

2012

Eindverslag Thema 3

Deel 2

Interdisciplinair onderzoek naar rendabiliteit van Groene Daken, benaderd via de disciplines biologie, natuurkunde en economie.

In hoeverre is de aanleg van extensieve biodiverse groene daken in voormalig stadsdeel Amsterdam Watergraafsmeer een aantrekkelijk duurzaam en financieel rendabele ontwikkeling voor zowel de gemeente als bewoner?



ABSTRACT- Ondanks de voordelen van groene daken, loopt de gemeente Amsterdam achter op het stimuleren van de aanleg hiervan ten opzichte van andere steden. In deze interdisciplinaire studie wordt de rendabiliteit van groene daken in voormalig Watergraafsmeer onderzocht. Verhoging van biodiversiteit, waterretentie, warmte-isolatie en CO2 reductie worden geïntegreerd in een economische maatschappelijke kosten-batenanalyse. Hieruit blijkt dat een groen dak in de eerste instantie meer investeringskosten met zich meebrengt maar dat het uiteindelijk resulteert in hogere baten door verlaagde energie- en gasrekening, verbeterde waterretentie en een verhoogde biodiversiteit. Uit het onderzoek blijkt dat een groen dak op lange termijn voor zowel particulieren als de gemeente rendabeler is in vergelijking met een standaard bitumen dak.

- Biologie: Jelger Kroese
(6097987)

- Economie: Jiska Klein
(6088252)

- Natuurkunde: Linda van
der Waart (6077560)

Tutor: Msc. L. Rutting
Begeleidend docent: Drs. K.F. Rijdsdijk
Aantal woorden:
Datum: 10-02-2012



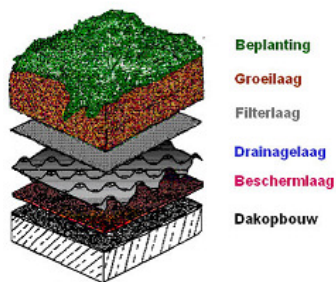
Inhoudsopgave

1	Inleiding	3
1.1	Groene daken in Amsterdam	3
1.2	Theoretisch kader	7
1.2.1	Een geschikte habitat voor een extensief biodivers dak	7
1.2.2	Kosten groen dak tegenover bitumen dak	7
1.2.3	Model waterretentie	8
1.2.4	CO2 reductie	9
1.2.5	Warmte-isolatie	9
1.2.6	Belangen	11
2	Methoden	12
2.1	Biodiversiteit op een extensief groen dak	12
2.2	Berekening van de kosten en baten van een groen dak	13
2.2.1	Maatschappelijke kosten en baten analyse	13
2.2.2	Realisatie groen dak	14
2.3	Waterretentie	14
2.4	Warmte-isolatie	15
2.5	CO2-reductie	16
3	Resultaten	17
3.1	Biodivers groen dak	17
3.2	Waterretentie	18
3.3	Warmte-isolatie	18
3.4	CO2-reductie	25
3.5	Integratie van kosten en baten in een economisch model	25
3.5.1	Resultaat kosten en baten analyse particulier	26
3.5.2	Resultaat kosten en baten analyse gemeente	28
3.5.3	Vermeden kosten waterretentie	28
3.5.4	Vermeden preventiekosten CO2 uitstoot	28
4	Conclusie	29
5	Discussie	29
6	Woord van dank	31
7	Referentielijst	32
	Appendix 1: Lijst doelsoorten	36
	Appendix 2: Gekozen doelsoorten op groen dak Amsterdam Watergraafsmeer	38
	Appendix 3: Legenda variabelen onderdeel rekenmodel	40
	Appendix 4: Bronnen financieel	42
	Appendix 5: Overzicht rekenkundig model	43
	Appendix 6: Mindmap integratie discipline natuurkunde, biologie en economie	44

1. Inleiding ~~op onderzoek~~

1.1 Groene daken in Amsterdam

Het 'groene dak' is voor stedelijk beleid in de ontwikkeling naar een duurzamere leefomgeving een bekend begrip. Het is een nieuw soort dakbedekking: een dak bedekt met vegetatie (zie figuur 1). Uit verscheidene onderzoeken blijkt een groen dak voordelen te leveren boven een standaard bitumen dak; het houdt het huis en de stad 's zomers koeler en 's winters juist warmer dan een standaard dak. Daarbij draagt de vegetatie bij aan een verbeterde waterretentie, water - en luchtzuivering en een hogere biodiversiteit in de stad (Getter, 2006; Niachou et al, 2001). Het groene dak duikt steeds vaker op, in Kopenhagen is het zelfs verplicht nieuwbouw ermee te bedekken ("Kopenhagen verplicht groene daken", 09-06-2010)



Figuur 1: opbouw groen dak (ecopedia.be)

Ondanks de besproken voordelen volgt Amsterdam niet het voorbeeld van steden als Kopenhagen. Daarnaast is de hoeveelheid vrijgestelde subsidie voor de aanleg van groene daken niet toereikend voor de vraag. Bovendien is de vrijgestelde subsidie een stuk lager in vergelijking met bijvoorbeeld Rotterdam: 205.000 euro in Amsterdam tegen 1.5 miljoen in Rotterdam ("Groene daken: Amsterdam blijft achter", 20-04-2011). Desalniettemin toont de gemeente Amsterdam interesse in de realisatie van groene daken, zo blijkt uit contact met Dhr. A. Brouwer van de afdeling Dienst Ruimtelijke Ordening gemeente Amsterdam (persoonlijke communicatie, 12-10-2011). Volgens Brouwer worden particulieren en bedrijven in stadsdelen West en Zuid actief gestimuleerd tot aanleg van groene daken. Stadsdeel Oost, waaronder voormalig stadsdeel Watergraafsmeer valt, heeft echter geen subsidieregeling ondanks de problemen op het gebied van waterhuishouding waarmee dit stadsdeel kampt. Is het groene dak niet rendabel voor Amsterdams gemeentelijk beleid in Oost, of is niemand bewust van de (eventuele) voordelen van een groen dak?

Eerder wetenschappelijk onderzoek naar groene daken was nooit gericht op de Gemeente Amsterdam (Brouwer, 12-10-2011; Daalder, 2011). Ook worden in bestaande kosten-batenanalyses factoren als biodiversiteit, verhoging van het stadsimago en verlenging van de levensduur van een dak achterwege gelaten. Dit wegens het feit dat deze factoren niet gemakkelijk in één gelijke waarde kunnen worden uitgedrukt om ze in een analyse te plaatsen (Arcadis, 2008). In dit onderzoek zullen deze factoren ook worden meegenomen, toegespitst op het voormalig Amsterdams stadsdeel Watergraafsmeer (vanaf hier benoemd als Watergraafsmeer).

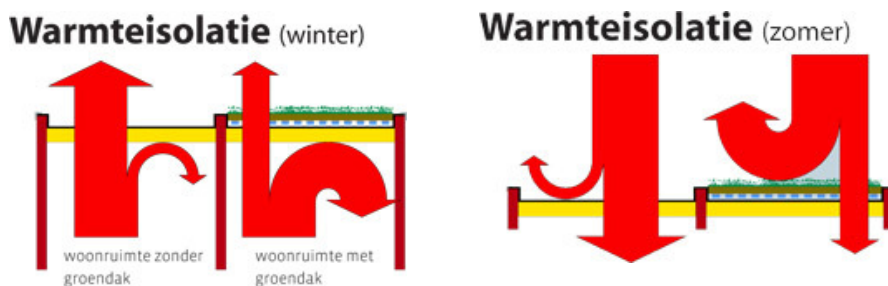
Hiertoe is gekozen voor een interdisciplinaire onderzoeksmethode, naar het stappenplan van Allen Repko (2008). Dit omdat interdisciplinariteit tot een adequate integratie van verschillende onderzoeksresultaten leidt, in tegenstelling tot een multidisciplinair onderzoek waarbij verschillende resultaten naast elkaar worden gelegd, maar zo geen geïntegreerde oplossing bieden voor het probleem. Integratie van verschillende bevindingen leidt tot een gezamenlijke conclusie op de hoofdvraag.

De factoren die onderzocht worden vinden hun raakvlakken in de natuurkunde en biologie. Binnen deze disciplines zullen deelonderzoeken gedaan worden naar de invloed van groene daken op CO2 reductie, energiebesparing, waterretentie en biodiversiteit.

CO2 reductie en energiebesparing zijn relevant aangezien de verhoogde vraag naar energiebronnen heeft geleid tot het bewustzijn van de eindigheid van de grondstoffen. Mogelijkheden om de vraag naar energie te verminderen wordt wereldwijd besproken, maar staan ook hoog op de gemeentelijke agenda. Hiermee hangt de koolstofdioxide uitstoot samen, wat een gevolg is van energiegebruik (in het geval van fossiele brandstoffen) en een oorzaak is van het broeikaseffect. Amsterdam heeft zichzelf de volgende doelen gesteld op het gebied van klimaat en energie (Duurzaamheidprogramma 2011-2014):

- Terugdringen energieverbruik bebouwde omgeving
- 40% reductie in 2025 ten opzichte van 1990
- Stabilisatie van de uitstoot in 2014
- Klimaatneutraal bouwen vanaf 2015

Groene daken helpen vanwege hun isolerende werking mee in het behalen van bovengenoemde doelstellingen, en hebben op die manier energietechnisch een winstgevend - en dus rendabel – karakter. Dit omdat isolatie de warmtestromen door een dak beperken. In figuur 2 is deze werking schematisch weergegeven.



Figuur 2: Isolerende werking van een groen dak bij een koude (winter) en warme (zomer) buitentemperatuur.

Energiebesparing leidt tot een verlaagde CO₂ uitstoot. Daarnaast dragen groene daken extra bij aan CO₂-reductie door middel van opname ervan door vegetatie (Kuypers, 2011). Specifiek voor Watergraafsmeer is verbeterde waterretentie relevant. De gemeente kampt namelijk met problemen met de afvoer van regenwater (WATERgraafsmeer, 2011). In dit stadsdeel zijn geen grachten om overmatig water af te voeren en er is veel bebouwing, waardoor het water niet wordt vastgehouden en ongereguleerd wegstroomt. Desalniettemin biedt al deze bebouwing veel mogelijkheden tot het creëren van een grote oppervlakte aan groene daken. Groene daken zorgen op hun beurt voor een gereguleerde afvoer van regenwater.

Biodiversiteit op groene daken is van belang vanwege de services die het ecosysteem levert. Een direct voordeel van de services is de verhoogde esthetische waarde. Een voorbeeld van een toegenomen esthetische waarde is een hogere waarde voor een woning. Uit een onderzoek van GreEnergy roots (2009) blijkt daadwerkelijk dat de aanleg van een groen dak de waarde van het betreffende gebouw met ongeveer 8% toeneemt. Een ander direct voordeel is dat een biodivers groen dak zorgt voor een stress verminderende omgeving (brochure Dak en Gevel Groen, 2010). Indirecte voordelen worden geleverd door het feit dat een verhoogde biodiversiteit zorgt voor een stabiel ecosysteem, dat beter bestand is tegen veranderingen. Grassen hebben bijvoorbeeld een hoge abilititeit om water af te staan aan de omgeving en zo zorgen zij voor een hoge isolatie van het dak. Doordat ze snel water verliezen overleven ze echter een lange droge periode niet. *Sedum* soorten hebben daarentegen juist een groot water vasthoudend vermogen, waardoor ze lange droge periodes wel overleven. Door een groen dak te creëren met een hoge diversiteit aan soorten is het dus mogelijk om het waterverlies gedurende het hele jaar te optimaliseren (Wolf & Lundholm, 2008). De waterretentie, CO₂ reductie en isolatie zijn bij een verhoogde biodiversiteit dus constanter onder verschillende weersomstandigheden.

In deze disciplinaire deelonderzoeken zullen door de disciplines Biologie en Natuurkunde de deelvragen worden behandeld: "Met welke combinatie van flora kan een extensief groen dak een biodivers ecosysteme huisvesten in Watergraafsmeer?" "Wat is het verschil in waterretentie tussen

een biodivers groen dak en een standaard bitumen dak in Watergraafsmeer?” “Wat is het verschil in warmteisolatie tussen een biodivers groen dak en een standaard bitumen dak in Watergraafsmeer?” “Met welke hoeveelheid reduceert een biodivers groen dak de CO₂ in de atmosfeer van Watergraafsmeer?”

