



Katholieke Hogeschool Sint-Lieven
Departement Industrieel Ingenieur
Technologiecampus Gent

Gebroeders Desmetstraat 1, 9000 Gent

Opleiding
Master in de industriële wetenschappen:
Bouwkunde

**De invloed van ventilatie op het rendement van
zonnepanelen**

Promotor: **ing. Veerle De Swaef** en **Dr. ir. Ralf Klein**

Eindverhandeling tot het behalen van de
graad van Master in de Industriële Wetenschappen: optie Bouwkunde en
aangeboden door **Quinten De Kooning** en **Dries Depreeuw**

Academiejaar 2009 - 2010



Voorwoord

Het maken van deze thesis was een boeiende maar zeker geen gemakkelijke opgave. Langs deze weg willen wij graag enkele personen bedanken die rechtstreeks of onrechtstreeks hebben bijgedragen tot realisatie van deze thesis.

In de eerste plaats zouden wij graag onze promotoren ing. Veerle De Swaef en Dr. ir. Ralf Klein willen bedanken voor het aanbrenge van dit interessante onderwerp. En ook voor de goede begeleiding en ondersteuning doorheen het ganse jaar.

Ook een woord van dank aan onze externe promotoren Sylvain Terryn en Ann Thierens voor de technische steun en de bereidwilligheid om ons te assisteren voor het opstellen van het testdak. Ook zijn wij het bedrijf Koramic erkentelijk voor het ter beschikking stellen van het terrein en materiaal voor het testdak.

Mathieu Vandenbulcke zouden wij ook willen bedanken voor de vele verhelderend gesprekken die blijk gaven van een uitstekende vakkennis.

Vervolgens een woord van dank aan onze ouders, familie en vrienden voor de niet aflatende steun en aanmoedigingen.

Bedankt!

Quinten De Kooning en Dries Depreeuw

Abstract

De invloed van ventilatie op het rendement van zonnepanelen

Quinten De Koning en Dries Depreeuw

Promotoren: ing. V. De Swaef en Dr. ir. R. Klein

I. INLEIDING

De vraag naar zonnepanelen kent de laatste jaren een ongeziene stijging in België en de rest van de wereld. Meer en meer mensen worden zich bewust van het feit dat de exploitatie van fossiele en nucleaire brandstoffen niet oneindig kan blijven voortduren. Bovendien is het verbruik van deze stoffen enorm belastend voor de natuur. Denk maar aan het broeikaseffect dat veroorzaakt wordt door de grote uitstoot van CO₂. Mede door de doelstelling van het Kyoto protocol om de CO₂ uitstoot drastisch te verminderen tegen 2020 heeft men nood aan alternatieven, aan andere manieren om 'propere' energie op te wekken. Gedurende de voorbije decennia hebben wetenschappers vele systemen ontwikkeld om aan deze 'eisen' te voldoen.

Een van de meest belovende technieken zijn zonnepanelen waarmee energie kan gewonnen worden uit zonne-energie. Door zijn modulaire opbouw van verschillende zonnecellen kan een dergelijke installatie van eender welk formaat zijn. Men kan dus de installatie dimensioneren naargelang de energiebehoefte van zijn verbruiker. Dit leent zich uitermate voor de energiebehoefte van woningen. En specifiek voor een installatie op hellende daken die, indien de oriëntatie van het gebouw gunstig gelegen is, een optimaal rendement kunnen bieden.

Om deze panelen te bevestigen aan het dakvlak zijn er twee mogelijkheden: enerzijds kan men kiezen voor een oplossing waarbij de panelen in het dakvlak geplaatst worden, anderzijds kan men kiezen om deze op een drager bovenop het dakvlak te plaatsen. Bij de laatste toepassing ontstaat een spouw die extra ventilatie mogelijk maakt. Gezien polykristallijne cellen, welke meestal toegepast worden in zulke installaties,

een negatieve invloed ondervinden op het vermogen bij stijgende temperatuur, zijn dergelijke On-top installaties efficiënter door de extra koeling die deze spouw verwezenlijkt. Echter worden deze toepassingen als esthetisch storend ervaren. Daarom wordt meer en meer geopteerd voor geïntegreerde toepassingen.

Het doel van deze masterproef is het verschil in rendement tussen deze twee types zonnepanelen te begroten. Er wordt verwacht dat het verschil tussen deze twee types zonnepanelen zo'n 3% procent zal bedragen.

II. METHODOLOGIE

De thesis werd opgedeeld in twee grote delen:

In het eerste deel wordt de werking en integratietoepassingen in de bouw uitvoerig beschreven.

Eens dit kader geschetst was, kon men overgaan tot het opzet van deze masterproef: om de precieze invloed van ventilatie op de werkingstemperatuur van de zonnecellen in te schatten werd de volledige warmtebalans rondom het zonnepaneel ontleed aan de hand van een uitgebreide literatuurstudie.

Hoewel er ongelooflijk veel beweegt rond zonnepanelen, is er slechts weinig beschreven specifiek over ventilatie. Wel gaan meerdere auteurs dieper in op het kwantificeren van de thermische trek maar weinigen wagen zich aan het wispelturige gedrag van de wind.

Op basis van de bevindingen werd vervolgens een poging ondernomen om deze temperatuur en zijn invloedsfactoren te bepalen aan de hand van een model. Gezien de

complexiteit van het probleem leidde dit model niet echt tot relevante oplossingen. Wel kan het model een idee geven over welke parameters in welke mate van invloed zijn.

Op een testdak (zie figuur 1) werden beide systemen (geïntegreerd en On-top) geïnstalleerd en geïnstrumenteerd. Dit gebeurde onder impuls van Koramic die zo de performantie van hun geïntegreerd product KoraSun wilden vergelijken met de On-top uitvoering. Dit testdak en de resultaten worden uitvoerig besproken in het laatste onderdeel.



Figuur 1: Testdak in Kortrijk

III. RESULTATEN EN INTERPRETATIES

In totaal werd gedurende 8 maand meetgegevens verzameld. Gedurende deze periode werd de volgende opbrengst gerealiseerd voor beide systemen.

Tabel 1: Opbrengst van de twee verschillende installaties

	KoraSun	On-top	Eenheid
Opbrengst	160,9	165,4	kWh

Het rendementsverlies bleek dus vrij beperkt (circa 2.7%) en ligt volledig in de lijn van de verwachtingen.

DANKWOORD

In de eerste plaats zouden wij graag onze promotoren ing. V. De Swaef en Dr. ir. R. Klein willen bedanken voor de goede begeleiding en ondersteuning. Ook een woord van dank aan onze externe promotoren Sylvain Terryn en Ann Thierens voor de technische steun en hun bereidwilligheid. Voor het gebruiken van hun materiaal en voor het ter beschikking stellen van een testdak op hun bedrijventerrein zijn wij Koramic erkentelijk. Verder zouden wij ook Mathieu Vandenbulcke willen bedanken voor de technisch expertise en voor de goede respons op onze vragen.

REFERENTIES

- [1] The German Energy Society, Planning & installing Photovoltaic Systems, Londen, Earthscan, 2008.
- [2] SANDBERG M., MOSHFEGH, B., Flow and heat transfer in the air gap behind photovoltaic panels, Renewable and Sustainable Energy Reviews 2(3), 1998.
- [3] BRINKWORTH, B.J., SANDBERG, M., Design procedure for cooling ducts to minimise efficiency loss due to temperature rise in pv arrays, Solar Energy 80(1), 2006.

Inhoudsopgave

Voorwoord	3
Abstract	4
Inhoudsopgave	6
Inleiding	12
Deel 1.....	13
1 Waarom zonnepanelen?	14
2 Historiek	16
3 Beschrijving van de installatie	17
3.1 De zonnecellen	17
3.1.1 Silicium zonnecellen	17
3.1.1.1 Mono-kristallijn silicium	18
3.1.1.2 Polykristallijn silicium	18
3.1.1.3 Amorfe cellen	19
3.1.2 Koper-indium-diselenide	20
3.1.3 Cadmiumtelluride.....	20
3.1.4 Organische cellen	20
3.1.5 Andere zonnecel-concepten.....	21
3.1.5.1 Bolvormige zonnecellen	21
3.1.5.2 Sliver zonnecellen.....	21
3.1.5.3 Concentrator zonnecellen	21
3.1.5.4 Hybride zonnecellen.....	22
3.2 Opbouw van een paneel	22
3.3 Omvormer	23
3.4 Netaansluiting	24
3.4.1 Netgekoppelde fotovoltaïsche systemen.....	24
3.4.2 Autonoom systeem	24
4 Beïnvloeding van het rendement.....	25
4.1 Bestraling.....	25
4.2 Oriëntatie en helling van de modules	26
4.3 Beschaduwing.....	27

4.4	Temperatuur.....	27
4.5	Ventilatie	28
4.6	Verliezen veroorzaakt door de verschillende componenten	28
4.7	Overzicht verliezen.....	29
5	BIPV (Building Integrated Photovoltaics)	30
5.1	Dak geïntegreerde zonnepanelen	31
5.1.1	Hellende daken.....	31
5.1.1.1	Opgebouwde systemen.....	31
5.1.1.2	Geïntegreerde systemen	32
5.1.2	Platte daken.....	33
5.1.2.1	Opgebouwde systemen.....	33
5.1.2.2	Geïntegreerde systemen	34
5.2	Fotovoltaïsche façades	35
5.3	Transparante systemen.....	36
5.4	Zonnewering systemen	36
5.5	Niet bouw gerelateerde toepassingen.....	36
6	Besluit.....	37
7	Hybrid PhotoVoltaic/Thermal technologie	38
7.1	Algemeen.....	38
7.2	Verschillende types PV/T systemen	39
7.2.1	PV/T panelen	39
7.2.2	PV/T collectoren	39
7.3	Beïnvloedingsfactoren (keuze type en warmtebron).....	40
7.3.1	Bedekte versus onbedekt PV/T systeem	40
7.3.2	Type fluidum.....	40
7.3.3	Energiebeschouwingen	40
7.4	Conclusie	41
Deel 2.....		42
1	Inleiding.....	43
	Symbolenlijst	44
2	Theoretische ontleding warmtebalans	45
2.1	Vooraf.....	45

2.2	Principes	47
2.2.1	Warmtebron: Zonnestraling.....	47
2.2.2	Conductie.....	47
2.2.3	Warmteoverdracht door straling	48
2.2.4	Convectie.....	49
2.3	Lokale warmteoverdrachten	50
2.3.1	Vooraf.....	50
2.3.2	Warmteafvoer aan de voorkant van het zonnepaneel	50
2.3.3	Warmteafvoer door een spouw achteraan het zonnepaneel.....	50
2.3.3.1	Thermische Trek	51
2.3.3.2	Windgeïnduceerde ventilatie	51
2.3.3.3	Actieve ventilatie/koeling.....	52
2.3.3.4	Tegenwerkende kracht: hydraulische weerstand van de spouw	52
2.3.3.5	Stromings- en temperatuurprofielen in de spouw.....	53
2.3.3.6	Optimale spouwdiepte	59
2.3.3.7	Invloed van de spouwlengte	60
2.3.4	Invloed spouw onderdak	60
2.3.5	Invloed dakopbouw.....	60
2.3.6	Invloed helling	61
2.4	Principe-voorstel geïntegreerde panelen met ventilerende spouw	62
2.5	Besluit.....	64
3	Poging tot modelleren.....	65
3.1	Inleiding	65
3.2	Warmteoverdrachten.....	66
3.2.1	Warmteoverdracht doorheen dakopbouw	66
3.2.2	Warmteoverdracht naar omgeving.....	66
3.2.3	Warmteoverdracht door/ in de spouw	66
3.2.4	Totale energiebalans	68
3.2.4.1	Geïntegreerd systeem	68
3.2.4.2	On-top systeem	68
3.3	Numerieke uitwerking.....	69
3.3.1	Bepaling warmteoverdrachtscoëfficiënt dakopbouw	69

3.3.2	Bepaling massadebiet.....	69
3.3.2.1	Geometrische eigenschappen	69
3.3.2.2	Afgeleide geometrische eigenschappen	70
3.3.2.3	Wrijvingsfactoren	70
3.3.2.4	Windkarakteristieken	70
3.3.2.5	Fysische parameters.....	70
3.3.2.6	Netto warmtetoevoer en stratificatie parameter	70
3.3.3	Keuze parameters.....	70
3.3.4	Resultaat.....	71
3.4	Vereenvoudigde methode.....	72
3.5	Besluit.....	73
4	De meetopstelling	74
4.1	inleiding	74
4.2	Beschrijving van de meetopstelling.....	75
4.2.1	De omgeving.....	75
4.2.2	De constructie	76
4.2.3	De installatie.....	78
4.2.3.1	KoraSun panelen	78
4.2.3.2	Omvormer	79
4.2.4	De meetopstelling	80
4.3	Verwachtingen	84
4.4	Verwerken van meetresultaten	86
4.5	Meetresultaten.....	88
4.5.1	Meetresultaten.....	88
4.5.2	Temperatuursverloop.....	89
4.5.3	Ogenblikkelijk vermogen	91
4.5.4	Type dagen	93
4.5.5	Invloed van de wind	98
4.5.6	Totaal geleverd vermogen.....	100
4.5.6	Irradiantie	102
4.5.7	Fictieve koeling.....	102
4.6	Besluit proefopstelling	104

5	Besluit deel II	105
	Algemeen besluit.....	106
	Bibliografie	107
	Figuren bronnenlijst	112
	Tabellen bronnenlijst.....	114
	Bijlage A: On-top zonnepaneel in Autocad	115
	Bijlage B: KoraSun zonnepaneel in Autocad.....	117
	Bijlage C: Technische fiche KoraSun zonnepaneel	118

Inleiding

Bij de lancering van een nieuw type zonnepanelen, KoraSun, ondervindt Koramic enige vooroordelen bij de installateurs en concurrent-producenten. De zonnepanelen dienen rechtstreeks op de dakpannen bevestigd te worden, welk de PV-panelen naadloos integreert in het dakvlak. Bij courante toepassingen worden de zonnepanelen op een kader bevestigd bovenop het dakvlak. In eerste instantie vooral omdat dit een universele oplossing is voor elk type dakbedekking. Echter heeft dit als bijkomstig voordeel dat hierdoor een spouw onder de zonnepanelen gecreëerd wordt. Door luchtcirculatie in deze spouw zullen de panelen beter kunnen afkoelen. Deze lagere werkingstemperatuur heeft dan weer een gunstig effect op het totaal geleverd vermogen van de zonnepanelen.

Deze spouw ontbreekt bij de KoraSun panelen. Vandaar de vraag van Koramic om na te gaan welke invloed deze heeft op het rendement van zonnepanelen. Hiervoor werd een testdak op hun bedrijventerrein geïnstalleerd en geïnstrumenteerd. Op dit testdak werden twee verschillende installaties voorzien: een waarbij zonnepanelen op een kader enkele cm's boven het dakvlak werden geplaatst, de zogenaamde On-top installatie, en een waarbij de KoraSun panelen rechtstreeks op de pannen werden geplaatst. De resultaten hiervan worden uitvoerig besproken in deel II.

Om tot een beter begrip te komen van wat er precies in zo'n spouw gebeurt, werd in dit deel ook een uiteenzetting gedaan aan de hand van een literatuurstudie.

Alvorens hier verder op in te gaan, leek het nuttig om eerst de werking van zonnepanelen te beschrijven. Dit is in het eerste deel terug te vinden samen met een inventaris van de huidige fotovoltaïsche toepassingen in de bouw. Om dit onderdeel af te sluiten werd wat dieper ingegaan op PV/T systemen, die naast de omgezette elektrische energie ook de thermische energie onttrekken aan de omgeving. Dergelijke systemen werken onder andere op actieve ventilatie. In Deel II komt vooral de invloed van passieve ventilatie naar voor.

Deel 1

Fotovoltaïsche Toepassingen

1 Waarom zonnepanelen?

Het grootste gedeelte van de energie werd eeuwenlang geleverd door een combinatie van mens, dier, water, wind,... Sinds de industriële revolutie en tot op de dag van vandaag is de energievraag immer blijven stijgen waardoor men, als noodzakelijk gevolg, meer en meer energie uit fossiele en nucleaire brandstoffen dient te exploiteren.[1]

Uit wetenschappelijke studies blijkt dat deze brandstoffen niet oneindig beschikbaar zullen zijn, en dat de mensheid dus op zoek moet gaan naar andere energiebronnen om aan de energiebehoefte te voldoen. Het gebruik van deze brandstoffen brengt bovendien een ander groot probleem met zich mee, namelijk het probleem van de milieuvervuiling. Het verwerken van fossiele en nucleaire brandstoffen zorgt voor uitstoten die schadelijk zijn voor het milieu, omdat ze ondermeer koolstofmonoxide en -dioxide,... bevatten. Deze stoffen hebben een negatief effect op het milieu en het klimaat; het broeikas effect is daar het meest prominente voorbeeld van.[2]

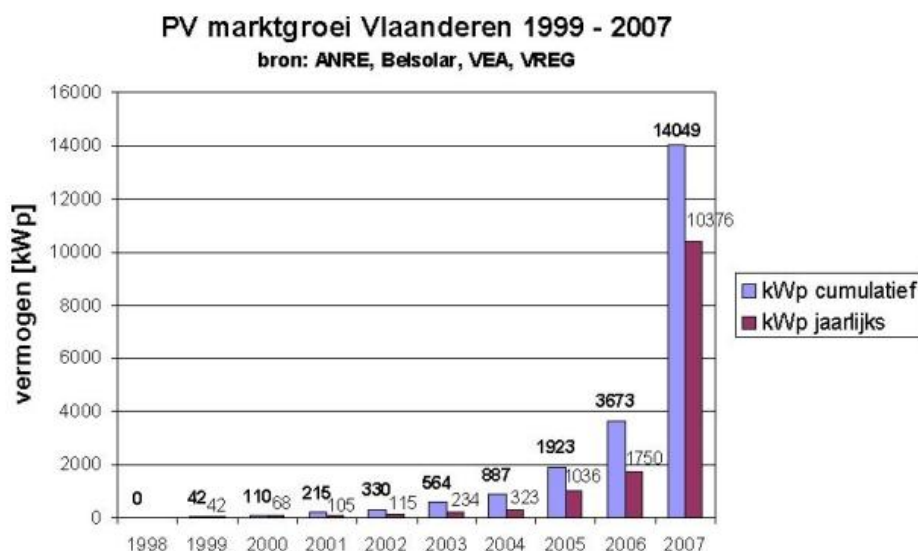
Voor deze problemen dienen dringend oplossingen gevonden te worden. Dat kan gebeuren door een rationele omgang met het energiegebruik en door de aanwending van hernieuwbare energie (zonne-energie, windenergie,...).

*'In one hour, the sun provides enough energy to supply the world's energy needs for one year.
In one day, it provides more energy than the world's population could consume in 27 years.
The sun's energy is free, and the supply is abundant. All we need to do is find a way to use it.'*[3]

In niet meer dan één uur kan de zon dus voorzien in de jaarlijkse energienoden van de ganse aarde. Het zou bijzonder onverstandig zijn om deze bron, die ons kosteloos ter beschikking staat, niet optimaal aan te wenden. Sinds de eeuwwisseling heeft zich hieromtrent dan ook een belangrijke mentaliteitswijziging voorgedaan, in het bijzonder wat het gebruik van zonnepanelen betreft.

Alhoewel zonnepanelen meer winstgevend zijn op grote lege vlaktes, kent men toch een aanzienlijke stijging in de meer dichtbevolkte gebieden. Dit kan verklaard worden door het feit dat men voor de plaatsing van zonnepanelen slechts enkele vierkante meters oppervlakte nodig heeft. Door de zonnepanelen te plaatsen op de gebouwschil kan men het tekort aan open vlaktes in Europa terugdringen. Niet alleen de integratie van zonnepanelen op gebouwen maar ook de subsidies die de overheid ter beschikking heeft gesteld de voorbije jaren heeft geleid dat zonnepanelen een grote opmars hebben gekend in België en de rest van Europa.

Tabel 1.1: Marktgroei van zonnepanelen in Vlaanderen



Tabel 1.1 laat zien dat de groene zonne-energie in de periode van 1999 tot 2007 een marktexplosie teweeg heeft gebracht in Vlaanderen. 1998 was het jaar waarin de Vlaamse overheid begonnen is met investeren in netgekoppelde fotovoltaïsche systemen op gebouwen (van particulieren en bedrijven).[4] Sindsdien is het milieubewustzijn en het gebruik van alternatieve wijzen om energie op te wekken sterk toegenomen.

In Juni 2009 is de nieuwe Europese richtlijn *'bevordering van het gebruik van energie uit hernieuwbare bronnen'* van kracht gegaan. Deze richtlijn heeft als doel om de broeikasgassen in Europa te laten dalen met 20% tegen 2020, teneinde een bijdrage te leveren aan de wereldwijde stabilisatie van de broeikasgassen.[5] Zonne-energie is een van de meest aangewezen manieren om deze groene energie op te wekken. Bij het gebruik van zonne-energie komen er immers geen milieubelastende stoffen vrij die schadelijk zijn voor de gezondheid van de mens en voor het milieu. Door de daarmee gepaard gaande besparingen in conventionele elektriciteitsproductie zullen de emissies van schadelijke stoffen aanzienlijk verkleinen.[6] Zonne-energie is hernieuwbaar omdat ze als onuitputtelijk wordt beschouwd.

Het gebruik van deze energiebron levert alleen maar voordelen en biedt tegelijk een oplossing voor de eindigheid van fossiele en nucleaire brandstoffen en zo ook voor het milieuprobleem.

2 Historiek

Zonnecel technologie dateert uit 1839 wanneer de Fransman Alexander Edmund Becquerel (de grootvader van Henri A. Becquerel, de ontdekker van radioactieve straling) het fotonvoltaïsche effect ontdekte. Hij merkte dat elektrische ladingen ontstonden uit door licht opgewekte chemische reacties.

Aanvankelijk schonk men nauwelijks aandacht aan Becquerel's bevindingen. Pas wanneer, enkele tientallen jaren later, Charles Fritts het fotonvoltaïsche effect aantoonde in een vast materiaal (selenium = half geleider) werden de resultaten van deze experimenten ernstig genomen. Maar omdat het rendement van dit proces hooguit 2% bedroeg en het materiaal ook te kostbaar was, werden er in dit stadium geen praktische toepassingen nagestreefd.[7]

In 1954 werd de eerste efficiënte silicium zonnecel gecreëerd door de Amerikaanse wetenschappers Chapin, Fuller en Pearson. De zonnecel had een rendement van 4%, later werd een rendement van 11% gehaald.[8]

Niet veel later, in 1958, werden de eerste zonnecellen gebruikt voor een praktische toepassing: de lancering van Vanguard 1, de eerste satelliet die functioneerde op elektriciteit opgewekt door de zon.[7] Door de hoge kostprijs werden deze echter vermeden voor elektrische toepassingen, ze werden enkel gebruikt wanneer er geen goedkopere alternatieven waren.

In 1959 werd er door Hoffman Electronics een zonnecel gecreëerd met 10% rendement (commercieel beschikbare fotonvoltaïsche cel).[8]

In begin jaren 70 was er veel interesse in alternatieve energiebronnen omwille van de grote oliecrisis: zonnepanelen, wind gedreven elektrische generatoren,... kwamen in de belangstelling te staan. De Amerikaan Dr. Elliot Berman ontwikkelde samen met Exxon Corporation een zonnecel die veel minder kostelijk was, de prijs werd gereduceerd van \$100 per Watt naar \$20 per Watt.

De eerste amorfe silicium zonnecel werd ontwikkeld in 1976 door Carlson en Wronski.[9]

Eind jaren 70 werd er door de overheden van verschillende ontwikkelingslanden subsidies uitgetrokken voor zonne-energie programma's. Zij waren meer gefocust op grote, gecentraliseerde zonne-energie centrales die verschillende hectaren grond besloegen. Vele ingenieurs realiseerden zich toen dat zonnecellen op de daken van individuele woningen konden gezet worden om te voldoen aan de energienoden.

Sindsdien heeft de overheid verschillende financiële stimulansen ontwikkeld om eigenaars aan te moedigen om zonnepanelen op hun dak te plaatsen.[10]

Sinds enkele jaren geleden geeft de federale overheid een belastingvermindering van 40% op de belastingfactuur en geeft de Vlaamse overheid productiesteun onder de vorm van groenestroomcertificaten. Daarnaast geven sommige gemeenten, provincies en netbeheerders nog een extra premie.[11] Sinds 2010 heeft de Vlaamse overheid de subsidies teruggeschoefd van 750€ naar 350€. De prijs van zonnestroomsystemen is momenteel nog te hoog, zonder de financiële steun van de overheid is het niet interessant (zelfs verlieslatend!) voor de gemiddelde consument om in zonnepanelen te investeren.[12] Als gevolg van nieuwe technologieën en ontwikkelingen daalt de prijs per Wattpiek snel. De installaties worden steeds compacter doordat de rendementen verhogen. De verwachtingen zijn dat de prijzen op lange termijn minstens met een factor 5 gaan dalen aangezien in het verleden de prijs van panelen telkens daalde bij iedere verdubbeling van de totale mondiale omzet.[13]

3 Beschrijving van de installatie

Hieronder worden de verschillende componenten, nodig voor een fotovoltaïsche installatie, kort besproken. Achtereenvolgens worden behandeld: de zonnecellen, de panelen, de omvormer en de netaansluiting.

3.1 De zonnecellen

Wanneer twee niet identieke halfgeleiders (deze atoombindingen kunnen immers gemakkelijk verbroken worden[14]) met elkaar in contact worden gebracht en aan het licht worden blootgesteld, komt een elektriciteitsstroom op gang tussen deze halfgeleiders. Men spreekt van een fotovoltaïsche omzetting. Fotovoltaïsch is een samenvoeging van het Griekse woord "*Photo*" (licht), en het woord "*voltaic*" (van Volt) wat letterlijk "*Volt verkregen door licht*" betekent.[15]

Een zonnecel bestaat meestal uit twee verschillend geladen lagen. Om een laagje positief of negatief op te laden maakt men gebruik van onzuiverheden.[16] Indien bijvoorbeeld silicium wordt genomen als basismateriaal voor een zonnecel dan kan men in de ene laag een kleine hoeveelheid fosfor (3-waardig atoom) aanbrengen, in de andere laag een kleine hoeveelheid borium (5-waardig atoom). Dit proces wordt doperen genoemd. Deze twee lagen zijn dan respectievelijk positief en negatief geladen.[17] Door deze verontreinigingen wordt er een overschot aan elektronen in de halfgeleiders verkregen. In de zonnecel ontwikkelt er zich zo een p-n junctie.

Indien men nu een stroomkring met spanningsbron aansluit op de zonnecel dan zou deze zonnecel dezelfde eigenschappen vertonen als een foto-diode. Door het invallende zonlicht op de zonnecellen zullen de fotonen op verschillende diepte (afhankelijk van de golflengte) in de halfgeleider worden geabsorbeerd. Indien zo'n foton voldoende energie bevat, kan het ervoor zorgen dat er een valentie-elektron van een atoom van het halfgeleidermateriaal wordt vrijgemaakt. Er zullen elektronen van het positieve laagje naar het negatieve laagje bewegen wanneer er gat-elektronen in de barrièrelaag worden gevormd. Door de stroming van gaten van de negatieve laag naar de positieve laag ontstaat er een potentiaalverschil tussen het p-n gebied.

Doordat niet alle fotonen elektron-gatparen vormen, sommige elektron-gatparen recombineren immers, blijft het rendement van zonnecellen beperkt (zie verder).[18]

Om de stroom te kunnen geleiden, wordt er een netwerk van dunne metallische aansluitingen (ook busbars genoemd) voorzien op de voorkant van de zonnecellen. Deze aansluitingen worden bekomen door opdamming¹. Op de achterzijde van de cel wordt meestal een dunne film van aluminium opgedampt.

3.1.1 Silicium zonnecellen

Silicium is het meest geschikte materiaal voor het gebruik als grondstof voor massaproductie van zonnecellen, of het nu van natuurlijke oorsprong is dan wel in een laboratorium werd vervaardigd. Het materiaal biedt tal van voordelen. De belangrijkste worden hier opgesomd. Silicium is omzeggens in onbeperkte hoeveelheden beschikbaar; bijna 60% van de aardkorst bestaat uit SiO₄. Het hoofdbestanddeel van dit SiO₄ is kwartsiet of siliciumdioxide (SiO₂). Aangezien dit natuurlijke silicium niet zuiver genoeg is voor de productie van zonnepanelen wordt het kwartsiet gereduceerd met cokes

¹ Opdammen is een depositietechniek om dunne lagen op een substraat aan te brengen.

via de EAF² methode. Hierdoor bekomt men een zuiverheid van 'slechts' 98 à 99% (dit is onbruikbaar voor elektrische toepassingen). Vervolgens wordt dit 'onzuivere' silicium verder gezuiverd totdat het onzuiverheidsgehalte een concentratie heeft van 0,1 ppma³. Dit betekent een zuiverheid van 99,99999%. Om het silicium te zuiveren kan men ook gebruik maken van metallurgische methodes zoals slakkenvorming en uitsmelten, al is deze zuiverheid nog altijd niet goed genoeg voor de halfgeleiderindustrie.

Verder is silicium ook niet giftig, smelt het gemakkelijk en kan het goed bewerkt en verwerkt worden.[7] Hierna worden de 3 meest gebruikte vormen besproken van silicium.

3.1.1.1 Mono-kristallijn silicium

Mono-kristallijn silicium haalt een rendement van 15 tot 18%.[19] Het totale marktaandeel van zonnepanelen met deze zonnecellen bedraagt ongeveer 43,4%. Deze zonnecellen worden echter minder gebruikt in de bouw vanwege hun hoge productiekost. Voor de productie van mono-kristallijn silicium gebruikt men de 'afval' of de overschot van de wafers (dunne plak kristallijn halfgeleidermateriaal) uit de micro-elektronica industrie.[20]

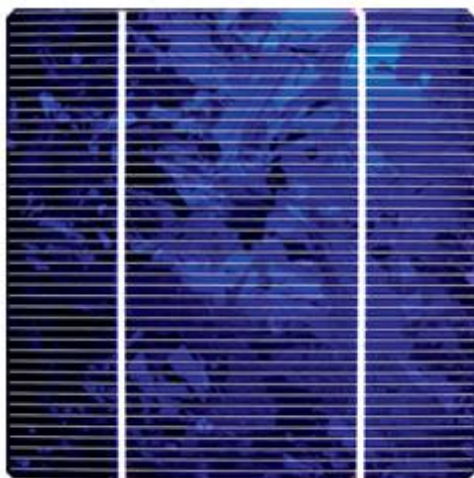
3.1.1.2 Polykristallijn silicium

Zonnecellen vervaardigd uit polykristallijne silicium hebben een rendement van 13 tot 16%. Deze zonnecellen hebben tegenwoordig een marktaandeel van 46,5% en worden het meest toegepast in de bouw.[19]

De zonnecellen worden gekenmerkt door de vele afzonderlijke kristalkorrels die gescheiden worden door korrelgrenzen. De korrelgrootten variëren van 1 tot 100mm. Voor de productie van polykristallijn silicium kan men twee verschillende productiemethoden beschouwen. Enerzijds de productie tot vorming van balken en anderzijds tot linten (zeer dunne plaatjes).[20]

3.1.1.2.1 Balken

De productie van polykristallijne zonnecellen begint bij het smelten van brokstukken silicium. Deze liquide substantie wordt vervolgens overgegoten in een grafieten kroes met vierkante sectie (hierdoor



Figuur 1.1: Polykristallijne silicium zonnecel

hebben de zonnecellen uiteindelijk een vierkante vorm terwijl men bij de mono-kristallijne zonnecellen een afgeronde vierkante vorm verkrijgt).[21] Door een gecontroleerde combinatie van afkoeling en verhitting zorgt men ervoor dat het mengsel koelt in een bepaalde richting. De bedoeling van deze gecontroleerde koeling is het vormen van een groot aantal silicium kristallen met een zo groot mogelijke celstructuur.[19]

Het gekoelde materiaal wordt dan in schijven gezaagd (wafers) met behulp van een draadzaag. Opmerkelijk is dat door het verzagen van deze balken er een materiaalverlies ontstaat van 50%.[19] De bekomen wafers hebben een benaderde dikte van 0,3mm.

² Electric Arc Furnace: Een vlamboogoven is een oven waarin het materiaal wordt opgewarmd door een vlamboog tussen de elektroden en het materiaal.

³ Parts per million atomic

Om tot de eigenlijke zonnecellen te komen ondergaan de ‘ruwe’ wafers nauwgezet enkele stappen. Eerst worden de schijven gepolierd, hierna volgt er een chemische reiniging (om eventuele fouten veroorzaakt door het verzagen te verwijderen), gevolgd door een doping met behulp van fosfor.[7]

3.1.1.2.2 Linten

Om het materiaalverlies van 50%, veroorzaakt door het verzagen van de polykristallijne balken, te vermijden heeft men verschillende lint-trek processen ontwikkeld. Bij deze processen trekt men dunne films rechtstreeks uit het gesmolten silicium.[20] Hierdoor hebben de bekomen silicium wafers al de noodzakelijk dikte. Deze methodes zijn veel economischer qua materiaalgebruik en energie en kunnen voor een significante kostenreductie zorgen. De EFG (Edge defined film-fed growth) methode is het meest gekend. Een achthoekige matrijs wordt gedoopt in gesmolten silicium en eruit getrokken aan een snelheid van 1 mm/s. Dit creëert een achthoekige pijp dat tot 6,5 meter in lengte kan worden. De wafers worden vervolgens uit de achthoekige vorm gesneden. De bekomen wafers hebben een afmeting van 10 cm op 12,5 cm en zijn 0,3 mm dik. Vervolgens worden dezelfde stappen ondernomen als bij de gezaagde wafers om de eigenlijke zonnecellen te bekomen.[19]

3.1.1.3 Amorfe cellen

De derde soort silicium zonnecellen, amorfe silicium cellen, hebben een rendement van 5 à 7%. Het beperkter materiaalverbruik en de eenvoudigere productie zorgen ervoor dat amorfe cellen minder kosten dan de voorgaande cellen. Deze zonnecellen hebben een marktaandeel van 4,7%. Een bijkomend voordeel van deze amorfe cellen is dat ze flexibel zijn en dus op eender welke dakvorm gelegd kunnen worden.[19]

Amorf silicium bestaat, in tegenstelling tot kristallijn silicium, uit een netwerk van Si atomen zonder een regelmatig geordend kristalrooster. Dit silicium wordt niet uit een blok silicium gezaagd zoals bij de voorgaande kristallijnmaterialen maar wordt op een ondersteunend materiaal “opgedampt”. [22] Eén van de grote voordelen van dit materiaal is het feit dat amorf silicium meer uniform is over grotere oppervlaktes. Aangezien amorf silicium van nature uit vele onzuiverheden bevat, zullen externe onzuiverheden of andere fouten de karakteristieken van het materiaal niet te veel wijzigen (en dus aantasten) en dit in tegenstelling tot mono- en polykristallijn silicium.[23] Zoals reeds gezegd ligt het rendement bij amorfe cellen aanzienlijk lager dan bij de kristallijne cellen. Dit komt doordat er relatief weinig silicium wordt gebruikt.[22]



Figuur 1.2: Toepassing van amorfe zonnecellen op het dak van een industrieloofs

Vaak worden er meerdere laagjes amorfe cellen op elkaar geplaatst om de efficiëntie te verhogen. Amorfe cellen kennen vele toepassingen; amorfe PV films, amorfe PV-lei modules, metalen dakbanen,

dakrollen. Ook worden ze gebruikt in kleinere toepassingen zoals polshorloges en zakrekenmachines.[24]

3.1.2 Koper-indium-diselenide

Door zijn afgeleide samenstellingen en de cadmiumsulfide kan men met koper-indium-diselenide (CuInSe_2), ook wel CIS genoemd, ook dunne-film zonnecellen maken op glas. Deze zonnecellen hebben een marktaandeel van 0,2%. CIS modules zijn vandaag de dag de meest efficiënte dunne-film modules die er op de markt verkrijgbaar zijn. Deze zonnecellen zijn op zeer kleine oppervlakten ($\pm 0,4\text{cm}^2$) zeer efficiënt, vermits ze in dat geval een rendement hebben van 18%. Dit rendement daalt al zeer snel naar een goede 9 tot 11% indien men overgaat naar grotere oppervlakten. Een nadeel is daarentegen de beperkte beschikbaarheid van de component indium.[24] Wanneer men overgaat naar massa productie dan zullen de productiekosten beduidend lager zijn dan die bij de kristallijne silicium cellen.[19]

3.1.3 Cadmiumtelluride

CdTe is een kristallijn mengsel van cadmium en tellurium. Het wordt meestal gecombineerd met cadmium sulfide om een p-n junction zonnecel te maken. Deze zonnecellen hebben een marktaandeel van 2,7%. Net zoals de CIS technologie zijn de CdTe cellen uiterst efficiënt op kleine oppervlakten en niet zo efficiënt op grotere. Ze behalen dan immers een rendement van 7 – 8,5%.[19] De CdTe technologie heeft de laagste productiekost van al de dunne- film zonnecellen en vergelijkende voor- en nadelen als bij CuInSe_2 , maar een bijkomend nadeel is de giftigheid van Cd bij breuk of afbraak van de modules.[25] Deze zonnecellen worden bijvoorbeeld ook nog gebruikt in zakrekenmachines.

3.1.4 Organische cellen

Om de productiekosten verder te laten dalen en minder afhankelijk te zijn van de materiaalvoorraad hebben wetenschappers zich de voorbije jaren bezig gehouden met het ontwikkelen van een nieuwe soort zonnecel, namelijk de organische zonnecel. De Zwitser Michael Grätzel lag aan de basis van deze zonnecel, in 1991 ontwierp hij de zogenaamde Grätzel cel. Basismateriaal voor deze zonnecel is de halfgeleider titanium dioxide (TiO_2).[19] Door het gebruik van organische materialen kunnen flexibelere, goedkopere, “plastieken zonnecellen” worden gecreëerd. Een van de nadelen is het gebruik van vloeibaar materiaal, wat stabiliteitsproblemen met zich meebrengt en dit vooral bij extreem hoge en lage temperaturen. Een ander nadeel van het gebruik van het vloeibare elektrolyt is de beperkte levensduur.[26] Ook is een organische zonnecel nogal gevoelig aan UV licht en oxidaties. De polymeren die gebruikt worden bij de organische zonnecellen zijn zeer duur maar omdat de actieve laag van de zonnecellen zoveel dunner is dan bij de andere, is er veel minder materiaal nodig waardoor de materiaalkost per vierkante meter heel laag wordt.[28] In tegenstelling tot de krystallijne zonnecellen stijgt de efficiëntie van organische cellen bij stijgende temperatuur. Ook blijken ze vrij tolerant ten opzichte van beschaduwing en lage instralinghoeken.[19] Organische zonnecellen behalen een rendement van 3 tot 5%.[17]

3.1.5 Andere zonnecel-concepten

De volgende zonnecellen worden in veel mindere mate gebruikt maar zijn toch het vernoemen waard. Er worden hier respectievelijk bolvormige, sliver, concentrator en hybride zonnecellen behandeld.

3.1.5.1 Bolvormige zonnecellen

Het idee achter bolvormige zonnecellen dateert uit de jaren 90 waar Texas Instruments de hoeveelheid aan materiaal voor zonnecellen wou reduceren. Al gauw stootten ze op problemen waardoor ze de zonnecellen niet op de markt brachten.[28] Een firma in Japan, Kyosemi Corporation heeft nu echter een bolvormige zonnecel gecreëerd met een diameter van 1 à 1,2 mm. Het oppervlak van zo'n zonnecel is n-gedopeerd terwijl de inhoud p-gedopeerd is.[19] Door hun bolvorm kunnen de zonnecellen gereflecteerd licht,

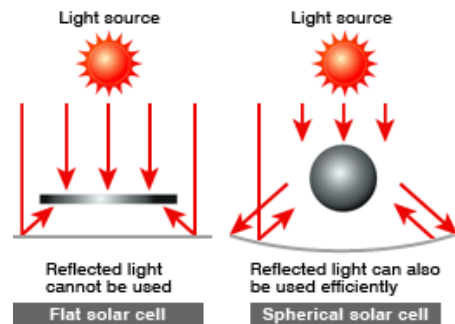


Figuur 1.4: Bolvormige zonnecel

ze in meerdere applicaties gebruikt kunnen worden.[29] De bekomen zonnecellen hebben een rendement van 9,5%.[19]

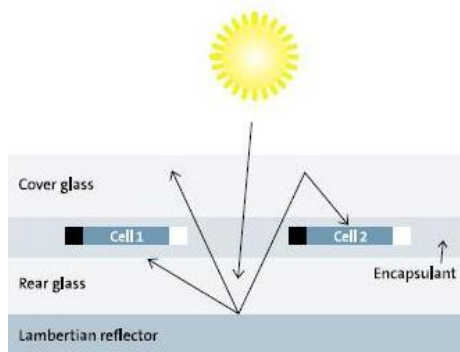
veroorzaakt door hexagonale reflectoren onder de zonnecel, opvangen terwijl dit bij de standaard zonnecel verloren gaat.

