GREEN ROOF integrated PHOTOVOLTAIC SYSTEM Versus CONVENTIONAL PHOTOVOLTAIC SYSTEM

Een theoretische en praktische benadering.

SCRIPTIE

D. Shadmanfar S.K.O Abraham-Reynolds Rotterdam, 2014

Hogeschool Rotterdam; Kenniscentrum Sustainable Solutions i.s.m. Zinco Benelux B.V.

Contactinformatie

Onderzoekers

Onderzoeksgroep:	PVGR – Photovoltaic Greenroof Research
E-mail:	researchpvgr@gmail.com
Naam	Abraham-Reynolds, Stephen
Studentnummer	0812437
E-mail	s.abraham.reynolds@gmail.com
Naam	Shadmanfar, Diyako
Studentnummer	0821032
E-mail	d.shadmanfar@gmail.com



Onderwijs

Onderwijsinstelling	Hogeschool Rotterdam
Studie	Bouwkunde, Bachelor
Studiejaar	2013-2014
Adres:	Instituut voor de Gebouwde Omgeving (IGO)
	G.J. de Jonghweg 4-6
	3015 GG Rotterdam
Eerste lezer	P.H.A.W. van Riel-Jacobs
E-mail	p.h.a.w.van.riel-jacobs@hr.nl



Tweede lezerC. van KranenburgE-mailc.van.kranenburg@hr.nl

Opdrachtgever & bedrijfsbegeleider

Naam opdrachtgever E-mail Adres:	dr.drs.ir. C.M. Ravesloot, christophmaria@ravesloot.nl Hogeschool Rotterdam, Kenniscentrum Sustainable Solutions Lectoraat: Innovatie Bouwproces & Duurzaamheid Heijplaatstraat 23 3089 JB Rotterdam
Naam bedrijfsbegeleider E-mail Adres:	Ing. P. Koop pkoop@zinco.nl ZinCo Benelux B.V. Lutkemeerweg 128

3029AD Amsterdam





Samenvatting

De combinatie van een begroeid dak met een PV-systeem wordt een GRiPV-systeem genoemd. Binnen dit onderzoek wordt een PV-systeem op een dak met zwarte bitumen of EPDM dakbedekking een "Traditioneel PV-systeem" genoemd.

De veronderstelling is dat de oppervlaktetemperatuur van het onderliggende dak in een GRiPV-systeem en traditioneel PV-systeem invloed heeft op de temperatuur (en daarmee de elektrische opbrengst) van PV-modulen. Er wordt gesuggereerd dat het lagere oppervlaktetemperatuur van een begroeid dak invloed heeft op de elektrische opbrengst van PV-modulen. De oppervlaktetemperatuur van een begroeid dak kan tot wel 40°C lager liggen dan een traditioneel zwart dak [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. De mate waarin een begroeid dak koeler is dan een traditioneel zwart dak is erg afhankelijk van verschillende omstandigheden. Voor opdrachtgevers is het van belang om inzicht te hebben in de economische, technische en esthetische gevolgen van de toepassing van een GRiPV-systeem ten opzichte van een traditioneel PV-systeem voor het dak. In voorgaande onderzoeken zijn pogingen gedaan om de voordelen en gevolgen van een GRiPV-systeem ten opzichte van een potentiele verhoging van de elektrische opbrengst binnen een bandbreedte van 4% tot 16% ten opzichte van traditionele PV systeem. In de onderzochte literatuur concluderen verschillende onderzoeken een verhoging van de elektrische opbrengst binnen een traditioneel PV-systeem. De verhoging bevindt zich in empirische onderzoeken in de bandbreedte van 4,3% tot 6%. De verschillende theoretische modellen plaatsen het verschil in opbrengst in de bandbreedte van 0,08% tot maximaal 8,3% [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7].

Uit de theoretische modellen blijkt dat de condities in het microklimaat bepalend zijn voor het mogelijk opbrengstverschil tussen een GRiPV-systeem en een traditioneel PV-systeem. Toch is er in de empirische onderzoeken niet gemeten in het microklimaat. Een theoretisch model gevalideerd door een meetopstelling ontbreekt. In de gepubliceerde onderzoeken wordt geen uniforme bepalingsmethode gehanteerd, waardoor het onduidelijk is in welke mate, samenstelling en klimatologische omstandigheden een GRiPV-systeem meer elektrische energie kan opleveren ten opzichte van een traditioneel PV-systeem. Dit maakt het moeilijk om een onderbouwde uitspraak te doen over de bandbreedte van het (mogelijke) opbrengstpercentage verschil tussen een GRiPV-systeem en een traditioneel PV-systeem. Er ontbreekt theoretisch inzicht in de energiebalans van een GRiPV-systeem gekoppeld aan praktijkmetingen. Het doel van dit onderzoek is om duidelijkheid te scheppen of en in welke mate de integratie van begroeide daken met PV-modulen (GRiPV-systeem) meerwaarde biedt ten opzichte van PV-modulen op zwarte daken (traditioneel PV-systeem) voor de elektrische opbrengst van de PV-module.

Het rapport is als volgt opgebouwd: hoofdstuk 1.0 tot 5.0 fungeren als inleiding voor de scriptie. Hier worden de aanleiding, probleemstelling, onderzoeksvragen en onderzoeksmethoden toegelicht. In het Theoretisch kader (hoofdstukken 6.0 tot 8.0) wordt het GRiPV-systeem verkend door de deelsystemen die het GRiPV-systeem opmaken te onderzoeken en te analyseren welke factoren invloed uitoefenen op de elektrische opbrengst van de PV-modulen en de thermische werking van begroeide daken. Ook wordt er gezocht naar methoden om de invloed van het onderliggend dakoppervlak op de temperatuur en opbrengst van PV-modulen te bepalen. De bijlagen zijn samengevoegd in een ander document, bijgevoegd met deze scriptie. Bijlage I betreft een rapport met betrekking tot de verkennende gevalstudies. Deze verkennende gevalstudies hebben inzicht gegeven in de werking en uitvoering van een GRiPV-systeem in de praktijk.

In Hoofdstuk 9.0 en 10.0 wordt beschreven hoe aan de hand van deze opgedane informatie het rekenkundig model is opgesteld en de meetopstelling is gerealiseerd. Om een vergelijking te maken tussen de invloeden van het onderliggend dak op de elektrische opbrengst, zijn de type PV-systemen gelijk aan elkaar. In Bijlage II bevindt zich de uitgebreide versie van het meetrapport, waarin dieper wordt ingegaan op de gehele meetopstelling met betrekking tot opbouw en resultaten. Het opgestelde rekenmodel bestaat uit een energie- en warmtebalans van een GRiPV-systeem en een traditioneel PV-systeem. De invoerwaarden voor dit rekenmodel zijn gebaseerd op aannames en zijn onderbouwd door empirische en theoretische onderzoeken. Bijlage III is bevat een processchema met de bijbehorende uitleg die het gebruik en de werking van het rekenkundig model moet verduidelijken. Ook bevat bijlage III een rapport waarin de opbouw van het volledige rekenmodel wordt uitgelegd. De inputdata voor het rekenkundig model is te vinden in bijlage IV.

In hoofdstuk 11.0 door middel van een gevoeligheidsanalyse met het opgestelde rekenkundig model de bandbreedte van het opbrengst verschil tussen een GRiPV- en traditioneel PV-systeem in drie statische klimaatscenario's berekend. Door verschillende waarden van individuele factoren in hetzelfde statische klimaatscenario in te voeren, wordt de mate van invloed van deze factoren op het elektrische opbrengstverschil tussen een GRiPV-systeem en traditioneel systeem inzichtelijk. Ook wordt van deze factoren hiermee tevens de afhankelijkheid van de klimaatomstandigheden inzichtelijk. In hoofdstuk 12.0 wordt onderzocht in hoeverre het samengestelde rekenmodel representatief is door middel van een validatie aan de hand van empirische gegevens van de meetopstelling. In de eindconclusie worden de antwoorden op de deelvragen nog een keer herhaald om uiteindelijk de hoofdvraag te beantwoorden. Ten slotte worden de resultaten aan de hand van de literatuur besproken en vergeleken.

Op basis van de gevoeligheidsanalyse kan geconcludeerd worden dat het toepassen van een GRiPV-systeem zorgt voor een verhoging van elektrische opbrengst, in vergelijking met een traditioneel PV-systeem, binnen een bandbreedte van **0,16% - 0,92%**. Uit de validatie van het rekenkundig model bleek dat er voor de berekende microklimaat temperaturen van het GRiPV-systeem een afwijking met een bandbreedte **van -8.81% tot 0.82%** voorkwam en voor het traditioneel PV-systeem een afwijking in de bandbreedte **van -6.00% tot 4.58%**. Het uiteindelijk berekende opbrengstverschil tussen een GRiPV-systeem en een begroeid dak ligt in de validatie **tussen de 0.99% en 0.06%**. De bandbreedte van het gemeten opbrengstverschil ligt **tussen de 0.00% en 0.01%**. Op basis van de resultaten van de gevoeligheidsanalyse en de praktijkmeting, uitgevoerd in dit onderzoek, kan geconcludeerd worden dat het combineren van een PV-systeem (2 PV-modulen) met een begroeid dak (25m²) niet tot een significante verhoging leidt ten opzichte van een vergelijkbaar traditioneel PV-systeem.

Voorwoord

Voor u ligt een scriptie geschreven ter afsluiting van de HBO Bachelor opleiding Bouwkunde aan de Hogeschool Rotterdam. De scriptie is het resultaat van een afstudeeropdracht welke ons heeft uitgedaagd om, naast de verkregen competenties en opgedane kennis van de afgelopen vier jaar toe te passen, ook nieuwe kennis en competenties te verwerven, bijvoorbeeld op het gebied van empirisch onderzoek.

Gedurende de studie hebben duurzame maatregelen en oplossingen in de gebouwde omgeving onze interesse gewekt en vanuit deze interesse hebben wij dit onderzoek gekozen. Zo heeft Diyako gekozen voor de minor/specialisatie "Duurzaam Integrale Bouwtechniek" en heeft Stephen meegewerkt aan het leerbedrijf Concept House CHIBB.

In dit onderzoek zijn de gevolgen voor de elektrische opbrengt van PV-modulen in de combinatie van een begroeid dak met PV-systeem (GRiPV-systeem) nader beschouwd. Deze scriptie is geschreven voor ieder die interesse heeft in de ontwikkeling van innovatieve dak technieken, waar meervoudig ruimtegebruik centraal staat. Het verslag geeft inzicht in het verzette werk gedurende onze afstudeerperiode. Er is onderzocht in welke mate specifieke factoren kunnen zorgen voor een verhoging van de elektrische opbrengst van GRiPV-systeem t.o.v. een traditioneel PV-systeem. Wij hopen dat de onderzoeksresultaten een positieve bijdrage kunnen leveren aan de ontwikkeling en toepassing van de GRiPV-systemen.

Wij danken in het bijzonder Christoph Maria Ravesloot en Peter Koop voor de begeleiding tijdens het onderzoek en voor het feit dat zij ons de mogelijkheid hebben gegeven om onszelf te kunnen uitdagen door binnen dit onderzoek een meetopstelling te kunnen realiseren. Tevens willen wij Harmen Riemens van ZinCo Benelux bedanken voor de fysieke ondersteuning tijdens het aanleggen van de meetopstelling en bedanken wij Van Der Tol en ZinCo voor het beschikbaar stellen van hun dak en een werkplaats t.b.v. de meetopstelling.

Priscilla van Riel-Jacobs zijn wij dankbaar voor haar kritische en komische noot, steun en begeleiding gedurende het onderzoek. Dhr. Cees van Kranenburg bedanken wij eveneens voor zijn kritische kijk op zaken als tweede lezer. Wij danken Matthijs Bourdréz en Els Aarts voor de kennismaking met meetopstellingen en mogelijkheid om een verkennende gevalstudie uit te voeren op de door hen gerealiseerde meetopstelling. Ook danken wij mvr. Wil Nicolaas, Directrice van de Willibrord-Milandbasischool te Bodegraven, voor het beschikbaar stellen van haar dak zodat wij de mogelijkheid hadden om een verkennende geval uit te voeren. In de beginfase van ons onderzoek hebben wij een aantal oriënterende interviews afgenomen ter verkenning van het onderwerp. Voor hun tijd willen wij graag bedanken: Nico Knipscheer, Arthur Hilgersom, Arno Albers en Rob Steltenpohl.

Verder danken wij ook alle docenten van de opleiding Bouwkunde die onze paden gekruist hebben en mede daarmee ons hebben gebracht waar we nu zijn.

Tot slot willen wij in het bijzonder onze ouders, broers en zussen bedanken voor alle steun die zij ons bieden. Zonder jullie zouden wij niet staan waar wij nu staan.

Diyako Shadmanfar & Stephen Abraham-Reynolds Rotterdam, April 2014

"Satisfaction lies in the effort, not in the attainment, full effort is full victory".

- Mahatma Gandhi

Inhoudsopgave

Conta	ictinformatie	I
Samenvatting		II
Voorw	Voorwoord	
Inleid	ing	VI
 Aanleiding Betrokken partijen 		VI
		VII
3.0	Probleemstelling en Onderzoeksvragen	VII
4.0	Afbakening	VIII
5.0	Onderzoeksmethode	VIII
Theor	retisch kader	1
6.0	Verkenning van het GRiPV-systeem	1
6.1	Het begroeid dak	1
6.2	Het PV-systeem	2
6.3	Voordelen en consequenties	3
6.4	Conclusie	4
7.0	Invloeduitoefenende factoren	5
7.1	Thermische werking van een begroeid dak	5
7.2	De elektrische opbrengst van een PV-systeem	7
7.3	Conclusie	10
8.0	Analyse onderzoeken met betrekking tot invloed GRiPV- systeem	11
8.1	Bepalingsmethode	15
Realis	satie Bepalingsmethoden	16
9.0	Ontleding en aanvulling rekenkundig model	16
10.0	Meetopstelling	23
10.1	1 Opbouw meetopstelling	23
10.3	2 Meetinstrumenten	24
Uitwe	erking Bepalingsmethoden	26
11.0	Gevoeligheidsanalyse	26
11.	1 Invoervariabelen ten behoeve gevoeligheidsanalyse	26
11.	2 Klimaatscenario`s	27
11.	3 Samenvattend per klimaatscenario	28
11.4	4 Conclusie	30
12.0	Validatie rekenmodel	31
12.	1 Resultaten	36
12.	2 Conclusie	39
GRiPV	/-system versus Conventional system	40
13.0	Eindconclusie	40
	Aanbevelingen vervolgonderzoek	41
	Discussie toepassing GRiPV-systemen	41
14.0	Literatuurlijst	42
15.0	Figuurlijst	45

INLEIDING

1.0 Aanleiding

Nederland is één van de meest dichtbevolkte landen ter wereld en zodoende is ruimte een schaars goed. Vooral de stedelijke gebieden staan de komende jaren voor een grote uitdaging te wachten. Door het dak te beschouwen als een 'tweede maaiveld' ontstaan er nieuwe en extra mogelijkheden. Het daklandschap kenmerkte zich voorheen vooral als onbenutte ruimte voor de plaatsing van klimaatinstallaties. Zelfs in de bestaande bebouwde omgeving leent het dak zich steeds meer voor allerlei oplossingen op het gebied van energiewinning, groen, water en warmtewinning. Er is veel bekend over de toepassing van PV-modulen op het dak en het toepassen van begroeide daken. PV-modulen leveren elektriciteit op en zijn tegenwoordig op korte termijn terug te verdienen [8, 9, 10]. Begroeide daken beschermen het onderliggende dak voor een groot deel tegen de weerselementen. Met als gevolg een duurzaam en groen daklandschap, een waterbergend vermogen, verlaging van de koellast in een gebouw en een levensduurverlenging van de dakbedekking [11, 12, 13]. Overheden hanteren zelfs een actief stimuleringsbeleid voor de duurzame oplossingen zoals PV-modulen en begroeide daken.

Nu wordt voornamelijk voor één enkele functie gekozen op het dak. Innovatieve inrichting van het daklandschap richt zich echter steeds meer op het mengen van verschillende functies en oplossingen [14]. Uit voorgaand onderzoeken is gebleken dat het combineren van begroeide daken en PV-modulen tot een GRiPV-systeem, kan leiden tot de volgende voordelen:

- De voordelen van begroeide daken en PV-modulen blijven behouden en worden gecombineerd [1, 2];
- Mogelijke waarde stijging van het dak per m², meervoudig gebruik van het dak [3];
- Vegetatiediversiteit is hoger, de schaduwwerking van de PV beschermt de vegetatie van het begroeid dak [2];
- Potentiele hogere opbrengst tot 16% van de PV-modulen, omdat de oppervlaktetemperatuur van een begroeide dak tot 40°C lager kan liggen dan bij traditionele daken [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7];

Naast de bovengenoemde voordelen heeft de aanleg van een GRiPV-systeem de volgende consequenties ten opzichte van een traditioneel PV-systeem:

- Extra gewicht op de constructie van het gebouw. Tot 50 kg/m² voor een traditioneel PV-systeem [8, 15] en minimaal 120 kg/m² voor een GRiPV-systeem [5, 16];
- Hogere onderhoudskosten, naast het PV-systeem [8, 15] dient ook het begroeid dak onderhouden te worden [12, 13, 17, 11].

Voor opdrachtgevers is het van belang om inzicht te hebben in de economische, technische en esthetische gevolgen van de toepassing van een GRiPV-systeem ten opzichte van een traditioneel PV-systeem voor het dak. Er zijn in voorgaande onderzoeken pogingen gedaan om de voordelen en consequenties van de toepassing van een GRiPV-systeem ten opzichte van een traditioneel PV-systeem in kaart te brengen. Desondanks is de potentiele hogere elektrische opbrengst van een GRiPV-systeem is niet voldoende gekwantificeerd om een onderbouwde uitspraak erover te maken. Het doel van dit onderzoek is om duidelijkheid te scheppen of en in welke mate de integratie van begroeide daken met PV-modulen (GRiPV-systeem) meerwaarde biedt ten opzichte van PV-modulen op zwarte daken (traditioneel PV-systeem).

2.0 Betrokken partijen



Dit onderzoek is onderdeel van het overkoepelend project Classificatie Technische Eigenschappen & Implementatie Begroeide Daken en wordt uitgevoerd in opdracht van het lectoraat Innovatie Bouwproces en Duurzaamheid van het kenniscentrum Sustainable Solutions RDM binnen de Hogeschool Rotterdam. Het lectoraat Innovatie Bouwproces en Duurzaamheid heeft als doel om de innovatieslagen van de bouwketen te verdiepen en te versnellen.

Project Classificatie Technische Eigenschappen & Implementatie Begroeide Daken

Het project Classificatie is gericht op versnelde invoering van grote oppervlakken begroeide daken in Nederlandse steden. Het overkoepelend onderzoek gebeurd in samenwerking met overheden, producenten en opdrachtgevers. De hoofdvraag die centraal staat is hoe een uniforme reken- en meetmethode voor technische specificaties van begroeide daken kan bijdragen aan versnelde invoering van begroeide daken in Nederland. Binnen het overkoepelend project lopen parallel aan elkaar verschillende onderzoeken naar de technische specificaties van begroeide daken.

