

TNO-rapport

TNO 2013 R11344

**De synergie van stedelijke klimaatadaptatie en
– mitigatie maatregelen; een vijftal
maatregelen uitgewerkt voor Rotterdam**

Datum	26 september 2013
Auteur(s)	Peter Bosch Harm ten Broeke Jonna Gjaltema Aniko Pásztor Vera Rovers
Aantal pagina's	63 (excl. bijlagen)
Aantal bijlagen	1
Opdrachtgever	Stichting Kennis voor Klimaat/Gemeente Rotterdam
Projectnaam	Kvk 3e tranche HSRR 3.8 Adaptatie en mitigatie verbinden
Projectnummer	054.02885
Rapportnummer	KVK 102/2013
ISBN nummer	978-94-90070-72-4



Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, foto-kopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande 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 opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

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

© 2013 TNO

Samenvatting

Als reactie op klimaatverandering kunnen twee soorten maatregelen worden onderscheiden: mitigatie en adaptatie. Mitigatie richt zich op het aanpakken van de oorzaken van klimaatverandering, terwijl adaptatie focust op het verzachten van de gevolgen van klimaatverandering.

In dit rapport wordt voor een selectie van vijf maatregelen met zowel een gunstig effect op adaptatie aan klimaatverandering als op mitigatie van klimaatverandering het adaptatie- en mitigatie effect gekwantificeerd. Dit zijn: 1) sproeien van daken en gevels; 2) warmte-koude opslag (WKO); 3) schaduwwerking (overhang, bomen, smalle straten en oriëntatie van straten); 4) verbeteren van de isolatie van de woningvoorraad; 5) verhogen van de albedo. Dit soort maatregelen leidt niet alleen tot een win-winsituatie, maar kan ook bijdragen tot een vergrootte acceptatie van het klimaatbeleid. De selectie vond plaats op basis van gegevensbeschikbaarheid en in overleg met de opdrachtgevers uit een lijst van 27 geïdentificeerde maatregelen. Om het adaptatie-effect in geld uit te drukken is de vermindering van het energieverbruik voor koeling in een standaard woning omgerekend in Euro's. De resultaten kunnen worden vergeleken met de jaarlijkse kosten van de maatregelen.

Het onderzoek in deze studie is uitgevoerd in samenhang met de maatschappelijke kosten-baten analyse (MKBA) van de Rotterdamse Adaptatie Strategie. De maatregelen die voor deze studie zijn geselecteerd, zijn gerelateerd aan maatregelen die genoemd zijn in de Rotterdamse Adaptatie Strategie. Factsheets van de vijf maatregelen zijn aangeleverd als input voor de MKBA.

De berekeningen zijn uitgevoerd voor een warme zomer zoals die in de toekomst naar verwachting regelmatig zal voorkomen, maar zonder rekening te houden met het hitte-eiland effect in binnensteden. Dit levert voor gebieden met een groot hitte-eiland effect een onderschatting op van het effect van de maatregelen. Omdat de berekeningen alleen zijn uitgevoerd voor een warme zomer, levert dat aan de andere kant een overschatting op ten opzichte van het effect in een gemiddelde zomer. Evenzo kunnen stijgende elektriciteitsprijzen leiden tot grotere financiële besparingen dan hier berekend.

Het planten van bomen voor schaduwwerking op gebouwen blijkt veruit de efficiëntste en de voordeligste maatregel: het gebouw en de directe omgeving worden afgekoeld, daardoor is minder mechanische koeling in het gebouw nodig en wordt elektriciteit bespaard. Daarna volgt het toepassen van overhang aan gebouwen. Het verhogen van de albedo¹ van een gebouw en het sproeien van daken en gevels hebben ook een adaptatie-effect binnen gebouwen en daarbuiten en dus ook energiebesparing bij koeling, maar de extra kosten van de maatregel zijn veel groter dan de energiewinst in Euro's. Voor maatregelen die in eerste instantie vanwege energiebesparing (mitigatie) worden genomen, zoals gebouwisolatie en warmte-koude opslag (WKO) levert het adaptatie effect extra

¹ De albedo van een object is een maat (meestal uitgedrukt als fractie of procenten) die aangeeft hoeveel straling er wordt teruggekaatst ten opzichte van de inkomende straling.

winst op. De kosten van deze maatregelen zijn echter dusdanig dat adaptatie alléén geen argument is voor de invoering.

Inhoudsopgave

	Samenvatting	3
1	Inleiding	7
1.1	Mitigatie	7
1.2	Adaptatie.....	8
1.3	Synergie.....	8
1.4	Maatregelen.....	9
2	Selectie van synergiemaatregelen.....	11
3	Aanpak en algemene aannames	17
3.1	Berekening van de effecten	17
3.2	Omschrijving van het type woning	18
3.3	Klimaatgegevens	19
3.4	Gebouworientatie.....	20
3.5	Prijzen en kosten	20
4	Maatregel 1: Sproeien van daken en gevels	21
4.1	Beschrijving	21
4.2	Uitvoering, dimensionering en kosten	21
4.3	Verdampingskoeling bij een appartementencomplex.....	27
4.4	Mitigatie effect.....	27
4.5	Samenvatting.....	28
5	Maatregel 2: Warmte- en koude-opslag.....	31
5.1	Beschrijving	31
5.2	Uitvoering, dimensionering en kosten	34
5.3	Mitigatie effect.....	37
6	Maatregel 3: Schaduwwerking (overhang, bomen, smalle straten en oriëntatie van straten)	39
6.1	Beschrijving	39
6.2	Uitvoering, dimensionering en kosten	39
6.3	Effecten.....	42
6.4	Mitigatie effect.....	42
7	Maatregel 4: Verbeteren van de isolatie van de woningvoorraad	45
7.1	Beschrijving	45
7.2	Uitvoering, dimensionering en kosten	45
7.3	Effecten.....	45
7.4	Mitigatie effect.....	46
8	Maatregel 5: Verhogen van de albedo	49
8.1	Beschrijving	49
8.2	Uitvoering, dimensionering en kosten	49
8.3	Effecten.....	50
8.4	Mitigatie effect.....	51
9	Overzicht van de adaptatie- en mitigatie-effecten.....	53

10	Literatuur	57
11	Ondertekening	63

1 Inleiding

Als reactie op klimaatverandering kunnen twee soorten maatregelen worden onderscheiden: mitigatie en adaptatie. Beide leiden tot een verminderde impact van klimaatverandering, maar via een verschillende aanpak op een verschillende tijdschaal. Mitigatie richt zich op het aanpakken van de oorzaken van klimaatverandering, terwijl adaptatie focust op het verzachten van de gevolgen van klimaatverandering². Kernachtig gezegd: Mitigatie beschermt de natuur tegen de maatschappij, terwijl adaptatie de maatschappij beschermt tegen invloeden van de natuur (Stehr & Von Storch, 2005).

1.1 Mitigatie

Mitigatie is erop gericht de drivers van klimaat-gerelateerde gevaren te verminderen (McEvoy, 2006). Meer concreet houdt dit in dat de door de mens geproduceerde broeikasgassen worden gereduceerd. Mitigatie van klimaatverandering wordt vaak gedreven door nationale en internationale initiatieven (Klein, 2005 en McEvoy, 2006). De Europese Unie heeft zich bijvoorbeeld ten doel gesteld om de broeikasgasuitstoot in 2020 met 20% te hebben verminderd ten opzichte van 1990 en de ambitie om deze in 2050 met 80% te verminderen (EC, 2011). Als gevolg hiervan hebben nationale en lokale overheden beleidsplannen ontwikkeld die daartoe moeten leiden. Zo heeft Rotterdam als doelstelling om 50% kooldioxide (CO₂) uitstoot te reduceren in 2025 ten opzichte van 1990. Om deze mitigatiedoelen te bereiken is er ook een belangrijke rol weg gelegd voor stedelijke gebieden. Steden zijn centra van economische activiteit, wat betekent dat het gebieden zijn met een hoge energie-intensiteit. Het vergroten van de efficiëntie van energieverbruik heeft dikwijls een economisch voordeel. Om mitigatiedoelen te bereiken, is het van groot belang om het verbruik van fossiele energiedragers in steden te verminderen (McEvoy, 2006). Maatregelen die kunnen bijdragen aan de reductie van broeikasgassen zijn in drie categorieën in te delen:

- Maatregelen gericht op het verhogen van energie-efficiëntie of het verminderen van de emissie van overige broeikasgassen;
- Maatregelen gericht op het vergroten van de inzet van hernieuwbare energiebronnen;
- Maatregelen gericht op het vastleggen van CO₂ in sinks (bijvoorbeeld bossen) (AMICA, 2007 en McEvoy, 2006).

² De officiële definitie van mitigatie gegeven door het UNFCCC: "In the context of climate change, a human intervention to reduce the sources or enhance the sinks of greenhouse gases. Examples include using fossil fuels more efficiently for industrial processes or electricity generation, switching to solar energy or wind power, improving the insulation of buildings, and expanding forests and other "sinks" to remove greater amounts of carbon dioxide from the atmosphere" (UNFCCC, 2012). De officiële definitie van adaptatie gegeven door het UNFCCC: "Adjustment in natural or human systems in response to actual or expected climatic stimuli or their effects, which moderates harm or exploits beneficial opportunities" (UNFCCC, 2012).

1.2 Adaptatie

Adaptatie is erop gericht de kwetsbaarheid voor, en de blootstelling aan, klimaatgerelateerde gevaren aan te pakken. Het gaat dan om aanpassing van natuurlijke en menselijke systemen aan reële of verwachte klimaatveranderingen en afgeleide effecten. Dit betekent niet alleen aanpassing aan de schadelijke, maar ook aan mogelijk gunstige effecten van klimaatverandering (McEvoy, 2006). Of, zoals Rotterdam het formuleert: 'minimaal last en maximaal profijt van klimaatverandering'.

In tegenstelling tot mitigatie, is er binnen de wetenschap en in de beleidswereld pas recentelijk aandacht gekomen voor het belang van adaptatie (Klein, 2005, Stehr & Von Storch, 2005).

Ook als wereldwijd verregaande reducties van de uitstoot van broeikasgassen worden bereikt, vinden er veranderingen in het klimaat plaats in de aankomende 30-40 jaar. Emissies uit het verleden beïnvloeden, door een vertragingseffect in de atmosfeer en de oceanen, het klimaat nu en in de nabije toekomst (Meehl et al, 2007).

Urbane gebieden zijn dichtbevolkt en bevatten een groot deel van de kapitaalgoederen van een nationale economie. De effecten van klimaatverandering kunnen schades veroorzaken aan gebouwen en infrastructuur, gezondheidsrisico's met zich mee brengen en uiteindelijk de stedelijke economie schade toebrengen. Lokale omstandigheden bepalen het relatieve belang van de verschillende gevolgen van klimaatverandering, zoals:

- Stijging van het zeeniveau en het risico van overstromingen;
- Overstromingen vanuit rivieren;
- Overstromingen en 'flashfloods' door extreme regenval;
- Hittegolven (in de stad versterkt door het hitte-eiland effect);
- Beperkte beschikbaarheid van water.

1.3 Synergie

De beschikbare financiële middelen voor stedelijk klimaatbeleid zijn niet onuitputtelijk. Het is daarom verstandig om aan te sturen op maatregelen die het meeste effect sorteren. In de literatuur vindt men in toenemende mate de verwijzing naar zogenaamde synergetische maatregelen; maatregelen die zowel een adaptie- als mitigatie-effect hebben. Dit soort maatregelen leidt niet alleen tot een win-winsituatie, maar leidt mogelijk ook tot een vergrote acceptatie van het klimaatbeleid.

Het onderzoek naar mogelijke synergiën is nog niet ver ontwikkeld. Op dit moment focust de literatuur zich op het identificeren van het optreden van synergiën en trade-offs. Wat tot op heden nog ontbreekt is een kwantitatieve beoordeling (o.a. kosten) van synergetische adaptatie-mitigatiemaatregelen. Akbari *et al.* (2005) is de enige ons bekende studie die systematisch het energetisch effect van een tweetal maatregelen om het hitte-eiland tegen te gaan en die tevens energie besparen, heeft gekwantificeerd. Dit TNO-rapport is een eerste poging om voor een grotere variatie aan synergetische maatregelen de kosten en de baten op stedelijk niveau op een systematische manier in kaart te brengen.

1.4 Maatregelen

Het onderzoek in deze studie is uitgevoerd mede in het kader van de maatschappelijke kosten-baten analyse (MKBA) van de Rotterdamse Adaptatie Strategie. De maatregelen die voor deze studie zijn geselecteerd, zijn gerelateerd aan maatregelen die genoemd zijn in de Rotterdamse Adaptatie Strategie. Aangezien de keuze van adaptatie maatregelen in deze strategie erg breed en algemeen is, vormt dit een geringere beperking dan de gegevensbeschikbaarheid over een aantal maatregelen. In hoofdstuk 2 wordt argumentatie geleverd voor de keuze van de bestudeerde maatregelen.

De geanalyseerde maatregelen zijn:

- Besproeien van daken en gevels (hoofdstuk 4);
- Warmte-koudeopslag (hoofdstuk 5);
- Schaduwwerking door bomen, oriëntatie van straten, smalle straten of overhang (In de inventarisatie van tabel 1 staat alleen smalle straten als exponent van deze categorie) (hoofdstuk 6)
- Verbeteren van de isolatie (hoofdstuk 7);
- Verhogen van de albedo (hoofdstuk 8);

Al deze adaptatiemaatregelen hebben een mitigatief bijeffect. Het adaptieve karakter van deze maatregelen ligt in de koeling die deze maatregelen bieden (en de daarmee samenhangende afname van gezondheids- en andere risico's). Het mitigatieve bijeffect ligt in de besparing van energie en/of het gebruik van hernieuwbare energie. Factsheets van de vijf maatregelen zijn aangeleverd als input voor de MKBA.

2 Selectie van synergiemaatregelen

Binnen TNO is er in 2010 gewerkt aan een inventarisatie van maatregelen tegen het hitte-eiland effect (o.a. Klok *et al.*, 2010a, 2010b en Van Harmelen *et al.*, 2011). Daarnaast is er door MWH een lijst met adaptatiemaatregelen opgesteld tegen onder andere hitte en wateroverlast (DPNH, 2012). Een aantal van de maatregelen uit deze bronnen heeft naast een adaptieve werking op hitte ook een gunstig neveneffect op het verbruik van energie (dus ook een vermeden CO₂ uitstoot) en valt daarmee ook in de categorie mitigatie. Deze maatregelen vormen de focus van dit project.

Ten behoeve van de uiteindelijke selectie van alle adaptatie-/mitigatiemaatregelen zijn in een eerste stap alle 27 maatregelen uit de genoemde inventarisaties gebundeld in een tabel (Bijlage A). Vervolgens is deze lijst vergeleken met de maatregelen die het kader van de maatschappelijke kosten-batenanalyse (MKBA) van de Rotterdamse Adaptatie Strategie in beschouwing worden genomen. De overeenkomstige maatregelen worden in Tabel 1 getoond.

Tabel 1 Verzameling van maatregelen die ook in de Rotterdamse MKBA voorkomen

Toepas-sings-gebied	Maatregel	Nr. in MKBA	Omschrijving	Adaptie(f)ve effect(en)	Mitigatie (synergie) effecten	Bron
Hitte	Ramen 's nachts open, overdag dicht	1	Overdag de ramen dicht houden houdt de warmte buiten, als het 's nachts afkoelt en de ramen worden geopend zal het binnenshuis afkoelen.	Verdrrijving van de hitte door natuurlijke ventilatie mogelijk te maken.	Energiebesparing t.o.v. actieve koeling (zoals airco), dus minder CO ₂ uitstoot.	Van Harmelen <i>et al.</i> (2011)
Hitte	Opzoeken van koele plekken	1	Mensen kunnen worden gestimuleerd meer buitenshuis in koele gebieden (zoals in een park, bij een fontein) te verblijven.	De overlast door hitte te beperken.	Energiebesparing t.o.v. actieve koeling (zoals airco), dus minder CO ₂ uitstoot.	Van Harmelen <i>et al.</i> (2011)
Hitte	Extra isolatie van gebouwen	8	Isolatie vermindert de warmteoverdracht van binnen naar buiten, maar ook van buiten naar binnen.	Ongewenste opwarming binnenshuis tijdens warme perioden wordt (deels) voorkomen.	In de winter wordt de warmte binnenshuis beter vastgehouden, waardoor minder actieve opwarming nodig is, dus minder energieverbruik en minder CO ₂ uitstoot.	Van Harmelen <i>et al.</i> (2011)

Hitte	Warmte- en koude opslag (WKO) in de bodem of zeewater.	3	Warmte en koude worden opgeslagen in grondwater in de bodem op een diepte van 20 tot 120 meter. Vervolgens kan 's zomers koud water worden benut voor koeling en 's winters warm water voor verwarming.	Actieve verkoeling binnenshuis.	Energiebesparing t.o.v. actieve koeling (zoals airco), dus minder CO2 uitstoot.	DPNH (2012)
Hitte	Verhoging albedo van gebouwopervlakken	7; 9	De albedo is de mate waarin zonlicht wordt weerkaatst. Hoe hoger de albedo, hoe minder zonlicht wordt opgenomen, hoe minder het gebouw wordt opgewarmd.	Voorkómen van hitte binnenshuis tijdens warme perioden.	Energiebesparing t.o.v. actieve koeling (zoals airco), dus minder CO2 uitstoot.	o.a. uit Pomerantz <i>et al.</i> (2006), Taha <i>et al.</i> (1988), Rosenzweig (2006), Sailor & Dietsch (2005), Kikegawa <i>et al.</i> (2005), Ihara <i>et al.</i> (2007), Che-Ani <i>et al.</i> (2009), Ichinose <i>et al.</i> (2008)
Hitte	Smalle straten zonder inval zonlicht tijdens middag-zon	2	Wanneer straten smal worden gehouden zodat het zonlicht niet direct in de 'canyon' terecht komt worden de gebouwen een stuk minder opgewarmd en wordt daardoor oncomfortabele hitte (deels) voorkomen.	Door het voorkómen van insolentie (instraling van de zon) wordt een onaangenaam hoge temperatuur vermeden.	Doordat het relatief koel(-er) blijft worden andere vormen van veelal actieve koeling vermeden, daardoor is deze vorm van koeling in feite een besparing op energie en dus CO2 uitstoot. Dit effect wordt deels teniet gedaan door de noodzaak voor extra verlichting, maar dit effect is als verwaarloosbaar aangenomen.	DPNH (2012)
Hitte	Hoogbouw	2	Wanneer gebouwen extra hoog worden gemaakt, werpen zij een schaduw op de rest van de stad die	Hitte wordt zoveel mogelijk vermeden door de bouwstijl.	Besparing op actieve koeling, dus minder energieverbruik en minder CO2 uitstoot.	DPNH (2012)

			daardoor koeler blijft.		Maar; het kan zijn dat door de hoogte er extra energie nodig is voor andere activiteiten (verplaatsen met een lift, extra verwarming etc.). De optimale bouwhoogte moet in beschouwing worden genomen.	
Hitte / water-overlast	Groene daken	19	Gebouwen uitrusten met een dak dat bestaat uit medium waarin vegetatie groeit.	Door extra isolatie en het verdampen van water wordt warmteoverdracht het gebouw in voorkomen en wordt warmte in het gebouw 'wegverdamp't'. Groene daken nemen vocht (zoals hemelwater) op en voorkomen dus wateroverlast.	Energiebesparing t.o.v. actieve koeling (zoals airco), dus minder CO2 uitstoot.	Ten Broeke & Bosch (2012)
Hitte / water-overlast	Blauwe daken	19	Dit houdt in: ofwel het uitrusten van poreus materiaal dat water vasthoudt en verdampt tijdens hitte, of een waterlaag op het platte dak handhaven. Ook besproeiing van daken komt voor, waardoor er een continue stroom van vocht wordt gehandhaafd.	Door de verdamping van water wordt voorkomen dat hitte het gebouw indringt. In sommige gevallen kan zelfs hitte aan het gebouw worden onttrokken. De opnamecapaciteit van blauwe daken kan ervoor zorgen dat er retentie van hemelwaterafvloeiing plaatsvindt, dus zorgen voor minder wateroverlast.	Energiebesparing t.o.v. actieve koeling (zoals airco), dus minder CO2 uitstoot.	Ten Broeke & Bosch (2012)
Hitte / Water-overlast	Waterbuffer	11; 13	De aanleg van extra waterberging.	Opvang van wateroverlast en verkoeling door thermische massa (zie ook groene en blauwe gebieden)	Voorkomt deels het hitte-eiland effect, dus voorkomt dat er warmte-ophoping in de stad plaats gaat vinden. Hierdoor is de vraag naar actieve koeling lager, wordt er energie bespaard en	Van Harmelen <i>et al.</i> (2011)

minder CO2
uitgestoten.