Het grote voordeel van deze zonnecellen is, zoals eerder gezegd, de grote besparing van materiaal. Er wordt namelijk maar 1/5 van het materiaal voor een standaard zonnecel gebruikt.[28] Door hun vorm geven de zonnecellen het zonnepaneel een zekere vorm van flexibiliteit doordat hun structuren niet vlak dienen geïnstalleerd te worden zodat



Figuur 1.3: Terugkaatsing door hexagonale vorm

3.1.5.2 Sliver zonnecellen



Figuur 1.5: Sliver zonnecel

doordat hun structuren niet vlak dienen geïnstalleerd te worden zodat

Sliver zonnecellen zijn dunne strookjes zonnecellen bekomen uit een 1 mm dikke mono-kristallijne wafer. De wafer wordt geëetst om 0,05 mm dunne strips te verkrijgen. De wafer wordt versneden tot strips van 10 cm lang, 1 mm breed en 0,05 mm dik. De strips worden tussen twee glasplaten gebracht voorzien van een spatie. Hierdoor kan er meer licht gebruikt worden door hetzelfde aantal zonnecellen.[19] Door een reflector te plaatsen aan de onderzijde wordt het licht dat in de opening valt teruggestraald naar de module. De bekomen zonnecellen hebben een rendement van 17,7 (100% dekkingspercentage) tot 13% (50% dekkingspercentage). Door gebruik te maken van openingen tussen de verschillende

3.1.5.3 Concentrator zonnecellen

cellen verlaagt de temperatuur van de cellen met 5°C à 6°C, dit verhoogt de efficiëntie van de module.[30]

De halfgeleiders uit groep III en groep V (InGaAs, InGaPh, germanium, ...) uit de periodieke tabel van Mendeljev maken de productie van uiterst efficiënte zonnecellen mogelijk. Concentrator zonnecellen zijn opgebouwd uit meerdere zonnecellen, gemaakt uit verschillende materialen en optimaal voor een bepaald zonnenspectrum, die op elkaar gestapeld zijn. Aangezien deze materialen zeer kostelijk zijn, wordt er door middel van concentrerende spiegels en lenzen zonlicht gebundeld en geconcentreerd op kleine cellen (meestal enkele vierkante millimeters).[24] Deze zonnecellen worden meestal uitgerust

met een sun tracking device omdat enkel directe straling geconcentreerd kan worden. Daarom worden deze zonnecellen niet gebruikt in onze contreien. De zonnecellen halen een rendement van 39%. [19]

3.1.5.4 Hybride zonnecellen

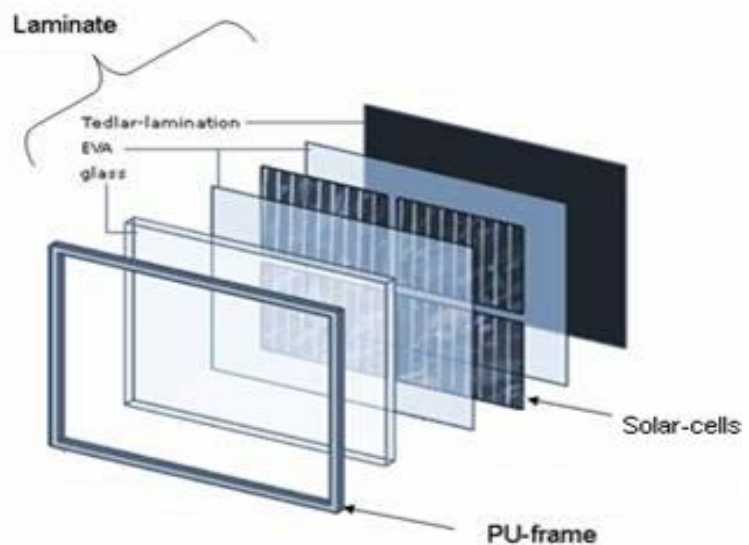
Hybride zonnecellen ofwel HIT (heterojunction with intrinsic thin layer) bestaan uit een single junction-amorf-silicium-zonnecellen. [31] Een mono-kristallijne wafer zorgt voor de basis van de HIT zonnecel, aan de boven- en onderkant van de wafer wordt een dunne laag amorf silicium aangebracht. Door deze combinatie creëert men een zonnecel die veel beter presteert bij hogere temperaturen en werkt bij een breder zonnenspectrum. Het vermogen daalt per graad Celsius immers maar met 0,33% terwijl dit bij een gewone kristallijne cel 0,4 à 0,6% is. Hybride zonnecellen halen een rendement van 18,5%. [19]

3.2 Opbouw van een paneel

Losse zonnecellen kunnen niet gebruikt worden om elektriciteit op te wekken: ze zijn immers breekbaar, de metalen componenten zijn vochtgevoelig en ze wekken een te kleine spanning en stroom op. Daarom worden de zonnecellen met elkaar verbonden door middel van gesoldeerde ribbons. [32] Men kan de zonnecellen ofwel in serie ofwel in parallel met elkaar verbinden. Men kiest voor serie geplaatste zonnecellen indien men een hoger voltage wenst. In die gevallen waarbij men werkt met modules met een groter uitgangsvermogen worden verschillende in serie geplaatste zonnecellen parallel geschakeld. [19]

Een zonnepaneel bestaat uit een licht doorlatende plaat (meestal glas, maar kan ook kunststof zijn). Het is belangrijk dat de plaat voldoende licht doorlaat. Hierom wordt wit glas gebruikt met een laag ijzer gehalte, hierdoor wordt 92% van het licht doorgelaten. De resterende 8% wordt meestal veroorzaakt door reflectie, daarom voorzien fabrikanten een anti-reflecterende laag op het glas. Door deze laag aan te brengen kan men de reflectie herleiden tot slechts 3%. [19] Door deze laag krijgen de silicium zonnecellen hun blauwe kleur. Andere kleuren zijn mogelijk mits men de samenstelling van de antireflecterende laag verandert.

Het rendement zal hierdoor echter dalen. [1] Aan de achterkant wordt een beschermende folie geplaatst: de tedlar (voor transparante zonnecellen wordt een glazen plaat gebruikt). Deze laag zorgt voor de waterdichtheid, dampdichtheid en warmtegeleiding. [24] Om de zonnecellen te beschermen tegen spanning, weersomstandigheden en vochtigheid worden de zonnecellen in een transparant bindingsmateriaal geplaatst. Dit materiaal zorgt er immers ook voor dat de cellen elektrisch geïsoleerd zijn. Er zijn 4 verschillende inkapseling materialen op de markt: EVA, polyvinyl butyral, teflon en hars. EVA (ethyl vinyl acetaat) wordt het meest toegepast.



Figuur 1.6: Opbouw van standaard zonnepaneel

Het geheel wordt vervolgens in een laminator geplaatst; hierin wordt alles verhit zodat alles met elkaar versmelt en er één geheel ontstaat. Tenslotte wordt er een aluminiumkader (PU kader) voorzien ter bescherming en voor de bevestiging.[22]

3.3 Omvormer

De omvormer is van groot belang bij fotovoltaïsche systemen. Hij zorgt ervoor dat de gelijkspanning wordt omgezet in wisselspanning en zorgt tegelijk voor een optimaal werkpunt (MPP⁴) voor de zonnepanelen.[33] De MPP van zonnepanelen varieert naarmate de klimaat condities ook veranderen. Door middel van een MPP tracker wordt dit optimale werkpunt gevonden.[19] Indien verschillende zonnepanelen met elkaar worden verbonden, dan dienen deze een gelijkaardige oriëntatie en hellingshoek te hebben (dit is bijvoorbeeld niet zo bij zonnepanelen die zich aan weerskanten van een nok bevinden). Indien zij dit niet hebben dan zullen de stromen in de verschillende strings (een string = een in serie geplaatste groep zonnepanelen) ongelijk zijn, hierdoor kan de MPP tracker geen eenduidige MPP vinden. Een omvormer met 2 of meer MPP trackers kan hier soelaas brengen.[33] Algemeen geldt dat de MPP voor twee verliezen zorgt. Men heeft namelijk de zoekverliezen, de omvormer moet namelijk altijd naar het maximum zoeken in de vermogenskarakteristiek. Dit kan door de spanning te fluctueren. Hierdoor zal de spanning rond de MPP spanning variëren waardoor het vermogen ook altijd lager of gelijk gaat zijn aan het vermogen bij de MPP. Een tweede soort verliezen verkrijgt je door de zogenaamde rimpelstroomverliezen. Deze komen voor bij 1-fase omvormers. Doordat deze omvormers een fluctuerend vermogen doorleveren aan het net en doordat de omvormers een beperkte opslagcapaciteit hebben leidt dit tot een rimpelspanning op het PV-array. Het verlies is afhankelijk per type omvormer en wordt geschat op ongeveer 1,5% van de DC-energie.[98]

De omvormer staat ook garant voor de kwaliteitsbewaking van de stroomlevering aan het elektriciteitsnet en de beveiliging. De omvormer wordt liefst zo dicht mogelijk bij de elektriciteitskast van de woning geplaatst om de weerstandsverliezen te reduceren. Bij netgekoppelde fotovoltaïsche systemen is een synchrone omvormer nodig, deze zorgt er immers voor dat de geleverde stroom in fase is met de netstroom. Hierdoor kan men elektriciteit, die niet onmiddellijk wordt verbruikt, doorvoeren naar het elektriciteitsnet.

Doordat de omvormer werkt onder een vaste spanning is het nodig dat de zonnepanelen dusdanig geplaatst zijn dat ze deze vaste spanning voorzien. Meestal is hiervoor een combinatie van in serie en parallel geschakelde zonnepanelen nodig.[34]

Omvormers zijn slechts in bepaalde vermogens beschikbaar. In West-Europese klimaatvoorwaarden is het aanbevolen om het vermogen van de omvormer lager te kiezen dan het vermogen van de serie aangesloten PV-panelen (onderdimensionering). Het gelijkstroomvermogen van de omvormer mag tot 20% lager liggen.[32]

Het aantal en het vermogen van de omvormer is bepaald door het totale piekvermogen van het PV systeem (en dus door het aantal panelen). Bij de keuze van het type omvormer moet men altijd in het achterhoofd houden dat de efficiëntie van zo'n omvormer in sterke mate afhangt van de spanning. Indien men immers een omvormer kiest waarbij het bereik veel lager is dan het maximale vermogen van een PV-systeem dreigt men een deel van de spanning te verliezen doordat de spanning wordt afgevlakt door de omvormer (de omvormer heeft een bepaalde minimum en maximum grens, indien de spanning hiertussen valt zal hij deze naar het spanningsnet sturen).[19] Indien men te veel panelen

⁴ Maximum power point: de omvormer zoekt voortdurend naar het punt waarbij het product van paneel-stroom en spanning (=vermogen) maximaal is

aansluit op de omvormer kan men de levensduur ervan negatief beïnvloeden, te weinig panelen leveren dan weer een lager rendement op.[33]

3.4 Netaansluiting

Zonnepanelen kunnen op twee manieren worden gebruikt. Enerzijds is er het netgekoppelde systeem, anderzijds het autonome systeem.

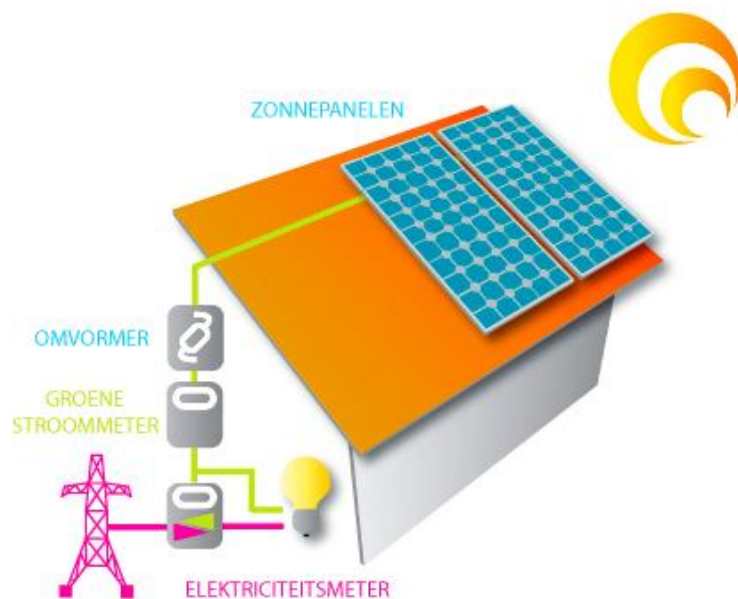
3.4.1 Netgekoppelde fotovoltaïsche systemen

Een netgekoppeld systeem wordt gekenmerkt door het ontbreken van een batterij. Bij een netgekoppeld systeem wordt immers het overschot (en/of tekort) aan stroom geleverd aan (en door) het elektriciteitsdistributienet.

Wanneer de hoeveelheid zonne-straling van die aard is dat er meer stroom gegenereerd wordt dan er verbruikt kan worden dan vloeit het teveel aan stroom terug naar het openbare net.[35] In dit geval zal de elektriciteitsmeter terugleveren. Voorwaarde hiervoor is wel dat de gebruiker een teruglevermeter heeft geplaatst. De terug-geleverde stroom wordt dan in mindering gebracht op de geleverde stroom (=salderen). Je krijgt dus als het ware een vergoeding als producent voor het leveren van groene stroom.

Het terugleveren van groene stroom is wettelijk beperkt tot een maximum van 3000kWh per jaar.[33]

Zoals hierboven reeds aangegeven, is de omvormer de belangrijkste component van de totale installatie. Deze omvormer zorgt ervoor dat de gelijkspanning wordt omgezet tot een normale netspanning (230V, 50Hz).[36]



Figuur 1.7: Netgekoppeld systeem

3.4.2 Autonoom systeem

Autonome systemen, ook stand-alone systemen genoemd, zijn systemen die niet gekoppeld zijn aan het elektriciteitsnet. Overdag wordt er elektriciteit geproduceerd door middel van de zonnepanelen. Deze elektriciteit wordt rechtstreeks naar de verbruiker gevoerd. Het overschot van deze elektriciteit wordt opgeslagen in accu's zodat 's nachts het object of de machine kan blijven functioneren.[35] Autonome systemen worden vooral gebruikt bij kleinschalige toepassingen; parkeermeters, auto's, ... maar worden ook toegepast bij woningen die heel afgelegen liggen en waarvoor het niet economisch verantwoordelijk en financieel mogelijk zou zijn om een aansluiting te voorzien op het netgekoppeld systeem.



Figuur 1.8: Parkeerautomat met zonnecellen

4 Beïnvloeding van het rendement

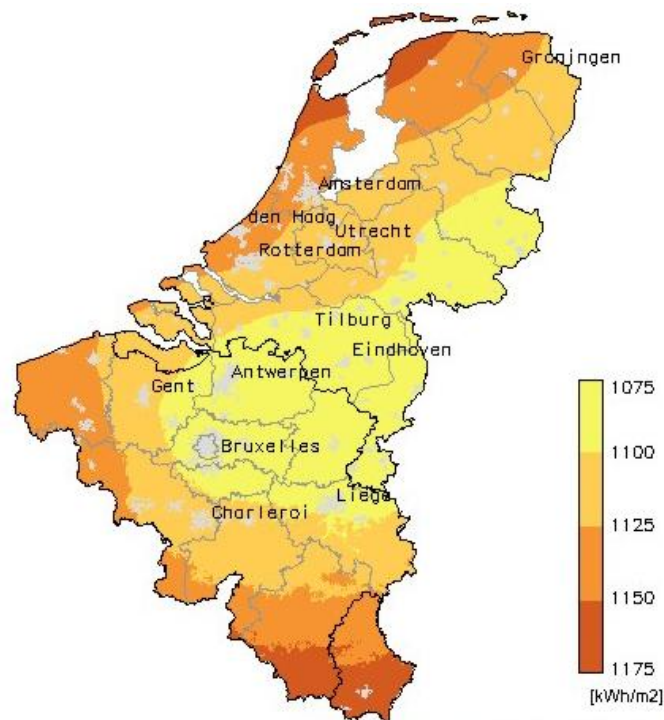
De elektriciteitsproductie van de geïnstalleerde PV-systemen hangt af van tal van factoren. Naast het klimaat zijn ook het systeemontwerp en de omgeving van invloed op de opbrengst.

Hieronder worden de belangrijkste factoren besproken die de opbrengst (nadelig) beïnvloeden.

4.1 Bestraling

De belangrijkste factor voor de opbrengst is de hoeveelheid invallend zonlicht op de zonnepanelen. Ook op dagen met beperkte zonnestraling werken de zonnecellen. Wanneer de zonnestraling de atmosfeer van de aarde binnendringt gaat een deel van de invallende energie verloren door verstrooiing of absorptie door luchtmoleculen, wolken en aerosols⁵. De straling die niet gereflecteerd of verstrooid wordt en die de aarde rechtstreeks bereikt, wordt directe straling genoemd. De straling die de ontvanger bereikt nadat deze door de luchtmoleculen wordt verspreid wordt diffuse straling genoemd. Het is ook mogelijk dat straling wordt gereflecteerd na in contact te zijn gekomen met de ondergrond. Dit wordt albedo⁶ genoemd.

De hoeveelheid straling die de oppervlakte bereikt is natuurlijk extreem variabel. Naast de dagelijkse en jaarlijkse regelmatigheid door de beweging van de zon, zijn er ook de onregelmatige variaties die veroorzaakt worden door het klimaat (wolkenbedekking e.d.).[21] In onderstaande figuur wordt de jaarlijkse globale zonne-instraling bij optimale oriëntatie van een PV module in België en Nederland weergegeven.



Figuur 1.9: Jaarlijkse globale instraling bij optimale oriëntatie

⁵ Een aerosol is een colloïde bestaande uit zeer kleine vaste of vloeibare deeltjes die gesuspendeerd zijn in een gas

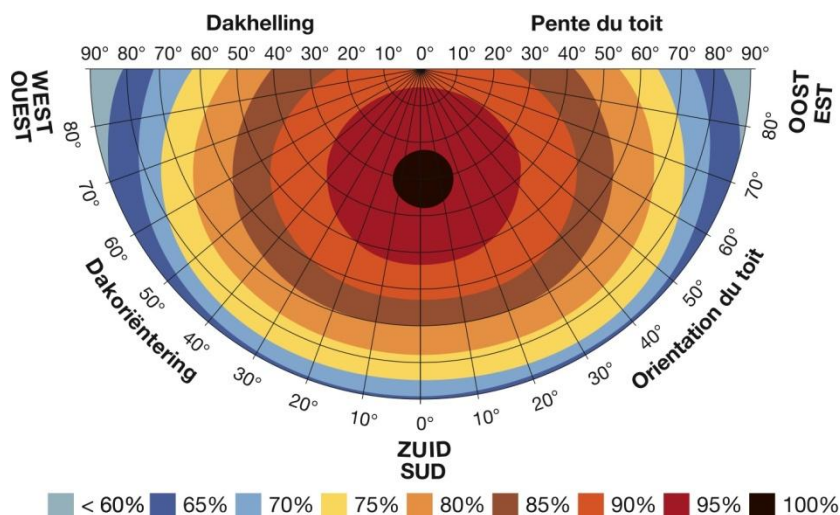
⁶ Weerkaatsingvermogen

Een exacte kennis van het pad van de zon is dus zeer belangrijk om de straling en de opbrengst te berekenen bij een toekomstig ontwerp. De stand van de zon wordt beschreven door middel van twee hoeken: de azimut (de hoek tussen de zon en het Zuiden) en de elevatiehoek (hoek tussen horizon en invallende licht).[19] Door de beweging van de zon is de hoeveelheid straling niet altijd gelijk doorheen het jaar. In de winter staat de zon bijvoorbeeld veel lager aan de hemel dan in de zomer waardoor ze ook vlugger ondergaat wat resulteert in minder uren zonlicht.[37] Niet alleen de zonuren maar ook het feit dat het zonlicht een langere weg dient af te leggen in de winter leidt tot verliezen. Zo zal een groot deel van het zonlicht geabsorbeerd en verstrooid worden (door wolken, vochtigheid, pollutie) waardoor er meer verliezen zijn. In de zomer zal daarom de opbrengst van de zonnepanelen veel hoger liggen dan in de winter.[19]

Omdat de beweging en stand van de zon het vergelijken tussen verschillende zonnepanelen bemoeilijkt wordt het vermogen van zonnepanelen bepaald aan de hand van standaardcondities. Deze standaardcondities zijn: een bestraling van 1000 Watt/m², waarbij het spectrum hiervan dient overeen te komen met het spectrum van zonlicht bij een luchtmassa⁷ van 1,5 en een celtemperatuur van 25°C.[38] Het piekvermogen (Wp, Wattpiek) is het maximale elektrische vermogen dat een zonnepaneel behaalt onder deze omstandigheden. De luchtmassa wordt in belangrijke mate bepaald door de breedtegraad waarin de installatie zich bevindt. Zo zal een installatie die dicht bij de evenaar ligt minder verliezen opmeten (luchtmassa ± 1) dan een installatie die zich in België bevindt.

4.2 Oriëntatie en helling van de modules

Een zuidgerichte opstelling is volgens onderstaande figuur het meest ideaal voor het plaatsen van een fotovoltaïsche installatie. In België is de optimale plaatsing deze waarbij men de zonnepanelen naar het zuiden richt onder een hoek van 36°. Men merkt op dat er zeer hoge rendementen (90% en hoger) kunnen behaald worden voor oriëntaties gelegen tussen het zuidoosten en het zuidwesten en voor hellingshoeken van 20° tot 60°. In België bestaat 60% van de zonnestraling uit diffuse straling.[24] Wegens het grote aandeel van dit indirecte licht hebben de oriëntatie en de hellingshoek van de PV panelen, onverwacht, een minder grote invloed.[32] Men merkt ook op dat zonnepanelen die geplaatst zijn tegen een gevel (en dus 90°) tot 25% - 30% minder rendement opleveren dan de ideale opstelling (wat niet bijzonder veel is).[24]



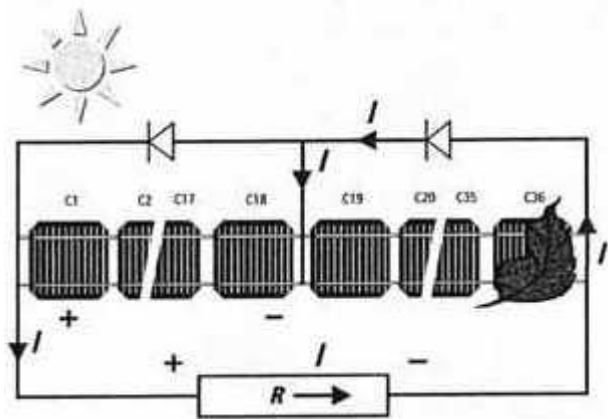
Figuur 1.10: Beïnvloeding van de oriëntatie op het rendement(in België)

⁷ het spectrum van zonlicht dat overblijft na filtering door lucht over een afstand gemeten door de atmosfeer welke een factor in weglengte langer is dan de kortst mogelijke. Wanneer de zon op de middag verticaal boven het aardoppervlak staat = luchtmassa 1, luchtmassa 1,5 = spectrum van zonlicht na afleggen van anderhalf maal lange weg door atmosfeer

4.3 Beschaduwning

Een van de belangrijkste factoren waar men bij de dimensionering van PV-panelen zeker rekening mee moet houden is de beschaduwning van de zonnepanelen. Wanneer zonnepanelen volledig beschaduwde zijn, of wanneer slechts een klein deel ervan wordt beschaduwde, dan kan dit een nefast gevolg hebben voor het rendement. Bij verschillende proefopstellingen heeft men immers gemerkt dat de energieopbrengst drastisch daalt indien men meerdere of zelfs maar 1 cel beschaduwde (zo krijgt men praktisch geen vermogen meer indien 1 rij zonnecellen beschaduwde is).[19]De beschaduwde zonnecellen vangen hierdoor minder lichtinstraling op wat resulteert in een lagere stroom, aangezien de laagste stroom de totale stroom in de serie bepaalt, is het nodig om deze schaduw te vermijden. Mogelijke oorzaken van deze beschaduwning kunnen bijvoorbeeld bomen, schouwen, lantaarnpalen, ... zijn.

Onder bepaalde condities kan een beschaduwde cel zelfs zo hard opwarmen dat het materiaal beschadigd wordt en er zogenaamde hot spots worden ontwikkeld.[32] Neemt men nu het voorbeeld waar er een blad valt op een zonnepaneel zodat een van de zonnecellen wordt beschaduwde en als een weerstand beschouwd kan worden.



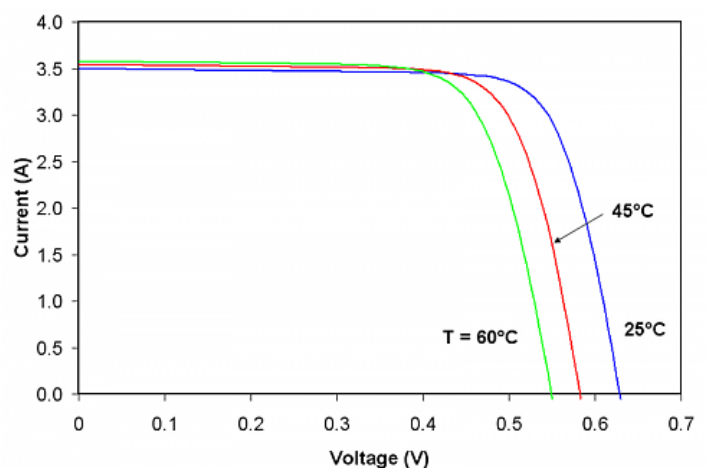
Figuur 1.11: Bypass diode

Doordat er geen stroom meer wordt gegenereerd in deze cel wordt er stroom gehaald van de omliggende zonnecellen zodat men een negatieve spanning krijgt. De stroom van de omliggende cellen stroomt nu door deze ene beschaduwde cel. Vervolgens wordt deze stroom omgezet in warmte. Wanneer er nu voldoende stroom vloeit door de beschaduwde cel, kunnen de juist vernoemde hot spots optreden. De spanning waarbij een hotspot wordt gegenereerd ligt tussen de 12V en 50V.[19]

Om dit fenomeen te verhelpen worden er zogenaamde bypassdiodes ingebouwd zodat de stroom toch voorbij een beschaduwde serie van zonnecellen kan.[39] Het beste resultaat wordt gegeven door een zonnepaneel waarbij elke zonnecel wordt voorzien van een bypass diode. In de praktijk wordt echter per 18 à 20 zonnecellen een bypass diode voorzien (om de kostprijs niet de hoogte in te laten schieten). Om het effect van schaduw op zonnepanelen voor te stellen kan men de omgeving in een software programma modelleren zodat men de beste schikking kan vinden door de verschillende parameters (stand van de zon, schaduw op verschillende bomen,...) te laten variëren.[19]

4.4 Temperatuur

Bij stijging van de temperatuur verhoogt ook de geleidbaarheid van de halfgeleiders waaruit een zonnecel bestaat. Hierdoor worden de elektronen mobieler waardoor het gemakkelijker wordt om gaten in het materiaal op te vullen. Zo verbetert de elektrische balans in de cel waardoor het elektrisch veld in de grenslaag verdwijnt zodat de lading niet meer gescheiden wordt in de zonnecel.[34]

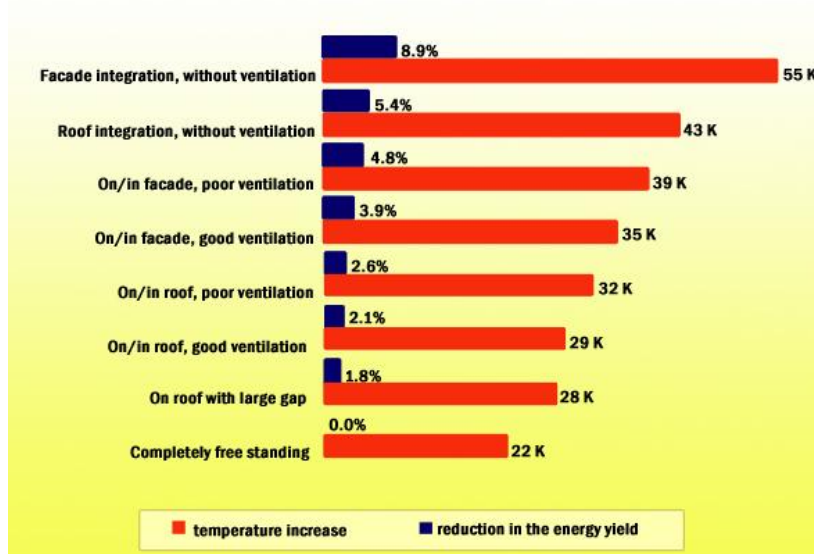


Figuur 1.12: Invloed van temperatuur op spanning

Op de figuur is duidelijk dat hoe hoger de temperatuur is, hoe lager de spanning is en dus ook het rendement. De zonnecellen kunnen op een warme zomerdag temperaturen hebben van 60°C en meer (zie resultaten deel 2). Hierdoor verliest u 20% van uw opbrengst. Algemeen stelt men vast dat per graad Celsius de temperatuur stijgt, de opbrengst daalt met 0,4 à 0,6%. [33]

4.5 Ventilatie

Om de temperatuur van de zonnepanelen op een aanvaardbaar niveau te houden, kan men beroep doen op natuurlijke ventilatie. Door het creëren van een luchtspouw tussen de zonnepanelen en de dakpannen kan men dit verwezenlijken. Indien een spouw ontbreekt (geïntegreerde zonnepanelen) kan men de dakpannen van groeven voorzien zodat er enigszins toch ventilatie door kan. [34] Indien men de achterzijde van de panelen goed kan ventileren, wat voornamelijk gebeurt bij zonnepanelen die op een plat dak worden opgesteld, zal het rendement positief worden beïnvloed. Wanneer de



Figuur 1.13: Ventilatie-Invloed op temperatuur

zonnepanelen de dakhelling volgen zal het rendement echter 2 à 5 % lager liggen dan het voorgaande geval. [40]

Bij zonnepanelen die verticaal tegen een gevel worden gemonteerd kan het opbrengstverlies oplopen tot ongeveer 10% indien men niet ventileert. [32]

Men kan ook de warmte onttrekken en gebruiken voor de verdere opwarming van het huis. Meer hierover in hoofdstuk 7.

4.6 Verliezen veroorzaakt door de verschillende componenten

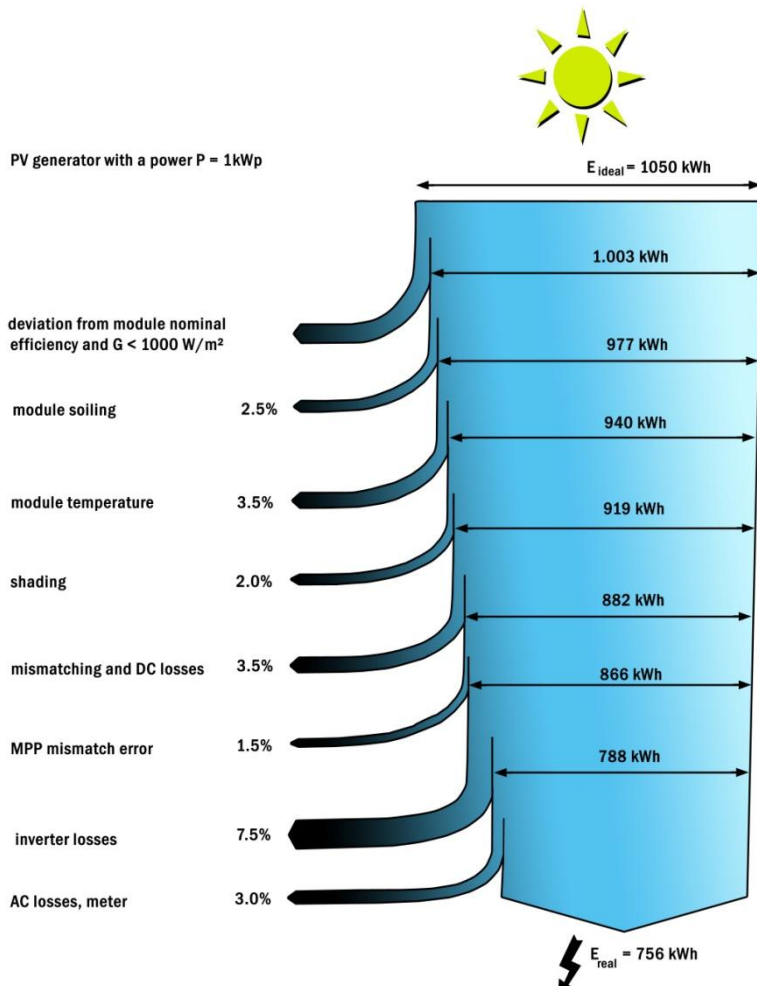
Het rendement hangt ook in grote mate af van het type zonnecel waaruit de verschillende zonnepanelen zijn samengesteld en van de componenten waarmee de installatie is opgesteld. Elk type zonnecel heeft immers een ander rendement, werking en werkelijk vermogen. Zonnecellen worden meestal gemaakt uit één type materiaal (bijvoorbeeld silicium). Aangezien zonlicht bestaat uit meerdere kleuren en het gebruikte materiaal slechts gevoelig is voor bepaalde kleuren gaat een deel van het zonlicht dwars door de cel heen. Een oplossing om dit probleem uit de wereld te helpen is het gebruik van een tandem. Door een zonnecel op te bouwen uit meerdere lagen, die elk werken bij een verschillende kleur, kan men een breder spectrum van het zonlicht gebruiken om energie op te wekken. [41]

Een fotovoltaïsche installatie bereikt nooit of slechts zeer zelden zijn volledig piekvermogen of zelfs maar 90% ervan. Dit heeft onder meer te maken met voorgaande besproken problemen. Door de hoge temperatuur daalt het elektrisch vermogen. Wanneer men nu een omvormer kiest waarbij het nominaal vermogen lager is dan het piekvermogen van de installatie treedt er nauwelijks of bijna geen energieverlies op. België werkt met een verhouding van 80% tussen nominaal omvormervermogen en

het piekvermogen van het veld. Door de omvormer zo te moduleren bekomt men het voordeel dat deze efficiënter zal werken bij lagere lichtinstralingswaarden.

Men dient ook goed op te letten bij het ontwerpen van het elektrische schema en bij de schakeling van de modules in de verschillende ketens. Door overmatig gebruik van bekabeling kunnen er weerstandsverliezen optreden in de bekabeling van het elektrisch veld. Door de gelijkstroomspanning groter te maken zullen deze verliezen kleiner worden.[24]

4.7 Overzicht verliezen



Figuur 1.14: Oorzaken rendementsverliezen

Figuur 1.14 laat zien hoeveel procent van het invallende zonlicht verloren gaat per beïnvloedingsfactor. Zo ziet men bijvoorbeeld dat 2% van het zonlicht verloren gaat aan beschaduwing van de zonnecellen. De verliezen veroorzaakt door de ijking en de fout op de omvormer bedraagt zo'n 7,5% (en is daarbij ook de grootste). Door vuiligheid (stof etc.) op de zonnepanelen verkleint het rendement met 2,5%, deze vuiligheid is ook merkbaar op het testdak in Kortrijk.

Indien we de verhouding nemen van de ideale energieproductie E_{ideel} en van de werkelijke energieproductie E_{real} dan bekomen we het opbrengst ratio (performance ratio) PR.

$$PR = E_{\text{real}} / E_{\text{ideel}}$$

Het PR is een indicator die aantoont hoeveel procent van de ideale energieproductie verloren gaat aan verliezen (hoe goed het systeem gepresteerd heeft onder de gerealiseerde omgevingscondities).[19]

5 BIPV (Building Integrated Photovoltaics)

Het acroniem BIPV verwijst naar systemen en concepten waarbij de fotonvoltaïsche cellen, naast de functie om elektriciteit op te wekken, ook de rol spelen van een gebouwelement (bescherming tegen weersomstandigheden, akoestische isolatie, beschaduwning tegen de zon, veiligheid,...). Met een gebouwelement worden al de delen van de gebouwschil van een woning bedoeld (dakbedekking, gevelbekleding, glazen oppervlaktes).[42] Het tegenovergestelde van BIPV is de plaatsing van zonnepanelen op bestaande delen van het gebouw, namelijk BAPV (Building Adapted Photovoltaics).[43]

Aangezien gebouwen momenteel 40% van het wereldwijde energieverbruik veroorzaken is het aan te raden om steeds nieuwere en aantrekkelijkere manieren te vinden om groene energie op te wekken. Volgens een recente studie van McKinsey kan men het energieverbruik in de bouwsector met 45% verminderen.[44] Door steeds verder te gaan met de integratie van zonnepanelen in een woning kan men drastisch het E-peil (energiebehoefte) van een woning verlagen zodoende dat men een passieve woning kan nastreven.

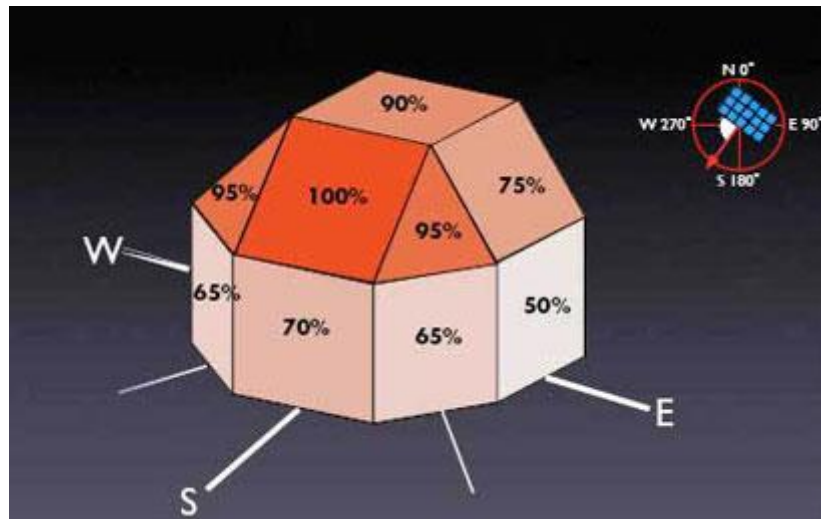
Het is verstandiger om in het begin van een project rekening te houden met de integratie in de ontwerpfase dan deze te laten uitvoeren op een later tijdstip. Zo heeft men immers meer mogelijkheden qua installatie, ook kan men hierdoor voor elk type gebouw een esthetische, energetische en economische oplossing vinden.[19] Ook zal de terugverdientijd van de zonnepanelen bij de twee verschillende situaties sterk verschillen. Zo zal men een kleinere terugverdientijd hebben indien men de zonnepanelen reeds voorziet in de ontwerpfase (minder arbeidsuren, moeilijkheden om achteraf de verbindingen te plaatsen,...).[42]

Dankzij de innovatieve ideeën van fabrikanten en ontwerpers beschikt men over een waaier van zonnepaneel systemen die men kan aanwenden bij de bouw van een woning, appartementsblok, industriehal... Het resultaat is, zoals hierboven vermeld, een zonnestelsel dat visueel veel minder opvalt en tal van andere voordelen met zich meebrengt. Een groot voordeel ook van geïntegreerde zonnepanelen is bovendien dat architecten zich niet geremd voelen en dat ze hun verbeelding nog steeds de vrije loop kunnen laten zoals blijkt uit onderstaande figuur. Figuur 1.15 laat de Sanyo Solar Ark zien die bedekt is met zonnepanelen aan de zijkanten. Het staat symbool voor het doel om een samenleving te bekomen met properere energie.[45]



Figuur 1.15: Sanyo's Solar Ark in Gifu Prefecture, Japan

Algemeen geldt dat voor BIPV systemen die geplaatst zijn op een hellend dak (of plat dak met een hellende metaalstructuur) gericht naar het Zuiden, de efficiëntie optimaal is. Voor systemen die geplaatst zijn op façades wordt een rendement van rond de 70% behaald, indien geplaatst naar het Zuiden, en rond de 50% indien gericht naar het Oosten of het Westen. Voor panelen geplaatst op een plat dak wordt 90% rendement behaald.[42]



Figuur 1.16: Verschillende rendementen bij plaatsing BIPV

Er bestaan verschillende normen (IEC 61215, IEC 61646, IEC 61730) waaraan de fotonvoltaïsche modules moeten voldoen vooraleer deze kunnen gebruikt worden als een onderdeel van de gebouwschil van een woning. Deze normen zijn bepalend voor zowel elektrische karakteristieken als de sterkte van de modules.[42] Hieronder worden de meest voorkomende systemen om zonnepanelen te plaatsen weergegeven en besproken.

5.1 Dak geïntegreerde zonnepanelen

De meest voorkomende manier om zonnepanelen op een woning te integreren is de integratie ervan in het dak (grootste rendement en vrije ruimte om zonnepanelen te plaatsen). Het grote voordeel van daken is dat er minder schaduw is dan op het grondniveau.[43] Er zijn verscheidene systemen op de markt, zowel voor platte als voor schuine daken.

5.1.1 Hellende daken

Terwijl bij platte daken de ontwerper een zekere vorm van vrijheid wordt gegeven voor het ontwerp van een PV-systeem, is dit niet het geval bij hellende daken aangezien de oriëntatie en de helling al bepaald zijn.

5.1.1.1 Opgebouwde systemen

Bij de On-top systemen voor hellende daken worden de modules bovenop een bestaand dak geplaatst met behulp van een metalen structuur (meestal in aluminium). Wanneer men zonnepanelen dient te plaatsen op reeds bestaande daken dan vormt dit systeem de goedkoopste oplossing. Het nadeel echter is - het esthetische aspect buiten beschouwing gelaten - dat de verschillende componenten blootgesteld worden aan de grillen van de natuur (opwaartse winddruk etc.).[19]

Aan de hand van een metalen structuur worden de zonnepanelen bevestigd aan het dak: eerst worden bevestigingsrails (1) aan het dak vastgemaakt via dakbevestigers (2). Deze dakbevestigers worden vastgeschroefd op de onderliggende panlatten. De zonnepanelen worden vervolgens op de rails gemonteerd. Vervolgens worden de panelen in serie of parallel geschakeld door ze met elkaar te verbinden, de kabels bevinden zich achter de panelen (ter bescherming en de esthetiek).[46] Op onderstaande figuur kan men de verschillende bevestigingsonderdelen duidelijk onderscheiden. In bijlage A is er een dakdoorsnede terug te vinden met On-top zonnepanelen.