Op deze manier wordt vanuit het discipline Biologie eerst bepaald met welke vegetatie het biodiverse dak wordt bedekt, vervolgens worden de eigenschappen van dat type dakbedekking gebruikt door de disciplines Biologie en Natuurkunde om de waterretentie, warmteisolatie en CO₂ reductie te berekenen. De uitkomsten hiervan zullen later in een economisch model om worden gezet in een monetaire waarde om uiteindelijk tot een adequate kosten-batenanalyse te komen. Zo wordt gekeken of de aanleg van een groen dak rendabel is voor zowel de gemeente als de bewoner van Watergraafsmeer. Op deze manier worden de bevindingen in één kader gezet wat leidt tot een geïntegreerd antwoord op de hoofdvraag (zie appendix 6 voor mindmap van integratie disciplines). Tevens is de omzetting in monetaire waarde relevant, omdat bij investeringen zoals een groen dak geldt voornamelijk de drijfveer is. Dit blijkt uit het interview van Wijnand Beemster met het expertpanel beschreven in *Toekomst van daken (04-10-2010)*. Door het begrip rendabiliteit te definiëren op een zodanige manier dat het alle disciplines omvat, kan worden vastgesteld of groene daken rendabel zijn voor Amsterdam Watergraafsmeer.

Hieruit vloeit de hoofdvraag: “In hoeverre is de aanleg van extensieve biodiverse groene daken in voormalig stadsdeel Amsterdam Watergraafsmeer een aantrekkelijk duurzaam en financieel rendabele ontwikkeling voor zowel de gemeente als bewoner?”

In elk van de disciplinaire deelonderzoeken zal een specifieke definitie van de term rendabel worden gehanteerd. Binnen de deelonderzoeken naar waterretentie, CO₂ reductie en warmteisolatie wordt rendabiliteit gedefinieerd als: financieel winstgevend. Binnen het deelonderzoek naar biodiversiteit is de rendabiliteit niet in een monetaire waarde om te zetten, aangezien daar te weinig informatie van Watergraafsmeer voor beschikbaar is en het in veel gevallen een welzijnskwestie betreft (Nijboer, beleidsadviseur groen Amsterdam Oost, 2012). Binnen dit deelonderzoek zal rendabiliteit gedefinieerd worden als: toegenomen ecosystem services als gevolg van verhoogde biodiversiteit en winstgevendheid in algemene oppervlakte begroeiing in Watergraafsmeer.

In de volgende paragrafen wordt het theoretisch kader van de verschillende deelonderzoeken beschreven. Vervolgens worden de methoden geïntroduceerd van waaruit de deelonderzoeken worden behandeld. Daaropvolgend worden de resultaten van de deelonderzoeken geïntegreerd door de kosten-batenanalyse, die conflicten tussen de betekenis van ‘rendabiliteit’ oplost. Dit zal leiden tot een uiteindelijke conclusie en discussie.

1.2 Theoretisch kader

1.2.1 Een geschikte habitat voor een extensief biodivers dak

Bij de constructie van een groen dak zijn twee hoofdmethoden in ontwerp toe te passen. In de eerste methode wordt een dunne substraatlaag gebruikt; dit wordt een extensief groen dak genoemd. In de tweede methode wordt een dikke substraatlaag gebruikt, namelijk een intensief groen dak. De aanleg van intensieve groene daken vergt aanpassingen aan het pand om het gewicht van de dikke substraatlaag te kunnen dragen. Wel biedt het veel mogelijkheden tot de vestiging van veel planten- en diersoorten. Het aanleggen van extensieve groene daken is gemakkelijker en goedkoper dan de intensieve vorm, maar beperkt de soortendiversiteit van planten die erop kunnen groeien tot enkele mobiele pioniersoorten (Brenneisen, 2006). Extensieve daken worden veelal geheel bedekt met *Sedum*¹ soorten, omdat deze weinig onderhoud vergen en tegen de zware omstandigheden op het dak bestand zijn. Onderzoek van Moerland (2011) en Kadas (2006) wijst echter uit dat op volledig met *Sedum* bedekte daken weinig ruimte is voor biodiversiteit en bedreigde soorten. Deze onderzoeken laten tevens zien dat bedreigde soorten wel behouden kunnen blijven door een geschikte habitat te creëren op extensieve groene daken.

Bij het creëren van een geschikte habitat in Amsterdam Watergraafmeer is het niet zinnig om de biotopen na te maken die rondom Amsterdam aanwezig zijn. De relatie met het oorspronkelijke bodemtype waar Amsterdam op is gebouwd is namelijk niet te maken, aangezien de bodem door de aanleg van de stad geroerd en aangepast is. Dit zorgt ervoor dat de stad een geheel eigen biotoop is (Mandema, 2008). Hierdoor worden in de stad soorten gevonden die elders niet voorkomen. Dit zijn vooral soorten die hun natuurlijke habitat in een rotsachtige omgeving hebben, aangezien de stad hier het meest mee gemeen heeft (Zoest & Melchers, 2006). Bovendien is de stad ook een erg dynamische biotoop, waar de eisen die soorten stellen aan een habitat en de soorten die er voorkomen snel kunnen veranderen (Mandema, 2008). Hierdoor moeten er in de stad omgevingen zijn die ruimte bieden voor deze dynamiek. Dit zijn omgevingen waar een verschillende en veranderende fauna samenstelling het hele jaar door kan rusten, foerageren, voortplanten en migreren. Groene daken bieden de ruimte voor deze omgeving en een hoge biodiversiteit van planten zorgt voor een verhoogde capaciteit in het bieden van een gunstige habitat voor de veranderende fauna.

1.2.2 Kosten groen dak tegenover bitumen dak

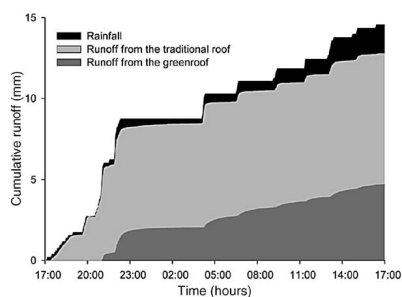
Uit onderzoek van Arcadis (2008) in opdracht voor gemeente Rotterdam is gebleken dat het aanleggen van een groen dak €65,- per m2 bedraagt. Voor een bitumen dak blijkt dit €31,- te zijn. In

¹ Sedum: geslacht uit de vetplantenfamilie (*Crassulaceae*)

dit onderzoek wordt aangenomen dat de kosten van aanleggen generaliseerbaar zijn voor de gemeente Amsterdam. Bovendien is uit onderzoek van Copijn Daktuin & Geveltuin gebleken dat het onderhouden van een groen dak €1,- per m2 per jaar kost. Het onderhoud van bitumen dak bedraagt €1,10 per m2 per jaar (Copijn Daktuin & Geveltuin 2009). In dit onderzoek wordt aangenomen dat deze kosten voor verschillende locaties binnen Nederland gelijk zijn, dus gelden ze ook voor gemeente Amsterdam.

1.2.3 Model waterretentie

Groene daken reduceren de wegstrooming van overtollig regenwater op verschillende manieren. Ze zorgen voor een vertraging in de initiële tijd van het wegstromen van water door opname ervan in het groene daken systeem; ze zorgen voor een reductie van de totale wegstrooming door een deel van het regenwater in planten vast te houden; ze zorgen voor een verdeling van de wegstrooming over een langere tijd, doordat het tijdelijk in het substraat opgeslagen regenwater met relatief lage snelheid wegstroomt (Mentens, Raes, & Hermy, 2006). Figuur 2 laat een voorbeeld zien van een groen dak dat de wegstrooming van het regenwater tijdens een regenbui in België aanzienlijk vermindert.



Figuur 3: Verschil in cumulatieve wegstrooming van regenwater tussen traditioneel dak en extensief groen dak, gemeten in Leuven (België), gedurende een periode van 24 uur van een regenbui van 14,6 mm. Beide daken hadden een 20 graden helling (Mentens, Raes, & Hermy, 2006).

Mentens et al. (2006) hebben aan de hand van de analyse van verschillende onderzoeken naar de waterretentie van groene daken uit West- en Centraal-Europa een model opgesteld. Dit model is in tabel 2 weergegeven om hiermee de wateruitstroming per daktype te berekenen.

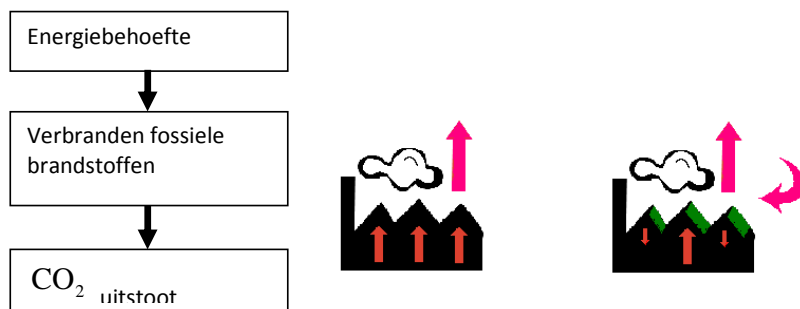
Niet-groen dak	water wegstrooming= $0.81P$
Gravel dak	water wegstrooming= $0.77P$
Groen dak	water wegstrooming= $693 - 1.15P + 0.001P^2 - 0.8 \times S$

Tabel 1: Formules voor berekening waterwegstrooming bij verschillende daktypes (Mentens et al, 2006)

Bovenstaande tabel laat zien dat de wegstroming van niet-groene daken slechts afhankelijk is van de jaarlijkse neerslag (P). De wegstroming van groene daken is afhankelijk van de jaarlijkse neerslag (P) en de dikte van de substraatlaag (S). Dit model is alleen bruikbaar voor omgevingen met een vergelijkbare jaarlijkse neerslag als in de gebruikte onderzoeken.

1.2.4 CO₂ reductie

Het groene dak zorgt voor vermindering in uitstoot van CO₂ door de verbeterde warmte-isolatie, die leidt tot een lager energieverbruik (in het geval van uit fossiele brandstoffen opgewekte energie). Het groene dak zorgt tevens voor een nettoreductie van CO₂ (Kuypers, 2011). Vegetatie neemt CO₂ op voor biologische processen (fotosynthese). In figuur 3 is schematisch de relatie tussen energie en groen dak te zien.

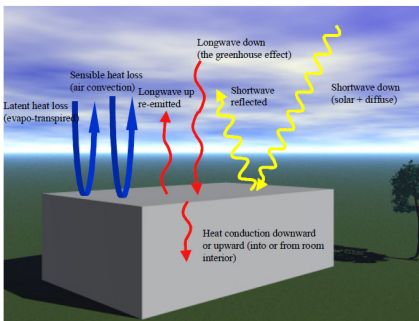


Figuur 4: Schematische weergave bijdrage van een groen dak in CO₂ reductie. De rode pijlen geven energie aan, de roze pijlen CO₂ in de lucht.

1.2.5 Warmteisolatie

Om inzicht te krijgen in deze warmtestromen door groene daken heeft Sailor et al (2008) een rekenmodel opgesteld. Echter maakt de vegetatie op het dak deze bepaling ingewikkeld vanwege microklimatologische effecten; denk aan windsnelheid tussen de vegetatie, reflectie en opname van zonnewarmte door gebladerte en verdamping van water door huidmondjes in de bladeren, wat zorgt voor verkoeling van het oppervlak. Met ruim zeventig variabelen is deze bepaling van Sailor zeer uitgebreid. Voor de opgestelde formules verwijzen we u naar de bijbehorende literatuur in de referentielijst. Ook Gaffin (2005) heeft getracht een dergelijk rekenkundig inzicht te verschaffen in warmtestromen in een dak. Dit resulteerde in een versimpelde vergelijkbaar op basis van slechts enkele variabelen en komt grotendeels overeen met de 'standaard' fluxvergelijking (1), die hieronder wordt geïntroduceerd.