ZinCo Benelux



ZinCo Benelux is gekoppeld aan het overkoepelend project Classificatie Begroeide daken en bieden binnen dit onderzoek bedrijfsbegeleiding en faciliteert de locatie voor een meetopstelling. ZinCo is marktleider in systeemoplossingen voor extensieve en intensieve dakbegroeiing. Met de bijdrage in het overkoepelende project wilt ZinCo samen met de dakbegroeiingsbranche innovatie stimuleren en het beeld van een begroeid dak als een investering onderbouwen.

3.0 Probleemstelling en Onderzoeksvragen

De mate waarin een begroeid dak koeler is dan een traditioneel zwart dak is erg afhankelijk van verschillende omstandigheden. Er wordt gesuggereerd dat het temperatuur verschil, dat op een zomerse dag kan oplopen tot 40 graden, tussen begroeide daken en traditionele zwarte daken invloed heeft op de elektrische opbrengst van PV-modulen op deze daken. Echter ontbreekt theoretisch inzicht in de energiebalans van een GRiPV-systeem gekoppeld aan praktijkmetingen. Dit maakt het op dit moment moeilijk om een onderbouwde uitspraak te doen over de bandbreedte van het (mogelijke) opbrengstpercentage verschil tussen een GRiPV-systeem en een traditioneel PV-systeem.

Met de volgende hoofdvraag en deelvragen zal de probleemstelling vanuit de theorie en de praktijk benaderd en opgelost worden.

Hoofdvraag:

"Wat is het verschil in elektrische opbrengst van GRiPV-systeem ten opzichte van een traditioneel PV-systeem in een Nederlandse zomersituatie?"

- 1) Uit welke deelsystemen is een GRiPV-systeem opgebouwd en welke voordelen en nadelen heeft het GRiPV-systeem?
- 2) Welke factoren kunnen bepalend zijn voor het mogelijke opbrengstverschil tussen GRiPV-systeem en traditioneel PV-systeem?
- 3) Welke methoden worden er gehanteerd om de invloed van het onderliggend, begroeid en traditioneel dak op de elektrische opbrengst van PV-modulen te bepalen?
- 4) Hoe kan aan de hand van de geanalyseerde informatie één rekenmodel gemaakt worden waarmee de warmtebalans van het onderliggende dak gekoppeld kan aan de elektrische opbrengst van een PVmodule?
- 5) Hoe kan aan de hand van de geanalyseerde informatie een meetopstelling gerealiseerd worden waarmee het opgestelde rekenkundig model gevalideerd kan worden?
- 6) Wat is de gevoeligheid van de factoren in het rekenkundig model?
- 7) In hoeverre komen de berekende waarden volgens het rekenkundig model overeen met de gemeten waarden van de meetopstelling?

4.0 Afbakening

Om een vergelijking te kunnen maken tussen de invloeden van het onderliggend dak op de elektrische opbrengst, zijn de type PV-systemen gelijk aan elkaar gesteld. De PV-modulen in beide systemen in dit onderzoek zijn van het type kristallijn silicium en zijn geplaatst op een open ondersteuningsconstructie (PV-frame). Dit houdt in dat de wind achter de PV-module kan stromen en er ook zoninstraling op de begroeiing onder de module kan vallen. Binnen dit onderzoek is het onderliggende dak in een GRiPV-systeem een extensief begroeid plat dak met een gewicht van minimaal 120 kg/m². In Figuur 1 zijn de twee type PV-systemen schematisch weergeven. Het onderliggende dak in het traditioneel PV- systeem betreft een zwarte bitumen of EPDM dakbedekking. Grinddaken, daken met een witte of grijze kleur worden hierbij buiten beschouwing gelaten.



Figuur 1: Schematische weergave GRIPV-systeem

5.0 Onderzoeksmethode

Om tot de beantwoording van de hoofdvraag te komen is het onderzoek onderverdeeld in een theoretisch gedeelte en een praktijkgedeelte. In Figuur 2 is weergeven welke stappen er ondernomen worden per onderzoeksfase.



Theoretisch kader

Het theoretisch kader heeft als doel het beschrijven van de achterliggende theorie en komt voor uit kwalitatief onderzoek. Om een beeld te krijgen van de toepassing van en het mogelijke opbrengstverschil tussen GRiPVsystemen en traditionele PV-systemen is in de oriënterende fase gezocht naar wetenschappelijke artikelen, productinformatie van leveranciers en producenten, referentieprojecten omtrent het onderwerp. Ook zijn er een drietal verkennende gevalstudies uitgevoerd, de bevindingen van deze studies zijn terug te lezen in Bijlage I. In de analyse fase is inzicht opgedaan over de invloedoefenende factoren en methoden voor het bepalen van het (mogelijke) opbrengstverschil tussen een GRiPV-systeem en traditioneel PV-systeem door de het analyseren van de vergaarde informatie.

Meetopstelling

In eerste instantie zou het opgestelde rekenkundig model gevalideerd worden met praktijk meetgegevens van een al gerealiseerd GRiPV-systeem. Tijdens de oriëntatie fase is er daarom gezocht naar bruikbare meetgegevens, welk uiteindelijk niet verkregen zijn. Met als gevolg dat tijdens het onderzoek is gekozen om zelf een meetopstelling te bouwen en de resulterende meetgegevens te gebruiken voor de validatie van het opgestelde rekenkundig model. De scope van het onderzoek is vergroot en de planning is aangepast met: de werkvoorbereiding (6 weken) en bouw van de meetopstelling (2 weken) en de meetperiode (4 weken). De meetopstelling wordt kort toegelicht in hoofdstuk 10.0 en is in uitgebreide vorm te vinden in Bijlage II.

Rekenkundig model

Aan de hand van het theoretisch kader is een rekenkundig model opgesteld van de energiebalans van een GRiPVsysteem en een traditionele PV-systeem. Met het rekenkundig model is het mogelijk om de elektrische opbrengst van een GRiPV-systeem en een traditionele PV-systeem in verschillende klimaatscenario`s te berekenen en te vergelijken. In Bijlage III is een processchema bijgevoegd, waarmee de werking van het rekenkundig model verduidelijkt wordt. De opbouw van het rekenkundig model wordt in kort uitgelegd in hoofdstuk 10.0 en is in totale vorm te vinden in Bijlage III.

Gevoeligheidsanalyse

Dit onderzoek heeft als doel cijfermatig inzicht te bieden in de bandbreedte van het (mogelijke) opbrengstverschil percentage tussen een GRiPV-systeem en een traditioneel PV-systeem. Om de theoretische bandbreedte te bepalen zal het (mogelijke) opbrengstverschil percentage in verschillende scenario's, gevormd in het theoretische kader, bepaalt worden doormiddel van de uitkomsten van de gevoeligheidsanalyse.

De gevoeligheidsanalyse wordt uitgevoerd door middel van het opgestelde rekenkundig model van de energiebalans van een GRiPV-systeem en een traditioneel PV-systeem. Deze methode geeft inzicht in de mate van invloed van de factoren in de elektrische opbrengst van een GRiPV-systeem en traditioneel systeem. Er zal worden bekeken wat het effect is van een verandering van één factor op de uitkomst van de elektrische opbrengst.

Validatie rekenkundig model

Met de meetgegevens van de meetopstelling kan het opgestelde rekenkundig model gevalideerd worden en kan waarde gehecht worden aan de uitkomsten van de gevoeligheidsanalyse. Vervolgens kan de bandbreedte van het (mogelijke) opbrengstverschil tussen een GRiPV-systeem en een traditioneel PV-systeem bepaald worden. Met empirische gegevens van de energiebalans van een GRiPV-systeem kan het opgestelde rekenkundig model gevalideerd worden. Tot slot ontstaat hiermee een duidelijk beeld van de mate van invloed van een begroeid dak op een PV-systeem in de Nederlandse zomersituatie.

THEORETISCH KADER

Het theoretisch kader heeft als doel het beschrijven van de achterliggende theorie. Met het theoretisch kader wordt het mogelijk om een rekenkundig model op te stellen en om een meetopstelling te ontwerpen en realiseren. In dit gedeelte van het rapport wordt het GRiPV-systeem verkend door de deelsystemen die het GRiPV-systeem opmaken te onderzoeken en te analyseren welke factoren uiteindelijk invloed uitoefenen op de elektrische opbrengst van de PV-modulen.

6.0 Verkenning van het GRiPV-systeem

Dit hoofdstuk dient ter introductie en verkenning van het GRiPV-systeem. Hier zal de definiëring van een GRiPVsysteem worden gegeven. Naast de definiëring wordt de globale algemene opbouw van de twee deelsystemen die het GRiPV-systeem vormen beschreven.

Het GRiPV-systeem en zijn kwaliteiten

Witmer gebruikt in 2010 als eerst de term Green Roof integrated Photovoltaics (GRiPVsysteem) om de integratie tussen begroeide daken en pv-modulen te benoemen. [6]

Het doel van een GRiPV-systeem is de ruimte op het dak beter te benutten door middel van meervoudig gebruik van het dak [14]. Deze combinatie van een begroeid dak met pvmodulen moet de voordelen van beide systemen versterken. [6, 14, 7, 3].

Het combineren van begroeide daken met PV-modulen zou moeten leiden tot:

- Hogere biodiversiteit, door de schaduwwerking van de PV op dakbegroeiing [1, 2]
- Hogere waardestijging van het dak per m² ten opzichte van een traditioneel PV-systeem [3]
- Potentieel hogere energie opwekking (tot 16%) [6, 14, 7, 3, 1, 2]
- Meervoudig gebruik van het dak [14]

Binnen het GRiPV-systeem kunnen allerlei type PV-modulen en type begroeide daken toegepast en gecombineerd worden. Sinds de eerste toepassing van PV-modulen op begroeide daken zijn er ook verschillende systemen ontworpen en verder ontwikkeld. In dit hoofdstuk volgt een uitleg over deze twee deelsystemen.

6.1 Het begroeid dak

De onderstaande lagen (tevens ook weergeven in Figuur 4) vormen de basis voor een begroeid dak [13, 18]. Afhankelijk van het type begroeid dak (en leverancier) kunnen ook andere lagen toegevoegd worden.

De begroeiingslaag, ook wel de vegetatielaag genoemd, is de daadwerkelijke beplanting op het dak, deze kan bestaat uit verschillende soorten mossen, sedums en grassen [13, 18].

Onder de begroeiingslaag zit de substraatlaag. Het substraat vormt de voedingsbodem voor de dakbegroeiing en is opgebouwd uit organisch of anorganisch materiaal. In de substraatlaag kan water worden opgeslagen om voedsel beschikbaar te houden voor de vegetatie [13, 18].

De drainagelaag zorgt er hoofdzakelijk voor dat het water vertraagd afgevoerd kan worden. De drainagelaag is, in veel gevallen, tevens ook in staat water te bufferen [13, 18]. De beschermlaag heeft als doel de dakbedekking te beschermen tegen mechanische beschadigingen tijdens uitvoering en bescherming tegen doordrukking door het gewicht van de begroeid dakopbouw [13, 18].

De wortelwerende laag moet voorkomen dat de wortels van de vegetatie de dakconstructie doordringen en beschadigd. [13, 18]

De waterkerende laag dient te voorkomen dat water in de constructie komt. Een waterkerende laag is veelal aanwezig op bestaande daken, hier zijn vaak niet-wortelwerende waterkerende lagen aanwezig. De waterkerende laag is de bovenste laag van het dakbedekkingssysteem die het begroeide dak draagt. [13, 18]

Figuur 3: Voorbeeld van een GRiPV-systeem

Figuur 4: Opbouw lagen extensief begroeid dak





6.2 Het PV-systeem

De functie van een PV-systeem is het omzetten van zonnestraling naar elektriciteit. Een PV-systeem bestaat uit PV-module(n), bekabeling, omvormer(s), verdeelkast en teruglopende elektriciteitsmeter, [15]. In Figuur 5 is een schematische weergave van een PV-systeem te zien.





PV-modulen zijn in verschillende typen, materialen en afmetingen te verkrijgen. Een PV-module bestaat vaak uit een ijzerarme glasplaat, een beschermde laag met daarin een serieschakeling van 36 tot 72 PV-cellen in een aluminium frame. Een PV-module is meestal opgebouwd uit een aantal lagen, dit is weergeven in Figuur 6.



Figuur 6: Opbouw PV-module

Aluminium frame,
 Waterdichte afdichting, meestal siliconenrubber,
 IJzerarme glasplaat,
 EVA of Tedlar (PVF),
 PV-cel (gemaakt van een halfgeleider materiaal),
 Afdichting aan de onderzijde, meestal siliconenkit.

De PV-cellen zijn gemaakt van een halfgeleidermateriaal, in de meeste gevallen silicium, die de energie van zonlicht direct omzet in elektrische energie. De PV-cellen worden geplaatst in een laag EVA (Ethyl-Vinyl-Acetaat) of PVF(polyvinylfluoride) en daarmee ontstaat een PV-laminaat. Deze laag beschermd de PV-cellen van invloeden van buitenaf en zorgt voor de elektrische isolatie. Om de ontstane "PV-laminaat" wordt een aluminium lijst om het geheel geplaatst voor de montage van het paneel.

De meest toegepaste typen PV-modulen zijn gemaakt van kristallijnsilicium, daarna volgen amorf silicium modulen. Via de bekabeling gaat de opgewekte energie van de PV-module naar de omvormer. De omvormer (ookwel inverter) vervult in een PV-systeem een centrale functie:

- Omzetten van gelijkstroom van de modulen naar (bruikbaar) wisselstroom,
- Het in MPP (maximaal vermogenspunt) bedrijven van de modulen,
- Afschakelen als er problemen zijn op het net,
- Bewaking en monitoring van het systeem.

Vanuit de omvormer gaat de wisselstroom naar de verdeelkast. In de verdeelkast wordt het PV-systeem beveiligd doormiddel van zekeringen en aarding, ook wordt de opgewekte elektriciteit verdeel over de elektrische groepen binnen een gebouw. De elektriciteitsmeter meet het elektriciteitsverbruik binnen een gebouw. Bij toepassing van PV-modulen moeten elektriciteitsmeters worden toegepast die ook terug kunnen tellen, indien stroom geleverd wordt aan het elektriciteitsnet [8, 9].

In Figuur 7 zijn de bevestigingsmethoden voor zowel traditionele PV-systemen en GRiPV-systemen schematisch weergeven. Het dak dient altijd getoetst te worden op sterkte, stijfheid en windbelasting conform NEN1991-1-4 en het PV-systeem conform NVN/NEN7250 [15, 9]. De PV-modulen kunnen zowel mechanisch bevestigd worden aan de onderconstructie van het dak of met een gewicht geballast worden op het dak. Bij een mechanische bevestiging loopt de verankering door de waterdichte lagen. Dit heeft tot gevolg dat de waterdichtheid van de dakbedekking meer aandacht vereist. [15] Bij het toepassen van een geballast PV-systeem wordt de waterdichtheid van het dak niet aangetast omdat het PV-frame op het dak geplaatst word. Het ballasten van de frames in een traditioneel PV-systeem kan door middel van grind of tegels. Bij toepassing van een GRiPV-systeem is het tevens ook mogelijk het substraat van de dakbegroeiing als ballast te gebruiken voor de PV-frames [15].



Figuur 7: Bevestigingswijzen PV-modulen

- I. Geballast PV-systeem (traditioneel): Geballast met behulp van een gewicht
- II. Mechanisch bevestigd aan dakconstructie (traditioneel): bevestigd aan de dakconstructie
- III. Geballast PV-systeem (GRiPV): Geballast door middel van het substraat
- IV Mechanisch bevestigd aan dakconstructie (GRiPV): bevestigd aan de dakconstructie

6.3 Voordelen en consequenties

Het toepassen van elk systeem heeft zowel voor- en nadelen. Producenten en leveranciers suggereren dat bij het combineren van begroeide daken en PV-modulen de voordelen van beide deelsystemen behouden blijven. In Tabel 1 zijn de voordelen van begroeide daken en PV-modulen weergeven.

,	
Voordelen van begroeide daken:	Voordelen van PV-modulen:
Geluidsisolatie [13]	Duurzame energie opwekking [10]
Verlenging van de levensduur van de onderliggende	Onderhoudsarm [10]
dakbedekking. [13]	
Zuiveren de lucht door fijnstof te binden en zuurstof te	Relatieve korte terugverdientijd [10]
produceren. [13]	"In 2013 is dit voor consumenten 8 tot 10 jaar"
Hebben de mogelijkheid om water te bufferen. [13]	
Verhogen de biodiversiteit op het dak. [13, 1]	
Verhoging van het thermisch comfort en kan voor een lagere	
koellast voor het gebouw zorgen. [13]	
Een mogelijke oplossing voor de vermindering van het Urban	
Heat Island-effect. [13]	
Een positief effect op de gezondheid van de mens (Healing	
Enviroment) [13]	

Tabel 1: Overzicht van alle voordelen van de deelsystemen

De toepassing van een GRiPV-systeem heeft echter ook consequenties waar rekening mee gehouden dient te worden in de bouwkundige uitwerking. De combinatie van een begroeid dak met PV-modulen voegt een relatief groot gewicht (min 120 kg/m²) toe. Het gewicht van een extensief begroeid dak zorgt voor extra gewicht van 30 tot 150 kg/m² ten opzichte van een traditioneel PV-systeem [11, 12]. In bepaalde gevallen zal de bestaande constructie van een gebouw versterkt moeten worden voor er een GRiPV-systeem geplaatst kan worden.

Het GRiPV-systeem vereist, net als vrijwel elk andere toepassing, onderhoud. Het benodigde onderhoud aan begroeide daken varieert sterk en hangt niet alleen af van het type begroeid dak, maar vooral ook aan de keuze van de beplanting. Voor extensief begroeide daken wordt aangeraden één à twee maal per jaar onderhoud te plegen op het begroeid dak. Als dit niet gedaan wordt, dan kan het begroeid dak binnen een aantal jaar in slechte staat gaan verkeren [13, 18]. Voor PV-modulen wordt aangeraden per half jaar onderhoud te plegen [15]. Het onderhoud van zowel de PV-modulen en het begroeid dak in een GRiPV-systeem kunnen op dezelfde momenten uitgevoerd worden.

De voordelen van begroeide daken zijn vooral gericht op het publieke belang. Het zuiveren van de lucht, waterbuffering, reducering hittestress in de stad; zijn allemaal voordelen die vooral positief effect hebben de omgeving waarin zij zich bevinden. De voordelen die PV-modulen zijn vooral gericht op de eigenaar van het gebouw. Het opwekken van energie en de relatieve korte terugverdientijd maken het kostentechnisch zeer aantrekkelijk voor een gebouweigenaar om een PV-systeem toe te passen. Het toepassen van een GRiPV-systeem zorgt ervoor dat er een bijdrage wordt geleverd aan een gezonder klimaat en leefmilieu, maar ook een besparing op energiekosten.

6.4 Conclusie

Onder het Green Roof integrated Photovoltaics-systeem (GRiPV-systeem) valt de integratie van een begroeid dak met een PV-module. Begroeide daken en PV-modulen concurreren nu vooral met elkaar voor de beschikbare ruimte op het dak. Het combineren van een begroeide dak met PV-modulen combineert ook de voordelen van beide losse systemen en leidt mogelijk naar verhoging van de energieopbrengst van de PV-modulen.