Figuur 1.17: Bevestiging van zonnepanelen op hellende daken

Nadeel van dit systeem is dat de plaatsing van de panelen arbeidsintensief is en dus meer arbeidsuren in beslag neemt. De arbeidsuren wegen echter niet op tegen de grote materiaalkost. Ook het esthetisch zicht en het toegevoegde gewicht (daken moeten er op voorzien zijn) zijn minpunten van dit systeem.[47] Het voordeel van dit systeem ten opzichte van geïntegreerde systemen is de natuurlijke ventilatie die plaatsvindt in de spouw. Hierdoor daalt de temperatuur van de zonnecellen en verhoogt het rendement.[48]

5.1.1.2 Geïntegreerde systemen

Bij geïntegreerde systemen worden de panelen in hetzelfde vlak als de dakpannen gelegd. Doordat de systemen in het vlak van het dak liggen zijn ze minder gevoelig voor opwaartse winddruk (windzuiging). Extra aandacht moet worden gegeven aan de hoeveelheid ventilatie en de temperatuur van de componenten.[46] Vandaag de dag zijn er uiteenlopende manieren om zonnecellen te integreren in de dakvorm.

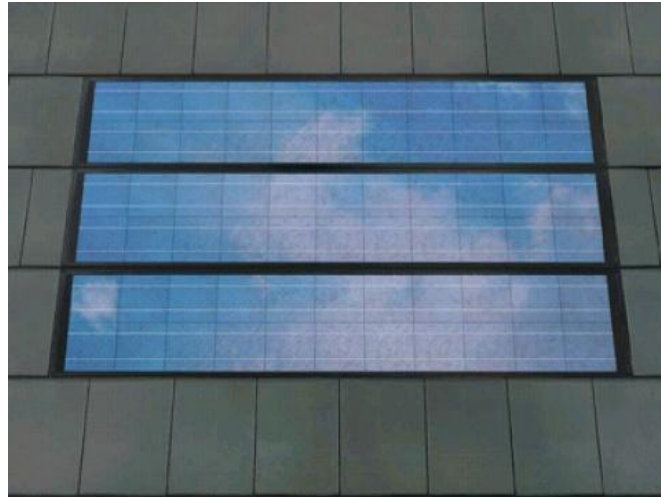
Een eerste manier om zonnepanelen te integreren in het dak is deze waarbij de zonnecellen geïntegreerd zijn in de dakpan zelf. Dakpannen kunnen voorzien worden van kristallijne of dunne-film zonnecellen. Ze worden gecombineerd met gewone betonnen of keramische dakpannen. Net als de standaard dakpan vormen ze een waterdichte structuur (indien nodig kan een waterdichte EPDM folie onder de dakpannen worden voorzien). In de meeste installaties is de plaatsing even simpel als de plaatsing van gewone dakpannen. Het enige nadeel is de aansluiting van de verschillende dakpannen (veel aansluitingen).[48]



Figuur 1.18: PV leien

Een andere (goedkopere) manier om zonnepanelen in de dakopbouw te integreren is het gebruiken van dak geïntegreerde modules (zoals onder meer KoraSun). Deze modules beslaan een oppervlakte van meerdere dakpannen. De panelen worden rechtstreeks op de dakpannen geplaatst (bijvoorbeeld met behulp van magneten, in het geval van KoraSun). Door de eenvoudige aansluiting van deze panelen is een vooropleiding voor installateurs niet nodig (men dient de panelen simpelweg met elkaar te verbinden via de juiste aansluiting).[19] In bijlage B is er een dakdoorsnede terug te vinden met KoraSun zonnepanelen.

Algemeen kan worden gesteld dat de installatiekost afneemt met de grootte van de fotovoltaïsche bouwelementen.[49]



Figuur 1.19: Geïntegreerde KoraSun panelen

5.1.2 Platte daken

Het grote voordeel bij platte daken is dat men een grote vrijheid heeft qua ontwerp. De plaatsing van de zonnepanelen kan zo bepaald worden dat men het hoogste mogelijke rendement kan halen. Ook de grote toegankelijkheid van platte daken is een pluspunt.[43] Kantoren en loodsen waarvan de platte daken bedekt zijn met fotovoltaïsche systemen hebben meer voordelen ten opzichte van de kleinere daken van particulieren. Door schaafeffecten kunnen de installatie- en onderhoudskosten immers relatief laag worden gehouden.[49]

5.1.2.1 Opgebouwde systemen

Net zoals bij de On-top systemen bij hellende daken worden de On-top systemen bij platte daken door middel van een metalen structuur op het dak bevestigd. In tegenstelling tot de hellende daken echter hebben de zonnepanelen meer vrijheid, ze moeten de helling en oriëntatie van het dak immers niet volgen. De modules worden bevestigd aan een metalen frame met driehoekige sectie. Deze driehoekvormige structuur zorgt ervoor dat men een ideale helling kan nastreven.[51]

Bij het monteren van zonnepanelen op platte daken dient men extra goed op te letten dat men het onderliggende dakoppervlak niet beschadigt door eventuele percussie. Zonnepanelen kunnen op het dak worden bevestigd door middel van een extra belasting (betonnen sokkel e.d.), hierdoor is er geen gevaar voor insijpelend water. Indien men de zonnepanelen verankerd aan de dakstructuur dient men dan ook speciale aandacht te hebben bij de aansluitingspunten (zie ook onderstaande figuur).[52] Ook het toegevoegde gewicht en de opwaartse windkrachten dienen in rekening gebracht te worden.[50]

Indien men meerdere rijen zonnepanelen wenst op te stellen, dan dienen deze op voldoende grote afstand van elkaar verwijderd te zijn zodat de achterliggende panelen niet beschaduwd worden door de voorliggende.



Figuur 1.20: Bevestiging van zonnepanelen op een plat

5.1.2.2 Geïntegreerde systemen

Bij de geïntegreerde systemen kent men vooral de toepassing van dakbedekkers met dunne-film zonnecellen op metalen of flexibele onderlagen. De dunne-film zonnecellen worden simpelweg gelijmd op het onderliggende dakoppervlak.[46] Er zijn producten op de markt waarbij de dunne-film zonnecellen op sandwich panelen worden geplaatst waardoor er ook isolatie voorzien is (meestal gebruikt in de industrie, door de grotere oppervlaktes).[48]

Het nadeel van deze vorm van zonnepanelen is dat de zonnecellen gemaakt zijn van een minder renderend type dan kristallijne zonnecellen en dat men meestal te maken heeft met een hoek die kleiner is dan 20° (met een lager rendement als gevolg). Men dient ook op te letten voor de elektrische veiligheidsaspecten doordat de grotere temperaturen van de kabels het risico op brand verhogen.[46] Het grote pluspunt van dit systeem is dat de initiële kostprijs van deze zonnecellen ruimschoots lager ligt dan de andere zonnesystemen.[19] Andere voordelen van dunne-film zonnepanelen zijn het esthetische zicht, het geringe gewicht, het ontbreken van percussies en opwaartse windkracht.[47]

Men kan de dunne-film zonnepanelen ook gebruiken in samenhang met betonkernactivering. Betonkernactivering maakt gebruik van de massa (meestal beton) om warmte op te slaan om die daarna (op koudere momenten) af te staan.[53] Door flexibele zonnecelbanen te voorzien op een betonnen plaat (voorzien van de nodige leidingen met water) kan men niet alleen elektriciteit en warmte opwekken maar kan men ook de temperatuur van de zonnecellen laten dalen, waardoor het rendement stijgt. Hierdoor krijgen de zonnecellen een stabiele temperatuur van 25 à 30°C. De onttrokken warmte kan gebruikt worden om onderliggende ruimtes te verwarmen.[54]

5.2 Fotovoltaïsche façades

PV-modules kunnen zorgen voor een esthetisch aantrekkelijke muur. Bovendien kunnen ze als zonnewering worden gebruikt.[49] Men heeft verschillende plaatsingsmogelijkheden.



Figuur 1.21: Fotovoltaïsche façade

Ten eerste kan men de zonnepanelen simpelweg bevestigen aan een reeds bestaande structuur door middel van het reeds besproken railsysteem. De zonnepanelen dienen hier niet voor een waterdichte constructie aangezien de onderliggende structuur hiervoor zorgt. Indien er geen eisen worden gesteld qua vorm en afmetingen kunnen standaard modules worden gebruikt.[19] De bevestiging moet zodanig gedimensioneerd zijn dat losrukken door windkrachten vermeden wordt.[43]

Ten tweede kunnen de zonnepanelen in het vlak van de façade worden geplaatst (vliesgevels).[49] Naast de traditionele

vliesgevel kan men opteren voor een dubbele vliesgevel. Een dubbele vliesgevel bestaat uit een dubbele glaswand gescheiden door een spouw (waardoor natuurlijke ventilatie de temperatuur van de zonnepanelen verlaagt). Hier worden de zonnepanelen geplaatst in de buitenste glaswand. De zonnepanelen vervangen zo de conventionele bedekkingmaterialen (glas e.d.).[43] Het spreekt voor zich dat de zonnepanelen zo geplaatst moeten worden dat insijpelen van water voorkomen wordt. De modules moeten dezelfde duurzaamheid en constructieve eigenschappen hebben als de materialen die ze vervangen.

Een andere manier om zonnepanelen te integreren is het gebruik maken van een Trombe Wall. Een Trombe Wall is een muur opgetrokken uit metselwerk of beton. Aan de buitenkant wordt een glazen wand voorzien en de muur wordt zwart geverfd. Door gaten in het beton of metselwerk zorgt men ervoor dat er in de achterliggende ruimte warme lucht circuleert. Ondanks hun hoge efficiëntie is de zwarte muur niet aantrekkelijk. Doordat de zonne-energie wordt omgezet in thermische energie (minderwaardig als elektrische energie, zie volgend hoofdstuk) kan men ervoor opteren om een Trombe Wall uit te voeren met fotovoltaïsche cellen. De zonnecellen bevinden zich achter de glazen wand. Door de luchtcirculatie worden ook hier de zonnecellen afgekoeld.[56]

Het totale rendement van verticaal geplaatste zonnepanelen is ongeveer 70% (zoals hierboven reeds gezegd) indien geplaatst naar het Zuiden. Men moet, voor het plaatsen van de zonnepanelen, nagaan of dichtbijstaande gebouwen niet zorgen voor een nefaste beschaduwing van de zonnepanelen.[48]

Voor de opbouw (en lichtspeling) van fotovoltaïsche façades worden er verschillende types modules gebruikt: klassieke modules, transparante (daarover meer in volgend subhoofdstuk) en semitransparante.[55]

5.3 Transparante systemen

Transparante modules kunnen gebruikt worden voor zowel gevel als dak. Ze bestaan meestal uit een transparante achterzijde met standaard kristallijne cellen, maar vaak worden ook modules met gedeeltelijk-transparante dunne-film cellen gebruikt.[48] De transparante modules worden vooral gebruikt wanneer men niet alleen energie wil opwekken maar ook natuurlijk zonlicht wil laten binnenvallen.[55] De transparante modules zijn gunstig om het binnenklimaat te regelen, ze functioneren immers (ook) als een zonnewering.



Figuur 1.22: Transparante modules in een dak

5.4 Zonnewering systemen



Het overmatig gebruik van glas in een gebouw kan belangrijke gevolgen met zich meebrengen. Door het glas te positioneren aan de zuidkant kan men ervoor zorgen dat de woning wordt opgewarmd in de winter, maar hierdoor kan de woning ook sterk verhit geraken in de zomer. Door gebruik te maken van luifels en overhangdaken kan men de oververhitting terugdrijven maar laat men ook heel wat energie verloren gaan. Ook hier kunnen fotovoltaïsche cellen het verschil maken: door dunne film amorfe zonnecellen op deze luifels te plaatsen of door fotovoltaïsche modules te voorzien boven ramen en andere openingen, krijgt men een win-win situatie.[43] De modules kunnen ofwel vast ofwel op beweegbare 'tracking devices' bevestigd worden.

Figuur 1.23: Schaduw PV

5.5 Niet bouw gerelateerde toepassingen

Net zoals bij PV modules die aan gebouwen worden bevestigd, vereisen stand alone PV systemen een goede structuur die slechte weersomstandigheden kan doorstaan. De structuren kunnen vastgemaakt worden in de grond door middel van grote metalen schroeven of door middel van een balastlaag. Vooraleer men de zonnepanelen plaatst dient men de grond goed te onderzoeken (zuurtegraad, weerstand,...). Men gebruikt de modules niet alleen om een gigantisch groot oppervlak te beslaan (gaande van honderden kW tot verschillende MW[15]), de zonnecellen kunnen ook gebruikt worden op carports, enzovoort. Doordat meerdere zonnepanelen achter elkaar worden geplaatst is het nodig dat er enige plaats tussen wordt gelaten om beschaduwing te voorkomen. De verschillende modules kunnen geëquipeerd worden met een sun-tracking-systeem. Er bestaan twee 'tracker' systemen, enerzijds hebben we het 'single-axis tracking' (beweging rond horizontale as) systeem, anderzijds het 'dual-axis tracking' (beweging rond verticale en horizontale as) systeem. Met het 'dual-axis tracking' systeem krijgen we een hogere efficiëntie dan bij de 'single axis'. Omdat dit systeem redelijk gecompliceerd is wordt een 'single-axis' systeem geprefereerd. De rendementsverhoging is 20% voor 'single-axis' en 30% voor 'dual-axis'. [19]



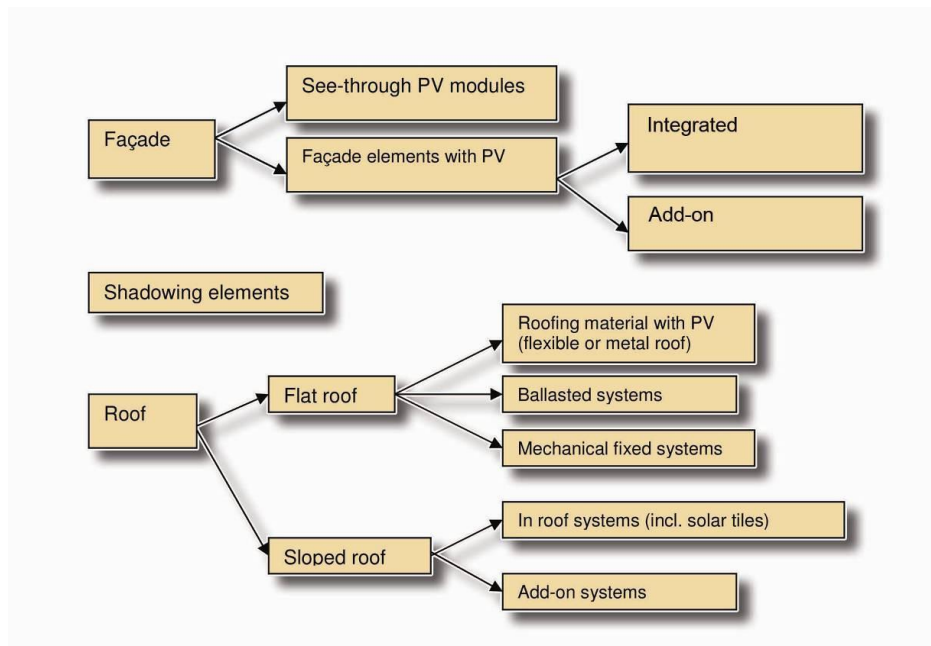
Figuur 1.24: Solarboom in Duitsland



Figuur 1.25: 2 MegaWatt landgoed in Fort Carson, Colo

6 Besluit

In de laatste jaren is de ontwikkeling van geïntegreerde zonnecellen exponentieel gestegen.[57] De huidige BIPV markt wordt gekenmerkt door een grote variëteit aan systemen en oplossingen om PV-modules te integreren en te plaatsen op een gebouwschil. (voorbeelden zijn gegeven doorheen dit hoofdstuk, voor een overzicht zie onderstaande figuur 1.26).



Figuur 1.26: Overzicht toepassingen

Doordat BIPV steeds belangrijker wordt in het licht van energiezuinige en passieve woningen dienen installateurs en particulieren ervan te bewust zijn dat er reeds vele aandachtspunten zijn bij het ontwerp en installeren van een PV-installatie. De windweerstand, de waterdichtheid, vuurbestendigheid en de interne condensatie zijn hier slechts enkele voorbeelden van.[46]

Door de komst van nieuwe ontwikkelaars en leveranciers op de markt komen er steeds nieuwere ontwikkelingen (en oplossingen) om zonnecellen te integreren op de woning.

7 Hybrid PhotoVoltaic/Thermal technologie

7.1 Algemeen

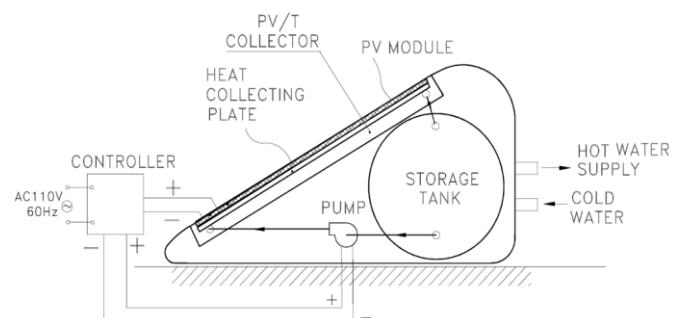
De commerciële zonnecel zet zonne-energie om in elektriciteit met een efficiëntie kleiner dan 20%. Dit wil zeggen dat meer dan 80% van de geabsorbeerde energie naar de omgeving wordt afgevoerd onder de vorm van warmte.[58]

Zoals besproken in hoofdstuk vier daalt de energieconversie wanneer de temperatuur van de silicium zonnecellen stijgt. Niet alleen de temperatuur maar ook het bereik (zonnestraal spectrum) van de zonnecellen bemoeilijkt het gebruik van fotovoltaïsche panelen.[59]

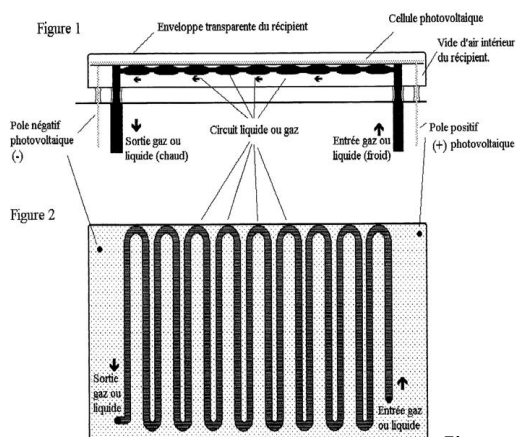
Fotovoltaïsche-thermische systemen (PV/T systemen) verwijzen naar de integratie van fotovoltaïsche en thermische zonnetechnologie in één enkel systeem. Hierdoor kan er elektriciteit en nuttige warmte energie worden opgewekt.[60] Door de afgevoerde warmte, die anders toch maar verloren gaat aan de omgeving, te benutten krijgt men een dubbel positief effect: enerzijds wordt er een betere efficiëntie verkregen van de silicium zonnepanelen door actief te ventileren en anderzijds krijgt men een warmtebron die men kan gebruiken voor het opwarmen van de woning.

PV/T modules kunnen, aan een lagere productie- en installatiekost, meer energie per oppervlakte eenheid genereren dan naast elkaar liggende zonnepanelen en thermische zonnecollectoren. Berekeningen gemaakt door het ECN (Energy research Centre of the Netherlands) in Nederland tonen aan dat bij gebruik van PV/T systemen het collector oppervlak met 40% gereduceerd kan worden voor eenzelfde hoeveelheid energie.[61]

Zoals te zien op figuur 1.27 is een PV/T systeem opgebouwd uit een fotovoltaïsche module, een warmte- absorberende plaat en tenslotte een warmtewisselaar waardoor een dia-thermisch⁸ fluïdum stroomt.[64] Het doel van de absorbeerplaat is in de eerste plaats het opvangen van de warmte en ten tweede het verlagen van de zonneceltemperatuur zodat de elektrische prestaties verhogen.[63]



Figuur 1.27: PV/T collector met water



Figuur 1.28: Plaatsing van fluïdumbuizen

Het fluïdum wordt opgewarmd door een ketel die zich achter het PV/T paneel bevindt. Door de opwarming van het fluïdum neemt de druk alsook het volume toe. Hierdoor wordt het fluïdum in de warmtewisselaar rondgepompt. Het warmte-geleidende fluïdum kan ofwel rechtstreeks contact maken met de absorbeerplaat of men kan er voor kiezen om het fluïdum te laten circuleren in buizen (zie figuur 1.28). Deze buizen worden zo geplaatst dat zij een zo groot mogelijk oppervlakte bekleden en dus zo veel mogelijk warmte kunnen opnemen.[64]

⁸ Een diathermisch fluïdum is een fluïdum die warmtestralen doorlatend is. Diathermie betekent immers inwendige verwarming door middel van sterke hoog frequente stromen.

Als fluïdum heeft men twee mogelijkheden, ofwel kiest men voor een liquide vloeistof of wel voor een gasvormig fluïdum. Indien men kiest voor een gasvormig fluïdum moet men de warmteoverdracht tussen de wand en het gas verbeteren (deze is van nature zwak). Doorheen de jaren zijn verschillende 'oplossingen' voor dit probleem op de markt gekomen. Zo is er een systeem waarbij de producenten een 'gordijnsysteem' ontwikkeld hebben waardoor het gas laminair gaat stromen (zo verkrijgt men een beperkt drukverlies).[64]

In een recent onderzoek (Bergene en anderen) werd aangetoond dat een dergelijk PV/T systeem, de ingevallen zonne-energie voor 60-80% benutten.

7.2 Verschillende types PV/T systemen

Men kan de PV/T systemen opdelen in twee grote soorten. Men kent PV/T panelen en PV/T collectoren. Er bestaan ook nog PV/T concentrators (=zonnecollectoren met concentratiespiegels) maar deze zijn uitgerust met zonnecollectoren (en dus geen zonnepanelen) en worden hier dus niet verder besproken.[61]

7.2.1 PV/T panelen

Een PV/T paneel bestaat uit een PV paneel waar aan de achterkant een koperen absorbeerplaat is aangebracht. Hierachter zitten koperen waterdoorvoerende buizen die vast gesoldeerd zijn. De jaarlijkse elektrische energie output bij een PV/T paneel is dezelfde als bij een conventionele PV module (de totale energie is natuurlijk groter).

Doordat de panelen onbedekt zijn blijven de temperaturen relatief laag ($\pm 50^{\circ}\text{C}$) waardoor deze panelen uiterst geschikt zijn in lage temperatuur verwarmingsapplicaties (men kan hiermee ook warm water produceren) gecombineerd met e.g. een warmtepomp (als fluïdum kan hier gekozen worden voor water of lucht).[68]



Figuur 1.29: PV/T paneel

7.2.2 PV/T collectoren



Figuur 1.30: PV/T collector

Verschillende PV/T panelen worden hier omvat in een geïsoleerde aluminium omkasting die voorzien is van een afdekkende glasplaat. De temperatuur in de PV/T collector kan hierdoor oplopen tot 90°C . Hierdoor is de jaarlijkse elektrische energie output lager dan bij een conventionele PV module.[62]

De warmte wordt vervolgens net zoals de PV/T panelen geabsorbeerd door een fluïdum dat stroomt in leidingen achter de panelen. Met PV/T collectoren kan men een woning van warm water en ruimteverwarming voorzien.

De thermische energie van PV/T collectoren is groter dan PV/T panelen doordat het thermisch rendement bij de PV/T panelen lager is door de grote verliezen (onbedekte PV panelen), en dit zeker bij lage temperaturen en sterke wind.[68]

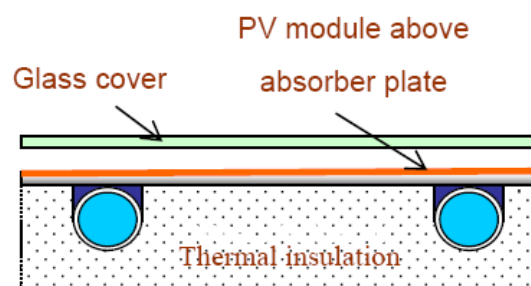
Een PV/T installatie van 25 m² kan de totale warmtevraag dekken van een standaard gezin en kan 96% van de elektriciteitsvraag dekken.[62]

7.3 Beïnvloedingsfactoren (keuze type en warmtebron)

Net zoals bij zonnepanelen in het algemeen dient men bij het ontwerp van PV/T systemen rekening te houden met meerdere randvoorwaarden. Hierna worden kort enkele van de verschillende parameters besproken.

7.3.1 Bedekte versus onbedekt PV/T systeem

Sandnes en Rekstad hebben na allerlei tests en opstellingen ondervonden dat een PV/T systeem dat niet afgedekt wordt door een glazen plaat een hogere efficiëntie heeft dan een PV/T systeem dat daar wel door wordt afgedekt.



Figuur 1.31: PV/T collector met glazen plaat

De installatie van een glazen plaat bovenop de collector reduceert de warmteverliezen maar zorgt er ook voor dat de absorbeerplaat minder energie kan absorberen als gevolg van de reflectie van het glas (ongeveer 10%).[65] PV/T collectors zonder glazen plaat produceren meer elektrische energie. Of men al dan niet een glazen plaat moet voorzien is afhankelijk van het beoogde doel: namelijk of men meer elektrische energie dan wel thermische energie wil creëren (zie verder). Men dient dit dus voor zichzelf uit te maken.

7.3.2 Type fluidum

Cox en Raghuraman hebben met behulp van meerdere computersimulaties aangetoond dat een lucht PV/T collector veel minder efficiënt is dan een vloeistoffen PV/T collector, onder meer omdat de eerste een lagere stralingsabsorptie en een hoge IR uitstraling heeft.[66]

Veel wetenschappers hebben ook het effect bestudeerd van de stroomsnelheid op de efficiëntie van PV/T systemen. Ze kwamen tot de conclusie dat de stroomsnelheid een vrij sterke invloed heeft op PV/T systemen. In een onderzoek van Garg en Agarwall werd aangetoond dat de gemiddelde elektrische efficiëntie toeneemt bij stijging van de totale watermassa en van de massastroom. De beste massastroom wordt gevonden tussen 0,001 à 0,008 kg/s m². [67]

7.3.3 Energiebeschouwingen

Om nu te beslissen welk ontwerp er het best wordt gekozen, een systeem dat al dan niet van een glazen afdekplaat wordt voorzien,... kan men best een oordeel vellen aan de hand van exergie. Exergie wordt beschouwd als de theoretisch maximale nuttige arbeid die gehaald kan worden uit een systeem. Fujisawa en Tani zijn immers tot de conclusie gekomen dat elektrische en thermische energie kwalitatief niet dezelfde zijn en dus ook niet met elkaar vergeleken kunnen worden. Thermische

energie kan immers geen arbeid produceren wanneer er een te klein verschil bestaat tussen een hoge en een lage temperatuursbron.[69]

Om nu te beslissen welke energie hoogwaardiger is dan de andere hebben Coventry en Lovegrove drie verschillende methodologieën (thermodynamisch, markt en milieu gebaseerd) ontwikkeld. Voor de thermodynamische methodologie werd een elektrisch/thermisch ratio gebruikt van 2,5 (vanwege het feit dat een energiecentrale 40% omzetting heeft). Voor de vernieuwbare marktenergie methode werden de verschillen in kostprijs tussen thermische en elektrische energie in rekening gebracht en bekwamen ze een ratio van 4,24: elektriciteit is in deze methode dus '4,24 meer waardevol' dan thermische energie. De resultaten van de derde methodologie leverden een ratio van 7,58 op (dit was gebaseerd op CO2 emissies e.d.).[70]

Tabel 1.2: Vergelijking van verschillende opstellingen

Comparison of exergy gain and exergy output density [19]				
Parameter	FPC	PV	PV/T _{N=0}	PV/T _{N=1}
Electrical exergy gain (kW h)	–	72.6	78.4	66.0
Thermal exergy gain (kW h)	6.0	–	2.4	5.6
Total exergy gain (kW h)	6.0	72.6	80.8	71.5
Installation area (m ²)	0.51	0.70	0.70	0.70
Exergy output density (kW h/m ²)	65.0	115.4	115.4	102.1
Percentage difference	–	–	76%	57%

Na verschillende opstellingen (zie tabel 1.2) met elkaar te hebben vergeleken kwamen ze tot de conclusie dat de functie van de glasplaat erin bestaat om het thermisch exergetisch maximale rendement en de uitlaat temperatuur (temperatuur van het uitgaand water) te verhogen. In de tabel kan men zien dat de FPC (Flat Plate Collector) de minste exergie oplevert, deze produceert immers alleen thermische en geen elektrische exergie. Zo kan men ook zien dat het onbedekte PV/T systeem (PV/T_{N=0}) 8% meer elektrische energie produceert dan een standaard PV paneel en 41% van de thermische energie van de FPC produceert. Men kan dus besluiten dat het onbedekte PV/T systeem de grootste efficiëntie haalt. De totale exergie van de onbedekte PV/T collector is immers 11% hoger dan het standaard PV paneel en zelfs 1287% groter dan het FPC systeem.[63]

Economisch en energetisch gezien is elektrische energie dus veel hoogwaardiger dan thermische energie. Een PV/T systeem zonder glasplaat is dan ook de meest ideale oplossing. Een interessante toepassing van PV/T systemen is deze waarbij het systeem wordt gekoppeld aan een grondwaterpomp. Wetenschappers Bakker en Co hebben ontdekt dat zo'n koppeling 100% van de totale warmtevraag levert voor een typische gezinswoning.[71]

7.4 Conclusie

Een PV/T systeem heeft vele voordelen: naast het feit dat de installatiekost sterk gereduceerd wordt (men dient immers maar 1 systeem te installeren in plaats van 2, het blijft natuurlijk wel duurder dan een gewone zonnepaneel installatie), wordt ook de benodigde oppervlakte in grote mate beperkt.[72]

Doordat de 'verloren' warmte opgevangen en onttrokken wordt verhogen de elektrische prestaties van de zonnecellen en creëert men een win-win situatie. Dit systeem is zeker veelbelovend voor de toekomst en moet zeker verder bekeken en ontwikkeld worden.

Deel 2

Vergelijkende studie

1 Inleiding

Door zonnepanelen voldoende te ventileren kan men een temperatuursverlaging realiseren ter hoogte van de productie-eenheid, de zonnecel. Gezien polykristallijn silicium, welk courant wordt toegepast in zonnepanelen, bij stijgende temperatuur een negatieve invloed op het geleverde vermogen ondervindt (-0,4 à 0,6%W/K), kan men door zij actief, zij passief te ventileren het rendement van de installatie opdrijven.

Dit leidt dus eigenlijk tot de kern van het probleem: de temperatuur ter hoogte van de zonnecellen en hoe deze beïnvloed wordt.

De volledige warmtebalans rondom het zonnepaneel dient dus ontleed te worden. Dit wordt behandeld in het volgende hoofdstuk.

In een tweede luik werd een poging ondernomen om deze theoretische achtergrond om te zetten in een werkend model. Echter bleek bij de ontleding dat er vele parameters in het spel zijn, die enerzijds moeilijk in te schatten zijn en anderzijds sterk afhankelijk zijn van installatie tot installatie. Daarboven zijn de meeste parameters nog eens onderling afhankelijk. Daarom werd het vrij moeilijk om tot een algemeen model te komen dat in iedere situatie toepasbaar is. Wel geeft het een idee welke parameters in welke mate van invloed zijn.

Hoewel er ongelooflijk veel beweegt rond zonnepanelen, is er in de literatuur weinig terug te vinden specifiek over ventilatie. Wel gaan meerdere auteurs dieper in op het kwantificeren van de thermische trek maar weinigen wagen zich aan het wispelturig gedrag van de wind.

Het praktisch aspect werd bij de theoretische ontleding niet uit het oog verloren. Waar mogelijk werd vanuit de literatuur aangeduid hoe men eventueel de installatie kan optimaliseren.

Om de bevindingen te toetsen werd op het terrein van het bedrijf Koramic te Kortrijk een proefdak opgesteld. Dit wordt voluit in het vierde hoofdstuk besproken.

Symbolenlijst

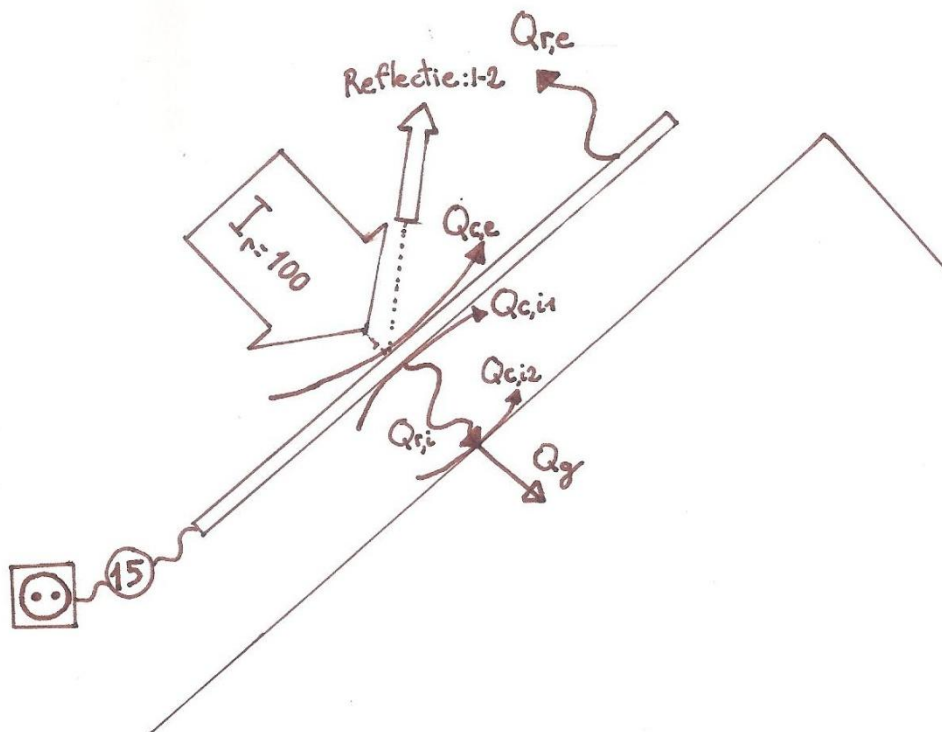
A_c	Sectie van de spouw[m ²]
B	Breedte van de spouw[m]
$CP_{i,e}$	Winddrukcoëfficiënten aan in- en uitlaat[-]
c_p	Specifieke warmtecapaciteit lucht [J/kgK]
D	Hydraulische diameter spouw[m]
e	Emissiefactor[-]
f_1	Wrijvingsfactor[-]
f_2	Wrijvingsfactor[-]
F_{ssky}	Hoekfactor vlak-hemelkoepel[-]
g	Gravitatieconstante[m/s ²]
h	Warmteoverdrachtcoëfficiënt [W/m ² K]
I	Irradiantie [W/m]
$K_{f1,2}$	Drukverlies in- en uitgang[-]
L	Lengte spouw[m]
\dot{M}	Massadebiet[kg/s]
q	Warmtestroom per eenheid van opp.[W/m ²]
Q	Warmtestroom [W]
R	Thermische weerstand[m ² K/W]
S	Warmtestroom door convectie[W/m ²]
T	Temperatuur[°K]
V_{10}	Vrije windsnelheid op 10m boven maaiveld[m/s]
$V_{wi,e}$	Windsnelheid aan in- en uitlaat [m/s]
β	Thermische uitzettingscoëfficiënt lucht [1/K]
Δp_{tt}	Drukverschil door thermische trek[Pa]
Δp_{wind}	Windgeïnduceerd drukverschil [Pa]
ΔT_{sky}	Vershil stralingstemperatuur buitenomgeving- hemelkoepel[°K]
θ	Hellingshoek spouw[°]
λ	Warmtegeleidingscoëfficiënt[W/mK]
ν	Kinematische viscositeit voor lucht[m ² /s]
ρ	Soortelijk gewicht lucht[kg/m ³]
σ	Stralingsconstante van Stefan-Boltzmann [5.67*10 ⁻⁸ W/m ² K ⁴]
ϕ_{12}	Hoekfactor[-]
$\psi_{1 \rightarrow 2}$	Uitwisselingsfactor[-]
ω	Installatiecoëfficiënt
<u>Suffixen</u>	
c	Convectie
g	Conductie
i	Binnen/inlaat
e	Buiten/uitlaat
r	Straling
PV	Zonnepaneel
s	Oppervlak

2 Theoretische ontleding warmtebalans

2.1 Vooraf

Afhankelijk van de paneelopbouw en het type zonnecel wordt slechts 6-14% van de invallende zonnestrallen omgezet in elektrische energie. De overige energie in de zonnestraling wordt omgezet in warmte-energie of wordt simpelweg geweerkatst. Om het rendement te verhogen wordt de weerkaatsing tot een minimum beperkt. Zowat 85% van de zonne-energie wordt dus omgezet in warmte-energie.

Om de temperatuursontwikkeling niet te hoog te laten oplopen moet deze warmte afgeleid worden naar de omgeving. Deze warmteoverdracht berust op 3 principes: conductie, convectie en straling. In volgende figuur worden alle energie-uitwisselingen duidelijk weergegeven.



Figuur 2.1: Warmteoverdrachten

Conductie is de warmtegeleiding doorheen een materiaal laag. Echter worden daken nu vrij goed geïsoleerd zodat deze vorm van warmtetransport vrij beperkt blijft. Zonnepanelen kunnen dus hun warmte-energie vooral kwijt naar hun omgeving dankzij convectie en straling.

Convectie wordt gestimuleerd door de stroming van een fluidum, lucht dus in de meeste gevallen, langsheen het oppervlak. Naarmate de stroomsnelheid verhoogt zal ook meer warmte gedissipeerd kunnen worden. Wind of bewuste ventilatie/circulatie zal dus de warmteafvoer sterk bevorderen.

Ieder lichaam met een temperatuur boven het absolute nulpunt straalt een deel van zijn warmte uit. De hoeveelheid van de totale warmtestroom door straling is dus afhankelijk van de temperatuur van het zonnepaneel maar ook van die van zijn omgeving omdat deze straalt op het oppervlak.

Bij geïntegreerde systemen zonder spouw kan het zonnepaneel enkel zijn warmte kwijt aan de voorkant naar zijn omgeving via convectie en straling en doorheen de dakopbouw via conductie.

Bij On-top systemen wordt er een spouw gerealiseerd waardoor nu ook de straling en convectie aan de achterkant geactiveerd worden. De convectie zorgt ervoor dat de lucht in de spouw opwarmt en deze warme lucht, lichter dan koudere lucht, zal naar boven willen drijven en zo ontstaat circulatie. Dit fenomeen wordt thermische trek genoemd.

Een andere drijvende kracht voor circulatie achter het paneel is deze door de wind. Drukverschillen aan de randen van het zonnepaneel zorgen ervoor dat lucht zich van de ene kant naar de andere kant zal bewegen en zo de opgebouwde warmte zal meedrijven en koudere lucht zal aanvoeren.

In wat volgt wordt op elk van deze aspecten ingezoomd.

2.2 Principes

2.2.1 Warmtebron: Zonnestraling

Zonnestraling bevat veel energie. PV cellen zullen net deze energie trachten te vatten en deze omzetten in bruikbare elektrische energie. Om een zo hoog mogelijk rendement te realiseren zijn zonnepanelen zodanig ontworpen dat ze zoveel mogelijk straling absorberen en zo weinig mogelijk reflecteren (maximaal 2-3% reflectie). Afhankelijk van het type zonnecel en de schikking van de cellen in de modules zal slechts een klein aandeel worden omgezet in nuttige elektrische energie. De overige $\pm 90\%$ van de energie zal dus volledig worden omgezet in warmte-energie.

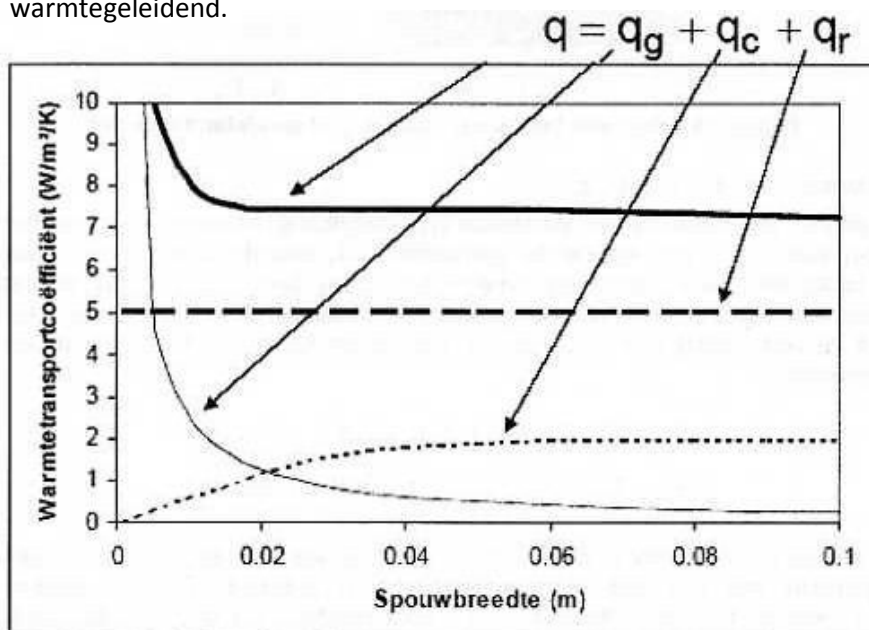
De hoeveelheid invallende zonnestraling werd reeds uitvoerig in deel I besproken. Deze kan op piekmomenten 1200W/m^2 bedragen, waarvan dus tot 1000W/m^2 en meer omgezet wordt in warmte.

2.2.2 Conductie

Zoals eerder gesteld kan een deel van de warmte gedissipeerd worden doorheen de dakopbouw. De hoeveelheid warmte wordt enerzijds bepaald door het temperatuursverschil tussen de panelen en de ruimte onder het dak en anderzijds door de 'weerstand' die het ondervindt bij de doorgang van de verschillende lagen. Deze weerstand doorheen een bepaalde laag wordt bepaald door de warmtegeleidingscoëfficiënt λ [W/mK] van het materiaal en de laagdikte.