Een algemeen gegeven is dat de netto energie (in de vorm van warmte) die door een materiaal of oppervlak vloeit, afhankelijk is van de hoeveelheid invallende energie op het dak minus de hoeveelheid energie die door dit materiaal of oppervlak (per m^2). Dit leidt tot een 'netto' energiestroom, ofwel energieflex (E_{netto}), die in deze vergelijking aangeeft in welke richting de warmte door het dakoppervlak stroomt. Er zijn zeven fluxen die samen de netto energieflex bepalen, in J/s per m^2 ofwel W/m^2 . Dit wordt weergegeven in figuur 4.



Figuur 5: Standaard energiebalans op een dak (Gaffin, 2005)

$$E_{\text{netto}} = Q_S + Q_L + Q_C + SW_{\text{netto}} + LW_{\text{netto}} \quad (1)$$

Tabel 2: Energieflexen en betekenis

Q_S	Sensible heat flux. Dit is volgens de thermodynamica de warmte-uitwisseling tussen een oppervlak en de lucht en wordt bepaald door conductie en convectie: 'voelbare warmte'
Q_L	Latent heat flux': warmte-uitwisseling die plaatsvindt door verdamping en condensatie: 'warmte opgeslagen in waterdamp'.
Q_C	Warmteconductie: warmte-uitwisseling tussen de onderlaag van het dakoppervlak en de ruimte eronder; wat er letterlijk door de daklaag aan warmte 'lekt'
SW_{netto}	Netto shortwave radiation, onder te verdelen in de inkomende (SW_{in}) en de uitgaande (SW_{uit}). Deze radiatie-energie wordt bepaald door golflengten in het zichtbare gebied en de nabij ultraviolette en infrarode straling
LW_{netto}	Netto longwave radiation, onder te verdelen in inkomende (LW_{in}) en uitgaande (LW_{uit}). Deze radiatie-energie wordt bepaald door infrarode straling

1.2.6 Belangen

De bovengenoemde theorieën worden gebruikt om de rendabiliteit van verschillende aspecten van groene daken te onderzoeken. Zoals eerder genoemd gaan de onderzoekers er van uit dat men baat heeft bij rendabele effecten en dus kostenbesparing, en dat deze besparing resulteert in een verhoging van het menselijk welzijn. De belangen bij deze verschillende vormen van rendabiliteit zijn echter verdeeld over verschillende partijen. Energiebesparing zorgt voor kostenbesparing van de bewoner of huurder van een pand; hier heeft de gemeente niet direct baat bij. De CO2 reductie daarentegen is om te rekenen in een kostenbesparing voor de gemeente; hier heeft de bewoner geen direct belang bij. Meer biodiversiteit verhoogt het 'groene imago' van de stad, en hierbij zullen zowel de gemeente als de bewoner baat hebben. Echter om andere belangen namelijk voor de gemeente leidt dit tot een betere reputatie van de stad en trekt waarschijnlijk meer toeristen aan. Voor de bewoner leidt de verhoogde biodiversiteit tot toegenomen genotswaarden; ze genieten meer van de mooie omgeving. Vanwege dit verschil in belangen zal in de uiteindelijke resultaten onderscheid worden gemaakt tussen kosten en baten voor de gemeente en kosten en baten voor de bewoner.

Energiebesparing is gerelateerd aan kostenbesparing, evenals CO2 reductie. Biodiversiteit daarentegen kan niet direct in geldwaarde worden uitgedrukt, omdat men hier niet direct voor betaald maar toch wel van kan profiteren als het er eenmaal is. Biodiversiteit draagt daarnaast bij aan het verhogen van het groene imago van de gemeente. Via de biologie wordt hier nader op ingegaan. Het aanleggen van een groen dak kan wel de waarde van vastgoed aantoonbaar verhogen, maar het berekenen van de precieze toegevoegde waarde is niet eenvoudig. Dit komt doordat er ook nog andere factoren meespelen tijdens taxatie, zoals de rest van de woning en omgeving. Tevens is een minimale threshold nodig (T. Simon Arcadis, persoonlijk contact, 11-11-11), namelijk het effect van 1 m2 groen dak op de energie- en gasrekening is verwaarloosbaar. Bovendien is bij 1 m2 groen dak geen sprake van een aanzienlijk en verzichtbaar verhoogde biodiversiteit of reductie van koolstofdioxide uitstoot. In de economie wordt rendabiliteit omschreven als een ratio om te kijken of er voldoende winst wordt gemaakt om solvabel te zijn en of er genoeg potentie is tot groei. De mate waarin een bedrijf/overheid het totale vermogen rendabel heeft weten te maken, wordt tot uitdrukking gebracht in de rendabiliteit op het totale vermogen.

2. Methode

2.1 Biodiversiteit op een extensief groen dak

Gezien de voordelen van een hogere biodiversiteit is het in dit onderzoek voorgestelde dakontwerp hierop aangepast. Hiertoe is onderzocht hoe een biodiverse habitat op een extensief groen dak gecreëerd kan worden. Intensieve groene daken zullen hierbij, gezien de hoge kosten, buiten beschouwing gelaten worden. Om een geschikte habitat te creëren is het van belang vast te stellen wat er met biodiversiteit bedoeld wordt, waarom dit belangrijk is en in hoeverre men dit wil bereiken. Dan kan worden bepaald welke soorten behouden of aangetrokken moeten worden, om vervolgens vast te stellen door middel van welke dak- en vegetatieconstructie dit bereikt kan worden. Hiervoor is een lijst van geschikte flora samengesteld, rekening houdend met mogelijkheden tot toepassing op een groen dak, kosten efficiëntie, bijdrage aan de biodiversiteit en faciliterend vermogen voor de onderstaande doelsoorten.

Bij de inrichting van een groen dak is vooral belangrijk dat deze het meeste waarde heeft voor de flora- en faunasoorten die mogelijk kunnen vertoeven in de stadsbiotoop en tevens gewenst zijn om te behouden, omdat ze bijvoorbeeld zeldzaam zijn. Deze soorten worden doelsoorten genoemd. Door middel van een literatuuronderzoek zijn de doelsoorten van Watergraafsmeer bepaald.

Gemeente Amsterdam heeft een lijst met doelsoorten samengesteld. Uit die lijst is voor dit onderzoek een selectie van dieren gemaakt, die mogelijk baat hebben bij de aanleg van groene daken. Opvallend is dat er in de lijst met doelsoorten van gemeente Amsterdam geen insecten zijn opgenomen. Met name bestuivende insecten zijn echter erg belangrijk voor biodiversiteit, doordat ze bijdragen aan de pollinatie van planten op het dak en in de omgeving, en een belangrijke voedselbron vormen voor veel vleermuis- en vogelsoorten (Colla et al., 2009). Vandaar dat de lijst met doelsoorten is aangevuld met insectensoorten die volgens een onderzoek van Mandema (2008) in Groningen ook kunnen worden aangetrokken door groene daken. Hierbij wordt aangenomen dat de ecologische omstandigheden in Amsterdam vergelijkbaar zijn met die in Groningen, aangezien het bij beide een stadsbiotoop betreft en de steden klimatologisch niet veel van elkaar verschillen. Bovendien worden in een rapport over het doelsoortenbeleid in Groningen van Van der Ploeg *et al.* (2009) grotendeels dezelfde zoogdier- en vogelsoorten als doelsoorten benoemd, als door de gemeente Amsterdam. Dit duidt op vergelijkbare ecologische omstandigheden. Bij het maken van een selectie uit de doelsoorten is rekening gehouden met de eetgewoonte en natuurlijke leefomgeving van de dieren. Een ander belangrijk criterium is dat de dieren de daken kunnen bereiken. De lijst bestaat daardoor alleen uit vliegende diersoorten. Hoewel er op groene

daken ook niet-vliegende dieren, zoals spinnen, worden aangetroffen, zijn die hier buiten beschouwing gelaten, omdat die geen actieve rol hebben bij de pollinatie van planten. In Appendix 1 staat de lijst met uiteindelijke doelsoorten voor Amsterdam Watergraafsmeer. Daarbij is aangegeven waarom ze als doelsoort zijn gekozen. Vervolgens is door middel van literatuur onderzoek gekeken met welke planten de daken moeten worden aangelegd om aan de habitatvereisten van deze doelsoorten te voldoen.

In het onderzoek van Mandema (2008) is een lijst met plantensoorten opgesteld die volgens hun onderzoek geschikt zijn voor een ecologisch dak. Uit deze lijst is een selectie van soorten gemaakt die ofwel specifiek een of meerdere van de doelsoorten aantrekken, ofwel een andere specifieke ecologische functie vervullen. Tevens kunnen alle geselecteerde soorten groeien op een extensief substraat (6-10 cm).

Van de lijst met plantensoorten zijn vervolgens de gemiddelde substraatdikte en de Leaf Area Index (LAI) berekend, die in de deelonderzoeken naar warmte-isolatie en CO₂-reductie als parameters dienen. De gemiddelde substraatdikte is berekend door simpelweg het gemiddelde van de benodigde substraatdiktes voor de geselecteerde planten te nemen. De LAI is een aanduiding voor het aantal vierkante meter bladoppervlak per vierkante meter bodem. Deze waarde kan alleen berekend worden als het groene dak daadwerkelijk bestaat. Vandaar dat deze waarde aan de hand van een onderzoek van Scurlock et al. (2001) naar de gemiddelde LAI van verschillende vegetatietypen is geschat.

Tot slot is aan de hand van gegevens van DRO/statistiek bodemgebruik (2009) berekend met welk percentage de oppervlakte groen in Watergraafsmeer toeneemt in de gevallen dat op 10%, 30% en 70% van de gebouwen groene daken worden aangebracht.

2.2 Berekening van de kosten en baten van een groen dak

2.2.1 Maatschappelijke kosten en baten analyse

Nu het dakontwerp voor Amsterdam Watergraafsmeer is bepaald, kan aan de hand hiervan worden gekeken tot welke kosten en baten dit leidt. Hierbij spelen verschillende factoren in meer of mindere mate een rol. Voor deze berekening wordt gebruik gemaakt van een Maatschappelijke Kosten-Batenanalyse (MKBA). Een MKBA geeft het rendement van een investering voor de gehele maatschappij weer. De kracht van de MKBA is het inzichtelijk maken van alle voor- en nadelen van een investering, waar die ook terecht komen. In een MKBA worden niet alleen de directe effecten van het project in kaart gebracht en gewaardeerd, maar ook de 'externe' effecten op bijvoorbeeld milieu, veiligheid en natuur (Arcadis, 2011).

Voordat het mogelijk is een rekening model te creëren, moet eerst een aantal aannames

worden gedaan. Ten eerste wordt er vanuit gegaan dat het beschreven groene dak een levensduur heeft van 40 jaar, en een bitumen dak 20 jaar (Aida Rotterdam). Ten tweede wordt er gebruik gemaakt van de huidige energie- en gasprijzen, en zijn er uitgangswaarden voor desbetreffende variabelen via wetenschappelijke bronnen geverifieerd.

De buurtmonitor van Stadsdeel Oost buurtmonitor geeft een beeld van het aantal bedrijven en woningen. Hier wordt gebruik gemaakt tijdens het onderzoek, om inzicht te krijgen in het aantal vierkante meter dakoppervlakte in Watergraafsmeer. (<http://stadsdeeloost.buurtmonitor.nl>)

2.2.2 Realisatie groen dak

In het artikel van Mentens et al. (2006) wordt een onderzoek van Köhler (2003) aangehaald waarin Köhler betoogt dat het realistisch is om aan te nemen dat 10 % van de gebouwen potentieel zijn voor aanleg van een extensief groen dak. Dit is gebaseerd op het gegeven dat in Duitsland meer dan 10% van alle nieuw gebouwde huizen bedekt zijn met een groen dak (Köhler, 2003). Om deze reden is er besloten om drie scenario's te schetsen, namelijk 10 % (realistisch), 30 % (plausibele situatie over 5 jaar) en 70 % (plausibele situatie over 10 jaar). Zoals besproken in dit onderzoek van Köhler (2003), is het niet mogelijk aan te nemen dat elk bitumen dak vervangen kan worden door een rendabel en kostenbesparend groen dak. Door complicaties omtrent verstevigingen van substraat en extra kosten bij het aanleggen van een biodiverse vegetatie op een schuin dak, worden alleen de platte daken in Watergraafsmeer als potentiële mogelijkheid gezien. In dit onderzoek wordt uitgegaan van een brede vegetatie voor een verhoogde biodiversiteit (zie appendix 1) waarvoor een plat dak essentieel is. Er zijn weinig gegevens te achterhalen over het aantal beschikbare vierkante meter plat dak. Om toch een beeld te kunnen geven van de rendabiliteit van een groen dak in Watergraafsmeer, worden de drie scenario's geschetst.