Het combineren van begroeide daken met PV-modulen zou moeten leiden tot:

- Meervoudig gebruik van het dak vanwege toepassen en combineren van begroeid dak en PV-modulen [14]
- Een hogere waardestijging van het dak per m² ten opzichte van een traditioneel PV-systeem [3]
- Hogere biodiversiteit, door de schaduwwerking van de PV op dakbegroeiing [1, 2]
- Potentieel hogere energie opwekking [6, 14, 7, 3, 1, 2]

Om tot een onderbouwde afweging te komen over de toepassing van een GRiPV-systeem, dienen de voor- en nadelen zorgvuldig te worden onderzocht en dienen er concrete cijfers met betrekking tot de gevolgen van de temperatuur van het onderliggend dak op de energieopbrengst van een PV-module beschikbaar te zijn. Het is belangrijk om duidelijkheid te krijgen in welke samenstelling of situatie een GRiPV-systeem meer elektrische energie oplevert ten opzichte van een traditioneel PV-systeem.

Nu de overige voordelen en consequenties van een GRiPV-systeem in kaart zijn gebracht, is het van belang om te kijken wat er in de literatuur precies over thermische werking van begroeide daken en elektrische opbrengst van PV-systemen.

7.0 Invloeduitoefenende factoren

In dit hoofdstuk worden de factoren die volgens de literatuur bepalend zijn voor het thermische werking van een begroeid dak en elektrische opbrengst van PV-module uiteengezet. De factoren bepalen welke situaties gunstig en/of ongunstig zijn voor het mogelijk opbrengstverschil tussen GRiPV-systeem en een traditioneel PV-systeem. Dit hoofdstuk bepaalt welke factoren berekend moeten worden in het rekenkundig model en gemeten in de meetopstelling om de bandbreedte van de mogelijke opbrengstverhoging vast te stellen.

7.1 Thermische werking van een begroeid dak

De veronderstelling is dat de oppervlaktetemperatuur van het onderliggende dak in het GRIPV-systeem en traditioneel PV-systeem invloed heeft op de temperatuur van de PV-modulen. De thermische werking van een begroeid dak kan ervoor zorgen dat de oppervlaktetemperatuur van het dak veel lager ligt ten opzichte van traditionele daken. In dit paragraaf worden de factoren weerlegd die bepalend zijn voor het thermisch effect van een begroeid dak.



Figuur 8: Temperatuur van de dakbedekking gedurende een warme dag in La Rochelle [27]

Er zijn meerdere empirische onderzoeken en modelleringsstudies van verschillende grootten en onderzoeksopzetten verricht naar de thermische werking van begroeide daken in verschillende klimaatzones en steden [19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28]. Uit deze onderzoeken blijkt dat het toepassen van een begroeid dak onder de juiste omstandigheden in de zomer vanwege zijn thermische werking een veel lager oppervlakte temperatuur kan hebben t.o.v. een traditioneel zwart dak. Dit komt doordat de

invloed van klimatologische omstandigheden (zonnestraling, relatieve luchtvochtigheid en wind) op de dakbedekking aanzienlijk gereduceerd kan worden door het toepassen van een begroeid dak. Dit kan resulteren in een temperatuurverschil van 40° C tussen een begroeid dak en een traditioneel dak, zoals weergeven in Figuur 8.

De thermische werking van begroeide daken is erg afhankelijk van weersomstandigheden [29], maar ook van de fysieke eigenschappen van de lagen van het begroeide dak, zoals thermische en stralingseigenschappen, vochtbalans en de type vegetatie. Al deze eigenschappen zijn tevens ook onderling afhankelijk van elkaar.

De thermische weerstand, dichtheid, massa en stralingseigenschappen variëren met het niveau van de vochtbalans van het substraat. De vochtbalans (hoeveelheid water in het substraat) van het substraat is weer op zijn beurt afhankelijk van het evapotranspiratie-proces (het verdampen en transpireren van water).

Evapotranspiratie

Voor het evapotranspiratie-proces wordt er energie onttrokken uit de omgeving. Evapotranspiratie is een combinatie van verdamping en transpiratie van vocht in het substraat en de begroeiing. Het water uit het substraat wordt opgenomen door de begroeiing en via de huidjesmondjes op de bladeren verdampt. De hoeveelheid neerslag, de drainagecapaciteit van een begroeid dak en het vochtgehalte in het substraat zijn bepalend voor de vochtbalans en dus voor de mate van evapotranspiratie op een begroeid dak. Die op zijn beurt weer afhankelijk is van de type vegetatie, de Leaf Area Index, hoogte beplanting en de bedekkingsgraad van de begroeiing en klimaatomstandigheden [21]. Evapotranspiratie zorgt ervoor dat het begroeid dak zijn warmte kwijt kan en is het belangrijkste element in de thermische werking van het begroeid dak.

Er zijn meerdere empirische studies gedaan naar het effect van de vochtbalans en evapotranspiratie op de temperaturen van een begroeid dak. Djedjig [21], Feller [22], Feng [23] en Lazzarin [26] concluderen dat evapotranspiratie zorgt voor 52% tot 60% van het totale warmteverlies van een begroeid dak. Hierdoor blijft de oppervlaktetemperatuur op een begroeid dak lager, in vergelijking tot een traditioneel dak.

Vochtbalans substraat

Uit het gevalideerde model van Djedjig [21] blijkt dat de vochtbalans van het substraat bepalend is voor de maximale temperatuur van het substraat. De vochtbalans wordt direct beïnvloedt door evapotranspiratie. Djedjig verbindt de temperaturen van het begroeid dak aan verschillende substraatvocht-gehaltes. Uit Figuur 9 is af te lezen dat de maximale oppervlaktetemperatuur niet boven de 50 °C komt bij een vochtgehalte van 10% en dat de temperatuur niet boven de 35 °C komt bij een vochtgehalte van 50%. De oppervlaktetemperatuur van het begroeid dak is zelfs lager met de omgevingsluchttemperatuur bij een hogere bodemvochtigheidsgraad.



Figuur 9: Vergelijking van substraat oppervlakte temperatuur Tg tot de lucht temperatuur Ta voor de verschillende

Beplanting

Een hogere beplantingsdichtheid (Leaf Area Index) betekent een lagere temperatuur in de substraatlaag. De vegetatielaag fungeert dan als een 'isolatiedeken' om het onderliggend substraat te beschermen tegen temperatuur invloeden [27]. De dichtheid van de beplanting heeft ook gevolgen voor de substraattemperatuur waar een groot verschil in temperatuur ontstaat naarmate de beplanting dichter wordt. De invloed die de begroeiingsdichtheid uitoefent is af te lezen Figuur 10 en Figuur 11.







Figuur 10: Vergelijking van substraat-temperaturen met een variatie in begroeiing dichtheid van 10 tot 75% [27].

Thermische Massa

Uit Figuur 8 (zie pagina 5) is op te maken dat een begroeid dak een veel stabielere temperatuur zal behouden gedurende de dag en nacht dan een traditioneel dak onder andere vanwege de thermische massa van het substraat. De thermische massa van een begroeid dak geeft de capaciteit aan voor het opslaan en afstaan van warmte [24]. De thermische massa wordt ook beïnvloed door de vochtbalans van het substraat en een hoger vocht gehalte betekend ook een hoger warmtecapaciteit [21]. De thermische capaciteit van het materiaal is het product van de dichtheid, volume en soortelijke warmte van een materiaal. Hoe hoger de zogenoemde thermisch massa van het substraat is, hoe langzamer de temperatuur op een dak zal stijgen en dalen.

7.2 De elektrische opbrengst van een PV-systeem

De energieopbrengst van de PV-modulen in een GRiPV-systeem en een traditioneel PV-systeem is afhankelijk van allerlei factoren. Dit hoofdstuk is om inzicht te krijgen in welke factoren bepalend zijn voor de energieopbrengst van PV-modulen. PV-modulen zetten zoninstraling om in elektriciteit. De totale opgewekte elektrische opbrengst van het PV-systeem is dan ook direct afhankelijk van de hoeveelheid zonne-instraling, het rendement van de PV-module en de verliezen van het totale PV-systeem. Deze factoren zijn weer afhankelijk van de omgeving, het klimaat en het ontwerp van het PV-systeem. [30].

Rendement PV-modulen

Het elektrisch rendement (η) van een PV-module is de verhouding tussen het vermogen van de cel en de hoeveelheid geleverde zoninstraling. Het rendement van PV-cellen is tevens ook gevoelig voor hoge celtemperaturen en variaties in de sterkte en spectrum van de invallende zonnestraling. Om een accurate vergelijking te maken tussen PV-modulen op verschillende momenten en locaties mogelijk maken is een standaard lichtspectrum en stralingssterke gedefinieerd in Standaard Test Condities (STC). Het rendement van een PVmodule wordt getest onder de STC om het Wattpiek-vermogen (het vermogen die de module maximaal kan leveren) vast te stellen.

De Standaard Test Condities zijn de volgende:

- Loodrecht op de module invallend licht met een intensiteit van 1000W/m²
- PV-cel temperatuur van 25°C
- Lichtspectrum zoals vastgelegd in de norm IEC 60904-3. Dit spectrum wordt aangeduid met AM 1.5 ofwel Airmass 1.5

Zoninstraling: Hoeveelheid

De belangrijkste factor voor bepaling van de elektrische opbrengst van een PV-installatie is de hoeveelheid invallende (korte golf) zoninstraling (uitgedrukt in kWh/m²) op de PVcellen. In de praktijk varieert de sterkte van het invallende licht op de PV-module en is deze sterkte afhankelijk van verschillende factoren.

De straling die het aardoppervlak rechtstreeks bereikt, noemen we directe straling. In Nederland valt directe straling in onder een bepaalde hoek ten opzichte van het aardoppervlak Wolken hebben een grote invloed op de hoeveelheid zonnestraling die het aardoppervlak bereikt. Maar ook gassen in de atmosfeer als zuurstof, kooldioxide, ozon, stikstof, waterdamp en vaste deeltjes (stof, roet) verzwakken de zonnestraling (zoals weergeven in Figuur 12).



Figuur 12: De inkomende zonnestraling wordt geabsorbeerd, verstrooid, gereflecteerd en uitgezonden.

De straling die via verstrooiing van gassen in de atmosfeer en reflectie op het aardoppervlak wordt ontvangen, heet diffuse straling. Dit is een verzwakte straling doordat de gassen in de atmosfeer energie van de zonnestraling kunnen opnemen (absorptie) of de zonnestralen kunnen verstrooien. De som van directe en diffuse straling wordt globale straling genoemd. Doordat de bewolking van plaats tot plaats kan variëren kunnen er aanzienlijke verschillen optreden in de zonnestraling aan het aardoppervlak [31].

De hoeveelheid straling die de oppervlakte bereikt kan dus variëren. De dagelijkse en jaarlijkse standen van de zon zijn te voorspellen, maar de invloed van de minder voorspelbare weersomstandigheden (zoals wolkbedekking) is groot. De jaarlijkse hoeveelheid instraling is niet overal ter wereld gelijk, ook binnen Nederland zijn er verschillen. Figuur 13 geeft de verdeling van de hoeveelheid globale instraling in Nederland voor een gemiddeld jaar weer.

Langjarig gemiddelde 1981-2010



Figuur 14: Gemiddelde jaarlijkse hoeveelheid globale instraling 1981-2010, KNMI



Figuur 13: Efficiëntie PV-modulen naar aanleiding oriëntatie en Helling

Zoninstraling: Oriëntatie en Helling

In Figuur 14 is een roos weergeven waarin op basis van de windorientatie de mate van efficientie van de elektrische productie weergeeft. Het invallende vermogen op de PV-module is niet alleen afhankelijk van de sterkte van het zonlicht, maar ook van de hoek tussen de module en de zon. In praktijk veranderd de hoek tussen de zon en de PV-module continue met als gevolg dat de vermogensdichtheid op de PV-module lager is dan die van het zonlicht. De vermogensdichtheid (W/m²) op een oppervlakte is gelijk aan de vermogensdichtheid van het zonlicht wanneer de PV-module en het zonlicht loodrecht op elkaar staan. In andere woorden, het invallende vermogen op de PV-module is maximaal wanneer het zonlicht er rechtstreeks op valt.

De PV-module kan gemonteerd worden met een specifieke oriëntatie en helling om over het hele jaar een maximale energiedichtheid van de zon te kunnen ontvangen [31]. In Nederland ligt de ideale oriëntatie van modulen op het zuiden, met een hellingshoek van 36° ten opzichte van het horizontale vlak. Een afwijking van 10° à 20° geeft echter een minimaal verlies ten opzichte van het maximum vermogen. De oriëntatie en helling zijn de enige factoren die door men bepaald en beïnvloed kan worden [31, 15].

PV-cel temperatuur

De operationele temperatuur wordt bepaald door: meteorologische omstandigheden, de configuratie van het systeem, thermische karakteristieken van de module materialen, de geometrische afmetingen en elektrische karakteristieken van de module [32, 33, 34, 30]. Deze factoren bepalen de grootte van de warmtestromen: conductie, convectie, radiatie en opgewekte elektrische stroom in en rond de PV-module [30].

Kristallijn-siliciumcellen produceren namelijk een hogere spanning als de temperatuur daalt en omgekeerd verliezen deze cellen spanning bij hoge temperaturen. Het gevolg wordt in Figuur 15 weergegeven. De optredende temperatuureffecten zijn het gevolg van een



van een zonnecel.

karakteristieke eigenschap van op kristallijn-silicium gebaseerde modulen Omdat de geleidbaarheid van halfgeleiders bij temperatuurstijgingen toeneemt (de elektronen worden mobieler), wordt het makkelijker voor

elektronen om gaten elders in het materiaal weer op te vullen. Doordat dit de elektrische balans in de cel verbetert, valt het elektrische veld bij de grenslaag weg, waardoor de ladingen niet meer goed gescheiden kunnen blijven. Het resultaat is een dalende spanning tussen de twee lagen. De typische temperatuur coëfficiënten voor de openklemspanning, de kortsluitstroom en de maximumpowerpoint (MPP) voor de verschillende soorten PV-modulen zijn weergegeven in Tabel 2:

Typische Temperatuur coëfficiënt	V _{oc} [%/°C]	I _{sc} [%/°C]	P _{mpp} [%/°C]
Kristallijn silicium (mono/poly)	-0,35	+0,06	-0,45
Amorf silicium	-0,33 tot -0,35	+0.08 tot +0,1	-0,20 tot -0,24

Tabel 2: Temperatuurcoëfficienten per type PV-module (handboek Zonne-energie, 2012)

In Figuur 16 wordt met behulp van een grafiek weergeven in welke mate de efficiëntie van een PV-module af neemt, wanneer de moduletemperatuur toeneemt. Op een zomerse onbewolkte dag kan de PV-cel temperatuur van open frame-systemen gemakkelijk boven 60 °C bereiken [35]. De PV-cellen van kristallijnsilicium PV-modulen verliezen boven de 25°C voor elke graad 0,45%. De hoge temperatuur kan PV-module productiviteit verlagen met maximaal 25%.



Het verschil tussen de PV-module temperatuur en de omgevingslucht temperatuur is voornamelijk afhankelijk van de zoninstraling en de windsnelheid [34]. Koehl nam in zijn onderzoek een wind koelend effect van 15 tot 20 °C waar, bij windsnelheden van 10 m/s en een

Figuur 16: Relatie tussen module-efficiëntie en moduletemperatuur

zoninstraling van circa 1000 W/m² [34]. In Nederland betekent dit voor een open frame systeem met kristallijn silicium modulen in Midden- en Oost- Nederland een elektrisch opbrengstverlies van ongeveer 3% op jaarbasis. Langs de kust is dit slecht 0%-0,5% op jaarbasis, vanwege de verhoogde windsnelheden, die de panelen koelen. Gemiddeld worden temperatuur-verliezen tussen 0 tot 6% aangenomen. [15]

Systeemverliezen

In elk PV-systeem zijn er naast temperatuurverliezen ook overige optredende systeemverliezen. Tijdens het ontwerpen van een PV-systeem is het van belang om hier rekening mee te houden om tot een optimale opbrengst van het PV-systeem te komen. Daarnaast is het in dit onderzoek van belang om de temperatuurverliezen te onderscheiden van de overige systeemverliezen. In Tabel 3 zijn de verschillende systeemverliezen en de bijbehorende procentuele mate van invloed weergeven (Tabel 3 loopt door op volgende pagina).

Beschrijving	Toelichting
Lage	Voor kristallijn silicium modules is het energieverlies in Nederland door lage
instralingverliezen	instralingsverliezen ongeveer 2,5 - 4,5% op jaarbasis. [15]
Beschaduwing	Door het PV-systeem in het MPP te bedrijven worden dan alle individuele PV-modulen in
	hun MPP bedreven en dus optimaal benut. Bij beschaduwing kunnen niet alle modulen
	tegelijkertijd in hun individuele MPP belast worden. Er treedt dan op het niveau van
	individuele modules een mismatch op tussen het MPP en het belastingpunt. Dit betekent
	dat er op module niveau en systeemniveau een energieverlies optreedt. [15]
Reflectieverliezen en	Reflectieverliezen ontstaan doordat de afdekplaat van het PV-module een deel van de
spectrale verliezen	opvallende straling reflecteert. Deze verliezen worden aangenomen op 3 - 4%. [15]
Weerstandsverliezen	Het verlies in de DC-bekabeling is afhankelijk van de lengte van de bekabeling (elektrische
in de bekabeling	weerstand) en de hoeveelheid stroom door de bekabeling. De regel is om deze ohms
	verliezen in vermogen < 1% te houden. [15]
Omvormerverliezen	De omvormer zet de gelijkstroom om in wisselstroom. Het rendement van dat
	conversieproces is afhankelijk van het ingangsvermogen. Bij lage vermogens is het
	conversierendement relatief laag. Omvormer verliezen worden gemiddeld aangenomen op
	5%. [15]

Tabel 3: Overzicht systeemverliezen van PV-systemen, Handboek Zonne-energie [15]

7.3 Conclusie

Om de bandbreedte van de mogelijke opbrengstverhoging vast te stellen zijn de factoren die volgens de literatuur bepalend zijn voor het thermische werking van een begroeid dak en elektrische opbrengst van PV-module in dit hoofdstuk uiteengezet.

De factoren die het meeste invloed uitoefenen op de thermische werking van een begroeid dak zijn onder te verdelen in de weersomstandigheden en fysieke eigenschappen van de lagen van het begroeide dak.

De weersomstandigheden zijn:

- Buitenluchttemperatuur
- Luchtdruk

- Relatieve Luchtvochtigheid
- Windsnelheid

De fysieke eigenschappen van de lagen van het begroeide dak zijn [21, 29]:

- Thermische massa
- Evapotranspiratie proces
- Leaf Area Index
- Bedekkingsgraad van de begroeiing
- dak zijn [21, 29]:
- Vochtbalans van het substraat
- Type vegetatie
- Hoogte beplanting

Al deze eigenschappen zijn, naast afhankelijk van de weersomstandigheden, tevens ook onderling afhankelijk van elkaar. Het substraat zorgt voor aanzienlijk meer thermische massa in een begroeid dak dan een traditioneel dak. Hoe hoger de thermische massa van een begroeid dak, hoe meer warmte er nodig is om het dak 1°C op te warmen. De thermische massa varieert met de niveau van de vochtbalans van het substraat. De vochtbalans van het substraat is weer op zijn beurt afhankelijk van de hoeveelheid neerslag, de drainagecapaciteit van een begroeid dak en evapotranspiratieproces. Evapotranspiratie is het belangrijkste element in de thermische werking van een begroeid dak. Evapotranspiratie zorgt voor 52% tot 60% van het totale warmteverlies, het koelend effect, van een begroeid dak [21, 23, 26]. Naast de vochtbalans van het substraat is de mate van evapotranspiratie ook weer afhankelijk van de type vegetatie, de Leaf Area Index, hoogte beplanting, de bedekkingsgraad van de begroeiing en de weersomstandigheden [21]. PV-modulen zetten zonnestraling om in elektriciteit.

