



**Milieu en Leefomgeving**

Princetonlaan 6  
Postbus 80015  
3508 TA Utrecht

[www.tno.nl](http://www.tno.nl)

T +31 88 866 86 06

F +31 88 866 36 21

[wegwijzer@tno.nl](mailto:wegwijzer@tno.nl)

**TNO-rapport**

**TNO-034-UT-2010-02195\_RPT-ML**

**Hittebeperkende maatregelen voor  
Rotterdam onderzocht met Envi-met microschaal  
klimaatsimulaties**

Datum	2 december 2010
Auteur(s)	Lisette Klok
Opdrachtgever	Programmabureau Kennis voor Klimaat
Projectnummer	034.21618
Aantal pagina's	37 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	1

Dit onderzoekproject werd uitgevoerd in het kader van het Nationaal Onderzoekprogramma Kennis voor Klimaat ([www.kennisvoorklimaat.nl](http://www.kennisvoorklimaat.nl)). Dit onderzoekprogramma wordt medegefinancierd door het Ministerie van VROM.

Alle rechten voorbehouden. Niets uit dit rapport mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

## Samenvatting

In dit onderzoek is voor een zomerse dag het verkoelende effect van 9 hittebeperkende klimaatmaatregelen onderzocht voor een vereenvoudigde situatie van een straat in Rotterdam. Dit is gedaan met het microschaal klimaatmodel Envi-met. Daarmee is binnen het Kennis voor Klimaatonderzoek (KvK) 'Hittestress in Rotterdam' nieuwe kwantitatieve informatie beschikbaar gekomen over het effect van klimaatmaatregelen die hitte beperken.

De onderzochte maatregelen grijpen in op water, groen, materiaalgebruik en beschaduwing. De maatregelen zijn geselecteerd op grond van een lijst met toepasbaar bevonden *no regret* maatregelen voor Rotterdam en op grond van wat mogelijk is binnen het Envi-met model.

Envi-met is een 3-dimensionaal non-hydrostatisch microschaal klimaatmodel dat de interacties tussen bodemoppervlak, gebouwen, vegetatie en atmosfeer in een stedelijke omgeving met een typische ruimtelijke resolutie van 0,5 tot 10 m en een temporele resolutie van 10 seconden simuleert. Envi-met is ontwikkeld door prof. dr. M. Bruse van de Universiteit van Mainz.

Het verkoelende effect van de 9 maatregelen is bepaald ten opzichte van een zeer versteende referentiesituatie die gebaseerd is op een wijkstructuur in de wijk Mathenesse van Rotterdam. De meteorologische condities van de gesimuleerde zomerse dag worden bepaald door een windsnelheid van 3,4 m/s uit oostelijke richting, een initiële luchttemperatuur van 17 °C en een relatieve luchtvochtigheid van 70%.

*Uit dit onderzoek is gebleken dat bomen, water en andere bestrating de effectiefste hittebeperkende maatregelen zijn in termen van een verlaging in de luchttemperatuur, en dan met name als het gaat om het verlagen van de luchttemperatuur lokaal en overdag.*

Het temperatuureffect van de hittebeperkende klimaatmaatregelen is bepaald op 1,8 m hoogte voor de situatie op straat en in de binnentuinen voor het heetste moment van de dag (15:00 uur). De resultaten laten zien dat bomen in de straat de meest verkoelende werking hebben met een gemiddeld effect van 1,2 °C. Naast bomen, is ook de aanleg van een watergeul in het midden van de straat een effectieve maatregel, met een verkoelende werking van 0,9 °C. De combinatie van deze twee maatregelen is goed voor een verkoelend effect van 1,9 °C. Ook voor de situatie 's nachts (00:00 uur) zijn de effecten van de maatregelen bepaald. Dan zorgen bomen en water ook voor verkoeling, maar het effect is dan kleiner. Bomen zorgen 's nachts voor een temperatuurdaling van 0,7 °C en water voor 0,4 °C. Vervanging van asfaltbestrating en stoeptegels door gele klinkers is ook een redelijk effectieve maatregel en zorgt voor een temperatuurdaling op straat van 0,7 °C overdag. 's Nachts heeft deze maatregel geen effect.

Helaas reikt het effect van al deze maatregelen niet ver. Achter de huizen, in de binnentuinen, is het verkoelende effect ervan niet meer merkbaar (minder dan 0,1 °C). De maatregelen lijken vooral effect te hebben op het lokale klimaat, daar waar de maatregelen zijn genomen. Verkoeling in de binnentuinen kan worden gecreëerd wanneer ter plaatse maatregelen worden genomen. Zo zorgt vervanging van klinkers in

de binnentuinen door gras voor een temperatuurdaling van 0,9 °C overdag (0,6 °C 's nachts). De overige onderzochte maatregelen (aanpassing van de huishoogte, gebruik van lichtgekleurde materialen voor de gebouwen en verandering van de oriëntatie van de bebouwing) blijken op grond van de Envi-met berekeningen minder effectief. Ook verdienen deze maatregelen minder voorkeur vanwege het feit dat zij niet eenvoudig toepasbaar zijn in bestaande woonwijken.

Voor de interpretatie van bovenstaande resultaten is het belangrijk om te onthouden dat de uitkomsten geldig zijn voor zeer specifieke situaties. Wanneer bijvoorbeeld het stratenpatroon, de gebouwstructuur, de watertemperatuur van de watergeul, of de gebruikte materialen anders zijn en de meteorologische situatie of bodemcondities verschillen, kunnen de effecten anders uitpakken. Aangezien uit het onderzoek is gebleken dat bomen het grootste verkoelende effect hebben op straat, zou het interessant zijn om in een vervolgonderzoek aandacht te besteden aan het effect wanneer de bomen anders geclusterd zijn, in een ander straattypen staan of wanneer andere boomsoorten worden gebruikt. Metingen in werkelijke situaties zouden daarbij het modelonderzoek kunnen ondersteunen.

Daarnaast zou het ook nuttig zijn om in een vervolgonderzoek niet alleen aandacht te besteden aan het effect van hittebeperkende klimaatmaatregelen op de luchttemperatuur maar ook op thermisch comfort, omdat thermisch comfort een bepalende factor is voor hittestress. Als laatste wordt, met het oog op klimaatverandering en de mogelijke toename in duur en frequentie van hittegolven, geadviseerd in een vervolgonderzoek het effect van de maatregelen te onderzoeken voor een hittegolfperiode. Doordat gedurende een langere hete periode de stad (bodem en gebouwen) langzaam opwarmt en het aanwezige water en bodemvocht afneemt, zal het effect van de onderzochte klimaatmaatregelen anders kunnen zijn dan uitgerekend in deze studie.

## Inhoudsopgave

	<b>Samenvatting</b> .....	<b>2</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b> .....	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Selectie van de onderzochte hittebeperkende klimaatmaatregelen</b> .....	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Envi-met</b> .....	<b>9</b>
<b>4</b>	<b>Modelopzet en werkwijze</b> .....	<b>12</b>
<b>5</b>	<b>Resultaten</b> .....	<b>16</b>
5.1	Conditie in de referentiesituatie .....	16
5.2	Temperatuureffect van de hittebeperkende klimaatmaatregelen .....	19
<b>6</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b> .....	<b>25</b>
<b>7</b>	<b>Referenties</b> .....	<b>27</b>
<b>8</b>	<b>Verantwoording</b> .....	<b>28</b>
	<b>Bijlage(n)</b>	
	A Schematische weergaves van de modelopzetten voor de situaties met hittebeperkende klimaatmaatregelen	

# 1 Inleiding

Klimaatverandering zal leiden tot hogere temperaturen, mogelijk meer hittegolven en een grotere kans op hittestress. Door het hitte-eiland effect zal deze kans in steden het grootst zijn. Om het stedelijk gebied leefbaar te houden en voorbereid te zijn op extreem hoge temperaturen, kunnen maatregelen op lokaal stedelijk inrichtingsniveau genomen worden. Denk hierbij aan de aanleg van meer water en groen in wijken en het gebruik van andere stedelijke materialen. Omdat het effect van dergelijke maatregelen nog onvoldoende gekwantificeerd is, zijn in het kader van het Kennis voor Klimaatonderzoek 'Hittestress in Rotterdam' een aantal hittebeperkende klimaatmaatregelen onderzocht met het microschaal klimaatmodel Envi-met. Van deze maatregelen is voor een zomerse dag het verkoelende effect op de luchttemperatuur bepaald in een sterk vereenvoudigde situatie die gebaseerd is op een straat in Rotterdam. De resultaten hiervan staan beschreven in dit rapport.

In totaal zijn de effecten van 9 klimaatmaatregelen doorgerekend. De resultaten van de situaties waarbij maatregelen zijn genomen zijn vergeleken met een situatie waarin geen maatregelen zijn genomen: de referentiesituatie. De referentiesituatie is gebaseerd op een wijkstructuur in Mathenesse, Rotterdam, bestaande uit huizenblokken van ongeveer 60 bij 200 m met binnentuinen. De woonhuizen zijn ongeveer 16 m diep en de meeste huizenblokken tellen vier woonlagen. De straten zijn soms geasfalteerd en soms bestraat met klinkers. Er zijn geen voortuinen en hier en daar staan bomen in de straat. Enkele foto-impresies van deze wijk zijn in figuur 1 weergegeven.



Figuur 1: Impressies van de situatie die is gesimuleerd in Envi-met. De foto's zijn van de wijk Mathenesse in Rotterdam rond de Hondiusstraat, Lieve Verschuierstraat, De Vliegerstraat en de Snellinckstraat. Deze wijk is gebruikt om de referentiesituatie voor de modelstudie te definiëren. (Bron: <http://maps.google.nl/>)

Hoofdstuk 2 van dit rapport geeft een uitleg van de onderzochte hittebeperkende klimaatmaatregelen. Een beknopte beschrijving van het Envi-met model waarmee de berekeningen zijn uitgevoerd is in hoofdstuk 3 gegeven. Hoofdstuk 4 beschrijft de modelopzet. De resultaten staan in hoofdstuk 5, en het rapport wordt afgesloten met conclusies en aanbevelingen in hoofdstuk 6.

## 2 Selectie van de onderzochte hittebeperkende klimaatmaatregelen

In dit onderzoek zijn in totaal 9 klimaatmaatregelen onderzocht. Deze maatregelen zijn geselecteerd op grond van de maatregelen die eerder in dit Kennis voor Klimaat onderzoek (Van Harmelen et al., 2010) toepasbaar zijn bevonden voor Rotterdam en op grond van wat mogelijk is binnen het Envi-met model.

Envi-met is een model dat vooral bestemd is om meteorologische condities op het schaalniveau van straat tot wijk (1 tot 500 m) te simuleren. Daardoor zijn met name hittebeperkende klimaatmaatregelen die ingrijpen op het stedelijk ontwerp op straatniveau (gebouwen, bouwmaterialen, oriëntatie, groene ruimte, water) geschikt voor simulatie in Envi-met.

Van Harmelen et al. (2010) hebben een inventarisatie uitgevoerd naar mogelijke en geschikte hittebeperkende klimaatmaatregelen voor Rotterdam. Hieruit zijn de *no regret* maatregelen geselecteerd, zijnde de maatregelen die geen negatief koelend (en soms zelfs een verwarmend) effect in de winter hebben en vrij gemakkelijk (binnen 5 jaar) weer teruggedraaid kunnen worden. In deze inventarisatie waren de maatregelen onderverdeeld naar de aspecten waarop zij aangrijpen: water, groen, materiaalgebruik, beschaduwning, koeling van gebouwen, zonwering en isolatie, energieconversie, en gedrag. De *no regret* maatregelen bleken kleinschalig groen, blauwe daken en fontein te zijn. Flexibel en zonder koelend effect in de winter zijn ook het sproeien van daken, gevels en straten. Op gebouwniveau zijn zonwering en actieve koeling *no regret* maatregelen. Ook waren er enkele gedragsmaatregelen geselecteerd, maar deze zijn niet binnen Envi-met te simuleren.

Uit de *no regret* maatregelen kunnen met name het effect van kleinschalig groen en wateroppervlakken goed met Envi-met bepaald worden. Blauwe daken, groene daken, fontein, en het besproeien van gevels en daken kunnen met de huidige Envi-met versie echter niet gesimuleerd worden. Zonwering (beschaduwning) kan door verschillende ingrepen worden bewerkstelligd. In Envi-met is dit bijvoorbeeld te simuleren door de gebouwhoogte- of oriëntatie aan te passen, of door schaduwrijke vegetatie te plaatsen. Aanpassing van het stedelijk materiaalgebruik wordt niet genoemd in de lijst van *no regret* maatregelen, maar is wel goed te simuleren met Envi-met. Daarom is deze maatregel toch onderzocht in deze studie.