Hitte / Water-overlast	Waterplein	15	Een plein met hoogteverschillen wordt ingericht om in tijden van (extreme) regenval als waterberging te dienen. De rest van de tijd kan het als standaard plein worden gebruikt.	Opvang van wateroverlast en verkoeling door warmtecapaciteit water (zie ook groene en blauwe gebieden)	Voorkomt deels het hitte-eiland effect, dus voorkomt dat er warmte-ophoping in de stad plaats gaat vinden. Hierdoor is de vraag naar actieve koeling lager, wordt er energie bespaard en minder CO2 uitgestoten.	DPNH (2012)
Wateroverlast	Doorlatende verharding	22; 25	Verharding (wegen, trottoirs etc.) worden doorlatend gemaakt waardoor hemelwater in de bodem kan infiltreren.	Terugdringen van wateroverlast.	Aanvulling van het grondwater, verdampingskoeling (wanneer de verharding zelf ook water vasthoudt)	DPNH (2012)
Hitte / water-overlast	Groene en blauwe gebieden	4	Meer plekken in de stad inrichten met groen (bijv. parken, bomen in street canyons, beplanting naast straten, beplanting bij invoeropeningen ventilatielucht, oevers etc.) en water (bijv. fontein, meertjes)	Verkoeling door thermische massa, schaduw en verdamping (passief). Blauwe en groene gebieden zorgen daarnaast voor extra waterberging, dus ten tijde van veel neerslag wordt wateroverlast deels voorkomen.	Voorkomt deels het hitte-eiland effect, dus voorkomt dat er warmte-ophoping in de stad plaats gaat vinden. Hierdoor is de vraag naar actieve koeling lager, wordt er energie bespaard en minder CO2 uitgestoten.	Van Harmelen <i>et al.</i> (2011)

Van deze lijst is, na een snelle screening van gegevensbeschikbaarheid, in overleg met de opdrachtgevers een vijftal maatregelen geselecteerd waarvan de effecten bij implementatie in het bewoonde deel van Rotterdam voor zover mogelijk zijn gekwantificeerd. Dit zijn de volgende maatregelen:

- Verbeteren van de isolatie van de woningvoorraad,
- Verhogen van de albedo van gebouwen,
- Beschaduwning aanbrengen voor gebouwen,
- Besproeiing van daken en gevels en
- Warmte-/koudeopslag.

De reden dat voor deze maatregelen is gekozen is dat er op voorhand van deze set de meeste data beschikbaar zijn om kwantitatief adaptatie- en mitigatie-effecten te kunnen berekenen³. Daarnaast is de verwachting dat voor het uitvoeren van deze maatregelen in de toekomst de meeste effecten worden behaald terwijl er de minste inspanningen tegenover staan. In het verlengde van die redenering bestaat de verwachting dat deze maatregelen voor de stad Rotterdam eveneens simpel maar doeltreffend zijn. In de hoofdstukken 4 t/m 8 wordt een volledige omschrijving van deze maatregelen gegeven.

³ Zonnepanelen behoren in principe ook bij de adaptatie-/mitigatiemaatregelen (zie Annex A), maar zijn niet meegenomen omdat het doel was maatregelen met vooral een adaptatie-effect voorop te stellen. Omdat zonnepanelen een indirecte werking hebben (ze wekken elektrische energie op die vervolgens door airco's kan worden gebruikt) vallen deze buiten deze studie.

3 Aanpak en algemene aannames

Bij het berekenen van de effecten van de 5 gekozen maatregelen (zie hoofdstuk 2) is een systematische aanpak gehanteerd die is gebaseerd op een aantal basisgegevens en aannames, waaronder het type woning en de dimensionering daarvan, de klimaatdata en de grootte waarin de adaptatie- en mitigatie effecten worden uitgedrukt. De wijze van berekenen, de basisdata en aannames worden hieronder beschreven.

3.1 Berekening van de effecten

Voor iedere maatregel zijn de effecten op adaptatie en mitigatie berekend of uit de literatuur afgeleid. Vanwege de beschikbaarheid van gegevens is de berekening uitgevoerd voor één huistype (zie paragraaf 3.2 voor een uitleg hierover) onder de veronderstelling dat, ook al verschillen de basisgegevens en de berekening voor andere huizen en gebouwen, de conclusies ongeveer hetzelfde zullen zijn. Deze veronderstelling moet nog getoetst worden; dit kan wellicht in een vervolgonderzoek aan bod komen.

De effecten op de temperatuur zijn berekend aan de hand van de zomer van 2003 (zie paragraaf 3.3), waarbij de temperatuur binnenshuis onder invloed van de adaptatie-/mitigatie-maatregelen varieert ten opzichte van de temperatuur buitenshuis. De precieze berekening is verschillend voor elke maatregel en wordt daarom gedetailleerd behandeld in de corresponderende hoofdstukken; tevens wordt daar aangegeven uit welke bronnen de adaptatie- en mitigatie-effecten afkomstig zijn.

Het adaptatie effect wordt uitgedrukt in de vermindering van het aantal uur dat de temperatuur binnenshuis hoger is dan 24 °C. Deze temperatuur is gekozen met de aanname dat mensen de airconditioning (mits aanwezig) aanzetten wanneer de temperatuur hoger wordt dan deze waarde.

Het mitigatie effect bestaat uit de energiebesparing die optreedt wanneer de onderzochte maatregel wordt genomen in vergelijking met het gebruik van een airconditioning eenheid in de woning. Als vergelijking voor de mitigatiebatens wordt uitgegaan van het gebruik van een airconditioningsysteem met een koelvermogen van 3,59 kW, geschikt voor ruimtes tot 115 m³. Dit is een systeem dat geschikt is in de standaardwoning waarin in dit onderzoek van is uitgegaan. De aanschafkosten van een dergelijke airco bedragen gemiddeld € 500,=. De installatiekosten van het beschreven systeem bedragen ca. € 300,=. Aangenomen wordt dat dit bedrag weinig zal variëren voor verschillende merken en uitvoeringen van airco's. De totale investering komt dus neer op € 800,= voor 1 woning. De onderhoudskosten bedragen EUR 100,= per jaar (voorrijkosten en 1 uur monteurswerk) waarbij wordt aangenomen dat er géén lekkage van koelmiddel zal optreden (bron: www.chigoairco.nl). De levensduur van de airco wordt verondersteld zo hoog te zijn dat deze niet van invloed op de vergelijking met andere maatregelen is en wordt derhalve ook niet meegenomen. De indirecte energie benodigd voor het vervaardigen van de airco – dit geldt tevens voor alle materialen die aan bod komen bij de maatregelen – zijn buiten beschouwing gelaten.

Voor de berekening van het energieverbruik van de airconditioning is uitgegaan van de hoeveelheid energie die uit de omgeving de standaardwoning binnenkomt. Deze energie komt via twee mechanismes binnen: convectie (warmte uit de lucht komt via de muren en het dak de woning binnen, berekend volgens MacKay (2008)) en zonnestraling (Velds, 1992). De zomer van 2003 is hiervoor als uitgangspunt genomen op basis van uurgegevens van het KNMI. De oriëntatie van een huis ten opzichte van de zon is van grote invloed op de hoeveelheid zonnestraling die een huis ontvangt. Omdat hierin een grote (en onbekende) variatie bestaat, is er gerekend met een lage en met een hoge invang van zonnestraling. Tegelijkertijd is ook de COP van de airconditioning gevarieerd tussen 3 (standaard) en 4 (erg efficiënt). De COP (coëfficiënt of performance) geeft de verhouding aan tussen de weggekoelde warmte en de daarvoor benodigde energie.

Dit levert voor het standaard huis (bouwjaar na 2011) zonder maatregelen een elektriciteitsverbruik voor koeling tot 24 °C op tussen 142 en 237 kWh voor de hele zomer. Deze waarde is geschaald naar andere bouwperiodes (<1974, 1974 – 1992 en 1992 – 2011) aan de hand van het optreden van oververhittingsuren in een standaardhuis in deze periodes volgens Haak (2012). Het gemiddelde verbruik van de vier bouwperiodes is daarmee 277 kWh voor een zomer als die in 2003.

De mitigatie-effecten van maatregelen worden uitgedrukt in vermindering van oververhittingsuren en omgerekend naar een vermindering van het gebruik van airconditioning. De bespaarde kosten zijn berekend met een prijs van elektrische energie van € 0,25/kWh. De vermeden CO₂-uitstoot wordt uitgedrukt in kg CO₂, waarbij is aangenomen dat het verbruik van 1 kWh elektrische energie leidt tot een CO₂ emissie van 0,713 kg CO₂-eq (Nederlandse elektriciteitsmix met import, berekend met 100 yr GWP, Frischknecht, et al.,2007).

Alleen de eerste orde effecten van de maatregelen worden in beschouwing genomen. Indirecte effecten van het gebruik van materialen (waterverbruik, aanleggen van installaties etc.) zijn buiten beschouwing gelaten.

In verband met de vergelijkbaarheid tussen de verschillende opties is ervan uitgegaan dat de gehele woning gekoeld wordt.

De effecten buitenshuis zijn verzameld aan de hand van literatuurgegevens en recente uitkomsten van het onderzoeksproject Climate Proof Cities.

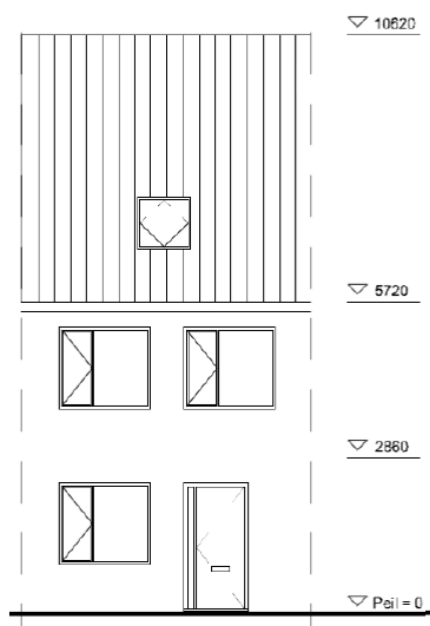
3.2 Omschrijving van het type woning

Als basis voor de woning die centraal staat in dit onderzoek is uitgegaan van een standaard rijtjeswoning. Dit is het meest voorkomende type woning in Nederland (Monitor Nieuwe Woningen, 2012). In Tabel 2 wordt een aantal voor dit onderzoek relevante karakteristieken van de woning (vóór er mitigatiemaatregelen zijn getroffen) weergegeven.

Tabel 2 Karakteristieken van de rijtjeswoning centraal in dit onderzoek

Parameter	Eenheid	Waarde
Bruto vloeroppervlak	m ²	120
Aantal woonlagen	n	3
R-waarde vloer	m ² · K/W	3,8
R-waarde muren	m ² · K/W	3,0
R-waarde dak	m ² · K/W	4,0
Albedo muren	-/-	0,3
Albedo dak	-/-	0,3

In Figuur 1 staat een schematische weergave van het rijtjeshuis.



Figuur 1 Schematische weergave van de in dit onderzoek gemodelleerde woning

Het bouwjaar van de woning is buiten beschouwing gelaten aangezien het bouwjaar slechts een indicatie is van de mate van isolatie van het huis, terwijl de isolatiewaarde van de onderdelen van het huis in dit onderzoek bekend zijn. Daardoor is een onderscheid naar bouwjaar niet nodig.

De woningvoorraad in Rotterdam eind 2011 is bijna 300.000 woningen (CBS-statline). Het percentage rijtjeswoningen in Nederland is ca. 36%. Als deze verhouding ook voor Rotterdam geldt, zou dit betekenen dat het aantal rijtjeswoningen in Rotterdam ruim 100.000 bedraagt.

3.3 Klimaatgegevens

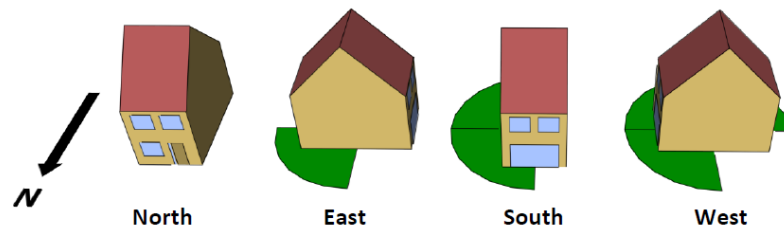
De adaptatie-effecten zijn zoals uitgelegd uitgedrukt in het aantal uren dat het binnenshuis warmer is dan 24 °C (Haak, 2012). Voor de berekening van dit effect in de toekomst kon niet worden uitgegaan van de KNMI06 klimaatscenario's (Klein Tank en Lenderink, 2009) die alleen een gemiddelde temperatuur geven. De computersimulaties, waarvan voor een aantal maatregelen gebruik gemaakt is, moeten gevoed worden met temperatuurgegevens per uur. De berekening van

deze effecten binnenshuis is daarom gedaan op basis van de klimaatgegevens van de warme zomer van 2003 in De Bilt. Omdat een zomer als in 2003 vaker zal voorkomen rond het jaar 2040 is dit een goede indicatie van wereldwijd hogere temperaturen en een geschikte benadering van een toekomstig klimaat.

Aangezien de simulaties uitgaan van temperaturen in De Bilt is geen rekening gehouden met het optreden van het hitte-eiland effect in steden. Metingen in Rotterdam laten zien dat op warme dagen er regelmatig een verschil van 5 graden en meer is tussen de temperatuur in de stad en het omringende platteland (CPC, 2012). Voor de uitkomsten in dit rapport betekent dit dat de mitigatie- en adaptatie effecten van maatregelen mogelijk onderschat worden.

3.4 Gebouworientatie

Zoals in bovenstaande paragrafen is uitgelegd zijn de klimaatgegevens van de zomer van 2003 gebruikt om de temperatuureffecten te modelleren. De temperatuur binnenshuis echter is afhankelijk van de positie van de woning ten opzichte van de zon. Daarom zijn waar mogelijk de effecten berekend voor een woning in de posities noord, oost, zuid en west om een indicatie te geven van de invloed van de oriëntatie. In Figuur 2 wordt dit verschil in oriëntatie weergegeven.



Figuur 2 Schematische weergave van de bouworientaties t.o.v. de windrichtingen. N.B: het verschil tussen noord en zuid is dat de voorgevel van de woning 180°C is gedraaid en dat er dus zonlicht direct in de woonkamer binnentreedt.

Bij de presentatie van de resultaten is steeds het gemiddelde aantal uren boven de temperatuurlimiet (24 °C) genoemd, waarbij een verondersteld wordt dat de woningvoorraad evenredig verdeeld is over de oriëntaties.

3.5 Prijzen en kosten

Alle prijzen en daarmee de kosten zijn, tenzij anders vermeld, uitgedrukt in Euro's van 2012.

Jaarlijkse kosten zijn berekend volgens een eenvoudige "discounted cash flow" benadering, volgens: $A = I * [r(1+r)^n / (1+i)^{n-1}] + OM$

Waarin A= jaarlijkse kosten, I = investering, r =discount rate, n= de levensduur van de investering in jaren en OM= som van onderhouds-, energie- etc. uitgaven per jaar.

In deze eenvoudige benadering wordt aangenomen dat de jaarlijkse kosten voor onderhoud, energie etc. niet veranderen gedurende de looptijd van het project. De discount rate is gezet op 2,5%, volgens de Nederlandse praktijk voor overheidsprojecten⁴.

⁴ <https://zoek.officiëlebekendmakingen.nl/kst-29352-5.html>

4 Maatregel 1: Sproeien van daken en gevels

De literatuur over het effect van het sproeien van daken en gevels is dun en komt met name van Aziatische landen, waar de klimatologische omstandigheden anders zijn dan in Nederland. Om toch een eerste inzicht te kunnen geven in voor- en nadelen van deze maatregel met de beperkte capaciteit van deze verkenningsstudie, zijn een aantal aannames gedaan waarbij de werkelijke resultaten zouden kunnen afwijken in de Nederlandse situatie. Deze aannames en onzekerheden worden vermeld in de tekst.