De totale opgewekte elektrische opbrengst van het PV-systeem is dan ook direct afhankelijk van de volgende factoren :

- Zoninstraling: Hoeveelheid

- Rendement van PV-module
- Zoninstraling: Oriëntatie en helling
- Temperatuur van PV-cellen in de PV-module
- Verliezen in het totale PV-systeem

De oriëntatie en helling van PV-modulen ten opzichte van de zon hebben grote invloed op het rendement van PVmodulen. De oriëntatie en helling worden bepaald door het ontwerp en zijn niet afhankelijk van natuurkundige processen. Het elektrisch rendement (η) van een PV-module is de verhouding tussen het vermogen van de cel en de hoeveelheid geleverde zoninstraling. Het rendement van PV-cellen is gevoelig voor variaties in de sterkte en het spectrum van de invallende zonnestraling en de operationele PV-celtemperatuur.

De operationele PV-celtemperatuur wordt bepaalt door [32, 33, 34, 30]:

- Meteorologische omstandigheden Elektrische karakteristieken van de module
- Configuratie van het systeem,

De optredende temperatuureffecten zijn het gevolg van een karakteristieke eigenschap van kristallijn-silicium PVmodulen, een hoge PV-celtemperatuur (elke graad boven de 25°C) verlaagt de energieopbrengst 0,45% /°C. Gemiddeld worden temperatuur-verliezen tussen 0 tot 6% aangenomen. [15] Het verschil tussen de PV-module temperatuur en de omgevingslucht temperatuur is voornamelijk afhankelijk van de zoninstraling en de windsnelheid [34]. Koehl nam in zijn onderzoek een wind koelend effect van 15 tot 20 °C waar, bij windsnel-heden van 10 m/s en een zoninstraling van circa 1000 W/m² [34]. De bovenstaande factoren bepalen in welke situaties gunstig en/of ongunstig zijn voor het mogelijk opbrengstverschil tussen GRiPV-systeem en een traditioneel PVsysteem. Met deze invloedhebbende factoren moet berekend worden in het rekenkundig model en gemeten worden in de meetopstelling. In het volgende hoofdstuk zal het rekenkundig model samengesteld worden.

8.0 Analyse onderzoeken met betrekking tot invloed GRiPVsysteem

In de literatuur worden verschillende methodes gehanteerd om de invloed van het onderliggend dakoppervlak en de opbrengst van PV-modulen in een GRiPV- en traditioneel systeem te bepalen en te vergelijken. De bepalingsmethodes zijn onder te verdelen in natuurkundige modellen en empirische meetopstellingen.

Onderzoek van Koehler

Wetenschappelijk onderzoek naar de integratie van en begroeid daken en PV-modulen begon in 2002 met een verkenning van Koehler, Wiartalla en Feige [1]. In het vervolgonderzoek werd met behulp van een meetopstelling data met betrekking tot een GRiPV-systeem en een traditioneel PV-systeem gemeten over circa 5 jaar [2].

In de meetopstelling zijn twee varianten van zowel een traditioneel PV-systeem als een GRiPV-systeem opgenomen. De eerste variant betrof een GRiPV-systeem een set open PV-frames die relatief hoog boven de het intensief begroeide dak waren gemonteerd. De tweede variant was ook een open systeem, maar was voorzien van een zonnetracker, waarmee de module met de optimale positie van de zon meedraaide. De traditionele PV opstelling bestond uit een BiPV-systeem (Building intergrated Photovoltiac systeem) en open PV-frame op het (traditionele) bitumineuze dak. De toegepaste systemen in het onderzoek zijn niet volledig gelijk aan elkaar (zie Figuur 17). Het is de vraag of de resultaten van de twee type daken direct met elkaar te vergelijken zijn, vanwege de andere



meetopstelling van Koehler (2002)

omstandigheden waarin de PV-modulen zich bevinden. Koehler et al. concluderen dat deze eerste verkenning naar de combinatie van begroeide daken met PV-modulen een positieve effect van een gemiddelde opbrengstverhoging hadden van 6%. Koehler et al. beschrijven de resultaten als volgt: "De efficiëntie van PVmodulen is afhankelijk van verschillende factoren. De thermische werking van een begroeid dak maakt deel uit van de invloedhebbende factoren. Gedetailleerde kennis van PV-technologie en begroeide daken is benodigd. Het zal goed zijn om deze onderzoeken voort te zetten net als het krijgen van resultaten op andere onderzoek locaties om de resultaten te controleren." [2]. De meetopstelling van Koehler bevatte twee erg verschillende frameopstellingen. In hoeverre het onderliggende intensief begroeide dak verantwoordelijk is voor het opbrengst percentage verschil van 6% en niet door het verschil in de frame opstellingen, is onbekend. Het is onduidelijk welke andere factoren of effecten invloed hebben gehad op het gemeten opbrengstverschil. Ook is onduidelijk binnen welke bandbreedte dit opbrengstverschil zit.

Onderzoek van Scherba

Op basis van de bevindingen van Koehler [1, 2] en het model van Sailor [36] is Scherba [37] onderzoek gaan doen naar het effect van grootschalig toepassing GRIPV-systemen op de zomerse hittestress van steden. Het door Sailor opgestelde model van energiebalans van een begroeide dak is bedoeld voor gebouw energieprestatie programma's. Scherba merkt op dat in stedelijke gebieden de afgifte van latent warmte gereduceerd is en de afgifte van voelbare warmte toeneemt. Dit betekent dat de luchttemperatuur in stedelijke omgevingen hoger liggen in zomer vanwege de afwezigheid van groen en water in vergelijking tot landelijke gebieden (Hittestress).

Het onderzoek van Scherba heeft als doel om de relatieve gevolgen van bepaalde type dakoppervlakken op het binnenklimaat in een stad in kaart te brengen. Er is dan ook niet onderzocht welke gevolgen de combinatie heeft voor de elektrische opbrengst ten opzichte van een traditioneel systeem. In Figuur 18 is schematisch weergeven welke factoren binnen stedelijke (Urban) en landelijke (Rural) gebieden invloed uitoefenen op de energiebalans van de onderzochte systemen. De albedo waarden van de omgeving



Figuur 18: Schematisch weergave van de energiebalans stedelijke (Urban) en landelijke (Rural) gebieden.

bepalen mede de hoeveelheid gereflecteerde straling. De terreinruwheid bepaalt in belangrijke mate de windsnelheid.

Onderzoek ZinCo GmbH

In 2010 publiceerde ZinCo een verslag over een GRiPV-systeem meetopstelling in Duitsland [38]. De meetopstelling bestaat uit drie identieke PV-modulen die op dezelfde locatie waren geïnstalleerd en met dezelfde oriëntatie en helling. In Figuur 19 is de meetopstelling weergeven. Module 1 en 2 zijn geïnstalleerd op een bitumen waterdicht membraan (één op een laag en de andere op een hoog frame). Daarnaast is Module 3 geïnstalleerd op een extensief begroeide dak en op een hoog montageframe. In totaal meten 27 sensoren continu onder meer de celtemperatuur aan de onderzijde van elke module. Tegelijkertijd meet een weerstation de temperatuur van de lucht, windsnelheid en instraling.



Figuur 19: ZinCo meetopstelling, 2010

Meetwaarden zijn geanalyseerd om het effect van het begroeid dak op de PV-modulen uit te drukken in cijfers, Het resultaat is over een hele jaar door berekend en er is een gemiddeld verschil van 8°C tussen de temperatuur van module 3 en die van de modules 1 en 2 geconstateerd. In Figuur 20 zijn de resultaten van een van de meetdagen weergeven. In het verslag wordt concludeert dat: "met een temperatuur coëfficiënt van 0,5%/°K, het zonnepaneel op het begroeide dak een hoger rendement van 0,5%/°K x 8K = 4% genereerd ten opzichte van een zonnepaneel op een bitumen dak." [38]

Aan de hand van het rapport van de meetopstelling van ZinCo is het moeilijk in te schatten of het berekende opbrengst verschil van 4% representatief is voor de werkelijkheid. Voor een onderbouwde uitkomst is voor deze berekening de gemiddelde celtemperatuur van de PV-module nodig. Aan de hand van het rapport is het moeilijk in te schatten of de gemeten temperatuur waarden representatief zijn voor de gemiddelde temperatuur van het gemeten PV-module. Het is ook onduidelijk wat de modulen daadwerkelijk hebben opgebracht tijdens meetperiode. Daarnaast geeft het verslag geen inzicht in de minimale en maximale temperatuurverschil tussen de PV-modulen in het onderzoek. En daarmee blijft bandbreedte van het opbrengstverschil onbekend.



Onderzoek van Hui



Hui [3] heeft in zijn onderzoek het model van Sailor [36] toegepast en gecombineerd met de energiebalans van een PV-modulen en tevens een praktijkmeting van één dag uitgevoerd in Hong Kong. In Figuur 21 is de meetopstelling van Hui weergegeven. In deze praktijkmeting zijn twee

identieke PV-modulen gebruikt die op een even identieke open frame gemonteerd zijn. Eén PV-module is gemonteerd op een extensief begroeide dak met sedumplanten. De tweede PV-module is gemonteerd op een traditionele dakbedekking. Het theoretisch model toonde een maximaal verschil van 8,3% tussen de opbrengst van een GRiPV-systeem en een traditioneel PV-systeem, in voordeel van het GRiPV-systeem. Het GRiPV-systeem leverde in de praktijkmeting (van één dag) 4,3% meer energie op dan het traditionele PV-systeem. Hui stelt verder dat het "cooling effect" gemaximaliseerd kan worden als het ontwerp optimaal is ingericht. De PV-module en de vegetatie moeten zo dicht mogelijk bij elkaar geplaatst worden zodat het evapotranspiratieproces¹ van het begroeid dak direct de PV-modulen kunnen beïnvloeden. Het theoretische model van Sailor [36] voor het rekenprogramma Energyplus was niet beschikbaar tijdens dit onderzoek. Dit heeft als gevolg dat de theoretische methode gebruikt door Scherba [37] en Hui [3] niet gebruikt kunnen worden in dit onderzoek. De praktijkmeting verricht door Hui geeft geen duidelijk beeld van percentageverschil in verschillende klimatologische omstandigheden.

Onderzoek van Witmer

Witmer [6, 7] heeft een model van een energiebalans van een GRIPV-system ontwikkeld. Het model combineert de interacties van elke van de oppervlaktes en koppelt deze met een microklimaat controle volume met als resultaat een inzichtelijk thermisch model voor (dynamische) simulatie. Volgens Witmer geeft het model, ontwikkeld in deze studie, genoeg inzicht in de eigenschappen en prestaties van een GRIPV-systeem om ontwerp en economische beslissingen te maken voor Green Roof integrated Photovoltaic-systemen [7].

Het thermisch BIPV model maakt het mogelijk de interacties tussen het microklimaat (de lucht tussen de achterzijde van de PV-module en het onderliggende dak), de PV-module, het begroeide dak en de omgevingslucht te modelleren. Hierbij moet worden vermeldt dat een thermisch BIPV model uitgaat van een natuurkundig gesloten systeem, gebruikelijk in een gebouw geïntegreerd PV-systeem. In Figuur 23 is een voorbeeld weergeven van een schematische weergave rekenkundig BiPV-model.

In Figuur 22 is een grafiek weergeven waarin de efficiëntie van PV-modulen in verschillende steden in de V.S. weergeven is. De blauwe staven staan voor de vergelijking van een GRiPV-systeem met en Traditioneel PV-systeem. Hieruit blijkt dat de opbrengstverhoging zich in vrijwel elke stad rond de 0,05% bevindt. Dit is een interessante bevinding, omdat in dit onderzoek er voor het eerst een opbrengstverhoging lager dan 4% is vastgelegd. Uit het nog op te stellen rekenkundig model zal blijken hoe het GRiPV-systeem in Nederland (theoretisch) zal presteren.





¹ Evapotranspiratie is het verdampen en transpireren van vocht in het begroeid dak. Dit proces wordt verder uitgelegd in hoofdstuk 7.1



Figuur 23: Energiebalans Witmer, 2011

Onderzoek van Aarts

In Amsterdam heeft Els Aarts (een studente van de Universiteit van Amserdam) een meetopstelling gerealiseerd waarbij een GRiPV-systeem wordt vergeleken met een traditioneel PV-systeem. De meetopstelling is weergeven in Figuur 24.



Figuur 24: Meetopstelling Solarsedum

De meetopstelling bestaat uit twee meetplots, een GRiPV-systeem en traditioneel PV-systeem op een plat dak. Het begroeide dak van het GRiPV-systeem bestaat uit vegetatietegels. Het traditionele PV-systeem is geplaats op een zwart/grijs bitumendakbedekking.

Het PV-systeem van beide plots bestaat uit 2 polykristallijn PV-modulen, elk aangesloten op een Enphase M215 micro-omvormer en gemonteerd op een SolarSedum frame. Het Solarsedum-frame is een open blikken frame op hardhouten blokken. Het frame wordt geballast met betonnen tegels die op het frame en de houtenblokken liggen. De achterzijde van de PV-modulen is open, waardoor de wind vrij achter een module kan stromen.

Voor de meting van de algemene luchttemperatuur en relatieve luchtvochtigheid op beide plots per plot is gebruikt gemaakt van een HMP45AC Vaisala sensor. De windsnelheid is op beide plots per plot gemeten met een A100R cupanemometer van Vector Instruments. Voor de meting van de inkomende straling en gereflecteerde straling van het onderliggend dakoppervlak is op beide plots per plot gebruikt gemaakt van Campbell Science Q7.1 albedometers. Er zijn vier CS P107 temperatuursensoren gebruikt voor de meting van de oppervlaktetemperaturen van het begroeide dak, de bitumineuze dakbedekking, de PV-module van het begroeide plot en het traditionele plot. Deze meetopstelling is geplaatst in een omgeving waarbij het onduidelijk is hoeveel invloed externe factoren hebben op de meting. Metingen in een vrij veld zijn eenvoudiger te analyseren, omdat factoren die de meting beïnvloeden (die wel aanwezig zijn in en gebouwde omgeving) worden uitgesloten. In het geval van deze meetopstelling zorgt de gevel van een zwart kantoor gebouw voor verstoring van de meting. De locatie van een meetopstelling kan de uitkomsten van een meting beïnvloeden. Uit de meetopstelling op het dak van Solarsedum zijn vooral lessen getrokken in: hoe en op welke plaatsen gemeten moet worden, waar je rekening mee moet houden tijdens het meten en zijn verstorende factoren inzichtelijk gemaakt.

8.1 Bepalingsmethode

In de onderzoeken komt een duidelijk beeld naar voren: onder de juiste omstandigheden zorgt het begroeide dak voor een verhoging van de elektrische opbrengst van een PV-systeem ten opzichte van een traditioneel dakopbouw. Het opbrengstverschil zou het gevolg zijn van het temperatuurverschil tussen de PV-modulen in het GRiPV-systeem en het traditionele PV-systeem, en dit temperatuurverschil zou weer het gevolg zijn van temperatuurverschil tussen een begroeid dak en een traditioneel dak. De bepalingsmethodes zijn onder te verdelen in natuurkundige modellen en empirische meetopstellingen. De theoretische modellen plaatsen het verschil in opbrengst in de bandbreedte van 0,08% tot maximaal 8,3% en de empirische onderzoeken in een bandbreedte van 4,3% tot 6%, in voordeel van een GRiPV-systeem.

De theoretische modellen gaan ervan uit dat de omstandigheden en warmtestromen in het microklimaat bepalend zijn voor de invloed van de temperatuur van het onderliggende dak op de temperatuur van de PVmodule. In Figuur 25 zijn de uitgangspunten van dit scenario geschetst. De buitenlucht temperatuur bedraagt 30 °C. In het traditionele PV-systeem zorgt de hoge temperatuur (70 °C) van het traditioneel dak voor een positieve convectieve warmte stroom naar het microklimaat. In het GRiPV-systeem zorgt de lage temperatuur van het begroeide dak (28 °C) voor een negatieve convectieve warmte naar het microklimaat. Het temperatuurverschil (42 °C) tussen het traditionele en begroeide dak zou volgens de literatuur ook resulteren in een opbrengstverschil. Uit de theoretische modellen blijkt dat de condities in het microklimaat bepalend zijn voor het mogelijk opbrengstverschil tussen een GRiPV-systeem en een traditioneel PV-systeem. Toch is er in de empirische onderzoeken niet gemeten in het microklimaat. Een theoretisch model gevalideerd door een meetopstelling ontbreekt. Daarnaast worden in de gepubliceerde resultaten geen uniforme bepalingsmethode gehanteerd dit maakt het vergelijken van de onderzoeken erg moeilijk. In de empirische onderzoeken is het niet duidelijk welke andere factoren of effecten invloed hebben gehad op het gemeten opbrengsten en temperatuurwaarden. De factoren die zorgen voor verschillende resultaten zijn te onderscheiden in;

Opbouw meetopstelling

- Begroeid dak type, aantal m² en opbouw;
- Beplantingstype: (beplantingsdichtheid, LAI, albedo en emissiviteit);
- Aantal, type en plaatsing PV-modulen: (hoogte, helling en oriëntatie);
- Configuratie PV-systeem:
 (open/gesloten opstelling, type omvormer en bekabeling);
- Meetperiode en- duur;
- Plaatsing en nauwkeurigheid toegepaste sensoren.

Klimaatomstandigheden

- Geografische locatie
 - (stedelijk en landelijk);
- Regenintensiteit;
- Zonintensiteit op het horizontale en het hellende PV-module vlak;
- Lucht- en grondtemperatuur;
- Relatieve luchtvochtigheid;
- Windsnelheid en richting;
- Direct of indirect zonlicht.

Het blijft dus nog onduidelijk in welke omstandigheden het temperatuurverschil tussen het begroeide dak en het traditionele dak ook kan zorgen voor een temperatuurverschil tussen de microklimaten (Tm) en de PV-modulen (Tpv) van beide systemen en daarmee uiteindelijk de elektrische opbrengst van een GRiPV-systeem t.o.v. een traditioneel PV-systeem kan verhogen. In de volgende hoofstukken wordt uiteengezet hoe het rekenkundig model is opgesteld en de meetopstelling is gerealiseerd waarmee vastgesteld kan worden in welke mate, samenstelling en klimatologische omstandigheden een GRiPV-systeem een hogere elektrische energieopbrengst kan leveren ten opzichte van een traditioneel PV-systeem.



Figuur 25: Uitgangspunten van het opbrengstverschil tussen het GRiPV-systeem en traditioneel PV-systeem.

REALISATIE BEPALINGSMETHODEN

In dit gedeelte van de scriptie zal met behulp van de opgedane kennis van het theoretisch kader, weergegeven worden hoe de bepalingsmethoden (rekenkundig model en meetopstelling) opgebouwd en gerealiseerd zijn.

9.0 Ontleding en aanvulling rekenkundig model

In dit hoofdstuk richten wij ons op de energiebalans van een GRIPV-systeem en van een traditioneel PV-systeem. Met de energiebalansen is het mogelijk de toekomstige elektrische opbrengst van een PV-module te berekenen en daarin ook rekening houden met de invloed hebbende factoren, de technische eigenschappen en opbouw van het onderliggende dak, extensief begroeide en traditioneel zwarte dak en klimaatomstandigheden. Het doel van het rekenkundig model is om de bandbreedte van de mogelijke opbrengst verschil tussen een GRiPV- en traditioneel systeem in statische klimaatscenario's te berekenen. Zoals geconcludeerd in het voorgaand hoofdstuk, zal het op te stellen rekenkundig model bestaan uit een combinatie van het rekenmodel van Witmer met een aanvulling van de warmtedoorgangcoëfficienten van Djedjig.