Uiteindelijk zijn op grond van bovenstaande argumenten de volgende maatregelen doorgerekend in dit onderzoek, waarbij staat vermeld op welk aspect zij ingrijpen:

1. hoogte gebouwen → zonwering
2. materiaalgebruik van gebouwen → materiaalgebruik
3. materiaalgebruik van straten → materiaalgebruik
4. water in de straat → water
5. gras in de straat → kleinschalig groen
6. bomen in de straat → kleinschalig groen
7. gras in de binnentuinen → kleinschalig groen
8. oriëntatie van de gebouwen → zonwering
9. bomen en water in de straat → combinatie van kleinschalig groen en water

De laatste maatregel (bomen en water in de straat) is eigenlijk een combinatie van maatregel 4 en 6, die, zoals later uit het onderzoek zal blijken, de twee effectiefste maatregelen zijn. Meer achtergrond over de mechanismen van de hittebeperkende klimaatmaatregelen is terug te vinden in Van Harmelen et al. (2010). Hoe de maatregelen precies in Envi-met zijn gesimuleerd is beschreven in Hoofdstuk 4: Modelopzet en werkwijze.



### 3 Envi-met

In dit hoofdstuk volgt een korte beschrijving van het Envi-met model dat gebruikt is voor het simuleren van de hittebeperkende klimaatmaatregelen. Uitgebreidere informatie en gedetailleerde beschrijvingen van de gebruikte vergelijkingen in het model zijn beschikbaar op de Envi-met website (<http://www.envi-met.com/>).

ENVI-met is een 3-dimensionaal non-hydrostatisch microschaal klimaatmodel ontwikkeld om de interacties tussen bodemoppervlak, gebouwen, vegetatie en atmosfeer in een stedelijke omgeving met een typische ruimtelijke resolutie van 0,5 tot 10 m en een temporele resolutie van 10 seconden te simuleren. Typische tijdsperiodes die gesimuleerd worden met Envi-met variëren van enkele uren tot twee dagen. Envi-met is ontwikkeld op basis van verschillende projecten door prof. dr. M. Bruse van de Universiteit van Mainz, Duitsland (Environmental Modelling Group, Institute of Geography).

Envi-met is een prognostisch model gebaseerd op de fundamentele stromingsleer- en thermodynamicawetten. Het model simuleert de volgende processen:

- Luchtstroming rond en tussen gebouwen.
- Uitwisseling van warmte en vocht tussen bodemoppervlak, gebouwen en atmosfeer.
- Kortgolvlige en langgolvlige stralingsfluxen rekening houdend met schaduwvorming, reflectie en weerkaatsing door gebouwen en vegetatie.
- Temperatuur van het bodemoppervlak en het oppervlak van gebouwen.
- Turbulentie.
- Water- en warmteuitwisseling in de bodem.
- Uitwisseling van warmte en vocht tussen vegetatie en atmosfeer; transpiratie, evaporatie en de voelbare warmteflux van vegetatie op grond van de fysische vegetatiekenmerken zoals de fotosynthesesnelheid en huidmondjesweerstand.
- Thermisch comfort en thermische indices zoals de stralingstemperatuur.
- Verspreiding van deeltjes en gassen inclusief de sedimentatie van deeltjes op vegetatie en oppervlakken.

Gebouwen, vegetatie, bodemsoorten en emissiebronnen worden bepaald in de modelconfiguratie. Daarnaast kan Envi-met ook waterlichamen (vijvers, rivieren, meertjes) simuleren.

#### *Windveld*

Windsnelheid en -richting worden berekend op grond van de Navier-Stokes vergelijkingen en de non-hydrostatische Boussinesq benadering met een wrijvingsterm voor vegetatie. Het windsnelheidveld wordt voor opgegeven tijdsintervallen opnieuw berekend.

#### *Temperatuur en vocht*

Advectie en diffusie van warmte en vocht worden op grond van het windveld berekend. Vegetatie en bodemoppervlak worden in de vergelijkingen gezien als bron- en verliestermen. Gebouwen zijn alleen een bron- en verliesterm voor temperatuur, niet voor vocht.

#### *Turbulente kinetische energie*

De turbulente kinetische energie wordt berekend op grond van het k-epsilon model. Twee prognostische vergelijkingen voor de energieproductie van turbulentie en dissipatie worden gebruikt om de turbulente energie te simuleren. Uitwisselingscoëfficiënten in de atmosfeer worden op grond van de Prandtl-Kolmogorov relatie berekend.

### *Bodem*

De verticale verdeling van temperatuur en vocht in de bodem of kunstmatige oppervlakken wordt berekend. Voor elke verticale gridbox kan een bodemtype worden opgegeven met bijbehorende eigenschappen om de verdeling van vocht en temperatuur te berekenen. De vergelijking van Clapp en Hornberger bepaalt het transport van water in de bodem. Er wordt rekening gehouden met wateropname door plantenwortels, en met de thermodynamische eigenschappen van de bodem als gevolg van het actuele bodemwatergehalte. Het bodemmodel rekent tot op een diepte van 2 m. Op deze diepte worden temperatuur en vocht constant verondersteld. Het bodemmodel is 1-dimensionaal met uitzondering van de bovenste laag. Deze is 3-dimensionaal om onrealistische temperatuurovergangen in de oppervlaktetemperatuur te voorkomen.

### *Wateroppervlakken*

Wateroppervlakken worden behandeld als een speciaal bodemtype. De processen die meegenomen worden zijn de transmissie en absorptie van kortgolvlige straling in water. Er worden geen berekeningen uitgevoerd aan de tweede energiebalans, namelijk die tussen waterbodem en de grond eronder. Ook rekent Envi-met niet aan de turbulente stroming in het water door temperatuur- en dichtheidsverschillen.

### *Vegetatie*

De temperatuur van het bladoppervlak wordt bepaald op grond van de energiebalans van het bladoppervlak en de actuele meteorologische en plantfysiologische condities (o.a. huidmondjesweerstand). Voelbare en latente warmte worden op grond van het windveld en de geometrie van de vegetatie bepaald. Daarnaast worden de stralingsfluxen inclusief schaduwvorming, absorptie, en terugkaatsing door verschillende gewaslagen berekend. Om de hoogte en de geometrie van de vegetatie mee te kunnen nemen in de berekeningen, moeten de LAD en RAD (Leaf Area Density profile en Root Area Density profile) bekend zijn.

### *Gebouwen*

De oppervlaktetemperaturen van gebouwen en daken worden voor elk gridpunt op grond van de oriëntatie t.o.v. de zon, het albedo, en de uitwisseling met de temperatuur in het gebouw berekend. Warmteuitwisseling tussen gebouwen en atmosfeer wordt bepaald uit het windveld, de turbulentie en de oppervlaktetemperatuur. Om de uitwisseling te kunnen bepalen, moeten de volgende gegevens bekend zijn: warmtetransmissie door gebouwmuren en daken, albedo van de muren en daken, temperatuur in het gebouw.

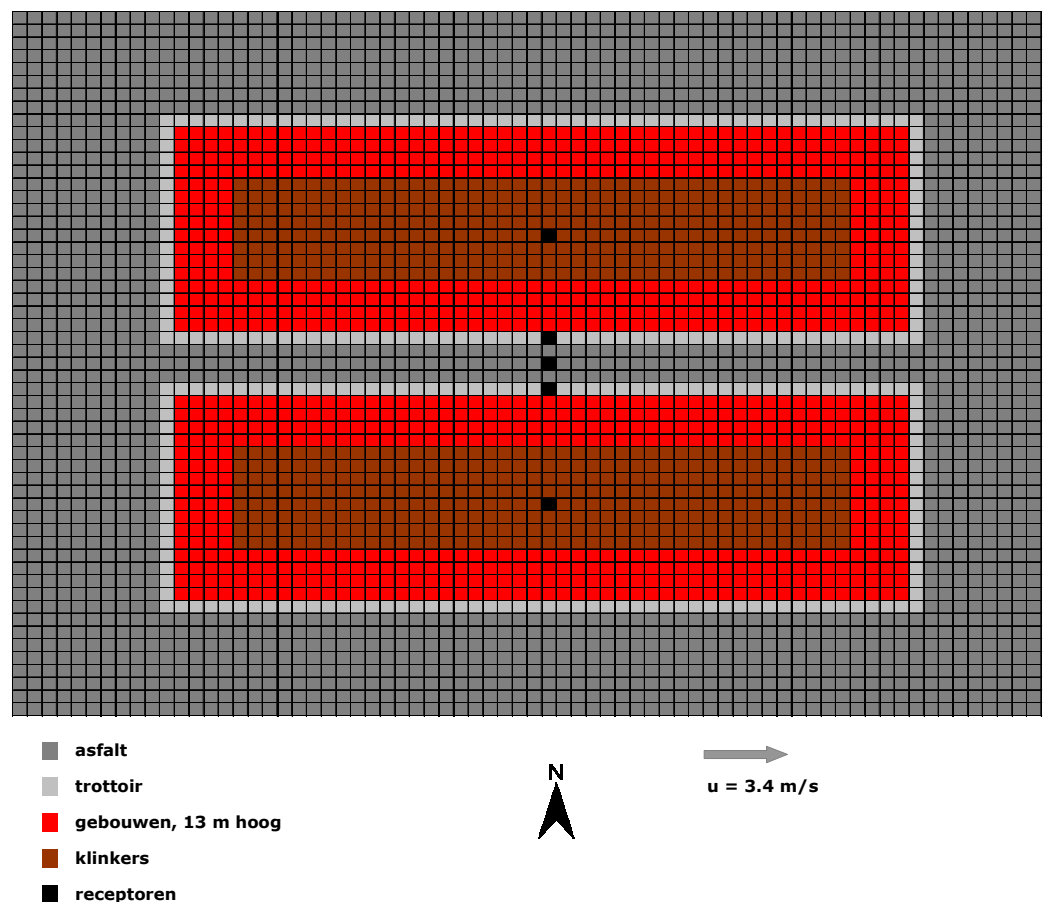
Tot op heden wordt nog steeds gewerkt aan de validatie en evaluatie van het Envi-met model. Dit is niet eenvoudig, omdat bij de validatie van numerieke modellen, zoals Envi-met, metingen nodig zijn. En het is juist vanwege de complexiteit van het uitvoeren van dergelijke metingen dat het gebruik van numerieke modellen zo populair is (Arnfield, 2003). Ali-Toudert (2005) is één van de weinigen die wel metingen heeft uitgevoerd voor verschillende stedelijke situaties, om informatie te verkrijgen over de betrouwbaarheid van Envi-met. Haar bevindingen hebben helaas niet tot toepasbare betrouwbaarheidsintervallen geleid, maar leidden voornamelijk tot enkele suggesties voor modelverbetering. Daarom is het ook niet mogelijk gebleken om in dit onderzoek uitspraken te doen over de betrouwbaarheidsbandbreedte van Envi-met voor de onderzochte hittebeperkende klimaatmaatregelen. Het belangrijkste doel van Envi-met is dan ook niet om de micrometeorologische condities en exacte temperaturen van een specifieke dag te reproduceren. Envi-met geeft vooral inzicht in de micrometeorologische processen die zich

afspelen in een stedelijk gebied. Met andere woorden, het doel van Envi-met is vooral om inzicht te krijgen in relatieve waarden: waar is het kouder, waar is het warmer, en hoe en waardoor verandert dit patroon als de stedelijke situatie anders is.

## 4 Modelopzet en werkwijze

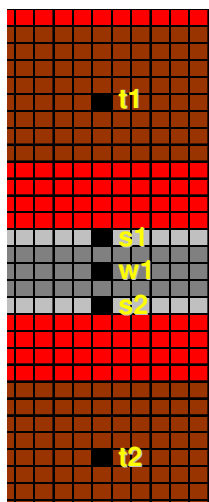
De referentiesituatie is gebaseerd op het stratenpatroon van een Rotterdamse wijk (Mathenesse, figuur 1). Figuur 2 geeft weer hoe een deel van deze wijk is geschematiseerd tot de modelopzet voor de referentiesituatie. Het modeldomein heeft een lengte van 280 m in de x-richting, 220 m in de y-richting en is 50 meter hoog. De ruimtelijke resolutie van de gridcellen is 4 m in zowel de x- als de y-richting en 2 m in de z-richting. De onderste modellaag is opgesplitst in 5 extra modellagen van elk 40 cm om de processen nabij het oppervlak nauwkeuriger te kunnen simuleren. De ruimtelijke resolutie van de gridcellen in het horizontale vlak is zichtbaar gemaakt in figuur 2. Rond het modeldomein zijn drie rijen *nesting grids* gedefinieerd om ongewenste effecten langs de rand van het domein te minimaliseren. Deze zijn niet ingetekend in figuur 2.

De gemodelleerde huizenblokken hebben een lengte van 200 m, een breedte van 64 m en een diepte van 16 m (zie Figuur 2). De huizenblokken zijn in oost-west richting gebouwd, zijn 13 m hoog en hebben platte daken. De straat tussen de huizenblokken is 20 m breed. Om het verschil met de situaties waarin hittebeperkende klimaatmaatregelen zijn genomen zo duidelijk mogelijk te maken is voor de referentiesituatie een zeer versteende en verharde situatie gekozen. De binnentuin is bestraat met rode klinkers en om de huizenblokken heen is een trottoir van 4 m breed gedefinieerd. Het overige deel van het domeinoppervlak bestaat uit asfalt.



