nijhuis, I. & Streng, J. (2011). *Hittestress in Rotterdam, Kennis voor Klimaat Rapport*. Alterra Wageningen UR & Climate Proof Cities Consortium, p. 49

2.7 Oplossingen - stedelijk niveau

Inleiding

Op stedelijk niveau (zie bijlage 11) zijn verschillende maatregelen toe te passen om het stedelijk hitte eiland effect te verminderen.

Water

Sommige steden voeren regenwater direct af en slaan het niet op of voeren het water niet vertraagd af. Dit heeft als negatief gevolg dat water niet voor een verkoelend effect kan zorgen: water verdwijnt namelijk snel in het riool. Door oppervlaktewater in de stad te laten, koelt het stedelijk oppervlak overdag af, doordat het water verdampt en dit voor een verkoelend effect zorgt. Aan de andere kant kan water nadelig zijn. Aan het eind van de zomer warmt water de wijk in de nacht op. Water houdt namelijk langer warmte vast dan de omgeving. Voor een warme periode geldt dat water op een gegeven moment geen verkoelend effect heeft maar een verwarmende factor kan zijn. Al met al zijn er meer positieve effecten van water dan nadelige.

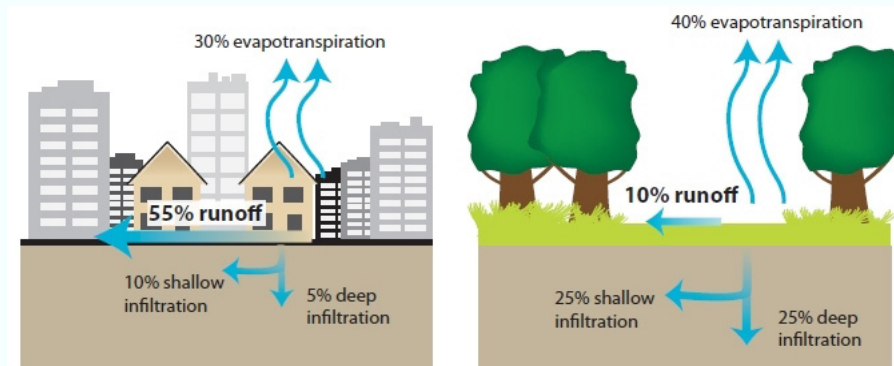
Groen

Parken

Uit een scriptie van Laura Kleerekoper⁴¹ blijkt dat parken een verkoelend effect hebben dat zelfs omliggende wijken koelt: *'Parks have an average cooling effect of 1-6°C that spreads 100 to 1000 meters into an urban area. A green facade or roof cools the outdoor environment with 0.5-3°C. However this is very dependent on the amount of water the plant or tree has available.'* Het koelend effect reikt 100-1000 meter en is afhankelijk van luchtstromen en de stedelijke morfologie. Uit figuur 31 blijkt dat er beter meer verspreid klein groen kan zijn dan voor één stad één groot park te hebben, zodat er meer verkoelende invloedssfeer ontstaat. Een halvering van de hoeveelheid groen door verdichting en vermindering van groen kan leiden tot een verhoging van het SHE met enkele tienden van graden. Dit effect is zo marginaal, omdat de hoeveelheid groen in centra nu al klein is.⁴²

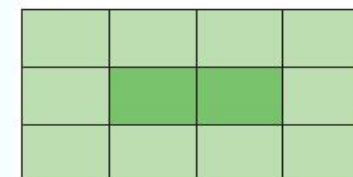
Bomen

Wanneer het verharde oppervlak van een park groter is dan 50%, is de kans groot dat een dergelijk park zelf een hitte eiland is.⁴³ Grofweg kan dus gezegd worden dat naarmate de hoeveelheid bomen en struiken in een park toeneemt, het park koeler is.

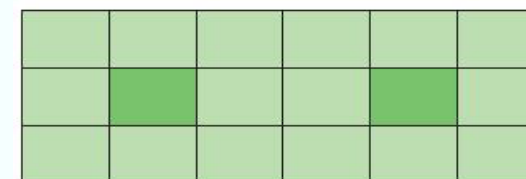


Figuur 30. Verschil in afvoer van water tussen stad en land. Bron: US Environmental Protection Agency

1 groot park



2 kleine parken



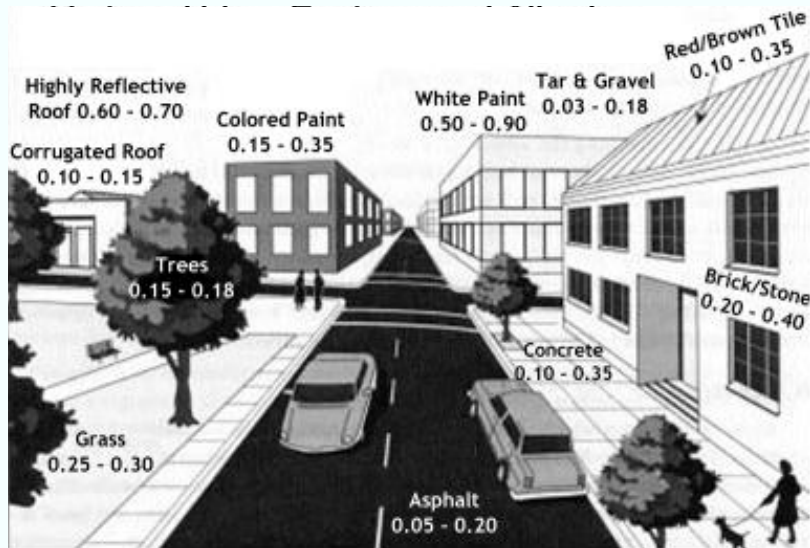
Park Invloedsfeer

Figuur 31. De koelingseffecten van parken, Alterra (2011)