Echter worden daken heden ten dage zeer goed geïsoleerd om net warmteverliezen te beperken. De huidige norm in België voor een dakschild is $0,4\text{W/m}^2\text{K}$. Wat betekent dat bij een temperatuursverschil tussen paneel en binnenruimte van 50°C slechts 20W/m^2 door conductie kan gedissipeerd worden. Bijgevolg kan men de warmteoverdracht door conductie doorheen de dakopbouw nagenoeg verwaarlozen. Wat dan ook gedaan wordt in de meeste theoretische studies. Als randvoorwaarde van het thermisch probleem wordt gesteld dat er geen warmteoverdracht gerealiseerd wordt doorheen de dakwand, met andere woorden dat deze zich gedraagt als een adiabatiese wand.

Conductie zal er wel voor zorgen dat de temperatuur van de achterkant van het paneel nagenoeg gelijk loopt met de voorkant waar de warmteontwikkeling plaatsvindt. De totale dikte van een module is namelijk vrij beperkt en de materialen waaruit de verschillende lagen zijn opgebouwd zijn vrij warmtegeleidend.



Figuur 2.2: Warmtetransport in een spouw

Conductie doorheen luchtlagen, met andere woorden spouwen, treedt enkel op bij spouwen dunner dan 1 cm. Bij grotere spouwen zal de warmteoverdracht louter convectief en door straling gebeuren zoals uit figuur 2.2 blijkt.

2.2.3 Warmteoverdracht door straling

Ieder lichaam met een temperatuur groter dan die van het absolute nulpunt, straalt een fractie van zijn warmte uit naar zijn omgeving. Anderzijds ontvangt dit lichaam ook stralingswarmte van zijn omgeving. De netto warmteoverdracht zal dus afhankelijk zijn van het temperatuurverschil tussen vlak en omgeving. Naast de onderlinge oriëntatie van beide stralingsvlakken hebben ook de emissiefactoren van beide oppervlakken een belangrijke rol. Het spreekt voor zich dat een wand met een hogere emissiefactor meer warmte zal uitstralen.

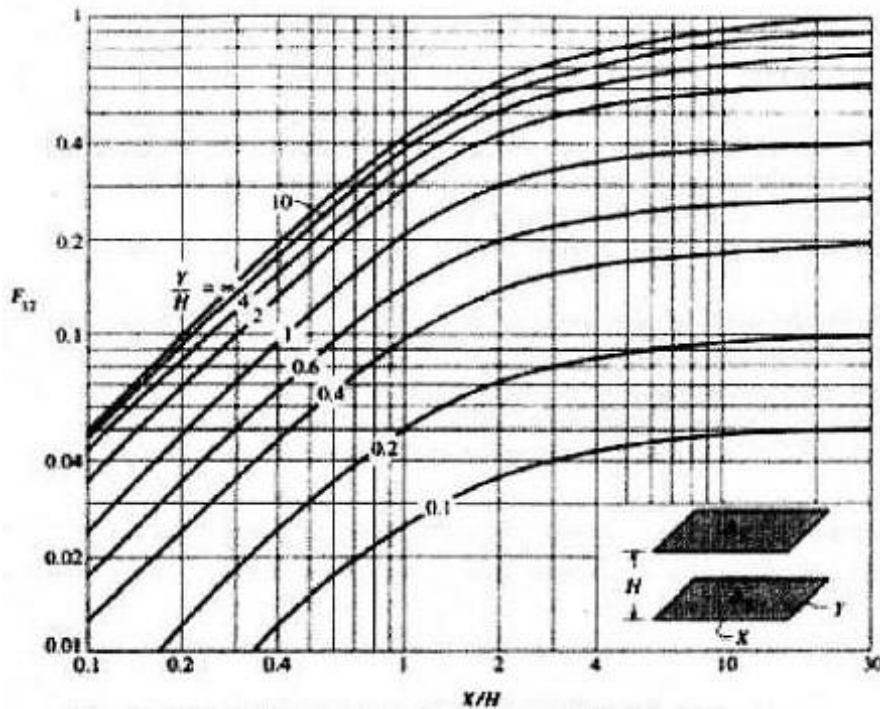
De netto uitgewisselde warmtestralingstroom per eenheid van oppervlakte tussen 2 oppervlakken bedraagt:

$$q_{r,1 \rightarrow 2} = \psi_{1 \rightarrow 2} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.1)$$

Met: T_1, T_2 : Absolute temperatuur vlak 1, vlak 2
 $\psi_{1 \rightarrow 2}$: uitwisselingsfactor tussen vlak 1 en 2

$$\psi_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{\frac{1-e_1}{e_1} + \frac{1}{\phi_{12}} + \frac{1-e_2 A_1}{e_2 A_2}} \quad (2.2)$$

Met: e = emissiefactor, die bepaalt in welke mate een materiaal zijn warmte zal uitstralen
 ϕ_{12} = Hoefactor, welke bij voldoende grote parallelle vlakken nadert naar 1



Figuur 2.3: Hoefactor voor twee evenwijdige rechthoeken

Men kan deze warmteflux lineariseren tot:

$$q_{r,1 \rightarrow 2} = h_r (T_2 - T_1) \quad (2.3)$$

$$\text{Met: } h_r = \sigma \psi_{1 \rightarrow 2} (T_1^2 + T_2^2) (T_1 + T_2) \quad (2.4)$$

Waardes voor de warmteoverdrachtcoëfficiënt voor straling liggen snel tussen 5 à 10 W/m²K. Op deze manier zal dus veel warmte gedissipeerd kunnen worden.

2.2.4 Convectie

Convectie is een vorm van warmteoverdracht die ontstaat wanneer een fluïdum over een oppervlak stroomt. Het fluïdum zal opwarmen door contact met het oppervlak. Dit fluïdum kan daarenboven in beweging zijn of net door de opwarming in beweging gezet worden. De warmteafvoer wordt zo dus versterkt. Men spreekt van natuurlijke convectie, wanneer er geen uitwendige oorzaak voor stroming aanwezig is, en geforceerde convectie wanneer het fluïdum op zich al in beweging is alvorens het contactoppervlak te naderen.

De oorzaak van dergelijke beweging is veelzijdig: enerzijds door drukverschillen die veroorzaakt worden door de wind aan het oppervlak of binnenin een spouw. Anderzijds door thermische trek die ontstaat door het lager soortelijk gewicht van verwarmde lucht.

Gezien de meerdere oorzaken en ook het samenspel is het moeilijk om de warmteoverdracht door convectie nauwkeurig te begroten. In de literatuur zijn daarom verschillende waardes terug te vinden. Een goed overzicht kan men terugvinden in [73]. Meestal zijn de formules eenparig afhankelijk van de snelheid van het fluïdum, bij hogere snelheden blijkt een machtsverheffing een betere benadering. Voor de eenvoud zal dezelfde benadering gebruikt worden als deze die wordt voorgesteld in de Belgische norm:

$$q_c = h_c (T_2 - T_1) \quad (2.5)$$

$$\text{Met: } h_c = 4 + 4V_{10} \quad (2.6)$$

Door natuurlijke convectie wordt dus reeds 4 W/m² bij een temperatuursverschil van 1 °C gerealiseerd. Zodra het fluïdum uit zichzelf in beweging is, zal nog meer warmte gedissipeerd worden. De windsnelheid, ergo ventilatie, heeft dus een grote invloed.

2.3 Lokale warmteoverdrachten

2.3.1 Vooraf

In wat volgt zullen de eerder beschreven principes aangewend worden om de verschillende warmteoverdrachten te begrijpen. Waar mogelijk wordt ook aangegeven wat kan ondernomen worden om de warmteflux te bevorderen.

Er dient een duidelijk onderscheid gemaakt te worden tussen installaties die met een spouw bovenop het dakvlak gemonteerd worden en installaties die rechtstreeks op het dakvlak gemonteerd worden. Bij de eerst vernoemde is er duidelijk nog een extra manier om warmte af te voeren, namelijk doorheen de spouw. Er zou zo op jaarbasis een rendementswinst van 3% kunnen geboekt worden[19].

2.3.2 Warmteafvoer aan de voorkant van het zonnepaneel

Deze warmteafvoer gebeurt door convectie en straling. Enerzijds zal dus de temperatuur van het oppervlak in vergelijking met die van de omgeving bepalend zijn alsook de snelheid van de wind over het oppervlak heen. Deze factoren zijn echter volledig van de weersomstandigheden afhankelijk en hier kan men dus bij het ontwerp weinig op inspelen.

Deze warmteafvoer wordt begroot in het volgend hoofdstuk, voor meer gedetailleerde berekeningen kan men [74] er op naslaan.

Indien men een spouw zou voorzien net voor de zonnepanelen, kan men de warmteafvoer eventueel verder stimuleren door actief te ventileren. Het glas nodig om deze spouw te realiseren zal echter een deel van de invallende zonnestraling reflecteren en zodoende het elektrisch rendement verlagen. Uit onderzoek blijkt dat men dit verloren elektrisch rendement niet kan terugwinnen door de gerealiseerde temperatuursdaling door zulke spouw.[65]

2.3.3 Warmteafvoer door een spouw achteraan het zonnepaneel

De warmteafvoer in de spouw gebeurt vooral convectief. Via warmtetransport zal tevens het tegenoverliggende vlak, het dakvlak, opgewarmd worden. Doch kan hierdoor, zoals eerder gesteld, weinig warmte ontsnappen. Echter wordt zo de achterwand ook geactiveerd om extra warmtetransport door convectie te creëren.

Wel zal een deel van de warmte door straling gedissipeerd worden doorheen de openingen van de spouw. Bij relatief lange spouwen bedragen deze verliezen slechts 2% [75], terwijl bij verhoudingen van L/d kleiner dan 10 deze wel van enig belang kunnen zijn. Dit kan men ook afleiden uit figuur 2.3.

De drijvende kracht achter de convectie berust op 2 principes: thermische trek of windgeïnduceerde drukverschillen aan de openingen. Algemeen kan men stellen dat bij een worst-case scenario enkel thermische trek optreedt, namelijk bij windstilte. Vele studies trachten deze thermische trek te begroten, gezien deze relatief eenvoudig is op te stellen mits bepaalde vereenvoudigingen.

Windgeïnduceerde drukverschillen zijn echter veel moeilijker te vergroten en sterk afhankelijk van de wispelturigheid van de wind evenals omgeving- en installatiefactoren. Weinigen hebben zich hier dan ook aan gewaagd.

Om beiden enigszins te begroten werd steeds vanuit een vereenvoudigd model vertrokken: namelijk een breed, dun kanaal dat slechts een in- en uitlaat heeft met aan de ene wand een oppervlaktewarmtebron en de andere wand adiabatisch verondersteld. Zo kan men tot een relatief oplosbaar 2D-model komen. Mocht men de spouw volledig open veronderstellen wordt het probleem uiterst complex met 3-dimensionale stromingspatronen die enkel nog met CFD (computational fluid dynamics) software uit te werken vallen. Hiervan zouden ook de randvoorwaarden voor de winddrukken te situatiegebonden zijn om er enige zinnige conclusies uit te trekken.

De meeste bevindingen zijn als volgt te bevatten: bij lage windsnelheden zal vooral de thermische trek domineren, deze is afhankelijk van de netto flux die de lucht in de spouw ontvangt. Bij hogere windsnelheden zal de warmteafvoer dan weer gedomineerd worden door deze snelheid.

In wat volgt zullen eerst beide principes worden uitgelegd om vervolgens een duidelijk beeld te scheppen van wat precies de warmteoverdracht, vooral door convectie, naar de spouw kan bevorderen.

2.3.3.1 Thermische Trek

De verwarmde lucht net achter het zonnepaneel zal opwaarts willen drijven gezien de lagere dichtheid dan die van de koudere lucht van de omgeving. Zo stijgt warme lucht uit de bovenkant van de spouw en wordt er onderaan koudere lucht aangezogen. De hoeveelheid warmte die hierdoor kan gedissipeerd worden is van vele factoren afhankelijk: temperatuursverschil, wrijvingsverliezen aan de kanaalwanden en van de in- en uitlaat, stromingsregime,...

Deze thermische trek kan uitgedrukt worden als een drukverschil tussen in- en uitlaat.[76]

$$\Delta p_{tt} = \rho g \beta (T_{gemiddeld} - T_{in}) L \sin \theta \quad (2.7)$$

De gemiddelde temperatuur in de spouw is echter moeilijk in te schatten, ze varieert namelijk zowel dwars als langs (zie verder), daarom wordt veelal een voorstel gedaan om deze naar de uitlaattemperatuur te herschrijven.

$$\Delta p_{tt} = \rho g \beta S (T_{uit} - T_{in}) L \sin \theta \quad (2.8)$$

Waarbij S , een factor gelegen tussen 0 en 1, de temperatuursverdeling in de spouw aangeeft (zie volgend hoofdstuk voor verdere uitwerking).

Door dit drukverschil aan de in- en uitlaat openingen van een kanaal, gelijkvorming met de spouw, te plaatsen kan men de geïnduceerde stromingsnelheid begroten, waaruit men dus ook de convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt kan afleiden.

2.3.3.2 Windgeïnduceerde ventilatie

$$\Delta p_{wind} = C_{P_i} \rho \frac{V_{wi}^2}{2} - C_{P_e} \rho \frac{V_{we}^2}{2} \quad (2.9)$$

Hoewel men theoretisch eenvoudig het drukverschil door wind, en zo ook de stromingsnelheid van de lucht, uit deze formule kan afleiden, ligt de moeilijkheid in het bepalen van de winddrukcoëfficiënten aan in- en uitlaat. Deze zijn alles behalve stationair en kunnen enkel theoretisch ontrafeld worden in een degelijk model van de installatie en zijn omgeving in CFD software. En dan nog bekomt men oplossingen die enkel gelden voor het 2D model welke slechts een vereenvoudiging is van het

effectieve complexe 3D stromingsprobleem. Enkel experimenteel zou men dus voor bepaalde proefopstellingen zinnige winddrukcoëfficiënten kunnen bekomen.

Een belangrijke invloed op de wind is nu eenmaal de omgeving waarin de installatie zich bevindt: in een open vlakke zal de wind vrij spel krijgen of middenin de bebouwde kom zal de wind gehinderd worden door allerlei obstakels.

In de windnorm kan men echter wel lokale c_{pe} coëfficiënten terugvinden. Echter zijn deze sterke vereenvoudigingen en zijn de openingen niet eenduidig in bepaalde voorgestelde zones te lokaliseren. Wat misschien wel een mogelijkheid zou zijn is om een doorvoer doorheen het dak te voorzien naar de andere dakwand. Indien wind recht op een dakvlak blaast dan zullen steeds tegengestelde winddrukcoëfficiënten op het ander dakvlak heersen. Zodoende wordt een mogelijk drukverschil sterk bevorderd. Meestal wordt dit reeds toegepast voor de spouw aan het onderdak, waar deze doorvoer opening kan worden voorzien onder de nokpannen.

2.3.3.3 Actieve ventilatie/koeling

Indien men de zonnecellen nog verder wenst te koelen kan men altijd overstappen naar actieve ventilatie. De warmte die zo wordt afgevoerd, kan eventueel aangewend worden voor andere doeleinden, zoals verwarming of als warmtebron voor een warmtepomp. Deze mogelijkheden werden reeds uitvoerig besproken in deel I onder het hoofdstuk PV/T.

Deze actieve ventilatie werkt analoog als bij windgeïnduceerde ventilatie en kan op zelfde manier begroot worden.

2.3.3.4 Tegenwerkende kracht: hydraulische weerstand van de spouw

De stroming zal zich natuurlijk niet onverhinderd kunnen ontwikkelen. De geometrische dimensies van het kanaal, eventuele obstakels, de vorm van de in- en uitlaten en het stromingsregime hebben allen hun invloed op de weerstand die een eventuele stroming zal ondervinden.

Algemeen bestaan er twee stromingsregimes (afhankelijk van het Reynolds getal) waarin gerekend kan worden: laminaire en turbulente stroming met een overgangszone ertussenin. Hoewel in laminaire stromingsgevallen de snelheid maximaal is, blijkt toch een turbulent regime beter: door complexere stromingspatronen zal de lucht doorheen de volledige spouw gemengd opdrijven, waardoor een grotere massa opgewarmd kan worden. Dit terwijl bij laminaire stroming enkel de grenslaag opwarming vertoont (hierover meer later). De meeste stromingsregimes bij hoge temperaturen van de zonnepanelen bevinden zich echter in de overgangszone of net in de turbulente zone.

Welke invloed deze wrijving heeft kan begroot worden in het voorgestelde model in volgend hoofdstuk.

2.3.3.4.1 Invloed van obstructies in de spouw

In de meeste theoretische benaderingen wordt steeds verondersteld dat er zich geen obstructies bevinden in de spouw. In reële situaties bevinden er zich meestal dwarse ribben waaraan de PV modules worden bevestigd. Ook wordt soms een gaas of rooster voorzien om geen vogels of andere dieren aan te trekken. Deze obstakels creëren een turbulente mengeling van de lucht, dewelke zowel de hydraulische verliezen als de warmteoverdracht vergroten. Terwijl de stroming slechts met de 4de wortel evenredig is aan de weerstand, welk dergelijke ribben vergroot, bleek experimenteel dat de warmteoverdracht verdubbelt[77].

Tonui gaat zelfs nog verder door dwarse vinnen op de achterwand van de spouw te installeren, dit wel in een PV/T installatie.[78] Het totale thermische rendement steeg maar de celtemperatuur steeg ook lichtjes. Frilling merkte dan weer een lichte daling op.[79]

Om een optimaal evenwicht tussen de wrijving en de warmteoverdracht te ontwerpen kan men methodes hanteren zoals men die gebruikt voor zonneluchtverwarmers. Brinkworth en Sandberg geven in eerder vernoemd werk hiervan een kleine samenvatting.[77]

2.3.3.4.2 Optimaliseren in en uitlaat coëfficiënten

De openingen rond de spouw zijn veelal te benaderen als in- en uitlaten met een scherpe rand. Er zijn echter andere, meer hydraulisch gunstige, vormen mogelijk die de stroming minder weerstand zouden bieden.

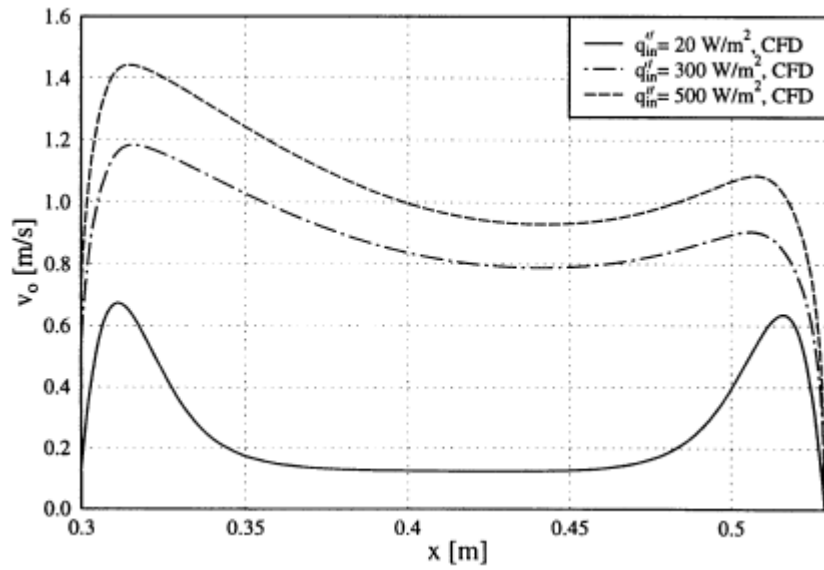
Deze werden behandeld door Sandberg.[80] Zo kan de inlaat coëfficiënt gereduceerd worden van 0,5 naar 0,1.

Er valt te noteren dat bij lange spouwen in vergelijking met hun diepte de wrijving vooral gedomineerd zal worden door de wrijving in de spouw zelf, en niet door de in- en uitlaatverliezen.

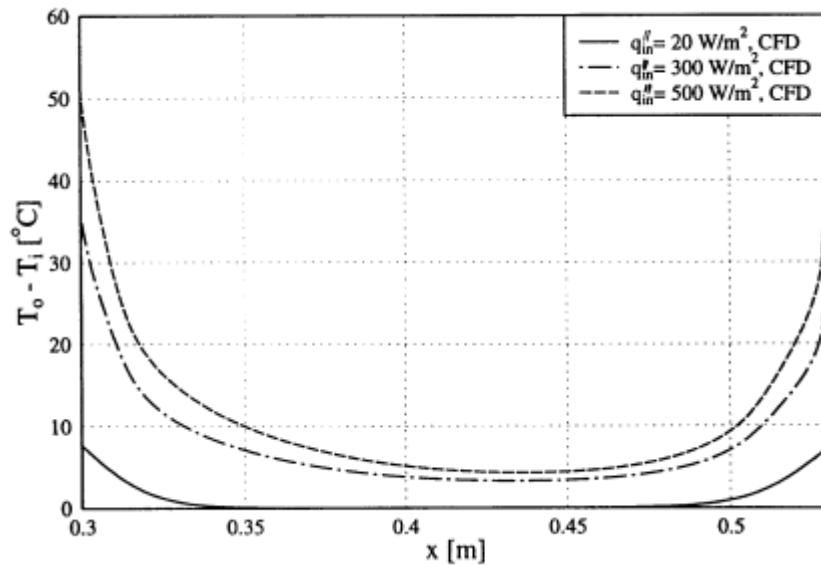
2.3.3.5 Stromings- en temperatuurprofielen in de spouw

Moshfegh en Sandberg werkten een model uit in CFD software om dit vervolgens te toetsen met een testopstelling: een spouwkanaal van 7m lengte en 0,23m diepte met een oppervlaktewarmtebron aan de ene wand en isolatie aan de andere kant. Hun theoretische voorspellingen bleken goed te correleren met hun metingen.[81]

Bij lage warmtetoevoer (20W/m^2) werd een laminaire stroming verondersteld, bij hogere warmtetoevoer (300 à 500W/m^2) een turbulente. Tussenliggende warmtetoevoeren genereren meestal een stroming in overgangsregime, welke niet te berekenen valt in CFD software. In volgende grafieken is duidelijk te merken dat bij laminaire stroming vooral aan de randoppervlakken warmte-uitwisseling optreedt, terwijl in turbulente regimes de volledige spouw geactiveerd wordt. Belangrijk valt op te merken dat de warmte overdracht tussen beide wanden bij lage invallende warmte vooral door straling gebeurt, terwijl bij hogere warmtefluxen deze ook door convectie gebeurt.

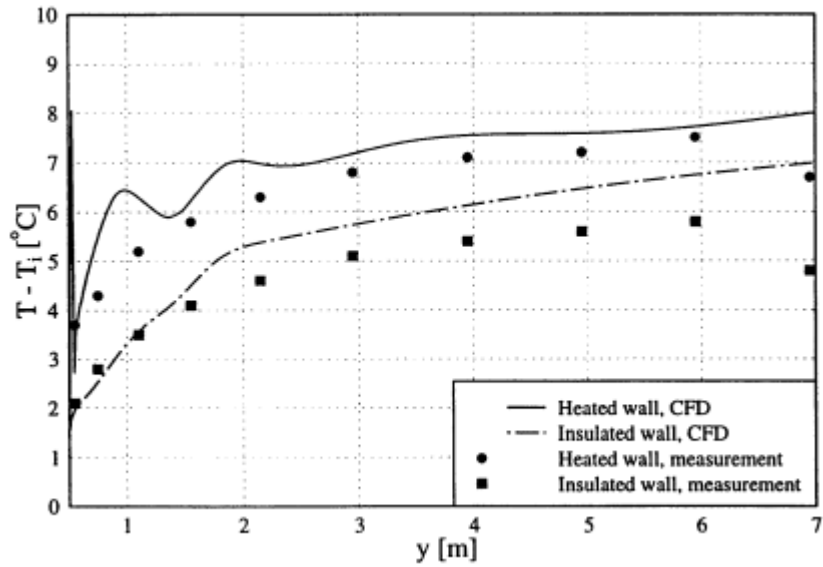


Figuur 2.4: Snelheidsprofiel dwars op de spouw

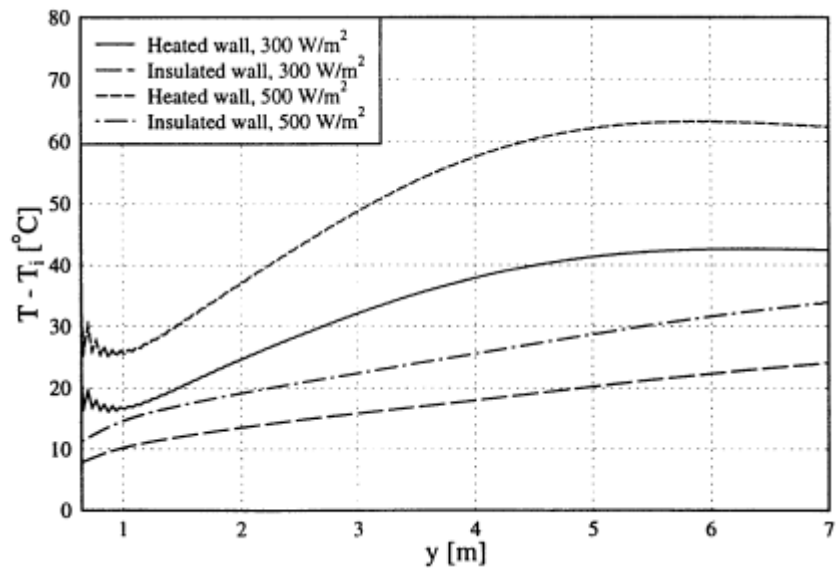


Figuur 2.5: Temperatuurprofiel dwars op de spouw

Over de lengte van de spouw valt op te merken dat de temperatuur stijgt naarmate meer afstand in de spouw werd afgelegd.



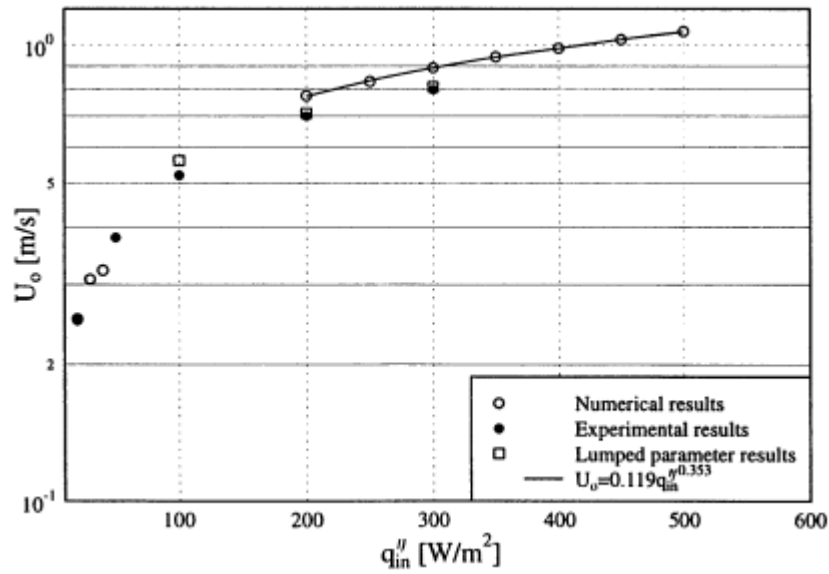
Figuur 2.6: Temperatuursprofiel langsheen de spouw bij 20 W/m^2



Figuur 2.7: Temperatuursvariatie langsheen de spouw bij $300\text{-}500 \text{ W/m}^2$

Terwijl bij laminaire stroming het temperatuurverschil tussen de twee wanden vrij constant blijft, blijkt bij turbulente stroming dit temperatuurverschil sterk op te lopen verderop in de spouw. Gelijkaardige profielen werden ook bekomen in onderzoek van Davidson.[82]

In volgende grafieken werden de uitlaatsnelheden en de temperatuurverschillen tussen in- en uitlaat uitgezet bij verschillende warmtefluxen. Het valt op dat beiden vooral beginnen te ontwikkelen eens ze zich in het overgangsregime bevinden, veroorzaakt door een flux van voorbij 20 W/m^2 .



Figuur 2.8: Uitlaatsnelheid bij verschillende warmtefluxen

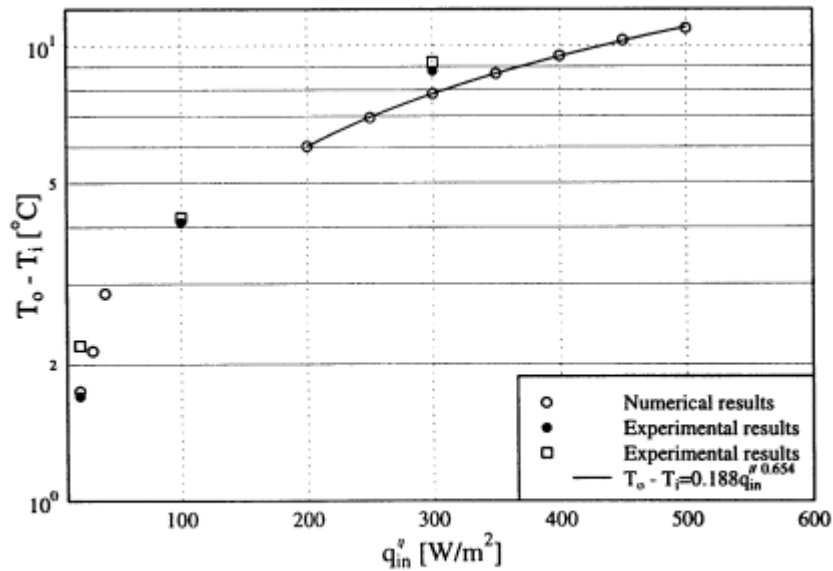
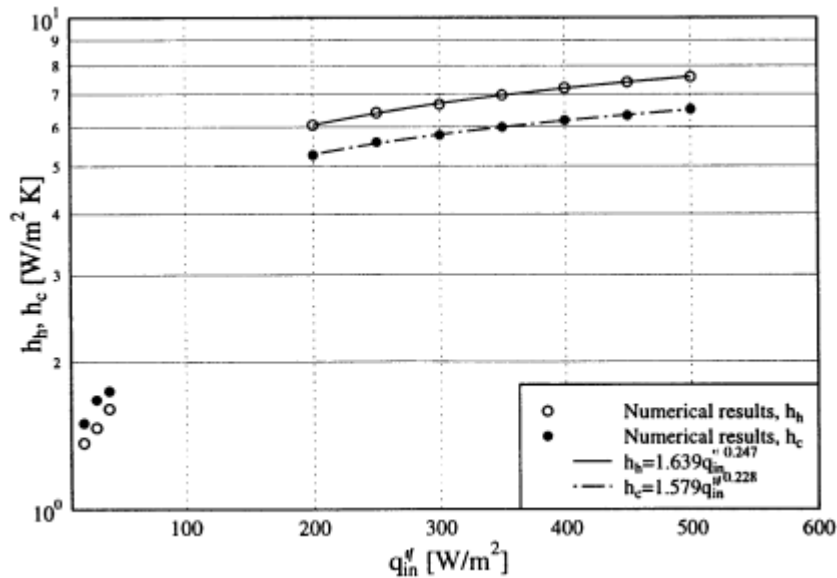


Fig. 4. Comparison of experimentally and numerically determined outlet air velocity (Fig. 4(a)) and temperature (Fig. 4(b)) results. The square shown in Fig. 4(b) is the recorded temperature difference while the filled circle shows the obtained temperature difference based on input heat and recorded flow rate.

Figuur 2.9: Verschil uit- en ingangstemperatuur bij verschillende warmtefluxen

Modellering in CFD software laat ook toe om de totale warmteoverdrachtscoëfficiënt van beide wanden te bepalen (met h_c deze voor de adiabatische wand en h_h voor die aan de warmtebron).



Figuur 2.10: Gemiddelde warmteoverdrachtscoëfficiënten

Ook werd nagegaan welke de invloed van de emissiefactor is van de wanden. Gezien straling een belangrijke factor is in het overbrengen van de warmte van de ene wand naar de andere wand wordt de emissiefactor van beide oppervlakken best zo hoog mogelijk gehouden. Zo zal bij warmtefluxen groter van 200 W/m^2 bijna 30% van de warmte overgedragen worden naar de onverwarmde wand om daar dan via convectie naar de buitenomgeving te worden afgevoerd. Sandberg spreekt zelf van 40%. [75]

Tabel 2.1: Effect van de emissiefactor van beide wanden

Case	ε_h	ε_c	\bar{T}_o °C	U_o m/s	\bar{T}_h °C	\bar{T}_c °C	\bar{h}_h W/m ² K	\bar{h}_c W/m ² K
1	1.0	1.0	27.8	0.89	50.6	35.0	6.7	5.8
2	1.0	0.1	28.3	0.83	62.7	24.3	6.3	5.0
3	0.1	1.0	28.5	0.84	64.2	23.9	6.3	5.6
4	0.1	0.1	28.7	0.82	65.2	22.0	6.4	4.9

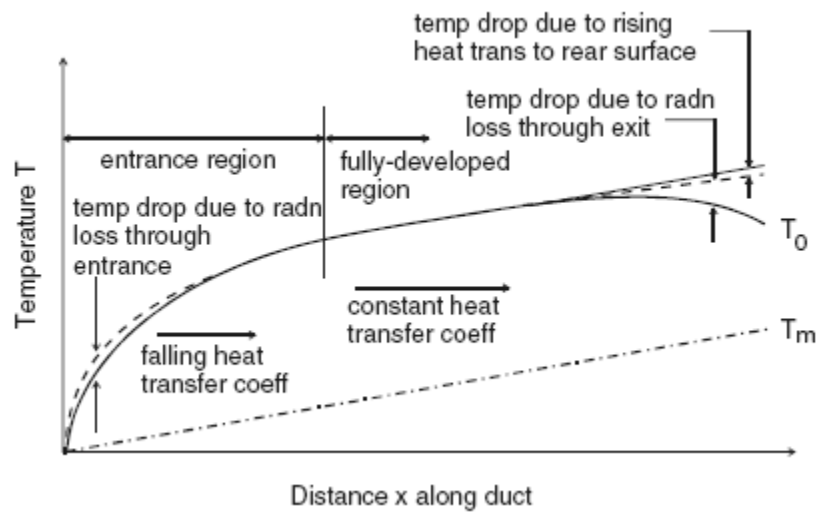
$$d = 0.23 \text{ m}, H = 6.5 \text{ m}, Pr = 0.708, Ra_d = 3.10^9, T_i = T_a = 20^\circ\text{C}, q''_{in} = 300 \text{ W/m}^2$$

Wel dient opgemerkt te worden dat in deze studie een vrij lange en diepe spouw werd beschouwd. Bij de meeste PV installaties zal de lengte echter tot enkele meters beperkt blijven terwijl de diepte van de spouw maximaal 10 cm zal bedragen. Daarenboven is er altijd een overgangszone aan de ingang waarin het stromingsregime zich nog moet ontwikkelen. Deze overgangszone zou wel beperkt blijven tot ongeveer 5 maal de dikte van de spouw. [76]

Ook werd enkel thermische trek onderzocht en is er enkel een in- en uitlaat opening respectievelijk onder- en bovenaan, terwijl thermische trek zich niet zo uitgesproken zal ontwikkelen indien beide zijanten open zijn.

De bevindingen en formules kunnen dus niet zomaar worden overgenomen, wel geven ze een goed beeld van wat er precies in de spouw gebeurt.

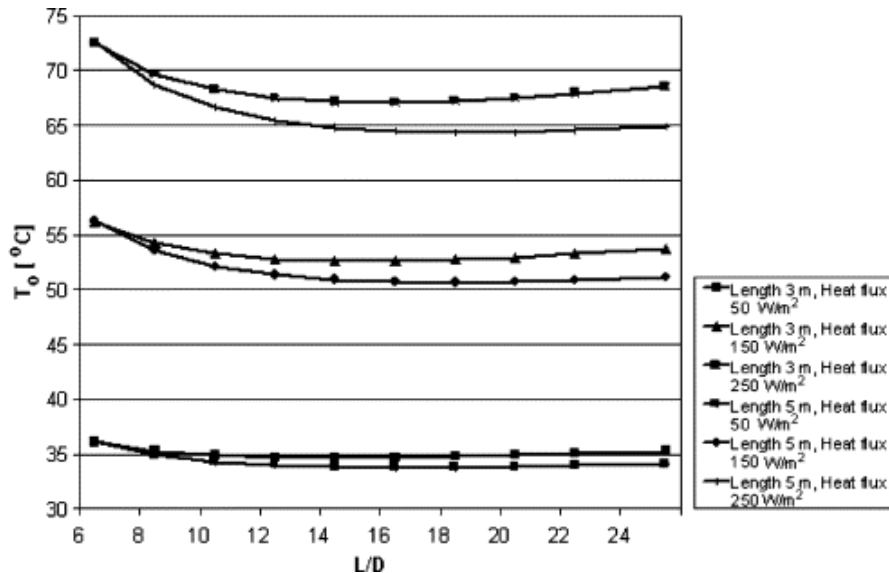
Brinkworth geeft een goede samenvatting van welke de invloedsfactoren zijn op het warmteprofiel langsheen de spouw. [77] Volgende figuur geeft een goede samenvatting.



Figuur 2.11: Invloedsfactoren op de temperatuur aan de PV zijde van de spouw

2.3.3.6 Optimale spouwdiepte

Meestal zal bij het ontwerp van een nieuwe installatie de lengte reeds bepaald zijn door het dak en/of de installatie zelf. De enige ontwerpparameter waar men vrijheid in heeft is dus de diepte van de spouw. Brinkworth stelt hier $L/D=20$ voor met D de hydraulische diameter welke bij twee parallelle platen twee maal de diepte benadert.[77]



Figuur 2.12: Wandtemperatuur op einde van de spouw

Deze werd eerst theoretisch afgeleid en vervolgens correct bevonden in experimenten. Let wel op, voor dit optimum ging men enkel uit van thermische trek en dus geen windverschijnselen of actieve ventilatie, want de precieze invloed van dit op het optimum is onduidelijk. Echter merkt men in de grafiek wel dat het optimum vrij vlak is en dat pas onder L/D van 10 noemenswaardige temperatuursverschillen optreden.

Dit optimum zou nagenoeg onafhankelijk zijn van de helling [83] en bedraagt omgerekend $1/40$ van de spouwlengte.

De vraag blijft echter of dit optimum geldig blijkt bij kortere, dunnere spouwen. Bij navraag aan de auteur werd hier geen duidelijk antwoord op gegeven. Maar het vermoeden is dat bij spouwen minder dan 10cm diep, wrijving een belangrijker aandeel zal spelen.

2.3.3.7 Invloed van de spouwlengte

Algemeen kan men stellen dat de lengte van de spouw een gunstig effect heeft, zolang wrijvingsverschijnselen niet gaan domineren. De thermische trek zal versterkt worden door grotere temperatuursverschillen en ook zullen de in- en uitlaten verder van elkaar gelegen zijn zodat er door de wind een groter drukverschil kan ontstaan. Bij heel lange spouwen benadert men eigenlijk een schouw die heel gunstig werkt door natuurlijke trek.

Eventueel kan men ook gaan spelen met de ligging van de zonnepanelen op de spouw. Dit werd getest door de lengte van de spouw te verdubbelen zonder dat op deze extra lengte een warmtebron aanwezig was.[75] Door de zonnepanelen bovenaan te situeren kwam men een 172% grotere stroming dan indien deze onderaan werd gesitueerd. In werkelijkheid zal een dergelijke verlenging van de spouw meestal onder dezelfde zonnestraling blootgesteld worden dus kan dit simpelweg als een langere spouw beschouwd worden.

2.3.4 Invloed spouw onderdak

Onder de pannen bevindt zich uiteraard nog een spouw. Deze heeft als hoofdfunctie een tweede regenscherm om binnensijpelend vocht af te leiden naar de dakgoot, maar ook om dit onderdak te verluchten. Hier is dus een extra vorm van ventilatie mogelijk. Echter is het effect hiervan heel moeilijk te begroten.

Om hier enig idee van te krijgen heeft Mei een labo-opstelling gemaakt waarbij PV cellen rechtstreeks op de pannen bevestigd waren en werd er actief geventileerd in de achterliggende spouw. Hierdoor kon een temperatuurverschil tot 3°C gerealiseerd worden.[84]

Het is dus aangewezen om de ventilatie in de dakspouw zo goed mogelijk te bevorderen. Dit kan men door grotere tengellatten te plaatsen en extra verluchting te voorzien door bijvoorbeeld verluchtingspannen. Aan de nok en onderdakrand kan men hiervoor ook speciale voorzieningen treffen.

2.3.5 Invloed dakopbouw

De warmteoverdracht doorheen de dakopbouw zal vooral conductief gebeuren. Zoals eerder gesteld zijn de meeste daken nu degelijk geïsoleerd dat deze flux vrij beperkt blijft. Bij gebrekkige isolatie zal dit eerder een gunstig effect geven, maar dan is de vraag of men niet beter eerst zou overgaan tot degelijk isoleren van de woning in plaats van zonnepanelen te installeren. Bovendien zal er zich, meestal in ongeïsoleerde dakruimtes, ook een sterke temperatuursontwikkeling plaatsvinden, welke de warmteoverdracht door het kleinere temperatuurverschil zal beperken.

Een ander belangrijk facet in de warmtebalans is de thermische inertie van materialen. Indien men over voldoende massa beschikt zal deze als het ware de temperatuurschommelingen kunnen bufferen en zodoende temperatuurspieken kunnen afvlakken. Echter is de thermische inertie van een typische dakopbouw vrij beperkt en zal deze er weinig toe dragen.