Figuur 2: Modelopzet voor de referentiesituatie.

Figuur 2 laat ook de vijf locaties zien waar receptoren zijn geplaatst. Dit zijn locaties waarvoor aparte modeluitvoer wordt gegenereerd. Figuur 3 geeft in een uitsnede van figuur 2 de afkortingen van de receptorlocaties weer die later in het rapport gebruikt worden om de resultaten te presenteren. Er zijn drie receptorlocaties in de straat, waarvan twee op de stoep (s1 en s1) en één in het midden van de weg (w1). Daarnaast zijn er twee receptorlocaties in de binnentuinen (t1 en t2).



Figuur 3: Gebuikte afkortingen van de receptorlocaties.

De eigenschappen van de stedelijke materialen die zijn gebruikt in de referentiesituatie staan in tabel 1 weergegeven. De belangrijkste eigenschappen zijn de albedo en de emissiviteit. De albedo is het reflecterend vermogen van een materiaal voor zonlicht en wordt uitgedrukt in de fractie zonlicht die wordt weerkaatst. De emissiviteit is de fractie warmte die een materiaal uitstraalt in vergelijking tot een zwarte straler met dezelfde temperatuur.

Tabel 1: Albedo en emissiviteit van de stedelijke materialen in de verschillende modelopzetten. De waarden in deze tabel zijn overgenomen uit Envi-met, m.u.v. de eigenschappen van daken met een lichtgekleurde coating. Deze zijn afkomstig uit Rosenzweig (2006).

Materiaal	Albedo	Emissiviteit	Modelopzet
Asfalt	0,2	0,9	referentie
Trottoir (stoeptegels)	0,4	0,9	referentie
Klinkers	0,3	0,9	referentie
Daken (bitumen)	0,13	0,96	referentie
Muren (rode baksteen)	0,3	0,96	referentie
Gele klinkers	0,5	0,9	materiaalgebruik straten
Daken met lichtgekleurde coating	0,5	0,96	materiaalgebruik gebouwen
Lichtgekleurde muren (kalksteen)	0,6	0,96	materiaalgebruik gebouwen

De meteorologische condities van de zomerse dag die gesimuleerd is, worden bepaald door een windsnelheid van 3,4 m/s uit oostelijke richting, een initiële luchttemperatuur van 17 °C en een relatieve luchtvochtigheid van 70%. De bewolgingsgraad is 1/8 gedurende de gehele dag. De simulatieduur beslaat één etmaal en begint op 19 juli om 00:00 uur en eindigt 20 juli om 00:00 uur. Gedurende de dag veranderen temperatuur en luchtvochtigheid als gevolg van instraling en opwarming. Windsnelheid en windrichting worden beïnvloed door de bebouwing en de veranderende stabiliteit van de atmosfeer.

Vervolgens zijn er kleine veranderingen in de modelopzet van de referentiesituatie gedaan om het effect van de hittebeperkende maatregelen te bepalen. Hieronder volgt per maatregel een korte beschrijving van deze aanpassingen. Bij elke maatregel staat de afkorting die later in het rapport wordt gebruikt voor het presenteren van de resultaten. In Bijlage A zijn de schematische weergaves van elk van deze modelopzetten opgenomen.

#### *1. Hoogte gebouwen (HG)*

Alle gebouwen hebben ten opzichte van de referentiesituatie twee extra verdiepingen erbij gekregen. Elk gebouw is nu 19 m hoog in plaats van 13 m.

#### *2. Materiaalgebruik van gebouwen (MG)*

De bakstenen muren van de gebouwen in de referentiesituatie zijn vervangen door kalksteen. Daarnaast zijn de bitumen daken vervangen door daken met een lichtkleurige coating. Hierdoor is de albedo van de daken en de muren hoger geworden (zie tabel 1 voor de exacte waarden). De albedowaarde van de lichtkleurige daken komt overeen met de waarde die was gekozen in een studie naar het effect van maatregelen in New York (Rosenzweig, 2006).

#### *3. Materiaalgebruik van straten (MS)*

Zowel het asfalt als het trottoir van de referentiesituatie zijn vervangen door geelgekleurde klinkers, waardoor de albedowaarde daalt (zie tabel 1). Figuur 4 laat een afbeelding zien van deze klinkers.



Figuur 4: Voorbeeld van geelgekleurde klinkers (Bron: [www.shutterstock.com](http://www.shutterstock.com)).

#### *4. Water in de straat (WS)*

In het midden van de straat is een watergeul aangelegd van 4 m breed over de gehele lengte van de straat.

#### *5. Gras in de straat (GS)*

In het midden van de straat is een grasberm aangelegd met een breedte van 4 m over de gehele lengte van de straat

#### *6. Bomen in de straat (BS)*

Aan weerszijden van de straat zijn bomen, in groepjes versprongen tegenover elkaar geplaatst. De bomen zijn 16 m hoog hebben een dicht kronendak. De onderste meters van de boom bevatten geen takken en bladeren.

#### *7. Gras in de binnentuinen (GT)*

De klinkers in de binnentuinen zijn vervangen door gras.

#### *8. Oriëntatie van de gebouwen (OG)*

In de referentiesituatie zijn de gebouwen in oost-west richting gebouwd. De bebouwing is nu een kwartslag gedraaid waardoor er een noord-zuid gerichte bebouwing ontstaat. De windrichting is daarbij ook aangepast zodat in beide situaties de windrichting parallel aan de straatrichting is.

#### *9. Bomen en water in de straat (BWS)*

Deze situatie is een combinatie van maatregel 4 en 6. Er zijn dus bomen geplant en er is een watergeul aangelegd in de straat.

Het temperatuureffect van elke maatregel is vervolgens bepaald door de gemiddelde temperatuur op de receptorpunten op 1,8 m hoogte op straat en in de binnentuinen te vergelijken met de referentiesituatie. Dit is gedaan voor de situatie overdag en 's nachts, omdat hittebeperkende klimaatmaatregelen zowel overdag als 's nachts tot verkoeling kunnen leiden.

## 5 Resultaten

In dit hoofdstuk worden eerst de resultaten voor de referentiesituatie besproken, zodat een goed beeld ontstaat van de ruimtelijke variatie in de meteorologische condities en de oorzaken. Daarna zullen de resultaten worden besproken die het effect op de luchttemperatuur laten zien wanneer hittebeperkende klimaatmaatregelen worden genomen.

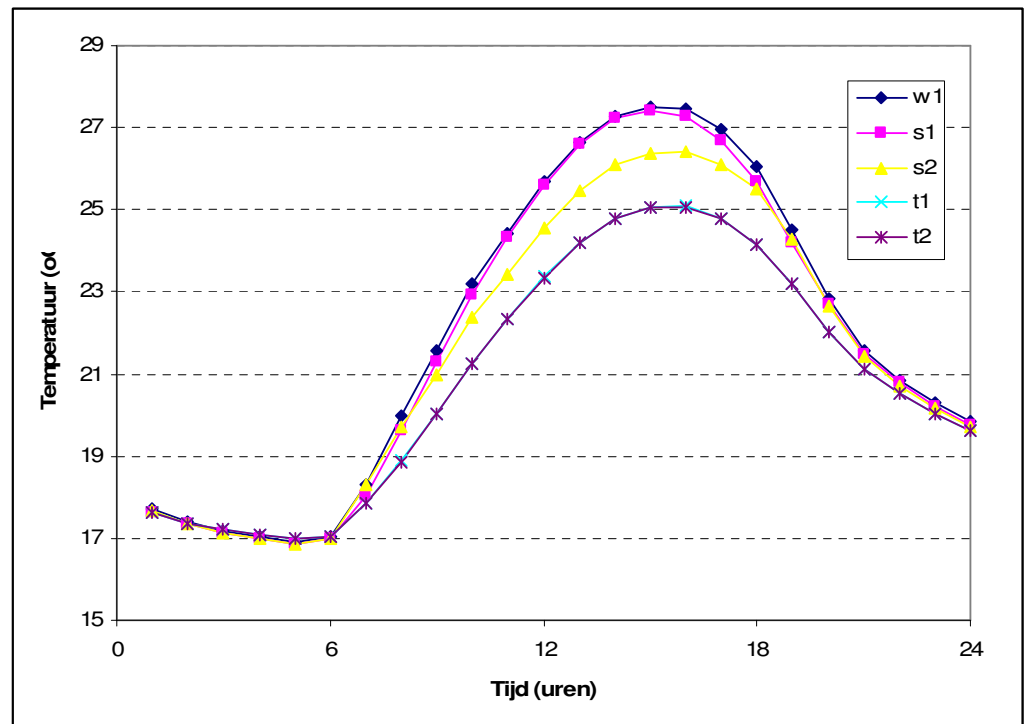
### 5.1 Condities in de referentiesituatie

Het temperatuurverloop op 1,8 m hoogte op de vijf receptorlocaties is weergegeven in figuur 5. Daarbij valt op dat de temperatuur om 15:00 uur het hoogst is (27,5 °C) op de locaties midden op straat (w1 en s1). De temperatuur in de binnentuinen is gedurende het hele etmaal lager dan op straat en bereikt een maximumwaarde van 25,0 °C. Dat het in de binnentuinen iets koeler is dan op straat heeft onder ander te maken met het verschil in materiaal. De klinkers in de binnentuin hebben een hogere albedo dan het asfalt op straat. Hierdoor wordt meer zonnestraling weerkaatst en is er minder warmte beschikbaar om het oppervlak en de lucht te verwarmen. Dit is ook terug te zien in het verloop van de netto straling (figuur 6). De netto straling is de som van alle stralingsfluxen die het oppervlak ontvangt, weerkaatst en uitstraalt. Doordat meer zonlicht weerkaatst wordt, is de netto straling in de tuinen (t1 en t2) lager dan op straat (w1).

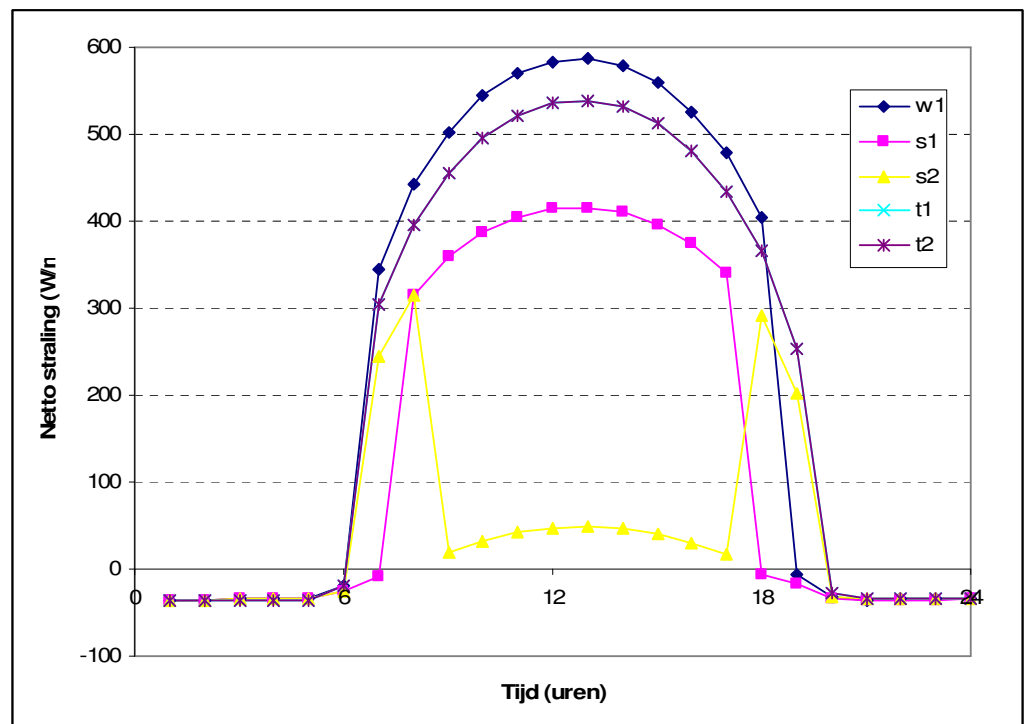
Figuur 5 laat ook zien dat de temperatuur aan de zuidzijde van de straat (s1) lager is dan aan de noordzijde (s2), omdat de zuidzijde meer in de schaduw ligt. Dit is ook terug te zien in de netto straling van figuur 6. Tussen 8:00 en 9:00 uur 's ochtends is bij s2 een sterke teruggang in de netto straling, doordat s2 op dat moment in de schaduw komt te liggen.