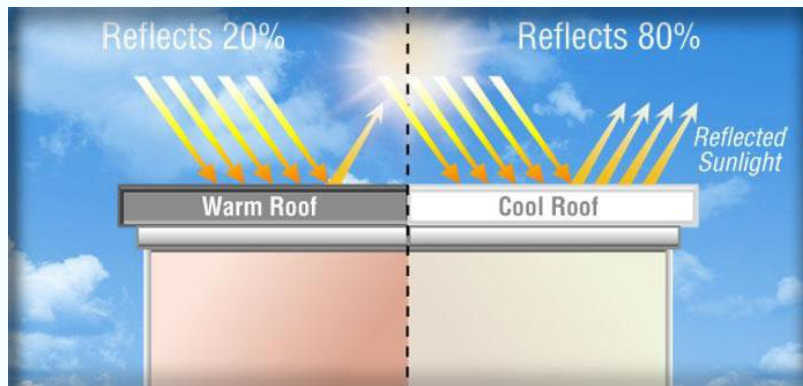
41. Kleerekoper L. (2009). *A heat robust city. Case study designs for two neighbourhoods in the Netherlands*. Delft University of Technology, p. 5

42. Duyzer, J. Klok, L. Verhagen, H. (2011). Hoge temperaturen ten gevolge van het stedelijk hitte-eiland effect nu en in de toekomst. TNO, p. 42

43. Kuypers, V. & Vries, B. de, (2008). Groen voor klimaat: www.kennisvoorklimaat.nl, p. 5



Figuur 32. Stedelijke albedo's. Bron: Environmental Protection Agency (2008)



Figuur 33. Koele witte daken vergeleken met standaard daken. Bron: heat island group (2011)

Bebouwing

Albedo

Voor de stadsregio Rotterdam/ Den Haag is berekend dat een verhoging van de albedo met factor twee, leidt tot een verlaging van het SHE met bijna 3°C.⁴⁴

Daken

Een studie uit Toronto voorspelde dat het transformeren van 50% van de daken naar groene daken voor een verkoeling van 1°C over de gehele stad zal zorgen. Daarnaast werd berekend dat koele daken en wegen in combinatie met bomen een verlagend effect van 20% op het stedelijke hitte eiland heeft. Ook werd de energie besparing hiervan doorberekend, dit kwam voor de gehele stad uit op \$4 miljoen dollar per jaar.⁴⁵

Materiaalgebruik

Laura Kleerekoper stelt in haar paper: "Met een stadsbrede albedo-verhoging van 25-40% kan een groot effect worden bereikt" een temperatuurverlaging van 1-4°C.⁴⁶ Hieruit blijkt dat materiaalgebruik wel degelijk invloed heeft op stedelijke hitte, alleen is nog niet bekend hoe groot die invloed is en is het de vraag of de kosten zullen opwegen tegen de baten.

Wanneer er op het verhogen van weerkaatsingsvermogen en verlagen van absorptievermogen wordt ingezet is het effectiever om dit vooral bij daken en wegen te doen. Op muren kan minder gestuurd worden omdat sommige wanden elkaar kunnen opwarmen als ze allebei veel weerkaatsingsvermogen bevatten.

Energie

Gebouwen die in de schaduw staan kunnen energie reduceren van 25% tot maximaal 80%. Uit Japans onderzoek, wat beschreven wordt in de thesis van Laura Kleerekoper, wordt vermeld dat een temperatuurverhoging van 1°C buiten leidt tot 6,6% elektriciteitsvraag verhoging binnen.⁴⁷

44. Duyzer, J. Klok, L. Verhagen, H. (2011). Hoge temperaturen ten gevolge van het stedelijk hitte-eiland effect nu en in de toekomst. TNO, p. 42

45. Akbari (2001). Energy Saving Potentials and Air Quality Benefits of Urban Heat Island Mitigation

46. Kleerekoper L. (2009). A heat robust city. Case study designs for two neighbourhoods in the Netherlands. Delft University of Technology, p.23

47. Kleerekoper L. (2009). Design principles for Urban Heat Management. Delft University of Technology, p. 9

Straatpatronen

Straten die van oost naar west lopen zijn over het algemeen warmer dan straten die noord-zuid lopen (zie figuur 34). Wanneer er sprake is van nieuwbouw of herstructurering in bijvoorbeeld vooroorlogse stadswijken is het (vanuit het oogpunt van stedelijke hitte) verstandig om oost-west straten te vermijden en voornamelijk te verkavelen op noord-zuid.