2.3 Waterretentie

Waterretentie vormt ook een belangrijke bijdrage aan kostenreductie. Met de term waterretentie wordt de reductie in afvoer van regenwater bedoeld doordat het opgevangen water door verdamping verdwijnt. Het is voor de kosten-batenanalyse nodig te berekenen in welke mate de aanleg van groene daken de wegstroming van regenwater kan reduceren in Watergraafsmeer. Hiertoe moet worden berekend hoeveel water extra wordt vastgehouden per groen dak ten opzichte van een normaal dak. Het door Mentens et al. (2006) opgestelde model (tabel 2) kan hier voor worden gebruikt, aangezien Amsterdam met een gemiddelde regenval van 866,6 mm per jaar (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, 2009) aan de gestelde klimatologische eisen van het model voldoet.

2.4 Warmteisolatie

In dit onderzoek worden de bevindingen van Sailor et al. gecombineerd met literatuur Gaffin (2005) en aanvullend van Hongming (2010) om zo een versimpeld rekenmodel. Door de variabelen in te vullen kan inzicht worden verkregen in de isolerende prestaties van een groen dak, bijvoorbeeld in vergelijking met die van een groen dak.

De eerder gepresenteerde vergelijking voor de netto energiestroom door een oppervlak (1) is afhankelijk van zeven fluxen (zie figuur 4), die elk afhankelijk zijn van verschillende variabelen. De betekenis van deze kunnen in de legenda in Appendix 3 kunnen worden opgezocht. In het kader van dit onderzoek zijn de volgende vergelijkingen opgesteld:

$$Q_S = \rho_{gem} \cdot C_{tc} \cdot C_p \cdot v_{wind} \cdot (T_{vegetatie} - T_{lucht}) \quad (2)$$

De Q_L en de Q_S zijn middels de Bowen-ratio (β) gekoppeld

$$\beta = \frac{Q_S}{Q_L} \quad (3)$$

Deze verhouding wordt geschat via (Hongming, 2008):

$$\beta = \gamma \cdot \frac{\Delta T}{\Delta q} \text{ met } \gamma = \frac{p \cdot C_p}{\lambda \cdot r}$$

Hieruit volgt:

$$Q_L = \frac{Q_S}{\beta} = \frac{\rho_{gem} \cdot C_{tc} \cdot v_{wind} \cdot \Delta q \cdot \varepsilon \cdot \lambda}{p} \quad (5)$$

Q_C geeft de warmte weer die wordt uitgewisseld door het dak heen (tussen de ruimte onder het dak, en buitenshuis) volgens de standaard thermodynamische vergelijking:

$$Q_C = \kappa \cdot (T_{dak} - T_{binnen}) \quad (6)$$

$$SW_{netto} = SW_{in} - SW_{uit} = Z_{direct} + Z_{diffusie} - \alpha(Z_{direct} + Z_{diffusie}) \quad (7)$$

$$LW_{netto} = LW_{in} - LW_{uit} = \sigma \cdot (C \cdot T_{lucht}^4 - \varepsilon_s \cdot T_{dak}^4) \quad (8)$$

Door de variabelen in vergelijkingen (2) tot en met (8) in te vullen, op basis van zowel een groen dak als een normaal (bitumen) dak, kan een beeld worden gecreëerd over de isolerende prestaties van de daken. De hierboven gepresenteerde vergelijkingen geven meteen de richting van de stroom aan:

in dit systeem is een positieve waarde naar beneden gericht (van buiten naar binnen), en een negatieve waarde naar boven.

2.5 CO2 reductie

Door te kijken naar de bijdrage van (dak)vegetatie aan CO2 reductie, kan worden afgeleid wat hun indirecte energetische rendabele bijdrage is. Drs. V.H.M. Kuypers van onderzoeksinstituut Alterra houdt zich bezig met de berekening van de netto CO2 reductie door biomassa in stedelijke bebouwing. Ook hierin spelen variabelen een rol: de soort vegetatie, de opname door planten overdag en uitstoot 's nachts en de hoeveelheid opgenomen en afgegeven CO2 wanneer de vegetatie biomassa verliest. Kuypers heeft zijn waarden gebaseerd op bestaande literatuur, en hieruit een berekening opgesteld. Deze kunnen worden toegepast op het groene dak om een netto CO2 reductie te schatten, die geplaatst kan worden in het economisch model.

Het rekenmodel van Drs. V.H.M. Kuypers is gebaseerd op het netto verschil tussen opgenomen en afgegeven CO2 door vegetatie. CO2 afgifte gebeurt 's nachts (bij afwezigheid van zonlicht), en door verlies van biomassa. Dit CO2 verlies wordt onderverdeeld op de intensieve of extensieve manier. Intensief is bijvoorbeeld verlies van biomassa als gevolg van menselijk handelen, zoals snoeien of maaien. Extensief is een gevolg van natuurlijke handelingen, bijvoorbeeld een boom die zijn bladeren verliest. Over het algemeen wordt biomassa heropgenomen door andere vegetatie of dieren of door de bodem, maar bij frequent intensief handelen is de kans op heropname van organische bestanddelen door de bodem als gevolg van een mineralenkringloop kleiner, wat leidt tot meer uitstoot dan zonder behandeling, vanwege het doorbreken van het natuurlijke evenwicht. Daarom is extensieve behandeling van vegetatie -voordeliger (02-12-2011) .

Kuypers onderscheidt in zijn onderzoek vier typen stedelijk groen: Bos, Grasland, Struiken en Parken. Het type 'Grasland' overkoepelt ruw gras, gazon, kruidenberm en stinze- of perkbeplanting, en is van toepassing op groene daken. Onderstaande tabel geeft Kuypers resultaten weer, toegespitst op het type groen dat van toepassing is op groene daken (zie tabel 3).

Tabel 3: Cumulatieve koolstoffixatie (in tonnen per ha) van een zeer extensief onderhouden gras/kruiden -vegetatie en een zeer intensief gemaaide grasvegetatie.

grasland	Extensief			Intensief		
N-jaren	Bio-massa	Bodem	Totaal	Bio-massa	Bodem	Totaal
1	1	0.3	1,3	0	0.1	0.1
10	1	6	7	0	1.1	1.1
20	1	9	10	0	1.8	1.8
30	1	10	12	0	2.1	2.1
40	1	11	12	0	2.2	2.2

Bovenstaande tabel is gebaseerd op grasland in een ‘matig’ gunstige situatie zoals in Nederland met beperkte bodemvruchtbaarheid en geen grondwaterinvloed. Dat maakt de situatie vergelijkbaar met een substraatlaag op een dak (Pouyat, 2006). De bovengrondse biomassa van een extensief beheerde gras-kruidenvegetatie bouwt zich snel op en blijft daarna ieder jaar ongeveer hetzelfde waarbij de jaarlijks afgestorven planten bijdragen aan de opbouw van de hoeveelheid in de bodem gefixeerde koolstof (Montagu, 2003).

3. Resultaten

3.1 Biodivers groen dak

Gezien de eigenschappen van de in bijlage 2 weergegeven plantensoorten is het mogelijk een relatief grote diversiteit aan planten op een extensief groen dak in Amsterdam Watergraafsmeer te laten groeien. Dit op zich zorgt al voor een verhoging van de biodiversiteit. Tevens heeft een deel van de weergegeven plantensoorten de mogelijkheid om één of meerdere van de doelsoorten aan te trekken. Deze vegetatietypen geven volgens het onderzoek van Scurlock et al. (2001) een gemiddelde LAI van 4. De gemiddeld benodigde substraatdikte voor de plantensoorten is 7,76 cm.

Op dit moment is er 145 hectare (DRO/statistiek bodemgebruik, 2009) aan oppervlakte groen in Watergraafsmeer, dit is 22% van de totale oppervlakte van Watergraafsmeer (DRO/statistiek bodemgebruik, 2009). 417 hectare van Watergraafsmeer is bebouwd gebied (DRO/statistiek bodemgebruik, 2009). In het geval dat op 10% van de gebouwen een groen dak wordt geplaatst is er dus een toename van 41,7 hectare aan oppervlakte groen. Dit is een toename van 29% van de totale hoeveelheid groen in Watergraafsmeer. In het geval dat op 30% van de gebouwen een groen dak

wordt geplaatst is er dus een toename van 125,1 hectare aan oppervlakte groen. Dit is een toename van 86% van de totale hoeveelheid groen in Watergraafsmeer. In het geval dat op 70% van de gebouwen een groen dak wordt geplaatst is er dus een toename van 291,9 hectare aan oppervlakte groen. Dit is een toename van 201% van de totale hoeveelheid groen in Watergraafsmeer. Deze toename in groen oppervlak zal ook een toename in biodiversiteit met zich mee brengen, aangezien de daken met een biodiverse verzameling plantensoorten bedekt worden. Deze toename is echter moeilijk in waarde te schatten, aangezien er geen gegevens beschikbaar zijn van de mate van de huidige biodiversiteit in Watergraafsmeer. Ook is moeilijk te voorspellen in welke mate de biodiversiteit werkelijk zal toenemen na plaatsing van de groene daken, aangezien het een constant veranderende biotoop is.

3.2 Waterretentie

Het gebruik van een gemiddelde substraatdikte van 77,6 mm (volgt uit de eerder opgestelde lijst plantensoorten met bijbehorende substraatdiktes variërend van 60 tot 120 mm) en een gemiddelde jaarlijkse regenval van 866,6 mm, volgt uit het model van Mentens et al. (2006) bij een niet-groen dak een waterwegstroming van 702 mm en bij een groen dak een wegstroming van 385 mm. Dit betekent een reductie in wegstroming van 45% bij een groen dak ten opzichte van een niet-groen dak.

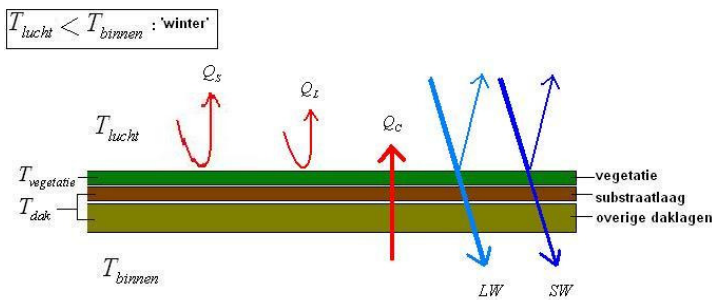
3.3 Warmte-isolatie

Het opgestelde rekenmodel is een versimpeld systeem om in verschillende omstandigheden energiestromen/verliezen door een groen dak te berekenen – en deze in de kosten-batenanalyse te vergelijken met bekende gegevens van bestaande ‘normale’ daken.

Om tot concrete resultaten te komen, moeten de vergelijkingen worden ingevuld. Er worden voor dit onderzoek grofweg twee situaties geschetst; een in een koude buitenomgeving (‘winter’) en een in een warme (‘zomer’). Hiervoor zijn waarden gebruikt van de Haarwegdata van het meteorologisch instituut (Meteorology and Air Quality research group) van Universiteit Wageningen in samenwerking met Alterra (Haarwegdata WUR, 2010). Dit instituut doet elk uur metingen, sinds 1974. Het weerstation is binnenlands gelegen (omgeving Wageningen), waardoor de gemiddelde temperatuur hier hoger zal liggen dan in omgeving Amsterdam, dat dicht bij zee ligt. Echter omdat een stedelijke omgeving warmer is dan een landelijke omgeving (Jacobs, 2011) kunnen de metingen in dit weerstation een bruikbare leidraad zijn voor de benodigde gegevens voor de invulling van het rekenmodel. De gegevens zijn gebaseerd op een gemiddelde van dagelijkse metingen in de eerste

twee weken van januari (koude buitenomgeving) en de eerste twee weken van juli (warme buitenomgeving) 2010.

Situatie 1: Koude buitentemperatuur.



Figuur 6: Verduidelijking van situatie 1 waar de temperatuur van de buitenlucht kleiner is dan de temperatuur van de binnenlucht.