In dit hoofdstuk zal de gebruikte warmtebalans van elke laag van het GRiPV- en traditioneel systeem worden weergegeven en toegelicht. De toegepaste formules waarmee de energie- en warmtestromen in de energiebalansen worden berekend zijn te vinden in Bijlage IV.

De energiebalans van een Green Roof integrated Photovoltaics-systeem is onder te verdelen in drie deelsystemen: de energie balans van een PV-module, de warmtebalans van het microklimaat en de warmtebalans van het begroeide dak (Witmer, 2011). De energiebalans van een Traditioneel PV-systeem is ook onder te verdelen in drie deelsystemen: (1) de energie balans van een PV-module, (2) de warmtebalans van het microklimaat en (3) de warmtebalans van het traditionele dak. In Figuur 26 zijn de lagen in de energiebalans per PV-systeem schematisch weergeven. . De energiestromen zullen in deze weergave worden gezet.



Figuur 26: De deelsystemen/lagen in de energiebalansen. Links: Trad. PV-systeem; Rechts: GRiPV-systeem

Converteren van Zonnestralinggegevens naar hellende vlakken

Voor de omrekening van de hoeveelheid zonnestraling op een horizontaal vlak naar zoninstraling onder een hellend vlak, wordt gebruik gemaakt van NEN norm 5060, Bijlage E: Procedure voor de omrekening van gegeven zonnestralingsgegevens naar verticale en hellende vlakken.

Energiebalans van de PV-module

In Figuur 28 is het model van Jones en Underwood [33] voor de energiebalans van een PV-module weergeven. Jones en Underwood versimpelen de opbouw van de PV-module tot één laag. Witmer [7, 6] gaat in zijn opgestelde energiebalans (zie Figuur 27) uit van een PV-model bestaande uit drie lagen, de voorzijde van de module, de PVcel en de achterzijde van de module.





Figuur 28: Schematische weergave van de energiebalans van de PV-module in het GRIPV-systeem volgens Jones

Figuur 27: Schematische weergave van de energiebalans van de PV-module in het GRIPV-systeem volgens Witmer

Men kan aannemen dat een model dat uit drie lagen bestaat nauwkeuriger en inzichtelijker het verloop van energie door de photovoltaïsche cel van PV-module berekend dan een een-laagsmodel. Het drielagen model houdt rekening met verschillende materialen waaruit de PV-module is opgebouwd en vereist meer informatie over de eigenschappen en opbouw dan standaard door producenten wordt geleverd. In dit onderzoek was enkel de standaard informatie over het gebruikte model van de PV-module beschikbaar en is dus gekozen voor toepassen van het één laags model van Jones en Underwood [33]. Met als gevolg geen interne temperatuurverschillen en warmte stromen in de PV-module.

Warmtebalans vergelijking van de energiestromen in de laag van de PV-modulen

Figuur 29 geeft een schematische weergave van de verschillende warmte- en energiestromen in de PV-module laag van het GRiPV-systeem. De energiebalans van de PV-module in het GRiPV-systeem heeft zeven warmte- en energiestromen namelijk de korte golfinstraling van de zon, de lange golfstralingsuitwisseling met de hemelkoepel, de vegetatielaag en het substraat, de opgewekte elektrische energie en de convectieve warmtestromen aan de voor- en achterzijde van de module.



Figuur 29: Schematische weergave van de warmte- en energiestromen in de PV-module laag van het GRiPV-systeem.

De energiebalans van de PV-module het GRiPV-systeem is weergegeven in de volgende vergelijking (de nummering van de formules zijn genummerd volgens de bijlage III om referentie te vergemakkelijken):

$$\left(\rho c_p\right)_{pv} \cdot \frac{dI_{pv}}{dt} = R_{tot,\theta} - \left(R_{sky,pv} + R_{n,f,pv} + R_{n,g,pv} + H_{Conv,pv,vz} + H_{Conv,pv,az} + P_{out}\right) \tag{1}$$

Symbool	Omschrijving	Eenheid
T_{pv}	Temperatuur van de PV-module	Kelvin
$\left(\rho c_p\right)_{pv}$	Thermische capaciteit van de PV-module	J/m^3K
P_{out}	Opgewekte elektrische energie PV-module	W/m^2
R _{sky,pv}	Lange golfstralingsuitwisseling met de hemelkoepel	W/m^2
$R_{f,pv}$	Lange golfstralingsuitwisseling met de begroeiing	W/m^2
$R_{g,pv}$	Lange golfstralingsuitwisseling met het substraat	W/m^2
$R_{tot,\theta}$	Totale kortgolf instraling op het hellende PV-module vlak	W/m^2
$H_{Conv,pv,vz}$	Voelbare convectieve warmtestroom aan de voorzijde van de PV-module	W/m^2
$H_{Conv,pv,az}$	Voelbare convectieve warmtestroom aan de achterzijde van de PV-module	W/m^2

De energiebalans van de PV-module van in het traditionele systeem en in het GRiPV-systeem verschillen van elkaar. De energiebalans van de PV-module in het traditionele PV-systeem heeft vijf warmte- en energiestromen. De inkomende energiestroom is de korte golfinstraling van de zon. De uitgaande energiestromen zijn de lange golfstralingsuitwisseling met de hemelkoepel, de traditionele dakbedekking, de opgewekte elektrische energie en de convectieve warmtestromen aan de voor- en achterzijde van de module. In Figuur 30 is een schematische weergave van de verschillende warmte- en energiestromen in de PV-module laag van een traditioneel PV-systeem weergeven.



Figuur 30: Schematische weergave van de warmte- en energiestromen in de PV-module laag van het traditioneel PV-systeem.

De energiebalans van de PV-module het traditioneel PV-systeem is weergegeven in de volgende vergelijking:

$\left(\rho c_p\right)_{pv} \cdot \frac{a I_{pv}}{dt} = R_{tot,\theta} - \left(R_{n,sky,pv} + R_{n,e,pv} + H_{Conv,pv,vz} + H_{Conv,pv,az} + P_{out}\right)$		(2)
Symbool	Omschrijving	Eenheid
T_{pv}	Temperatuur van de PV-module	Kelvin
$\left(\rho c_p\right)_{pv}$	Thermische capaciteit van de PV-module	J/m^3K
Pout	Opgewekte elektrische energie PV-module	W/m^2
$R_{n,sky,pv}$	Lange golfstralingsuitwisseling met de hemelkoepel	W/m^2
$R_{n,e,pv}$	Lange golfstralingsuitwisseling met de EPDM dakbedekking	W/m^2
$R_{tot,\theta}$	Totale kortgolf instraling op het hellende PV-module vlak	W/m^2
$H_{Conv,pv,vz}$	Voelbare convectieve warmtestroom aan de voorzijde van de PV-module	W/m^2
H _{Conv,pv,az}	Voelbare convectieve warmtestroom aan de achterzijde van de PV-module	W/m^2

Een convectieve warmtestroom kan een combinatie van vrije en gedwongen convectieve effecten zijn. De connectieve warmteoverdracht coëfficiënt voor deze twee warmtestromen moeten worden vastgesteld; een gedwongen convectie warmteoverdracht coëfficiënt en de vrije convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt [32, 39].

Gedwongen convectie speelt is het gevolg van de windstroom over het oppervlak van de PV-paneel en speelt een belangrijke rol bij het bepalen van de thermische reactie van het PV-paneel. Er zijn diverse waarden voor de geforceerde coëfficiënt beschikbaar, deze vergelijkingen werden ontwikkeld op basis van fundamentele warmteoverdracht theorie, windtunnel metingen, en empirische metingen [32].

Vrije convectieve warmteverliezen zijn het gevolg van temperatuurverschillen tussen de PV-module en de lucht, vooral in koude klimaten kan de verschil relatief groot zijn. Vrije convectieve warmteverliezen aan de voor en achterzijde van de PV-module zijn de dominante convectieve warmtestroom op dagen met weinig of geen wind [32].

Naast windsnelheid is de windrichting op de PV-module ook een belangrijke factor voor de bepaling van de convectiecoëfficiënt [39]. Gezien de meerdere oorzaken en ook het samenspel van alle bovengenoemde omstandigheden is het moeilijk om de warmteoverdracht door convectie nauwkeurig te berekenen. In de literatuur zijn daarom verschillende waarden terug te vinden. Een overzicht van deze waarden kan is terug te vinden in het onderzoek van Pavylos J.A. [39].

Warmtebalans vergelijking van het Microklimaat volume

De situatie tussen een PV-module en het onderliggende, begroeide of traditionele dak, het microklimaat, is in de praktijk erg complex vanwege de hoeveelheid factoren die de windstroom en daarmee de convectieve warmtestromen kunnen beïnvloeden. Witmer [7, 6] vereenvoudigd de complexe situatie door het microklimaat rekenkundig te zien als een gesloten systeem met een vaste volume en een ingaande en uitgaande lucht massastroom. De drijfkracht achter de luchtstroom is de wind(snelheid) en de temperatuurverschillen tussen de algemene lucht en de lucht in het microklimaat volume. Net als het model van Witmer [7, 6] gaat het opgestelde rekenkundig model ervan uit dat het microklimaat van het GRiPV-systeem een luchtvolume heeft met 4 warmteoverdrachtstromen in de vorm van convectieve warmtestromen die het volume in en uit stromen (zie Figuur 30). De convectieve warmtestroom afkomstig van de achterzijde van de module, warmt het microklimaat op. Warmte gaat vervolgens verloren door de convectieve warmtestromen naar de omgevingslucht, de vegetatie en het substraat.

Het microklimaat van het traditionele PV-systeem een luchtvolume heeft met 3 warmteoverdrachtstromen in de vorm van convectieve warmtestromen die in en uit het volume stromen(zie Figuur 31). De convectieve warmtestroom afkomstig van de achterzijde van de module en de traditionele dakbedekking, warmt het microklimaat op. Warmte gaat vervolgens via de convectieve warmtestromen naar de omgevingslucht.

Convectie

naar PV-module





Convectie

naar Buitenlucht

Figuur 32: Schematische weergave van de warmte- en energiestromen in het microklimaat volume van het GRiPV-systeem

Figuur 31: Schematische weergave van de warmte- en energiestromen in het microklimaat volume van het traditioneel PV-systeem

De energiebalans van het microklimaat in het GRiPV-systeem is weergegeven in de volgende vergelijking::

$(\rho c_p)_m \cdot u_m \cdot$	$h_m \cdot \left[\frac{dT_m}{dt} - T_a\right] = H_{Conv,a} + H_{pv} + H_{Conv,f} + H_{Conv,g}$	(3)
Symbool	Omschrijving	Eenheid
T_m	Temperatuur van de lucht in het microklimaat volume	Kelvin
T_a	Temperatuur van de algemene buitenlucht	Kelvin
H _{Conv,a}	Convectieve warmte stroom naar de algemene lucht	W/m^2
$H_{Conv,pv}$	Convectieve warmte stroom van de PV-module	W/m^2
$H_{Conv,f}$	Convectieve warmte stroom van de vegetatielaag	W/m^2
$H_{Conv,g}$	Convectieve warmte stroom van het substraat	W/m^2
$(\rho c_p)_m$	Thermische capaciteit van de lucht in het microklimaat volume	$J/m^{3}K$
u_m	Luchtsnelheid in het microklimaat volume	m/s
h_m	Hoogte van het microklimaat volume	m

De energiebalans van het microklimaat in het traditioneel PV-systeem is weergegeven in de volgende vergelijking:

$\cdot u_m \cdot h_m \cdot \left[\frac{dT_m}{dt} - T_a \right] = H_{Conv,a} + H_{pv} + H_{Conv,e}$	(4)
Omschrijving	Eenheid
Temperatuur van de lucht in het microklimaat	Kelvin
Temperatuur van de algemene buitenlucht	Kelvin
Voelbare convectieve warmtestroom naar de algemene buitenlucht	W/m^2
Voelbare convectieve warmte stroom van de PV-module	W/m^2
Voelbare convectieve warmte stroom van de dakbeekking	W/m^2
Thermische capaciteit van de lucht in het microklimaat volume	J/m^3K
Luchtsnelheid in het microklimaat volume	m/s
Hoogte van het microklimaat volume	m
	$\begin{array}{l} \cdot u_m \cdot h_m \cdot \left[\frac{dT_m}{dt} - T_a\right] = H_{Conv,a} + H_{pv} + H_{Conv,e} \\ \hline \\ $

Dakoppervlakte in het direct zonlicht en Dakoppervlakken in de schaduw

Door de schaduw van de PV-module op het onderliggende dak ontstaan er het begroeide dak en traditionele dak in de praktijk uit twee verschillende temperaturen. Desondanks rekenen we in het model met één gemiddelde temperatuur van de vegetatielaag, substraatlaag en het traditionele daklaag. In het rekenkundig model wordt rekening gehouden met de veranderde ratio tussen beschaduwde en onbeschaduwde dakoppervlaktes wanneer de zon gedurende de dag beweegt over de hemelkoepel. De berekening voorgesteld door Scherba, Sailor en Rosentiel [37] is gekoppeld aan de uitkomsten van de zonnehoekberekening om de ratio te berekenen door middel van de NEN 5060 Bijlage E [40]. Vervolgens kan met deze ratio berekend worden hoeveel zoninstraling gemiddeld op één m² dakoppervlak valt. Voor de beschaduwd delen word gerekend met enkel diffuse korte golf instraling en in het direct zonlicht met globale instraling op een horizontaal dakoppervlak.

Warmtebalansvergelijking van de vegetatielaag

De vegetatielaag in het opgestelde model kent 5 warmteoverdrachtstromen (zie Figuur 33). De inkomende energiestromen bestaan uit de toetreden korte golf zoninstraling, de lange golfstraling afkomstig van de achterzijde van de PV-module en de convectieve (voelbare) warmtestroom van het microklimaat naar de begroeiing. De uitgaande energie stromen zijn lange golfstraling naar de hemelkoepel en evapotranspiratie (latente warmtestroom) door de stoma monden van de begroeiing.



Figuur 33: Schematische weergave van de warmte- en energiestromen in de vegetatielaag van het GRiPV-systeem.

De energiebalans van de vegetatielaag kan berekend worden met de volgende vergelijking:

$$\left(\rho c_p\right)_f \cdot D_f \cdot F \cdot \frac{dT_f}{dt} = R_{f,short} + R_{f,sky} + R_{f,pv} + R_{f,fg} + H_{conv,g} + L_f$$
(5)

Symbool	Omschrijving	Eenheid
T_f	Temperatuur van de begroeiing	Kelvin
F	Leaf Area Index	m^2/m^2
D_f	Gemiddelde blad dikte van de begroeiing	m
$(\rho c_p)_f$	Thermische capaciteit van de lucht in het microklimaat	J/m^3K
$R_{n,f}$	Netto radiatieve warmtestroom begroeiing	W/m^2
H_{f}	Voelbare warmtestroom begroeiing	W/m^2
L_{f}	Latente warmte stroom van evapotranspiratie van de begroeiing	W/m^2
$R_{n,f,short}$	Geabsorbeerde korte golfstraling door de begroeiing	W/m^2
$R_{n,f,sky}$	Lange golf uitwisseling tussen het substraat en de hemelkoepel	W/m^2
$R_{n,f,pv}$	Lange golf uitwisseling tussen het substraat en de pv-module	W/m^2
$R_{n,f,fg}$	Lange golf uitwisseling tussen het substraat en de begroeiing	W/m^2

Warmtebalans vergelijking van de substraatlaag

De substraatlaag in het model kent 7 warmteoverdrachtstromen (zie Figuur 34). De inkomende warmtestromen zijn de korte golfinstraling, convectie van het microklimaat, lange golfstralingsuitwisseling met vegetatielaag en de achterzijde van de PV-module. De uitgaande warmtestromen zijn de lange golfstralingsuitwisseling met de hemelkoepel, de latente warmtestroom (verdamping) en warmtegeleiding door de begroeiing, het substraat en de opbouw van het dak naar de binnenruimte toe.



Figuur 34: Schematische weergave van de warmte- en energiestromen in de substraatlaag van het GRiPV-systeem. De energiebalans van de substraatlaag kan berekend worden met de volgende vergelijking:

$\left(\rho c_p\right)_{g,\omega_g} \cdot \frac{dT_g}{dt}$	$\frac{d}{dt} = R_{g,sky} + R_{g,pv} + R_{g,fg} + R_{g,short} + H_{conv,g} + H_{cond,e} + L_g$	(6)
Symbool	Omschrijving	Eenheid
$\left(\rho c_p\right)_{g,\omega_g}$	Thermische capaciteit substraat met watergehalte	J/m^3K
T_g	Temperatuur van het substraat	Kelvin
$R_{n,g}$	Netto radiatieve warmtestroom substraat	W/m^2
H_g	Voelbare warmtestroom substraat	W/m^2
L_g	Latente warmte stroom substraat	W/m^2

Warmtebalans vergelijking van de laag van het traditionele dakoppervlak

De traditionele daklaag in het model kent 5 warmteoverdrachtstromen, Figuur 35. De inkomende warmtestromen zijn de korte golfinstraling, lange golfstralingsuitwisseling met de achterzijde van de PV-module. De uitgaande warmtestromen zijn de lange golfstralingsuitwisseling met de hemelkoepel, convectie van het microklimaat en warmtegeleiding door de opbouw van het dak naar de binnenruimte toe.



Figuur 35: Schematische weergave van de warmte- en energiestromen in de traditionele dak laag.

De energiebalans van het traditioneel dakoppervlak kan berekend worden met de volgende vergelijking:

r ·		
R _{n,e}	Netto radiatieve warmtestroom EPDM dakbedekking	W/m ²
He	Voelbare warmtestroom EPDM dakbedekking	W/m ²
R _{n,g,short}	Geabsorbeerde korte golfstraling door de begroeiing	W/m ²
R _{n,g,sky}	Lange golf uitwisseling tussen het substraat en de hemelkoepel	W/m ²
R _{n,g,pv}	Lange golf uitwisseling tussen het substraat en de pv-module	W/m ²

(7)

Kelvin J/m³K

Totale Energie- en warmtebalans van het Traditioneel PV-systeem

Als alle deelsystemen van een Traditioneel PV-systeem met zijn bijbehorende warmtestromen worden gecombineerd, ontstaat een totaal overzicht van alle warmtestromen die in en uit het systeem gaan. Figuur 36 geeft een schematische weergave van de warmte- en energiestromen tussen de verschillende lagen van het traditioneel PV-systeem.



Figuur 36: Schematische weergave van de warmte- en energiestromen in het traditioneel PV-systeem.

Totale Energie- en warmtebalans van het GRIPV-systeem

In Figuur 37 een schematische totaaloverzicht van de warmte- en energiestromen tussen de verschillende lagen van het GRiPV-systeem weergeven.



Figuur 37: Schematische weergave van de warmte- en energiestromen in het GRiPV-systeem.