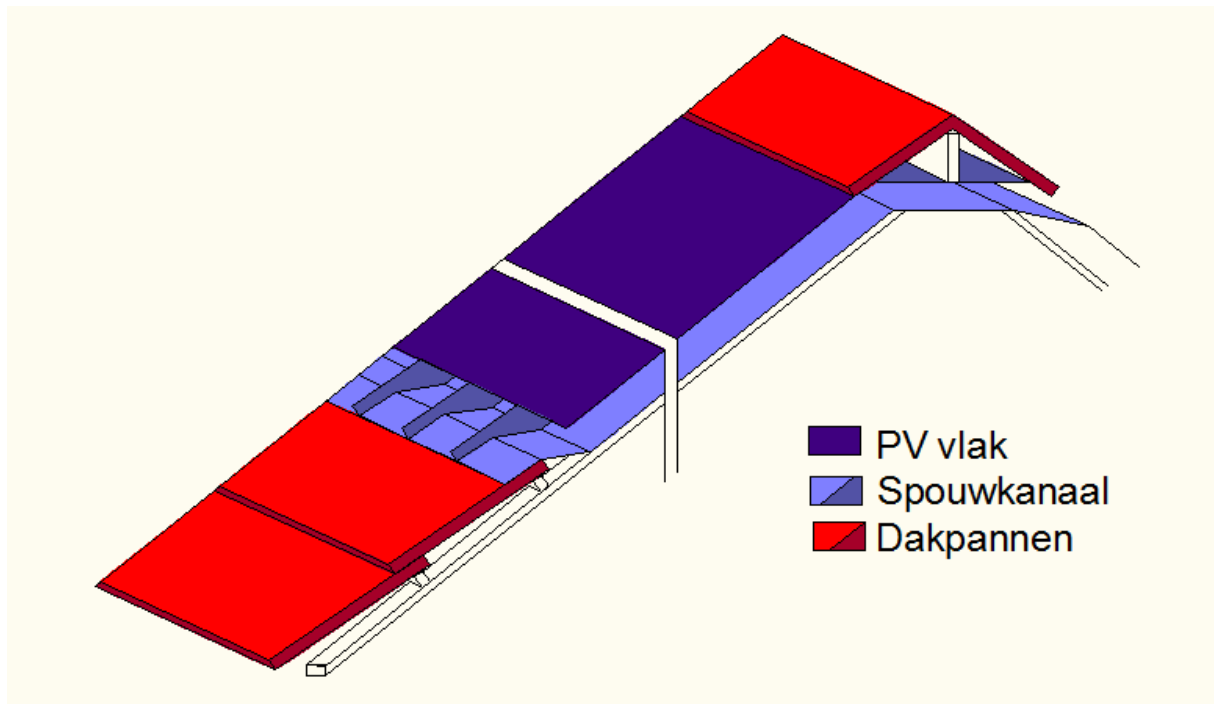
Er bestaan toepassingen waarbij PV panelen rechtstreeks op betonpanelen worden geplaatst die dan nog extra kunnen gekoeld worden door betonkernactivatie. Zo wordt er wel voldoende thermische inertie gecreëerd die zijn invloed zal hebben. Echter blijft de vraag hoe men op een degelijke manier het onderliggend gebouw nog zal kunnen isoleren en van degelijke waterdichting voorzien.

2.3.6 Invloed helling

De helling heeft op alle vlakken een bepalende invloed: de grootte van het convectief en stralingswarmtetransport, de thermische trek,.. Echter zijn deze factoren onbeduidend bij keuze van de helling. Deze wordt best gekozen volgens de optimale lichtinval (cfr. deel I) maar ligt meestal al vast door de helling van het constructie onderdeel waarop de panelen zullen geplaatst worden .

2.4 Principe-voorstel geïntegreerde panelen met ventilerende spouw

Uit het voorgaande valt op te merken dat winddrukverschillen aan in- en uitlaat openingen een grote invloed hebben op de koeling van de spouw. Voor thermische trek is vooral de lengte van belang. De gunstige invloed van de spouw kan volgens de auteurs toch gecombineerd worden met een geïntegreerde installatie zonder een bestaande dakstructuur ingrijpend te veranderen.



Figuur 2.13: principe voorstel

Daar waar de meeste geïntegreerde modules nog steeds rechtstreeks op de pannen bevestigd worden, is het voorstel om deze pannen volledig te vervangen door een soort kanaalplaat. Zo kan zeker een inlaatopening van 2-5 cm voorzien worden zonder dat deze visueel storend wordt in het dakvlak. De zonnepanelen zouden tot net aan de nokpannen moeten doorlopen zodat men een kanaaldoorgang kan voorzien worden met het andere dakschild. Zo kan men optimaal inspelen op de meestal tegengesteld heersende winddrukcoëfficiënten. Door randeffecten worden negatieve winddrukcoëfficiënten aan de dakranden meestal nog versterkt, wat nog een extra gunstig effect zou geven.

Door ook de installatie tot in de nok door te trekken kan men in principe de langst mogelijke spouw in het dakvlak creëren, welke dan weer de thermische trek ten gunste komt.

Voorts kan men de hydraulische diameter van de kanalen vergroten, en dus de wrijving verkleinen, door de kanaalplaat zelfdragend te maken zodat men de bestaande panlatten kan verwijderen. Dergelijke versteviging van de kanaalplaat impliceert dwarse verstijving dewelke, indien oordeelkundig gekozen, extra koeling door turbulentie kan veroorzaken.

De materiaalkeuze voor deze kanaalplaat is heel belangrijk: zo dient geopteerd te worden voor een zo goed mogelijk thermische geleiding en zo hoog mogelijke emissiefactor. Vermoedelijk is de gebruikte colofast voor de KoraSun dragers hiervoor geschikt.

Dit betreft enkel een principe-voorstel. Er vergt nog speciale aandacht naar de aansluiting met de aanliggende pannen en ook met de modules onderling. Ook de uitvoering onder de nok dient van naderbij te bekeken worden, niet altijd zal men hier een doorgang kunnen maken.

Er is een vermoeden dat dergelijke installatie een rendementsverbetering van minimaal 1 à 2% zou betekenen ten opzichte van de klassiek geïntegreerde installatie. Gezien een installatie toch al snel enkele tienduizenden euro's kost is er waarschijnlijk een marge waardoor dergelijke aanpassingen financieel haalbaar zouden blijken.

2.5 Besluit

Men merkt dat het opstellen van de warmtebalans rondom de zonnecellen vrij complex is en men zonder verstrekkende vereenvoudigingen weinig theoretisch kan beschouwen.

Wel is de invloed van ventilatie vrij groot: aan de voorkant van het paneel zal de afgevoerde warmte door convectie lineair stijgen met de windsnelheid. Indien er een spouw aanwezig is zal het massadebiet in die spouw, en dus ook de afgevoerde warmte, proportioneel zijn met de windsnelheid en zal bij geen wind het massadebiet evenredig zijn met de derde machtswortel uit de netto warmteflux in de spouw.[85] De luchtsnelheid ter hoogte van het paneel heeft dus een grote invloed.

De warmteafvoer door straling is echter louter afhankelijk van de temperatuurverschillen. Wel is het belangrijk om de stralingsoverdracht in de spouw zo goed mogelijk te bevorderen door de emissiefactoren van beide wanden zo dicht mogelijk bijeen te houden. Zodoende activeert men de achterwand ook om convectief warmte af te voeren, en dit tot 40% van de totale warmteafvoer in de spouw.

Doorheen de tekst werden enkele aandachtspunten gevestigd om een installatie te optimaliseren. Algemeen (vooral bij geïntegreerde toepassingen) komt het er vooral op neer de ventilatie aan het onderdak te bevorderen door:

- het plaatsen van dikkere tengellatten
- verluchtungsstroken onder de onderste pannenrij te plaatsen aan de dakranden
- circulatie onder de nok van het ene dakvlak naar het andere zo weinig mogelijk te belemmeren
- verluchtungsplatten te voorzien
- ...

Bij On-top installaties beschikt men nog over een extra spouw die men beter kan laten renderen door:

- optimale lengte/diepte verhouding van 40
- zo hoog mogelijke emissiefactoren van beide spouw oppervlakken
- aanwezigheid van dwarsribben
- hydraulisch gladde in- en uitlaten
- verlengen spouw
- ..

De bevindingen voor de spouw bij On-top panelen werden steeds opgebouwd vanuit een model waar de spouw eerder als kanaal werd beschouwd. Men kan veronderstellen dat deze ook een gunstig effect zullen hebben bij een volledig open spouw, echter zal de invloed misschien uitvergroet of net verkleind worden.

Gezien de aanwezigheid van een dergelijk natuurlijk geventileerde spouw slechts 3% rendementswinst realiseert, dient men ook het relatieve belang van iedere voorgestelde aanpassing in beschouwing te nemen.

Op basis van deze bevindingen werd tot slot een voorstel gedaan hoe men alsnog bij een geïntegreerde installatie een spouw zou kunnen realiseren zonder enige ingrepen op de bestaande dakstructuur.

3 Poging tot modelleren

3.1 Inleiding

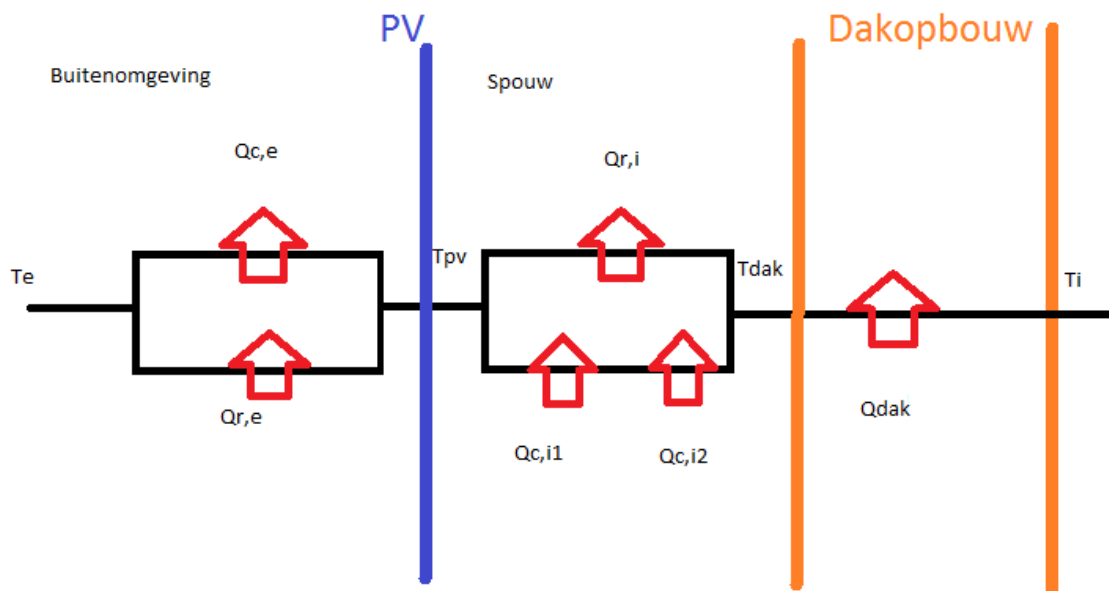
De werkelijke aard van dit probleem is vrij complex. Indien men niet de vereenvoudigingen zou hanteren die meermaals werden aangehaald, dient men zich te beroepen op moeilijke differentiaalvergelijkingen. Vooral de Navier-Stokes vergelijking en de momentenvergelijking spelen een belangrijke rol in het exact modelleren.

Daarnaast is de wispelturigheid van de kenmerkende parameters, namelijk windsnelheid en zonnestraling, geen éénduidig bepaald gegeven. Om deze alsnog te kunnen hanteren in een wiskundig model dient men ze als stochastische processen te benaderen.

Recenter onderzoek tracht dan ook beiden te combineren. Bloem stelde zo een niet-lineaire eerste orde stochastische differentiaalvergelijking op om de warmteoverdracht van een PV paneel te beschrijven.[86] Friling gaat diezelfde richting uit.[79]

Andere auteurs maken hun analyse aan de hand van Rayleigh , Nusselt, Grashof en Prantl getallen, die de warmteoverdrachten van fluïda dimensieloos karakteriseren (vergelijkbaar met het Reynolds getal voor stroming).[87]

Deze theorie valt echter buiten de context van onze opleiding. Vanuit onze theoretische achtergrond zullen we trachten een ééndimensionaal thermisch netwerk op te bouwen die de situatie enigszins benadert.



Figuur 2.14: Thermisch netwerk met spouw

Bij geïntegreerde systemen valt de parallel schakeling in de spouw uiteraard weg.

3.2 Warmteoverdrachten

3.2.1 Warmteoverdracht doorheen dakopbouw

$$q_{dak} = U_{dak} (T_{dak} - T_{binnen}) \quad (3.1)$$

3.2.2 Warmteoverdracht naar omgeving

$$q_{buiten} = U_{buiten} (T_{ref,e} - T_{pv}) \quad (3.2)$$

$$\text{Met: } U_{buiten} = h_e = h_{ce} + h_{re} \quad (3.3)$$

$$h_{r,e} = \epsilon \cdot \sigma \cdot T_m^3 \quad (3.4)$$

Met: T_m = Gemiddelde temperatuur oppervlakte en omgeving

$$h_e = 4 + 4 \cdot V_{10} \quad (3.5)$$

$T_{ref,e}$ = referentie temperatuur omgeving

$$T_{ref,e} = T_e + \frac{a_s I_s - h_{re} F_{ssky} \Delta T_{sky}}{h_{ce} + h_{re}} \quad (3.6)$$

$$\text{Met: } F_{ssky} = \frac{(1 + \cos \theta)}{2} \quad (3.7)$$

De warmteoverdrachtscoëfficiënt voor straling is dus afhankelijk van de temperatuur en dus ook van de oplossing. Er moet dus telkens geïtereerd worden tot de oplossing convergeert. De buitenreferentie temperatuur zal dus voor beide systemen verschillen.

3.2.3 Warmteoverdracht door/ in de spouw

$$q_{spouw} = U_{spouw} (T_{pv} - T_{dak}) \quad (3.8)$$

$$\text{Met: } U_{spouw} = h_{ri} + \frac{1}{\frac{1}{h_{ci1}} + \frac{1}{h_{ci2}}} \quad (3.9)$$

Als benadering worden beide convectieve coëfficiënten gelijk verondersteld.

$$U_{spouw} = h_{ri} + \frac{h_{ci}}{2} \quad (3.10)$$

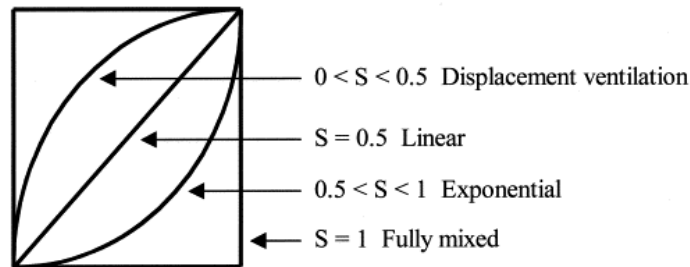
Om h_c te begroten dient men echter de lichtsnelheid in de spouw te kennen.

Brinkworth stelt formule 3.11 voor om het massadebiet te bepalen.[87] Eens dit massadebiet gekend is kan men er de gemiddelde snelheid uit afleiden.

$$\begin{aligned} & [K_{f1} + K_{f2} + f_1] \dot{M}^3 \\ & + [f_2] (\rho_0 A_c v_0) \left(\frac{v}{v_0} \right) \left(\frac{L}{D^2} \right) \dot{M}^2 \\ & - [CP_i V_{wi}^2 - CP_e V_{we}^2] (A_c \rho_0)^2 \dot{M} \\ & - [SQ_g] \sin(\theta) (2gL \frac{\beta_0}{c_{p0}}) \left(\frac{\beta}{\beta_0} \right) \left(\frac{c_{p0}}{c_p} \right) (\rho_0 A_c)^2 = 0 \end{aligned} \quad (3.11)$$

De eerste term brengt de hydraulische verliezen in rekening, de tweede de afhankelijkheid van het Reynolds getal van de stroming. De derde term laat dan weer toe windgeïnduceerde stroming te verrekenen en tenslotte behandelt de laatste term de thermische trek.

Met: Q_g =Netto warmte toevoer aan de lucht in de spouw[W]
 S = Stratification parameter geeft de verdeling weer van het temperatuursverloop (bij continue stijgend is $S = 0.5$)[-]



Figuur 2.15: Stratification parameter

Gezien c_p , β en ρ afhankelijk zijn van het resultaat van de energiebalans, namelijk de temperatuur van de lucht dient in principe ook hier iteratief gewerkt te worden.

Uit dit massadebiet kan nu de luchtsnelheid berekend worden.

$$V_{spouw} = \rho \frac{\dot{M}}{BH} \quad (3.12)$$

Wel dient opgemerkt te worden dat deze modellering vertrekt vanuit volgend randvoorwaarden:

- De dakopbouw werd als een adiabatische wand verondersteld, met andere woorden er zou geen warmtetransport doorheen deze wand worden gevoerd, in werkelijkheid gebeurt dit wel maar gezien de meeste daken nu voorzien zijn van een dikke isolatielaag is dit vrij aannemelijk.
- Ook beschouwt men een gesloten kanaal om tot een 2 dimensionale oplossing te komen. De zijkanten van de spouw werden dus gesloten verondersteld. In werkelijke situatie zijn de zijkanten altijd open en ontstaat er een complex 3D stromingspatroon die enkel te bestuderen valt met bijvoorbeeld CFD software.

Daarboven stelt Brinkworth zelf voor om deze parameters best experimenteel te bepalen gezien deze sterk afhankelijk zijn van de opstelling.

Hoewel de testresultaten van hun proefopstelling de formule bevestigen dient deze toch met enige voorzichtigheid aangewend te worden. Voor precieze voorspellingen is men beter een goede proefopstelling te doen, of een bestaande installatie degelijk te instrumenteren. Wel laat het toe een goed inzicht te krijgen in de effecten van de verscheidene parameters.

3.2.4 Totale energiebalans

3.2.4.1 Geïntegreerd systeem

De celtemperatuur kan voor het geïntegreerde systeem achterhaald worden door het warmtetransport naar de omgeving en de binnenkant gelijk te stellen.

$$q_{buiten} = q_{dak} \quad (3.13)$$

3.2.4.2 On-top systeem

Deze werd opgelost door eerst de totale warmteflux door de equivalente thermische weerstand te bepalen.

$$R_{eq} = \frac{1}{h_{re} + h_{ce}} + \frac{1}{h_{ri} + \frac{h_{ei}}{2}} + \frac{1}{U_{dak}} \quad (3.14)$$

Hieruit kan men de totale flux afleiden.

$$q_{totaal} = \frac{(T_{ref,e} - T_i)}{R_{eq}} \quad (3.15)$$

Eens deze bekend is, kan men het temperatuursverloop snel afleiden.

3.3 Numerieke uitwerking

3.3.1 Bepaling warmteoverdrachtscoëfficiënt dakopbouw

Tabel 2.2: Warmteoverdrachtscoëfficiënt dakopbouw

	dikte [m]	lambda[W/mK]	R[m ² K/W]	
dakpannen(*)				
spouw(*)			0,1	
onderdak	0,005	0,15	0,033	
niet homogene laag	0,15	0,052	2,87	
gipskarton	0,01	0,25	0,04	
plafonddak R _{si} (**)			0,1	
		SOM R	3,15	m²K/W
		U On-top:	0,32	W/m²K

(*) volgens EN ISO 6946 p9 gaat het om een sterk geventileerde spouw: bovenliggende constructieonderdelen mogen niet meer in rekening gebracht worden en men dient een R_{si} in rekening te brengen die gelijk is aan R_{se} bij windstilte.

Probleem met dit voorschrift is, dat dit als rekenmodel geldt voor een energiebalans van een woning op jaarbasis. Afhankelijk van de temperatuursopbouw, windsnelheid etc. zullen er wel warmteoverdrachten en weerstanden aanwezig zijn. Deze R_{se} is dus afhankelijk van de tocht in de spouw en temperatuursverloop. Deze is echter heel moeilijk te kwantificeren.

(**)bepaling R_{si} volgens EN ISO 6946

$$h_r = \pm 5 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$h_c = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$R_{si} = 1 / (5 + 5) = 0,1$$

Dezelfde bemerkingen zijn terug geldig. Echter is de effectieve warmteoverdracht aan dit vlak vrij beperkt en van minder belang.

3.3.2 Bepaling massadebiet

3.3.2.1 Geometrische eigenschappen

Tabel 2.3: geometrische eigenschappen

Diepte	0,15	m
Lengte	1,5	m
Breedte	1,5	m
Hellingshoek	35	°

3.3.2.2 Afgeleide geometrische eigenschappen

Tabel 2.4: Afgeleide geometrische eigenschappen

Ac	0,225	m ²
D	0,27	m

3.3.2.3 Wrijvingsfactoren

Tabel 2.5: Wrijvingsfactoren

Kf1	0,5		Drukverlies ingang (*)
Kf2	1		Drukverlies uitgang (*)
f1	0,674	-	Wrijvingsfactor (*)
f2	96	-	(*)

(*) op voorstel van [87]

3.3.2.4 Windkarakteristieken

Tabel 2.6: Windkarakteristieken

CP1	0,8	-	Winddrukcoëfficiënt inlaat
Win	0	m/s	Windsnelheid ingang
CP2	-0,3	-	Winddrukcoëfficiënt uitlaat
Wout	0	m/s	Windsnelheid uitgang

3.3.2.5 Fysische parameters

Tabel 2.7: Fysische parameters

Rho	1,127	kg/m ³	Dichtheid van lucht
beta	0,0032	1/K	Thermische uitzettingscoëfficiënt lucht
Cp	1005	J/kgK	Specifieke warmtecapaciteit lucht
v	1,57E-05	m ² /s	Kinematische viscositeit voor lucht
g	9,81	m/s ²	Graviteitsconstante

3.3.2.6 Netto warmtetoever en stratificatie parameter

Tabel 2.8: Netto warmtetoever en stratificatie parameter

Q	197,78	W
S	0,5	-

3.3.3 Keuze parameters

De meeste parameters kunnen vanuit de literatuur overgenomen worden. Bepaalde parameters vergen echter speciale aandacht:

- Q_g (netto energie toevoer spouw) (*) werd als volgt opgevat: q_{totaal} vermenigvuldigd met de oppervlakte en het temperatuursverschil doorheen de spouw
- S werd als 0,5 verondersteld. (*)

- Als omgevingsfactoren werd de maximaal gemeten irradiatie gekozen, met bijhorende temperaturen en windstil.

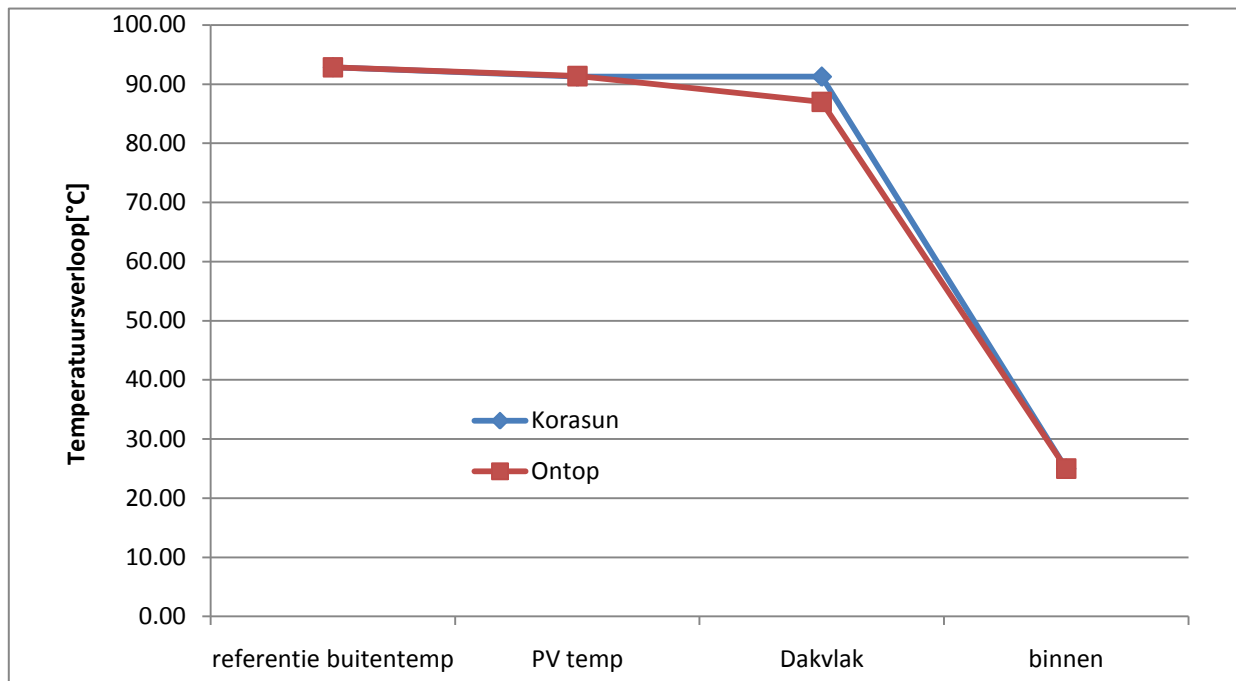
Tabel 2.9: Omgevingsfactoren

Binnentemperatuur	25
Buitentemperatuur	30
windsnelheid	0
Δsky	21
Irradiatie	1200
Effectieve absorptie	0,85

De effectieve absorptie werd gereduceerd gezien een deel van de zonnestraling omgezet wordt in elektrische energie. Δsky is deze voor een open hemel.

(*) Indien men het product SQ_g preciezer wil benaderen, kan men de procedure in [87] terugvinden.

3.3.4 Resultaat



Figuur 2.16: Grafiek van temperatuursverloop doorheen dakoppervlak

Tabel 2.10: Temperatuursverloop

	KoraSun	On-top	eenheid
buitentemperatuur	30,00	30,00	°C
referentie buitentemp	92,85	92,83	°C
PV temp	91,27	91,36	°C
Dakvlak	91,27	86,99	°C
binnen	25,00	25,00	°C

Terwijl de zonnecel bij het geïntegreerd systeem theoretisch tot 92,85°C zou oplopen worden de cellen in het On-top systeem 92,83°C. Enerzijds zijn deze temperaturen veel te hoog (er werd maximaal 65°C

gemeten) en anderzijds blijkt de spouw slechts 0,02°C te koelen. Vermoedelijk is dit inherent aan de manier van oplossen. In werkelijkheid bracht de spouw in gelijkaardige weersomstandigheden een koeling van 5°C teweeg.

Een ander probleem werd ondervonden bij de berekening van het massadebiet, deze bleek veel te hoog, namelijk 0,052kg/s. Uit literatuur voor soortgelijke opstellingen ligt de verwachting in de grootorde van 0,005 - 0,009kg/s.

3.4 Vereenvoudigde methode

Skoplaki stelt een gesimplificeerde methode voor die een rechtstreekse schatting toelaat van de module temperatuur aan de hand van een beperkt aantal parameters.[88]

$$T_{pv} = T_e + \omega \left(\frac{0.32}{8.91+2.04V_{10}} \right) I \quad (3.16)$$

Waarbij $\omega = \frac{k_{installatie}}{k_{freestranding}}$ als "installatie coëfficiënt"

Tabel 2.11: Waardes van k bij verschillende type installaties

PV array mounting type	ω
Free standing	1.0
Flat roof	1.2
Sloped roof	1.8 (1.0-2.7)
Façade integrated	2.4 (2.2-2.6)

Echter laat deze niet toe de kritische situaties met irradianties van 1000-1200W/m² en windstilte, op een realistische manier te begroten. Men bekommt al snel temperaturen van boven de 95°C welke nooit werden waargenomen in ons klimaat.

Verder worden ook nog het rendement en het vermogen op analoge manier afgeleid, maar gezien de onnauwkeurigheid worden deze hier niet meer vermeld.

3.5 Besluit

De totale warmtebalans is vrij complex en valt moeilijk te ontleden. Vele parameters zijn namelijk moeilijk te bepalen en daarenboven ook sterk afhankelijk van installatie tot installatie. Het is dus onmogelijk, zelfs indien men de meeste parameters goed heeft ingeschat, om tot een algemeen geldend model te komen.

Merkwaardig is wel dat de berekening van het massadebiet mank loopt, terwijl de experimentele studiën in [85] de bevestiging bracht van de vooropgestelde formule. Het is ook te betreuren dat de vergelijking geen oplossingen meer bood indien men de winddruk in rekening brengt. De term die de winddrukken in rekening bracht kan evengoed aangewend worden bij het dimensioneren van een ventilatie systeem gezien deze ook tot een aangelegde druk kan herleid worden.

Om de fout, welke dan ook, te achterhalen werd de auteur van dit artikel gecontacteerd, echter bleek deze naar alle waarschijnlijkheid emeritus.

Verder theoretisch onderzoek zou deze fout wel achterhalen en tot een beter inzicht van alle werkende processen leiden zodat een meer gefundeerde keuze van de parameters kan vooropgesteld worden.

Ook is er onduidelijkheid of de gehanteerde oplossingsmethode van het equivalente thermisch netwerk wel tot juiste resultaten leidt. Het lijkt alsof deze onmogelijk tot een significante temperatuursdaling ter hoogte van de zonnepanelen kan laten uitkomen.

4 De meetopstelling

4.1 inleiding

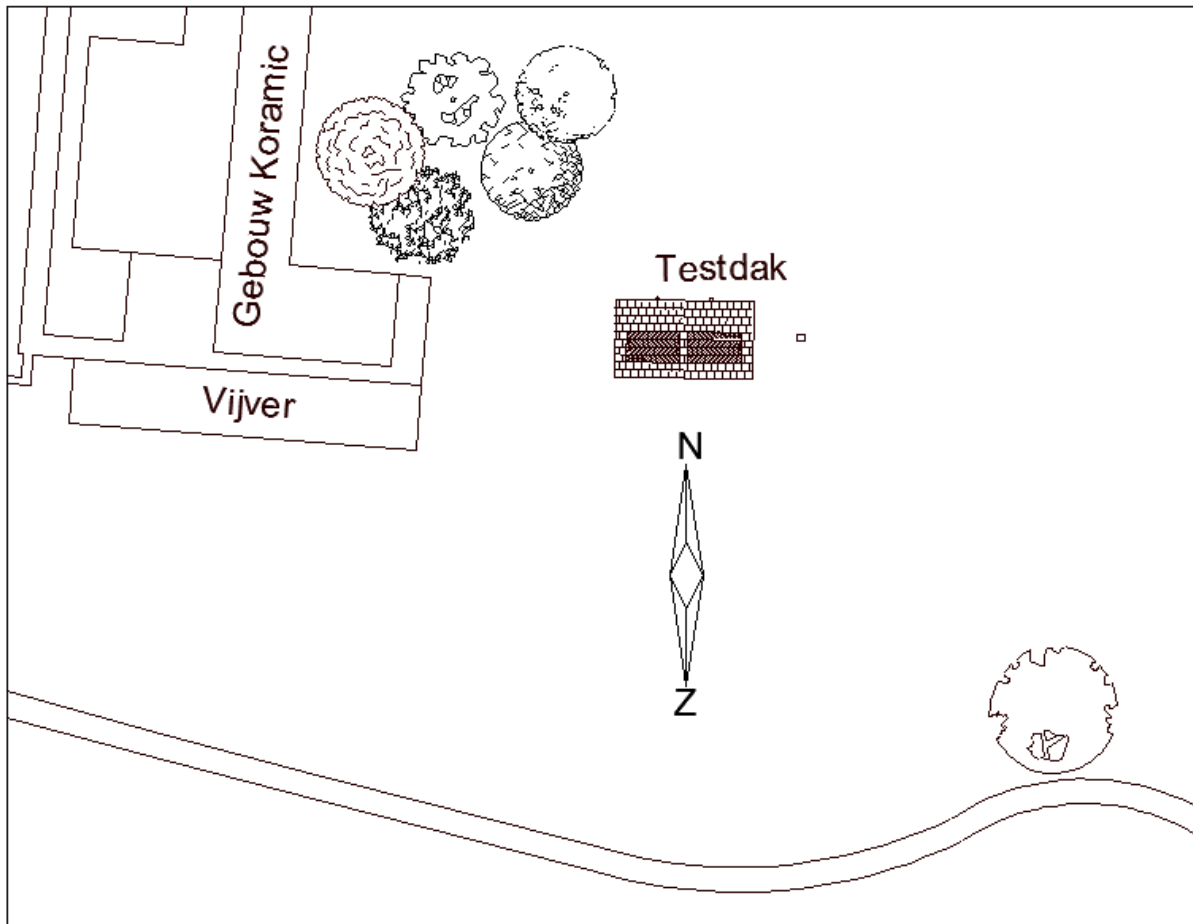
Om in te springen op de recente marktontwikkelingen lanceerde Koramic een eigen PV paneel, namelijk KoraSun. Een esthetisch zeer verantwoord product die op een rij speciaal daarvoor voorziene pannen bevestigd kan worden. Zo vormen de panelen één geheel met het dak. Echter wordt op deze manier van bevestigen geen spouw onder de panelen gecreëerd die voor extra ventilatie zou kunnen zorgen. Dit leidt tot een beperktere koeling en zodoende zouden de panelen een slechter rendement leveren.

Om het vermogensverlies bij de geïntegreerde KoraSun panelen precies te kunnen begroten, werd onder impuls van Koramic een testdak geïnstalleerd. Op dit testdak werden twee verschillende types installaties geplaatst van elk 4 zonnepanelen. Bij de ene installatie werden de panelen op een frame enkele centimeters bovenop het dakvlak bevestigd, de andere werd geïntegreerd in het dakvlak zoals de KoraSun panelen normaal geplaatst worden.

Gezien beide opstellingen identiek zijn, op de aanwezigheid van de spouw na, kan duidelijk het effect van zo'n spouw geëvalueerd worden. Uit voorlopige metingen bleek alvast dat het effect enigszins beperkt is tot 2,7%. Welke nauw aansluit met de verwachte waarde van circa 3% uit diverse literatuur.[19]

4.2 Beschrijving van de meetopstelling

De meetopstelling bevindt zich op het bedrijventerrein van Koramic te Kortrijk. Hieronder wordt een situatieschets weergegeven.



Figuur 2.17: Situatieschets testdak

4.2.1 De omgeving

De proefopstelling is gelegen in een vrij open terrein, waar de wind weinig weerstand ondervindt. Dit zal de werking van de spouw nog extra activeren in vergelijking met courante installaties die meestal in een stedelijke omgeving gebeuren waar wind veel meer belemmerd wordt. Bovendien is het dak ook zuidelijk gericht terwijl in België wind meestal vanuit ZW waait (zie figuur 2.19). Alle omgevingsfactoren zijn dus aanwezig om maximale koeling door de spouw te realiseren.



Figuur 2.18: Omgeving Z-O van het testdak

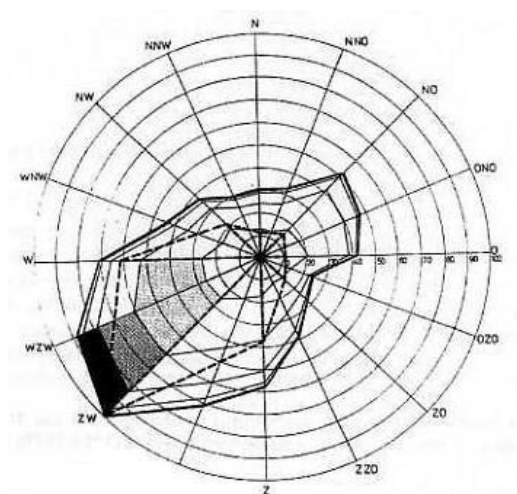


Figuur 2.19: Omgeving Z-W van het testdak

Op onderstaande foto is een totaalbeeld terug te vinden van de omgeving rond het testdak.



Figuur 2.20: Totaalbeeld van omgeving



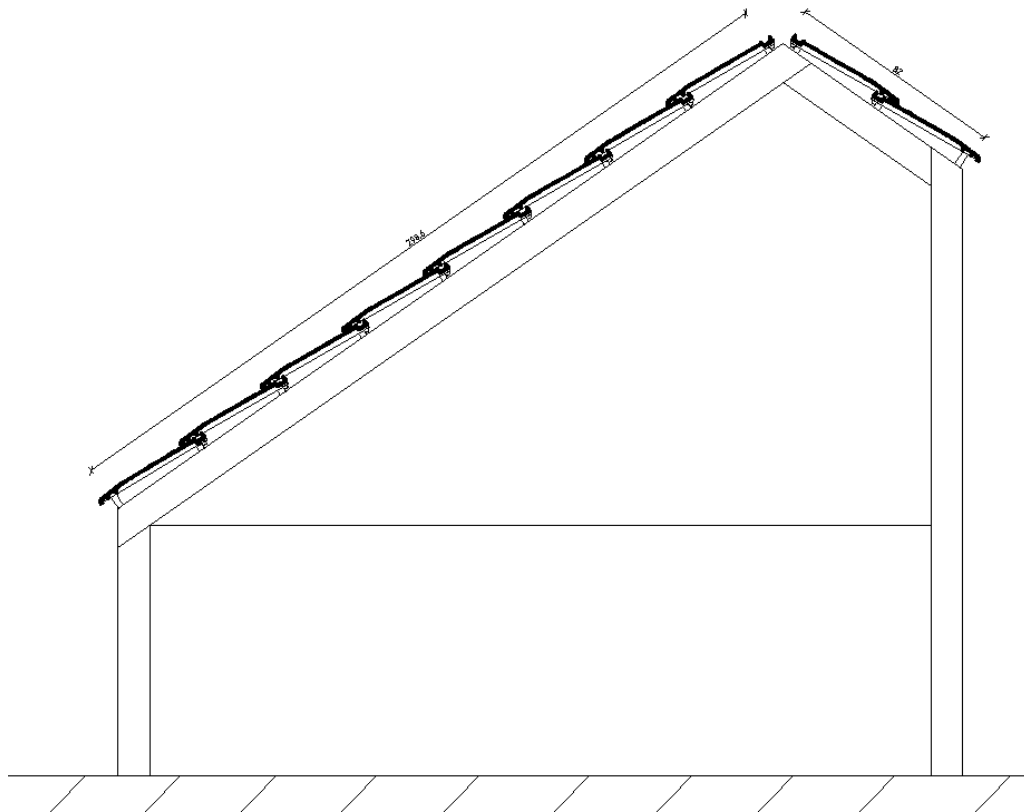
De hellingshoek van het dakvlak bedraagt 35° , in combinatie met de oriëntatie naar het zuiden kan een rendement van 100% worden behaald (zie deel I).

Op figuur 2.17 is merkbaar dat enkel het gebouw van Koramic en een boom in de Z-O richting enige vorm van beschaduwing kunnen geven op het testdak. Echter vallen deze schaduwen enkel in bij zonsopgang en zonsondergang. Daardoor kan men de invloed van beschaduwing enigszins verwaarlozen gezien de productie op deze momenten vrij laag is.

Figuur 2.21: Voornaamste Windrichtingen in België

4.2.2 De constructie

De proefopstelling bestaat uit een houten spanten constructie en beslaat een oppervlakte van $14,44\text{m}^2$ ($=5,08\text{m} \times 2,843\text{m}$). Het dakoppervlak bestaat uit twee zijdes (er is dus ook een nok voorzien), de ene zijde is 2985 mm lang en bestaat uit acht rijen van achttien dakpannen en twee verschillende types zonnepanelen, de andere zijde is 820 mm lang en bestaat uit twee rijen van achttien dakpannen.



Figuur 2.22: Doorsnede testdak

De gebruikte dakpannen zijn de Migeon Actua pannen (latafstand = 370 mm). Op figuur 2.23 is merkbaar dat aan de linkerkant van het dak de On-top panelen werden geplaatst en aan de rechterkant de KoraSun panelen (geïntegreerd). Per installatie werden telkens 4 panelen gebruikt (deze werden op voorhand geselecteerd om onder dezelfde condities een zelfde vermogen te leveren 78Wp met een fout van 0,2Wp).



Figuur 2.23: Testdak met verschillende systemen

In de ruimte onder het testdak is de vloer voorzien van isolatie (minerale wol). Momenteel is in de volledige binnenruimte de achterkant, zijkanten en het schuine vlak van het dak niet geïsoleerd. Verder zijn ook niet alle spleten en kieren voorzien van een kit waardoor de wind vrij spel heeft.



Figuur 2.24: Ventilerende onderlat

Bij het plaatsen van de KoraSun panelen raadt Koramic aan om ventilerende onderlatten (zie figuur 2.24) te plaatsen onder de onderste dakpannen. Hierdoor zal het onderdak extra geventileerd worden zodat de pannen onder de panelen wat extra kunnen afkoelen.

Tot op heden werden wel nog geen nokpannen geplaatst. Hierdoor wordt er in feite meer geventileerd in de onderdakspouw dan dat men op een reëel dak zou ondervinden.

Onder het bovenste KoraSun paneel zijn dakpannen geplaatst voorzien van fijne groeven (te merken aan het kleurverschil met de andere dakpannen). De bedoeling

van deze pannen is om nog extra ventilatie tussen pan en paneel te krijgen. Echter werd hiervoor geen specifieke meetapparatuur geplaatst om het verschil met de klassieke pannen te registreren. Gezien de groeven niet volledig in de pan doorlopen en zodoende geen effectief luchtkanaal gecreëerd wordt, valt dan ook te betwijfelen of dit enig effect zou hebben.

4.2.3 De installatie

4.2.3.1 KoraSun panelen

De KoraSun panelen zijn voorlopig met 4 verschillende types kleidakpannen integreerbaar: de Migeon Actua, de Migeon Mega, de Bisch/migeon Jura Nova en de Pottelberg Stormpan 44 (= populairste dakpan).

Normaliter worden de panelen op de markt gebracht met een fout van 3% op 78Wp. Om tot een onderlinge vergelijking te kunnen komen werden enkel panelen geïnstalleerd met een vermogen van 78,0 ($\pm 0,2$)Wp. De fout op de productie per 4 panelen bedraagt dus 0,4Wp (of 0,13%). In de vergelijking tussen beide systemen kan een fout van 0,1875% verwacht worden.

Tegenwoordig leveren de nieuwe KoraSun panelen 81 Wp, later zal dit verhoogd worden naar 85 Wp. Om dit vermogen op te wekken maakt men gebruik van 22 polykristallijne cellen. Om te voorkomen dat de installatie soms geen vermogen oplevert doordat een van de modules beschaduwd is, is in elke module een bypass diode (zie deel 1) voorzien. Koramic garandeert dat de zonnepanelen nog steeds op 90% rendement werken na 12 jaar en op 80% rendement werken na 25 jaar.