4.1 Beschrijving

Door het besproeien van daken en gevels kan het dakoppervlak en de daaronder liggende ruimtes worden gekoeld door middel van verdamping. Met verdampingskoeling wordt een manier van koelen bedoeld waarbij water wordt ingezet als het koelmiddel (Ten Broeke en Bosch, 2012). Het water neemt warmte op en verdampt, waarbij voelbare warmte wordt omgezet in latente warmte. Het principe van verdampingskoeling berust op het feit dat voor de verdamping van water veel energie nodig is, namelijk 2,3 MJ per liter. Ter vergelijking, droge lucht opwarmen kost per °C 1,2 kJ/m³ of 1 kJ/kg, ruim een factor 2000 minder.

Het verdampingspotentieel is afhankelijk van het dauwpunt⁵ en de relatieve luchtvochtigheid in de buitenlucht. De relatieve luchtvochtigheid neemt af bij het toenemen van de temperatuur, waardoor het koelingspotentieel via verdamping het grootst is op het warmste moment van de dag. In Nederland blijkt dat het toepassen van verdampingskoeling onder de huidige omstandigheden voornamelijk zinvol is tijdens hittegolven op tijdstippen tussen 12:00 en 17:00 uur (Ten Broeke en Bosch, 2012). Tijdens gemiddelde zomers is verdampingskoeling voor het buitenmilieu vanwege de matige temperatuur (gemiddeld 21 °C) en hogere relatieve luchtvochtigheid van ca. 65% niet noodzakelijk en ook niet zinvol.

De warmteflux van buiten naar binnenshuis is onder andere afhankelijk van de dak constructie/materiaalgebruik en isolatiewaarde. Hoe beter het huis bijvoorbeeld geïsoleerd is, hoe minder effect deze maatregel dan ook zal hebben. De warmteflux voor een Nederlandse woning en het effect van isolatie zou nader onderzocht moeten worden. Onderstaande berekening is uitgevoerd voor een woning met isolatiegraad overeenkomstig met bouwjaar 1974 – 1992 (matig geïsoleerd).

4.2 Uitvoering, dimensionering en kosten

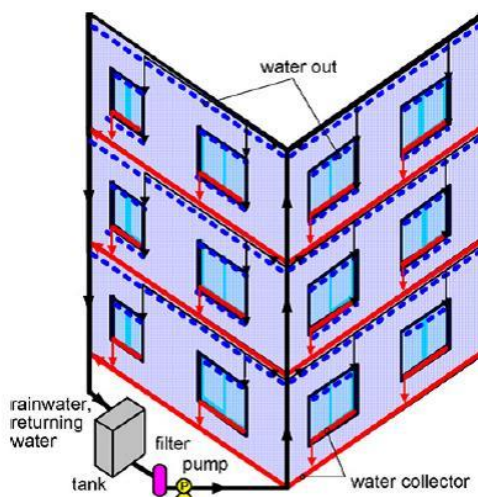
4.2.1 *Investeringskosten*

De investeringskosten betreffen het installeren van de sproei installatie (buitenlangs aangelegd), ruwweg zijn er twee mogelijkheden;

- 1) gebruik van drinkwater uit leidingen met waterdruk.
- 2) gebruik van regen- of oppervlaktewater met een waterpomp en eventueel een opslagtank.

⁵ Het dauwpunt is de temperatuur waarbij water condenseert onder gelijke dauwspanning, anders gezegd, de temperatuur waarbij het in de lucht aanwezige vocht zal gaan neerslaan.

De opzet van He en Hoyano (2008) volgens figuur 3 wordt als uitgangspunt gebruikt voor deze studie waarbij voor elke verdieping en raam een leiding en goot (voor wateropvang) wordt aangelegd. Voor het dak gaan we ervan uit dat er één leiding over de nok loopt en er geen extra dakgoten nodig zijn. Omdat sproeien vooral zinvol is tussen 12:00 en 17:00, is aangenomen dat de noord- en oost gevel nooit bewaterd zullen worden en dat daarom bij een rijtjeswoning maar één gevel geschikt is voor bewatering (zie ook figuur 9 in He en Hoyano (2008)). Voor het dak geldt wel dat beide kanten bewaterd zullen worden.



Figuur 3 Voorbeeld van het bewateren van de gevel, in dit geval met regenwater(opslag) en een waterpomp (bron: He & Hoyano, 2008)

Uitgaande van figuur 3 en de standaard rijtjeswoning volgens SenterNovem (2006)⁶ is er in totaal 33,52 meter leiding nodig (à € 0,78/m), en 15,8 meter goot (à € 7,57/m) plus 26 gootbeugels à € 2,81 per stuk. In de regenpijp zelf is al voorzien. Daarnaast is nog een timer/besproeiingscomputer (€ 135) en vochtsensor (€ 60) nodig. Een schatting voor de totale kosten komt daarmee uit op € 400 per woning. Abernethy (1985) gaat er van uit dat het systeem minstens net zo lang mee gaat als de levensduur van het gebouw zelf.

Wanneer wordt uitgegaan van het gebruik van drinkwater⁷ is dit het hele basissysteem. Bij gebruik van regen- of oppervlakte water is een additioneel een reservoir, filter en pomp en leidingen nodig om water uit een reservoir op te pompen. Bij gebruik van grondwater is het reservoir niet nodig, maar we nemen aan dat in dichtbebouwde stedelijke gebieden het gebruik van grondwater niet veel zal voorkomen.

⁶ De voor- en achtergevel van een standaard rijtjeswoning meet 5,40 x 5,72 m, de voor- en achterkant van het dak meet 5,4 x 4,9 m. Het gemiddelde aantal m² gebouwschil van een standaard rijtjeswoning is daarmee 115 m² (SenterNovem 2006).

⁷ Vanuit duurzaamheidsoogpunt is het echter de vraag of sproeien met drinkwater wenselijk is.

4.2.2 *Installatiekosten*

Omdat er op het moment voor zover bekend geen bedrijven zijn die deze systemen installeren, is voor de installatiekosten van het basis besproeiingssysteem een ruwe schatting gedaan en aangenomen dat twee mensen 1 dag werken om het besproeiingssysteem aan te leggen. Met een verondersteld uurloon van € 30,= en € 50,= voorrijkosten komt de schatting uit op € 530,= ($8 \times 2 \times €30,= + € 50,=$) installatiekosten.

Voor de installatie vanuit regen- of oppervlakte water is een additionele pomp nodig van ca. 750W, deze kan 50 l/min tot 50m hoog oppompen (€200,-)⁸. De levensduur van de pomp is op 10 jaar gesteld, zonder onderhoudskosten. Kosten voor een 5000 liter plastic of beton reservoir zijn bij benadering: reservoir en levering en aansluitingsmateriaal €2500, filter €500, aanlegkosten €1000⁹, in totaal €4000. Levensduur is eveneens op 10 jaar gesteld.

4.2.3 *Onderhoudskosten*

Behalve de ventielen/kleppen zijn er geen bewegende delen. De leidingen en goten moeten worden doorgespoten om verstoppingen te voorkomen en moeten leeg worden laten gelopen in de winter. Ook is er een periodieke controle nodig (Abernethy, 1985). Er is aangenomen dat de kosten voor deze controles en handelingen verwaarloosbaar zijn.

4.2.4 *Operationele kosten*

Voor een drinkwatersysteem zijn de elektriciteitskosten zijn minimaal, daar er gebruik kan worden gemaakt van de waterdruk. Er is alleen elektriciteitsgebruik voor de timer/besproeiingscomputer. De benodigde hoeveelheid water is afhankelijk van de temperatuur, dauwpunt en relatieve luchtvochtigheid. Bij een studie in Japan werd voor een simulatiemodel 12 l/m²/uur gebruikt (He en Hoyano, 2008). Dit getal wordt ook voor deze verkenning gebruikt, ook al is het onbekend in hoeverre dit watergebruik ook op Nederland van toepassing is.

Het aantal uur dat het dak en gevel bewaterd wordt is maximaal 5 uur per dag en alleen op dagen dat de binnentemperatuur boven de 24 graden uit komt. Er wordt hierbij van uitgegaan dat de studie van He en Hoyano (2008) (zie paragraaf 4.2.1) ook van toepassing is op de Nederlandse situatie, waarbij de binnentemperatuur 's middags 2 graden hoger is dan de buitentemperatuur. Volgens deze aanname is er dus koeling nodig vanaf een buitentemperatuur van 22 graden. In de zomer van 2003 waren er 78 dagen waarbij de temperatuur boven de 22 graden Celsius uit kwam (weergegevens KNMI)¹⁰. Dat zijn 78×5 uur = 390 operationele uren.

Het watergebruik voor bewatering van het dak en de gevel van een woning in Nederland zou dan jaarlijks: 12 liter \times 115 m² \times 390 uur = 538.200 liter zijn. Met een (drink)waterprijs van € 1,45/m³ (Vewin, 2010) zou het € 780 per jaar per rijtjeswoning kosten.

⁸ <http://www.hovanmelis.nl/tuin-en-terras/waterpompen-tuinpomp/tuinpomp-grondwaterpomp/elektrische-city-pump-eurom-tp750s-waterpomp-750-w.html>

⁹ www.db.com, www.regenwatershop.com, aanlegkosten bestaan uit machinehuur € 500 en twee dagen arbeidsloon € 500.

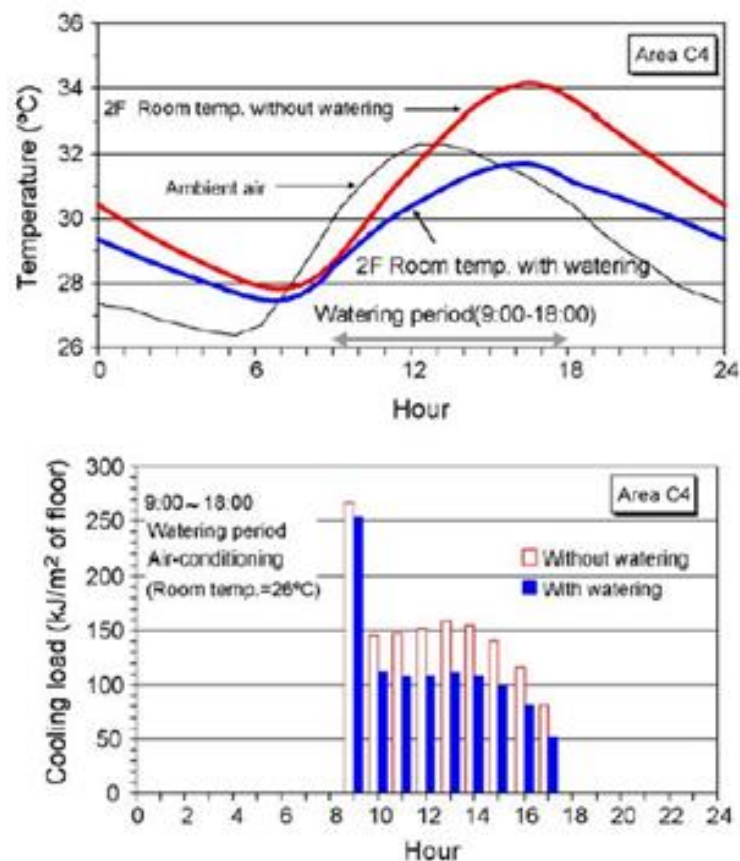
¹⁰ Er is hier geen onderscheid gemaakt in de tijdsduur dat de temperatuur boven de 22 graden uit kwam. Het kan zijn dat dit een hele middag het geval was, of slechts 1 uur.

Voor een systeem gebaseerd op regen- of oppervlaktewater is het elektriciteitsverbruik de grootste kostenpost. Bij een waterverbruik van 12 liter/m²/uur en een te besproeien oppervlak is 115 m² is het waterverbruik komt 1380 l/uur. Dat komt overeen met 23 liter per minuut. Bij 23 l/min verbruikt de voorgestelde 750W pomp naar schatting $23/50 \times 750 = 345$ W. Voor 390 operationele uren is het totale verbruik 135 kWh, ofwel € 35 per jaar.

4.2.5 *Effecten*

Het sproeien van de gebouwschil leidt tot een vermindering van het aantal uren dat het binnenshuis meer dan 24 °C is. Er zijn weinig studies bekend die exact hebben uitgerekend of gemodelleerd in hoeverre het dakoppervlak en de muren kunnen afkoelen door bewatering en hoe dit de binnentemperatuur beïnvloedt. De meeste studies gaan bovendien uit van een metalen opslagloods of fabriekshal met plat dak en weinig isolatie. Een Japanse simulatiestudie van He en Hoyano (2008) benadert de Nederlandse rijtjeswoning het beste. He en Hoyano (2008) gaan uit van een vrijstaande woning met een schuin, houten dak met glaswol isolatie (albedo = 0.15, heat transmission = 0.41 W/m² K) en houten muren met glaswol isolatie (albedo = 0.5, heat transmission, = 0.69 W/m² K. Deze woningen zijn in de simulatie voorzien van een hydrofiele TiO₂ coating (81% van oppervlak). He en Hoyano (2008) houden in hun onderzoek rekening met het aanbrengen van een hydrofiele coatingslaag op de muren en het dak (super-hydrophilic photocatalyst (TiO₂)), onder de aanname dat er een dun laagje water op de gevel en het dak blijft staan. Onderzoek heeft echter aangetoond dat meer water verdampt op een hydrofoob oppervlak doordat er meer water op het oppervlak blijft staan in de vorm van waterdruppels, die een groter contact met de lucht hebben (Blocken en Carmeliet, 2006). Het effect van de coatingslaag kan invloed hebben op de resultaten van deze studie. Deze coatingslaag is niet meegenomen in de investeringskosten. Het verdampingspotentieel waar in de simulatie rekening mee is gehouden geldt voor een zomerse dag in Japan (32 °C, 55% relatieve luchtvochtigheid) en kan andere resultaten geven voor de Nederlandse situatie.

Figuur 4 van He en Hoyano (2008) geeft aan dat zonder bewatering de binnentemperatuur gedurende de ochtend oploopt, rond het middaguur de buitentemperatuur overschrijdt en aan het eind van de middag tot 2 graden boven de buitentemperatuur uit kan komen. Het bewateren van het dak en de gevels kan aan het eind van de middag voor 2 graden koeling zorgen binnenshuis ten opzichte van de situatie zonder bewatering. De kamertemperatuur blijft hierdoor net onder de buitentemperatuur.



Figuur 4 Variatie in kamertemperatuur (links) en koelcapaciteit (rechts) voor een vrijstaande woning (bron: He en Hoyano, 2008)

Het maximaal haalbare resultaat is daarom het voorkomen van warmere binnend- dan buitentemperaturen en dus het evenaren van de buitentemperatuur. Het doel, het vermijden van het aantal uren oververhitting binnenshuis, is daarmee alleen realiseerbaar als de buitentemperatuur niet boven de 24 graden Celsius uit komt. Van de 78 dagen dat de buitentemperatuur in 2003 boven de 22 graden uit kwam (zie paragraaf 5.2.3), kwam op 55 dagen de buitentemperatuur ook boven de 24 graden uit. Dat betekent dat bewatering op gevel en dak alleen op de overige 23 dagen oververhitting binnenshuis had kunnen voorkomen, oftewel 30% van de tijd.

Een standaard Nederlandse rijtjeswoning had in 2003 1415 uren oververhitting (bij gemiddelde oriëntatie) (Haak, 2012). We nemen hierbij aan dat deze oververhittingsuren evenredig verdeeld zijn over de 78 dagen waarop de buitentemperatuur boven de 22 graden uit kwam en dat bewatering van 12 tot 17 oververhitting binnenshuis volledig had kunnen voorkomen op 23 van deze dagen¹¹. Met deze aanname zou de rijtjeswoning 30% minder uren hebben waarbij

¹¹ Deze aanname is vrij uw, immers, het aantal uren oververhitting zal op hetere dagen groter zijn dan op 'koelere' dagen. Het voert echter te ver om binnen deze studie van alle dagen een temperatuurgrafiek van binnen- en buitentemperaturen te maken. Verder onderzoek kan hier nauwkeurigere resultaten leveren.

de binnentemperatuur boven de 24 graden Celsius uit komt, oftewel een reductie van 425 uur¹².

De baten van verdampingskoeling worden hier in geld uitgedrukt via besparing op energie waarbij de maatregel wordt vergeleken met de inzet van traditionele airconditioning, waarbij wordt aangenomen dat deze alleen aan gaat als de temperatuur binnenshuis boven de 24 graden Celsius komt (zie paragraaf 4.4).

4.2.6 *De neveneffecten van besproeien van gevels en daken*

Met deze maatregel neemt juist tijdens droge perioden het watergebruik toe, wat waterschaarste kan verergeren. Sensoren kunnen bijhouden wanneer het nodig is om water te sproeien en wanneer ze uit kunnen worden gezet, zodat er geen water verspild hoeft te worden. Ook kan het water van de gevel worden opgevangen en worden hergebruikt.

Verder hoeft er in principe geen water van drinkwaterkwaliteit te worden gebruikt. Het gebruiken van oppervlakte- of regenwater middels een waterpomp spaart energie uit voor zuivering tot drinkwater. Hierbij moet wel bestudeerd worden wat de minimale waterkwaliteit moet zijn om ziekteverspreiding te voorkomen. Het vervangen van drinkwater door oppervlakte- of regenwater lost overigens niet het probleem van waterschaarste op. Het maakt het wel moeilijker om vraag en afname van water te monitoren en controleren.

Door sproeien worden extreme temperatuurverschillen op het dak en de gevels vermeden, waardoor de levensduur wordt verlengd en minder onderhoud nodig is (Feustel, 1991, Carrasco 1987, Smith 1988). Of er een risico bestaat voor schimmelvorming moet nog worden onderzocht (Narumi *et al.*, 2009).

Het sproeien van gevels en daken kan ook leiden tot een afkoeling op straatniveau (en daarmee reductie van het stedelijk hitte-eilandeffect), maar de reikwijdte van dit effect is nog onbekend. Wel is er onderzoek gedaan naar de afkoeling van de lucht boven een nat dak. Nakayama en Fujita (2010) hebben een verkoeling van ca. 5 graden van de lucht op 1 meter boven het dakoppervlak hebben gemeten door het toepassen van verdampingskoeling via verschillende poreuze materialen. Toparlar (2012) heeft een simulatie uitgevoerd met het Computational Fluid Dynamics (CFD) model om te zien wat het effect van een fictieve vijver op het dak van een gebouw in de wijk Bergpolder-Zuid in Rotterdam is. Volgens de simulatie kan een vijver/blauw dak de luchttemperatuur op 1.5 m hoogte boven het dak verlagen met 2.7°C tot 3.9°C.

Met de besproeiing van daken en gevels in de zomer wordt géén nadelig neveneffect verwacht in de winter.