10.0 Meetopstelling

De meetgegevens van de meetopstelling bieden de mogelijkheid om inzicht te krijgen in de werking van een GRiPVsysteem in de praktijk. Met empirische gegevens die inzicht bieden in de energiebalans van een GRiPV-systeem kan het opgestelde rekenkundig model gevalideerd worden. In dit hoofdstuk zal de opbouw van de meetopstelling besproken worden. Figuur 38 is een foto van de gerealiseerde meetopstelling te Amsterdam.



Figuur 38: De meetopstelling te Amsterdam op het dak van het kantoor van ZinCo Benelux. Bron: Leven op Daken, 2014

10.1 Opbouw meetopstelling

De meetopstelling bestaat uit twee meetplots. Per plot zijn er een aantal eigenschappen karakteristiek per plot en een aantal eigenschappen gemeenschappelijk. De twee meetplots zijn een nabootsing van twee realistische praktijksituaties op een dak. In deze paragraaf zal per plot de opbouw van de dakoppervlakken in de meetopstelling worden uiteengezet.

Meetopstelling	Meetinstrument & plaatsing				
Begroeid dak	Het dakoppervlak is uitgevoerd met een sedummat met minimaal 8				
	verschillende sedumsoorten, variërend in hoogte ca. 15-30 mm. Het				
	gebruikte substraat heeft dezelfde eigenschappen als het substraat "Zinco				
	Extensief".De substraatlaag heeft een hoogte van ongeveer 90 mm.				
Traditioneel dak	De traditionele plot is voorzien van zwarte EPDM-folie (1mm) en een EPS				
	isolatielaag van 100 mm met een Rc/Rd–waarde van 2,5 m²K/w. Onder de				
	isolatie ligt 10 mm substraat om de plot 1 te nivelleren met plot 2. De				
	microklimaten van plot 1 en 2 zijn daarmee van gelijke grootte met een				
	gelijk volume.				
PV-systeem	In deze PV-installatie worden vier PV-modulen geplaatst, twee per				
PV-modulen:	meetplot. Het PV-systeem in de meetopstelling is beide plots (op het				
ET-Solar M660250 (250 Wp)	dakoppervlak na) op dezelfde wijze geconfigureerd. Alle PV-modulen zijn				
- Begroeide plot	geplaatst op een aluminium frame op dezelfde hoogte onder een				
- Traditionele plot	hellingshoek van 30° geplaatst.				
Elektrische opbrengst	De Enphase M215 micro-omvormers hebben de mogelijkheid om				
- Begroeide plot	opbrengstdata met software automatisch in kaart te brengen. De				
- Traditionele plot	omvormers zijn bevestigd aan het aluminium frame van de PV-modulen.				
	Elke omvormer wordt onder een PV-paneel aan het frame bevestigd.				

10.2 Meetinstrumenten

Het doel van de meetinstrumenten is het meten van factoren en klimaatomstandigheden die invloed uitoefenen op de thermische werking van het begroeide en het traditionele dak en de elektrische opbrengst van de PVmodulen in de meetopstelling. Deze factoren en klimaatomstandigheden zijn zo gemeten dat de meetgegevens ingevoerd kunnen worden in het rekenkundig model. In Figuur 39 is een doorsnede weergeven met de totale overzicht van de meetopstelling met dakopbouw en posities van alle sensoren.



Figuur 39: Doorsnede met overzicht totale meetopstelling

Klimaatomstandigheden

Om inzicht te krijgen in de invloed van de klimaatomstandigheden op de energiebalans van het begroeide plot en het traditioneel plot, worden de volgende klimatologische omstandigheden gemeten:

Klimaat omstandigheden	Meetinstrument & plaatsing
Algemene luchttemperatuur	De algemene luchttemperatuur wordt buiten de meetplots gemeten op
	een hoogte van 1500 mm.
Algemene relatieve luchtvochtigheid	De algemene luchttemperatuur wordt buiten de meetplots gemeten op
	een hoogte van 1500 mm.
<u>Windsnelheid</u>	De windsnelheid wordt gemeten op een hoogte van 1300 mm met behulp
	van een ultrasonische anemometer.
Windrichting	De windrichting wordt gemeten op een hoogte van 1300 mm.
Globale instraling op het horizontale	De globale instraling op het horizontaal vlak wordt per plot gemeten met
<u>vlak</u>	behulp van een albedometer. De sensor staat op een hoogte van 1300
- Begroeide plot	mm vanaf het dakoppervlak.
- Traditionele plot	
Gereflecteerde straling van het	De gereflecteerde straling van het horizontaal vlak wordt per plot
horizontale vlak	gemeten met behulp van een albedometer. De sensor staat op een hoogte
- Begroeide plot	van 1300 mm vanaf het dakoppervlak.
- Traditionele plot	

Factoren warmte- en energiestromen

De meetinstrumenten moeten naast de klimatologische omstandigheden ter plaatsen van de meetopstelling, ook de factoren meten waarmee de grootte van de warmte- en energiestromen, in het begroeide en traditionele dakoppervlakte, de microklimaten en de PV-modulen bepaalt kan worden.

Factor	Meetinstrument & plaatsing
PV-module temperatuur	Aan de achterzijde van elk van de 2 PV-modulen op het plot is een CS-
- Begroeide plot	110PV sensor geplakt die temperatuur van een PV-cel meet.
- Traditionele plot	
<u>Spanningsmeter</u>	De elektrische opbrengst van elke individuele PV-module wordt gemeten
- Begroeide plot	door de spanningsmeter in de micro-omvormer.
- Traditionele plot	
Luchttemperatuur microklimaat	Tussen de 2 PV-modulen en het dakoppervlakte is een CS215 sensor
- Begroeide plot	geplaats die de luchttemperatuur in het microklimaat meet.
- Traditionele plot	
Relatieve luchtvochtigheid	Dezelfde CS215 sensor meet ook de relatieve luchtvochtigheid van het
<u>microklimaat</u>	microklimaat.
- Begroeide plot	
- Traditionele plot	
Albedo (reflectie) begroeide dak	Met de LP PYRA 06 albedometer, deze meet de inkomende globale
- Begroeide plot	straling en de gereflecteerde straling van het begroeide dak, wordt de
- Traditionele plot	albedo (reflectie waarde) van het begroeide dak bepaalt.
Substraat temperatuur	De temperatuur van het substraat wordt gemeten met de Decagon 5TM
- Begroeide plot	sensor, in de schaduw van de PV-modulen en in het direct zonlicht.
Cubatan at ha da mu a abtish ai d	
Substraat bodemvochtigneid	Naast de substraat temperatuur meet de Decagon 5 i Misensor ook de
- веgroeide plot	substraat podemvochtigneid, in de schaduw van de PV-modulen en in
	net airect zoniicht.
EPDM dakbadakking opportakta	De temperatuur van het substraat wordt gemeten met de CS109L senser
	in de schaduw van de DV medulen en in het direct zenlicht
	in de schaduw van de PV-modulen en in het direct zohlicht.
- Traditionele plot	

PV-systeem

Tot slot moet natuurlijk ook de elektrische opbrengsten in het PV-systeem geregistreerd worden om een uitspraak te kunnen doen welk effect de gevolgen van de factoren hebben gehad op de elektrische opbrengst.

Factor	Veetinstrument & plaatsing Aan de achterzijde van een PV-module is een CS-110PV sensor geplakt			
<u>Celtemperatuur</u>	Aan de achterzijde van een PV-module is een CS-110PV sensor geplakt			
- Begroeide plot	die temperatuur van een PV-cel meet.			
- Traditionele plot				

UITWERKING BEPALINGSMETHODEN

In de voorgaande hoofdstukken is duidelijk geworden hoe de thermische werking van begroeid daken kan zorgen voor een temperatuurverschil tussen een begroeid dak en een traditioneel dak. Met het opgestelde rekenkundig model kunnen we in dit hoofdstuk door middel van het uitvoeren van een gevoeligheidsanalyse de energiebalans van een GRIPV- en traditioneel PV-systeem analyseren en vergelijken. Met de resultaten van de meetopstelling kunnen de uitkomsten van het rekenkundig model gevalideerd worden om zo zowel de theoretische en daadwerkelijke bandbreedte van potentiele energieopbrengst vast te leggen

11.0 Gevoeligheidsanalyse

Aan de hand van drie verschillende statische klimaatscenario's wordt de invloed van factoren op het verschil in elektrische opbrengst van een GRiPV- en traditioneel PV-systeem geanalyseerd. Dit gebeurd door het opbrengst verschil tussen de beide PV-systemen te berekenen met in elk klimaatscenario vijf verschillende waarden voor bepaalde factoren. In de gevoeligheidsanalyse wordt de energiebalans van een GRIPV-systeem en traditioneel PVsysteem berekend in statische klimaatscenario's en de bandbreedte van het opbrengst-verschil tussen die 2 systemen bepaalt. De gevoeligheidsanalyse heeft als doel inzicht te geven in de mate van invloed die de invloedhebbende factoren uitoefenen op het verschil in elektrische opbrengst tussen een GRiPV-systeem en Traditioneel PV-systeem.

De verwachting is dat in de meeste klimaatscenario`s het begroeide dak zal zorgen voor een negatieve convectieve warmtestroom in het microklimaat van het GRiPV-systeem, het begroeide dak zal dus warmte uit het microklimaat halen. Het traditionele dak zal daarin tegen naar verwachting zorgen voor een positieve convectieve warmtestroom in het microklimaat van het traditionele PV-systeem, het traditionele dak zal dus warmte toevoegen aan het microklimaat.

De factoren die het meeste invloed zullen uitoefenen op het opbrengstverschillen zijn naar verwachting dan ook factoren die direct het temperatuurverschil tussen het begroeide en het traditionele dak en/of de mate van invloed van de convectieve warmtestroom tussen het microklimaat en begroeide of traditionele dak op temperatuur van het microklimaat beïnvloeden.

Met de uitkomsten van deze gevoeligheidsanalyse kan bepaald worden welke eigenschappen/factoren van een GRIPV-systeem aangepast kunnen worden om de elektrische opbrengst positief te beïnvloeden ten opzichte van een traditioneel PV-systeem.

11.1 Invoervariabelen ten behoeve gevoeligheidsanalyse

Aan de hand van de formules in bijlage III en de conclusies van het theoretisch kader over de energiebalans van beide systemen is gekozen om factoren te toetsen die direct invloed uitoefenen op thermische werking van het begroeide dak of in het microklimaat.

De factoren zijn onder te verdelen in locatiespecifieke factoren, eigenschappen begroeid dak en GRIPV- en traditioneel PV-systeem eigenschappen. De locatiespecifieke factoren, de hoogte van de dakvloer en de terrein coëfficiënt, beïnvloeden de mate van de windsnelheid op het dak. De windsnelheid is bepalend voor de grootte van de convectieve warmtestromen in het microklimaat van beide systemen.

De factoren die bepalend zijn voor de thermische werking van het begroeide dak zijn de volgende eigenschappen van het begroeide dak: de Leaf Area Index (LAI), Volumetric Water Content (VWC), de lengte van begroeiing, de hoogte van het substraat en de hoogte van de begroeiing. De hoogte van het microklimaat is de eigenschap in de GRIPV- en traditioneel PV-systemen die bepalend is voor de thermische massa in het microklimaat. In Tabel 4 zijn de minimum, onder gemiddeld, gemiddeld, boven gemiddeld en maximum waarden voor de verschillende factoren.

	Minimum	Onder	Gemiddeld	Boven	Maximum
		gemiddeld		gemiddeld	
Locatie specifieke factoren:					
✤ Hoogte dakvloer	4.00 m	8.00 m	12.00 m	20.00 m	30.00 m
 Terreincoëfficiënt 	Vlak	Landelijk	Laag	-	Hoog
	0.68	0.52	0.35	-	0.21
	0.17	0.20	0.25	-	0.33
Eigenschappen begroeid dak:					
 Leaf Area Index (LAI) 	0.50	1.00	2.00	3.00	4.00
 Vochtbalans substraat (VWC) 	0.05	0.10	0.15	0.25	0.35
 Lengte begroeiing 	0.03 m	0.04 m	0.05 m	0.06 m	0.07 m
✤ Hoogte substraat	0.04 m	0.07 m	0.09 m	0.12 m	0.15 m
✤ Hoogte begroeiing	0.01 m	0.02 m	0.03 m	0.04 m	0.05 m
GRIPV- en traditioneel PV-					
systeem eigenschappen:					
Hoogte microklimaat	0.25 m	0.35 m	0.45 m	0.55 m	0.65 m

Tabel 4: Invoervariabelen ten behoeve van de gevoeligheidsanalyse

11.2 Klimaatscenario`s

De drie statische klimaatscenario's zijn gekozen, aan de hand van de door KNMI opgestelde classificatiedagen en aan de hand van de maximale buitenlucht temperatuur. De klimaatscenario's zijn afkomstig uit de bijlage A-2 van NEN-5060. In deze bijlage staan uurgemiddelde referentie-klimaatgegevens voor ontwerpberekeningen voor energieprestatieberekeningen. Er is gekozen voor de klimaatgegevens om 13:00 uur op de betreffende dagen. Op dit tijdstip zijn er geen wolken aanwezig en is de hoogste instraling gemeten. De uurgemiddelde referentieklimaatgegevens betreft globale, directe en diffuse zoninstraling waarden. Aan de hand van bijlage-E van NEN-5060 wordt de instraling op de PV-modulen berekend.

Klimaat-	KNMI	Globale	Buitenlucht	Relatieve	Luchtdruk	Windsnelheid
scenario	classificatie	instraling	temperatuur	luchtvochtigheid		
1	Warme dag	883 W/m²	19.2 °C	50 %	1113 Pa	4.0 m/s
2	Zomerse dag	799 W/m²	25.4 °C	65 %	1110 Pa	3.0 m/s
3	Tropische dag	836 W/m²	32.3 °C	45 %	1178 Pa	6.0 m/s

Tabel 5: Invoergegevens ten behoeve van de klimaatscenario`s

De windrichting op de PV-modules bepaalt of de convectie aan de voor of achterzijde zal domineren. In Nederland komt de wind voornamelijk uit het noordwesten en PV-modulen worden vrijwel altijd georiënteerd met de voorzijde richting het zuiden, dus de convectie zal in de meeste gevallen aan de achterzijde domineren. In de gevoeligheidsanalyse zal de wind vast gezet worden op het noordwesten.

11.3 Samenvattend per klimaatscenario

De onderstaande figuren geven de gevoeligheid van alle variabele factoren voor het opbrengst verschil tussen het GRIPV- en traditioneel PV-systeem in klimaatscenario 1, 2 en 3 weer in een grafiek. De grafieken geven de mate van invloed weer die de variabele factoren hebben op het opbrengstverschil tussen een GRIPV-systeem en een traditioneel PV-systeem.

Klimaatscenario 1

In Grafiek 1 is weergeven dat tijdens klimaatscenario 1 de LAI, de hoogte van de begroeiing en het microklimaat de grootste invloed uitoefenen. Met de gemiddelde waardes is een opbrengstverschil van 0,48% gerealiseerd. De hoogste waarde (0,76%) is bereikt met een maximale hoogte van het microklimaat en het laagste opbrengst verschil (0,20%) is bereikt met een minimale LAI waarde.





Grafiek 1: Opbrengstverschil tussen een GRiPV- en traditioneel PV-systeem in klimaatscenario 1

Klimaatscenario 2

In Grafiek 2 is weergeven dat tijdens klimaatscenario 2 de LAI, de hoogte van de begroeiing en het microklimaat opnieuw de meeste invloed uitoefenen. De lengte van de begroeiing en de hoogte van het substraat zorgen weer voor geen tot een kleine stijging van het opbrengstverschil. Met de gemiddelde waarden is een opbrengstverschil van 0,58% gerealiseerd. Dit is 0,10% hoger dan in klimaatscenario 1. De hoogste waarde (0,94%) is bereikt met een maximale hoogte van het microklimaat en het laagste opbrengst verschil (0,30%) is bereikt met een minimale LAI waarde.



Klimaatscenario 2: Zomerse dag

Grafiek 2: Opbrengstverschil tussen een GRiPV- en traditioneel PV-systeem in klimaatscenario 2

Klimaatscenario 3

In Grafiek 3 is weergeven dat tijdens klimaatscenario 3 de LAI, de hoogte van de begroeiing en het microklimaat net als in de voorgaande scenario's de meeste invloed uitoefenen. De lengte van de begroeiing en de hoogte van het substraat zorgen weer voor geen tot een kleine stijging van het opbrengstverschil. Met de gemiddelde waarden is een opbrengstverschil van 0,76% gerealiseerd, 0,18% hoger dan in het vorige klimaatscenario. De hoogste waarde (1,23%) is bereikt met een maximale LAI waarde en het laagste opbrengst verschil (0,25%) is bereikt met een minimale LAI waarde.



Grafiek 3: Opbrengstverschil tussen een GRiPV- en traditioneel PV-systeem in klimaatscenario 3

11.4 Conclusie

De klimaatomstandigheden spelen een grote rol in de mate waarin de andere factoren invloed uitoefenen op het opbrengstverschil tussen het GRiPV-systeem en het traditionele PV-systeem. In klimaat scenario 2 neemt de buitenluchttemperatuur toe, tegelijkertijd nemen de invloeden van de windsnelheid en de zoninstraling af. Met als gevolg dat de temperatuurverschil van het microklimaat en de PV-module tussen het GRiPV-systeem en het traditionele PV-systeem af neemt. Het temperatuurverschil is namelijk afhankelijk van het verschil van de convectieve stromen in het microklimaat en de PV-module tussen het GRiPV-systeem en het Traditionele PV-systeem. De sterkte van de convectieve warmtestromen worden bepaald door de convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt, de grootte van het oppervlakte en het temperatuurverschil tussen het bestanddelen. De afgenomen windsnelheid daalt de sterkte van de connectieve warmteoverdrachtscoëfficienten van de warmtestromen.

De factoren die het meeste invloed hebben op het verschil in elektrische opbrengst, oefenden deze sterkste invloed uit bij het bereiken van de factormaximumwaarde. Het gaat hierbij om de Leaf Area Index met (0,75%, 0,82% en 1,23%), de hoogte van de begroeiing met (0,59%, 0,74% en 1,04%) en de hoogte van het microklimaat met (0,76%, 0,94% en 1,14%).

In tegenstelling tot de waarden van de hoogte van de begroeiing en het microklimaat, stijgt het opbrengstverschil van de Leaf Area Index in klimaatscenario 2 nauwelijks in vergelijking tot klimaatscenario 1. Dit komt omdat de Leaf Area Index geen invloed kan uitoefenen op de convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt van de begroeiing, de massawarmte-transportweerstand van het begroeiingsoppervlak en de hoogte van de begroeiing daarin tegen wel.

Ondanks het feit dat de hoogte van het microklimaat geen invloed uitoefent op de convectieve warmtestromen, zorgt de combinatie van de lage hoogte van het microklimaatvolume en de lage windsnelheid toch voor een lichte stijging van het opbrengstverschil tussen klimaatscenario 2 in vergelijking tot klimaatscenario 1. De lage hoogte van het microklimaatvolume heeft als gevolg dat de thermische massa in het microklimaatvolume afneemt. De lagere windsnelheid zorgt ervoor dat de luchtmassastroom in het microklimaatvolume (de convectieve warmtestroom naar de omgevingslucht) afneemt. De combinatie van deze twee effecten zorgt ervoor dat de invloed van de inkomende of uitgaande convectieve warmtestromen van het onderliggende dak op de temperatuur van het microklimaatvolume vergroot. De convectieve warmtestromen van het begroeide dak koelen het microklimaat af en de convectieve warmtestromen van het traditionele dak warmen het microklimaat volume op.