Opvallend is dat midden op dag de netto straling voor de locaties op de stoep (s1 en s2) door schaduw en een hoge albedo het laagst is, maar dat deze locaties niet koeler zijn dan de locaties in de binnentuinen (t1 en t2). Dit is het gevolg van het nabijgelegen warme asfalt met een lage albedowaarde en de warme lucht daarboven die mengt met de lucht boven het trottoir.

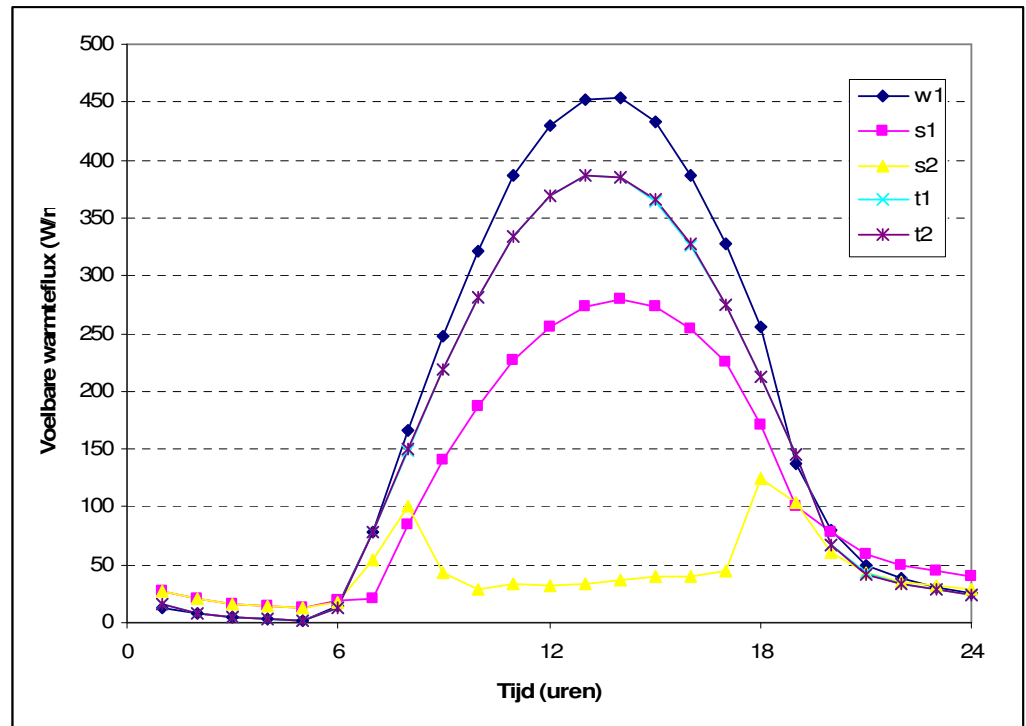




Figuur 5: Temperatuurverloop op 1,8 m hoogte op de 5 receptorlocaties. Zie figuur 3 voor de afkortingen en de locaties van de receptoren.



Figuur 6: Verloop van de netto straling op de 5 receptorlocaties. Zie figuur 3 voor de afkortingen en de locaties van de receptoren.

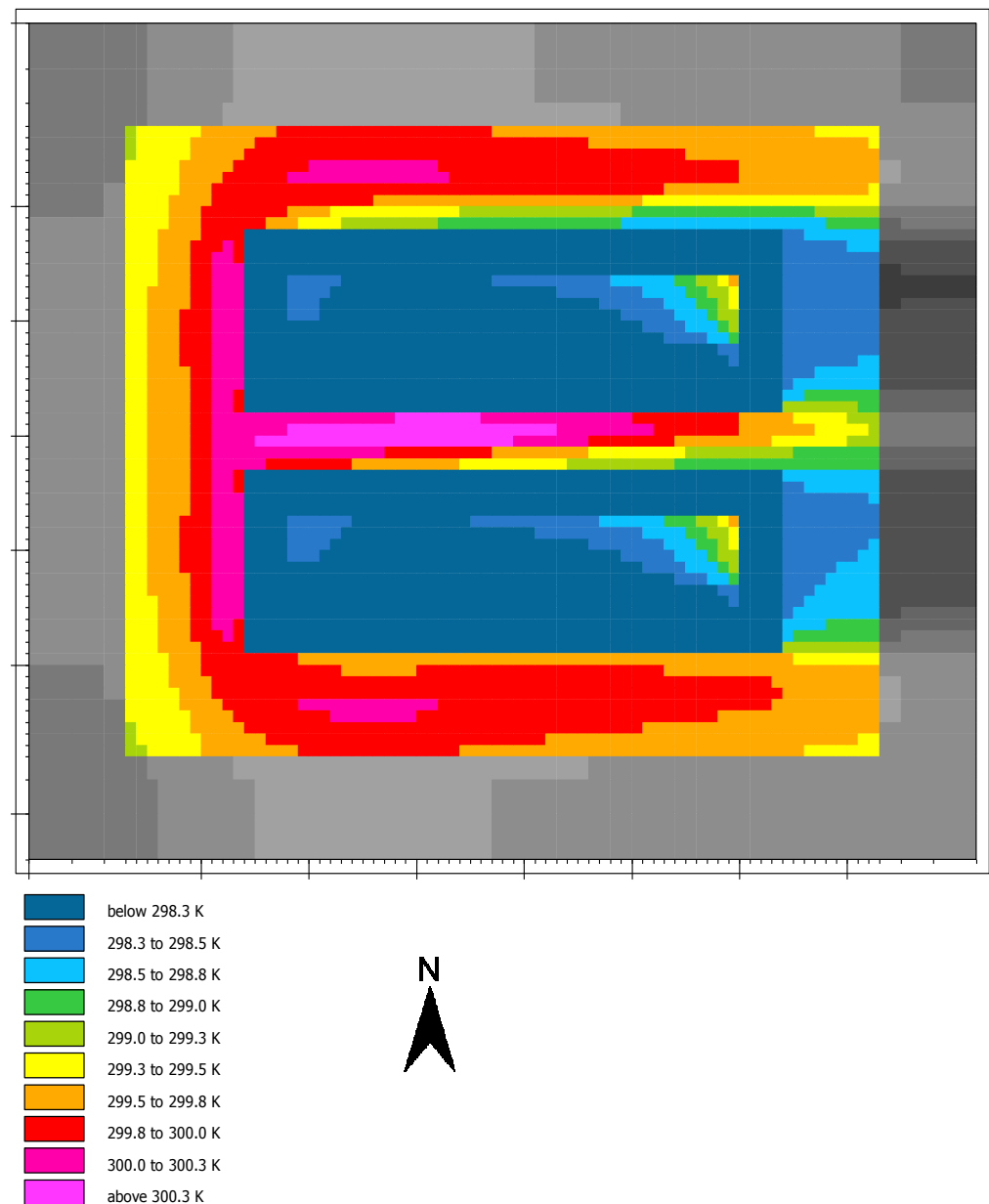


Figuur 7: Verloop in de voelbare warmteflux op de 5 receptorlocaties. Zie figuur 3 voor de afkortingen en de locaties van de receptoren.

De netto straling is gelijk aan de warmte die beschikbaar is voor het opwarmen van de bodem, de lucht en voor verdamping. Aangezien de referentiesituatie geheel uit ondoorlatend asfalt en steen bestaat, is er geen bodemwater beschikbaar voor verdamping. Er is dus geen verdamping van water in het modeldomein en alle energie uit de netto straling wordt gebruikt voor bodemopwarming en opwarming van de lucht. Deze laatste component wordt de voelbare warmteflux genoemd, en is in figuur 7 getoond. De voelbare warmteflux vertoont hetzelfde patroon als de netto straling. De waarden zijn erg hoog, omdat er geen verdamping is, maar ook omdat het een simulatie voor een zonnige zomerse dag betreft.

Niet zichtbaar gemaakt in figuren zijn het verloop van windsnelheid en relatieve luchtvochtigheid gedurende de dag. Deze variabelen vertonen geen sterke variatie gedurende de dag en er zijn geen grote verschillen tussen de receptorlocaties. Windsnelheid varieert tussen 2,5 en 3,0 m/s en de relatieve luchtvochtigheid tussen 60 en 70%.

Omdat het temperatuurmaximum om 15:00 optreedt en de temperatuurverschillen tussen de locaties op dat moment het grootst zijn, is in figuur 8 ook de ruimtelijke variatie in de luchttemperatuur in het gehele modeldomein getoond. Het temperatuurverschil in de straat is maximaal 1,5 °C, waarbij het aan de noordkant van de straat warmer is dan aan de zuidkant, vanwege minder schaduw. Aan de westkant van de straat is het ook warmer dan aan de oostkant. Dit komt omdat om 15:00 uur de westkant beschenen wordt door de zon, en de oostkant niet meer. De binnentuinen zijn duidelijk minder warm, maar in het zonnigste noordoostelijke puntje van elke tuin is de temperatuur wat hoger.



Figuur 8: Ruimtelijk variatie in de luchttemperatuur op 2,0 m hoogte om 15:00 uur (in K). De nesting grids zijn grijs weergegeven.

## 5.2 Temperatureffect van de hittebeperkende klimaatmaatregelen

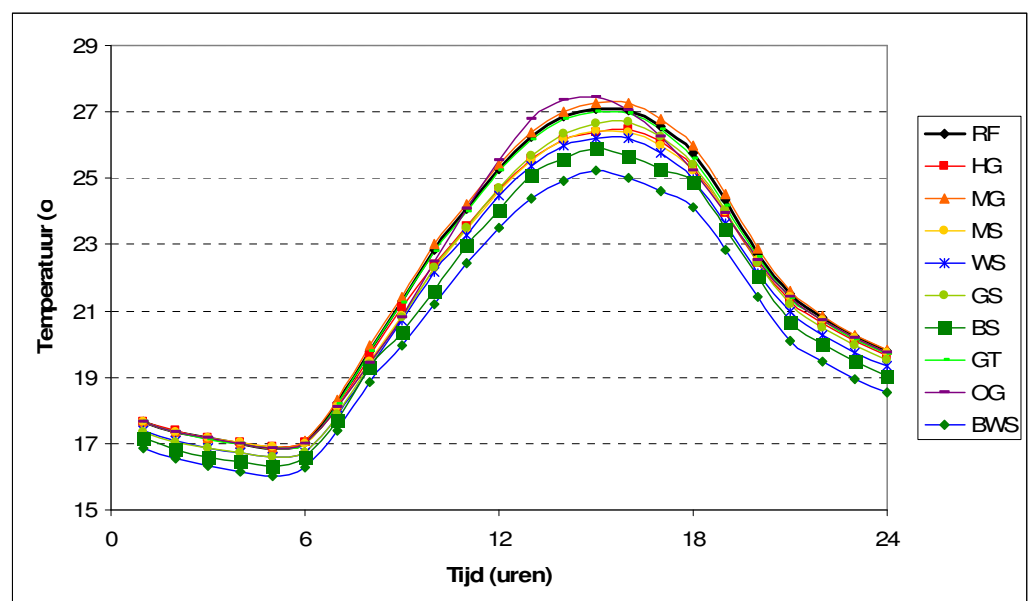
Hitte in het stedelijk gebied kan zowel overdag als 's nachts tot overlast leiden. Daarom is het temperatureffect van de verschillende klimaatmaatregelen voor beide momenten bepaald. Dat wil zeggen dat het verkoelende effect van de maatregelen is bepaald voor 15:00 uur (het heetste moment van de dag) en voor 24:00 uur (het einde van de simulatie). De situatie om 15:00 uur wordt overdag genoemd en die van 24:00 uur 's nachts. Er is onderscheid gemaakt tussen het temperatureffect op straat, waarbij de temperaturen op de receptorlocaties s1, s2 en w1 zijn gemiddeld, en het effect in de binnentuinen, waarbij de temperaturen van de locaties t1 en t2 zijn samengenomen.

Figuren 9 en 10 tonen het gemiddeld temperatuurverloop voor de receptorlocaties op straat en in de binnentuinen op 1,8 m hoogte. De temperatuurverschillen tussen de hittebeperkende klimaatmaatregelen zijn het grootst om 15:00 uur en zijn duidelijker op straat dan in de binnentuinen. In de binnentuinen hebben alleen de situaties waarbij de hoogte van de gebouwen is veranderd (HG) en gras in de binnentuinen is aangelegd (GT) een duidelijk afwijkend temperatuurverloop van de referentiesituatie (RF). Het temperatureffect van de andere maatregelen, die voor het grootste deel ingrijpen op de situatie op straat, reikt nauwelijks tot achter de huizen.