¹² Dit getal kan afwijken van het aantal operationele uren van het bewateringssysteem, omdat het ook buiten de werkingsperiode effect heeft (zie ook het verschil tussen de rode en blauwe lijn in Figuur 4 na 18.00 uur).

4.3 Verdampingskoeling bij een appartementencomplex

Ter illustratie is het aardig om de studie van Narumi *et al.* (2009) te noemen waarbij is onderzocht wat het effect van verdampingskoeling is op de binnentemperatuur en het energiegebruik van een appartementencomplex. Deze studie is van toepassing op de situatie in Japan en kan daarom andere resultaten geven voor de Nederlandse situatie. In deze studie is in een leeg gebouw in Japan gemeten wat het effect is van het sproeien van het dak, de gevel en het sproeien van de lucht bij de luchtinlaat van de airconditioner. Ook is vervolgens berekend hoeveel energie dit zou besparen.

Het besproeien van het dak zorgde voor een gemiddelde daling van de binnentemperatuur van een appartement direct onder het dak van 1.2 °C (op 120cm boven het vloeroppervlak). Dit zorgt voor een reductie in het energiegebruik van de airconditioner van 9,7/22% (tijdens het gebruik van de airco).

Het besproeien van de gevel, waardoor gekoelde lucht het appartement kan binnenstromen, zorgde voor 1.9 °C koeling van de binnentemperatuur (op 120 cm hoogte boven de vloer). De luchtvochtigheid in het appartement neemt met deze maatregel echter wel toe. Het thermisch comfort, uitgedrukt in de SET index, komt daarmee gemiddeld uit op 0.9 °C reductie. Het energiegebruik van de appartementen die niet direct onder het dak liggen kan hierdoor met 65% afnemen (direct onder het dak 51%).

Het sproeien van het gebied rond de luchtinlaat van de airconditioner zorgde gemiddeld voor een reductie in het energiegebruik van 36%.

Het uitvoeren van alle maatregelen tegelijk zou hiermee in totaal tot een besparing van 80% van het energiegebruik van de airconditioner kunnen leiden in het appartementencomplex¹³.

4.4 Mitigatie effect

De effecten op mitigatie worden uitgedrukt in bespaarde kosten door vermeden elektriciteitsgebruik en vermeden CO₂ uitstoot. He en Hoyano (2008) geven aan dat in Japan, afhankelijk van het gebouwtype, de gemiddelde koellast over de dag met 30-40% kan afnemen door bewatering (zie ook figuur 4 (rechts) voor een van de bestudeerde gebouwtypen). Dit betekent een reductie in het energiegebruik van de airconditioning van gemiddeld 35%. Wanneer gebruik gemaakt wordt van een elektrische pomp om water op te pompen ontstaat er echter wel weer CO₂ uitstoot (overeenkomend met 135 kWh: 96 kg CO₂). Met bovenstaande schattingen is het vermeden elektriciteitsgebruik (kWh), bespaarde kosten door vermeden elektriciteitsgebruik (EUR) en vermeden CO₂ uitstoot (kg CO₂) voor de Nederlandse situatie berekend, zie tabel 3.

¹³ Dit getal is alleen van toepassing op het energiegebruik van de airconditioner. Het extra energiegebruik voor besproeiing is hierbij niet meegenomen.

4.5 Samenvatting

In tabel 3 en 4 wordt een overzicht gegeven van alle kosten en baten van het bewateren van gevels en daken. Tabel 3 geeft de uitkomsten voor het gebruik van regenwater, Tabel 4 voor het gebruik van regen- of oppervlaktewater. Het bewateren van gevel en dak is niet voldoende om te voorkomen dat er nog flink wat oververhittingsuren optreden. In het geval van drinkwatergebruik zijn vooral door het waterverbruik de jaarlijkse kosten van bewatering vele malen hoger dan die van een airconditioning installatie. Het gebruik van regen- of oppervlaktewater voor besproeiing beperkt de kosten van deze maatregel enigszins: de grootte van de investering in het opslagreservoir bepaalt de rentabiliteit. Als gebruik kan worden gemaakt van een bestaand opslagreservoir zijn de kosten lager dan een airconditioning installatie, maar moet er in geval van watertekort worden aangevuld met leidingwater, dan wordt besproeiing qua kosten weer ongunstiger.

Om de resterende 990 oververhittingsuren weg te koelen is aangenomen dat toch een airconditioning installatie wordt gebruikt. Qua kosten is dit onvoordelig; en alleen bij gebruik van drinkwater treedt een elektriciteitsbesparing (en CO₂ emissiereductie) op ten opzichte van een situatie waarin de gehele woning met een airconditioning gekoeld zou worden.

Tabel 3 Totaaloverzicht kosten en baten 'Sproeien van daken en gevels' per rijtjeswoning, variant drinkwater

Uitwerkings gebied	Variabele	Eenheid (per woning/2003-zomer)	Geen maatregel (BAU)	Air conditioning	Bewateren gevels en dak	Bewateren én airco
Adaptatie	Aantal uren $T_{\text{binnen}} > 24 \text{ }^\circ\text{C}$	Uur	1415	0	990	0
Mitigatie	Energiegebruik tov BAU	kWh	n.v.t.	170-280	0	100-180
	CO ₂ -emissies tov BAU	kg	n.v.t.	120-200	0	80-130
Financiële kosten	Aanschaf	€	n.v.t.	800	530	1330
	Energiekosten tov BAU	€/jaar	n.v.t.	40-70	0	25-45
	Waterkosten tov BAU	€/jaar	n.v.t.	0	780	780
	Onderhoudskosten	€/jaar	n.v.t.	100	0	100
	Jaarlijkse kosten	€/jaar	n.v.t.	230-260	800	1020-1040
Neven-effecten	Watergebruik tov BAU	l	n.v.t.	0	538200	538200

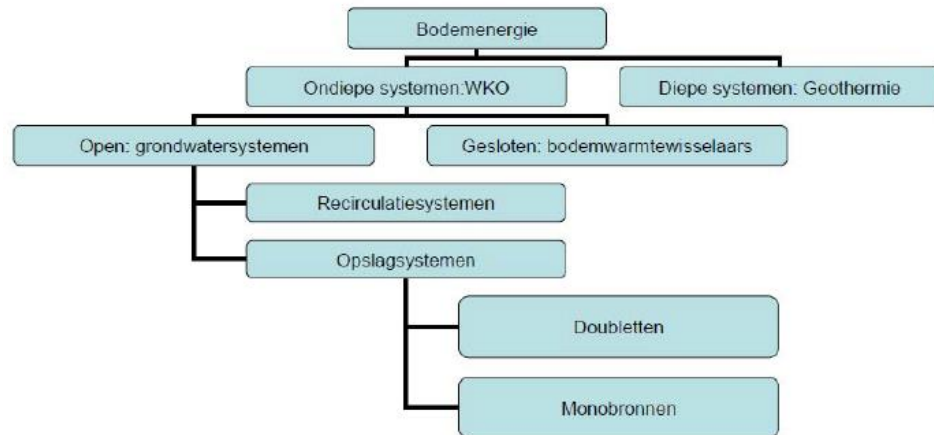
Tabel 4 Totaaloverzicht kosten en baten 'Sproeien van daken en gevels' per rijtjeswoning, variant regen- of oppervlaktewater

Uitwerkings gebied	Variabele	Eenheid (per woning/2003-zomer)	Geen maatregel (BAU)	Air conditioning	Bewateren gevels en dak	Bewateren én airco
Adaptatie	Aantal uren $T_{\text{binnen}} > 24 \text{ } ^\circ\text{C}$	Uur	1415	0	990	0
Mitigatie	Energiegebruik tov BAU	kWh	n.v.t.	170-280	135	300-410
	CO2-emissies tov BAU	kg	n.v.t.	120-200	95	215-295
Financiële kosten	Aanschaf	€	n.v.t.	800	4730	1530
	Energiekosten tov BAU	€/jaar	n.v.t.	40-70	35	75-100
	Waterkosten tov BAU	€/jaar	n.v.t.	0	0	0
	Onderhoudskosten	€/jaar	n.v.t.	100	0	100
	Jaarlijkse kosten	€/jaar	n.v.t.	230-260	575	810-830

5 Maatregel 2: Warmte- en koude-opslag

5.1 Beschrijving

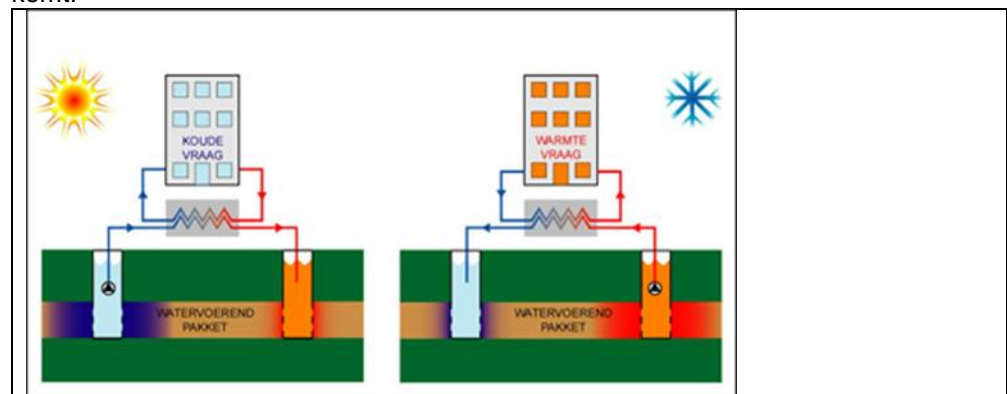
Warmte-koudeopslag (WKO) in de bodem maakt in tegenstelling tot geothermie gebruik van lagen in de ondiepe grond. Er bestaan open en gesloten systemen. In dit onderzoek ligt de focus op open systemen.



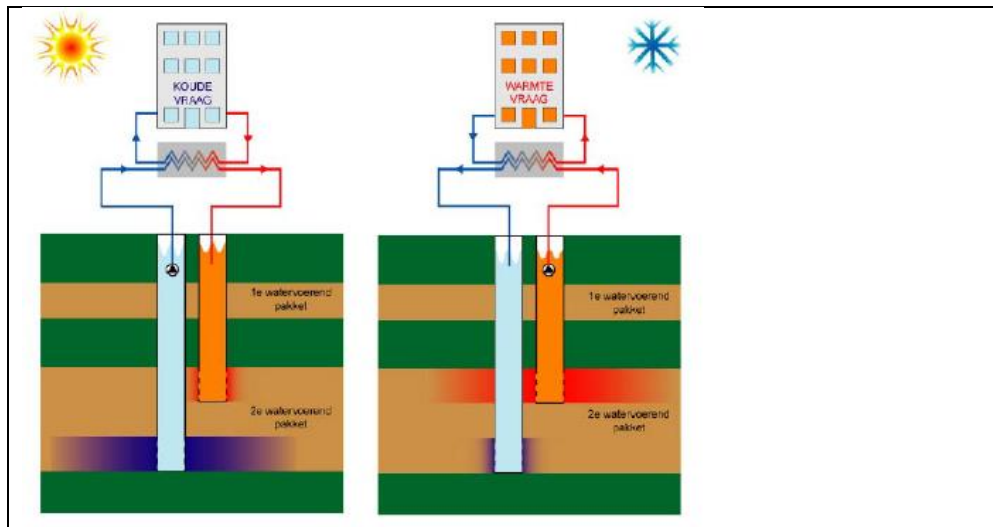
Figuur 5 Bodemenergie (bron: SKB *et al.*, 2011)

In deze WKO-systemen wordt grondwater uit de bodem als energiedrager gebruikt voor koeling en verwarming. Zomers kan er gekoeld worden met kou die in de winter is opgeslagen in het grondwater. Daarnaast is verwarming in de winter mogelijk door gebruik te maken van de warmte die tijdens de zomer is opgeslagen (bodemenergie.nl,2010).

De bronnen van een WKO zijn aquifers – watervoerende zandlagen waaruit water wordt opgepompt. Er zijn WKO's met één bron (monobron) of met twee geslagen bronnen (doublet) – zie figuur 6 en 7. Bij een enkele bron worden de warmte en koude in één bron boven elkaar opgeslagen. Het is dan belangrijk dat er in de aquifer een kleilaag is die ervoor zorgt dat er geen kortsluiting tussen de bronnen komt.



Figuur 6 Open WKO-systeem – Doublet (bron: Duurzameenergiethuis, 2009)



Figuur 7 Open WKO-systeem – Monobron (bron: Duurzameenergiethuis, 2009)

WKO's kunnen worden aangesloten op verschillende types gebouwen. De pieken in warmte- en koudevraag dienen beperkt te zijn, daarom wordt de voorkeur gegeven aan energiezuinige gebouwen. Bestaande bouw moet vaak eerst gerenoveerd worden om geschikt te zijn voor een WKO-systeem (Projectgroep DEPW, 2010).

Voor grote systemen – utiliteitsbouw of complexen van woningen – wordt vaak een open bronsysteem gebruikt. Er moet een bepaalde schaalgrootte zijn, wil een WKO van nut zijn voor woningbouw. Op Bodemenergie.nl wordt gesproken over minimaal 100 woningen (2012). In woningbouwprojecten is er sprake van een collectief grondwatersysteem dat gecombineerd wordt met een centraal opgestelde warmtepomp, een piekkel en warmtedistributie, of met individuele combiwarmtepompen in de woningen.

Een andere vereiste voor een goedwerkend WKO-systeem is, bij de huidige stand van de techniek, een evenwicht in de warmte- en koudevraag. In de Nederlandse woningbouw is er veel meer vraag naar verwarming (in de winter) dan koeling (in de zomer). Daarom zijn WKO-systemen gebruikelijker in utiliteitsbouw, waar de warmte- en koudevraag meer in balans is. Echter, aangenomen wordt dat wanneer koeling wordt aangeboden aan woningen, de disbalans tussen warmte- en koudevraag genoeg zal reduceren om een operationeel WKO-systeem in gebruik te nemen.

WKO's kunnen niet altijd en overal zomaar toegepast worden. Er moet een geschikte watervoerende laag zijn, de bodemkwaliteit moet bekend zijn, de bodem moet eventueel gesaneerd worden en ook moet onderzocht worden of de locatie in een beschermingsgebied of drinkwaterwingebied ligt. Daarnaast is het belangrijk om te onderzoeken of er andere WKO-gebruikers zijn en wat de consequenties ervan zijn (DEPW, 2010).

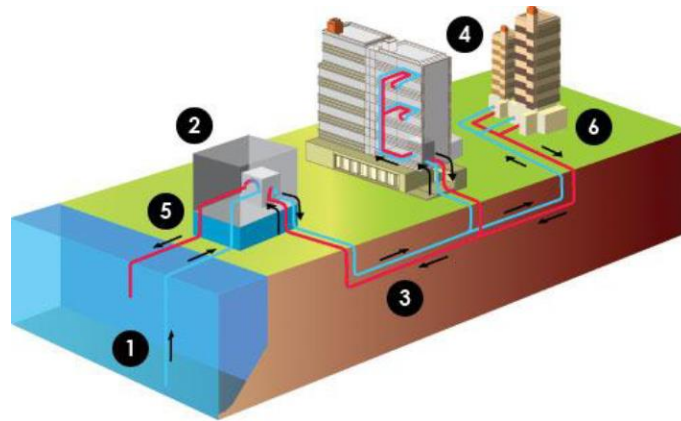
Een WKO als koudesysteem heeft een relatief hoge koelingstemperatuur en heeft als warmtesysteem een relatief lage temperatuur (35 °C). Daarom worden WKOs vaak in combinatie met warmte-afgiftesystemen gekozen die via een lage temperatuur effect sorteren (vloerverwarming, ventilatorconvectors, wandverwarming) (Lente-akkoord, 2011).

Een andere reden dat WKOs niet vaak voorkomen bij woningbouw is omdat er een aparte beheersorganisatie nodig is voor het WKO-systeem, wat financiële verplichtingen meebrengt. Daarnaast is het aantal WKOs op een bepaald grondgebied gebonden aan fysieke grenzen. In de stedelijke omgeving kan niet alle bouw op WKOs worden gekoeld/verwarmd omdat de capaciteit van de bodem dat niet toelaat.

5.1.1 *Oppervlaktewater*

Naast het gebruik van grondwater, is het ook mogelijk om oppervlaktewater te gebruiken voor koeling. Er kan gekoeld worden met zeewater, water uit diepe meren of rivieren. De temperatuur van het water van de koudebron moet tussen de 4 en 7 graden Celsius liggen (Öko-Institut, 2012). Het koude water wordt opgepompt en koelt het koudenetwerk via een warmtewisselaar. Het opgewarmde water wordt weer teruggeleid naar de bron (ibid.). De energiemaatschappij Nuon omschrijft het gebruik van een WKO met oppervlaktewater als volgt: Bij de productie van koude wordt gebruikt gemaakt van koud water in de diepe lagen van een plas of meer. Dit water wordt naar warmtewisselaars in een koudecentrale gepompt. Het water gaat door de warmtewisselaar waarbij het koude water het water in de leidingen van het koudesysteem koelt. Het iets opgewarmde water wordt vervolgens meteen teruggepompt naar de van nature warmere bovenlaag van de plas. Het gekoelde water in het koudesysteem gaat naar de klant. Dit water geeft zijn koude af aan het interne koelsysteem bij de klant. Klanten koelen hiermee ruimtes, computers en servers. Zij hebben geen eigen koelsysteem meer nodig (Nuon, 2010).

Naast de emissiereductievoordelen (zie paragraaf Effecten) heeft dit systeem ook voordelen zoals lage exploitatiekosten en een korte payback periode (ibid.). In Nederland zijn al voorbeelden van stadskoeling met oppervlaktewater in gebruik. Figuur 8 toont een schematische weergave van de opbouw van een dergelijk systeem.



Figuur 8 Districtkoeling met diep water: 1:Deep water intake, 2:Heat exchanger building, 3:Chill water loop, 4:Serviced buildings, 5:Seawater discharge, 6 Cooling effect (Ocean Thermal Energy Corporation, 2012)

Zo wordt stadskoude in Amsterdam toegepast aan de Zuidas en in Amsterdam Zuidoost. “Koud water wordt via een centrale uit respectievelijk de Nieuwe Meer en de Ouderkerkerplas gepompt, via buizen naar een bedrijventerrein gebracht en daar gebruikt voor het koelen van gebouwen en ICT-systemen” (Amsterdam.nl, 2011). Het water voor de Zuidas wordt van 30 meter diepte uit de Nieuwe Meer gehaald en heeft een temperatuur van rond de 5-6 graden Celsius. Wanneer het water uit het meer te warm is, worden er elektrische koelers gebruikt voor het koelingssysteem (ibid.,p.16), dat wil zeggen dat er een back-up systeem nodig om de koelfunctie te kunnen waarborgen.