Bij de herinrichting van de openbare ruimte in een bestaande wijk is het verstandig om in oost-west straten met name de noordgevels te beschaduwten en in verhouding meer groen/ water aan te brengen dan in noord-zuid straten. Groen is ook nodig in noord-zuid straten om op het warmste moment van de dag schaduw te bieden, alleen in mindere mate.

Wind

Een optimale hoogte-breedte ratio kan zorgen voor meer verkoeling door wind. Volgens Laura Kleerekoper is de beste ventilatie is mogelijk bij een HW ratio van 0,5.⁴⁸Een aantal voorbeelden hoe het beste met de H/W ratio kan worden ontworpen staat in figuur 35 weergegeven.

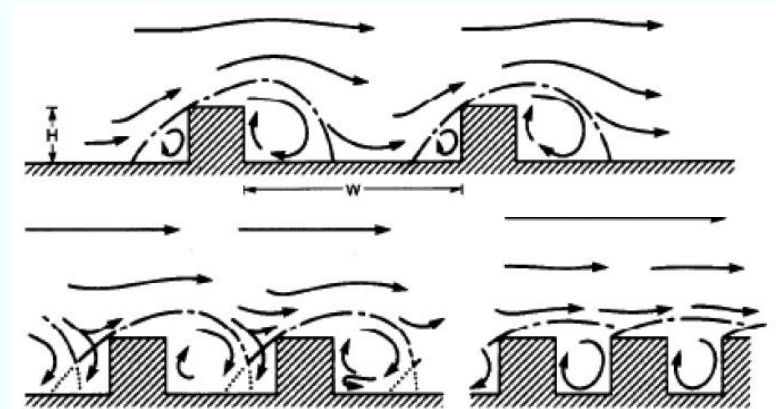
Voor Nederlandse steden is het vanuit het oogpunt van stedelijke hitte het handigst om stedenbouwkundige structuren te bedenken waarbij rekening gehouden wordt met koele westenwind (zeewind). Ontwerpers zouden er rekening mee kunnen houden dat in Nederland met extreem weer (hitte- en koude golven) de wind uit het oosten waait. Men zou in stedenbouwkundige structuren kunnen sturen op het 'blokkeren' van oostenwind en het 'verwelkomen' van een westenwind (zie figuur 36), welke in Nederland overigens ook het meeste voorkomt.⁴⁹

Figuur 34. De relatie tussen de oriëntatie van straten en de luchttemperatuur. Bron: onbekend

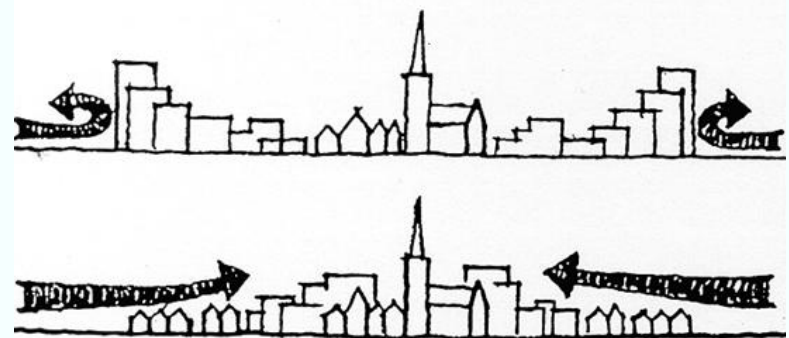
orientation	aspect ratio	PET _{max} (°C)	T _a (°C)	v (ms ⁻¹)
E-W	H/W = 0.5	62 - 68	35.2 - 39.6	0.03 - 0.14
	H/W = 1	62 - 66	33.6 - 38.8	0.03 - 0.13
	H/W = 2	62 - 67	37.9 - 38	0.16 - 0.2
	H/W = 3	62 - 65	34.6 - 37.6	0.1
	H/W = 4	62 - 65.6	34.3 - 37.1	0.16 - 0.2
N-S	H/W = 0.5	62 - 65.4	35 - 39.5	0.01 - 0.09
	H/W = 1	60 - 65.7	34.3 - 38.5	0.04 - 0.13
	H/W = 2	58 - 62	35.5 - 37.1	0.23 - 0.24
	H/W = 3	58 - 61.2	35.6 - 37.3	0.1
	H/W = 4	54 - 58	36.7	0.25

Toelichting
E-W: oost-west
N-S: noord-zuid
H/W: hoogte-breedte verhouding
PET_{max}: maximale gevoelstemperatuur
T_a: gemiddelde luchttemperatuur
V: windsnelheid

Figuur 35. De relatie tussen de hoogte-breedte (H/W) van straatpatronen en wind. Bron: Oke (1988)



Figuur 36. Het weren van ongewenste windstromen/ het toelaten van gewenste windstromen. Bron: onbekend



48. Kleerekoper L. (2009). A heat robust city. Case study designs for two neighbourhoods in the Netherlands. Delft University of Technology, p.23

49. Blijkt uit feedback van L. Kleerekoper