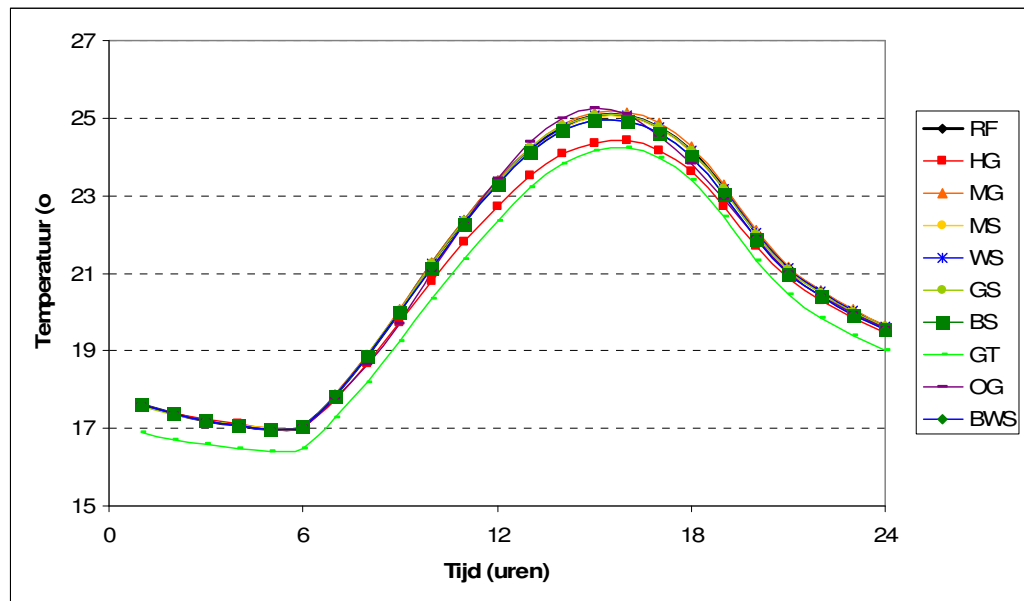
Figuur 9 toont ook dat water en bomen in de straat voor de grootste temperatuurverlaging zorgen, zowel 's nachts als overdag. Daarnaast is het opvallend dat twee maatregelen tot een temperatuurstijging leiden op straat, namelijk materiaalgebruik van gebouwen (MG) en de oriëntatie van gebouwen (OG). Dit zal verderop in dit hoofdstuk nader worden toegelicht.

Tabel 2: Gebruikte afkortingen voor de modelsimulaties.

Afkorting	Simulatie
RF	referentiesituatie
HG	hoogte van gebouwen
MG	materiaalgebruik van gebouwen
MS	materiaalgebruik van straten
WS	water in de straat
GS	gras in de straat
BS	bomen in de straat
GT	gras in de binnentuinen
OG	oriëntatie van de gebouwen
BWS	bomen en water in de straat



Figuur 9: Gemiddeld temperatuurverloop op straat (s1, s2 en w1) op 1,8 m hoogte voor de referentiesituatie en de situaties waarin hittebeperkende klimaatmaatregelen zijn genomen. Zie hoofdstuk 4 of tabel 2 voor de gebruikte afkortingen.



Figuur 10: Gemiddeld temperatuurverloop in de binnentuin (t1 en t2) op 1,8 m hoogte voor de referentiesituatie en de situaties waarin hittebeperkende maatregelen zijn genomen. Zie hoofdstuk 4 of tabel 2 voor de gebruikte afkortingen.

Overigens zijn de gesimuleerde temperaturen in de figuren 9 en 10 hoger aan het einde van de dag dan aan het begin. Dit komt onder andere doordat de eerste uren van de modelsimulaties gebruikt worden om het Envi-met model op te starten. Hierdoor zijn de resultaten van deze gesimuleerde uren (tot ongeveer 6:00 uur) niet betrouwbaar voor interpretatie.

Figuren 11 en 12 tonen het gemiddeld temperatuureffect van de verschillende hittebeperkende maatregelen op straat en in de binnentuinen om 15:00 uur en 24:00 uur. Het temperatuureffect is berekend als het temperatuurverschil tussen de situatie waarin de maatregel is genomen en de referentiesituatie. Hierna zullen de resultaten van elke maatregel afzonderlijk worden toegelicht:

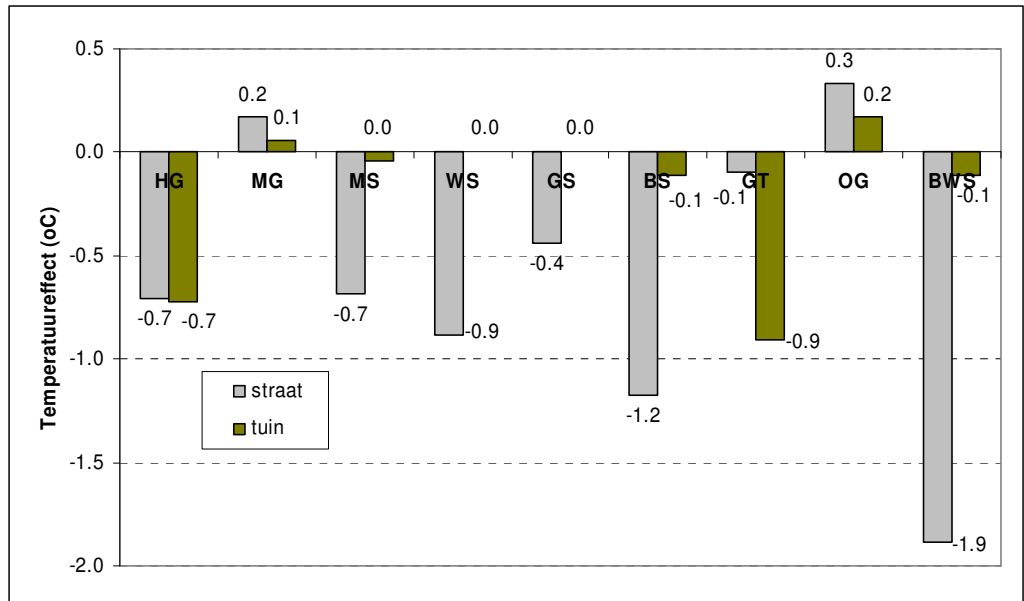
### 1. Hoogte gebouwen (HG)

Aanpassing van de hoogte van gebouwen van 13 naar 19 m zorgt op straat en in de binnentuinen tot een temperatuurdaling van maximaal 0.7 °C. 's Nachts is het effect minder dan 0.2 °C. Het temperatuureffect wordt veroorzaakt doordat er meer schaduwvorming is.

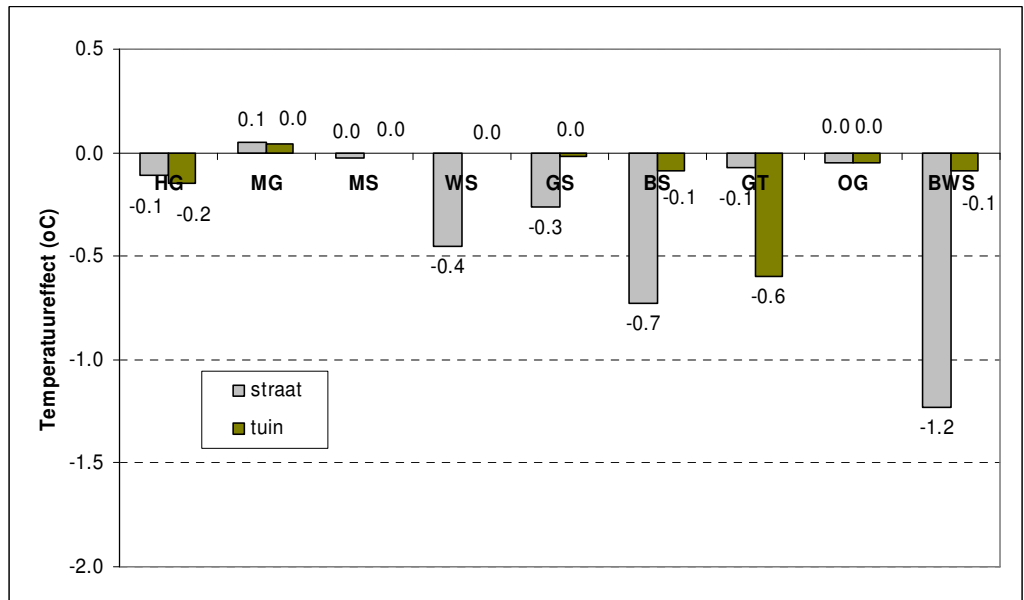
### 2. Materiaalgebruik van gebouwen (MG)

Wanneer de bakstenen muren van de gebouwen worden vervangen door kalksteen en de bitumen daken door daken met een lichtgekleurde coating dat meer zonlicht reflecteert, neemt de temperatuur op straat en in de binnentuinen met minder dan 0.2 °C toe, zowel 's nachts als overdag. Deze maatregel leidt dus niet tot het gewenste effect en zorgt zelfs voor een temperatuuroptocht. Een verklaring hiervoor is dat de hogere albedowaarde van de gebouwen tot meer weerkaatsing van zonlicht leidt waardoor het oppervlak, de straat en de tuinen, meer straling ontvangt. Op die plekken neemt de netto straling toe en is vervolgens meer warmte beschikbaar voor de opwarming van het oppervlak en de lucht, waardoor het effect ongunstig is. Het gewenste effect zou zijn geweest dat de hoge albedo van de gebouwen tot lagere oppervlaktetemperaturen van de muren en daken zouden leiden,

waardoor minder warmte zou worden afgegeven aan de lucht. Blijkbaar is in de onderzochte situatie het eerste effect sterker dan het tweede.



Figuur 11: Temperatuureffect op 1,8 m hoogte op straat en in de binnentuinen als gevolg van de 9 hittebeperkende maatregelen om 15:00 uur. Zie hoofdstuk 4 of tabel 2 voor de gebruikte afkortingen.



Figuur 12: Temperatuureffect op 1,8 m hoogte op straat en in de binnentuinen als gevolg van de 9 hittebeperkende maatregelen om 24:00 uur. Zie hoofdstuk 4 of tabel 2 voor de gebruikte afkortingen.

### 3. Materiaalgebruik van straten (MS)

Asfalt en trottoirs vervangen door geelgekleurde klinkers, waardoor de albedowaarde daalt, leidt tot een gemiddelde temperatuurdaling van 0.7 °C op straat overdag. In de binnentuinen

heeft deze maatregel geen effect, omdat de koelere lucht op straat niet voldoende mengt met lucht achter de bebouwing. Ook 's nachts heeft deze maatregel geen effect. Blijkbaar koelen straten met een lagere albedo 's nachts af tot hetzelfde temperatuurminimum, waardoor het effect op de luchttemperatuur gelijk is.

#### 4. *Water in de straat (WS)*

Een watergeul van 4 m breed over de gehele lengte van de straat verlaagt de temperatuur op 1.8 m hoogte in de straat met 0,9 °C overdag. Net als bij ander materiaalgebruik van de straat reikt dit verkoelende effect niet tot achter de gebouwen, omdat de koelere lucht op straat niet voldoende mengt met de lucht achter de bebouwing. Het temperatuureffect is het sterkst boven het water en lager bij de gevels. 's Nachts is het verkoelende effect van water in de straat lager: 0,4 °C. Het gemodelleerde temperatuureffect is sterk afhankelijk van de watertemperatuur. De gesimuleerde watertemperatuur van het wateroppervlak is overdag rond 17 °C, en 's nachts 13 °C.

#### 5. *Gras in de straat (GS)*

Gras in het midden van de straat is iets minder effectief dan een even groot oppervlak met water: een verkoelend effect van 0,4 °C overdag en 0,3 °C 's nachts. Wederom is het effect hiervan achter de huizen niet meer merkbaar.

#### 6. *Bomen in de straat (BS)*

Aanplant van bomen in de straat zorgt voor een verlaging in de luchttemperatuur van 1,2 °C overdag en 0,7 °C 's nachts. Daarmee is het de effectiefste van de onderzochte maatregelen. Het verkoelende effect wordt bewerkstelligd door verdamping en meer schaduwvorming. Het verkoelende effect van bomen in de straat is heel licht merkbaar in de binnentuinen (met minder dan 0,1 °C).

#### 7. *Gras in de binnentuinen (GT)*

Wanneer de klinkers in de binnentuinen worden vervangen door gras, dan daalt vooral de temperatuur ter plaatse, een effect van 0,9 °C overdag en 0,6 °C 's nachts. Het effect hiervan op straat is gering (minder dan 0,1 °C). Het temperatuureffect van gras in de binnentuinen is groter dan op straat (GS). Dit kan worden verklaard door de grootte van het grasoppervlak. In de binnentuin is het gehele gebied vervangen door gras, terwijl bij de grasmaatregel in de straat alleen een strook van 4 m breed in het midden van de straat is bedekt met gras, waaromheen nog asfalt is gelegen.