Figuur 2.25: Voorkant KoraSun paneel



Figuur 2.26: Achterkant KoraSun paneel

De KoraSun panelen zijn voorzien van 7 magneten (onderaan het paneel) die op de magneten in de speciale dakpannen vastklikken. Bovenaan worden de panelen met 4 schroeven in de panlatten bevestigd. Hierdoor verloopt de installatie zeer vlot en dienen geen pannen verzaagd te worden. Het paneel is ideaal om te gebruiken bij installaties op bestaande daken, ook mede door het laag eigengewicht (slechts 8kg/paneel) die de montage vereenvoudigt.

Dankzij het PU-kader (gebaseerd op de Colofast techniek) worden de cellen beschermd tegen UV-straling, water,... ze zorgen er ook voor dat het systeem naadloos aansluit op de dakpannen. De KoraSun panelen worden aan elkaar gekoppeld door middel van 4 mm² dubbel geïsoleerde kabels met MC3 connectors. Voor de aansluiting tussen omvormer en panelen worden solar kabels voorzien van minstens 6mm² (voor meer specificaties kan de technische fiche van het KoraSun paneel geraadpleegd worden in bijlage C).

Zoals te zien is in bijlage B (en eerder gezegd) bestaat er eigenlijk geen spouw tussen de KoraSun panelen en de dakpannen (de zonnepanelen liggen immers direct op de pannen). In bijlage A echter is op te merken dat het On-top paneel wel over zo'n spouw beschikt. De gemiddelde diepte van deze spouw bedraagt 9 à 10 cm. Terwijl voor de zijanten deze diepte varieert. In bijlage B is daarom een dwarsdoorsnede weergegeven waar men duidelijk ziet dat de diepte van de spouw (door het aluminium kader van 5 cm en de onderliggende dakpannen) varieert van 3,8 cm tot 6,7cm.

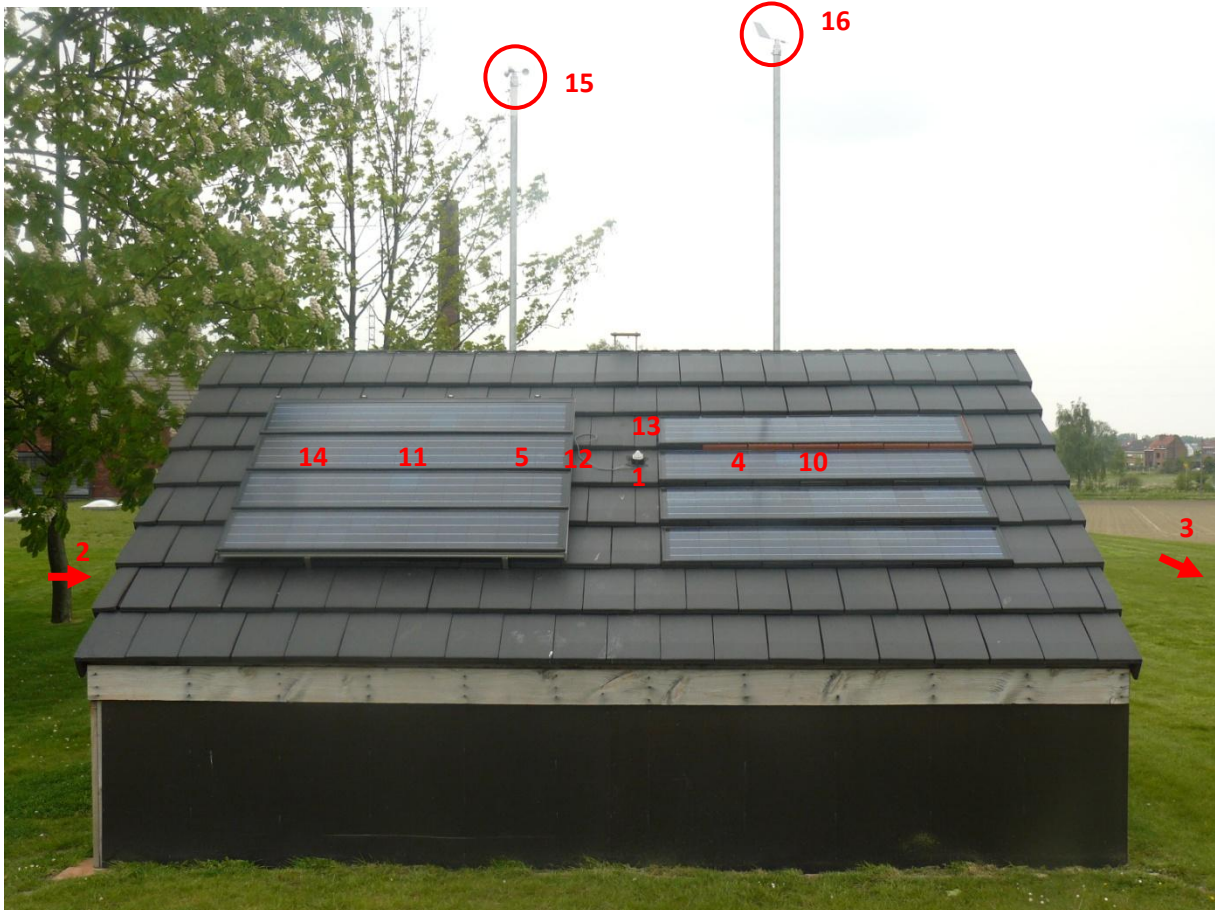
4.2.3.2 Omvormer

In het testdak zijn er twee omvormers voorzien van het type DorfMüller DMI 250/35 (een voor elke installatie). Via deze omvormers wordt de gelijkspanning omgezet in een wisselspanning (zie deel I). De nominale ingangscapaciteit van de omvormer is 360 Wp (4 gekoppelde panelen met elk een vermogen van ±78 Wp maakt een totale capaciteit van 312 Wp). De omvormer zet de spanning om met een Maximum Power Point (=MPP) werkend met een spanningsbereik tussen 28V tot 50 V.

Achter de omvormer werden twee vermogensmeters geïnstalleerd, deze meten hoeveel wisselspanning van elk type zonnepaneel (On-top of KoraSun) er naar het spanningsnet wordt gestuurd. Op de omvormers zit er sowieso ook een bepaalde productiefout. Deze is echter zeer moeilijk te bepalen. Daarboven hebben de kWh tellers ook hun eigen meetfout. Daarom zal hun fout groter zijn dan deze van de vermogensberekening gebaseerd op de gemeten DC spanningen en stromen.

4.2.4 De meetopstelling

De meetopstelling is voorzien van 16 meettoestellen en de twee eerder vermelde kWh tellers. Een globale foto van het testdak wordt hieronder weergegeven, hierin worden de locaties van de verschillende toestellen weergegeven. Vervolgens worden kort hun meet(on)nauwkeurigheid besproken.



Figuur 2.27: Testdak met verschillende meettoestellen

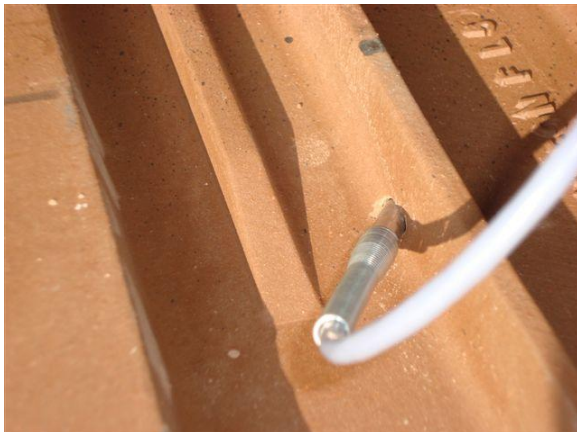
1. Pyranometer: Bepaling van de lichtinstraling (W/m^2)
2. PT100 1: Bepaling van de binnentemperatuur ($^{\circ}C$) (niet zichtbaar op foto)
3. PT100 2: Bepaling van de buitentemperatuur ($^{\circ}C$) (niet zichtbaar op foto)
4. PT100 3: Bepaling van de temperatuur ($^{\circ}C$) van de dakpan onder een KoraSun paneel
5. PT100 4: Bepaling van de temperatuur ($^{\circ}C$) van de dakpan onder een On-top paneel
6. Spanning KoraSun: wordt gemeten (tot op 0,01V)
7. Spanning On-top: wordt gemeten (tot op 0,01V)
8. Stroom KoraSun: wordt gemeten over de shunt weerstand (tot op 0,01A)
9. Stroom On-top: wordt gemeten over de shunt weerstand (tot op 0,01A)
10. PT100 5: Bepaling van de temperatuur ($^{\circ}C$) van een KoraSun paneel
11. PT100 6: Bepaling van de temperatuur ($^{\circ}C$) van een On-top paneel
12. PT100 7: Bepaling van de temperatuur ($^{\circ}C$) van het onderdak onder een vrije pan
13. PT100 8: Bepaling van de temperatuur ($^{\circ}C$) van een vrije pan
14. PT100 9: Bepaling van de temperatuur ($^{\circ}C$) in de spouw onder het On-top systeem
15. Anemometer: bepaling van de windsnelheid (m/s) met een nauwkeurigheid van ± 0.5 m/s
16. Windvaan: bepaling van de windrichting ($^{\circ}$) met een nauwkeurigheid van $\pm 2,5^{\circ}$

De pyranometer meet de dichtheid van de zonnestraling met een nauwkeurigheid van $\pm 7\%$. Ook zit er een onzekerheid van $\pm 3\%$ op de lineariteit van de metingen en kunnen de metingen beïnvloed worden met stijgende temperatuur ($\pm 0,2\%/K$). Dit meettoestel heeft een bereik van 0 tot 2000 W/m^2 . De keuze werd gemaakt om de pyranometer in het dakvlak tussenin de twee installaties te plaatsen onder dezelfde helling. Zodoende werd er een even grote irradiantie gemeten als de panelen ontvangen.

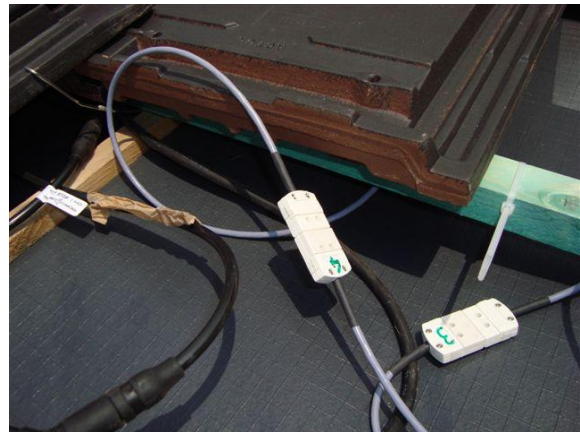
De PT100, ook RTD genoemd (Resistance Temperature Detection) meet de temperatuur van de desbetreffende materialen of omgevingen. De sensor werkt volgens het principe dat de weerstand van een bepaald materiaal wijzigt volgens een lineair verloop indien deze temperatuurschommelingen ondergaat.[89] De temperatuursensor bestaat uit een zeer fijne weerstandsdraad gemaakt uit platina (vandaar PT) waarover de spanning gemeten wordt. De 100 verwijst naar de elektrische weerstand van 100 Ohm die de temperatuursensor heeft bij 0°C ($138,5055 \text{ Ohm}$ bij 100°C).[90] Al de temperatuursensoren meten met een nauwkeurigheid van $\pm 1,0 \text{ }^\circ\text{C}$ en hebben een meetbereik van -200°C à 850°C . [91]

Aangezien de aansluitdraden een aanzienlijke invloed kunnen hebben op de weerstandsmeting door de veranderlijke temperaturen voorziet men de PT100 van een driedraadsaansluiting. Met behulp van de twee eerste draden wordt de weerstand van de PT100 en de leiding (kabel) gemeten. Tussen de tweede en de derde draad wordt uiteindelijk alleen de weerstand van de leiding gemeten. Door de tweede meting af te trekken van de eerste krijgt men het resultaat zonder invloed van de aansluitdraden.[92] Niet alleen de leiding maar ook de plaats van de temperatuursensor kan enige invloed hebben op de meetwaarden. Zo wordt er een sterk variërend temperatuursverloop verwacht doorheen de dakopbouw. Indien de meter niet dicht genoeg aansluit bij het te meten materiaal of wanneer deze niet op de bedoelde plaats is terechtgekomen, kan deze temperatuur verschillen van de reële temperatuur.

Op links 2.28 wordt duidelijk hoe de temperatuur van een vrije pan wordt gemeten. De temperatuursensor wordt in een daarvoor voorziene boring geplaatst. In figuur 2.29 worden de aansluitingen van temperatuursensoren 3 en 4 weergegeven.



Figuur 2.28: Vrije pan met PT100



Figuur 2.29: PT100 3 en 4

De buitentemperatuur wordt gemeten aan de hand van temperatuursensor 2. Deze sensor bevindt zich in een 'Stevenson Screen' (zie onderstaande figuur 2.30). Een Stevenson Screen is in feite een thermometerhut geplaatst op een hoogte van 1,5 meter boven kortgeknipt gras. De wanden van het thermometer hutje zijn wit daar het zonlicht invloed kan hebben op de te meten temperatuur. Door de wanden in het wit te voorzien wordt het licht gereflecteerd.[93] Om een vrije luchtstroom te realiseren worden in de 4 zijden ventilatieroosters voorzien, deze roosters voorzien een laminaire

luchtstroming waardoor een iets of wat constante windcirculatie wordt bekomen. Deze voorgaande voorwaarden worden bepaald door het WMO⁹.



Figuur 2.30: Stevenson Screen

De anemometer meet, zoals eerder gezegd, de windsnelheid. Hij stuurt al de gemeten data via een lineair signaal door naar de datalogger (van 4 tot 20 mA). Met deze windmeter kunnen windsnelheden tot 40 m/s worden gemeten, dit komt neer op zo'n 144 km/u. De meet(on)nauwkeurigheid van dit toestel bedraagt $\pm 0,5$ m/s.

Via de windvaan wordt de windrichting bepaald met een nauwkeurigheid van $\pm 2,5^\circ$. De windvaan kan ononderbroken 360° ronddraaien. Net zoals de anemometer stuurt de windvaan een lineair signaal door naar de datalogger (van 4 tot 20 mA). De windvaan werd manueel met kompas geijkt. Hierop zal dus een vrij grote onnauwkeurigheid zitten van circa 10-15°. In principe kan dit geen kwaad gezien dit kanaal niet precies hoeft bepaald te zijn, enkel een idee van de heersende windrichting is voldoende.

De twee meettoestellen werden bevestigd op een holle cilindrische ijzeren buis. De norm beschrijft dat de twee meettoestellen op een hoogte van 10 m boven het maaiveld dienen geplaatst te worden. Om logistieke redenen werd de meethoogte beperkt tot 6 m boven het maaiveld en een kleine 2 meter boven de nok. Hoewel de windsnelheid op deze manier niet met de genormaliseerde formules kan herleid worden tot de snelheid ter hoogte van het dakvlak, zal de lagere hoogte een beter beeld geven van deze snelheid. Initieel was de vraag om ook windsnelheden in de spouw te kunnen meten, echter bleek hiervoor niet onmiddellijk een haalbare oplossing beschikbaar.

De 18 verschillende meettoestellen worden aangesloten op een Data acquisitie apparaat, namelijk de Midi Logger GL800. De gegevens worden rechtstreeks opgeslagen op een USB stick (links boven het toestel). Deze dient voldoende groot te zijn aangezien er om de seconde 16 gegevens worden gemeten (voor 1 maand komen we aan ongeveer: 18metingen x 60seconden x 60minuten x 24uren x 30dagen= 46.656.000gegevens). In dit toestel is ook een intern geheugen voorzien zodat, wanneer de USB stick eruit wordt getrokken om de gegevens op de computer over te zetten, de metingen continu opgeslagen worden (op het intern geheugen kunnen zo'n 5,5 miljoen gegevens).

⁹ World Meteorological Organization

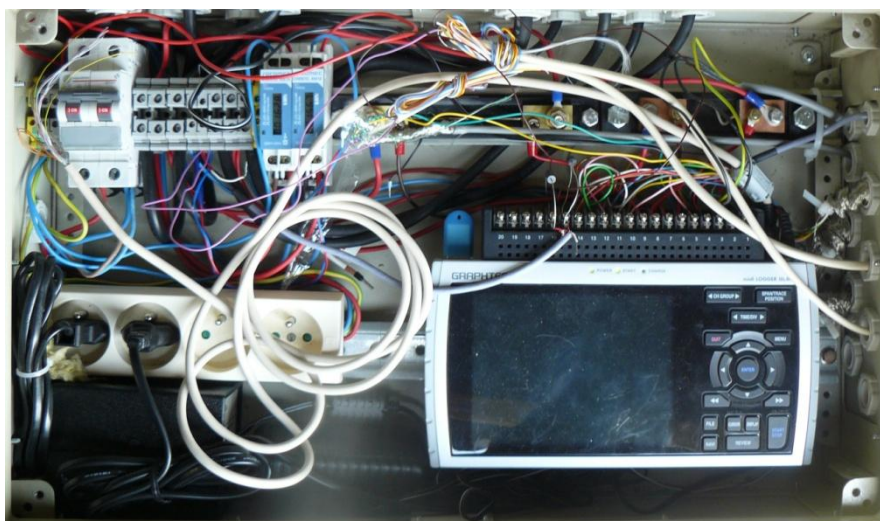


Figuur 2.31: Data acquisitie apparaat

Doordat er spanning staat over de klemmen (aan de achterkant van de datalogger zijn 20 kanalen voorzien om meettoestellen via klemmen aan te sluiten) van de meettoestellen worden deze van voeding voorzien zodat de midi logger stroom kan meten. Hoewel de kanalen van elkaar geïsoleerd zijn zodat ze niet kunnen interfereren met de andere metingen, werd soms een signaal ontvangen op ongebruikte kanalen. Echter werden geen abnormaliteiten op de gebruikte kanalen waargenomen.

Op de datalogger kan worden ingesteld met welk meetinstrument er gemeten wordt. Hierdoor weet de datalogger automatisch in welke eenheden er wordt gemeten. Er worden 3 verschillende soorten metingen verricht. De temperatuur, een spanning van 20 mV tot 50 V en een stroom over een externe shunt weerstand gaande van 4 tot 20mA wordt gemeten. Hier zit een bepaalde fout op. Voor de temperatuursensors geeft de GL800 een onzekerheid van $\pm 1^\circ\text{C}$. Voor de meetinstrumenten waarop een spanning en stroom wordt teruggezonden naar de datalogger krijgt men een onzekerheid van 0,1% van de FS¹⁰.

Op onderstaande figuur 2.32 is de datalogger (rechts beneden) terug te vinden, alsook de schakeling met de 16 meettoestellen en de twee vermogensmeters (links boven).



Figuur 2.32: Midi Logger GL 800 met aansluitingen

¹⁰ FS = Full Scale. Full Scale is het maximale meetbereik voor een bepaald meetinstrument

4.3 Verwachtingen

Zoals eerder gebleken zouden de KoraSun panelen bij voldoende bestraling een 5-tal graden warmer moeten worden dan bij de On-top toepassing, dit door afwezigheid van de spouw die voor extra koeling kan zorgen.

Gezien deze temperatuurstijging een negatieve invloed heeft op het vermogen (-0,4 à 0,6%W/K), zou zo het rendement een 3-tal% lager liggen. Dit kan ook indirect geverifieerd worden uit de energieproductiesimulator van het JRC:

Op hun site dienen de nodige parameters ingevoerd te worden: locatie, hellingshoek, azimuth en type installatie: freestanding of integrated[99]. Op basis van statistische gegevens berekent de software vervolgens de jaarlijkse productie. In volgende tabel werden de resultaten weergegeven voor een geïntegreerde installatie van 1 kWp.

Tabel 2.12: Jaarlijkse productie van zonne-energie door de KoraSun panelen in Kortrijk

Fixed system: inclination=35°, orientation=0°				
Month	E_d	E_m	H_d	H_m
Jan	0.86	26.8	1.03	32.0
Feb	1.77	49.4	2.17	60.8
Mar	2.18	67.7	2.76	85.5
Apr	3.18	95.4	4.18	125
May	3.52	109	4.72	146
Jun	3.44	103	4.69	141
Jul	3.63	112	4.99	155
Aug	3.31	103	4.53	140
Sep	2.60	78.0	3.48	104
Oct	1.88	58.3	2.42	75.1
Nov	1.19	35.8	1.46	43.9
Dec	0.67	20.7	0.80	24.7
Yearly average	2.36	71.6	3.11	94.5
Total for year		860		1130

Met: E_d de dagelijks gemiddelde elektriciteitsproductie (kWh)
 E_m de maandelijks gemiddelde elektriciteitsproductie (kWh)
 H_d de gemiddelde dagelijkse hoeveelheid globale irradiantie per m^2 (kWh/ m^2)
 H_m de gemiddelde maandelijks hoeveelheid globale irradiantie per m^2 (kWh/ m^2)

Door het totale Wattpiekvermogen van de KoraSun panelen te vermenigvuldigen met deze waarde bekomt men de geschatte totale opbrengst voor de KoraSun panelen voor één jaar. De 4 panelen hebben elk een rendement van 78 Wp wat neerkomt op een totaal van 312 Wp (4 x 78 Wp). De totale jaaropbrengst wordt dus geschat op zo'n 268,32 kW (860kWh x 0,312kWp). Echter is de meetopstelling pas operationeel vanaf begin juli. De verwachte opbrengst voor deze periode (tot halverwege mei) is 177,93 kWh.

Bij benadering kan de opbrengst van de On-top panelen bepaald worden als een free standing (zonnepanelen bevestigd op de grond) configuratie. In figuur 13 ziet men dat er een rendementsverschil is van 2,1% tussen 'completely free standing' en 'On/in roof, good ventilation'.

Tabel 2.13: jaarlijkse productie van zonne-energie door de On-top panelen in Kortrijk

Fixed system: inclination=35°, orientation=0°				
Month	E_d	E_m	H_d	H_m
Jan	0.90	27.8	1.03	32.0
Feb	1.85	51.8	2.17	60.8
Mar	2.30	71.1	2.76	85.5
Apr	3.36	101	4.18	125
May	3.72	115	4.72	146
Jun	3.63	109	4.69	141
Jul	3.83	119	4.99	155
Aug	3.50	108	4.53	140
Sep	2.74	82.3	3.48	104
Oct	1.98	61.3	2.42	75.1
Nov	1.24	37.3	1.46	43.9
Dec	0.69	21.4	0.80	24.7
Yearly average	2.48	75.5	3.11	94.5
Total for year		905		1130

Door nu weer het totale Wattpiekvermogen van de On-top installatie te vermenigvuldigen met deze waarde bekomt men de geschatte totale opbrengst voor de On-top panelen voor één jaar. De 4 panelen hebben elk een rendement van 78 Wp wat neerkomt op een totaal van 312 Wp (4 x 78 Wp). De totale jaaropbrengst wordt dus geschat op zo'n 282,36 kW (905kWh x 0,312kWp). Echter is de meetopstelling pas operationeel vanaf eind juli. De verwachte opbrengst voor deze periode(tot halverwege mei) is 186.95 kWh-2,1%=183.21kWh.

Gobsch maakte voor een gelijkaardig product een vergelijkbare meetopstelling om het rendementsverlies te kunnen bepalen[100] . Het gemeten rendementsverlies bleek slechts 0,75% te zijn, wat vrij laag ligt. Wanneer men dan de studie er op naleest dan merkt men dat slechts enkele weken werd gemeten zodat het objectieve onderzoek wel in vraag kan gesteld worden.

Uit de theoretische ontleding bleek dat de windsnelheid een gunstig effect heeft op de koeling in de spouw. Dit verband zou zelf kwadratisch verlopen.

4.4 Verwerken van meetresultaten

Per seconde worden 18 kanalen geregistreerd op de datalogger, uiteindelijk werd over 284 dagen gemeten. Volgende tabel geeft een idee welke de hoeveelheid aan te verwerken gegevens:

Tabel 2.14: Hoeveelheid meetgegevens

284	dagen
6816	uren
408.960	minuten
24.537.600	seconden
392.601.600	meetgegevens

Zoals af te lezen in de grafiek zou er door de programma code een kleine 400 miljoen meetgegevens verwerkt moeten worden. Wel ging een kleine twee maand aan meetgegevens verloren (september en oktober), vermoedelijk bij het ont-/herkoppelen van de USB stick aan de datalogger. Met behulp van een Data Recovery programma werd getracht om deze verloren gegevens terug te vinden, echter zonder resultaat.

Bij de datalogger was er software geleverd om deze gegevens te visualiseren en statistisch te verwerken. Echter bood deze software niet voldoende functionaliteit om de resultaten degelijk te analyseren en werd beslist hiervoor zelf software te ontwikkelen om de gegevens dan in Excel te kunnen verwerken. Als programmeertaal werd VBA gekozen gezien de goede integratie met alle Excel functionaliteit.

De oorspronkelijke software voorziet de mogelijkheid om de meetresultaten naar een Excel sheet te schrijven. Maar het aantal meetintervallen overstijgt al snel het aantal beschikbare rijen. Daarom werden de bestanden eerst omgezet naar CSV bestanden (comma separated variables). Deze ruwe data neemt al snel 3,5Gbyte in beslag. Deze bestanden kunnen dan met programma code ingelezen worden om dan uit te schrijven naar Excel bestanden. Initieel gaf dit ook problemen gezien de meetwaardes ook als kommagetallen uitgeschreven waren.

Per dag zal een nieuw Excel blad aangemaakt worden en deze worden dan per maand weggeschreven in een excelbestand. Vervolgens zullen afgeleide grootheden zoals vermogen, temperatuursverschil gradiënten e.d. automatisch afgeleid worden. Alle waarden worden dan statistisch verwerkt: bepalen van minimum, maximum, gemiddelde,... Ook wordt het geleverd vermogen per dag berekend om dan uiteindelijk het rendementsverschil te kunnen bepalen.

In een volgende stap wordt een nieuw excelblad aangemaakt waarin deze resultaten worden samengevat: per dag wordt hier het minimum, maximum en gemiddelde weergegeven van ieder kanaal en afgeleide grootheid. Ook het wordt het vermogen het rendementsverschil per dag weergegeven en . Hiervan wordt dan in de eerste drie rijen terug het gemiddelde, minimum en maximum bepaald en het totale rendement en rendementsverschil.

Deze samenvattende gegevens per maand worden dan samengevoegd in een nieuw excelbestand die toelaat alle resultaten van de volledige meetperiode overzichtelijk te beschouwen (zie tabel 2.15).

Eens alle metingen verwerkt kunnen grafieken automatisch opgevraagd worden voor eender welke kanalen en afgeleide grootheden. Deze worden vervolgens weggeschreven in een nieuw .jpg bestand per dag.

Gezien alle bewerkingen worden ingegeven als formules kunnen aanpassingen snel en eenvoudig gedaan worden. Zo kunnen foute meetgegevens eenvoudig getraceerd worden en indien gewenst aangepast of weggelaten.

De programmacode laat ook toe om zelf een interval aan te duiden waarover de meetgegevens dienen samengevat te worden. In Document A: monitoring van PV systemen[94] raadt men aan om voor dergelijke meetopstellingen om de seconde te registreren maar om dan verder te werken met het gemiddelde om de 10 minuten. Iedere verder analyse vertrekt dan ook vanuit dit interval.

In dit document wordt ook aangeraden om maanden waarvan meer dan 20% van de meetgegevens verloren gingen of abnormale waardes vertoonden niet mee te nemen in de analyse. Zo werden maanden juli, september en oktober verworpen. De maand mei werd dan wel nog opgenomen om toch nog enige resultaten van recent geïnstalleerde meetapparatuur te kunnen analyseren (buitentemperatuur, anemometer en windvaantje).

4.5 Meetresultaten

4.5.1 Meetresultaten

In tabel 2.15 worden de meetresultaten per maand weergegeven. In wat volgt zullen alle belangrijke facetten toegelicht worden.

Tabel 2.15: Overzicht meetresultaten per maand

Toon alles Toon enkel gem. Toon enkel min. Toon enkel max.	Pyranometer[W/m ²]	Temperatuur intern[°C]	Temperatuur extern[°C]	T. pan onder Korasun[°C]	T. pan onder Ontop[°C]	Spanning Korasun[V]	Spanning Ontop[V]	Stroom Korasun[A]	Stroom onttop[A]	Temperatuur Korasun[°C]	Temperatuur onttop[°C]	T. onderdak onder vrije pan[°C]	T. Vrije pan[°C]	T. spouw Ontop[°C]	Windsnelheid[m/s]	Windrichting[-]	Temperatuursverschil[°C]	vermogensverlies[%]	geleverd vermogen[Wh]	Korasun	
																				Gem.	Min.
	123.8	10.6	9.4	10.9	9.9	15.8	15.8	1.0	1.0	17.7	17.4	10.4	6.2	9.4	2.5	-0.6	0.4		160.904	2.7	Korasun
	0.0	-7.9	-0.1	-12.2	-10.1	0.0	0.0	0.0	0.0	-4.7	-4.5	-11.2	-117.1	-10.7	0.0	-1.6	-4.7		-165.449		Ontop
	1209.5	42.7	26.3	53.7	43.8	50.3	50.4	8.3	8.7	60.9	59.7	48.4	61.3	41.4	7.9	0.8	17.1				
	285.9	19.7		22.6	19.6	21.31	21.52	2	2	28.3	27.6	21.1	24.2	18.2			0.8				
	1.0	11.8		9.4	10.3	0.03	0.03	0	0	15.1	15.3	10.1	8.7	10.1			-1.1				
	1189.1	29.0		44.5	31.8	40.42	39.85	8	8	53.4	49.3	38.0	53.1	28.7			5.0				
	245.8	23.7		23.7	21.6	19.99	20.09	2	2	31.0	30.4	22.7	24.8	20.6			0.5				
	1.0	12.6		9.7	10.9	0.02	0.02	0	0	16.0	16.4	10.6	9.2	10.6			-2.2				
	1209.5	42.7		53.7	43.8	50.26	50.36	8	9	60.9	59.7	48.4	61.3	41.4			5.7				
	59.4	11.2		10.1	10.0	11.37	11.32	0	0	16.3	16.2	10.2	10.2	10.0			0.1				
	0.5	2.5		-0.3	1.4	0.02	0.02	0	0	6.4	6.3	0.6	-0.8	1.7			-1.6				
	792.4	20.8		25.7	19.3	43.60	42.81	6	6	35.3	33.5	22.1	31.1	18.0			4.7				
	41.5	4.3		3.0	3.2	10.01	10.03	0	0	9.6	9.6	3.2	-32.0	3.1			0.0				
	0.0	-6.1		-10.7	-8.1	0.01	0.01	0	0	-3.1	-2.3	-9.4	-108.3	-8.5			-3.2				
	637.4	14.1		19.4	14.6	46.11	44.94	4	5	27.6	25.3	16.8	24.0	14.6			10.2				
	43.5	1.8		0.6	0.7	10.86	10.84	0	0	7.5	7.4	0.8	-11.5	0.5			0.1				
	0.0	-7.9		-12.2	-10.1	0.02	0.01	0	0	-4.7	-4.5	-11.2	-117.1	-10.7			-3.8				
	719.2	13.4		20.9	12.4	45.43	45.03	6	6	31.3	28.0	16.3	28.4	12.5			4.8				
	53.2	3.8		3.1	3.0	12.47	12.40	0.40	0.40	9.9	9.7	3.2	3.2	2.9			0.2				
	0.0	-6.5		-11.1	-8.6	0.01	0.01	0.00	0.00	-3.3	-3.4	-9.5	-11.7	-9.5			-4.7				
	877.4	13.4		21.6	12.6	44.31	43.55	6.79	7.14	32.9	29.2	16.2	28.6	12.9			17.1				
	94.3	8.0		8.8	8.0	16.37	16.32	0.97	0.99	15.9	15.5	8.4	9.4	7.5			0.4				
	0.5	-4.5		-7.5	-5.5	0.02	0.01	0.00	0.00	0.0	0.1	-6.2	-8.3	-5.9			-2.3				
	656.0	22.4		30.8	22.8	47.65	45.89	7.27	7.57	39.8	36.3	27.3	39.4	20.3			7.3				
	170.2	12.2		14.4	12.5	19.66	19.71	1.62	1.64	22.1	21.4	13.3	15.5	11.6			0.7				
	0.0	1.2		-0.1	-2.4	-0.5	0.03	0.02	0.00	0.00	5.3	5.6	-1.5	-3.3			-2.8				
	831.8	31.3		26.3	48.2	35.1	42.73	42.56	7.81	7.92	57.8	41.5	55.6	31.3			7.8				
	120.0	10.5		8.9	11.7	10.4	19.89	19.76	1.03	1.03	19.0	18.4	11.0	12.2			0.6				
	1.0	2.4		1.3	-1.1	0.6	0.02	0.02	0.00	0.00	7.0	7.0	-0.3	-1.9			-2.3				
	803.0	19.2		16.6	32.9	22.8	42.09	41.52	7.60	7.75	47.8	41.8	25.7	41.8			6.2				

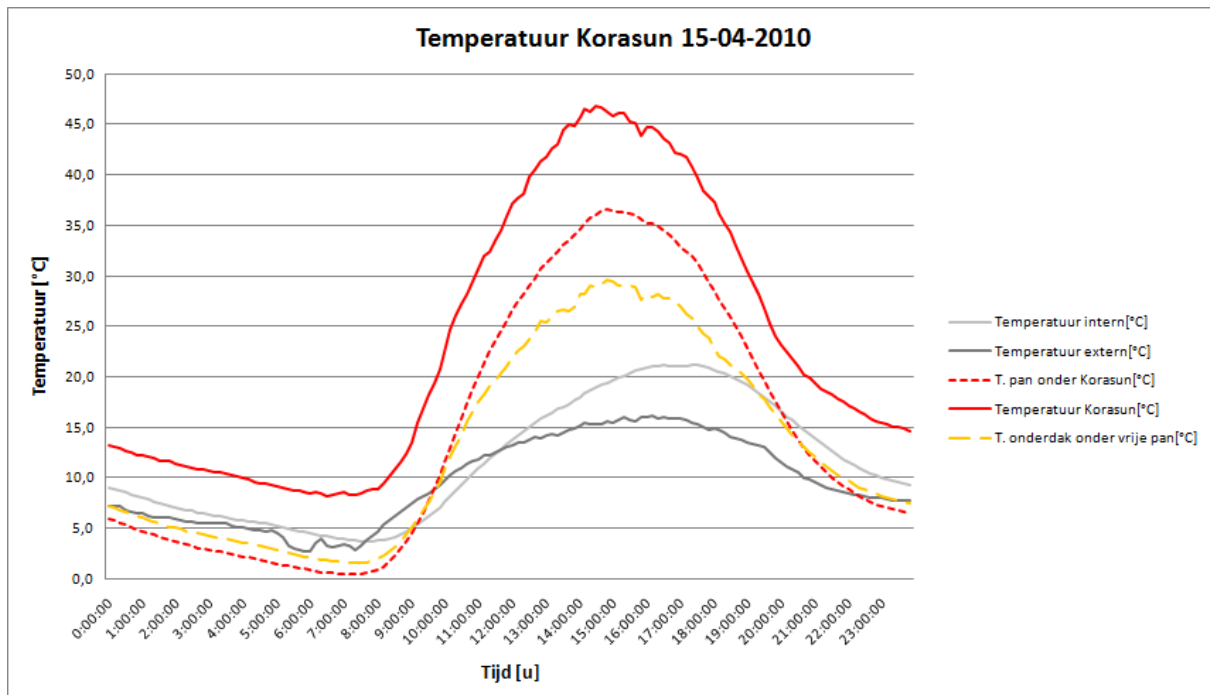
4.5.2 Temperatuursverloop

In eerste instantie zal het temperatuursverloop per installatie van naderbij bekeken worden. Hierna kan men dan de twee systemen met elkaar vergelijken.

Gezien de buitentemperatuur slechts sinds begin april correct geregistreerd wordt, is het aangewezen om eerst een dag uit april te bespreken zodat in de bespreking ook de buitentemperatuur kan opgenomen worden. Als keuze werd 15 april genomen. Dit betreft een vrij zonnige dag met irradiantie tot 660W/m^2 en buitentemperaturen tot 16°C .

In figuur 2.33 valt duidelijk op dat de KoraSun panelen vrij sterk opwarmen. Temperaturen van circa 46°C worden bereikt, zowat 30 graden hoger dan de omgevingstemperatuur. Op zonnige dagen in de zomer werden zelf temperaturen van $60,9^\circ\text{C}$ geregistreerd. Ook de dakpannen onder de KoraSun panelen ervaren een grote opwarming. Met een maximum van $50,3^\circ\text{C}$ lag de temperatuur altijd een kleine 10°C lager dan de panelen zelf.

Temperaturen met betrekking tot de geïntegreerde installatie worden steeds in het rood weergegeven. Omgevingstemperaturen in tinten van grijs, deze met betrekking tot de vrije pan middenin de twee installaties in het geel.



Figuur 2.33: Temperatuur KoraSun 15-04-2010

Uit de figuur valt ook duidelijk te merken dat de binnentemperatuur steeds na-ijlt op de buitentemperatuur. Meestal lag deze temperatuur een 5-10 graden hoger dan de buitentemperatuur en bereikte deze zijn piek rond 17u. In de periode dat er nog geen buitentemperatuurmetingen beschikbaar waren, werd een maximum binnentemperatuur van $42,7^\circ\text{C}$ opgemeten.

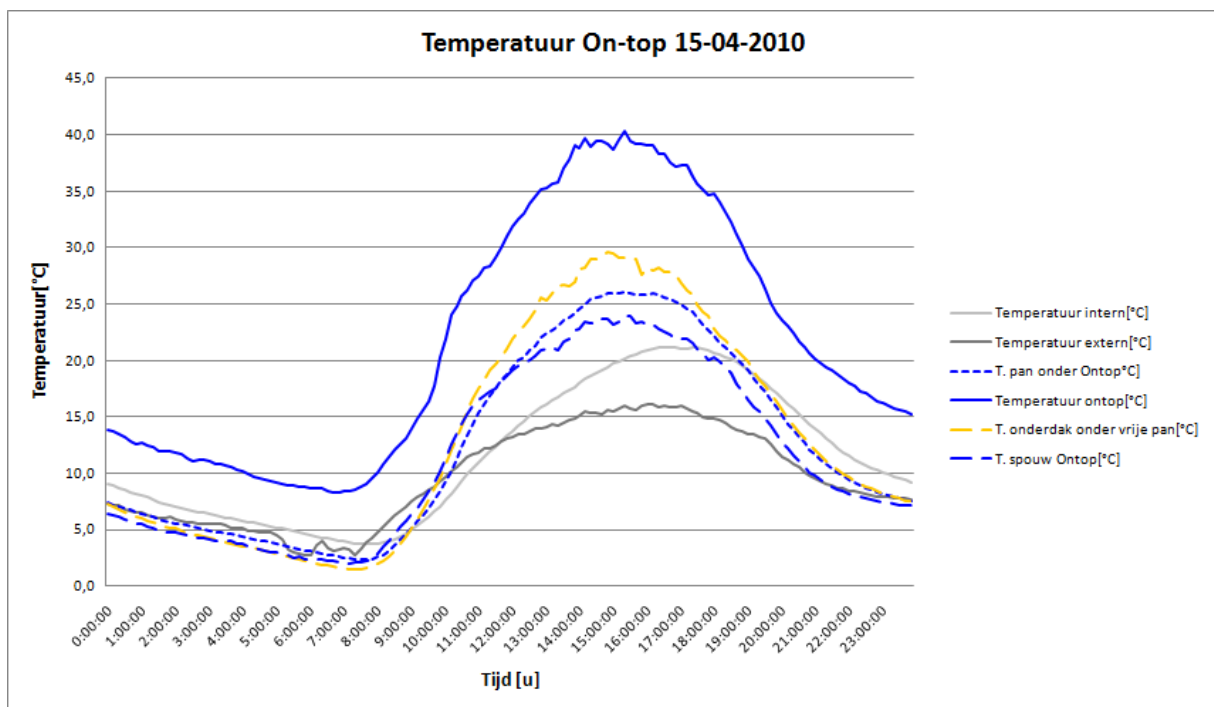
De temperatuur onder de pannen, aan het onderdak, werd ook gemeten. Wel bevindt deze sensor zich niet rechtstreeks onder een van beide installaties maar net middenin onder een vrije pan.

Bij de On-top installatie werd nog een extra temperatuur opgemeten, namelijk deze in de spouw. Deze hangt op een 2 tal cm onder de panelen. Men merkt een beduidende lagere temperatuur op (figuur 2.34), zelfs koeler dan de dakpan die er onder liggen. Dit strookt met de bevindingen in de

theoretische ontleding: in principe wordt hier de temperatuur van de buitenlucht gemeten die door circulatie onder het paneel licht opgewarmd wordt. In principe zou er enige voorspelling van dit temperatuursverschil mogelijk zijn (zie figuur 2.5). Echter is het meetvolume van de PT100 op zich al 4 cm lang (zie figuur 2.28) en hangt deze vrij willekeurig in de spouw.

Een goed zicht op verloop van de temperatuur in de spouw is dus met deze opstelling niet haalbaar. Indien dit gewenst zou zijn, zou men beter overgaan naar een labo instelling waar alle omgevingsparameters beter controleerbaar zijn en men ook verfijndere meetapparatuur kan gebruiken. Eveneens zou men dan ook meerdere thermokoppels kunnen plaatsen doorheen de spouw.