5.2 Uitvoering, dimensionering en kosten

Deze berekening gaat uit van koeling van woningbouw met bouwjaar >2011 . Deze nieuw gebouwde huizen hebben goede isolatie, welke belangrijk is voor een goede werking van WKO's. N.B: het verbruik van de airconditioning in deze woning is lager dan in woningen met eerdere bouwjaren, vandaar dat de vergelijking in het energieverbruik anders uitpakt dan bij de overige maatregelen waarbij oudere woningen (met mindere isolatiegraden) in beschouwing zijn genomen.

Een WKO kan koelen en verwarmen. In deze berekening is echter alleen naar het koelende effect van de WKO gekeken. Bij koudelevering (directe koudelevering - zonder inzet koelmachine) kan een COP (coëfficiënt of performance, zie paragraaf 3.1) van 10 worden gehaald door WKO's in woningbouw – afgezet tegen een COP van compressiekoelmachines van 3 à 4 is dat een verbetering met een factor 2,5 tot 3,3.¹⁴ .

¹⁴ Bij goed ontwerp kan een COP voor warmte worden behaald van 7 en voor koude een COP van 11; o.a. bewezen op DUO in Groningen. Zie ook <http://www.gemeente-oldambt.nl/document.php?fileid=54137&f=d4e4d93b398e2b39d9635ade40aca289&attachment=1&c=31951>

5.2.1 Kosten

Ook bij de berekening van de kosten is er van uitgegaan dat het WKO systeem alleen voor koeling wordt gebruikt, niet voor verwarming. De kosten van een WKO worden geheel aan de koelfunctie toegedeeld; dit is echter niet realistisch omdat een WKO voor een groot deel ook voor verwarming zal dienen. De CO₂ reductie door gebruik van een WKO zal nog hoger uitvallen wanneer ook de verwarmende werking van de WKO wordt meegenomen: Bij verwarming (waarbij een warmtepomp wordt ingezet) kan een WKO een COP van 5 halen. Bij een gemiddeld centrale-rendement van 39% (bw) is dat een primair rendement van ca. 500% (een COP van 5 komt overeen met 500%) maal 39% = 200%. Dat is ruim het dubbele van het rendement van een HR ketel (90 – 95% bw). Een WKO bespaart dus niet alleen energie (en dus CO₂-uitstoot) door koeling, maar ook door verwarming.

De kosten voor de installatie van een WKO zijn zeer uiteenlopend. Factoren die een rol spelen zijn bodemsoort en -kwaliteit en bijvoorbeeld het soort grondwater (zoet, zout, brak). Verder is de prijs erg afhankelijk van de grootte van het te koelen/verwarmen oppervlak.

Expertschattingen:

- Ter illustratie: een WKO voor een gemeentehuis met een vermogen van 150 kW en 30 m³ in een zandgrond zal rond de 80.000 euro kosten. Dit is nog niet de gehele WKO, de warmtepompen zijn bijvoorbeeld nog niet meegenomen in deze prijs.
- Een ander voorbeeld is een WKO-systeem voor een tuincentrum en woonhuis, ook met een vermogen van 150 kW en 30 m³. De totaalprijs inclusief twee warmtepompen is voor dit voorbeeld 250.000 euro. Voor een verzorgingstehuis ligt dit bedrag waarschijnlijk rond de 300.000 euro.
- BAM-De Ruijter heeft het volgende overzicht met een aantal voorbeeldprojecten (niet gespecificeerd naar type gebouw, alleen per stad) ter indicatie van de prijs:

Locatie	Vermogen	Aantal bronnen	Diepte	Kosten compleet systeem *
Amsterdam	2200 kW	1 W en 1 K	190 m -mv	€ 180,- tot € 250,- / kW
Rotterdam	2200 kW	3 W en 3 K	230 m -mv	€ 350,- tot € 420,- / kW
Den Bosch	2200 kW	2 W en 2 K	80 m -mv	€ 220,- tot € 270,- / kW
Utrecht	2200 kW	3 W en 3 K	55 m -mv	€ 250,- tot € 320,- / kW

* Compleet systeem t/m tsa en meet- en regeltechniek, incl. alle vergunningen.

Figuur 9 Indicatie van prijzen WKO's (BAM-De Ruijter, 2012)

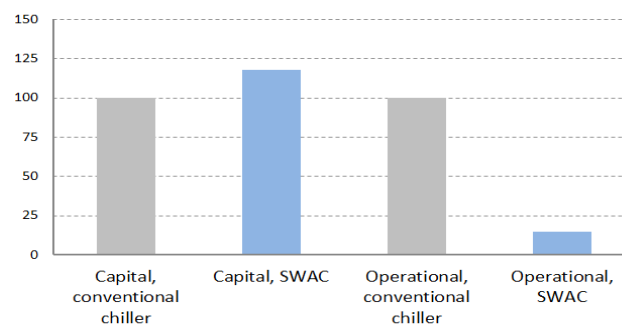
De figuur illustreert de grote spreiding in kengetallen voor een voorbeeld project met een gewenst vermogen van 2200 kW (komt overeen met een grondwaterdebiet van ca. 275 m³/h) in enkele steden in Nederland. Een systeem in Rotterdam is behoorlijk duur, terwijl een systeem in Amsterdam van dezelfde capaciteit ongeveer de helft kan kosten.

- Kosten van een WKO-bron van 20 m³ liggen rond de € 100.000 en voor 100 m³ rond de € 200.000. Dit zijn echter de kosten voor alleen de bron. De kosten voor een warmtepomp, de infrastructuur en het gehele voortraject zijn dus niet meegenomen.
- Naast de investeringskosten zijn er terugkerende kosten betrokken bij deze maatregel. Een open bron systeem dient goed onderhouden te worden. Een systeem van 150 kW van een gemeentehuis of zorginstelling zal per jaar ongeveer 2000-2500 euro kosten. Onder onderhoud vallen bijvoorbeeld het doorspoelen van het systeem en 2 x per jaar een preventief bezoek.
- BodemenergieNL stelt dat de terugverdientijd voor kantoorgebouwen van 3000 tot 10.000 m² ongeveer 5 tot 8 jaar is. Voor gebouwen groter dan 10.000 m² is dit ongeveer 3 tot 7 jaar.

De kosten van een WKO variëren dus sterk en de praktijkvoorbeelden zijn schaars en weinig representatief. Om toch tot een schatting van de installatiekosten te komen is uitgegaan van een gemiddelde van de kentallen in Figuur 9 (BAM-De Ruijter, 2012) voor de stad Rotterdam: € 385,=/kW. Er wordt uitgegaan van een systeem van 150 kW waarmee naar schatting 10 huizen kunnen worden gekoeld. Per huis komt de installatie neer op € 385,= × 150 × (1/10) = €5775/woning. Voor het onderhoud wordt geschat dat het voor 10 huizen € 2250,= zal kosten op jaarbasis (op basis van het tweede voorbeeld in de opsomming hierboven), dus omgerekend € 225,= per woning.

5.2.2 Kosten van WKO's met oppervlaktewater

In figuur 10 staan de kosten weergegeven van 'Sea Water Air Conditioning' (SWAC) en van conventionele koeling. De investeringskosten zijn groter voor een SWAC, maar de energie- en onderhoudskosten liggen ver lager. Daardoor stelt GreenVis dat de investering in een SWAC in een periode van 2 tot 7 jaar kan worden terugverdiend (Greenvis.nl, 2011)



Figuur 10 Kosten Sea Water Air Conditioning in US\$ (bron: Greenvis.nl, 2011)

Natuurlijk hangt de economische levensvatbaarheid af van veel factoren. Dit zijn enkele belangrijke:

- Locatie en afstand tot diep zeewater
- De benodigde koelcapaciteit
- Gebruikstijden van de airconditioning
- Lokale kosten van elektriciteit
- De complexiteit van het distributiesysteem op het land (GreenVis.nl, 2011).

5.2.3 *Effecten*

Het installeren van een WKO-systeem heeft het volgende adaptatie-effect in woningen vergeleken met een referentiesysteem zonder koeling in woningen: De binnentemperatuur overschrijdt niet meer de 24 °C en het aantal uren met een binnentemperatuur >24 °C wordt dus verminderd met 1201 uren¹⁵.

Het neveneffect van een WKO-systeem is dat deze in de winter verwarmt met een lager energieverbruik dan een conventioneel CV-systeem met een HR-ketel. Dit effect valt echter buiten de reikwijdte van deze studie en is derhalve niet gekwantificeerd.

5.3 **Mitigatie effect**

Mitigatie-effecten worden hier berekend als besparing op energie, waarbij wordt aangenomen dat de maatregel concurreert met traditionele airconditioning in woningbouw. Het mitigatie-effect wordt uitgedrukt in bespaarde kosten door vermeden elektriciteitsgebruik (EUR) en vermeden CO₂ uitstoot (kg CO₂). Zie ook hoofdstuk 3.

Deze berekening geldt voor woningbouw, en daarbinnen voor de standaard woning. Alhoewel WKO nog niet is gerealiseerd voor individuele woningen is het in principe mogelijk om op wijkniveau WKO te benutten voor verkoeling in de zomer en verwarming in de winter. Er wordt hier van een theoretische situatie uitgegaan waarbij aan technische vereisten (beschikbaarheid van aquifer/oppervlaktewater, geïsoleerde woningen etc.) is voldaan. Op basis van deze voorwaarden is de aanname dat de berekende waarden een realistisch beeld geven van de mitigatie-effecten van een WKO in de woningbouw.

Het mitigatie-effect, de besparing in vergelijking met een airco, valt in de volgende range (zie tabel 5):

- Vermeden elektriciteitsgebruik (kWh): 85-142
- Bespaarde kosten door vermeden elektriciteitsgebruik (EUR): €25-35
- Vermeden CO₂-uitstoot (kg CO₂): 70-130

5.3.1 *Oppervlaktewater*

Volgens GreenVis Energy Solutions kan het gebruik van zeewater voor koeling in een WKO zorgen voor een CO₂ emissiereductie van 90% ten opzichte van elektrische airconditioners. Nuon stelt dat door de districtkoeling aan de Zuidas in Amsterdam een emissiereductie op zal treden van 75% t.o.v. het gebruik van airconditioners (Nuon, 2012). Dat is dus een iets lager verschil dan koeling met grondwater (omgerekend komt de COP neer op ongeveer 6,4 i.p.v. 10 bij grondwater) maar nog steeds veel efficiënter dan het gebruik van een airco.

Een voorzichtige constatering zou zijn dat een WKO met oppervlaktewater minder efficiënt is dan een WKO met grondwater, maar dit is gebaseerd op enkele gegevens en dus allerminst zeker. Een mogelijke oorzaak is het uitgebreidere systeem om oppervlaktewater aan te voeren en rond te pompen. Vanwege dit gebrek aan gegevens wordt hieronder uitgegaan van een WKO die gebruik maakt van ondergrondse warmte-/koude opslag.

¹⁵ Omdat in de WKO berekening is uitgegaan van nieuwbouwwoningen is het aantal uren met hoge binnentemperatuur lager dan in de andere hoofdstukken, waarin gerekend is met woningen uit verschillende bouwperiodes.

5.3.2 *Samenvatting*

Het installeren van een WKO systeem gebeurt vooralsnog alleen in de utiliteitsbouw en de prestaties plus de kosten zijn erg locatie-afhankelijk. Aangenomen wordt echter dat er op de korte termijn mogelijkheden zullen ontstaan om WKO systemen te plaatsen geschikt voor woningen. In de berekening van de effecten wordt uitgegaan van een systeem dat hiervoor al geschikt is. De kosten en besparing op energie worden in Tabel 5 weergegeven.

Tabel 5 Jaarlijkse kosten en baten Warmte en Koude Opslag per rijtjeswoning

Uitwerkings gebied	Variabele	Eenheid (per woning/2003-zomer)	Geen maatregel/BAU*	Airconditioning	WKO (grondwater gebaseerd)
Adaptatie	Aantal uren T _{binnen} >24 °C	Uur	1201	0	0
Mitigatie	Energiegebruik tov BAU	kWh	n.v.t.	140-240	40-60
	CO2-emissies tov BAU	kg	n.v.t.	100-170	30-40
Financiële kosten	Aanschaf	€	n.v.t.	800	5800
	Energiekosten tov BAU	€/jaar	n.v.t.	35-60	10-25
	Onderhoudskosten	€/jaar	n.v.t.	100	225
	Jaarlijkse kosten	€/jaar	n.v.t.	230-250	885

*Business As Usual (de situatie waarin géén maatregelen worden genomen)

6 Maatregel 3: Schaduwwerking (overhang, bomen, smalle straten en oriëntatie van straten)

6.1 Beschrijving

Het beschaduwen van een woning kan door vaste uitbreidingen aan de woning, bijvoorbeeld een overhang (zie 6.2.1). Het kan ook door één of een rij bomen voor de woningen te plaatsen, smalle straten aan te leggen, of door de oriëntatie van straten heel bewust te kiezen. Alle maatregelen van beschaduwen werken op dezelfde manier: ze blokkeren de zonnestraling. Dat resulteert erin dat minder zonne-energie en daarmee minder warmte de woning binnenkomt. Het beschaduwen van woningen is daarom een passende mitigatie en adaptatie maatregel: door schaduw blijft het koeler in de woningen ten tijde van hitte en daardoor is er tevens minder of geen behoefte aan koelen met energiegebruik (airco, ventilator).

In de winterperiode is bezonning van gebouwen echter wel belangrijk om energie te besparen: daarom verdienen, afhankelijk van de situatie, flexibele oplossingen en bomen die hun bladeren verliezen in de winter de voorkeur. Een flexibele oplossing kan ook voorkomen dat meer schaduw zorgt voor de noodzaak voor meer verlichting. Dit effect is in dit onderzoek buiten beschouwing gelaten.

6.2 Uitvoering, dimensionering en kosten

6.2.1 *Maatregel 1: Overhang*

Onder overhang wordt een boven het raam of balkondeur horizontaal geplaatst scherm verstaan, flexibel of permanent. Voor het effect is de lengte van het scherm van belang. Uit oogpunt van uitvoerbaarheid is een lengte van 2,0 m realistisch (Haak, 2012).

Voor het optimale schaduweffect moeten alle ramen "aan de zonnige kant" van een overhang worden voorzien. Een tussenwoning van een typisch Nederlands rijtjeshuis (zie de omschrijving van de gemodelleerde woning in paragraaf 3.2) heeft drie ramen, een deur en een dakraam aan de voorkant en twee ramen en een balkondeur/terrasdeur/pui aan de achterkant. De ramen aan de voor- of achterkant van het huis zouden van overhang moeten worden voorzien. Dat is afhankelijk van de oriëntatie van het huis. In de regel is de meest aan de zon blootgestelde kant van het huis de zuidkant. Bij een andere oriëntatie moet plaatselijk worden gekeken van welke kant het huis de meeste zonnestraling vangt.

Kosten van overhang

De aanschafprijs van een beweegbare overhang boven een raam is in de orde van € 400,=. Boven een balkondeur in de orde van € 1000,=.

Er wordt van uitgegaan dat alleen de zuidkant van overhang wordt voorzien. Indien de voorkant van het huis naar het zuiden is gericht, komen de kosten op minimaal € 2200,= neer. Indien de achterkant van het huis naar het zuiden gericht is, komen de kosten op minimaal € 1800,= neer.

Aangenomen wordt dat een overhang theoretisch gezien een levensduur heeft van tenminste 25 jaar. Een goede bron voor deze informatie is niet gevonden, maar het ligt in de lijn der verwachting dat een zonwering die wanneer nodig gereinigd wordt vanwege de robuustheid van de constructie een genoemde levensduur heeft. Schade door nonchalance van de gebruiker (de wering open laten tijdens harde windstoten of neerslag) wordt in de berekening verwaarloosd.

Onderhoudskosten per jaar

Onderhoud van een overhang betekent het regelmatig schoonhouden. Het is daarom aangenomen dat onderhoud van een overhang geen significante extra kosten met zich meebrengt. Het kan mogelijk zijn dat het doek is aangetast door vuil waardoor deze vervangen moet worden, maar aangenomen is dat dit (a) een fractie van de totale aanschaf- en installatiekosten bedraagt en (b) dat dit zo weinig voorkomt dat het geen significante bijdrage heeft in de totale kosten.

6.2.2 *Maatregel 2: Bomen*

Een boom of een rij bomen voor één of meerdere huizen is niet altijd een uitvoerbare maatregel, simpelweg omdat er niet altijd genoeg ruimte is voor een boom.

Hoeveel binnenkomende zonnestraling een boom blokkeert is afhankelijk van:

- de grootte van de boom: hoogte en diameter, dichtheid van de kroon
- de soort boom: loof- of naaldboom (en de soort daarbinnen)
- de plaatsing ervan ten opzichte van de ramen: blokkeert de boom het zonlicht voor heel het raam, of voor een deel van het raam en geldt het voor een of meerdere ramen.

Voor beide kanten van het huis in Figuur 1 geldt dat wanneer er een Hollandse iep (*Ulmus clusius*), de meest voorkomende boom in Nederland, midden voor het huis geplaatst wordt, deze een schaduw werpt op het hele huis. Iepen worden 16-25 m hoog, al na 10 jaar bereiken ze een hoogte van 10-14m en horen daarom in de categorie snelgroeiend. Bij een volgroeide iep is de kroonbreedte 11-15m (BomenWaaier). Omdat dit ca. twee keer zo breed is als de woning waarvoor de berekening is uitgevoerd, wordt er uitgegaan dat 1 boom per 2 woningen volstaat voor het volledige verkoelingseffect.

Bomen werpen een schaduw niet alleen op het huis maar ook op het verhard oppervlak, waarmee opwarming daarvan kan worden voorkomen. Dit draagt ook bij aan het koel houden van huizen in de schaduw van bomen en het voorkómen van de opwarming van de (zeer) lokale temperatuur. Het effect van bomen op de omgevingstemperatuur is gemiddeld 1°C (Bowler et al., 2010).

Naast beschaduwing kunnen bomen de luchtkwaliteit beïnvloeden. Bomen zuiveren de lucht doordat deze fijn stof opnemen. Naaldbomen zijn daarbij efficiënter dan loofbomen. Een aandachtspunt is dat bomen te dicht op elkaar in de straat een zogenaamde tunneleffect kunnen veroorzaken, waarbij vervuilde lucht juist in de straat vastgehouden blijft. Om dit te voorkomen is het nodig dat de bomen minimaal 40% "poreus" (=luchtdoorlatend) zijn.