De sterkte van de convectieve warmtestroom van het microklimaatvolume naar de vegetatie is de factor is met de grootste invloed op het opbrengstverschil tussen een GRiPV-systeem en een traditioneel PV-systeem, de bandbreedte van de opbrengst verhoging ligt tussen de **0,20% - 1,23%**.

12.0 Validatie rekenmodel

Met het opgestelde rekenkundig model is de gevoeligheid van individuele factoren op de elektrische opbrengst van PV-modulen in een GRiPV-systeem en een traditioneel systeem te bepalen en met elkaar te vergelijken. In dit hoofdstuk wordt bekeken in hoeverre het samengestelde rekenmodel representatief is voor de praktijk.

De verkregen data van de meetopstelling tijdens de meetperiode 02-08-13 tot 04-08-13 worden gebruikt als invoerwaarden in het rekenkundig model. In de uitgevoerde berekening zijn de volgende gemeten waarden, in die meetperiode, ingevoerd als startwaarde voor de iteratieve berekening:

- Temperatuur van de zwarte EPDM dakbedekking (traditioneel plot)
- Temperatuur van het substraat (Begroeide plot)
- Bodemvochtigheidgraad van het substraat (Begroeide plot)
- Windsnelheid
- Globale instraling op het horizontaal vlak

De gemeten temperaturen van begroeide- en traditionele dakoppervlakken en de bodemvochtigheidgraden bestaan uit waarden die gelden van in de schaduw en in direct zonlicht. De eigenschappen, opbouw, samenstelling en afmetingen van het begroeide en traditionele plot in de berekening zijn vergelijkbaar met gerealiseerde meetopstelling. Bepaalde eigenschappen van het begroeide dak van de meetopstelling zijn onbekend bij de fabrikant of leverancier, hierdoor moest de input data aangevuld worden met waarden uit de literatuur. De inputdata voor het rekenkundig model is te vinden in bijlage IV.

Klimaatomstandigheden

Tijdens de drie meetdagen was de lucht vrijwel onbewolkt, wel is de zoninstraling in de namiddag het zwakst op 02-08-13 vanwege onbekende redenen. Bewolking is te categoriseren van 0 tot 8 octa`s. Volgens KNMIweerdata was het een vrij onbewolkte dag met een bedekkingsgraad van 1 octa. De meetdagen zijn als volgt gecategoriseerd, zoals weergeven in Tabel 6.

Type dag	Voorgekomen op	Temperatuur	Bewolkingsgraad
Warm	03-08-13	20°C - 25°C	3/8 octa
Zomers	04-08-13	25°C - 30°C	0/8 octa
Tropisch	02-08-13	30°C en hoger	1/8 octa

Tabel 6: Categorisatie klimaatdagen

In Grafiek 4 zijn de temperatuurverloop en globale zoninstraling weergeven voor de periode 02-08-13 tot 04-08-13. Elke dag is er een piek van circa 780 W/m² bereikt, dit zorgt voor hoge energieopbrengsten, maar ook hogere warmtelasten in beide PV-systemen



Globale Zoninstraling & Algemene Luchttemperatuur

Grafiek 4: Globale Instraling en Algemene Buitentemperatuur

Wind is de horizontale verplaatsing van lucht. De belangrijkste oorzaak van deze luchtverplaatsing is verschil in luchtdruk. De windparameters die in de meteorologie en klimatologie een rol spelen zijn:

- windsnelheid
- windrichting
- windstoot of vlaag

De hoogte van de windsnelheid is een van de bepalende factoren van de convectieve warmtestromen in de energiebalans van het GRiPV- en traditioneel PV-systeem. Grafiek 5 geeft de gemiddelde windsnelheid per uur weer tijdens de meetperiode. De gemiddelde windsnelheden gemeten tussen 02-08 en 04-08 begaven zich gemiddeld tussen 0,45 m/s en 3,3 m/s. Een windsnelheid van 3,3 m/s wordt gecategoriseerd als matige wind. De gemeten windsnelheden komen overeen met de langjarige maandelijks gemiddelde windsnelheid in augustus voor de meetlocatie [41].



Grafiek 5: Gemiddelde windsnelheid per uur

De windrichting is bepalend voor verdeling van de convectieve warmteoverdracht coëfficiënten van de voor en achterkant van de PV-module in het rekenmodel. Tijdens de meeting kwam de wind voornamelijk uit de westelijke richtingen(56%), zie Grafiek 6. In het rekenkundig model is uitgegaan van een vaste westelijke windrichting.



Percentage Windrichtingen op 2-8-13 tot 4-8-13

Grafiek 6: Waargenomen windrichtingen meetperiode

De hoogst waargenomen windstoot in de meetperiode was 8,8 m/s, gemeten op 03-08 om 11:26. Dit wordt gecategoriseerd als een vrij krachtige wind.

Temperaturen dakoppervlakken

De temperatuur van de dakoppervlakte is in zowel het direct zonlicht als in de schaduw gemeten. Deze temperaturen worden beiden ingevoerd in het model en samen met de schaduw/onbeschaduwd ratio worden de warmtestromen van en naar de dakoppervlaktes berekend.

In Grafiek 7 zijn de temperaturen van de dakoppervlakte in het zonlicht weergegeven. Grafiek 7 laat duidelijk te zien dat de opwarming van de dakoppervlakken het gevolg is van de globale zoninstraling. Vooral de temperaturen van het EPDM lijkt sterk beïnvloed te worden door de zoninstraling. De thermische massa van het begroeide dak zorgt ervoor dat het dak vertraagd opwarmt en afkoelt in vergelijking met het traditionele dak. Op 2-8 is te zien dat rond 15:00 de zoninstraling fors daalt en de temperature van het traditioneel dakoppervlak binnen een uur tijd 30 graden daalt, het begroeid dak maar 0,5 graad.



Temperaturen dakoppervlakken in zonlicht

De maximale gemeten daktemperaturen zijn:

	Dag 1		Dag 2		Dag 3	
Maximale Zoninstraling	13:00	781,84	14:00	810,73	13:00	818,27
Oppervlakte temp. Traditionele plot	12:00	69,66	14:00	55,22	13:00	67,65
Oppervlakte temp. Begroeide plot	15:00	30,80	16:00	27,36	16:00	29,48
Max. Δ T	Δ T=	38,86	∆ T=	27,86	Δ T=	38,17

Grafiek 7: Temperaturen dakoppervlakken in zonlicht op 03-08-13

Uit Tabel 1 blijkt het temperatuurverschil tussen de dakbegroeiing en het traditionele dak, de Δ T, tussen 27,86°C en 38,86 °C te zitten. De temperaturen van het begroeid dak en het traditioneel dak verschillen sterk van elkaar. Het begroeid dak bereikt zijn maximale temperatuur in alle meetdagen later dan het zwart dak. De maximale Δ T bevindt zich tussen de 27,85 en 38,86°C.

In Grafiek 8 zijn de temperaturen van de dakoppervlaktes die grotendeels in het schaduw van de PV-modules liggen weergegeven. Deze dakoppervlakken ontvangen in de schaduw enkel diffuse zonstraling. Hierdoor worden warmen de beschaduwde oppervlakken minder snel op ten gevolge van de zoninstraling. De maximale gemeten² daktemperaturen zijn:



Grafiek 8: Temperaturen dakoppervlakken onder PV tussen 02-08-13 en 04-08-13

Hoewel oppervlaktetemperaturen in de schaduw lager liggen, vertoont de oppervlaktetemperatuur van het traditioneel dak echter nog relatief veel fluctuatie. Het begroeide dak is op hetzelfde moment veel stabieler en veranderd veel minder snel van temperatuur. Deze fluctuaties geven goed weer dat het traditionele dak veel gevoeliger is voor klimatologische factoren. De maximale ΔT bevindt zich hier tussen 3,54 en 12,19°C. De temperatuurverschillen zijn in het direct zonlicht veel groter dan in de schaduw. Het beschaduwde oppervlak staat volledig in het microklimaat en zou daardoor meer invloed moeten uitoefenen op de temperatuur van het microklimaat dan het dakoppervlak in de zonlicht. Hierdoor wordt verwacht dat de ΔT van de microklimaten lager ligt dan verwacht.

	Dag 1		Dag 2		Dag 3	
Maximale Zoninstraling	13:00	781,84	14:00	810,73	13:00	818,27
Oppervlakte temp. Traditionele plot	12:00	38,60	13:00	26,21	13:00	33,05
Oppervlakte temp. Begroeide plot	14:00	26,41	14:00	22,57	14:00	22,44
ΔΤ		12,19		3,54		10,61

Tabel 7: Gemeten waarden Maximale oppervlaktetemperatuur in de schaduw per plot

² De maximaal gemeten van de dakoppervlakken worden tot 15:00 meegenomen. Hierna beïnvloed de zoninstraling de meting, waardoor de temperaturen in de schaduw niet in dezelfde condities gemeten zijn.

12.1 Resultaten

De mate waarin het rekenkundig model representatief is voor werkelijk situatie wordt ingeschat door de berekende waarden te vergelijken met de gemeten waarden. De berekende waarden bestaat uit de temperaturen van het microklimaat, de PV-modulen en de elektrische opbrengst van beide plots. De berekende waarden worden aangegeven met de letter C en de gemeten waarden met de M in de grafieken.

In Grafiek 9 geeft het percentueel verschil tussen de berekende en gemeten microklimaat temperaturen weer in het begroeide plot en het traditionele plot. Het verschil tussen het berekende microklimaat van het GRiPV-systeem en de gemeten waarden ligt in de bandbreedte van -8.81% tot 0.82%. Voor het berekende microklimaat van het traditioneel PV-systeem heeft de afwijking een bandbreedte van -6.00% tot 4.58%.

Het verschil tussen de berekende en gemeten waarden voor zowel het begroeide als traditionele plot volgt vrijwel dezelfde trendlijn. Hieruit kan gehaald worden dat de oorzaak voor het verschil tussen de berekening en de meting heeft dus op beide plotten dezelfde oorzaak. Dit geeft aanleiding om de berekende warmtestromen in het microklimaat nader te bekijken.



Percentageverschil tussen de gemeten en berekende microklimaat temperaturen

Grafiek 9: Percentueel verschil tussen de berekende en gemeten microklimaat temperaturen.

In het rekenkundig model is de convectieve warmtestroom van het onderliggende dak maatgevend voor de temperatuur van het microklimaat. In Grafiek 11 is te zien dat het begroeide dak zorgt voor een negatieve convectieve warmtestroom in het microklimaat van het GRiPV-systeem, het begroeide dak haalt warmte uit het microklimaat. In Grafiek 12 is te op te merken dat het traditionele dak daarin tegen zorgt voor een positieve convectieve warmtestroom in het microklimaat van het traditionele PV-systeem, het traditionele voegt warmte toe aan het microklimaat.

Uit Grafiek 10 blijkt dat in de meting het onderliggende dak weinig invloed op de temperatuur van het microklimaat uitgeoefend, de temperatuur van het microklimaat wijkt nauwelijks af van de algemene luchttemperatuur. De mate van invloed van de convectieve warmtestroom afkomstig van het onderliggende dak wordt in het model overschat.



Grafiek 10: Gemeten en berekende microklimaat temperaturen.







Warmteflux Microklimaat traditioneel PV-systeem

Grafiek 12: Warmteflux van het Microklimaat van het traditioneel PV-systeem in het rekenkundig model.

De berekende waarden voor de temperaturen van de PV-modulen liggen een stuk hoger dan de gemeten waarden. Het maximale verschil bedraagt zelfs circa 16 °C. De oorzaak hiervan ligt waarschijnlijk in het feit dat de gemeten PV-module temperatuur niet representatief is voor de gemiddelde temperatuur van de hele module. Het rekenkundig model gaat hier wel vanuit en reken met een gemiddelde temperatuur. De sensoren in de meetopstelling meten namelijk een klein oppervlakte van de hele PV-module terwijl de temperatuur over de gehele module sterk kan variëren door variërende windsnelheden rond de PV-module.

Het is dus moeilijk te valideren of de afwijkingen die zich voor deden bij de microklimaat-temperaturen zich doorzetten naar de PV-modules. Het temperatuurverschil tussen de gemeten en berekende temperaturen weerspiegelt zich niet in het verschil tussen de berekende en gemeten opbrengstwaarden. De circa 16 °C verschil in module temperaturen zou een percentageverschil in opbrengst van circa 7% moeten opleveren tussen de gemeten en berekende waarden. Toch liggen de gemeten en berekende elektrische opbrengst waarden op dat moment niet meer dan 3% bedraagt. Dit is bevestigt dat de gemeten PV-module temperaturen niet representatief zijn voor de gehele module.

De uiteindelijke het berekende opbrengstverschil tussen een GRiPV-systeem en een begroeid dak ligt tussen de 0.99% en 0.06%. De bandbreedte van het gemeten opbrengstverschil ligt tussen de 0.00% en 0.01, zie Grafiek 14

In de onderstaande Grafiek 13 zijn de gemiddelde gemeten waarden van de PV-cel temperaturen per plot en de berekende PV-cel temperaturen per plot weergegeven. De gemeten waarden van het begroeide plot en het traditionele plot worden weergegeven als Gem_BG en Gem_EPDM. De berekende waarden van het begroeide plot en het traditionele plot worden weergegeven door C_BG en C_EPDM.



PV-module temperaturen

Grafiek 13: Overzicht maximale gemiddelde berekende en gemeten temperaturen van het microklimaat per plot.



Elektrische opbrengst verschil tussen GRiPV en traditioneel PV-systeem

Grafiek 14: Elektrische opbrengst verschil tussen een GRiPV-en traditioneel PV-systeem.

12.2 Conclusie

De berekende luchttemperaturen in het microklimaat van de begroeide plot liggen meestal lager dan de algemene luchttemperatuur en de gemeten microklimaat luchttemperaturenwaarden. De berekende microklimaattemperaturen van het traditionele plot liggen vrijwel altijd hoger dan de algemene luchttemperatuur de gemeten microklimaat temperaturen waarden van het traditionele dak. De temperatuur van het microklimaat is bepalend voor de operationele temperatuur van de PV-module en daarmee ook de elektrische opbrengst van de PV-module.

De mate van invloed van de convectieve warmtestroom afkomstig van het onderliggende dak wordt in het model overschat. Hoogst waarschijnlijk is de convectieve stroom van en naar de algemene lucht onderschat. Dit resulteert in een afwijking met een bandbreedte van -8.81% tot 0.82% voor het berekende microklimaat van het GRiPV-systeem. Voor het berekende microklimaat van het traditioneel PV-systeem heeft de afwijking een bandbreedte van -6.00% tot 4.58%

De berekende temperaturen van de PV-modulen liggen een stuk hoger dan de gemeten waarden. Het maximale verschil bedraagt zelfs circa 16 °C. Dit verschil in moduletemperatuur zou een percentageverschil in opbrengst van circa 7% moeten opleveren tussen de gemeten en berekende waarden. Toch liggen de gemeten en berekende elektrische opbrengst waarden op dat moment niet meer dan 3% bedraagt. Hoogstwaarschijnlijk zijn de gemeten PV-moduletemperaturen niet representatief voor de gemiddelde temperatuur van de hele module, waar de berekening wel vanuit gaat. De uiteindelijke het berekende opbrengstverschil tussen een GRiPV-systeem en een begroeid dak ligt tussen de 0.99% en 0.06%. De bandbreedte van het gemeten opbrengstverschil ligt tussen de 0.00% en 0.01%. Het uiteindelijk opbrengstpercentageverschil tussen een GRiPV-systeem en een Traditioneel PV-systeem in de berekening komt hoger uit dan in de meting vanwege de overschatting van de invloed van het onderliggende dak op de temperaturen van het microklimaat.

GRIPV-SYSTEM VERSUS CONVENTIONAL SYSTEM 13.0 Eindconclusie

Een Green Roof integrated Photovoltaic-systeem staat voor de integratie van een begroeid dak met een PVmodule. Op basis van gepubliceerde onderzoeksresultaten van GRiPV-systemen wordt gesuggereerd dat het temperatuurverschil tussen begroeide daken en traditionele zwarte daken in de zomer invloed heeft op de elektrische opbrengst van PV-modulen op de daken. Producenten en leveranciers beweren dat GRiPV-systemen kunnen zorgen voor een potentiele verhoging van de elektrische opbrengst binnen een bandbreedte van 4% tot 16% ten opzichte van traditionele systemen. In de onderzochte literatuur concluderen verschillende onderzoeken een verhoging van de elektrische opbrengst van een GRiPV-systeem ten opzichte van een traditioneel PV-systeem. De verhoging bevindt zich in empirische onderzoeken in de bandbreedte van 4,3% tot 6%. De verschillende theoretische modellen plaatsen het verschil in opbrengst in de bandbreedte van 0,08% tot maximaal 8,3%.

In de gepubliceerde resultaten wordt geen uniforme bepalingsmethode gehanteerd, waardoor het onduidelijk is in welke mate, samenstelling en klimatologische omstandigheden een GRiPV-systeem meer elektrische energie kan opleveren ten opzichte van een traditioneel PV-systeem. Om de invloed van het begroeide dak op de elektrische opbrengst van PV-modulen te bepalen en vergelijken met de invloed van een traditioneel dak, zijn de factoren achter de thermische werking van begroeide daken en de elektrische opbrengst van PV-modulen in kaart gebracht.

Het rendement van een PV-systeem is sterk afhankelijk van klimaatomstandigheden en verschillende verliesposten. De grootste potentiele verliespost in een PV-systeem is het gevolg van PV-cel temperaturen boven de 25 graden. Op jaarbasis worden de temperatuurverliezen gemiddeld aangenomen tussen 0 tot 6%. De thermische werking van begroeide daken is erg afhankelijk van weersomstandigheden, maar ook van de fysieke eigenschappen van de lagen van het begroeide dak, zoals thermische en (uit)stralings-eigenschappen, vochtbalans van het substraat en de type begroeiing. Al deze eigenschappen zijn naast de weersomstandigheden, tevens ook onderling van elkaar afhankelijk.

Aan de hand van het uitgevoerde literatuuronderzoek is een rekenkundig model van de energiebalans van een GRiPV- en traditioneel PV-systeem opgesteld. Met het opgestelde rekenkundig model is de bandbreedte van het opbrengst verschil tussen een GRiPV- en traditioneel systeem in 3 statische klimaatscenario's berekend en is tevens een validatie uitgevoerd aan de hand van praktijkmetingen. Het rekenmodel bestaat uit een energie- en warmtebalans van een GRiPV-systeem en een traditioneel PV-systeem en is gebaseerd op aannames en onderbouwd door (empirische) onderzoeken. De energie- en warmtebalans van het GRiPV- en traditioneel PV-systeem vereenvoudigd de complexe situatie in het microklimaat door het microklimaat rekenkundig te zien als natuurkundig gesloten systeem, met een vaste volume en een lucht massastroom die daar doorheen stroomt. Dit maakt het model beperkt in het volledig nabootsen van een daadwerkelijk optredende situatie met alle onderlinge factoren en relaties. In hoeverre het samengestelde rekenmodel representatief is onderzocht door middel van een validatie aan de hand van een meetopstelling

Aan de hand van drie verschillende statische klimaatscenario's is ook de invloed van factoren op de elektrische opbrengst van een GRIPV-systeem en traditioneel PV-systeem berekend en het opbrengst-verschil tussen die twee systemen bepaald. De hoogte van het microklimaat is een van de factoren die het meeste invloed uitoefenen op het verschil in elektrische opbrengst. Van de eigenschappen van het begroeide dak blijkt dat de hoogte van de begroeiing en Leaf Area Index de meeste invloed op de temperatuur van het microklimaat uitoefenen. Deze twee eigenschappen zijn bepalend voor de grootte van de convectieve warmestroom van de begroeiing naar het microklimaat. De vijf minst invloed uitoefenende variabele factoren zijn de bodemvochtigheidsgraad, de lengte van de begroeiing, de hoogte van het substraat, hoogte van de dakvloer en de terreincoëfficiënt. Daar moet bij vermeld worden dat de invloed van de bodemvochtigheidsgraad niet onderschat moet worden. De bodemvochtigheidsgraad is direct bepalend is voor de mate van evapotranspiratie en daarmee ook het temperatuur verschil tussen een begroeiid dak en een zwart traditioneel dak.