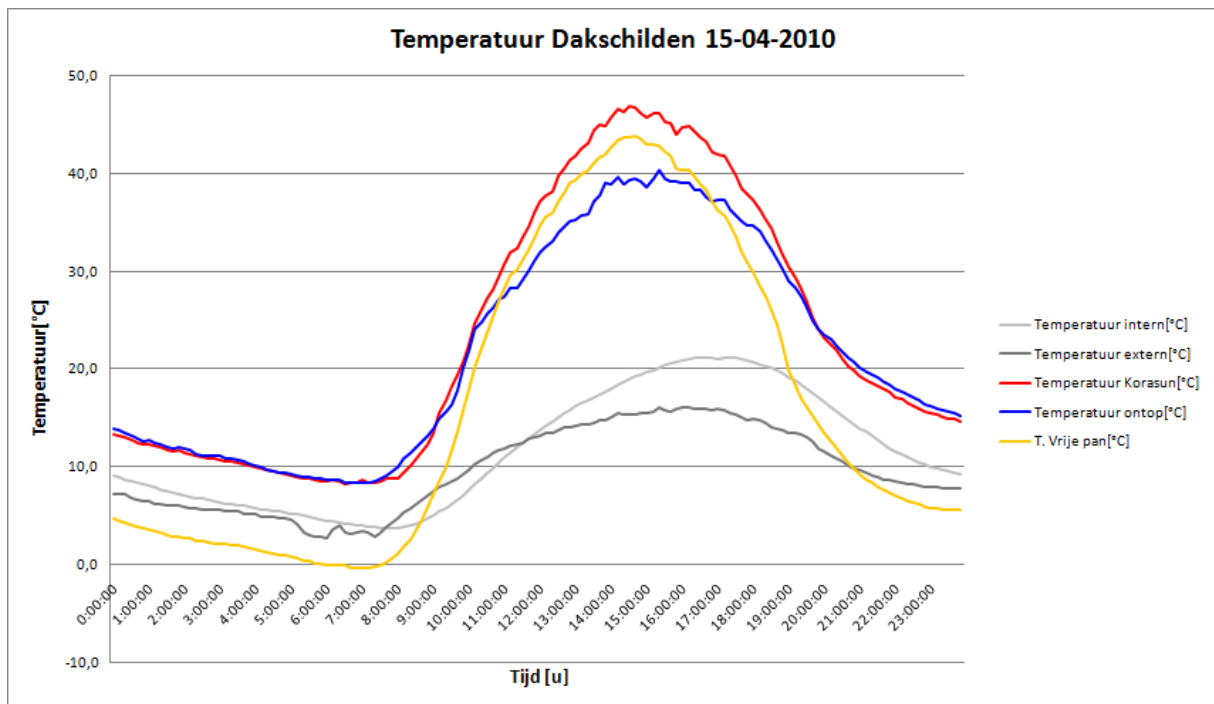
Temperaturen met betrekking tot de geïntegreerde installatie worden steeds in het blauw weergegeven.



Figuur 2.34: Temperatuur On-top 15-04-2010

Wanneer de temperaturen van de verschillende type dakschilden (On-top, geïntegreerd en vrije pan) vergeleken worden in figuur 2.35, valt duidelijk te zien dat de panelen bij de geïntegreerde panelen warmer worden dan bij een On-top installatie. Bij voldoende zonlicht bleek dit al snel een 4 à 6 tal graden verschil. Een piek van 17°C en 10°C werd waargenomen in februari, vermoedelijk is de aanwezigheid van sneeuw op de panelen hiervan de oorzaak.

Het valt ook op dat de gewone pan ook sterk opwarmt: het betreft namelijk een zwarte pan die de zonnestraling heel sterk absorbeert, zelf meer dan de zonnepanelen gezien deze nog een aandeel van de energie omzetten in elektriciteit.



Figuur 2.35: Temperatuur Dakschilden 15-04-2010

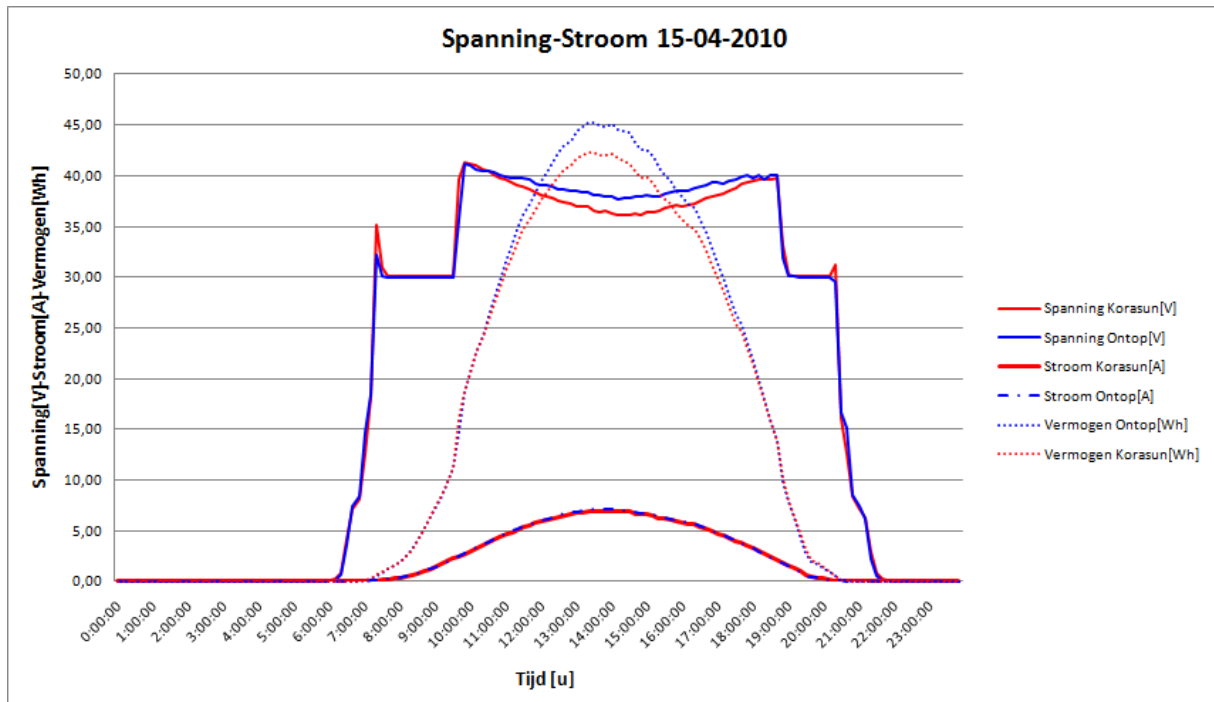
In de vergelijking tussen de verschillende dakvlakken kwamen enkele schijnbare tegenstrijdigheden naar boven: 's nachts zouden de vrije On-top panelen blijkbaar steeds 0,2 à 0,8 °C warmer blijven dan de KoraSun panelen die tegen de pannen bevestigd zijn. Hoewel dit binnen de meetfout valt, zou men net het omgekeerde verwachten. Ook bleken de temperaturen van de PV panelen zelf 's nachts steeds een 6 tal graden warmer dan alle andere temperaturen. De precieze oorzaak hiervan, is niet gekend. Wel bestaan de sensoren aan de PV panelen enkel uit een dunne weerstandsdraad die aan de achterkant van het paneel gekleefd wordt. Dit terwijl de andere sensoren zich in een cilindrisch lichaam bevinden (zie figuur 2.28). Dit zou een mogelijke oorzaak kunnen zijn.

Veel van deze kleine foutjes zouden al opgehelderd kunnen worden mocht bij de installatie van het dak reeds alle thermokoppels met elkaar vergeleken zijn. Echter was de datalogger toen nog niet geïnstalleerd. Er werd nog een poging ondernomen om nadien met een draagbaar temperatuurmeettoestel het onderlinge verschil tussen de thermokoppels te bepalen echter bleek het toestel en de manier van meten hiervoor te onnauwkeurig.

Ook werden foto's genomen met een infraroodcamera. Maar de resultaten hiervan waren te onnauwkeurig om mee te geven. Wel kon aan de hand van beide meettoestellen opgemerkt worden dat er wel degelijk een temperatuursverschil tussen de onderste panelen en bovenste panelen bestaat. Bij de On-top installatie bleek dit te variëren tussen de 2 à 4,5°C en bij de geïntegreerde installatie toch ook wel 1°C. Let wel de fout hierop is vrij beduidend. Indien gewenst zou de installatie hier nog verder op geïnstrumenteerd kunnen worden om hier duidelijke resultaten te bekomen.

4.5.3 Ogenblikkelijk vermogen

De gevonden temperatuursverschillen zullen hun invloed hebben op zowel de geleverde spanning als de stroom. Dit vooral voor de spanning daar deze met 0,4 à 0,6% afneemt per graad Celsius bij polykristallijne cellen. In volgende grafiek wordt dit snel duidelijk. In deze grafiek kan men ook ontrafelen hoe de omvormer achter het MPP zoekt: Een constant werkingsniveau van 30V werd dan ook op iedere dag teruggevonden.



Figuur 2.36: Spanning-stroom 15-04-2010

In het vermogensverloop valt duidelijk een hogere productie op de middag te merken voor de On-top installatie. Op piekmomenten bedroeg dit verschil zelfs 6-8%. Gezien het vermogen echter op jaarbasis geëvalueerd wordt, zal het wezenlijke verschil niet zo hoog liggen: buiten de middaguren loopt de productie zo goed als gelijk en daarenboven zijn de echt zonnige dagen die aanleiding geven tot zulke grote temperatuursverschillen, niet maatgevend op jaarbasis.

Uit de meetwaarden werd een poging ondernomen om de gradiënt van het vermogen ten opzichte van het temperatuursverschil te berekenen. Deze zou normaal 0,5% moeten bedragen. Uit de resultaten werd dezelfde waarde, -0,5% teruggevonden. Hoewel de vermogensgradiënt lijkt te kloppen is de nauwkeurigheid van deze berekening vrij klein. De oorzaak van deze (on)nauwkeurigheid hiervan is het feit dat er heel wat uitwendige oorzaken zijn in de plotse stroom- en spanningsverschillen tussen de 2 installaties: tijdelijke beschaduwing, meetfouten e.d.. Ook dient het temperatuursverschil voldoende groot te zijn om dergelijke fouten niet nog extra uit te vergroten.

$$\text{vermogensgradiënt} = \frac{d\%P}{dT} \quad (4.1)$$

4.5.4 Type dagen

Om op een duidelijke manier de resultaten van de meetgegevens te presenteren werd gekozen om dit te doen aan de hand van 4 type dagen: een warme zonnige dag, een warme bewolkte dag, een koude zonnige dag en een koude bewolkte dag. Als keuzecriterium werd de temperatuur en de irradiantie genomen: immers bij een bewolkte dag zal de zonnestraling vrij laag zijn met sterk wisselende pieken.

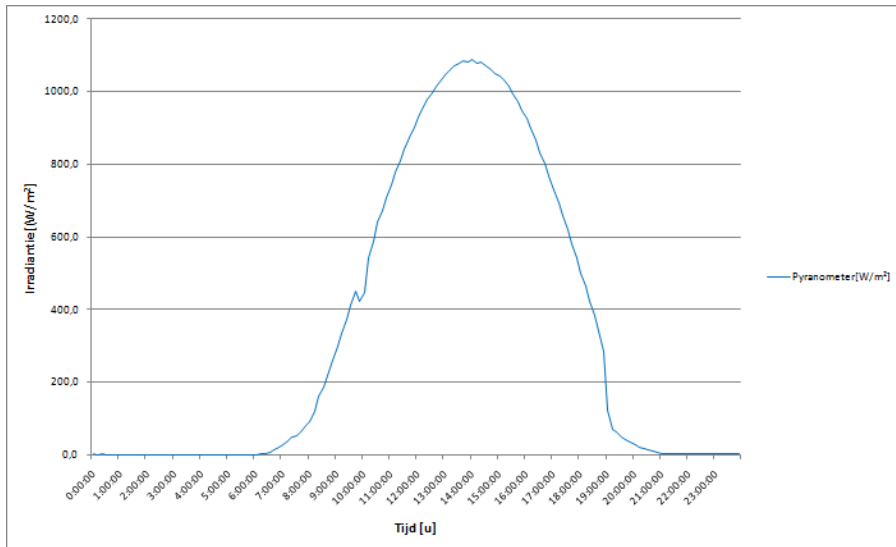
De volgende dagen werden zo geselecteerd:

Tabel 2.16: Typedagen

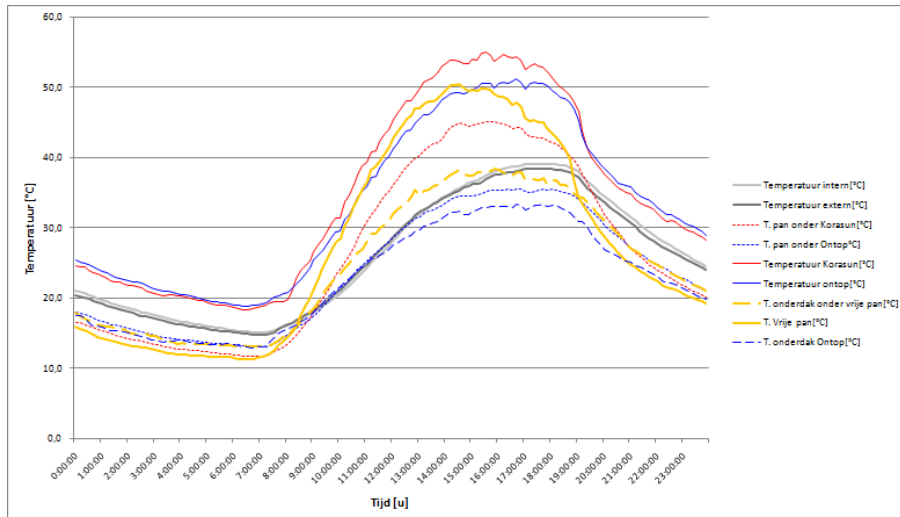
Type dag	Datum	Irradiantie[W/m ²]
Warme zonnige dag	14/aug/09	1100
Warme bewolkte dag	7/aug/09	300-800
Koude zonnige dag	26/jan/10	500
Koude bewolkte dag	11/jan/10	90

Dezelfde fenomenen als beschreven (hierboven) aan de hand van de gegevens 15 april kunnen in de volgende grafieken herkend worden, echter telkens voor andere omgevingsparameters.

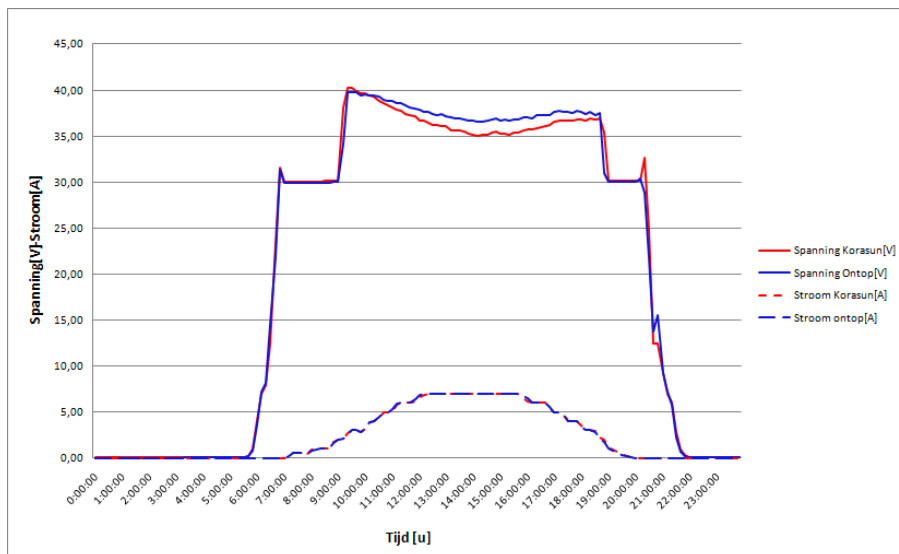
Warme zonnige dag in de zomer: 14 augustus 2009



Figuur 2.37: Irradiantie typedag 1

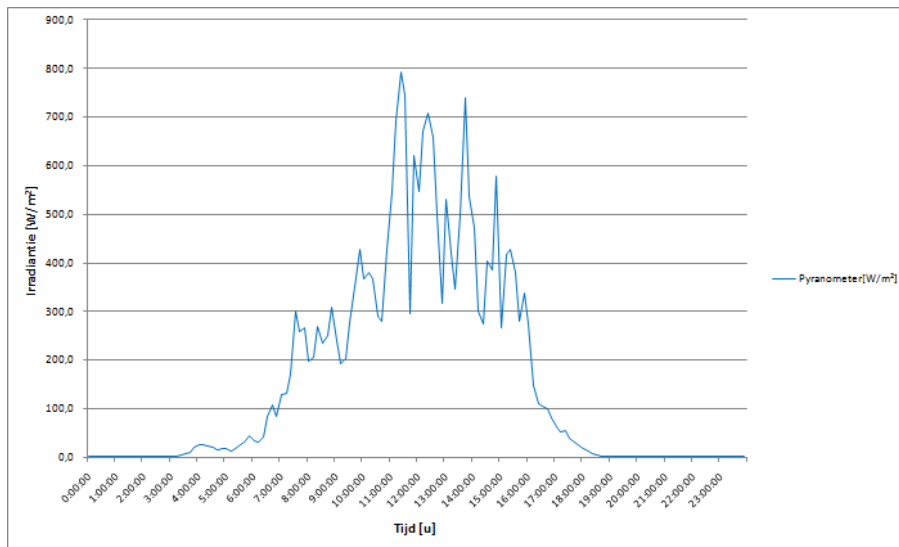


Figuur 2.38: Temperatuurgrafiek typedag 1

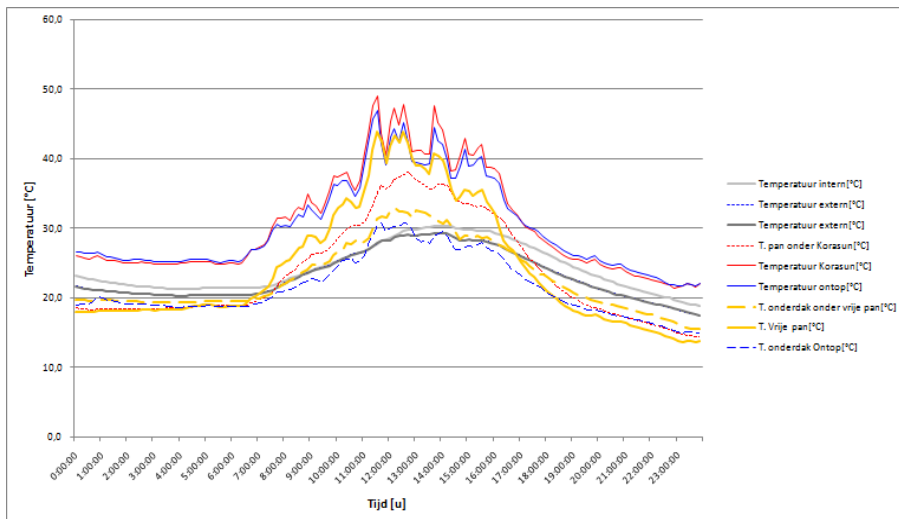


Figuur 2.39: Stroom en Spanning grafiek typedag 1

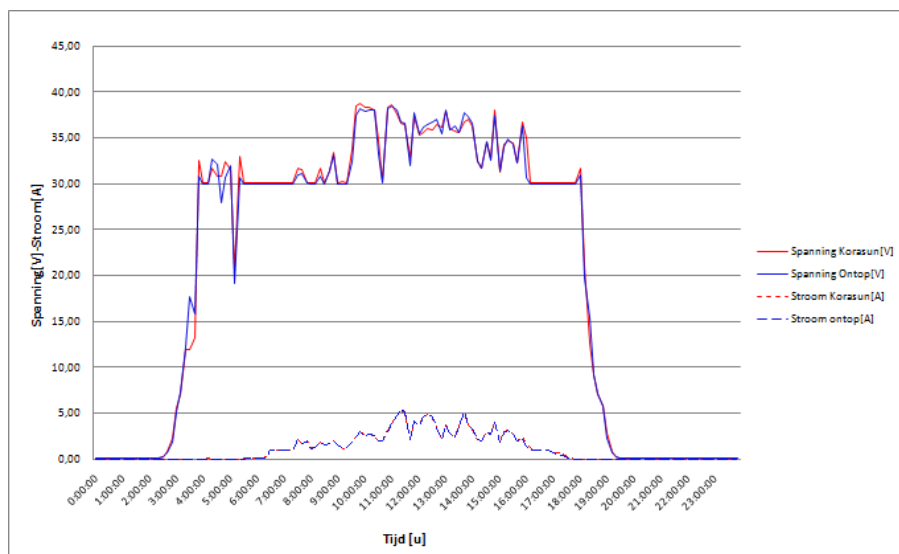
Warme bewolkte dag in de zomer: 7 augustus 2009



Figuur 2.40: Irradiantie typedag 2

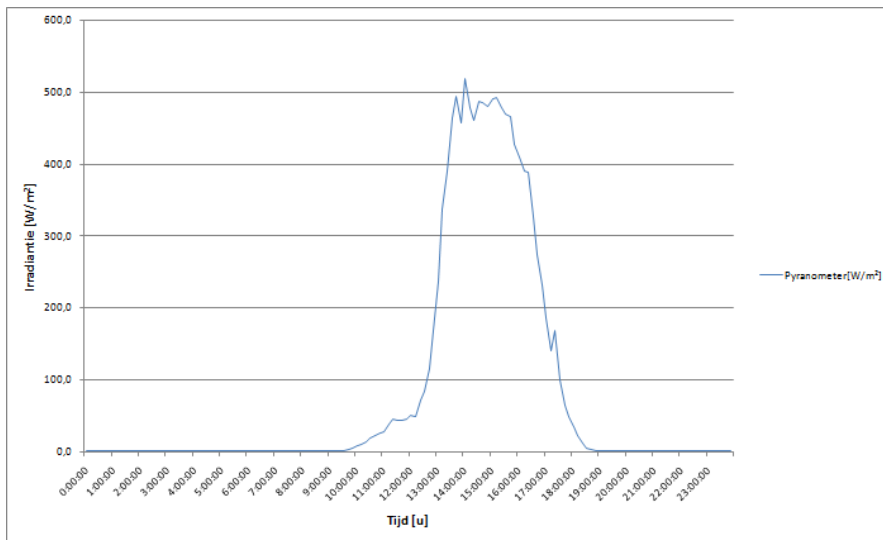


Figuur 2.41: Temperatuurgrafiek typedag 2

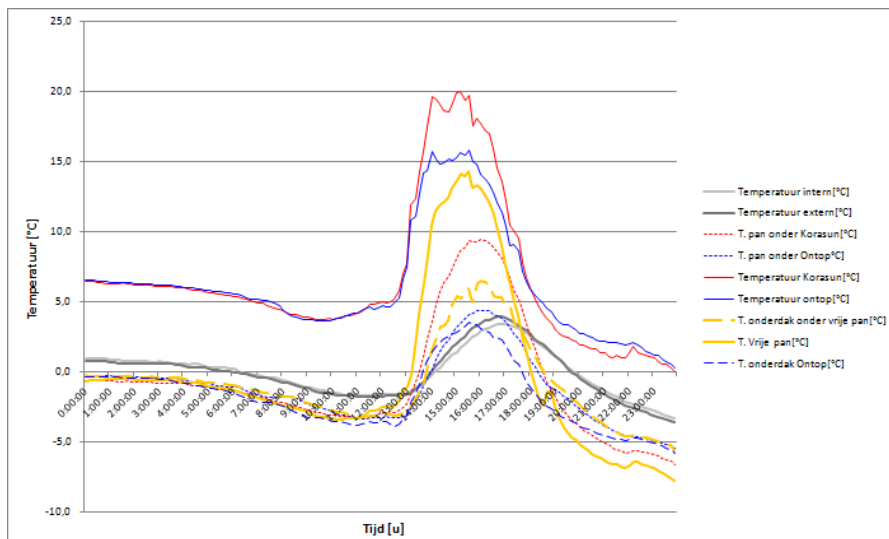


Figuur 2.42: Stroom en Spanning grafiek typedag 2

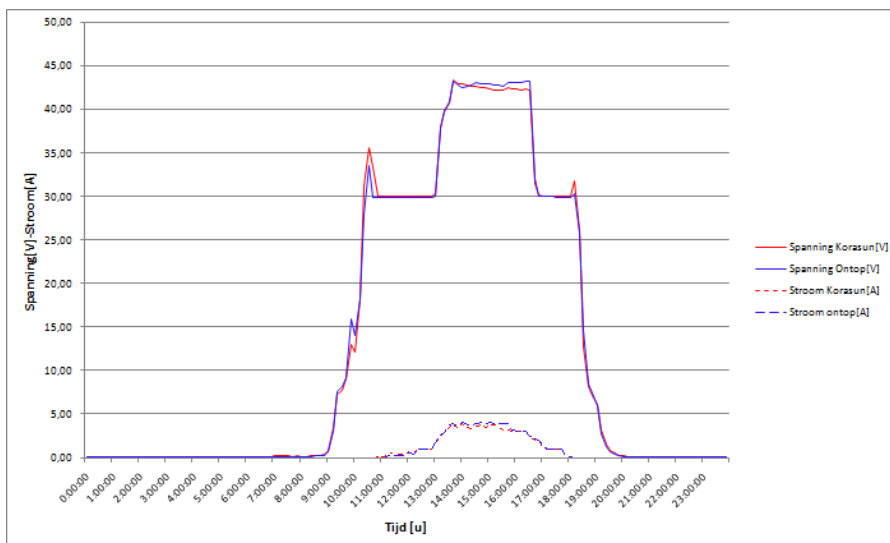
Koude zonnige dag in de winter: 26 januari 2010



Figuur 2.43: Irradiantie typedag

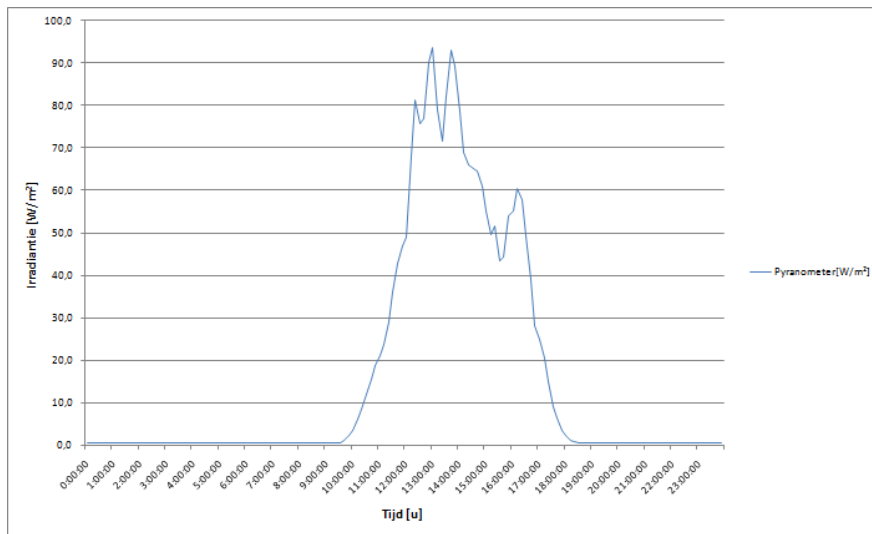


Figuur 2.44: Temperatuurgrafiek typedag 3

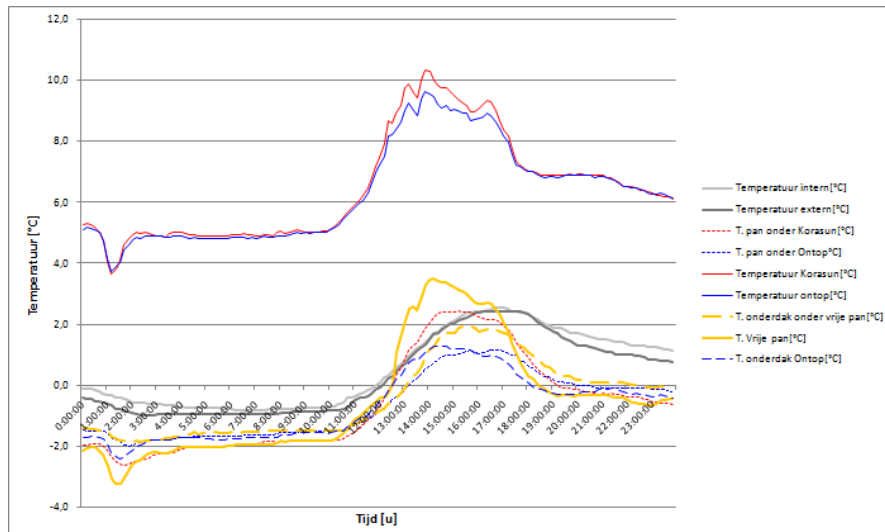


Figuur 2.45: Stroom en Spanning grafiek typedag 3

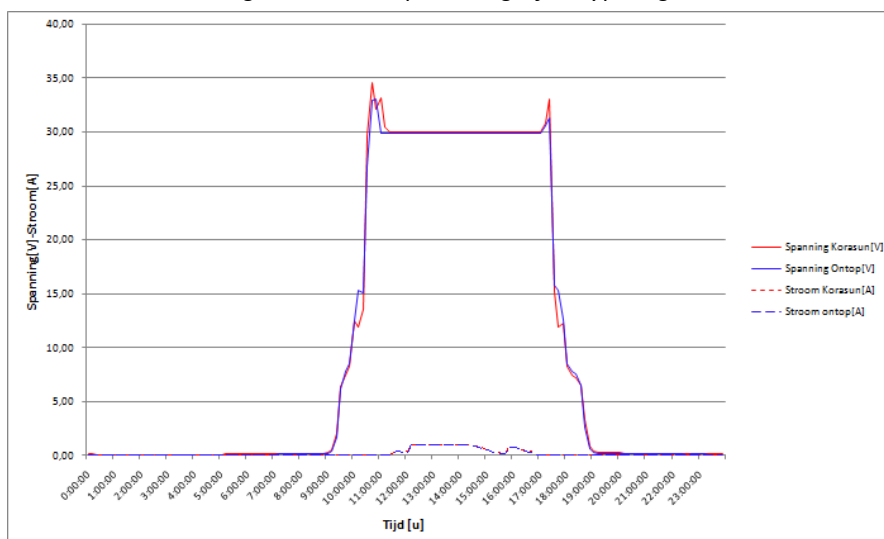
Koude bewolkte dag in de winter: 11 januari 2010



Figuur 2.46: Irradiantie typedag 4



Figuur 2.47: Temperatuurgrafiek typedag 4

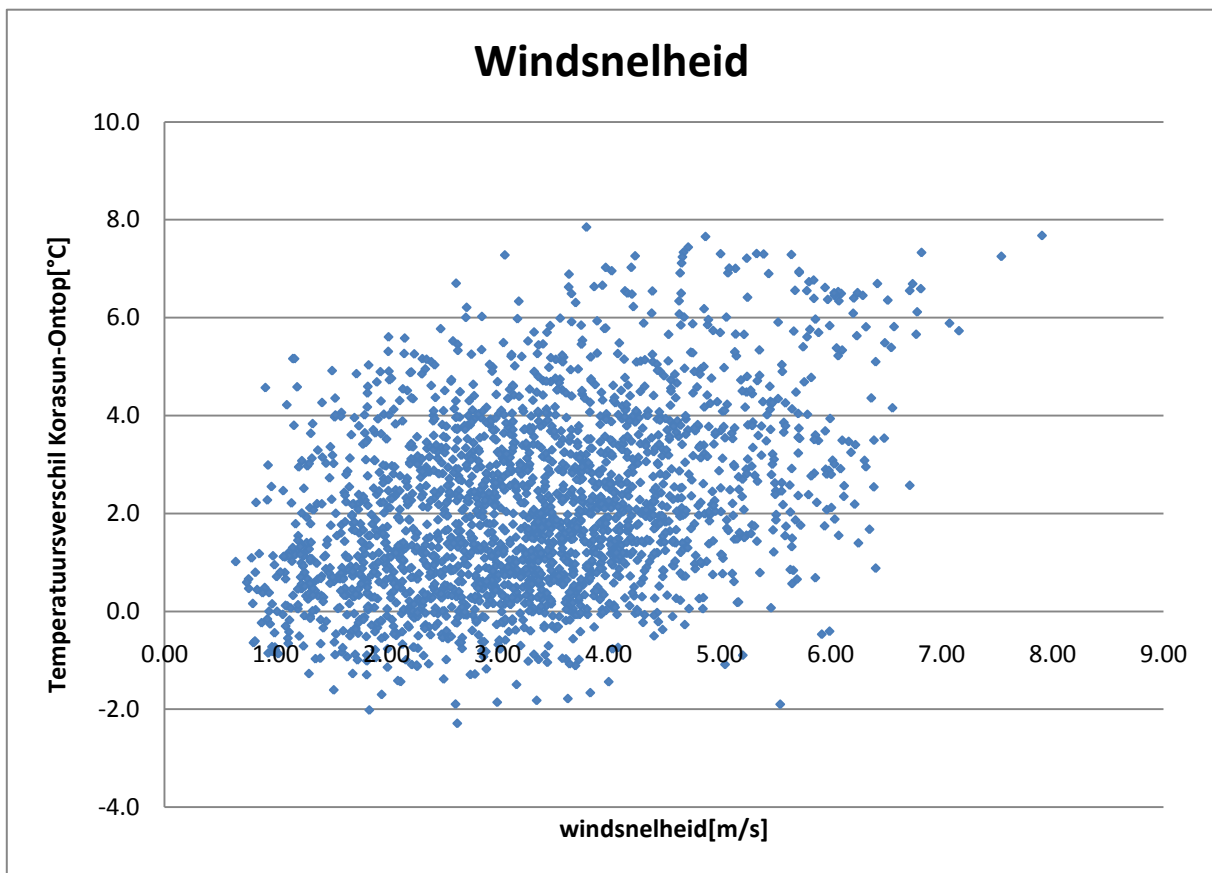


Figuur 2.48: Stroom en Spanning grafiek typedag 4

4.5.5 Invloed van de wind

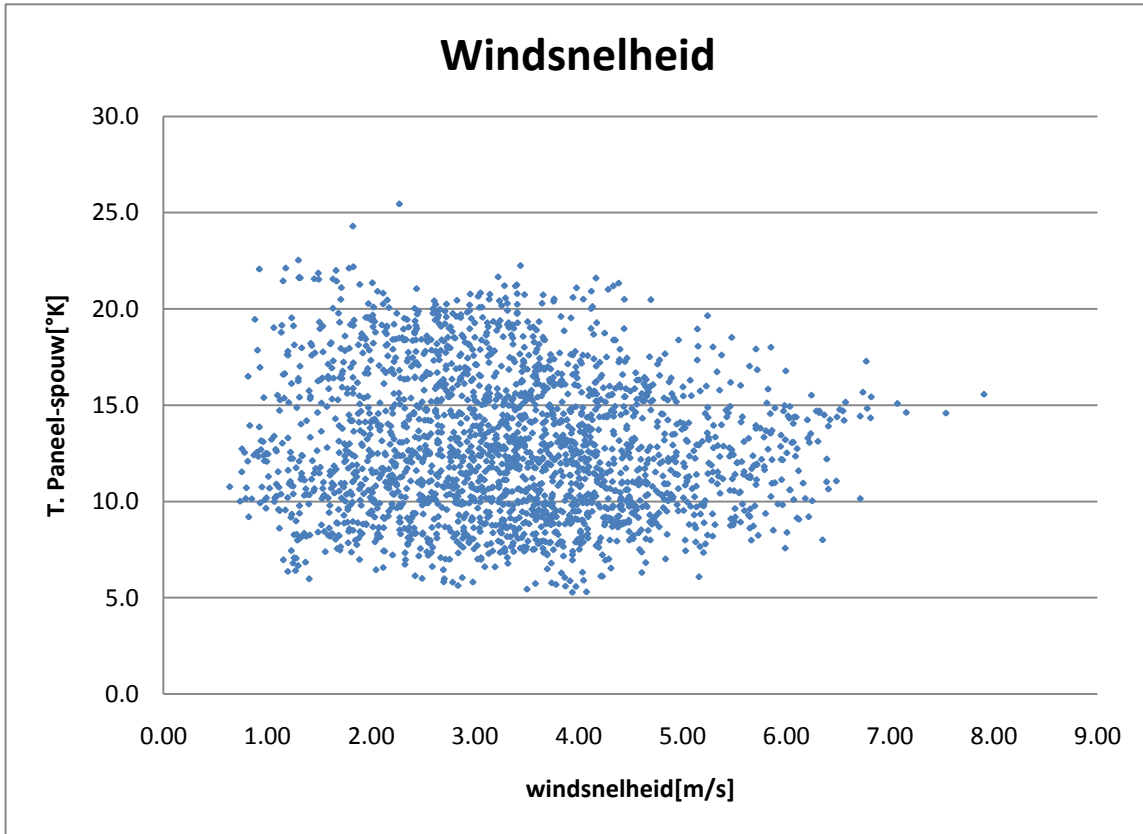
Zoals gebleken uit de theoretische ontleding zou de windsnelheid een gunstige invloed hebben op het koelend vermogen van de spouw. Uiteraard blijkt deze ook een gunstig effect te hebben op de convectie op beide PV vlakken en in de spouw ter hoogte van het onderdak. Maar gezien het effect hiervan voor beide installaties gelijk is kan men met deze meetopstelling hieromtrent niets verder uit afleiden.

Om een idee te krijgen welke de invloed is van de windsnelheid op het temperatuursverschil van de PV panelen werden alle metingen tussen 8:00 en 22:00 uitgezet in volgende grafiek. De resultaten variëren heel sterk maar er is een licht kwadratisch verband te ontwaren. Door eventueel uit te filteren naar de windrichtingen die op het dakvlak inblazen, kan een beter resultaat weer te vinden zijn. Echter zijn er nog te weinig meetgegevens van de windvaan beschikbaar om hiervan resultaten te publiceren.

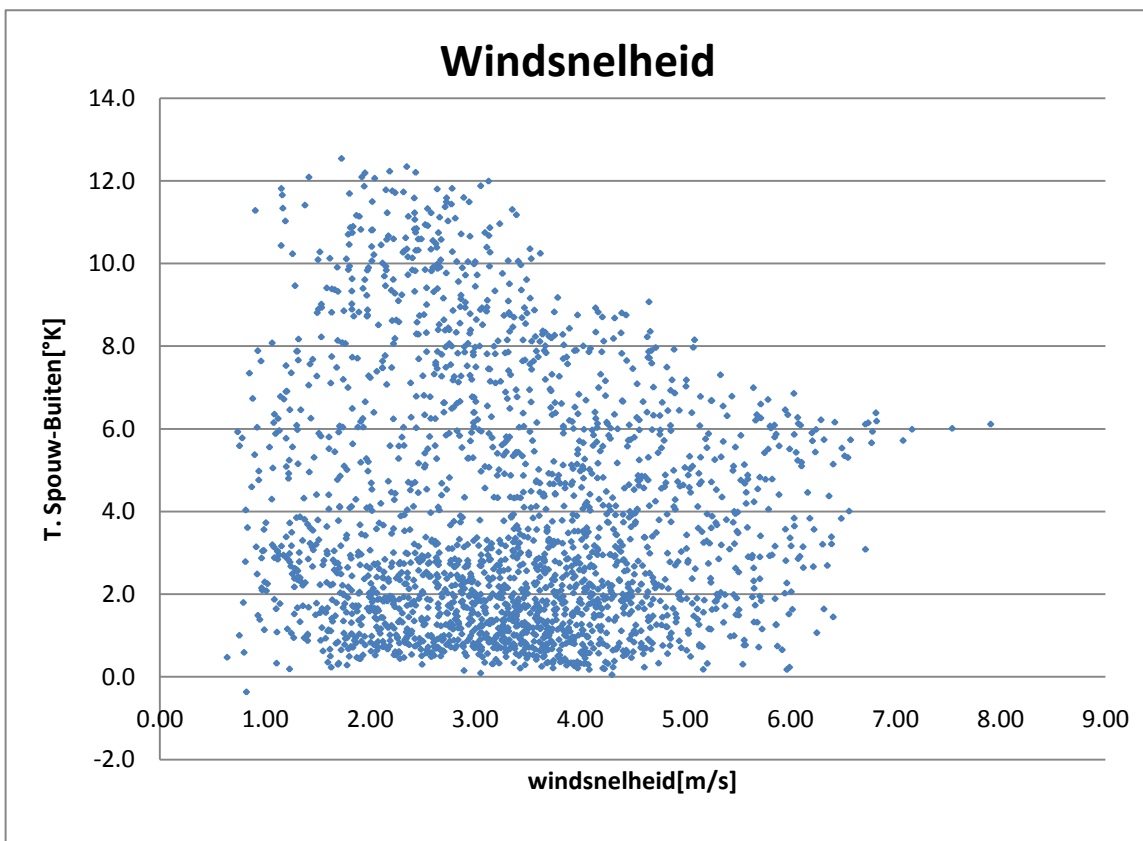


Figuur 2.49: Windsnelheid- temperatuursverschil KoraSun - On-top

Om het effect van de windsnelheid op de temperatuur in de spouw te evalueren werd het temperatuursverschil tussen spouw en buitenomgeving en het temperatuursverschil tussen het On-top paneel en spouw uitgezet. De resultaten blijken nog onbeduidender.