#### 8. *Oriëntatie van de gebouwen (OG)*

De oriëntatie van de bebouwing ten opzichte van de zon heeft alleen overdag invloed op de temperatuur. In de referentiesituatie was de bebouwing van oost naar west gericht. In de aangepaste situatie is deze van van noord naar zuid. De windrichting ten opzichte van het stratenpatroon is overigens hetzelfde gebleven. Verandering van oriëntatie heeft tot gevolg dat de temperatuur in de straat en de binnentuinen iets toeneemt met respectievelijk 0,3 en 0,2 °C. Door de noord-zuid gerichte bebouwing is er minder schaduwvorming in de straat wanneer de zon op zijn hoogste punt staat (12 uur 's middags). Hierdoor warmt het aardoppervlak meer op, en zijn de luchttemperaturen in de straat iets hoger dan bij een oost-west oriëntatie. Echter de oost-west oriëntatie zorgt wel voor hogere temperaturen in de ochtend en namiddag (zie figuur 9). Opgemerkt moet worden dat deze resultaten zeer afhankelijk zijn van de gekozen straatbreedte, huishoogte en het tijdstip (zonnestand) op het jaar. De huidige berekeningen zijn gedaan voor 19 juli, ongeveer een maand nadat de zon zijn hoogste stand heeft bereikt. De dagen ervoor staat de zon dus hoger aan de hemel, en zal er minder schaduwwerking zijn. Hierdoor zal de oost-west oriëntatie de warmste situatie

worden, zoals ook Ali-Toudert en Mayer (2006) vonden voor een stedelijke situatie in Noord-Afrika waar de zon hoger aan de hemel staat.

#### *9. Bomen en water in de straat (BWS)*

Wanneer de twee effectiefste maatregelen gecombineerd worden, aanleg van water en bomen in de straat, is het totaaleffect bijna gelijk aan de optelling van de afzonderlijke effecten: een verkoelend effect van 1,9 °C overdag en 1,2 °C 's nachts.



## 6 Conclusies en aanbevelingen

In dit onderzoek is voor een zomerse dag het verkoelende effect van 9 hittebeperkende klimaatmaatregelen voor een sterk vereenvoudigde situatie van een straat in Rotterdam onderzocht met het microschaal klimaatmodel Envi-met. De onderzochte maatregelen grijpen in op water, groen, materiaalgebruik en beschaduwing. Het effect van de maatregelen is uitgedrukt in het temperatuurverschil op 1,8 m hoogte overdag (15:00 uur) en 's nachts (24:00 uur) ten opzichte van een referentiesituatie waarin geen maatregelen zijn genomen. Met de verkregen resultaten is binnen het Kennis voor Klimaatonderzoek 'Hittestress in Rotterdam' nieuwe kwantitatieve informatie beschikbaar gekomen over het effect van hittebeperkende klimaatmaatregelen.

De resultaten tonen aan dat de aanplant van bomen een verkoelende werking van gemiddeld 1,2 °C op straat heeft en daarmee de effectiefste maatregel is. Deze waarde past binnen de waarden die gemeld worden in een reviewartikel over het verkoelende effect van parken en groen in de stad van Bowler et al. (2010). Na bomen, is de aanleg van een watergeul in het midden van de straat de effectiefste maatregel. Deze maatregel heeft een verkoelende werking van 0,9 °C op straat. De combinatie van bomen en water is goed voor een verkoelend effect van 1,9 °C. Bomen en water zorgen ook 's nachts voor een licht verkoelend effect. Bomen zorgen dan voor een temperatuurdaling van 0,7 °C en water 0,4 °C. Vervanging van asfalt en stoeptegels door gele klinkers is ook effectief en zorgt voor een temperatuurdaling op straat van 0,7 °C overdag. 's Nachts heeft deze maatregel geen effect.

Helaas reikt het effect van al deze maatregelen niet ver. Achter de huizen, in de binnentuinen, is het verkoelende effect ervan niet meer merkbaar (minder dan 0,1 °C). Het effect in de binnentuinen wordt alleen verkregen wanneer ter plaatse maatregelen worden genomen. Zo zorgt vervanging van klinkers door gras in de binnentuinen voor een temperatuurdaling van 0,9 °C overdag en 0,6 °C 's nachts.

De overige onderzochte maatregelen zijn minder effectief of zijn niet eenvoudig te realiseren in een bestaande woonwijk. Zo zorgen hogere gebouwen (19 m i.p.v. 15 m) in de gesimuleerde situatie tot meer schaduw en 0,7 °C lagere temperaturen overdag, en geeft een oost-west gerichte bebouwingsstructuur 0,3 °C lagere temperaturen dan een noord-zuid gerichte structuur. Het effect van de laatste maatregel is sterk afhankelijk van het tijdstip van het jaar, de gebouwhoogte en straatbreedte. De modelresultaten lieten geen verkoelend effect zien voor gebouwen met beter reflecterende muren en daken. Gras in de straat is met een verkoelende werking van 0,4 °C overdag minder effectief dan bomen. Beide zorgen voor een verkoelend effect door extra verdamping. Echter, bomen leveren ook schaduw waardoor het verkoelende effect van bomen waarschijnlijk groter is.

Wat voor de interpretatie van bovenstaande resultaten belangrijk is, is dat de berekeningen voor sterk vereenvoudigde en specifieke situaties zijn uitgevoerd. Andere resultaten zijn te verwachten wanneer de omgeving, het stratenpatroon, de bouwstructuur, de temperatuur van de watergeul, of de gebruikte bouwmaterialen verschillen, maar ook wanneer de meteorologische condities anders zijn, zoals een lagere zonnestand, meer bewolking, of een andere windsnelheid of -richting. Daarnaast is voor elk van de onderzochte hittebeperkende maatregelen maar één situatie doorgerekend. Een andere clustering van de bomen, een andere vorm van het groen- of wateroppervlak, een andere gebouwhoogte, een nattere of warmere bodem, of andere materiaaleigenschappen zullen tot andere resultaten leiden. Daardoor is het berekende effect van de maatregelen een benadering.

*Uit dit onderzoek is vooral gebleken dat bomen, water en ander materiaalgebruik voor bestrating de effectiefste hittebeperkende maatregelen zijn in termen van een verlaging in de luchttemperatuur, en dan met name als het gaat om het verlagen van de luchttemperatuur lokaal en overdag.*

Vervolgens zijn er een aantal aanbevelingen voor vervolgonderzoek te noemen waardoor het effect van de onderzochte hittebeperkende maatregelen nog beter beoordeeld zou kunnen worden. Als eerste zouden er meer verschillende situaties onderzocht kunnen worden om te bepalen in hoeverre de verkoelende werking van de maatregelen afhangt van de omgeving, het weertype, het soort boom, de watertemperatuur, soort groenstructuur of watertype. Metingen in werkelijke situaties zouden daarbij het modelonderzoek kunnen ondersteunen.

Daarnaast zou het nuttig zijn om niet alleen aandacht te besteden aan het effect van hittebeperkende maatregelen op de luchttemperatuur maar ook op het thermisch comfort, analoog aan onderzoek dat Lenzholzer (2010) heeft uitgevoerd naar microklimatologische aspecten in het ontwerp van stadspaleizen. Thermisch comfort wordt medebepaald door luchtvochtigheid, windsnelheid en straling, is een bepalende factor voor hittestress en kan ook in Envi-met worden gesimuleerd.

Een ander aspect dat nader onderzocht zou kunnen worden is het effect van hittebeperkende maatregelen gedurende een hittegolf. De effecten zouden dan anders kunnen zijn dan voor een enkele zomerse dag, omdat gedurende een langere hete periode gebouwen en bodem in de stad langzaam opwarmen en het aanwezige water en bodemvocht afnemen door verdamping. Hierdoor zal de situatie veranderen en daarmee het effect van de maatregelen. Met het oog op klimaatverandering en de mogelijke toename in duur en frequentie van hittegolven is dit zeker een punt dat belangrijk kan zijn.

Als laatste kunnen, wanneer een nieuwere versie van Envi-met het mogelijk maakt, de andere door Van Harmelen et al. (2010) geselecteerde *no regret* maatregelen onderzocht worden. Deze betreffen blauwe en groene daken, fontein en het besproeien van gevels en daken.

## 7 Referenties

- Ali-Toudert, F. 2003. Dependence of outdoor thermal comfort on street design in hot and dry climate. PhD-thesis. Berichte des Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg, Nr. 15.
- Ali-Toudert, F., en Mayer, H. 2006. Numerical study on the effects of aspect ratio and solar orientation on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Building and Environment* 41, 94–108.
- Arnfield, J. 2003. Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23: 1-26.
- Bowler, D.E., Buyung-Ali, L., Knight, T.M., en Pullin, A.S. 2010. Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, doi:10.1016/j.landurbanplan.2010.05.006
- Lenzholzer, S. 2010. Designing atmospheres: research and design for thermal comfort in Dutch urban squares. PhD-thesis. Wageningen - UR.
- Rosenzweig, C., Solecki, W., en Slosberg, R. 2006. Mitigating New York City's Heat Island with Urban Forestry, Living Roofs, and Light Surfaces. Report 06-06. Albany, NY: New York State Energy Research and Development Authority.
- Van Harmelen et al. 2010. Maatregelen tegen het hitte-eilandeffect en hittestress in Rotterdam. KvK-rapport.

## 8 Verantwoording

Naam en adres van de opdrachtgever:

Programmabureau Kennis voor Klimaat  
Ir. C.L. van Deelen  
Postbus 80115  
3508 TC Utrecht

Namen en functies van de projectmedewerkers:

Lisette Klok projectleider/onderzoeker TNO

Namen van instellingen waaraan een deel van het onderzoek is uitbesteed:

-

Datum waarop, of tijdsbestek waarin, het onderzoek heeft plaatsgehad:

Juni – november 2010

Naam en paraaf tweede lezer:



Jan Duyzer

Ondertekening:



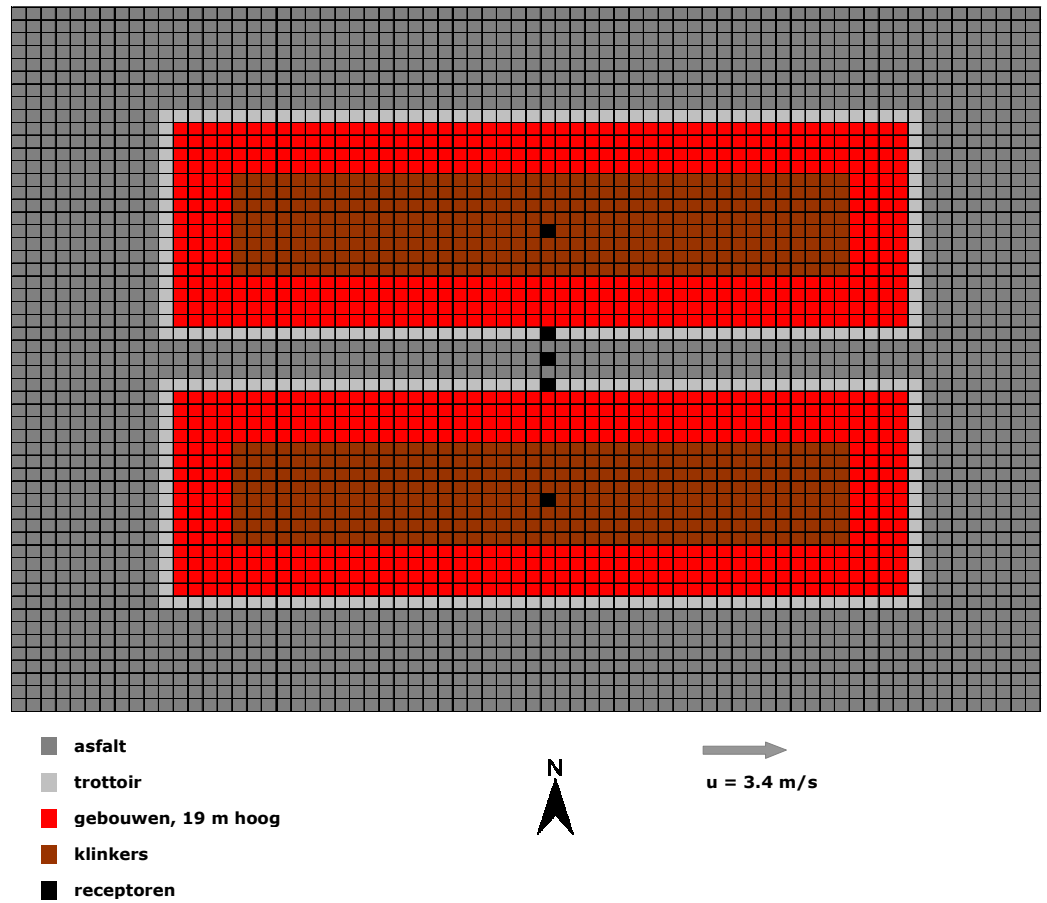
Lisette Klok  
Projectleider

Autorisatie vrijgave:

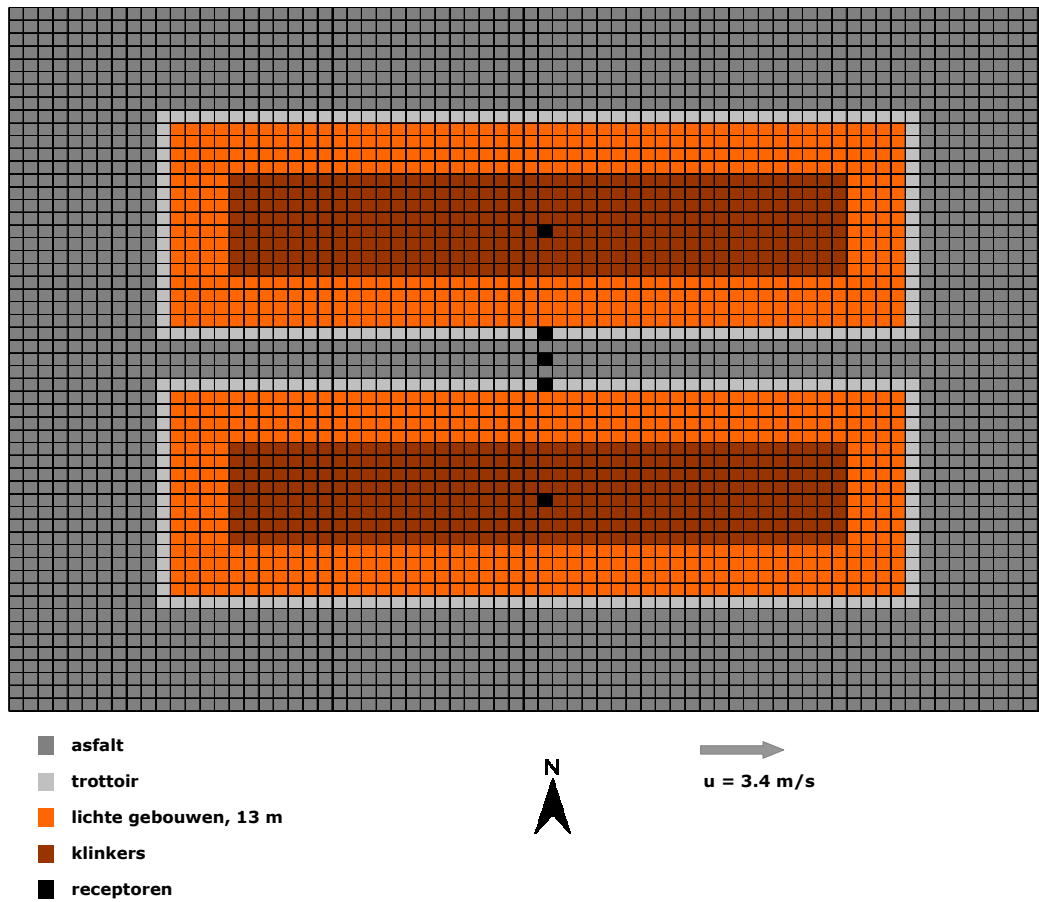


Jeroen Borst  
Afdelingshoofd

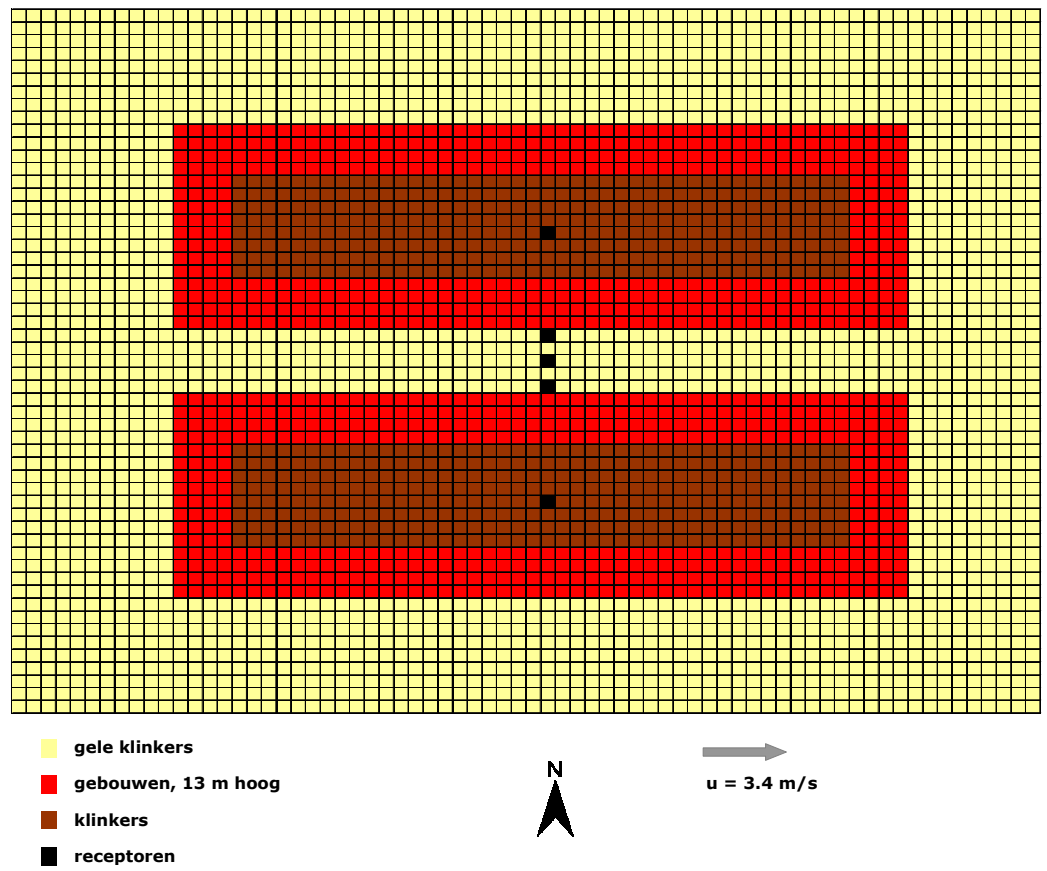
## A Schematische weergaves van de modelopzetten voor de situaties met hittebeperkende klimaatmaatregelen



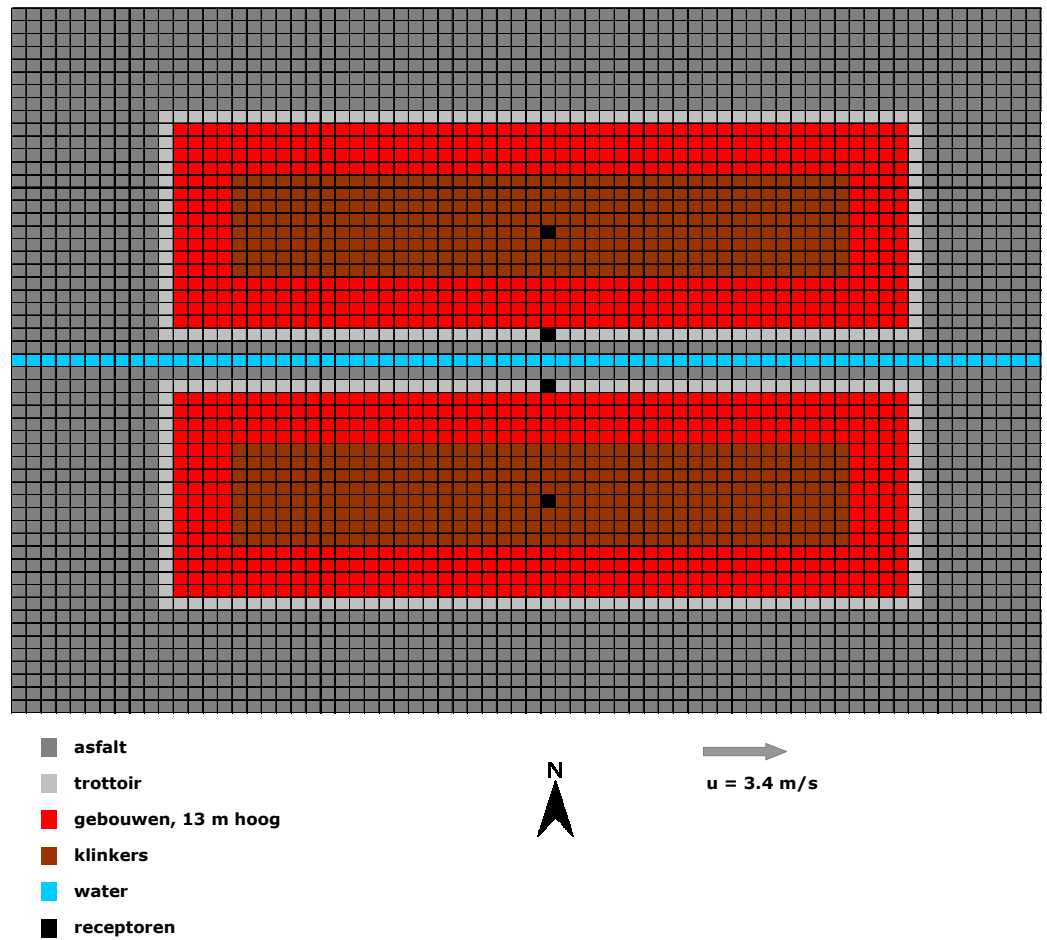
Figuur A1: Modelopzet voor de situatie met hoge gebouwen (HG).



Figuur A2: Modelopzet voor de situatie met ander materiaalgebruik voor de gebouwen (MG).

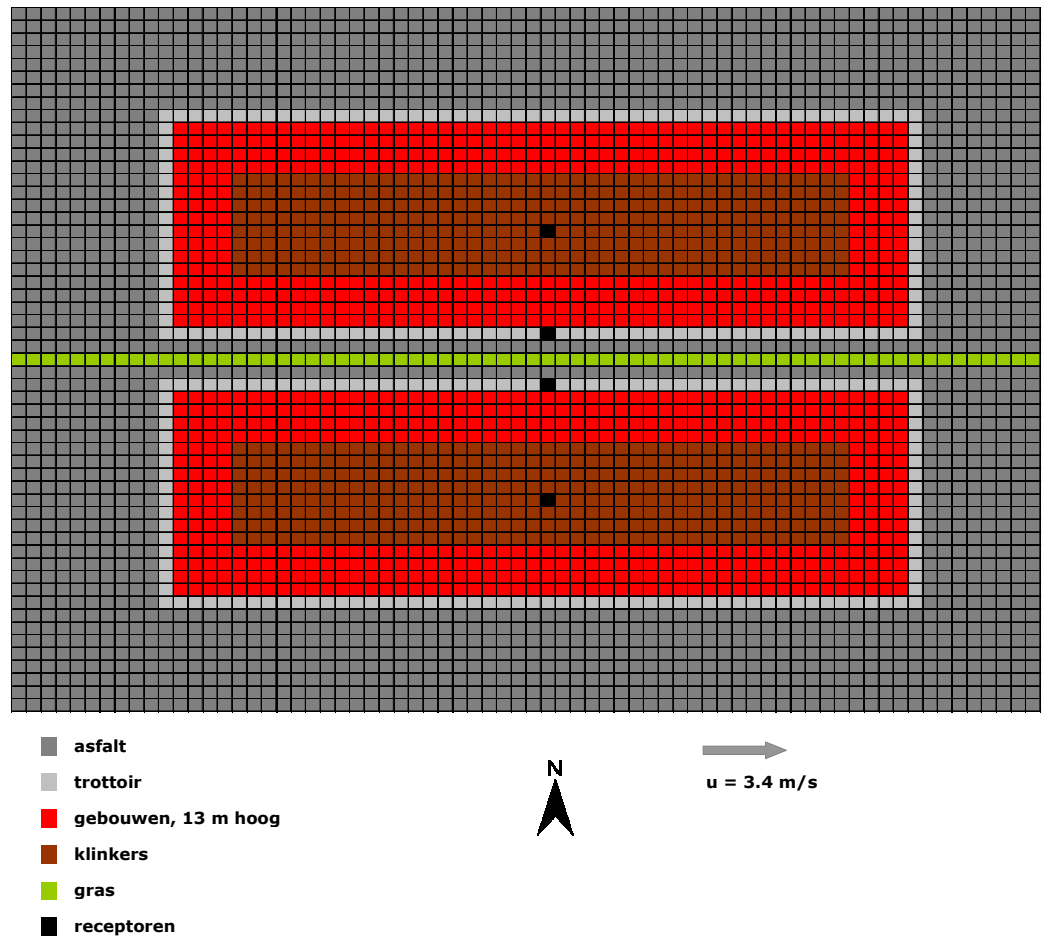


Figuur A3: Modelopzet voor de situatie met ander materiaalgebruik voor de straat (MS).