Bovenstaande figuur 6 geeft schematisch de warmtestromen weer in de eerste twee weken van januari (koude buitentemperatuur). De gemiddelde buitentemperatuur was 271,6 K (Haarwegdata

WUR, 2010). Hierbij hoort een gemiddelde luchtdichtheid ρ_{gem} van $1,3 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$. C_{tc} is een

gegeven van de ruwheid van het oppervlakte, vaak tussen de $1.1 \cdot 10^{-3}$ en $3.0 \cdot 10^{-3}$, maar wanneer er op een grotere hoogte wordt gemeten heeft de windsnelheid hier invloed op volgens de bepaling

van Deardorff (1978): $C_{tc} = 0.01 \cdot \left(1 + \frac{0.3}{v_{wind}} \right)$. Volgens Jacobs (2012) ligt deze waarde tussen de

0,01 en 0,015. C_p is een standaard waarde van $1005.6 \left(\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right)$ (Sailor, 2008). De gemiddelde

windsnelheid was $3,357 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$ op 10 m hoog en dit neemt in een stedelijke omgeving af met een

factor 1.5 waaruit 2.23 volgt. Sailor hanteert 2,2 m/s (2008). Hieruit volgt $C_{tc} = 0.0113 \sim 0,011$. De

ruwheid van een bitumen oppervlak is iets groter: 0,0115. De temperatuur van de vegetatie op het dak was 274,1 K (Haarwegdata WUR, 2010). Er wordt aangenomen dat in een koude buitenomgeving een bitumen dak eenzelfde temperatuur aanneemt (vanwege de isolerende materialen in dit dak).

Ook zal in dit rekenmodel worden uitgegaan van géén verdamping, en dus Q_L , in het geval van een bitumen dak. Een standaard bitumen dak heeft een K waarde van 3,0. De extra vegetatie op het groen dak maakt dit extra isolerend, tot gemiddeld een K waarde van 2,0 (Niachou, 2001;

Hongming, 2008). De temperatuur vlak onder de vegetatielaag wordt bepaald aan de hand van de Haarwegdata, gemeten 5-10 cm onder de bodem. Aangenomen wordt dat de binnentemperatuur gemiddeld 18 °C is (291.15 K). Hieronder de ingevulde waarden:

Groen dak	
ρ_{gem}	$1,3(1) \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$
C_{tc}	$1.1 \cdot 10^{-2}$
C_p	$1.0056 \cdot 10^3 \left(\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right)$
v_{wind}	$2.2(1) \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$
$T_{vegetatie}$	274,1 K
T_{lucht}	271,6 K

Bitumen dak	
ρ_{gem}	$1,3(1) \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$
C_{tc}	$1.15 \cdot 10^{-2}$
C_p	$1.0056 \cdot 10^3 \left(\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right)$
v_{wind}	$2.2(1) \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$
T_{dak}	274,1
T_{lucht}	271,6 K

ρ_{gem}	$1,31(1) \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$
C_{tc}	$1.1 \cdot 10^{-2}$
v_{wind}	$2.2(1) \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$
q_{lucht}	0.4703 kPa
$q_{bladoppervlak}$	0.7158 kPa
Δq	0.2455 kPa
ε	0.622
λ	$2.50(1) \cdot 10^6$
p	101,325 kPa

Groen dak	
K	$2,0 \left(\frac{W}{m^2 K} \right)$
T_{dak}	273.05 K
T_{binnen}	291.15 K

Bitumen dak	
K	$3,0 \left(\frac{W}{m^2 K} \right)$
T_{dak}	273.05 K
T_{binnen}	291.15 K

De Haarwegdata bevatten ook maten van inkomende zonnestraling. Deze komen overeen met de gegeven waarden dat een groen dak een α van 0.6 heeft (soms wordt zelfs 0,8 gesteld; maar dat lijkt hoog), en een bitumen dak van 0,15. De emissie coëfficiënt ε_s van een groen dak is iets lager dan die van een plat dak: 0,85 tegen 0,9.

Groen dak	
LW_{in}	262,65
LW_{uit}	300,46
LW_{netto}	-37,81

Bitumen dak	
LW_{in}	262,65
LW_{uit}	291.83
LW_{netto}	-29.18

Groen dak	
SW_{in}	6,579
SW_{uit}	3,954
SW_{netto}	2,625

Bitumen dak	
SW_{in}	6,579
SW_{uit}	0,994
SW_{netto}	5,585

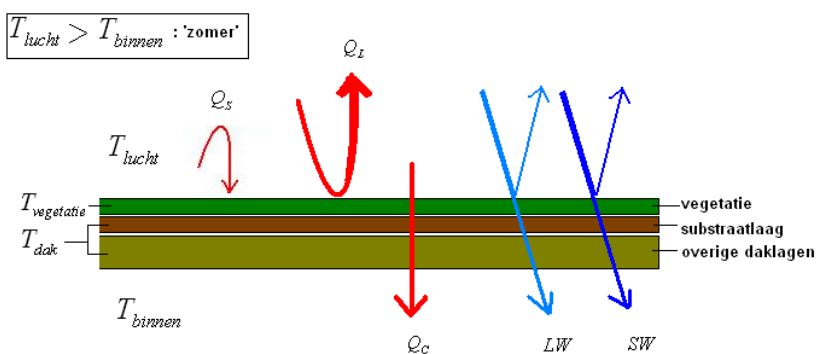
Hieruit blijkt de een netto energieflex van:

Winter	Groen dak	Bitumen dak
Q_s	-79.09	-82.69
Q_L	-13.95	0
Q_C	-36.20	-54.30
SW_{netto}	2.63	5.59
LW_{netto}	-37.81	-29.18
Netto	-164.42	-160.58

Tabel 4: netto energieflex groen dak en bitumen dak in de winter.

Te zien is dat een bitumen dak hier als rendabeler uitkomt dan een groen dak. Dit is een gevolg van de waarde van Q_L , waarvan er nu wordt uitgegaan dat die geen enkele invloed heeft op de warmteuitwisseling op een bitumen dak. In de discussie zal dit nader worden toegelicht. Op de weerkaatsing van de 'longwave radiation' na zijn alle energiestromen energetisch rendabeler bij een groen dak. Een plat bitumen dak heeft een iets hogere emissie coëfficiënt (weerkaatsingsvermogen) dan een dak bedekt met vegetatie.

Situatie 2: warme buitentemperatuur



Figuur 7: Verduidelijking van situatie 2 waar de temperatuur van de buitenlucht groter is dan de temperatuur van de binnenlucht.

In de eerste twee weken van juli 2010 werd er een gemiddelde buitentemperatuur van 300,8K gemeten, om 16:00. De temperatuur van het gewas was gemiddeld 297.0 K. De temperatuur 5-10 cm onder de vegetatielaag was 304.83 K. Nu echter geldt een andere daktemperatuur: een bitumen dak kan een temperatuur van 80 °C bereiken. In dit model wordt aangenomen dat er niet altijd volle zon was, en het dak gemiddeld 60°C was in warme omstandigheden. Bij de gegeven buitentemperatuur daalt de ρ_{gem} naar $1.184 \sim 1.2$. De windsnelheid was gemiddeld 2.20 m/s, en in stedelijke omgeving 1.46 m/s.

Groen dak	
ρ_{gem}	$1.2(1) \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$
C_{tc}	$1.1 \cdot 10^{-2}$
C_p	$1.0056 \cdot 10^3 \left(\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right)$
v_{wind}	$1.46 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$
$T_{vegetatie}$	297.0 K
T_{lucht}	300.8 K

ρ_{gem}	1,2(1) kg/m ³
C_{tc}	$1.1 \cdot 10^{-2}$
v_{wind}	1.46 m/s
q_{lucht}	38.74 kPa
$q_{bladoppervlak}$	23.07 kPa
Δq	15.67 kPa
ε	0.622
λ	$2.44(1) \cdot 10^6$
p	101,325 kPa

Bitumen dak	
ρ_{gem}	$1.2(1) \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$
C_{tc}	$1.15 \cdot 10^{-2}$
C_p	$1.0056 \cdot 10^3 \left(\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right)$
v_{wind}	$1.46 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$
T_{dak}	333.2 K
T_{lucht}	300.8 K

Groen dak	
K	$2,0 \left(\frac{W}{m^2 K} \right)$
T_{dak}	304.8 K
T_{binnen}	291.15 K

Bitumen dak	
K	$3,0 \left(\frac{W}{m^2 K} \right)$
T_{dak}	333.2 K
T_{binnen}	291.15 K

Groen dak	
LW_{in}	391,86
LW_{uit}	494,22
LW_{netto}	102,363

Bitumen dak	
LW_{in}	391,86
LW_{uit}	348.32
LW_{netto}	43.54

Groen dak	
SW_{in}	439,24
SW_{uit}	263.54
SW_{netto}	175.70

Bitumen dak	
SW_{in}	439,24
SW_{uit}	65.24
SW_{netto}	374.00

Wederom is de energiestroom ten gevolge van verdamping op een bitumen dak weggelaten. Desondanks is te schematisch te zien dat een groen dak (ten gevolge van verdamping en een kleine sensibele warmtestroom) isolerend werkt, terwijl een bitumen dak vooral warmte doorlaat waardoor de binnenruimte wordt opgewarmd. In deze berekening is zelfs een verkoelende werking van het dak te zien: dit kan voorkomen wanneer de buitenlucht een hoge temperatuur bereikt na een regenval, waardoor de vegetatie veel water bevat en door plotselinge verdamping extra verkoelend werkt.

Zomer	Groen dak	Bitumen dak
Q_s	73.64	656.45
Q_L	-215.46	0
Q_C	27.30	126.15
SW_{netto}	175.70	374.00
LW_{netto}	-102.36	-43.45
Netto	-41.18	1113.15

Tabel 5: netto energieflex groen dak en bitumen dak in de zomer.

3.4 CO₂-reductie

In tabel 3 is te zien dat 1,3 ton CO₂ per hectare grasland wordt opgenomen, en wanneer dit extensief wordt behandeld komt daar gemiddeld na dertig jaar 10 ton CO₂ bij. Dan is de vegetatie 'verzadigd' en vindt een evenwichtssituatie plaats. In de eerste jaren neemt de vegetatie veel CO₂ op: 130 g/m², en na 40 jaar is dit gemiddeld 30 g/m². Ter vergelijking: Getter et al. heeft met behulp van metingen in sedum-achtige planten de CO₂-opname gemeten. Zij vonden in het eerste jaar een opname van 160 g/m² en na het tweede cumulatief 375 g/m² (2009). Gebhart et al. vond op een soortgelijke wijze in het eerste jaar 110 g/m² (1994).

3.5 Integratie van kosten en baten in een economisch model

Vervolgens wordt berekend door Milieubarometer (2011) dat de vrijgekomen CO₂ uitstoot door gasverbruik 1,825 kg per m³ gas bedraagt en vrijgekomen CO₂ uitstoot door elektriciteit 0,455kg per kWh. Volgens de Woonhelpdesk (2010) is de gasbesparing door aanschaf van groen dak tussen de 2,5 en 5 m³ gas per vierkante meter. Dus de gemiddelde gasbesparing equivalent aan een gemiddelde van 3,75 m³ per vierkante meter. Volgens Aida Rotterdam (2011) kunnen we aannemen dat een groen dak 40 jaar mee kan en een bitumen dak 20 jaar. Dankzij goede hulp en informatieverlening van Arcadis, was het mogelijk om een MKBA te creëren voor gemeente Amsterdam. Met deze waarden wordt verder gerekend in het MKBA. Het complete overzicht van uitgangswaarden rondom groen dak is te vinden in appendix 4.

3.5.1 Resultaat kosten en baten analyse particulier

Het financiële resultaat voor de (particuliere) eigenaar van een groen dak wordt berekend door de investerings- en onderhoudskosten te vergelijken met de ontstane baten. Het financiële resultaat toont aan of de aanschaffing van een groen dak leidt tot een hogere private baten in vergelijking met een standaard bitumen dak. Bij deze case keren de opbrengsten jaarlijks terug en deze bestaan vooral uit de vermeden kosten voor gas- en elektraverbruik. De kosten bestaan uit de hogere investeringskosten voor een groen dak per vierkante meter in vergelijking met een bitumen dak (zie tabel 6).