Een ander effect van bomen is de lokale bijdrage aan waterinfiltratie tijdens hevige regenbuien.

Kosten van aanplant

De prijs van een gemiddelde Hollandse iep varieert tussen € 15 met een hoogte van 2,50 m en € 175 met een hoogte van 5,50 meter (Bomen online, 2012). De plaatsingskosten zijn een veelvoud hiervan. Deze kosten zijn afhankelijk van de situatie en variëren sterk. Ten behoeve van de berekening nemen we hier een stelpost van € 100 per boom aan.

Kosten per jaar

De grootste kostenpost is regelmatig snoeien. Ook deze kosten zijn erg situatieafhankelijk. We schatten hier een stelpost van 50 €/jaar.

6.2.3 *Maatregel 3: Smalle straten*

Smalle straten zijn bekend van mediterrane gebieden en van oude historische Nederlandse stadskernen. Door de geringe breedte van de straat valt er weinig zonlicht binnen. Er wordt vrijwel continu schaduw geworpen op het wegdek en op de gebouwen.

Bij de dimensionering dient er rekening te worden gehouden met de ruimte die nodig is voor grote voertuigen. Een ander belangrijk aandachtspunt is dat hulpdiensten niet worden belemmerd door de smalle straten en dat er geen extra brandgevaar wordt gecreëerd. Tevens kunnen de straten, met oog op bezonning in de winter, niet al te smal worden gemaakt. De vraag is daarmee hoe realistisch smalle straten zijn en zo ja, of en hoe snel deze maatregel vanwege bestaande bouw geïmplementeerd kan worden. Waarschijnlijk is de vervangingsnelheid van bestaande bouw te laag om gebruik te maken van deze maatregel.

Kosten van smalle straten

Aangenomen wordt dat aanleg van smalle straten niet duurder is dan aanleg van gewone straten. Smalle straten hebben twee positieve effecten op de kosten: ten eerste er blijft meer ruimte over voor woningbouw, wat meer opbrengsten oplevert. Ten tweede is de bestrating van smalle straten goedkoper dan van een reguliere straat. (MWH, 2011)

6.2.4 *Maatregel 4: Oriëntatie van straten*

De vorm van de street canyon speelt een belangrijke rol in het stedelijke klimaat. Het beïnvloedt de luchttemperatuur, luchtvochtigheid en windstroming in de straat maar ook daaromheen (Shashua-Bar & Hoffman, 2003). Door de oriëntatie van de straten strategisch te kiezen, kan ervoor gezorgd worden dat woningen in de straten meer zonneshijn krijgen door de gevels naar het zuiden te oriënteren (oost-west straat oriëntatie), of dat deze juist minder zonneshijn krijgen door beschaduwing. Een betere ventilatie kan worden bewerkstelligd door de straten in de windrichting te oriënteren. Indien de heersende windrichting het toelaat, kan een combinatie van beide effecten worden verwacht. De ligging van de plaats in het landschap waar de wijk of straat zich bevindt; bijv. langs open water is ook van belang voor het bepalen van de meest gunstige oriëntatie van straten.

Bij de dimensionering dient er rekening te worden gehouden met de beweging van de zon. Uit oogpunt van klimaatmitigatie is het belangrijk dat er ruim voldoende zonneshijns de woningen bereikt zodat een aangename binnentemperatuur met minder verwarming bereikt kan worden. Uit oogpunt van klimaatadaptatie is het belangrijk dat er in de straat genoeg schaduw is zodat er in de zomer binnenshuis niet (of niet veel) gekoeld hoeft te worden. Dit conflict kan worden opgelost door een bomenrij in de straat te plannen bestaande uit loofbomen die in de zomer schaduw werpen op de woningen en in de winter de zon doorlaten.

In het algemeen hebben warme, droge klimaatgebieden baat bij een noord-zuid straatorientatie in combinatie met smalle straten en hoge gebouwen. Op die manier zijn de straten in de grootste deel van de dag beschaduwde. Koudere klimaatgebieden hebben juist baat bij oost-west georiënteerde, brede straten met lage bebouwing. In warme, natte klimaatgebieden is het juist van belang dat de straat goed geventileerd kan worden. De oriëntatie van straten moet ervoor zorgen dat natuurlijke windpatronen optimaal benut kunnen worden. (CLEAR, nd.) Er kunnen eventueel verschillen in de windrichting bestaan in de zomer en winter. In de zomer is het belangrijk dat warme lucht wordt afgevoerd om de straat te koelen. In de winter is het juist belangrijk dat er geen harde winden door de straat waaien.

Kosten van andere oriëntatie van straten

Er zijn geen extra kosten t.o.v. gemiddelde aanlegkosten. Extra brede straten en extra bomenrijen brengen kosten met zich mee.

6.3 Effecten

6.3.1 Maatregel 1: Overhang

Afhankelijk van de positionering van het huis heeft een zonnesherm van 2 m lang de volgende effecten: Er is een afname van uren waarin de temperatuur boven de 24°C is van ongeveer 70-100%. Deze reductie is groot bij een gebouw dat naar het noorden is georiënteerd (85-95%) en iets groter wanneer het gebouw naar het zuiden is georiënteerd (75-100%), vergeleken met de andere richtingen (70-100%). De gemiddelde reductie in het aantal uur dat het >24 °C is 902 uur per jaar (Haak, 2012).

6.3.2 Maatregelen 2, 3 en 4: Bomen, smalle straten en oriëntatie van straten

Aangenomen mag worden dat het hebben van een volwassen boom of een rij bomen vergelijkbare effecten binnenshuis heeft als het implementeren van een overhang. Daarnaast hebben bomen een verlagend effect op de buitentemperatuur. Het effect van schaduw door smalle straten en door de oriëntatie van de straat is situatiebepaald.

6.4 Mitigatie effect

Het effect van het toepassen van een overhang of schaduwbomen rond het huis is relatief groot vergeleken met de andere besproken maatregelen, terwijl de jaarlijkse kosten beperkt zijn.

Wanneer besloten wordt de resterende oververhittingsuren weg te koelen met een airconditioning is het mitigatie-effect, uitgedrukt in bespaarde kosten door vermeden elektriciteitsgebruik voor mechanische koeling in het beschreven huis (zie hoofdstuk 3) gemiddeld genomen € 25-45 per woning. Er wordt daarmee 80-130 kg CO₂ minder uitgestoten (Tabel 6).

Tabel 6 Jaarlijkse kosten en baten Schaduwwerking per rijtjeswoning.

Uitwerkings gebied	Variabele	Eenheid (per woning/2003-zomer)	Geen maatregel/BAU*	Airconditioning	Overhang of bomen	Overhang/ bomen en airco
Adaptatie	Aantal uren T _{binnen} >24 °C	Uur	1403	0	501	0
Mitigatie	Energiegebruik tov BAU	kWh	n.v.t.	170-280	0	60-100
	CO ₂ -emissies tov BAU	kg	n.v.t.	120-200	0	40-70
Financiële kosten	Aanschaf	€	n.v.t.	800	Overhang: 400 - 2200 Bomen: 75	Overhang: 1200 - 3000 Bomen: 475
	Energiekosten tov BAU	€/jaar	n.v.t.	40-70	0	15-25
	Onderhoudskosten	€/jaar	n.v.t.	100	0, behalve bomen: 25	0, behalve bomen: 75
	Jaarlijkse kosten	€/jaar	n.v.t.	230-260	Overhang: 105 Bomen: 30	Overhang: 320 Bomen: 140

N.B: smalle straten en alternatieve oriëntatie van straten zijn qua effecten vergelijkbaar met het aanplanten van bomen.

7 Maatregel 4: Verbeteren van de isolatie van de woningvoorraad

7.1 Beschrijving

De maatregel 'verbeteren van de isolatie' omhelst het aanbrengen van extra dak- en gevelisolatie in bestaande woningen met slecht tot matige isolatie. Het idee is dat isolatie niet alleen warmte vasthoudt binnenshuis in de winter, maar dat het ook voorkomt dat er warmte het huis binnendringt in de zomer waardoor het dus relatief koel blijft. Daarmee is het een effectieve adaptieve maatregel tegen klimaatverandering (warmere zomers). De synergie met mitigatie zit in het feit dat dit een vorm van passieve koeling is waardoor actieve koeling, dus energiegebruik en daardoor CO₂-uitstoot wordt vermeden.

7.2 Uitvoering, dimensionering en kosten

Aangenomen wordt dat er gemiddeld tot 8 cm isolatiemateriaal aanwezig is in de referentie woning. In de voorgestelde maatregel wordt dit ruim twee keer zo veel, namelijk 17 cm. Hierbij wordt een plaat isolatiemateriaal *tegen* de muur geplaatst aangezien er *in* de meeste bestaande muren onvoldoende ruimte is. De R-waarde (mate van warmteweerstand met eenheid m².K/W) neemt daarmee toe tot ca. 5,4 (deze was 3,0 voor de gevels en 4,0 voor daken) (Haak, 2012).

De investeringskosten om 1 woning qua isolatie op te waarderen zijn opgezocht op <http://www.verbeteruw huis.nl>, waarin de uitgangssituatie en de gewenste extra isolatie zijn opgegeven om zo tot een schatting van de prijs te komen. Deze komt (gemiddeld) neer op € 9200 per woning.

De jaarlijkse kosten worden als € 0 aangenomen, aangezien isolatie doorgaans één maal wordt aangebracht en vervolgens gedurende de resterende levensduur van de woning blijft zitten.

7.3 Effecten

De effecten van het opwaarderen van isolatie heeft de volgende effecten: een gemiddelde reductie in het aantal uur dat het >24 °C is in de woon- en slaapkamer van het beschreven huis van ca. 100 uur per jaar per woning (Haak, 2012). Het effect van de bouworiëntatie – naar welke windrichting de voorzijde (en dus de woonkamer) van de woning wijst – heeft veel invloed op de reductie in het aantal uren boven de 24 °C:

- Noord: 469 uur
- Oost: 216 uur
- West: -22 uur
- Zuid: 462 uur

Blijkbaar heeft een woningoriëntatie op het westen (de voorgevel is in dat geval naar het westen gericht) een negatieve invloed op het aantal oververhittingsuren. Dit heeft te maken met het feit dat wanneer de zon lager staat en in de woonruimte schijnt, zoals in het geval met de oriëntatie op het westen, er meer hitte de woning binnendringt. Overigens is dit effect afhankelijk van de mate van isolatie van de woning. In woningen die beter geïsoleerd zijn dan de standaardwoning (uit de

bouwperiode 1974-1992) treedt dit nog meer op. Gemiddeld genomen – met de aanname dat iedere windrichting evenredig is gerepresenteerd in de gebouworientatie – komt het aantal uren boven de 24 °C dat gereduceerd wordt neer op ca. 280 per woning. Ten opzichte van de basissituatie is dat 20%.

7.4 Mitigatie effect

Aangezien de reductie in het aantal oververhittingsuren relatief gering is, wordt aangenomen dat het restant oververhittingsuren wordt weggekoeld met een airconditioning. De mitigatie-baten ten opzichte van de situatie met alleen een airconditioning zijn ook niet erg groot:

- Besparing elektrische energie: 40-60 kWh/jaar
 - Kosten besparing: ca. €10/jaar
 - Vermindering CO₂ uitstoot: 25-40 kg CO₂/jaar
- (zie Tabel 7).

Extra isolatie van woningen heeft echter ook een positief effect in de winter. Het huis houdt namelijk meer warmte vast waardoor er minder energie gebruikt hoeft te worden om het huis te verwarmen. Dit effect valt echter buiten de reikwijdte van deze studie en is derhalve niet gekwantificeerd. Opgemerkt wordt hier echter wel dat het effect van isolatie in de winter meer van invloed is dan het effect in de zomer en dat het zinvoller is de afweging voor het aanbrengen van extra isolatie van dit effect in de winter te laten afhangen. Terwijl de jaarlijkse kosten voor isolatie plus airco voor een vergelijking in de zomerperiode nadelig uitvallen, zal een vergelijking over het gehele jaar waarschijnlijk lagere kosten van isolatie laten zien.

Tabel 7 Jaarlijkse kosten en baten isolatie per rijtjeswoning

Uitwerkings gebied	Variabele	Eenheid (per woning/2003-zomer)	Geen maatregel/BAU*	Airconditioning	Isolatie	Isolatie en airco
Adaptatie	Aantal uren Tbinnen >24 °C	Uur	1415	0	1135	0
Mitigatie	Energiegebruik tov BAU	kWh	n.v.t.	170-280	0	130-220
	CO2-emissies tov BAU	kg	n.v.t.	120-200	0	95-160
Financiële kosten	Aanschaf	€	n.v.t.	800	9215	10015
	Energiekosten tov BAU	€/jaar	n.v.t.	40-70	0	30-60
	Onderhoudskosten	€/jaar	n.v.t.	100	0	100
	Jaarlijkse kosten	€/jaar	n.v.t.	230-260	440	665-690

8 Maatregel 5: Verhogen van de albedo

8.1 Beschrijving

Wanneer zonnestraling op een object valt wordt een deel geabsorbeerd en een deel weerkaatst. De door een object hoeveelheid teruggekaatste straling heet de 'albedo' en deze wordt vaak uitgedrukt als fractie van de inkomende straling. Veel woningen en gebouwen hebben een donker gekleurd (schuin) dak met een albedo van ongeveer 0,3. Dat houdt dus in dat 30% van de energie (warmte) uit zonnestraling wordt weerkaatst en 70% door het materiaal wordt geabsorbeerd. Die geabsorbeerde warmte lekt voor een groot deel het binnenklimaat in waardoor de temperatuur zal stijgen.

Het verhogen van de albedo door daken wit te schilderen resulteert in een albedo van ca. 0,8 waardoor meer dan twee keer zoveel warmte wordt weerkaatst als in de uitgangssituatie. Dit voorkomt opwarming van de ruimte binnenshuis (Haak, 2012).

8.2 Uitvoering, dimensionering en kosten

Aangenomen wordt dat de albedo in de uitgangssituatie 0,3 is en dat deze door het nemen van de maatregel wordt verhoogd tot 0,8. In andere woorden; in plaats van 30% zonlicht wordt er 80% weerkaatst, 50% meer.

De investeringskosten om de albedo van 1 woning van 0,3 te verhogen naar 0,8 wordt geschat op € 2500. Het oppervlak dat geschilderd moet worden is ongeveer 80 m² per dak. Dit is gebaseerd op een aantal tarieven van buitenschilders en (professionele) reinigingsbedrijven maar kan hiervan sterk afwijken omdat er vooralsnog geen 'dak'-schilders zijn gevonden. Het reinigen van het dak wordt als vereist ondersteld omdat er doorgaans 'hardnekkig' vuil (aangroei van mos, ingedroogde verontreinigingen etc.) moeten worden verwijderd en omdat aangenomen wordt dat de dakpannen moeten worden voorbereid voor de hechting van de verf. Ter illustratie: het wit schilderen van een plat dak is doorgaans veel eenvoudiger, omdat er geen dakpannen gereinigd hoeven te worden maar slechts de bitumenlaag. Bovendien is het schilderwerk vanwege het gladde oppervlak makkelijker en daarmee goedkoper.

Naast de investeringskosten zijn er jaarlijkse kosten van deze maatregel. Het blijkt namelijk dat doorgaans de albedo van de aangebrachte verf na 1 jaar reduceert van 0,8 naar gemiddeld 0,4 (Haak, 2012) en na 2 tot 3 jaar waarschijnlijk de oorspronkelijke waarde zal benaderen. Wanneer opnieuw wordt geschilderd kan de albedo van 0,8 weer benaderd worden. Aangenomen wordt dat opnieuw reinigen en schilderen eveneens € 2500 bedraagt per woning. Daarmee zijn de jaarlijkse kosten gelijk aan de investeringskosten. Wanneer er wordt gekozen voor 1 keer in de 5 jaar schilderen en reinigen, een tijdsperiode waarin veelal het houtwerk opnieuw wordt geschilderd, bedragen de jaarlijkse kosten € 500 per woning.

8.3 Effecten

De effecten van het verhogen van de albedo van daken naar 0,8 heeft de volgende effecten: een gemiddelde reductie in het aantal uur dat het >24 °C is in de woon- en slaapkamer van een standaard rijtjeshuis van ca. 611 uur per jaar. Het effect van de bouworientatie – naar welke windrichting de voorzijde van de woning wijst – heeft enige invloed op de reductie in het aantal uren boven de 24 °C:

- Noord: 678 uur
- Oost: 705 uur
- West: 402 uur
- Zuid: 662 uur

(Haak, 2012).

Behalve dat een verhoogde albedo van het dak van gebouwen de binnentemperatuur reduceert is er ook een daling op de buitentemperatuur nabij de gebouwen waarneembaar. In Klok *et al.* (2010) is een literatuuronderzoek gedaan naar onder andere het verhogen van de albedo. Hieruit werd geconcludeerd dat voor een onderzochte stad (Sacramento, Californië, V.S.), wanneer de albedo verhoogd wordt van 0,25 tot (gemiddeld) 0,40, de temperatuur in die stad vergeleken met de 'oude' situatie met 1 tot 4 °C wordt verlaagd. Om hetzelfde te claimen voor Nederlandse steden gaat op basis van deze gegevens echter te ver. Het ligt wel in de lijn der verwachting om een temperatuur reductie in dezelfde orde van grootte (enkele graden Celsius) te verwachten nabij woningen met een verhoogd albedo.

Voor Nederland is aan de hand van een aantal computersimulaties onderzocht hoe het klimaat in de stad (adaptatie-effect in het buitenklimaat) verandert als de stedelijke structuur wordt gewijzigd (CPC, 2012). Er werd o.a. geconstateerd dat een lichter dakoppervlak (h = 9 m) voor een koelere luchttemperatuur op straatniveau (h = 2 m) zorgt.

Wel wordt in deze studie opgemerkt dat een hogere reflectiecoëfficiënt van de gevel van een woning niet altijd leidt tot een koelere omgevingstemperatuur, omdat een object in de baan van het licht (op 2 meter hoogte) meer straling ontvangt en daardoor meer opwarmt. Er blijkt een kantelpunt te zijn waarbij meer reflectie leidt tot afkoeling, maar de auteurs geven aan dat het nog onduidelijk is waar dit punt ligt. Hieruit kan voor de situatie in Nederland worden geconcludeerd dat het van belang is om albedo verhogende maatregelen vooralsnog te beperken tot de daken van woningen.