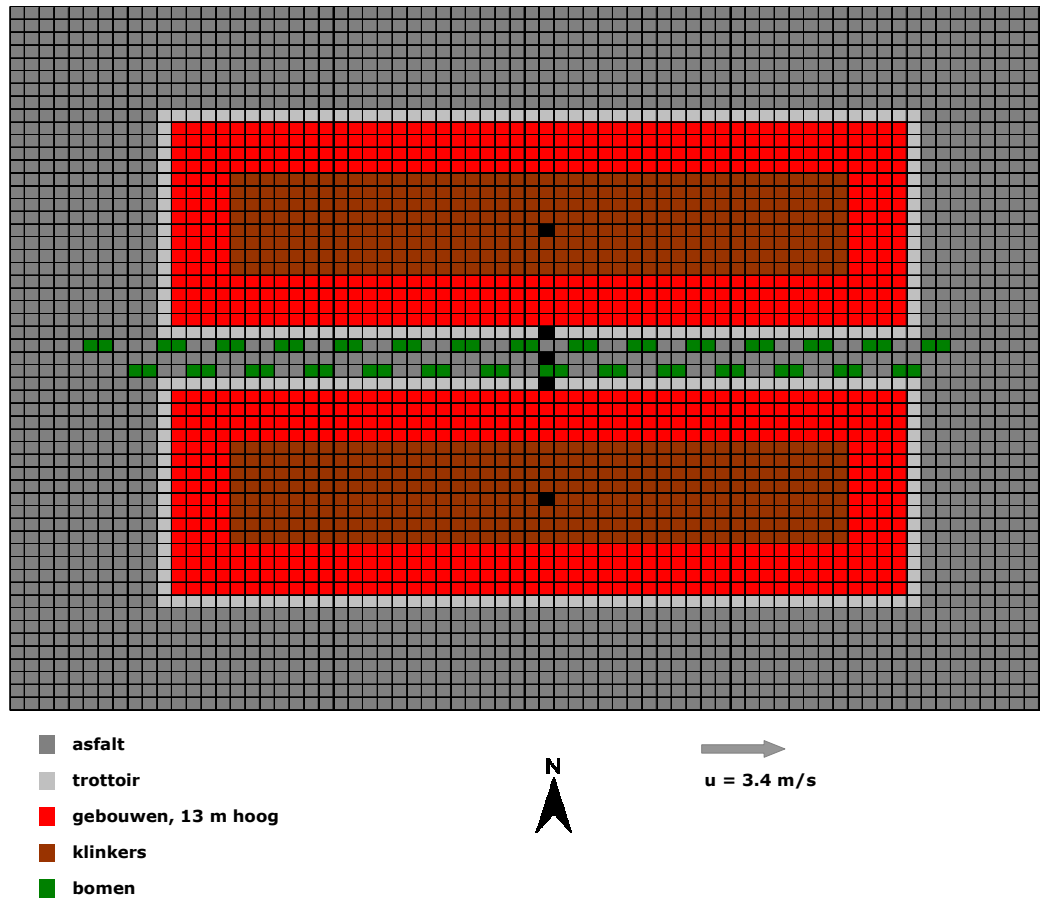


Figuur A4: Modelopzet voor de situatie met water in de straat (WS).

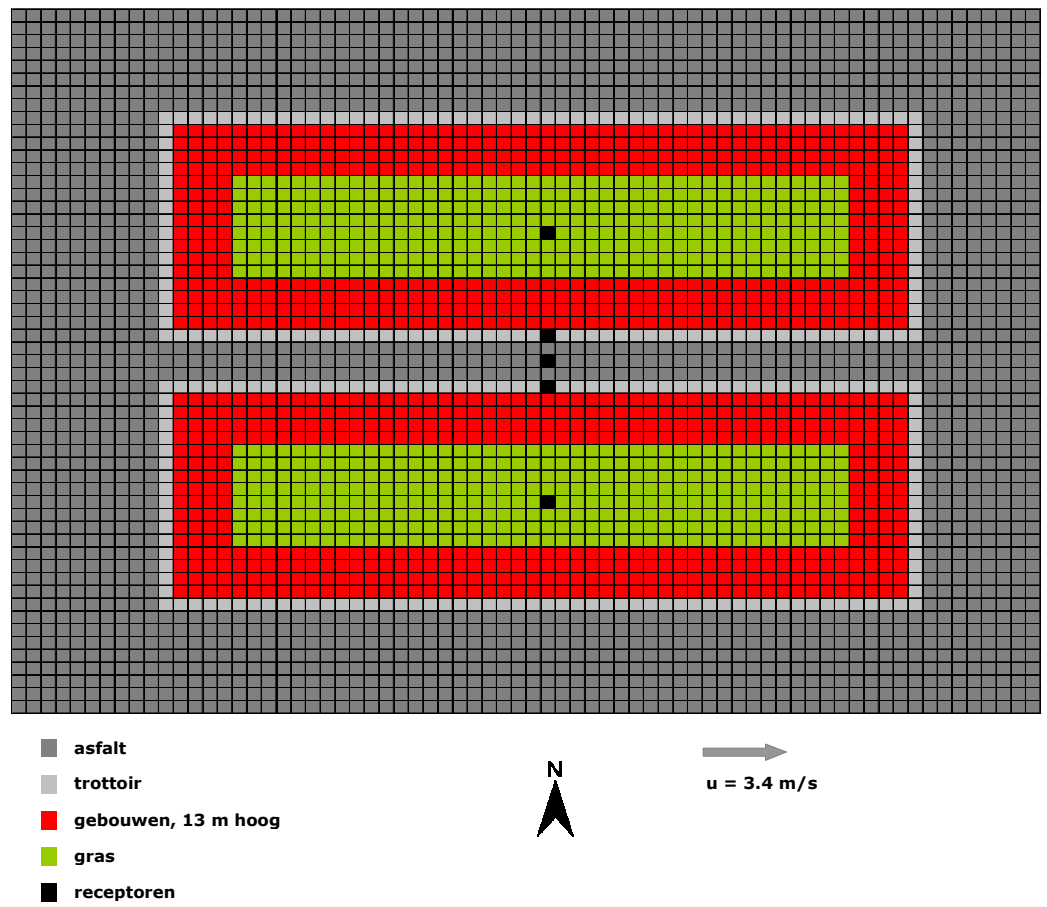




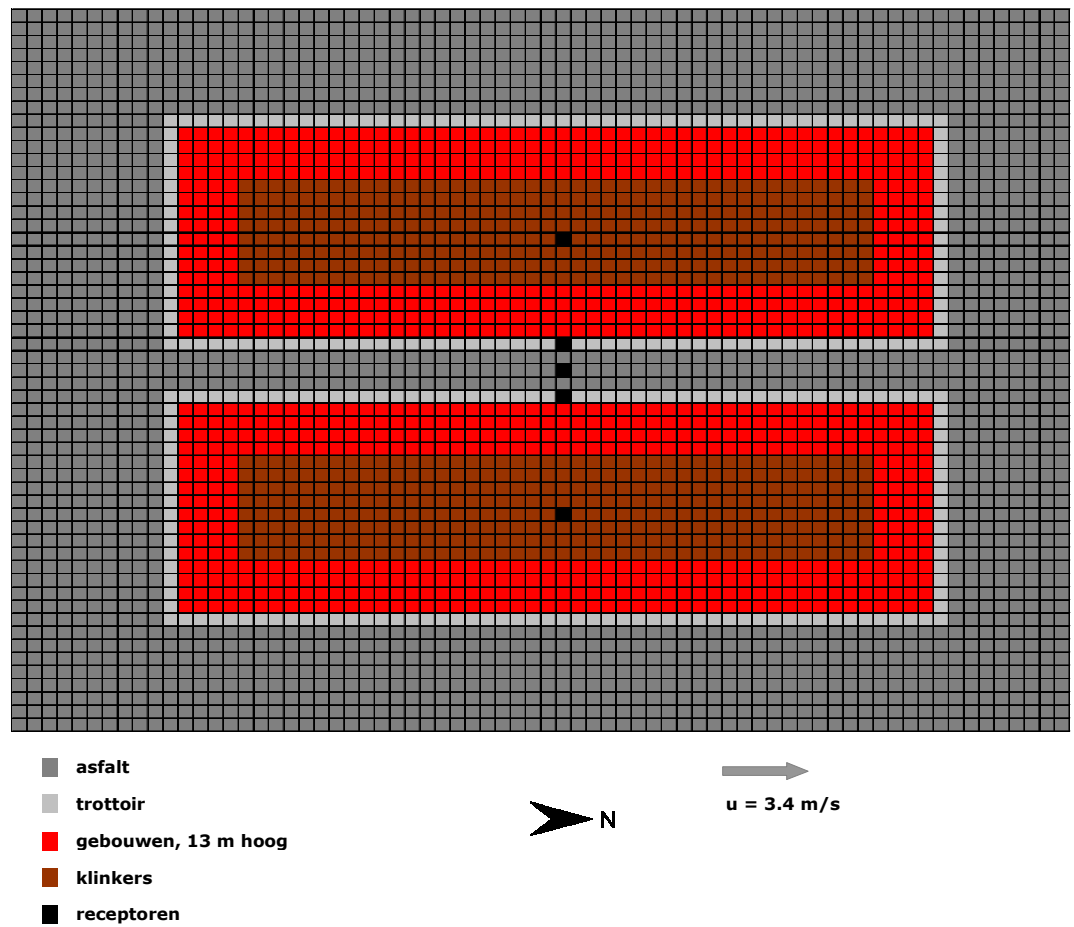
Figuur A5: Modelopzet voor de situatie met gras in de straat (GS).



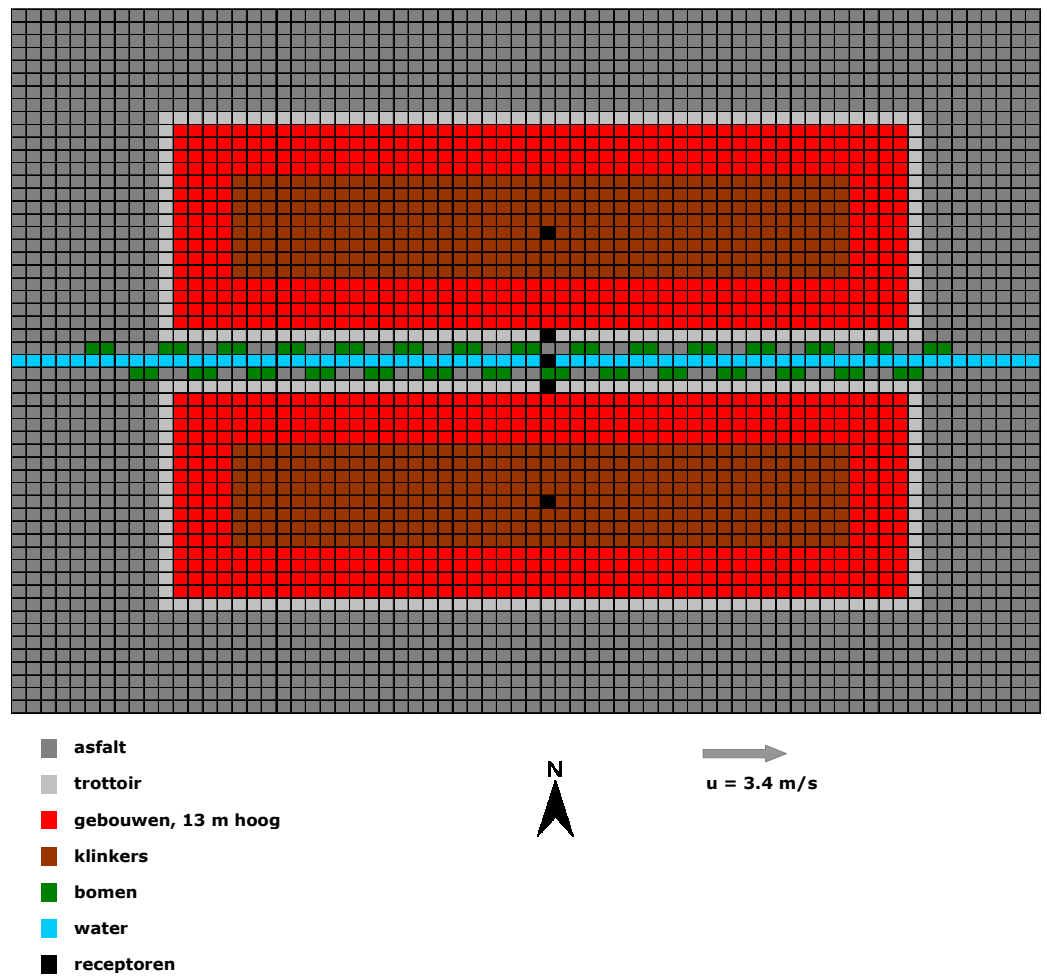
Figuur A6: Modelopzet voor de situatie met bomen in de straat (BS).



Figuur A7: Modelopzet voor de situatie met gras in de binnentuinen (GT).



Figuur A8: Modelopzet voor een noord-zuid orientatie van de gebouwen (OG).



Figuur A9: Modelopzet voor de situatie met bomen en water in de straat (BWS).