Type:	Levensduur:	Investeringskosten per m2:	Investeringskosten proefwoning (60m2) per levensduur van dak:	Investeringskosten proefwoning (60m2) verdeeld per jaar:	Onderhoudskosten proefwoning (60m2) per jaar:
Groen dak	40 jaar	€65	€3900	€97,50	€60,00
Bitumen dak	20 jaar	€31	€1860	€93,00	€66,00

Tabel 6: Verschil investerings- en onderhoudskosten tussen groen dak en bitumen dak

De vermeden gas- en elektrakosten is in kaart gebracht met het rekenkundig model. Zoals eerder berekend, is de gemiddelde gasbesparing equivalent aan een gemiddelde van 3,75 m³ per vierkante meter. Doordat per m³ gas er 1,825 kg wordt uitgestoten (Milieubarometer, 2011), is er sprake van een reductie van 6.84 kg per m². Voor de proefwoning met een dakoppervlak van 60 m² bedraagt deze reductie 410,4 kg per jaar.

Proefwoning (60m2 dakoppervlakte) per jaar				
	Zonder groen dak		Met groen dak	Besparing ivm groen dak
Totaal elektriciteitsverbruik		5100 kWh	2516,59 kWh	2583,41 kWh
Totale elektriciteitsverbruik	€	1.122,00	€ 474,45	€ 568,35
Totale gasverbruik		960 m3	735 m3	225,00 m3
Totale gasverbruik	€	556,80	€ 426,30	€ 130,50

Tabel 7: Overzicht waarden van reductie van elektriciteits- en gasverbruik door implementatie van groen dak.

Bovenstaande waarden zijn voor een jaar en zijn berekend als volgt; een gemiddelde woning verbruikt volgens SenterNovem 85 kWh per m². Als je dit berekend voor een oppervlak van 60 m², komt daar de waarden van 5100kWh. De actuele prijs voor 1 kWh elektriciteit bedraagt €0,22 (Prijspeil 2011) en hiermee is het bedrag van €1122,00 berekend. Voor de berekening van het gasverbruik gaat dit enigszins hetzelfde. Volgens SenterNovem gebruikt een gemiddeld huishouden

16 m³ gas per m². Als dit gegeven maal de gasprijs van €0,58 per m³ (Prijspeil 2011) wordt gedaan, krijgen we het bedrag van € 556,80. Door de aanschaf van een groen dak wordt het totale elektriciteits- en gasverbruik gereduceerd. Uit tabel 4 van het natuurkundig model is gebleken dat de procentuele afname van energieflex in de winter van groen dak ten opzichte van een bitumen dak 2,39% bedraagt (nieuw-oud/oud * 100% leidt tot -164.42+160.58/160.58*100%=2.39%). Uit tabel 5 kan berekend worden dat de procentuele toename van energieflex in de zomer van groen dak ten opzichte van een bitumen dak 103.7% bedraagt (nieuw-oud/oud * 100% leidt tot -41.18-1113.15/1113.15*100%=-103.7%). Om met deze gegevens verder te kunnen rekenen, wordt aangenomen dat de jaarlijkse besparing van energieflex de gemiddelde procentuele verandering bedraagt, namelijk 50.66%. Met dit gegeven kan worden gezegd dat de aanleg van groen dak resulteert in een 50.66% afname van elektriciteitsverbruik. De reductie van het elektriciteitsverbruik na aanschaf van groene daken is dus 0.50655*5100kWh = 2583,41 kWh per proefwoning van 60m². De totale elektriciteitsverbruik van een gemiddelde proefwoning met groen dak bedraagt 5100-2583,41=2516,59kWh. Om dit in geld uit te drukken, doen we dit weer maal de actuele prijs van 1kWh.

Volgens Woonhelpdesk (2010) bedraagt de besparing van gasverbruik per jaar door groen dak tussen de 2,5 en 5,0 m³ gas per m². We nemen aan dat deze proefwoning het gemiddelde is van deze waarden dus het bespaart zo'n 3,75 m³ gas per m². In plaats van dat een gemiddelde woning 16 m³ per m² verbruikt, consumeert het nog 12.25 m³ per m² (door verbeterde isolatie e.d.). Vermenigvuldig dit met de dakoppervlakte wat resulteert in een totale gasverbruik van 735 m³. Vervolgens multipliceer je dit met de gasprijs en krijg je de waarde in geld uitgedrukt.

Bovenstaande gegevens kunnen in een MKBA worden verwerkt om zo tot een daadwerkelijk antwoord te komen. Uit tabel 5 blijkt dat de investeringskosten voor een proefwoning per jaar €4,50 extra zijn voor groen dak. De kosten en baten van een groen dak zijn hieronder in een tabel verwerkt ten opzichte van een bitumen standaard dak.

Variabele:	Kosten:	Baten:	Netto:
Investeringskosten	€4,50		(€4,50)
Onderhoudskosten		€6,00	€6,00
Besparing gaskosten		€130,50	€130,50
Besparing elektrakosten		€568,35	€568,35
Reductie geluidshinder		€198,90	€198,90
Biodiversiteit		*	
Totaal	€4,50	€903,75	€899,25

Tabel 8: Overzicht van de kosten en baten analyse van particuliere proefwoning van 60m² dakoppervlakte met een plat groen dak in vergelijking met een standaard bitumen dak.

3.5.2 Resultaat kosten en baten analyse gemeente

Het financiële resultaat voor de gemeente en daarmee indirect voor de maatschappij wordt berekend door de kosten te vergelijken met de opbrengsten. Dit resultaat geeft inzicht of de techniek van een groen dak vanuit maatschappelijk perspectief rendabel is. Bij het maatschappelijk resultaat wordt rekening gehouden met vermeden kosten voor waterretentie en de verminderde preventiekosten voor koolstofdioxide uitstoot.

3.5.3 Vermeden kosten waterretentie

Uit testen van gemeentelijk IngenieursBureau Amsterdam (IBA) is gebleken dat de waterretentie bij een groen dak 0,006 m3 per m2 bedraagt. Arcadis heeft op basis van onderzoeken de aanname gemaakt dat vermeden kosten voor waterretentie €350 per m3 bedragen. Via deze tussenstap is het mogelijk om de vermeden kosten aan waterretentie in geld uit te drukken, namelijk €2,10 per m2 ($0,006 \times 350 = 2,10$). Voor de proefwoning met een dakoppervlak van 60 m² bedraagt deze kostenreductie aan waterretentie €126,- per jaar. Voor de gemeente Watergraafsmeer waarin 57.491 woningen zijn gevestigd, is het mogelijk om de totale besparing te berekenen.

Bij een implementatie van 10 % van groene daken leidt dit tot een kostenreductie van €724.386,60 op het gebied van waterretentie. Bij een implementatie van 30 % leidt dit tot een besparing van €2.173.159,80. In de derde scenario waarbij er sprake is van een implementatie van 70 % groene daken leidt dit tot een kostenreductie van €5.070.706,20.

3.5.4 Vermeden preventiekosten koolstofdioxide uitstoot

Echter heeft gemeente Amsterdam de preventiekosten voor 'nog' niet in kaart, maar volgens gemeente Rotterdam bedragen de preventiekosten €0,05 per kg. In dit onderzoek wordt aangenomen dat de preventiekosten voor koolstofdioxide uitstoot generaliseerbaar zijn voor de gemeente Amsterdam. Dit resulteert in een reductie van €20,52 aan preventiekosten, aangezien hiervoor berekend is dat voor een proefwoning met een dakoppervlak van 60 m² een CO2 reductie van 410,4 kg per jaar bedraagt. Om deze reductie in kaart te brengen voor Voormalig stadsdeel Watergraafsmeer wordt de enkele reductie van €20,52 vermenigvuldigd met 57.491 woningen (Dienst, Onderzoek en Statistiek 2011).

Een implementatie van groen dak bij 10% van de huishoudens in Oost, resulteert in een besparing van €117.971,53 dus ruim 1 ton reductie aan preventiekosten voor koolstofdioxide uitstoot. Een implementatie van groen dak bij 30% van de huishoudens in Oost, resulteert in een besparing van €353.914,59 dus ruim 3 en een halve ton besparing aan preventiekosten voor de koolstofdioxide uitstoot. Een implementatie van groen dak bij 70% van de huishoudens in Oost,

resulteert in een besparing van €825.800,72 dus ruim 8 en een kwart ton besparing aan preventiekosten voor de koolstofdioxide uitstoot.

4. Conclusie

Uit de resultaten van het deelonderzoek naar biodiversiteit blijkt dat het mogelijk is om een biodivers milieue te creëren op een extensief groen dak. Dit op zich zorgt al voor een verhoging van de biodiversiteit. Tevens heeft een deel van de weergegeven plantensoorten de mogelijkheid om één of meerdere van de doelsoorten aan te trekken. Bepaalde doelsoorten zorgen op hun beurt weer voor betere omstandigheden van de planten, door bijvoorbeeld pollinatie, waardoor de biodiversiteit in Watergraafsmeer in zijn geheel zal toenemen. Gegeven de eigenschappen van biologisch bepaalde dakvegetatie, is met het rekenmodel berekend dat een dergelijk dakontwerp vooral 's zomers energetisch voordelig is. De gevonden waarden zijn niet leidend voor de exacte energiestromen door een dak wegens de vele aannames en de momentopnamen waarop deze zijn gebaseerd (ondanks dat een gemiddelde is genomen van twee weken). Luchtvochtigheid, regenval en windsnelheid zijn van grote invloed op de resultaten en fluctueren constant. Desondanks is het mogelijk om een conclusie te geven betreft de rendabiliteit van een groen dak. Samen met de gevonden verhoogde waterretentie en CO₂-reductie kunnen uit het economisch model twee verschillende conclusies worden getrokken. Ten eerste is het voor de particulier met een proefwoning van 60m² rendabel om een groen dak aan te schaffen. Ten tweede is voor de gemeente en maatschappij de implementatie van een groen dak in alle gevallen (10%, 30% en 70%) rendabel en positief zijn.

5. Discussie

In deze studie zijn vele aannames gedaan, vanwege de grote hoeveelheid biologische en klimatologische bijeffecten die per methode meespeelden in het onderzoek. Bovendien zijn er bij het economisch rekenmodel veel aannames gemaakt betreft de levensduur van de twee daken en de kostenbesparing op waterretentie. Deze aannames waren nodig om tot concrete gegevens te komen om met de maatschappelijke kosten-batenanalyse, tevens het integratiemodel, tot een conclusie en advies aan de gemeente te komen. Dit maakt de conclusie niet sluitend; het is eerder een leidraad. Aannames zijn in onderzoeken met vele variabele bijeffecten belangrijk in de bepaling van een advies of onderzoeksresultaat. Beleidsplannen als de grootschalige aanleg van groene daken is kostenintensief, maar een duurzaam alternatief en zou op korte termijn voor baten kunnen zorgen. Om deze reden is het doen van aannames onoverkomelijk in het onderzoek wat op de korte en lange termijn duurzame en bovenal groene alternatieven zijn voor huidige beleidsplannen. Om ervoor te

zorgen dat de groene daken daadwerkelijk gerealiseerd worden door de particulieren, kan de gemeente ervoor kiezen om subsidie uit te delen om het zo te motiveren. Dit zou een idee kunnen zijn voor een vervolgonderzoek naar de effectiviteit van subsidie uit delen voor aanleg van een groen dak.

Dit onderzoek zal naast een advies dus ook een stap zijn naar een vervolgonderzoek: enkele gegevens kunnen los van de conclusie gebruikt worden in een nieuwe analyse. Het rekenmodel verschaft een versimpeld beeld van de warmtestromen, en kan hergebruikt worden voor nieuwe inzichten wanneer o.a. variërende luchtdruk- en temperatuurwaarden worden gekozen. Echter zullen wel eventuele klimatologische bijeffecten extra onderzocht moeten worden voor een juiste interpretatie ervan. De lijst met doelsoorten is op basis van enkele aannames en studies samengesteld, en is een leidraad voor vervolgstudies waarin biodiversiteit wordt opgenomen. Ook de bepaling van CO₂ reductie kan gebruikt worden voor vervolgonderzoek. Ten slotte is het economisch rekenmodel vanzelfsprekend over te nemen, aangezien het mogelijk is de input aan te passen (zie bijlage x).