De conclusie voor de maatregel 'verhogen van de albedo' is dus dat er een aanzienlijke reductie in de binnentemperatuur bereikt kan worden en dat er buitenshuis ook een verlaging van de temperatuur wordt behaald – al is het een veel lagere.

Het verhogen van de albedo heeft ook in de winter een positief effect. Volgens Yu *et al.* (2008), die het effect van een verhoogde albedo van 0.21 naar 0.86 hebben onderzocht steeg de binnentemperatuur met 2,81 °C in de winter. De auteurs verklaren dit doordat de wit geschilderde oppervlakken ook hittestromen van binnen naar buiten (in de winter de grootste hittestroom) tegenhouden. Dit was echter uitgevoerd in China dat een ander klimaat kent en bovendien in een niet

representatief gebouw, dus de resultaten zijn niet 1 op 1 te vertalen naar de Nederlandse situatie, bovendien valt dit buiten de reikwijdte van de studie. Waarschijnlijk valt het effect in Nederland vanwege de al redelijk geïsoleerde huizen tegen. Belangrijk echter om te concluderen is dat een verhoogde albedo zeer waarschijnlijk géén lagere temperaturen binnenshuis in de winter veroorzaakt.

8.4 Mitigatie effect

Verhogen van de albedo is niet voldoende om te voorkomen dat er nog oververhittingsuren optreden. Om de resterende 778 oververhittingsuren weg te koelen is aangenomen dat toch een airconditioning installatie wordt gebruikt. De combinatie met airconditioning levert gemiddeld genomen een elektriciteitsbesparing op van 80-130 kWh per woning, of omgerekend 60-90 kg minder CO₂ uitstoot per woning, ten opzichte van een situatie waarin de gehele woning met een airconditioning gekoeld zou worden (Tabel 8). De jaarlijkse kosten van albedoverhoging zijn door de kosten van regelmatig schilderen hoog: het dubbele van de kosten van airconditioning.

Tabel 8 Jaarlijkse kosten en baten Albedoverhoging per rijtjeswoning

Uitwerkings gebied	Variabele	Eenheid (per woning/2003-zomer)	Geen maatregel/BAU*	Aircon-ditioning	Albedo verhoging	Albedo verhoging en airco
Adaptatie	Aantal uren T _{binnen} >24 °C	Uur	1415	0	778	0
Mitigatie	Energiegebruik tov BAU	kWh	n.v.t.	170-280	0	90-150
	CO ₂ -emissies tov BAU	kg	n.v.t.	120-200	0	60-110
Financiële kosten	Aanschaf	€	n.v.t.	800	2500	3300
	Energiekosten tov BAU	€/jaar	n.v.t.	40-70	0	20-40
	Onderhoudskosten	€/jaar	n.v.t.	100	0	100
	Jaarlijkse kosten	€/jaar	n.v.t.	230-260	540	750-770

9 Overzicht van de adaptatie- en mitigatie-effecten

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de resultaten van alle in dit rapport behandelde maatregelen met synergie-effect (Tabel 9). Omdat de passieve koelingstechnieken niet alle oververhittingsuren weten te voorkomen, laat voor een goede vergelijking de meest rechterkolom het aantal uren zien waarbij na toepassing van de maatregel de binnentemperatuur nog steeds boven de 24°C is.

Tabel 9 Jaarlijkse kosten en baten van synergetische maatregelen per rijtjeswoning

Maatregel	Vermindering aantal uren boven 24 °C	Besparing op energie	Vermindering CO ₂ -emissies	Kosten t.o.v. volledige koeling met airco*	Rest uren boven 24 °C
	<i>h/jr</i>	<i>kWh/jr</i>	<i>kg CO₂/jr</i>	<i>€/jr</i>	<i>h/jr</i>
Sproeien van daken en gevels	425	170-280 (drinkw) 135-145 (regenw)	120-200 (drinkw) 25-105 (regenw)	540 tot 570 (drinkw) 315 tot 345 (regenw)	990
Warmte- en koudeopslag**	1201	100-180	70-130	630 tot 650	0
Schaduwwerking	902	170-280	120-200	-130 tot 230	501
Isolatie	280	170-280	120-200	180 tot 210	1135
Albedoverhoging	637	170-280	120-200	280 tot 300	778

NB: * een negatief getal betekent besparing

**Bij warmte- en koudeopslag is er vanuit gegaan dat de woning al een isolatiegraad heeft gelijk aan een woning met bouwjaar >2011. Daarentegen is bij de maatregel 'isolatie' er vanuit gegaan dat de isolatie van een lager niveau is. In principe volgt WKO dus altijd ná het toevoegen van extra isolatie.

Schaduwwerking door een overhang of het planten van bomen blijkt de maatregel te zijn met de grootste synergie: de grootste reductie in oververhittingsuren met een reële besparing op de jaarlijkse kosten. Het planten van bomen levert in jaarlijkse kosten de grootste besparing op. Het koelend effect van bomen is echter wat minder voorspelbaar dan bij toepassing van overhang. Bomen hebben daarentegen ook een koelend effect op de buitenruimte.

Sproeien van daken en gevels, albedoverhoging en isolatie sparen wel energie uit, maar leiden niet tot kostenbesparingen omdat dit relatief dure maatregelen zijn.

Voor een zuivere vergelijking zijn in tabel 10 effecten en kosten weergegeven voor de situatie waarin naast de passieve adaptatie maatregel ook nog actieve koeling wordt toegepast. Omdat twee koel systemen naast elkaar worden gebruikt is dit economisch onvoordelig; wel wordt op energie bespaard en wordt de kooldioxide uitstoot verminderd.

Ook uit deze tabel blijkt dat schaduwwerking het grootste effect geeft tegen de laagste kosten. Zoals in Tabel 6 is te zien zijn bomen goedkoper dan een overhang. De extra kosten van additionele airconditioning worden ongeveer gecompenseerd door de energiebesparing vanwege de adaptieve maatregel. De energiebesparing door de combinatie bedraagt 65% ten opzichte van het gebruik van een airconditioning alleen (en is ca 2,5-5% van het jaarlijkse verbruik van gas en elektra in een standaard huishouden).

Tabel 10 Jaarlijkse kosten en baten per rijtjeswoning in combinatie met airconditioning om rest oververhittingsuren weg te koelen.

Maatregel	Besparing op energie	Vermindering CO ₂ -emissies	Kosten t.o.v. volledige koeling met airco
	<i>kWh/jr</i>	<i>kg CO₂/jr</i>	<i>€/jr</i>
Sproeien van daken en gevels	70-100 (drinkw) 130 (regenw)	40-70 (drinkw) 95 regenw)	780 tot 790 (drinkw) 570 tot 580 (regenw)
Warmte- en koudeopslag	100-180	70-130	630 tot 650
Schaduwwerking	110-180	80-130	-70 tot 60
Isolatie	30-60	20-40	400 tot 460
Albedoverhoging	80-130	60-90	510 tot 520

NB: vergeleken is de maatregel plus additionele airconditioning om het restant oververhittingsuren weg te koelen ten opzichte van de situatie met alleen airconditioning.

De maatregelen albedoverhoging en het sproeien van daken en gevels (beide in combinatie met airconditioning) zijn twee tot drie keer zo duur als het alleen gebruiken van een airconditioning. De energiebesparing ten opzichte van het gebruik van airconditioning alleen is ca. 35% (sproeien) en 45% (albedo). Beide maatregelen hebben ook een verlagend effect op de buitentemperatuur.

Verbeteren van de isolatie van de standaardwoning is te duur om alleen vanwege warmteoverlast te doen. Als de investering gedaan wordt om verwarmingsenergie te besparen in de winter, dan ontstaat in de zomer een kleine extra besparing van 10 €/jr aan energiekosten in een standaardwoning met gebruik van additionele airconditioning (vergeleken met het koelen van het niet-geïsoleerde huis met airconditioning). Hier tegenover staat dat het urban heat island-effect ook in de winter zorgt voor iets hogere temperaturen, waardoor de baten van de energiebesparing in de winter ook weer wat verminderen.

Datzelfde geldt ook voor warmte en koude opslag. Als hierin geïnvesteerd wordt voor verwarming in de winter, dan zijn ook grote besparingen op koeling mogelijk. In tegenstelling tot de andere maatregelen kan een WKO installatie alle uren boven 24 °C wegnemen, en is geen additionele koeling meer nodig. Een overhang, gebouw isolatie en WKO hebben alleen invloed op het binnenklimaat, er zijn geen additionele baten door verbetering van het buitenklimaat.

Geordend naar grootte van het synergie-effect is de volgorde van maatregelen: 1: beschaduwning door bomen, 2: beschaduwning door overhang, 3: albedoverhoging (maar tegen hoge kosten), 4: sproeien daken en gevels (eveneens tegen hoge extra kosten, tenzij bij gebruik van een bestaand regen- of oppervlaktewater reservoir waarbij de kosten van een opslagtank wegvallen). WKO heeft ook een groot synergetisch effect, maar deze maatregel moet, net als isolatie, worden afgewogen tegen de achtergrond van energiebesparing voor verwarming en koeling samen.

10 Literatuur

Akbari, H. & Konopacki, S. – Calculating energy-saving potentials of heat-island reduction strategies. *Energy Policy* 33 (2005), 721 – 756

Al-Shallal, K. A., & Al-Rais, L. (2011, September). Outdoor airflow analysis and potential for passive cooling in the traditional urban context of Dubai. *Renewable Energy*, 36(9), 2494-2501.

AMICA. (2007, 12 18). Matrix of measures integrating mitigation and adaptation. Retrieved from Amica: http://www.amica-climate.net/online_tool0.html

Amsterdam.nl (2011), Stadskoude maakt duurzame koeling mogelijk, op: <http://www.amsterdam.nl/@409177/pagina/>.

BAM-De Ruijter,(2009), WKO installaties, op: <http://www.bam-deruiter.nl/werkgebieden/grondwatertechniek/warmte-koude-opslag-diepboringen/wko-installatie-voor-warmte-koude-opslag.html>

Blocken, B., Carmeliet J. (2006). On the accuracy of wind-driven rain measurements on buildings. *Building and Environment* 41(12): 1798-1810.

Bodemenergie.nl (2012), Toepassingsgebieden Open systemen, http://www.bodemenergie.nl/Bodemenergie/Toepassingsgebieden/TG_woningbouw .

Bomen online. (2012, september 12). Opgeroepen op september 20, 2012, van Ulmus clusius: <http://www.bomenonline.nl/Assortiment/Details.asp?Soort=Ulmus%20%27Clusius%27&PlantNr=903789&Lang=NE>

BomenWaaier. (sd). Opgeroepen op september 20, 2012, van Iep Ulmus Clusius: <http://www.bomenwaaier.nl/bomen.php?boomid=1580>

Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., and Pullin, A. S. (2010). "Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence." *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 147-155.

Broeke, H.M. ten, Bosch, P.R. (2012). De synergie klimaatadaptatie en -mitigatie nader onderzocht: groene daken en verdampingskoeling. TNO-060-UT-2012-00409.

Che-Ani, A. - Mitigating the urban heat island effect: some point without altering existing city planning - *European Journal of Scientific Research* Vol. 35, No2 (2009), 204-216

Chungloo S, Limmeechokchai B. Application of passive cooling systems in the hot and humid climate: the case study of solar chimney and wetted roof in Thailand. *Building and Environment* 2007;42:3341-51.

CLEAR, C. L. (zd). Level Five: Street Widths and Orientation. Opgeroepen op September 27, 2012, van Comfortable Low Energy Architecture, CLEAR: http://www.new-learn.info/packages/clear/interactive/matrix/level_5_street_widths_and_orientation.html

CPC (2012) Climate Proof Cities - Klimaatbestendige Steden, Voortgangsrapportage, Climate Proof Cities 2012 - December 2012. [Rovers, V.; Bosch, P.; Pásztor, A. en Albers, R, eds]. (TNO).

DPNH (2012). Maatregelenmatrix, Een overzicht met 155 klimaatmaatregelen: fysieke maatregelen die genomen kunnen worden ter voorkoming van overlast door water, droogte en hitte en maatregelen die schade bij een eventuele overstroming kunnen beperken. Deltaprogramma Nieuwbouw en Herstructurering. (www.DPNHmaatregelenmatrix.nl).

Duurzameenergiethuis (2009), Warmte-koude opslag als energiebron voor huizen krijgt meer ruimte van VROM, op: <http://www.duurzameenergiethuis.nl/energie/warmte-koude-opslag-als-energiebron-voor-huizen-krijgt-meer-ruimte-van-vrom-1689.html>

EC (2011). Een routekaart naar een concurrerende koolstofarme economie in 2050, COM(2011)112, Brussel.

Feustel, H., Alabeida, A., de, Blumstein, C. (1991). Alternatives to Compressor Cooling in California Climates - Review and outlook. California Institute for Energy Efficiency (CIEE).

Frischknecht, R. Tuchs Schmid, M., Faist-Emmeger, Bauer, C., and Dones, R. 2007. Strommix und Stromnetz, Data v2.0. Ecoinvent report no 6/Teil XVI. ESU-services and PSI, Uster.

GreenVis.nl (2011), Stadskoude - Seawater air conditioning, op: <http://www.greenvis.nl/stadskoude-swac.php> .

Haak, A. (2012). Climate change and heat stress in residential buildings; Evaluation of adaptation measures. Technische Universiteit van Eindhoven. Eindhoven: Technische Universiteit van Eindhoven.

Harmelen, T van.; Broeke, H. ten; Klok, L.; Janssen, S.; Oppen, P. van; Ruijgvoorn, E.; Verhoeven, G.; Brolsma, R. en Koning, E. (2011). Maatregelen tegen het hitte-eilandeffect en hittestress in Rotterdam (TNO/SBR/Deltares/Gemeentewerken Rotterdam) - TNO rapport TNO-060-UT-2011-00109; 2011

He J., Hoyano A. (2008). A numerical simulation method for analyzing the thermal improvement effect of super-hydrophilic photocatalyst-coated building surfaces with water film on the urban/built environment. Energy and Buildings 40: 968-978.

Holmes, M. en Hacker, J. - Climate change, thermal comfort and energy: Meeting the design challenges of the 21st century - Energy and Buildings, 39 (2007), 802-814

HVAC Systems, Thumann, A., ed. Fairmont Press, 1988.

Ichinose, T.; Matsumoto, F. en Kataoka, K. - Counteracting urban heat islands in Japan - Chapter 15 "Urban Energy Transition" - 2008

Iepen wacht. (sd). Opgeroepen op september 20, 2012, van <http://www.iepenwacht.nl/nl/iepenwacht/de-iep>

Ihara, T., Kikegawa, Y., Asahi, K., Genchi, Y. en Kondo, H. - Changes in year-round air temperature and annual energy consumption in office building areas by urban heat-island countermeasures and energy-saving measures. *Applied Energy* 85 (2008), 12 - 25.

Kikegawa, Y., Genchi, Y., Kondo, H. en Hanaki, K. - Impacts of city-block-scale countermeasures against urban heat-island phenomena upon a building's energy-consumption for air-conditioning. *Applied Energy* 83 (2006), 649 - 668

Klein, R., Schipper, E., & Dessai, S. (2005). Integrating mitigation and adaptation into climate and development policy: three research questions. *Environmental Science & Policy*, 579-588.

Kleintank, A. en G. Lenderink, 2009. Climate change in the Netherlands; Supplements to the KNMI06 scenarios. KNMI, De Bilt.

Klok, L.; Broeke, H. ten; Harmelen, T. van; Verhagen, H.; Kok, H. en Zwart, S. (TNO/Waterwatch BV) - Ruimtelijke verdeling en mogelijke oorzaken van het hitte-eiland effect - TNO-rapport TNO-034-UT-2010-01229_RPT-ML; 2010

Klok, L.; Broeke, H. ten; Duyzer, J. en Harmelen, T. van - Overzicht van maatregelen tegen het stedelijk hitte-effect - TNO-rapport TNO-034-UT-2010-00266_RPT-ML; 2010

Kolokotroni, M.; Giannitsaris, I. en Watkins, R. - The effect of the London urban heat island on building summer cooling demand and night ventilation strategies - *Solar Energy* 80, Issue 4, 2006, 383-392

Lente-akkoord (2011), Warmtepompen in de woningbouw. De do's-and-don'ts voor ontwikkelaars.

MacKay, David J.C. (2008). *Sustainable Energy – without the hot air*. UIT Cambridge.

Meehl, G.A., T.F. Stocker, W.D. Collins et al., (2007). Global Climate Projections, in: *Climate change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge UK and New York, NY, USA.

McEvoy, D., Lindley, S., & Handley, J. (2006). Adaptation and mitigation in urban areas: synergies and conflicts. *Municipal Engineer*, 185-191.

Monitor Nieuwe Woningen (2012). Retrieved March 22, 2012 from <http://mnw.datawonen.nl>

Nakayama, T., Fujita, T. (2010). Cooling effect of water-holding pavements made of new materials on water and heat budgets in urban areas. *Landscape and Urban Planning* 96, pp 57-67.

Narumi, D., Shigematsu, K., Shimoda, Y. (2009). Effect of Evaporative Cooling Techniques by Spraying Mist Water on Energy Saving in Apartment House. PLEA2009 - 26th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Quebec City, Canada, 22-24 June 2009

Nuon (2010), Nuon opent koudecentrale in Amsterdam Zuidoost, op <http://www.nuon.com/nl/pers/persberichten/20100526/>

Nuon (2012), Showcase of district cooling systems in Europe - Amsterdam, op: http://www.iea-dhc.org/download/Showcases_District_Cooling_Amsterdam.pdf .

Ocean Thermal Energy Corporation (2012), Seawater District Cooling, op: http://www.otecorporation.com/seawater_district_cooling.html .

Öko-Institut (2012), Contribution of Renewable Cooling to the Renewable Energy Target of the EU.

Pomerantz, M.; Pon, B.; Akbari, H. en Chang, S.C. - The effects of pavements' temperatures on air temperatures in large cities. Lawrence Berkely National laboratory - Berkeley; <http://eetd.lbl.gov/HeatIsland/PUBS/2000/43442rep.pdf>

Rosenzweig, C. en Solecki, W. (Columbia University Center for Climate Systems Research & NASA/Goddard institute For Space Studies / Department of Geography, Hunter College - CUNY) - Mitigating New York City's Heat Island With Urban Forestry, Living Roofs and Light Surfaces; 2006

Sailor, D. en Dietsch, N. - The Urban Heat Island Mitigation Impact Screening Tool (MIST) - <http://www.heatislandmitigationtool.com> - 2005

Senternovem. (2006). Referentiewoningen nieuwbouw. SenterNovem.