Op basis van de gevoeligheidsanalyse kan geconcludeerd worden dat het toepassen van een GRiPV-systeem zorgt voor een verhoging van elektrische opbrengst, in vergelijking met een traditioneel PV-systeem, binnen een

bandbreedte van **0,20% - 1,23%**. Dit is een vrij groot verschil met de resultaten van de meetopstelling omdat resultaten van de gevoeligheid analyse zijn bepaalt voor statische klimaatscenario's op het midden van de dag met de meest gunstige klimaat omstandigheden. Het percentage van de opbrengstverhogingen betreffen dan ook de maximale waarde die op die dag haalbaar zijn. Het gemiddelde percentage van de opbrengstverhoging over de hele dag zou in klimaatscenario's een stuk lager liggen. Een beperking van het huidige rekenkundig model is dat de berekening niet toelaat om een super scenario te maken waar alle factoren maximale waarden hebben.

Uit de validatie van het model bleek er een afwijking tussen de berekende waarden en de gemeten waarden voor te komen. Voor het microklimaat van het GRiPV-systeem betekent dit een afwijking met een bandbreedte van -8.81% tot 0.82%. Voor het berekende microklimaat van het traditioneel PV-systeem heeft de afwijking een bandbreedte van -6.00% tot 4.58%. In het model is de mate van invloed van de convectieve warmtestroom afkomstig van het onderliggende dak overschat. Hoogst waarschijnlijk is de convectieve stroom van en naar de algemene lucht onderschat.

Het uiteindelijk berekende opbrengstverschil tussen een GRiPV-systeem en een begroeid dak ligt in de validatie **tussen de 0.99% en 0.06%.** De bandbreedte van het gemeten opbrengstverschil ligt **tussen de 0.00% en 0.01%.** Op basis van de resultaten van de gevoeligheidsanalyse en de praktijkmeting, uitgevoerd in dit onderzoek, kan geconcludeerd worden dat het combineren van een klein PV-systeem (2 PV-modulen) met een relatief klein oppervlakte begroeid dak (25m²) niet tot een significante verhoging leidt ten opzichte van een vergelijkbaar traditioneel PV-systeem.

Aanbevelingen vervolgonderzoek

Vanwege de complexe situatie zou een vervolg onderzoek met een grotere opzet andere resultaten op kunnen leveren. Empirisch vervolg onderzoek zou zich moeten richten op een meetopstelling met een groter PV-systeem, een meetperiode van meerdere jaren en een stedelijke omgeving. Mocht het rekenkundig model in vervolgonderzoek gebruikt worden, is het onze aanbeveling het rekenkundig model aan te passen om een super scenario mogelijk te maken, de berekening dynamisch te maken en onderzoek te doen om de berekening van de convectieve warmtestromen in het microklimaat representatiever te maken.

Discussie toepassing GRiPV-systemen

In het maken van de keuze van de toepassing van een GRiPV-systeem is de elektrische opbrengst van een GRiPVsysteem slecht één van de vele aspecten die een rol vervullen. Het hoofddoel van een GRiPV-systeem is de ruimte op het dak beter te benutten door middel van meervoudig gebruik van het dak. Het combineren een PV-systeem met een begroeide dak kan ook gezien worden als een design element voor architecten en ontwerpers om aantrekkelijke duurzame dak landschappen te creëren. Daarnaast zou de combinatie van begroeid daken met pvmodulen de voordelen van beide systemen combineren en zelfs versterken.

De voordelen van het aanleggen van begroeide daken zijn in vergelijking tot PV-modulen gericht op het publieke belang. Opdrachtgevers die een begroeid dak toepassen zijn niet op zoek naar financiële voordelen, maar willen vooral een steentje bijdragen aan een gezond klimaat en leefmilieu. Bij de toepassing van PV-systemen ligt de nadruk meer op de voordelen voor de eigenaar. De relatief korte terugverdientijd voor de opdrachtgevers maakt het op de eerste plaats een kostenbesparende investering die ook nog eens duurzaam is.

Het ontwerp van een GRiPV-systeem zal afhankelijk zijn van het doel dat de ontwerper voor ogen heeft met het daklandschap. Uit dit onderzoek is geconcludeerd dat om een tot een optimaal GRiPV-systeem te komen is het noodzakelijk om in een vroeg ontwerpstadium een afgewogen keuze te maken over: dakconstructie, open of gesloten PV-systeem, type ballast methode, type begroeid dak en de hoogte van de begroeiing. De mogelijke verhoging van de elektrische opbrengst zal nooit de doorslaggevende reden zijn voor de toepassing van een GRiPV-systeem. De verwachting is dat de toepassing van een GRiPV-systeem voortkomt vanuit een evenwichtig ideaal, waarbij de eigenaar niet alleen investeert in zijn dak voor zijn eigen belang maar ook het publieke belang.

14.0 Literatuurlijst

- [1] M. Koehler, M. Schmidt, M. Laar, U. Wachsmann and S. Krauter, "Photovoltaic-panels on greened roofs: positive interaction between two elements of sustainable.," 2002.
- [2] M. Koehler, W. Wiartalla and F. R., "Interaction between pv-systems and extensive green roofs," in *Fifth Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference, Awards and Trade Show*, 2007.
- [3] D. S. C. M. Hui and M. S. C. Chan, "Integration of green roof and solar photovoltaic systems," in Proceedings of Joint Symposium 2011: Integrated Building Design in the New Era of Sustainability, Hong kong, 2011.
- [4] R. Miller, "Vegetated Roofs (Green Roofs) Combined with Photovoltaic Panels A Case of the Study Sun-Root™ System," Green Roof Service, LLC, Baltimore, 2012.
- [5] Optigroen, "Handleiding: Solar Groendak," [Online]. Available: http://www.optigroen.nl/pdf/SolarGroendak_04-2010.pdf. [Accessed mei 2013].
- [6] L. Witmer, "Quantification of the passive cooling of photovoltaics using green roofs.," The Pennsylvania State University, Raleigh, North Carolina, 2010.
- [7] L. Witmer and J. Brownson, "An energy balance model of Green Roof integrated Photovoltaics: a detailed energy balance including Microclimatic effects.," The Pennsylvania State University, Raleigh, North Carolina, 2011.
- [8] ABB Group, Technical Performance PV Plants, ABB Group, 2010.
- [9] Agentschap NL, "Zonnestroomprojecten, Leidraad," Agentschap NL, Utrecht, 2010.
- [10] ECN, ECN Factsheet zonnestroom, Petten: ECN, 2009.
- [11] Optigroen, "Ontwerp- & Technische handleiding dak- en gevelbegroeiing.," 2012. [Online]. Available: http://www.bouwproducten.nl/resources/upload/18ik62l-publication.pdf. [Accessed Mei 2013].
- [12] ZinCo Benelux, "Technische handleiding: systemen voor extensieve dakbegroeiing," 2013. [Online]. Available: http://www.zinco.nl/systeemoplossingen/extensievedaken/TechnischeHandleidingExtensief2013.pdf. [Accessed Mei 2013].
- [13] W. Verburg, Richtlijn vegetatiedaken bestaande bouw, Rotterdam: Stichting Bouw Research, 2010.
- [14] "Dubbeldoeldak betekend driedubbele winst," Leven op Daken, pp. 22, 23, 2013.
- [15] Stichting ISSO, Handboek Zonne-energie, Rotterdam MA: Stichting ISSO, 2012.
- [16] ZinCo, "Handleiding: Solar Energy and Green Roofs," [Online]. Available: http://www.zincogreenroof.com/EN/downloads/pdfs/Solar_Energy_and_Green_Roofs.pdf. [Accessed mei 2013].
- [17] P. Teeuw and C. Ravesloot, Begroeide Daken Na 2010 afstemming van techniek, organisatie, maatschappelijk belang., Amsterdam: Techne Press, 2011.
- [18] A. Karssen, Handboek Groene Daken: van ideeën tot realisatie, BDA Dak- en gevelopleidingen, 2011.
- [19] E. P. D. Barrio, "Analysis of the green roofs cooling potential in buildings," *Energy and Buildings,* vol. 27, pp. 179-193, 1998.

- [20] M. Delemarre and S. P., "De isolerende werking van begroeide daken in de zomer.," Rotterdam, 2012.
- [21] R. Djedjig, S.-E. Ouldboukhitine, R. Belarbi and E. Bozonnet, "Development and validation of a coupled heat and mass transfer model," *International Communications in Heat and Mass Transfer model for green roofs,* vol. 39, no. 6, p. 752–761, 2012.
- [22] M. M. Feller, "Quantifying Evapotranspiration in Green Infrastructure: A Green Roof Case Study," Villanova University, 2011.
- [23] C. Feng, Q. Meng and Y. Zhang, "Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs," *Energy and Buildings*, vol. 42, no. 6, p. 959–965, 2010.
- [24] E. Huang, "De isolerende werking van begroeide daken in de Winter," Rotterdam, 2013.
- [25] C. Jim and L. Peng, "Weather effect on thermal and energy performance of an extensive tropical.," *Urban Forestry & Urban Greening*, vol. 11, no. 1, p. 73– 8, 2012.
- [26] R. M. Lazzarin, F. Castellotti and F. Busato, "Experimental measurements and numerical modelling of a green roof," *Energy and Buildings*, vol. 37, no. 12, p. 1260–1267, 2005.
- [27] S. Ouldboukhitine, R. Belarbi, I. Jaffal and A. Trabelsi, "). Assessment of green roof thermal behavior model," *Building and Environment*, vol. 46, no. 12, pp. 2624-2631, 2011.
- [28] T. Susca, S. Gaffin and G. Dell'Osso, "Positive effects of vegetation: Urban heat island and green roofs," *Environmental Pollution*, vol. 159, pp. 2119 - 2126, 2011.
- [29] C. Jim and L. L. Peng, "Weather effect on thermal and energy performance of an extensive tropical green roof," *Urban Forestry & Urban Greening*, vol. 11, p. 73– 85, 2012.
- [30] M. E. Meral and F. Dinçer, "A review of the factors affecting operation and efficiency of photovoltaic based electricity generation systems.," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 5, p. 2176–2184, 2011.
- [31] C. Velds, P. Van der Hoeven, J. Koopstra, W. Raaff and W. Slob, "Zonneinstraling in Nederland," KNMI Nederland, 1992.
- [32] S. Armstrong and W. Hurley, "A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions," *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, p. 1488e1495, 2010.
- [33] A. Jones and P. Underwood, "A thermal model for Photovoltaic systems," *Solar Energy*, vol. 70, no. 4, p. 349–359, 2001.
- [34] M. Koehl, M. Heck, S. Wiesmeier and J. Wirth, "Modeling of the nominal operating cell temperature based on outdoor weathering," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 95, pp. 1638-1646, 2011.
- [35] G. Makrides, B. Zinsser, M. Norton, G. Georghiou, S. M. and J. Werner, "Energy Yield of Different Photovoltaic Systems Installed in Cyprus," 2008.
- [36] David J. Sailor, "Energy Perf ormance of Green Roofs: the role of the roof in affecting building energy and the urban atmospheric environment," in *EPA Heat Island Reduction Program Webcast*, 2010.
- [37] A. Scherba, D. J. Sailor, T. N. Rosenstiel and C. C. Wamser, "Modeling the Impact of Roof Reflectivity, Integrated Photovoltaic Panels and Green Roofs," *Building and Environment*, vol. 46, no. 12, pp. 2413-2666, 2011.

- [38] ZinCo, "Press Release: Green roofing increases earnings from photovoltaic systems," 2010. [Online]. Available: http://www.zinco-greenroof.com/EN/news/press_releases/press_release_details.php?id=57. [Accessed Mei 2013].
- [39] A. Palyvos, "A survey of wind convection coefficient correlations for building envelope energy systems' modeling," *Applied Thermal Engineering*, vol. 28, p. 801–808, 2008.
- [40] NEN-Norm, "NVN/NEN 5060:2008 Hygrothermische eigenschappen van gebouwen Referentieklimaatgegevens," NEN-Norm, 2008.
- [41] Noordhoff atlasproducties/KNMI, De bosatlas van het klimaat, Noordhoff Uitgevers B.V., 2011.
- [42] P. C. Tabares-Velasco and J. Srebric, "A heat transfer model for assessment of plant based roofing systems in summer conditions.," *Building and Environment,* vol. 49, p. 310–323, 2012.
- [43] T. Susca, S. Gaffin and D. G.R., "Positive effects of vegetation Urban heat island and green roofs," *Environmental Pollution*, vol. 159, pp. 2119-2126.
- [44] E. Skoplaki and J. Palyvos, "On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations," *Solar Energy*, vol. 83, p. 614–624, 2009.
- [45] J. Shao, J. Liu, J. Zhao, W. Zhang, D. Sun and Z. Fu, "A novel method for full-scale measurement of the external convective heat transfer coefficient for building horizontal roof," *Energy and Buildings*, vol. 41, p. 840–847, 2009.
- [46] C. Schwingshackl, M. Petittaa, J. Wagner, G. Belluardo, D. Moser, M. Castelli, M. Zebisch and A. Tetzlaff, "Wind effect on PV module temperature: Analysis of different techniques for an accurate estimation," *Energy Procedia*, vol. 40, p. 77 – 86, 2013.
- [47] D. Sailor and M. Hagos, "An updated and expanded set of thermal property data for green roof growing media," *Energy and Buildings*, vol. 43, p. 2298–2303, 2011.
- [48] D. Morau, R. Tiana and A. Ludovic, "Simple model for the theoretical survey of green roof thermal behavior.," *Journal of Technology Innovations in Renewable Energy*, 2012.
- [49] C. Huang, C. Chan and C. Chou, "Combine the thermal model to analyze the building integrated photovoltaic array performance," in *International Congress on Informatics, Environment, Energy and Applications-IEEA 2012*, Singapore, 2012.
- [50] H. W. Gausman and W. A. Allen, "Optical Parameters of Leaves of 30 Plant Species.," *Plant Physiol.*, vol. 52, pp. 57-62, 1973.
- [51] M. Delemarre and S. P., "De isolerende werking van begroeide daken in de zomer.," Rotterdam, 2013.
- [52] D. Deepreeuw and Q. De Kooning, "De invloed van ventilatie op het rendement van," Gent, 2010.
- [53] D. D.C, C. L., H. S. and A. A., "An experimental investigation of airflow and heattransfer in roof-intergrated photovoltaic thermal systems," Montreal, Cananda.
- [54] NEN-Norm, NEN 7250:2013 Ontw. nl Zonne-energiesystemen Integratie in daken en gevels Bouwkundige aspecten, NEN, 01-07-2013, p. 52.
- [55] Ruud van Herpen, "Meerzone luchtstroommodellen," in Luchtstroommodellen, Kennisbank Bouwfysica.
- [56] P. J. R. J. Wieringa, "Windklimaat van Nederland," KNMI, 1983.

15.0 Figuurlijst

Figuur 1: Schematische opbouw van een type GRiPV-systeem	VIII
Figuur 2: Processchema afstuderen	VIII
Figuur 3: Voorbeeld van een GRiPV-systeem	1
Figuur 4: Opbouw lagen extensief begroeid dak	1
Figuur 5: Onderdelen in een PV-systeem	2
Figuur 6: Opbouw PV-module	2
Figuur 8: Temperatuur van de dakbedekking gedurende een warme dag in La Rochelle [27]	5
Figuur 9: Vergelijking van substraat oppervlakte temperatuur voor de verschillende vochtgehaltes [21]	6
Figuur 10: Vergelijking van substraat-temperaturen met een variatie in begroeiing dichtheid van 10 tot 75% [27]	6
Figuur 11: Vergelijking van blad temperaturen met een variatie in begroeiing-dichtheid van 10 tot 75%. [27]	6
Figuur 12: De inkomende zonnestraling wordt geabsorbeerd, verstrooid, gereflecteerd en uitgezonden	7
Figuur 13: Efficiëntie PV-modulen naar aanleiding oriëntatie en Helling	8
Figuur 14: Gemiddelde jaarlijkse hoeveelheid globale instraling 1981-2010, KNMI	8
Figuur 15: Het effect van temperatuur op de I-V curve van een zonnecel	8
Figuur 16: Relatie tussen module-efficiëntie en moduletemperatuur	9
Figuur 17: Schematische weergave meetopstelling van Koehler (2002)	11
Figuur 18: Schematisch weergave van de energiebalans stedelijke (Urban) en landelijke (Rural) gebieden	11
Figuur 19: ZinCo meetopstelling, 2010	12
Figuur 20: Meetresultaten van 6 Juli 2009, ZinCo meting	12
Figuur 21: Opbouw Meetopstelling Hui, 2010	13
Figuur 22: Vergelijking van efficiëntie PV-modulen tussen GRIPV-systemen en Traditionele PV-systemen in verschillende	
steden uit de VS	13
Figuur 23: Energiebalans Witmer, 2011	14
Figuur 24: Meetopstelling Solarsedum	14
Figuur 25: Uitgangspunten van het opbrengstverschil tussen het GRiPV-systeem en traditioneel PV-systeem.	15
Figuur 26: De deelsystemen/lagen in de energiebalansen. Links: Trad. PV-systeem; Rechts: GRiPV-systeem	16
Figuur 27: Schematische weergave van de energiebalans van de PV-module in het GRIPV-systeem volgens Witmer	17
Figuur 28: Schematische weergave van de energiebalans van de PV-module in het GRIPV-systeem volgens Jones	17
Figuur 29: Schematische weergave van de warmte- en energiestromen in de PV-module laag van het GRiPV-systeem	17
Figuur 30: Schematische weergave van de warmte- en energiestromen in de PV-module laag van het TR. PV-systeem	18
Figuur 31: Schematische weergave van de warmte- en energiestromen in het microklimaat volume van het TR.PV-systee	m.19
Figuur 32: Schematische weergave van de warmte- en energiestromen in het microklimaat volume van het GRiPV-systee	em 19
Figuur 33: Schematische weergave van de warmte- en energiestromen in de vegetatielaag van het GRiPV-systeem	20
Figuur 34: Schematische weergave van de warmte- en energiestromen in de substraatlaag van het GRiPV-systeem	20
Figuur 35: Schematische weergave van de warmte- en energiestromen in de traditionele dak laag	21
Figuur 36: Schematische weergave van de warmte- en energiestromen in het traditioneel PV-systeem.	22
Figuur 37: Schematische weergave van de warmte- en energiestromen in het GRiPV-systeem	22
Figuur 38: De meetopstelling te Amsterdam op het dak van het kantoor van ZinCo Benelux. Bron: Leven op Daken, 2014	23
Figuur 39: Doorsnede met overzicht totale meetopstelling	24