Gezien de beperkte beschikbare informatie betreft groen dak kunnen er geen harde conclusies getrokken worden. Het verdient aanbeveling om de genoemde factoren betreffende energieverliezen en daadwerkelijke aantal vierkante meter plat dak (d.m.v. dakscan) nader te onderzoeken en te verfijnen. Meer onderzoek betreft groen dak is dan ook noodzakelijk.

6. Woord van dank

Bij het schrijven van dit verslag hebben de onderzoekers veel baat gehad bij de hulp van experts en werknemers van de gemeente Amsterdam. In het bijzonder gaat onze dank uit naar:

Dhr. A. Brouwer	- Dienst Ruimtelijke Ordening, gemeente Amsterdam
Pascal Hament	- Senior beleidsadviseur duurzaamheid
Dr. Ir C.M.J Jacobs	- Alterra, Wageningen
Drs. V.H.M. Kuypers	- Alterra, Wageningen
Alco van der Marel	- Coördinator Kwaliteit & Uitvoering Groen
Ir R.P.H. Snep	- Alterra, Wageningen
Tristan Simon	- Adviseur Arcadis, Arnhem
Bas Wijffels	- VHG, Vakgroepsecretaris groenvoorzieners

Ook gaat dank uit naar onze begeleiders:

Dr. K.F. Rijdsdijk, UVA
Lucas Rutting, Msc., UvA..

Door hulp van o.a. Tristan Simon, adviseur bij Arcadis, hadden wij veel gegevens tot onze beschikking wat betreft groene daken en de kosten en baten hiervan. [KFR1]

7. Literatuurlijst

- Arcadis (2008). Het rendement van groene daken in Rotterdam (2008) in opdracht van gemeente Rotterdam, *H20/24* p.23-25.
- Brenneisen, S. (2006). Space for urban wildlife: designing green roofs as habitats in Switzerland, *Urban habitats* 4 (1), p. 27-36.
- Buursink, E. (2008, Augustus 26). *Doelsoortenlijst gemeente Amsterdam*. Opgeroepen op November 15, 2011, van Website van gemeente Amsterdam:
<http://www.amsterdam.nl/toerisme-vrije-tijd/groen-natuur/flora-fauna/doelsoortenlijst/>
- Colla, S. R., Willis, E., Packer, L. (2009). Can green roofs provide habitat for urban bees (*Hymenoptera: Apidae*)?, *Cities and the environment* 2(1), art 4.
- Currie, B. A, Bass, B. (2008). Estimates of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE model, *Urban Ecosyst*, 11, p. 409-422.
- Gaffin S.R., Rosenzweig C., Parshall L., Beattie D., Berghage R., O'Keeffe G., Braman D. (2005). Energy balance modelling applied to a comparison of green and white roof cooling efficiency. Paper presented at the Third Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference. *Awards and Trade Show*, 4–6 May 2005, Washington, DC.
- Gebhart D.L., Johnson H.B., Mayeux H.S., Polley H.W. (1994). The CRP increases in soil organic carbon. *Journal of Soil and Water Conservation* 49, p. 488-492.
- Getter, K.L., Rowe, D.B. (2006). The Role of Extensive Green Roofs in Sustainable Development, *HortScience* 41(5), p. 1276-1285.
- Getter, K.L., Rowe, D.B., Robertson G.P., Gregg B.C., Andresen, J.A. (2009). Carbon Sequestration Potential of Extensive Green Roofs. *Environment Science & Technology* 43, p. 7564–7570.

- Hongming, H., Jim C.Y. (2010). Simulation of thermodynamic transmission in green roof ecosystem. *Ecological Modelling* 221, p. 2949-2958.
- Kadas, G. (2006). Rare invertebrates colonizing green roofs in London, *Urban habitats* 4 (1), p.66-86.
- Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut. (2009). *Jaaroverzicht neerslag en verdamping in Nederland*. De Bildt: Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
- Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (2011), *Jaarverslag 2010: 24 uur KNMI*, in opdracht van het Ministerie van Infrastructuur en Milieu.
- Kuypers, V.H.M., de Vries, E.A. (ongepubliceerd) Kennis voor Klimaat: De hittescan als instrument, achtergrondrapportage.
- Kuypers, V.H.M. (2011). Persoonlijke communicatie 02-12-2011.
- Montagu, K., A. Cowie A., Rawson B.R., Wilson & George B.H. (2003). Carbon sequestration predictor for land use change in inland areas of New South Wales – Background, user notes, assumptions and preliminary model testing. Version 2.0. *Research and development division*, State Forests of New South Wales, Sidney, p. 35.
- Mandema, F. S. (2008). Ecologische daken: daknatuur in de binnenstad van Groningen, *Rijksuniversiteit Groningen*.
- Mentens, J., Raes, D., & Hermy, M. (2006). Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and Urban Planning* , p. 217-226.
- Moerland, W. (2011). Ecologische waarden op drie groene daken in Rotterdam – een verkennende studie. *BSR-rapport 170, bureau Stadsnatuur Rotterdam*, Rotterdam.
- Niachou, A., Papakonstantinou, K., Santamouris, M., Tsangrassoulis, A., Mihalakakou, G., (2001). Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance – *Energy and Buildings* 33, p. 719-729.

- Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman R. R., Doshi, H., Dunett, N., Gaffin, S., Kööhler, M., Liu, K. K. Y., Rowe, B. (2007). Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions, and services, *American Institute of Biological Sciences*, 57 (10), p. 823-833.
- Ploeg, E., van der, Vries, E., de & Wanink, J. H. (2009). Nota uitwerking doelsoorten beleid, stenige biotopen stedelijk gebied, gemeente Groningen. Rapport 2009-038, *Koeman en Bijkerk bv*, Haren.
- Pouyat, V., Yesilonis I.D. & Nowak D.J. (2006). Carbon Storage by Urban Soils in the United States. *Journal of Environmental Quality* 35, p. 1566-1575.
- Sailor, D.J. (2008). A Green Roof Model for Building Energy Simulation Programs. *Energy and Building*, vol. 40, p. 1466-1478.
- Tsang S.W. & Ji C.Y. (2011). Game-theory approach for resident coalitions to allocate green-roof benefits. *Environment and Planning A 2011*, vol. 43, p. 363-377.
- Wolf, D., & Lundholm, J. T. (2008). Water uptake in green roof microcosms: effects of plant species and water availability. *Elsevier*, vol. 33 (2), p. 179-186.

Digitale Bronnen

- Buurtmonitor aangehaald op 31-11-2011 via http://www.oost.amsterdam.nl/wonen_en/buurtten-oost/
- Dakscan Maps Amsterdam, website aangehaald op 25-11-2011 via <http://www.dakscan.nl/main.php?cid=66>
- Emissierechten: prijs CO₂ , website aangehaald op 30-11-2011 via <http://www.emissierechten.nl/>
- IPS, (09-06-2010). Kopenhagen verplicht groendaken. Aangehaald op 02-10-2011 via <http://www.ipsnews.be/artikel/kopenhagen-verplicht-groendaken>

- Partij voor de Dieren (20-04-2011). Groene daken: Amsterdam blijft achter. Aangehaald op 02-10-2010 via <http://www.nieuwsuitamsterdam.nl/2011/04/groene-daken-amsterdam-blijft-achter>

Magazines en Brochures:

- AAGD (2005). Informatiebrochure 'Het Groene Dak van Amsterdam.
- Amsterdam Beslist Duurzaam – Duurzaamheidsprogramma 2011/2014, aangehaald via website gemeente Amsterdam: <http://www.amsterdam.nl/gemeente/organisatie-diensten/dro/duurzame-toekomst>
- REview : Special Dakscans (2008), Hoofdredactie: Saskia Goes. Maart 2008 relatiemagazine van Consolidated, Dakwacht en BetonRestore
- WATERgraafsmeer: regenwateroverlast. Gebaseerd op de studie 'Exploratory study of pluvial; flood impacts in Dutch urban areas' van Riel, W. Van (12-07-2011), aangehaald via <http://www.watergraafsmeer.org/images/sitedocuments/publicaties/studenten/2011%2007%2012%20wouter%20van%20riel%20regenwateroverlast.pdf>

Persoonlijke communicatie

- Brouwer
- Daalder
- De Jong (Daklab)
- Tristan Simon (Arcadis)

Appendix 1 : Lijst van doelsoorten

Soort	Latijnse naam	Klasse	Waarom
Gewone dwergvleermuis	<i>Mipistrellus pipistrellus</i>	Zoogdieren	Gebruikt huizen als dagschuilplek; Komt voor in stadsdelen met veel groen; Meer kruidenrijke begroeiing zorgt voor beter voedselaanbod; blijft hele jaar in de stad (Buursink, 2008).
Meervleermuis	<i>Myotis dasycneme</i>	Zoogdieren	Zeer zeldzaam in europa; schuilt in holle bomen wanneer alleen of in kleine groepjes; kraamkolonies schuilen in huizen; Meer kruidenrijke begroeiing zorgt voor beter voedselaanbod (Buursink, 2008).
Ruige dwergvleermuis	<i>Pipistrellus nathusii</i>	Zoogdieren	lijkt op gewone dwergvleermuis, maar groter; gaat in zomer weg; gebruikt holle bomen en wateroevers (Buursink, 2008).
Boerenzwaluw	<i>Hirundo rustica</i>	Vogels	Meer kruidenrijke begroeiing zorgt voor beter voedselaanbod (Buursink, 2008).
Gierzwaluw	<i>Apus apus</i>	Vogels	volledig afhankelijk van mens; mist nestingsmogelijkheden; Meer kruidenrijke begroeiing zorgt voor beter voedselaanbod (Buursink, 2008).
Huismus	<i>Passer domesticus</i>	Vogels	erg afhankelijk van mens; mist nestingsmogelijkheden; Meer kruidenrijke begroeiing zorgt voor beter voedselaanbod voor jongen (Buursink, 2008).
Ijsvogel		Vogels	Heeft rustige broedplek nodig

Kneu	<i>Carduelis cannabina</i>	Vogels	In de stad moet de soort het hebben van opgespoten terreinen, industriegebieden en weg- en spoorbermen; eet vooral zaden van kruidenrijke gebieden met verspreide bosschages en langs infrastructuur. (Buursink, 2008).
Zwartkopmeeuw	<i>Larus melanocephalus</i>	Vogels	Kunnen zich in kolonies vestigen [LR2] op daken, want ze moeten niet verstoord worden (Buursink, 2008).
Akkerhommel	<i>Bombus pascuorum</i>	Hommels	maakt nest boven grond in dichte laag planten
Groefbij	<i>Halictus spec.</i>	Bijen	Graaft nest in zandheuveld van 20-40 cm hoog
Zandbij	<i>Andrena spec.</i>	Bijen	Graaft nest in zandheuveld van 20-40 cm hoog
Bruin zandoogje	<i>Maniola jurtina</i>	Vlinders	wordt makkelijk aangetrokken, mits genoeg dakoppervlak en grassen
Hooibestje	<i>Coenonympha pamphilus</i>	Vlinders	wordt erg moeilijk aangetrokken, dus indicator voor hoge ecologische waarde van dak
Icarusblauwtje	<i>Polyommatus icarus</i>	Vlinders	wordt redelijk moeilijk aangetrokken, dus indicator voor redelijke ecologische waarde dak
Kleine vuurvinder	<i>Lycaena phlaeas</i>	Vlinders	wordt redelijk moeilijk aangetrokken, dus indicator voor redelijke ecologische waarde dak
Zwartsprietdikkopje	<i>Thymelicus lineola</i>	Vlinders	wordt redelijk moeilijk aangetrokken, dus indicator voor redelijke ecologische waarde dak