Shashua-Bar, L., & Hoffman, M. E. (2003, January). Geometry and orientation aspects in passive cooling of canyon streets with trees. *Energy and Buildings*, 35(1), 61-68.

SKB et al. (2011), Handreiking Masterplannen Bodemenergie.

Smith, J. C. "Theory Vs. Practice in Direct Evaporative Roof Spray Cooling," in "Proceedings of the Second Symposium on Improving Building Systems in Hot and Humid Climates, College Station, Texas, September 24 – 26, 1985"

Souza, L. C., Rodrigues, D. S., & Mendes, J. F. (2003). Eighth International IBPSA Conference. Sky View Factors Estimation Using a 3D-GIS Extension, (pp. 1227-1234). Eindhoven.

Spronken-Smith, R.A. en Oke, T.R. – 1998 – The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates – *International Journal of Remote Sensing*, 19(11), 2085 - 2104

Stehr, N., & Von Storch, H. (2005). Introduction to papers on mitigation and adaptation strategies for climate change: protecting nature from society or protecting society from nature? *Environmental Science & Policy*, 537-540.

Taha, H., Akbari, H., Rosenfeld, A., en Huang, J., 1988. Residential cooling loads and the urban heat island - the effects of albedo. *Building and Environment*, 23(4), 271-283.

UNFCCC. (2012). Glossary of climate change acronyms. Retrieved from UNFCCC: http://unfccc.int/essential_background/glossary/items/3666.php

Toparlar, Y. (2012). Computational analysis of climate change adaptation measures at the building and street scale focused on evaporative cooling: case study for Bergpolder Zuid. Master thesis, Eindhoven University of Technology. Supervisors: Twan van Hooff, Wendy Janssen, Hamid Montazeri, Harry Timmermans, Bert Blocken, Ronald Albers.

Upmanis, H.; Eliasson, I. & Lindqvist, S. – 1998 – The influence of green areas on nocturnal temperatures in a high latitude city (Göteborg, Sweden) – *International Journal of Climatology*, 18, 681 - 700

CA. Velds (1992). *Zonnestraling in Nederland*. Thieme-Baarn/KNMI, De Bilt. ISBN90-5210-140-X.

Vewin (2010). *Tarievenoverzicht drinkwater per 1 januari 2010*. Vewin 2010/96/6259

Walsh, C., Dawson, R., Hall, J., Barr, S., Batty, M., Bristow, A., . . . Zanni, A. (2011). Assessment of climate change mitigation and adaptation in cities. *Urban Design and Planning*, 75-84.

Yu, B.; Chen, Z.; Shang, P. and Yang, J. - Study on the influence of albedo on building heat environment in a year-round - *Energy and Buildings* 40 (2008) 945 - 951

11 Ondertekening

Naam en adres van de opdrachtgever:

Stichting Kennis voor Klimaat/Gemeente Rotterdam

Namen van de projectmedewerkers:

Peter Bosch
Harm ten Broeke
Jonna Gjaltema
Aniko Pásztor
Vera Rovers

Naam en paraaf tweede lezer:



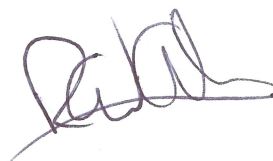
Drs. S.E. de Vos - Eftting

Ondertekening:



Drs. P.R. Bosch
Projectleider

Autorisatie vrijgave:



Ir. R.A.W. Albers MPA
Research Manager

A De complete lijst met adaptatie-/mitigatie-maatregelen

Toepassingsgebied	Maatregel	Omschrijving	Adaptie(f)ve effect(en)	Mitigatie (synergie) effect(en)	Kosten	Referentie/opmerkingen
Hitte	Verdampingskoeling (binnenshuis)	Er bestaan drie methoden: - indirect (via warmtewisselaar) - direct (lucht direct in contact met vocht) - tweetraps (combinatie van indirect en direct)	Verdampingskoeling is een alternatieve manier van airconditioning; de binnenlucht wordt d.m.v. de opname van warmte door water (latente warmte) gekoeld.	Energiebesparing t.o.v. traditionele airco's, dus minder CO ₂ uitstoot.		Ten Broeke & Bosch (2012)
Hitte	Zonwering of overhang (beschaduwing)	Beweegbare schermen en luiken installeren op gebouwen aan de zonzijde, eventueel bomen die schaduw werpen op het gebouw	Minder hitte-overdracht naar het gebouw	Minder airco-gebruik -> minder energiegebruik - > minder CO ₂ uitstoot		Van Harmelen et al. (2011)
Hitte	Koude-/warmteterugwinning	Terugwinning van koude en/of warmte uit ventilatielucht	Dit is een isolerende maatregel, die ervoor zorgt dat er minder warmte/koude uitwisseling tussen gebouw en omgeving is.	Deze techniek is energiezuiniger dan traditionele airco's -> energiebesparing en dus minder CO ₂ uitstoot.		Van Harmelen et al. (2011)
Hitte	Ramen 's nachts open, overdag dicht (gedrag)	Overdag de ramen dicht houden houdt de warmte buiten, als het 's nachts afkoelt en de ramen worden geopend zal het binnenshuis afkoelen.	Verdrrijving van de hitte door natuurlijke ventilatie mogelijk te maken.	Energiebesparing t.o.v. actieve koeling (zoals airco), dus minder CO ₂ uitstoot.	Laag, alleen voorlichting.	Van Harmelen et al. (2011)
Hitte	Opzoeken van koele plekken (gedrag)	Mensen kunnen worden gestimuleerd meer buitenshuis in koele gebieden (zoals in een park, bij een fontein) te verblijven.	De overlast door hitte te beperken.	Energiebesparing t.o.v. actieve koeling (zoals airco), dus minder CO ₂ uitstoot.	Laag, alleen voorlichting.	Van Harmelen et al. (2011)

Hitte	Activering thermische massa	Gebouwen worden gevuld met een medium met hoge warmtecapaciteit (zoals water). Bij warme klimaatomstandigheden warmt het medium op zonder de ruimte te verwarmen.	Minder hitte-overdracht naar het gebouw	Energiebesparing t.o.v. actieve koeling (zoals airco), dus minder CO ₂ uitstoot.		Van Harmelen et al. (2011). N.B: de Maastoren in Rotterdam wordt al op deze manier gekoeld.
Hitte	Phase change materials	PCM' zijn materialen die veel energie (warmte) opnemen wanneer ze van fase (vast naar vloeibaar en vice versa) veranderen. Deze warmte-opname is geschikt om tijdens oncomfortabele hitte de warmte uit het leefniveau weg te nemen en in het materiaal op te slaan.	Warmte opname in materialen (warmte opslag).	Energiebesparing t.o.v. actieve koeling (zoals airco), dus minder CO ₂ uitstoot.		Van Harmelen et al. (2011)
Hitte	Extra isolatie van gebouwen	Isolatie vermindert de warmteoverdracht van binnen naar buiten, maar ook van buiten naar binnen.	Ongewenste opwarming binnenshuis tijdens warme perioden wordt (deels) voorkomen.	In de winter wordt de warmte binnenshuis beter vastgehouden, waardoor minder actieve opwarming nodig is, dus minder energieverbruik en minder CO ₂ uitstoot.		Van Harmelen et al. (2011)
Hitte	Warmte- en koude opslag (WKO) in de bodem of zeewater.	Warmte en koude worden opgeslagen in grondwater in de bodem op een diepte van 20 tot 120 meter. Vervolgens kan 's zomers koud water worden benut voor koeling en 's winters	Actieve verkoeling binnenshuis.	Energiebesparing t.o.v. actieve koeling (zoals airco), dus minder CO ₂ uitstoot. Tevens effect in winter; efficiënte verwarming	Voor een systeem van 500 kW: ca. EUR 470000.	DPNH (2012)

		warm water voor verwarming.			
Hitte	Natuurlijke ventilatie	Verbetering (of nieuwe aanleg) van ventilatiesystemen/-openingen, zodat de luchtstromen in een gebouw geoptimaliseerd worden en voor verkoeling zorgen tijdens warme perioden.	Actieve verkoeling binnenshuis.	Dit systeem kost - wanneer het in gebruik is - geen extra energie en bespaart dus ook op CO ₂ uitstoot.	Kolokotroni et al. (2006), Holmes & Hacker (2007)
Hitte	Verhoging albedo van gebouwoppervlakken	De albedo is de mate waarin zonnestraling wordt weerkaatst. Hoe hoger de albedo, hoe minder zonlicht wordt opgenomen, hoe minder het gebouw wordt opgewarmd.	Voorkómen van hitte binnenshuis tijdens warme perioden.	Energiebesparing t.o.v. actieve koeling (zoals airco), dus minder CO ₂ uitstoot.	Pomerantz et al. (2000), Taha et al. (1988), Rosenzweig et al. (2006), Sailor & Dietsch (2005), Kikegawa et al. (2006), Ihara et al. (2008), Che-Ani (2009), Ichinose et al. (2008)
Hitte	Smalle straten zonder inval zonlicht tijdens middagzon	Wanneer straten smal worden gehouden zodat het zonlicht niet direct in de 'canyon' terecht komt worden de gebouwen een stuk minder opgewarmd en wordt daardoor oncomfortabele hitte (deels) voorkomen.	Door het voorkómen van insolentie (instraling vanuit de zon) wordt een onaangenaam hoge temperatuur vermeden.	Doordat het relatief koel(-er) blijft worden andere vormen van veelal actieve koeling vermeden, daardoor is deze vorm van koeling in feite een besparing op energie en dus CO ₂ uitstoot. N.B. de behoefte aan verwarming in de winter	DPNH (2012) Deze maatregeling kan alleen worden uitgevoerd bij nieuw aan te leggen straten.

kan groter worden.

Hitte	Slaapkamers aan de noordzijde	Doordat slaapkamers aan de noordzijde worden geplaatst, hebben deze minder instraling van de zon en blijven dus koeler.	Hitte wordt zoveel mogelijk vermeden door de bouwstijl.	Besparing op actieve koeling, dus minder energieverbruik en minder CO ₂ uitstoot.		DPNH (2012)
Hitte	Geen slaapkamers op de bovenverdieping	Doordat slaapkamers op de begane grond zijn gesitueerd, hebben ze minder last van opstijgende warmte en zijn ze beter geïntegreerd in de natuurlijke ventilatie in een woning.	Hitte wordt zoveel mogelijk vermeden door de bouwstijl.	Besparing op actieve koeling, dus minder energieverbruik en minder CO ₂ uitstoot.		DPNH (2012)
Hitte	Hoogbouw	Wanneer gebouwen extra hoog worden gemaakt, werpen zij een schaduw op de rest van de stad die daardoor koeler blijft.	Hitte wordt zoveel mogelijk vermeden door de bouwstijl.	Besparing op actieve koeling, dus minder energieverbruik en minder CO ₂ uitstoot. Maar; het kan zijn dat door de hoogte er extra energie nodig is voor andere activiteiten (verplaatsen met een lift, extra verwarming etc.). De optimale bouwhoogte moet in beschouwing worden genomen.	Dezelfde kosten als bij reguliere bouw.	DPNH (2012)

Hitte / wateroverlast	Groene daken	Gebouwen uitrusten met een dak dat bestaat uit medium waarin vegetatie groeit.	Door extra isolatie en het verdampen van water wordt warmteoverdracht het gebouw in voorkomen en wordt warmte in het gebouw 'wegverdamp't'. Groene daken nemen vocht (zoals hemelwater) op en voorkomen dus wateroverlast.	Energiebesparing t.o.v. actieve koeling (zoals airco), dus minder CO ₂ uitstoot.	Tussen de EUR 60 en EUR 220 per m ² , voor een levensduur van 20 jaar.	Ten Broeke & Bosch (2012)
Hitte / wateroverlast	Blauwe daken	Dit houdt in: ofwel het uitrusten van poreus materiaal dat water vasthoudt en verdampt tijdens hitte, of een waterlaag op het platte dak handhaven. Ook besproeiing van daken komt voor, waardoor er een continue stroom van vocht wordt gehandhaafd.	Door de verdamping van water wordt voorkomen dat hitte het gebouw indringt. In sommige gevallen kan zelfs hitte aan het gebouw worden onttrokken. De opnamecapaciteit van blauwe daken kan ervoor zorgen dat er retentie van hemelwaterafvloeiing plaatsvindt, dus zorgen voor minder wateroverlast.	Energiebesparing t.o.v. actieve koeling (zoals airco), dus minder CO ₂ uitstoot.		Ten Broeke & Bosch (2012); Wanneer kraanwater gebruikt wordt om de voorraad water aan te vullen is er een negatief effect, namelijk extra drinkwaterverbruik.
Hitte / Wateroverlast	Waterbuffer	De aanleg van extra waterberging.	Opvang van wateroverlast en verkoeling door thermische massa	Voorkomt deels het hitte-eiland effect, dus voorkomt dat er warmte-ophoping in de stad plaats gaat vinden. Hierdoor is de vraag naar actieve koeling lager, wordt er energie bespaard en minder CO ₂ uitgestoten.		Van Harmelen et al. (2011)

Hitte / Wateroverlast	Waterplein	Een plein met hoogteverschillen wordt ingericht om in tijden van (extreme) regenval als waterberging te dienen. De rest van de tijd kan het als standaard plein worden gebruikt.	Opvang van wateroverlast en verkoeling door thermische massa (zie ook groene en blauwe gebieden)	Voorkomt deels het hitte-eiland effect, dus voorkomt dat er warmte-ophoping in de stad plaats gaat vinden. Hierdoor is de vraag naar actieve koeling lager, wordt er energie bespaard en minder CO ₂ uitgestoten.		DPNH (2012)
Hitte / Wateroverlast	Laanconstructie	De laanconstructie houdt in dat woongebieden dusdanig worden ingericht dat de windstroming zo min mogelijk wordt belemmerd, dus dat er tijdens warme perioden een 'natuurlijke airco' optreedt. Daarnaast worden er bomen aangeplant die zorgen voor schaduw en evapotranspiratie.	Voorkómen van hitte door de wind zoveel mogelijk tussen de gebouwen te laten stromen en het benutten van bomen als effect tegen hitte.	Besparing op actieve koeling, dus minder energieverbruik en minder CO ₂ uitstoot.	Zelfde kosten als bij reguliere wijken (alleen heroriëntatie) of duurder als door extra bomen de bebouwingsdichtheid lager wordt. .	DPNH (2012) Heeft wel als nadelen dat: - het alleen toepasbaar is op nieuwe wijken of dat complete wijken heringericht moeten worden - de bebouwingsdichtheid lager wordt.
Hitte / Wateroverlast	Gebouwen deels in water bouwen	De gebouwen in kwestie worden deels in water geplaatst.	Het water zorgt voor verdampingskoeling en warmteput.	Besparing op actieve koeling, dus minder energieverbruik en minder CO ₂ uitstoot. Daarnaast vormt het waterbassin een buffer tegen wateroverlast.		DPNH (2012)

Hitte / Wateroverlast	Drijvend bouwen	Huizen worden op plateaus gebouwd op het water, waardoor ze een drijvend karakter krijgen.	Het water zorgt voor verdampingskoeling en warmteput.	Besparing op actieve koeling, dus minder energieverbruik en minder CO ₂ uitstoot. Daarnaast vormt het waterbassin een buffer tegen wateroverlast; het waterniveau kan stijgen zonder dat de huizen overstromen.		DPNH (2012)
Wateroverlast	Doorlatende verharding	Verharding (wegen, trottoirs etc.) worden doorlatend gemaakt waardoor hemelwater in de bodem kan infiltreren.	Terugdringen van wateroverlast.	Aanvulling van het grondwater, verdampingskoeling (wanneer de verharding zelf ook water vasthoudt)	ca. EUR 130000 per 2000 m ² (EUR 65/m ²).	DPNH (2012)
Hitte	Zonnepanelen (PV-cellen)	Zonnepanelen wekken elektrische energie op uit opgevangen zonlicht.	Alhoewel hier het primaire effect energie-opwekking is (mitigatie) en niet verkoeling (adaptatie), zorgen zonnepanelen toch voor een extra isolatie van daken waardoor de warmte-overdracht van buiten naar binnen verminderd wordt.	Energieopwekking, dus minder CO ₂ uitstoot.	Ca. EUR 600/m ² aan geïnstalleerde panelen (inclusief randapparatuur)	Van Harmelen et al. (2011)

Hitte	Zonneboilers	Zonneboilers slaan warmte uit zonnestraling op in water door middel van panelen op het dak waar waterleidingen doorheen lopen.	Alhoewel hier het primaire effect energie-opwekking is (mitigatie) en niet verkoeling (adaptatie), kunnen zonneboilers toch voor een extra isolatie van daken zorgen waardoor de warmte-overdracht van buiten naar binnen verminderd wordt. De warmte die normaliter op het dak terecht zou komen wordt nu in het water opgeslagen.	Energieopwekking, dus minder CO ₂ uitstoot.	Van Harmelen et al. (2011)
Hitte	Efficiëntere indeling van verkeer	Een efficiëntere indeling van verkeer, promotie van zuinige auto's, bevorderen van carpoolen en openbaar vervoer, stimulering van fietsen/lopen ,etc. kunnen het brandstofverbruik en de verkeersdichtheid verminderen. Deze maatregelen voorkomen verbranding (mitigatie), die direct gerelateerd is aan uitstoot van warmte. Het effect is echter grotendeels rondom wegen merkbaar en dus minder op leefniveau.	Minder warmteproductie, dus minder bijdrage aan hoge temperatuur tijdens warme perioden.	Ca. 20% minder energiegebruik, dus minder CO ₂ uitstoot.	Van Harmelen et al. (2011)

Hitte / wateroverlast	Groene en blauwe gebieden	Meer plekken in de stad inrichten met groen (bijv. parken, bomen in street canyons, beplanting naast straten, beplanting bij invoeropeningen ventilatielucht, oevers etc.) en water (bijv. fontein, meertjes)	Verkoeling door thermische massa, schaduw en verdamping (passief). Blauwe en groene gebieden zorgen daarnaast voor extra waterberging, dus ten tijde van veel neerslag wordt wateroverlast deels voorkomen.	Voorkomt deels dat er warmte-ophoping in de stad plaats gaat vinden. Hierdoor is de vraag naar actieve koeling lager, wordt er energie bespaard en minder CO2 uitgestoten. Daarnaast wordt luchtvervuiling (PM10) opgevangen	Van Harmelen et al. (2011)
----------------------------------	---------------------------	---	--	--	----------------------------