Appendix 2: Gekozen doelsoorten op groen dak Amsterdam Watergraafsmeer

Plant	Latijnse naam	Familie	Specifieke eigenschap	Hoogte	Dikte substraat	Vochtigheid	Standplaats	Zon/schaduw
Gewoon duizendblad	<i>Achillea millefolium</i>	Compositie nfamilie	In vlinderplanten top 50 (Mandema, 2008)	40-60 cm	7-12 cm	Vochtig- droog	Omgewerkte, grazige grond	Zonnig en schaduw
Schapenzuring	<i>Rumex acetosella</i>	Duizendkno op	Waardplant kleine vuurvlinder (Mandema, 2008)	10-60 cm	6 cm	droog	Zure, stikstofhoudende grond	zonnig
Rood zwenkgras	<i>Festuca rubra</i>	Grassenfami lie	Voedselplant voor de rupsen van het Bruin zandoogje en het Hooibeestje (Mandema, 2008)	15-90 cm	6 cm	Droog-nat	Zoet, brak of zilt	Zonnig, weinig schaduw
Gevinde kortsteel	<i>Brachypodium pinnatum</i>	Grassenfami lie	Waardplant voor Bruin zandoogje, Zwartsprietdikkopje en Hooibeestje (Mandema, 2008)	30-100 cm	7-12 cm	Matig vochtig	kalkgraslanden	zonnig
Kamgras	<i>Cynosurus cristatus</i>	Grassenfami lie	Waardplant voor Bruin zandoogje, Zwartsprietdikkopje en Hooibeestje (Mandema, 2008)	20-60 cm	7-12 cm	vochtig	Voedselrijke grond	zonnig
Breed fakkelgras	<i>Koeleria pyramidata</i>	Grassenfami lie	Waardplant voor Bruin zandoogje, Zwartsprietdikkopje en Hooibeestje (Mandema, 2008)	60-120 cm	7-12 cm	Matig droog	kalkgraslanden	zonnig
Smal fakkelgras	<i>Koeleria macrantha</i>	Grassenfami lie	Waardplant voor Bruin zandoogje, Zwartsprietdikkopje en Hooibeestje (Mandema, 2008)	20-30 cm	7-12 cm	droog	Open, kalkhoudende grond	zonnig
Muskuskaasjeskruid	<i>Malva moschata</i>	Kaasjeskruid familie	In vlinderplanten top 50 (Mandema, 2008)	60-70 cm	7-12 cm	vochtig	Voedselrijke, grazige grond	Zonnig en schaduw
Kluwenklokje	<i>Campanula glomerata</i>	Klokjesfamili e	Klokjes interessant voor bijen (specifiek Grote klokjebij) (Mandema, 2008)	20-30 cm	6 cm	vochtig	Kalkhoudende grond	Zonnig, weinig schaduw
Ruig klokje	<i>Campanula trachelium</i>	Klokjesfamili e	Klokjes interessant voor bijen (specifiek Grote klokjebij) (Mandema, 2008)	Tot 80 cm	7-12 cm	vochtig	Kalkhoudende grond	Zonnig en schaduw
Kruipend zenegroen	<i>Ajuga reptans</i>	Lipbloemfami lie	In vlinderplanten top 50 (Mandema, 2008)	5-15 cm	6 cm	Nat-matig vochtig	Voedselrijke grond	schaduwrijk
Slangenkruid	<i>Echium vulgare</i>	Ruwbladigen familie	In vlinderplanten top 50 (voedselplant Zwartsprietdikkopje) (Mandema, 2008)	60-100 cm	6 cm	droog	Kalkrijke, stikstofrijke, omgewerkte grond	Zonnig, weinig schaduw
Engels gras	<i>Ameria maritima</i>	Strandkruidfami lie	In vlinderplanten top 50 (Mandema, 2008)	15-25 cm	10-15 cm	droog	Grazige zandgrond	zonnig
Muurpeper	<i>Sedum acre</i>	Vetplantenfami lie	Zorgt voor extra vochtbeschikbaarheid voor andere planten in droge condities (Wolf & Lundholm, 2008)	5-10 cm	6 cm	droog	Matig voedselarme tot voedselrijke zandgrond	zonnig
Roze vetkruid	<i>Sedum spurium</i>	Vetplantenfami lie	Zorgt voor extra vochtbeschikbaarheid voor andere planten in droge condities (Wolf & Lundholm, 2008)	15 cm	6 cm	droog	Stenige plaatsen	zonnig

Tripmadam	<i>Sedum reflexum</i>	Vetplantenfamilie	Zorgt voor extra vochtbeschikbaarheid voor andere planten in droge condities (Wolf & Lundholm, 2008)	15-30 cm	6 cm	droog	Zandgrond en stenige plaatsen	zonnig
Gewone rolklaver	<i>Lotus corniculatus</i>	Vlinderbloemenfamilie	Waardplant en nectarplant voor het Icarusblauwtje (Mandema, 2008)	5-25 cm	6 cm	vochtig	Matig voedselrijke grond	

Appendix 3: Legenda variabelen onderdeel Rekenmodel

Symbol	Naam	Betekenis/standaard formule	Eenheid
Q_s	Sensible heat flux	warmte-uitwisseling door conductie en convectie	$\left(\frac{W}{m^2}\right)$
Q_L	Latent heat flux	warmte-uitwisseling door verdamping	$\left(\frac{W}{m^2}\right)$
Q_c	Warmteconductie	Warmte-uitwisseling door materiaal	$\left(\frac{W}{m^2}\right)$
SW	shortwave radiation	Radiatie energie	$\left(\frac{W}{m^2}\right)$
LW	Longwave radiation	Radiatie energie	$\left(\frac{W}{m^2}\right)$
ρ_{gem}	Dichtheid lucht		$\left(\frac{kg}{m^3}\right)$
C_{tc}	Bulk transfer coefficient	Ruwheid van een oppervlak	geen
C_p	Specific heat van de lucht	Warmtecapaciteit lucht bij gegeven luchtdruk	$\left(\frac{J}{kg \cdot K}\right)$
v_{wind}	windsnelheid	In omgeving/oppervlaktelaag vegetatie	$\left(\frac{m}{s}\right)$
T_{lucht}		Temperatuur lucht	(K)
$T_{vegetatie}$		Temperatuur van de vegetatielaag op het dak	(K)
T_{dak}		Temperatuur van de substraat- en daklaag	(K)
T_{binnen}		Temperatuur binnenin het pand	(K)
β	Bowen-ratio	Verhouding tussen de sensibele en latent heat	geen
γ	Psychrometrische constante		$\left(\frac{kPa}{K}\right)$
q	verzadigingsdampspanning	$0.6108 \cdot e^{\frac{17.27(T-273.15)}{T-35.85}}$	(kPa)
λ	verdampingsconstante	$\lambda = 1000 \cdot \{ 2501 - 2.361(T - 273,15) \}$	$\left(\frac{J}{kg}\right)$
ρ	Atmosferische druk	Op zeeniveau 101.325 kPa	(kPa)
$\mathcal{E}$		ratio molecuair gewicht van waterdamp/droge lucht	geen
K	warmtegeleiding		$\left(\frac{W}{m^2 K}\right)$
Z_{direct}	Zonnewarmte rechtstreeks		$\left(\frac{W}{m^2}\right)$
$Z_{diffusie}$	Zonnewarmte via verstrooid licht		$\left(\frac{W}{m^2}\right)$

α	Albedo	Weerkaatsingvermogen van een oppervlak	Geen
σ	Stefan Boltzmann constante	$5.67 \cdot 10^{-8}$	$\left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} \right)$
ε_s		Emissiecoëfficiënt van het dakoppervlak	geen

Appendix 4: Bronnen Financieel

Focus	Uitgangswaarden	Bron
Investeringskosten groen dak	€65/m ²	Gemeente Rotterdam
Onderhoudskosten groen dak	€1/m ²	Copijn daktuin & geveltuin
Investeringskosten bitumen dak	€31/m ²	Gemeente Rotterdam
Onderhoudskosten bitumen dak	€1,10/m ²	Copijn daktuin & geveltuin
Gemiddelde levensduur bitumen (standaard) dak	20 jaar	Aida Rotterdam
Gemiddelde levensduur groen dak	40 jaar	Aida Rotterdam
Gemiddelde gasprijs huishoudens	€0,58/m ³	Prijspeil 2011
Gemiddeld gasverbruik per m ²	16 m ³ /m ²	CenterNovem
Besparing gasverbruik per jaar door groen dak	2,5-5,0 m ³ /m ²	Woonhelpdesk 2010
Gemiddelde elektriciteitsprijs huishoudens	€0,22/kWh	Prijspeil 2011
Gemiddeld elektriciteitsverbruik kWh per m ²	85 kWh/m ²	CenterNovem
Besparing elektriciteitsverbruik door groen dak	50,66%	Rekenmodel Natuurkunde
Gemiddelde dakoppervlakte woning	60 m ²	VROM.nl
Vrijgekomen CO ₂ uitstoot door gasverbruik	1.825 kg/m ³	Milieubarometer
Vrijgekomen CO ₂ uitstoot door elektriciteit	0.455 kg/kWh	Milieubarometer
CO ₂ reductie door vermindering gasverbruik	6.84 kg/m ²	Berekend zie (1)
CO ₂ reductie door vegetatie van groen dak	Linda	
Vermeden kosten waterretentie	€350/m ²	Aanname gemaakt door Arcadis
Vermeden kosten waterzuivering	€0,28/m ²	Gemeente Rotterdam
Waterretentie door groen dak	0,006 m ³ /m ²	Resultaten IBA
Waterreductie groen dak	45%	Zie paragraaf 1.2.
Reductie geluidshinder t.o.v. standaard isolatie	3 dB(A)	www.zinco.nl
Waardering geluidshinder	€66,30/dB/woning/jaar	CE(2004) geactualiseerd voor 2010

(1) Gemiddelde gasbesparing door groen dak is 3,75 m³ per vierkante meter. Doordat per kubieke meter gas er 1,825 kg CO₂ uit wordt gestoten, is er sprake van een CO₂ reductie van 6.84 kg/m²

Appendix 5

Printscreen van het rekenkundig model; input is variabel

INPUT						Rekenkundig model Watergraafsmeer					
Algemene waarden		Specificatie	Waarde	Eenheden				Uitgangswaarden			
Gemiddelde gasprijs huishoudens			58	eurocent/m3					58 eurocent/m3		
Gemiddelde elektriciteitsprijs huishoudens			22	eurocent/kWh					22 eurocent/kWh		
Gemiddeld elektriciteitsverbruik kWh per m2			85	kWh/m2					85 kWh/m2		
Gemiddeld gasverbruik per m2			16	m3/m2					16 m3/m2		
Uitstoot CO2 door 1m3 gasverbruik			1,825	kg CO2/m3					1,825 kg CO2/m3		
Uitstoot CO2 door 1 kWh elektriciteit			0,455	kg CO2/kWh					0,455 kg CO2/kWh		
Gemiddelde levensduur groen dak			40	jaar					40 jaar		
Gemiddelde levensduur bitumen (standaard) dak			20	jaar					20 jaar		
Gemiddelde dakoppervlakte woning			60	m2					60 m2		
Besparing elektriciteitsverbruik door groen dak			0,05	%					0,05 %		
Besparing gasverbruik per jaar door groen dak			3,75	m3/m2					2,5-5,0 m3/m2		
CO2 reductie door vermindering gasverbruik			6,5	kg/m2					4,0-9,0 kg/m2		
Vermeden kosten waterretentie			350	euro/m2					350 euro/m2		
Vermeden kosten waterzuivering			28	eurocent/m2					28 eurocent/m2		
Externaliteiten		Specificatie	Waarde	Eenheden				Uitgangswaarden			
preventiekosten CO2		Koolstofdioxide	5	eurocent/kg					5 eurocent/kg		
Investeringskosten groen dak			65	euro/m2					65 euro/m2		
Onderhoudskosten groen dak			1	euro/m2					1 euro/m2		
Investeringskosten bitumen dak			31	euro/m2					31 euro/m2		
Onderhoudskosten bitumen dak			1,10	euro/m2					1,1 euro/m2		
CO2 reductie door vermindering gasverbruik			6,84	kg/m2					6,84 kg/m2		
Besparing elektriciteit door groen dak			0,05	%					0,05 %		
Besparing gas door groen dak			4	m3/m2					4 m3/m2		
Waterretentie door groen dak			0,01	m3/m2					0,006 m3/m2		
Waterreductie groen dak			52	%					52 %		
Reductie geluidshinder tov standaard isolatie			3	dB(A)					3 dB		
Waardering geluidshinder			66,30	€/dB/woning/jaar					66,30 €/dB/woning/jaar		

Appendix 6: Mindmap integratie discipline natuurkunde, biologie en economie