Figuur 2.50: Windsnelheid- temperatuursverschil paneel-spouw

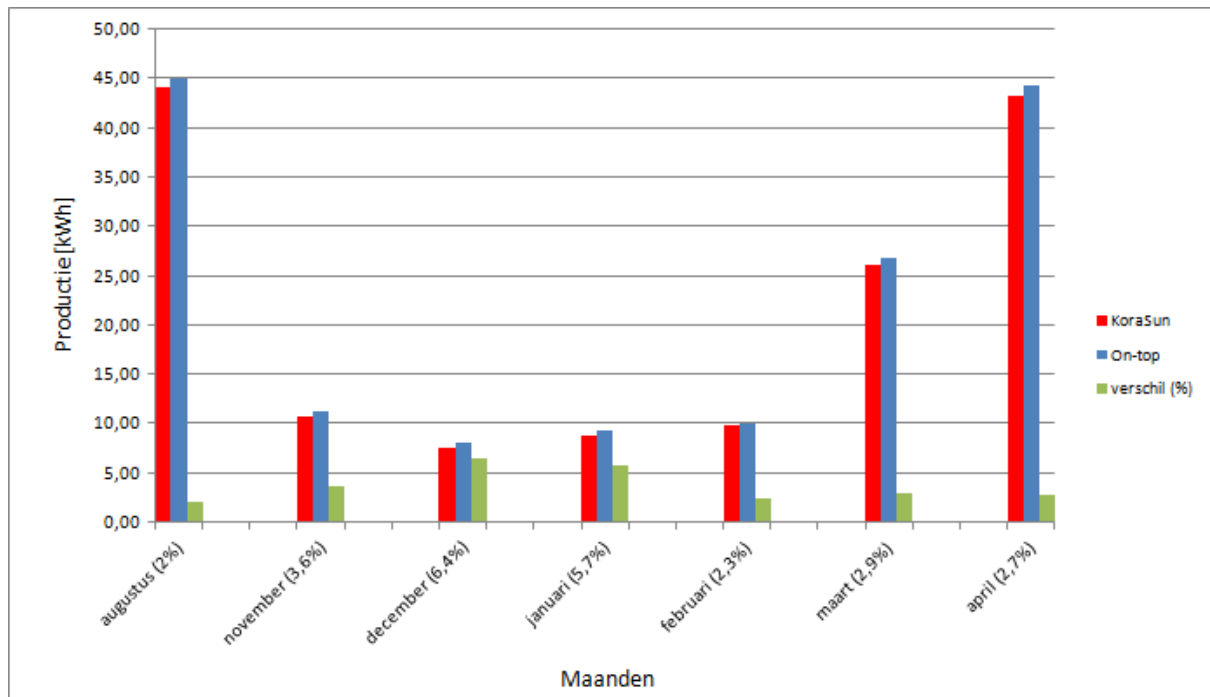


Figuur 2.51: Windsnelheid- temperatuursverschil spouw-buiten

4.5.6 Totaal geleverd vermogen

Uit tabel 2.15 blijkt dat de totale gemeten productie voor de KoraSun installatie 160,9kWh bedraagt, voor de On-top installatie 165,4kWh. Het totale rendementsverlies bedraagt dus slechts 2,7%. Ook zijn er de maandelijkse verliezen in opgenomen.

Figuur 2.52 geeft de resultaten weer per maand. Hoewel men zou verwachten dat net de zomermaanden het grote verschil zouden maken, bedraagt het verlies slechts 2,0% in augustus terwijl in de wintermaanden het verschil meer uitgesproken wordt (tot 6,4% in december).



Figuur 2.52: Productie per maand per type

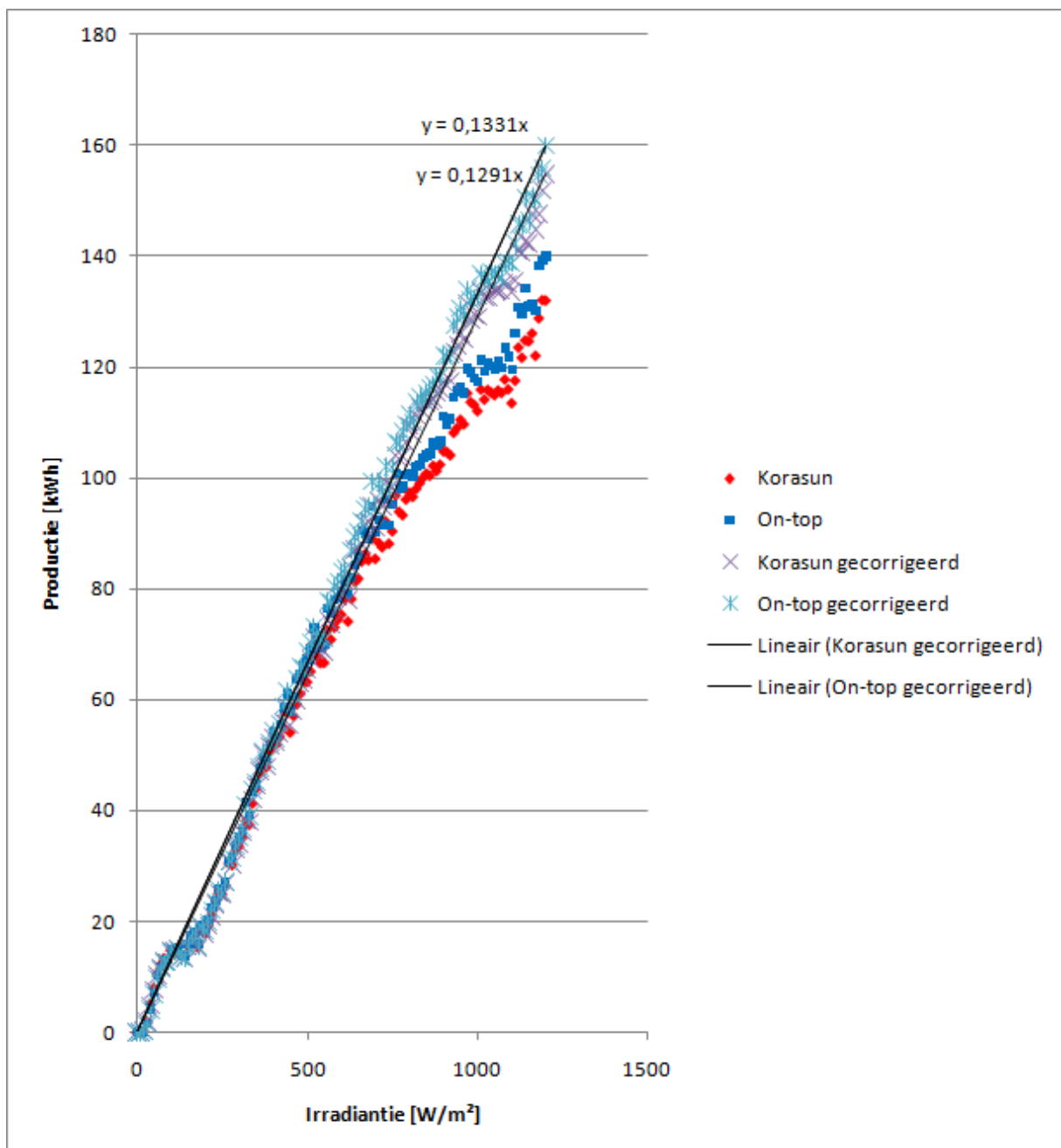
Een eerste oorzaak hiervoor kan de wind zijn die in de zomer minder sterk is dan in de wintermaanden. Daarboven zullen de installatiefactoren ook veel meer naar boven komen bij lagere vermogens: meetfouten, verschillend gedrag van de omvormers in de zoektocht naar MPP bij lage vermogens, enz.

Toch valt op te merken dat wegens de relatief lagere productie in de wintermaanden het resulterend maandverlies minder zal doorwegen in het jaarlijkse rendement.

Ook werd een even grote productie waargenomen in april als in augustus en dit terwijl de gemiddelde zonnestraling 30% lager lag. De lagere gemiddelde temperatuur speelt een rol maar slechts voor een aantal procentjes. Een ander aandeel kan verklaard worden gezien de metingen in augustus meerdere malen onderbroken werden. Deze beiden kunnen de vrij hoge productie echter niet volledig verklaren. Eens meer meetgegevens beschikbaar zullen zijn, zal hier waarschijnlijk wel een duidelijkere analyse gesteld kunnen worden.

Volgens onderzoek van de Nederlandse Werkgroep PV Monitoring [95] kan men beter het wind- en temperatuurgecorrigeerde rendement gebruiken om opbrengstverschillen met elkaar te vergelijken. De correctie naar de temperatuur kan vrij eenvoudig gedaan worden: op basis van de temperatuur van de cellen en het gemeten vermogen kan theoretisch berekend worden welk vermogen zou geleverd worden indien de panelen 25°C warm zijn. Echter wordt wel nagelaten om te beschrijven hoe men de rendementen moet corrigeren voor de invloed van de wind.

Zo blijkt uit grafiek 2.53 dat het gecorrigeerde rendement van de PV cellen in On-top panelen 13,31% bedraagt, voor de geïntegreerde panelen bedraagt deze 12,91%. Dit is lager dan het opgegeven rendement van de cellen op de technische fiche maar is te wijten aan de installatie verliezen (zie deel I). Op deze richtingscoëfficiënten is echter een vrij grote fout van toepassing.

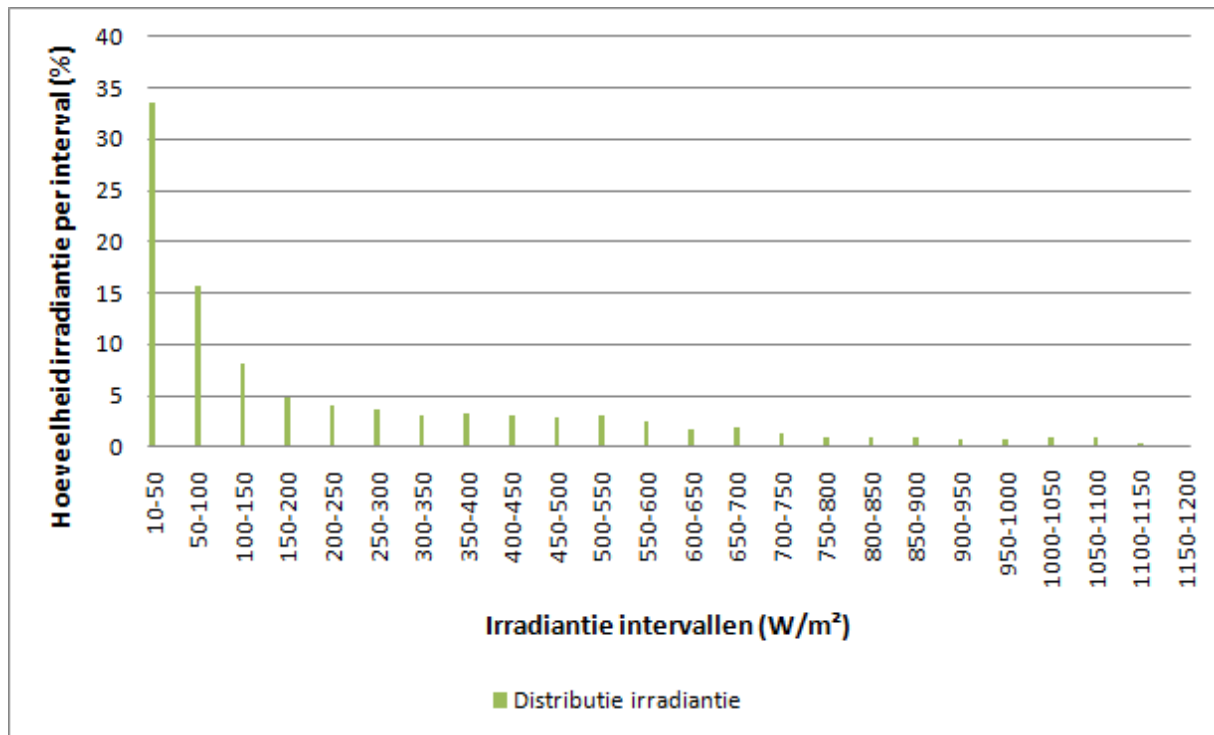


Figuur 2.53: Verschil in rendement van de twee types zonnepanelen

Op de installatie waren ook twee kWh tellers voorzien die het geleverde AC vermogen opmaten en dit reeds sinds dag één van de productie. Zo bracht de On-top installatie 196.9kWh op en de geïntegreerde 189.9kWh. Het verschil tussen beide bedraagt zo 3,7%. Wel is de mogelijke afwijking hierop groter dan uit de DC metingen omdat de omvormers nooit volledig identiek zijn en nog minder gelijk zullen reageren. In principe worden ook stroom en spanning door de omvormers gestuurd zodat op deze manier ook ergens de fout van de omvormers zijn invloed zal hebben. Echter ontbreekt de auteurs elektronisch inzicht om hier op verder in te gaan.

4.5.6 Irradiantie

Op onderstaande grafiek kan men zien dat vooral de diffuse straling (zie deel I) in onze contreien belangrijk is voor de productie. De zonnestraling wordt in de grafiek opgedeeld in irradiantieniveau's. Irradiantieniveau's tussen de 1000 en 1200 W/m², veroorzaakt door directe straling, komen regelmatig voor. Maar doordat de energie-inhoud van deze straling door de beperkte duur uiterst gering is (enkele uren per jaar), is deze ook bijna niet waar te nemen op de grafiek. Het is vooral de straling liggende tussen de 10W/m² en 500 W/m² die bepalend is voor de groene stroom productie. [98].



Figuur 2.54: Spreidingsgrafiek van de irradiantie

4.5.7 Fictieve koeling

Door de PV panelen tot een lagere temperatuur af te koelen kan men een hoger elektrisch rendement bekomen. Dit werd reeds aangehaald in het onderdeel over PV/T installaties. Dit effect van koeling werd aan de hand van de meetresultaten gesimuleerd (zie tabel 2.17): telkens wanneer de cel temperatuur hoger dan 25°C bedroeg, werd het geleverd vermogen gecorrigeerd met de vermogensgradiënt (-0,5%/K).

Zo bleek het totaal rendement van de KoraSun installatie te verhogen met 5,2% en deze van de On-top installatie 4,2%. Het koppelen van een PV installatie met warmteterugwinning lijkt dus uiteindelijk toch niet zo'n grote synergie op te leveren in ons klimaat. Vermoedelijk zal op jaarbasis dit resultaat iets

hoger worden aangezien er niet voor alle zomermaanden meetgegevens beschikbaar zijn. In augustus bleek de rendementswinst respectievelijk 10,7% en 9,3% .

Tabel 2.17: Fictieve koeling tot 25°C

		Geleverd vermogen [Wh]	Totaal geleverd vermogen bij celtemperatuur > 25°C [Wh]	Vermogenswinst indien gekoeld tot 25°C [Wh]	Vermogenswinst indien gekoeld 25°C [%]
Totaal	KoraSun	160.904	111.250	8.364	5,2
	On-top	165.449	104.200	6.923	4,2
30.7.2009 tot 31.7.2009	KoraSun On-top	2.125 2.169	2.035 2.075	20 21	1,0 1,0
1.8.2009 tot 31.8.2009	KoraSun On-top	44.056 44.962	42.817 43.530	4.701 4.181	10,7 9,3
1.11.2009 tot 30.11.2009	KoraSun On-top	10.774 11.171	5.384 4.120	98 47	0,9 0,4
1.12.2009 tot 31.12.2009	KoraSun On-top	7.490 8.005	382 117	3 0	0,0 0,0
1.1.2010 tot 31.1.2010	KoraSun On-top	8.665 9.189	931 462	14 4	0,2 0,0
1.2.2010 tot 28.2.2010	KoraSun On-top	9.734 9.966	1.692 327	23 2	0,2 0,0
1.3.2010 tot 31.3.2010	KoraSun On-top	26.057 26.831	14.689 11.794	393 202	1,5 0,8
1.4.2010 tot 30.4.2010	KoraSun On-top	43.189 44.366	37.066 36.401	2.846 2.300	6,6 5,2
1.5.2010 tot 10.5.2010	KoraSun On-top	8.816 8.790	6.253 5.373	267 167	3,0 1,9

4.6 Besluit proefopstelling

Gebaseerd op de voorlopige meetresultaten bleek alvast dat het rendementsverlies door ventilatie in de lijn van de verwachtingen lag, namelijk 2,7% ($\pm 0,2$). Echter is dit resultaat gebaseerd op de meetgegevens van nog maar 8 maanden en dient best de evaluatie gemaakt te worden op basis van een volledig jaar meetgegevens.

Gedurende het voorbije jaar werd de installatie hiervoor op punt gezet. Wel dienen nog zeker de volgende aanpassingen gedaan te worden opdat een betere simulatie van een reële toestand zou bekomen worden: plaatsen van de nokpannen en isolatie tussen de spanten. Daarnaast is het, gezien door het relatief laag vermogensverschil tussen beide installaties, aangewezen om nog dieper de meetfouten en toestelfouten te gaan onderzoeken. Dit vergt dan ook enig elektronisch inzicht die buiten onze opleiding valt.

De software voor de verwerking van de meetgegevens is functioneel en kan gebruikt worden om verdere meetgegevens automatisch te verwerken. Er dient nog een beter algoritme ingevoerd te worden voor de verwerking van de windrichtingmetingen en wordt er best nog wat gesleuteld aan de user-interface die momenteel vrij rudimentair is.

In het opzet om het rendementsverlies door ventilatie in reële situaties te bepalen is deze installatie uiterst geschikt. Ook de omgevingsfactoren van het proefdak zijn ideaal zodat het bekomen rendementsverlies zeker een bovengrens vormt voor vergelijkingen met reële situaties. Indien men echter zou wensen om het effect van de spouw dieper te analyseren is het aangeraden om hiervoor een labo opstelling te maken. Mits door het extra instrumenteren van de onderste en bovenste zonnepanelen met thermokoppels zou men wel van de bestaande meetopstelling een accurater beeld krijgen van het temperatuursverschil dat toch niet zo onbeduidend leek.

5 Besluit deel II

De invloed van ventilatie op zonnepanelen bleek een vrij complex fysisch probleem te zijn, waar momenteel nog relatief weinig fundamenteel onderzoek werd naar gedaan. Alle theoretische modellen vertrokken steeds van een sterke vereenvoudiging waarbij de spouw als een gesloten kanaal werd beschouwd. Dit enkel voor de thermische trek. In werkelijke situaties is de spouw langs alle zijden open en speelt de wind een grote rol. Dit valt echter heel moeilijk te modelleren.

Niet alleen het model werpt vragen op qua toepasbaarheid, ook de vele parameters die een rol spelen. Velen van deze parameters bleken sterk onderling afhankelijk en daarboven moeilijk te begroten. Zo is er een grote veelzijdigheid aan voorstellen in de literatuur voor veel van deze parameters die soms ver uit elkaar kunnen liggen.

Wel was de zoektocht nuttig om een beter inzicht te krijgen op het complexe temperatuurs- en stromingsgedrag in de spouw en hoe men hierop zou kunnen inspelen om een installatie te optimaliseren.

Hoewel de installatie naar dit fundamenteel onderzoek niet ontworpen is, konden de bevindingen toch enigszins getoetst worden.

Algemeen besluit

Hoewel de problematiek rond rendementen van zonnepanelen eerder buiten de context van de bouwkundige ingenieur valt, werd toch onderzocht hoe men zonnepanelen in het algemeen kan toepassen in de bouw. De verschillende toepassingen en manieren van integreren werden in het eerste deel toegelicht en aandachtspunten bij de installatie werden aangetekend.

De opgemaakte inventaris is vrij volledig maar gezien dit een sterk groeiende markt is, is deze zeker niet limitatief en zullen er zeker verdere ontwikkelingen komen. Vooral PV/T installaties lijken een hefboom in de evolutie naar passiefhuizen.

Eens dit kader geschetst werd, werd in deel II onderzocht welke de precieze invloed van ventilatie is. Hiervoor werd de volledige warmtebalans opgemaakt om te kunnen onderzoeken waar precies de luchtsnelheid zijn invloed zal hebben. Het samenspel van alle factoren bleek vrij complex maar toch werd vanuit een praktisch standpunt getracht aan te duiden welke factoren van belang zijn en hoe die eventueel kunnen geoptimaliseerd worden bij ontwerp.

Deze bevindingen konden getoetst worden aan de hand van het proefdak waar een geïntegreerde en een On-top installatie werden geïnstrumenteerd. Het bepalen van het rendementsverschil tussen beide installaties was dan ook het initiële opzet van deze masterproef. Hoewel nog geen meetgegevens voor een volledig jaar beschikbaar zijn bleek deze voor een redelijk representatieve periode van 8 maand 2,7% ($\pm 0,2$) te bedragen, welk perfect in de lijn van de verwachtingen ligt, namelijk 3%.

De proefopstelling werd ook op punt gesteld om verdere gegevens te verzamelen, echter zijn er nog enkele aandachtspuntjes die werden meegegeven in het besluit voor de meetopstelling.

Bibliografie

- [1] Publicatie door ODE-Vlaanderen VZW, Warmte uit zonlicht, s.l., s.n., 2007, p. 3. [Online beschikbaar]: http://www2.vlaanderen.be/economie/energiesparen/doc/brochure_zonlicht.pdf
- [2] Publicatie door ODE-Vlaanderen VZW, Duurzame energie – wegwijzer 2007, s.l., s.n., 2007, p. 3-4. [Online beschikbaar]: <http://www.ond.vlaanderen.be/energie/pdf/Brochure%20Duurzame%20Energie%202007.pdf>
- [3] <http://www.buildingsolar.com/technology.asp> geraadpleegd op 13 februari
- [4] <http://ode.be/index.php?page=elec-uit-zon-markt> geraadpleegd op 15 februari
- [5] Publicatie door Europese commissie en Joint Research Centre, JAEGER-WALDAU, A., e.a., PV status report 2009, s.l., s.n., 2009. [Online beschikbaar]: <http://re.jrc.ec.europa.eu/refsys/>
- [6] ALSEMA, E., NIEUWLAAR, E., Environmental Aspects of PV Power Systems, Utrecht, s.n., 1997. [Online beschikbaar]: http://www.nrel.gov/PV/thin_film/docs/environmental_aspects_of_PV_power_systems_iea_workshop.pdf
- [7] KRIEG, B. Stroom uit de zon – Zonnecel-techniek in theorie en praktijk, Beek, Elektuur BV, 1992, p23, pp. 35-35, pp. 53-54 .
- [8] http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar_timeline.pdf geraadpleegd op 6 maart
- [9] <http://whyfiles.org/041solar/main3.html> geraadpleegd op 6 maart
- [10] http://www.californiasolarcenter.org/history_PV.html geraadpleegd op 6 maart
- [11] http://www.vlaanderen.be/servlet/Satellite?pagename=Infolijn/View&c=Solution_C&p=1186804409590&cid=1090509354622 geraadpleegd op 6 maart
- [12] Belga, Zonnepanelen zonder subsidie verlieslatend, De Morgen, 9 maart 2010
- [13] Energieonderzoek centrum Nederland, http://cop15.ecn.nl/uploads/media/factsheet_zon.pdf geraadpleegd op 10 maart
- [14] <http://www.natuurkunde.nl/artikelen/view.do?supportId=687503> geraadpleegd op 7 maart
- [15] <http://www.epia.org/> geraadpleegd op 23 maart
- [16] <http://ode.be/index.php?page=zonnestroom-tech> geraadpleegd op 15 februari
- [17] <http://www.zonnepanelen-info.nl/zonnecellen/> geraadpleegd op 15 februari
- [18] <http://www.fontys.nl/lerarenopleiding/sittard/nattech/bel/default.htm> geraadpleegd op 7 maart
- [19] The German Energy Society, Planning & installing Photovoltaic Systems, Londen, Earthscan, 2008, pp. 10-11, p. 16, pp. 25-28, pp. 38-40, p.42, pp. 44-47, p. 49, p. 51, p. 65, p. 67, pp. 89-90, p. 159, p. 179, p. 181, p. 209, pp. 221-222, p.230, pp. 244-245.
- [20] DE VOS, A., Cursus Zonnecellen van de Universiteit Gent, s.l., s.n., s.d., p. 99, pp. 99-101, p. 101.
- [21] MARKVART, T. Solar Electricity. West Sussex Engeland, John Wiley & Sons Ltd, 2000, p 47-48, p.7-8.
- [22] <http://www.stroomwerk.nl/solarbasics.php> geraadpleegd op 25 februari
- [23] <http://www.avil.hacettepe.edu.tr/pages/Amorphous/Amorphous%20silicon.html> geraadpleegd op 1 maart

- [24] Publicatie door ODE-Vlaanderen VZW, Elektriciteit uit zonlicht, s.l., s.n., 2007, p. 6, p. 10, p. 4, p. 30. [Online beschikbaar]: <http://www.ond.vlaanderen.be/energie/pdf/Brochure%202007%20Elektriciteit%20uit%20zonlicht.pdf>
- [25] <http://www.isuppli.com/News/Pages/First-Solar-to-Produce-Twice-as-Much-as-Leading-Crystalline-Solar-Module-Suppliers-in-2009.aspx> geraadpleegd op 6 maart
- [26] <http://www.kennislink.nl/publicaties/organische-zonnecellen> geraadpleegd op 8 maart
- [27] HEREMANS, P., Organische Zonnecellen, Interconnect, nummer 27, juli 2008, p.4-5 [Online beschikbaar]: <http://www2.imec.be/content/user/File/InterConnect/Dutch/IC27.pdf>
- [28] GRAHAM-ROWE, D., Focusing Light on Silicon Beads, 2007, <http://www.technologyreview.com/Energy/19696/?a=f> geraadpleegd op 10 maart
- [29] WINTER, J., Spherical Solar Cells Are Pretty Awesome, 2007, <http://www.ecogeek.org/component/content/article/1063> geraadpleegd op 10 maart
- [30] http://www.originenergy.com.au/environment/files/factsheet_sliver.pdf geraadpleegd op 10 maart
- [31] BLOMJOUS, E., Japan steekt energie in fotovoltaïsche zonnecellen, 2004, <http://www.twanet.werk.nl/default.ashx?DocumentId=2237> geraadpleegd op 10 maart
- [32] Publicatie door ODE Vlaanderen vzw, Bouwen met fotovoltaïsche zonne-energie, Enschede, Van Muyswinkel, s.d. , p. 8, p. 12, p.10. [Online beschikbaar]: http://www.ode.be/images/stories/Brochures/zPV_br_bouwen_met_PV_050120.pdf
- [33] <http://www.siderea.nl/zonne-energie/info/> geraadpleegd op 13 maart
- [34] <http://www.zonnepanelen-info.nl/zonnepanelen/> geraadpleegd op 10 maart
- [35] <http://www.zonnepanelen.wouterlood.com/> geraadpleegd op 15 februari
- [36] <http://www.newnrg.nl/index.php?menu=20> geraadpleegd op 15 februari
- [37] DANCKAERT, D., VAN DEN BROECK, L., Beweging van de zon doorheen de seizoenen, Uitwisseling, jaargang 22, nummer 4, 2006, p. 11.
- [38] http://gratisenergie.be/zonnepanelen_opbrengst.html geraadpleegd op 18 februari
- [39] MUENSTER, R.J., Shade happens, 2009, <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2009/02/shade-happens-54551> geraadpleegd op 14 februari
- [40] <http://www.wtcb.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbri-contact&pag=Contact22&art=319> geraadpleegd op 14 februari
- [41] <http://www.zonnestroom.net/PVfaq.html> geraadpleegd op 17 maart
- [42] <http://www.biPV.ch/> geraadpleegd op 20 februari
- [43] HAGEMANN, I., Building integrated Photovoltaics, a new design opportunity for architects, 2010, http://www.giPV.de/BIPV_Brochure.pdf.
- [44] Duurzaam bouwen met fotovoltaïsche aluminiumoplossingen, Belgian Building Magazine, nr. 67, 23^{ste} jaargang, maart 2010, pp. 18-19.
- [45] <http://sanyo.com/solarark/en/about/> geraadpleegd op 12 maart
- [46] D6.1.1 Current state-of-the-art and best practices of BIPV, Performance of Building Integrated Photovoltaïcs, 2006, pp. 10-18.

- [47] Powerpoint van Maarten Van Cleef verkregen op <http://www.epia.org/events/past-events/archives.html> geraadpleegd op 14 maart
- [48] State of the art, potential, test procedures and requirements for BIPV, Performance of Building Integrated Photovoltaics, December 2009, p. 2.
- [49] <http://www.hollandsolar.nl/> geraadpleegd op 27 maart
- [50] <http://www.wtcb.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbri-contact&pag=Contact22&art=319> geraadpleegd op 1 maart
- [51] <http://www.zonnepanelen-advies.be/soorten.php> geraadpleegd op 22 maart
- [52] <http://www.zonnepanelen-energie.be/plat-dak.html> geraadpleegd op 22 maart
- [53] <http://www.airdeck.be/en/index.php?n=152> geraadpleegd op 29 maart
- [54] http://PVdatabase.org/products_view_details.php?ID=11 geraadpleegd op 29 maart
- [55] <http://www.PVresources.com/> geraadpleegd op 24 maart
- [56] JIE, J., HUA, Y., e.a., Modeling of a novel Trombe wall with PV cells, Building and Environment 42, 2007, pp. 1544–1552
- [57] BAHAJ, A.S., Photovoltaic roofing issues of design and integration into buildings, Renewable Energy 28, 2003, pp. 2195–2204
- [58] HUANG, B.J., LIN, T.H., e.a., Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal systems, Solar Energy Vol. 70, No. 5, 2001, pp. 443–448.
- [59] ADNAN, I., LI JIN, G., e.a., Hybrid Photovoltaic Thermal (PV/T) Air and Water Based Solar Collectors Suitable for Building Integrated Applications, American journal of environmental sciences 5 (5), 2009, pp. 618-624.
- [60] http://www6.cityu.edu.hk/bst/AppliedWork/Research/Hybrid_photovoltaic.pdf geraadpleegd op 23 februari
- [61] <http://www.iea-shc.org/> geraadpleegd op 1 april
- [62] <http://www.PVtwins.nl/principe.html> geraadpleegd op 1 april
- [63] CHARALAMBOUS, P.G., MAIDMENT, G.G., e.a., Photovoltaic thermal (PV/T) collectors: A review, Applied Thermal Engineering 27, 2007, pp. 275–286
- [64] <http://www.sirris.be/uploadedFiles/News/Fotovoltaische%20daksystemen.pdf> geraadpleegd op 1 april
- [65] SANDNES, B., REKSTAD, J., A photovoltaic/thermal (PV/T) collector with a polymer absorber plate. Experimental study and analytical model, Solar Energy 72 (1), 2002, pp. 63–73.
- [66] COX, C.H., RAGHURAMAN, P., Design considerations for flat-plate photovoltaic/thermal collectors, Solar Energy 35 (3), 1985, pp. 227–241.
- [67] GARG, H.P., AGARWAL, R.K., Some aspects of a PV/T collector/forced circulation flat plate solar water heater with solar cells, Energy Conversion and Management 36 (2), 1995, pp. 87–99.
- [68] ELSWIJK, M.J., STROOTMAN, K.J., e.a., PVT in collectieve zonthermische systemen, 2003, p. 12.
- [69] FUJISAWA, T., TANI, T., Annual exergy evaluation on photovoltaic–thermal hybrid collector, Solar Energy Materials and Solar Cells 47 (1–4), 1997, pp. 135–148.

- [70] COVENTRY, J.S., LOVEGROVE, K., Development of an approach to compare the 'value' of electrical and thermal output from a domestic PV/thermal system, *Solar Energy* 75 (1), 2003, pp. 63–72.
- [71] BAKKER, M., ZONDAG, H.A., Performance and costs of a roof-sized PV/thermal array combined with a ground coupled heat pump, *Solar Energy* 78, 2005 pp. 331–339
- [72] HUANG, B.J., LIN, T.H., e.a., Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal, *Solar Energy* Vol. 70, No. 5, 2001, pp. 443–448.
- [73] PALYVOS, J.A., A survey of wind convection coefficient correlations for building envelope energy systems' modeling. *Applied Thermal Engineering*, 2008, pp. 801 – 808.
- [74] DUFFIE, J.A., BECKMAN, W.A., e.a., Solar engineering of thermal processes, New York :, 1980.
- [75] SANDBERG, M., MOSHFEGH, B., e.a., Buoyancy-induced air flow in photovoltaic facades: Effect of geometry of the air gap and location of solar cell modules, *Building and Environment* 37(3), 2002, pp. 211 – 218.
- [76] BRINKWORTH, B.J., Estimation of flow and heat transfer for the design of PV cooling ducts, *Solar Energy* 69(5), 2000, pp. 413 – 420.
- [77] BRINKWORTH, B.J., SANDBERG, M., Design procedure for cooling ducts to minimise efficiency loss due to temperature rise in PV arrays, *Solar Energy* 80(1), 2006, pp. 89 – 103.
- [78] TONUI, J.K., TRIPANAGNOSTOPOULOS, Y., Improved PV/t solar collectors with heat extraction by forced or natural air circulation, *Renewable Energy* 32(4), 2007, pp. 623 – 637.
- [79] FRILING, N., BLOEM, H., e.a., Modelling the heat dynamics of building integrated and ventilated photovoltaic modules, *Energy and Buildings* 41(10), 2009, pp. 1051 – 1057.
- [80] SANDBERG, M., STOBACH, J., Aspects of air and heat flow for roof integrated PV hybrid systems. Proceedings of the Second World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, 1988, pp. 2598 – 601.
- [81] SANDBERG M., MOSHFEGH, B., Flow and heat transfer in the air gap behind photovoltaic panels, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2(3), 1998, pp. 287 – 301.
- [82] DAVIDSON J.H., MITTELMAN, G., A model and heat transfer correlation for rooftop integrated photovoltaics with a passive air cooling channel, *Solar Energy* 83(8), 2009, pp. 1150 – 1160.
- [83] BRINKWORTH, B.J., Optimum depth for PV cooling ducts, *Solar Energy* 80(9), 2006, pp.1131 – 1134.
- [84] MEI, L., INFIELD, D.G., Equilibrium thermal characteristics of a building integrated photovoltaic tiled roof, *Solar Energy* 83(10), 2009, pp. 1893 – 1901.
- [85] BRINKWORTH, B.J., MARSHALL, R.H., A validated model of naturally ventilated PV cladding, *Solar Energy* 69(1), 2000, pp. 67 – 81.
- [86] BLOEM, J.J., DAMMANN, B., Estimation of non-linear continuous time models for the heat exchange dynamics of building integrated photovoltaic modules, *Energy and Buildings* 40(2), 2008, pp. 157 – 167.
- [87] BRINKWORTH, B.J., A procedure for the routine calculation of laminar free and mixed convection in inclined ducts, *International Journal of Heat and Fluid Flow* 21(4), 2000, pp. 456 – 462.
- [88] SKOPLAKI, E., BOUDOUVIS, A.G., A simple correlation for the operating temperature of photovoltaic modules of arbitrary mounting, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 92(11), 2008, pp. 1393 – 1402.
- [89] <http://proeffabriek.tripod.com/id10.html> geraadpleegd op 14 april
- [90] http://www.ronnyrooman.be/meet_regel/pt100.pdf geraadpleegd op 14 april

- [91] <http://www.ccinv.be/> geraadpleegd op 15 april
- [92] MERTENS, J., Niveauregeling voor vloeibaar stikstof, Koeling van een germaniumdetector, 2005, p.17
- [93] <http://www.mapsofworld.com/referrals/weather/meteorology/stevenson-screen.html>
geraadpleegd 15 april
- [94] Commission of the European Communities, Guidelines for the Assessment of Photovoltaic Plants, Document A: Photovoltaic System Monitoring, Issue 4, January 1991
- [95] Nederlandse Werkgroep PV Monitoring, C.W.A. Baltus, E.A. Alsema, e.a., aanbevolen werkwijze voor de monitoring van netgekoppelde PV-systemen in Nederland, Utrecht, Novem, 1997, p. 15.
- [96] Commission of the European Communities, Joint Research Centre, Guidelines for the Assessment of Photovoltaic Plants, Document B: Analysis and Presentation of Monitoring Data Issue 4.1, June 1993
- [97] BALTUS, C.W.A., Evaluatie van rapportages gemonitorde PV-systemen, s.l., s.n., 2001
- [98] <http://www.PV-monitoring.novem.nl/contents/BL2.html> geraadpleegd op 25 april
- [99] <http://re.jrc.ec.europa.eu/PVgis/apps3/PVest.php> geraadpleegd op 11 mei
- [100] GOBSCH, G., SCHULZE, D., Untersuchung des thermischen und elektrischen Verhaltens des CSS Solardachsteins im Vergleich zur frei aufgeständerten Variante, 2003, p 26.

Figuren bronnenlijst

Figuur 1.1: <http://www.ecvv.com/product/1318014.html>

Figuur 1.2: <http://www.appliedsolarwindsolutions.com.au/>

Figuur 1.3: http://www.kyosemi.co.jp/product/pro_ene_sun_e1.html

Figuur 1.4: <http://www.metaefficient.com/renewable-power/solar-beads-could-cut-costs-by-50.html>

figuur 1. 5: http://www.originenergy.com.au/environment/files/factsheet_sliver.pdf

figuur 1.6: Powerpoint Koramic: opleiding KoraSun 30 december 2009 - nl, slide 11

Figuur 1.7: <http://www.zonnepanelen-infopunt.be/zonnepanelen>

Figuur 1.8: http://www.taxameter.nl/fs_onstreet.php?onstreet.php

Figuur 1.9: http://www.taxameter.nl/images/paragraph/img_os_stelio_straat.jpg

figuur 1.10: Powerpoint Koramic: opleiding KoraSun 30 december 2009 - nl, slide 36

figuur 1.11: *Planning and Installing Photovoltaic Systems, The German Energy Society, p91*

figuur 1.12: <http://www.zonnepanelen-info.nl/zonnepanelen/rendement-zonnepanelen/>

figuur 1.13: *Planning and Installing Photovoltaic Systems, The German Energy Society, p89*

figuur 1.14: *bewerkte afbeelding uit Planning and Installing Photovoltaic Systems, The German Energy Society, p179*

Figuur 1.15: <http://archives.starbulletin.com/2007/01/19/business/story01.html>

Figuur 1.16: http://www.biPV.ch/requisiti_orientamento_e.asp

Figuur 1.17: http://www.altec-solartechnik.de/files/1268D4763AF/ALSD_qualiDruck.pdf

figuur 1.18: *Brochure, Performance of Building Integrated Photovoltaics – December 2009, p2*

Figuur 1.19: www.koramic.be

figuur 1.20: <http://www.mrsolar.com/page/MSOS/CTGY/roof>

figuur 1.21: <http://wohnen.pege.org/2007-energiesparmesse/>

Figuur 1.22: <http://www.solar-constructions.com/transparant01.jpg>

figuur 1.23: *Uit Powerpoint: Ile de la Réunion van Schüco, Brussels, EPIA BIPV Conference, January 31st, 2008 (verkregen van <http://www.epia.org/>)*

Figuur 1.24: http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_tree

Figuur 1.25: <http://www.wapa.gov/newsroom/default.htm>

figuur 1.26: *Uit Verslag: 019718 PV PERFORMANCE D6.1.1 Current state-of-the-art and best practices of BIPV (verkregen van <http://www.epia.org/>)*

figuur 1.27: *B. J. HUANG[†], T. H. LIN, W. C. HUNG and F. S. SUN, performance evaluation of solar photovoltaic thermal systems*

Figuur 1.28: <http://www.sirris.be/uploadedFiles/News/Fotovoltaische%20daksystemen.pdf>

figuur 1.29: <http://www.PVtwins.nl/collectors.html>

Figuur 1.30: <http://www.PVtwins.nl/panels.html>

Figuur 1.31: http://www6.cityu.edu.hk/bst/AppliedWork/Research/Hybrid_photovoltaic.pdf

figuur 2.2: *Cursus gebouwentechniek bouwfysica 1, p 34*

Figuur 2.3: *Cursus gebouwentechniek bouwfysica 1, p 24*

Figuur 2.4: SANDBERG M., MOSHFEGH, B., *Flow and heat transfer in the air gap behind photovoltaic panels*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2(3), 1998, p. 294.

Figuur 2.5: SANDBERG M., MOSHFEGH, B., *Flow and heat transfer in the air gap behind photovoltaic panels*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2(3), 1998, p. 294.

Figuur 2.6: SANDBERG M., MOSHFEGH, B., *Flow and heat transfer in the air gap behind photovoltaic panels*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2(3), 1998, p. 295.

Figuur 2.7: SANDBERG M., MOSHFEGH, B., *Flow and heat transfer in the air gap behind photovoltaic panels*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2(3), 1998, p. 295.

Figuur 2.8: SANDBERG M., MOSHFEGH, B., *Flow and heat transfer in the air gap behind photovoltaic panels*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2(3), 1998, p. 297.

Figuur 2.9: SANDBERG M., MOSHFEGH, B., *Flow and heat transfer in the air gap behind photovoltaic panels*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2(3), 1998, p. 297.

Figuur 2.10: SANDBERG M., MOSHFEGH, B., *Flow and heat transfer in the air gap behind photovoltaic panels*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2(3), 1998, p. 298.

Figuur 2.11: BRINKWORTH, B.J., SANDBERG, M., *Design procedure for cooling ducts to minimise efficiency loss due to temperature rise in PV arrays*, *Solar Energy* 80(1), 2006, p. 96

Figuur 2.12: BRINKWORTH, B.J., SANDBERG, M., *Design procedure for cooling ducts to minimise efficiency loss due to temperature rise in PV arrays*, *Solar Energy* 80(1), 2006, p. 97

Figuur 2.15: BRINKWORTH, B.J., MARSHALL, R.H., *A validated model of naturally ventilated PV cladding*, *Solar Energy* 69(1), 2000, p. 69.

Figuur 2.21: *Cursus gebouwentechniek bouwfysica 1, p 89*

Figuur 2.25: Powerpoint Koramic: opleiding KoraSun 30 december 2009 - nl, slide 57

Figuur 2.26: Powerpoint Koramic: opleiding KoraSun 30 december 2009 - nl, slide 56

Figuur 2.31: http://www.lontek.com.au/graphtec/gl800/graphtec_gl800_data_logger.htm

Figuur 2.32: http://www.lontek.com.au/graphtec/gl800/graphtec_gl800_data_logger.htm

Tabellen bronnenlijst

Tabel 1.1: <http://ode.be/index.php?page=elec-uit-zon-markt>

Tabel 1.2: CHARALAMBOUS, P.G., MAIDMENT, G.G., e.a., Photovoltaic thermal (PV/T) collectors: A review, *Applied Thermal Engineering* 27, 2007, p. 284.

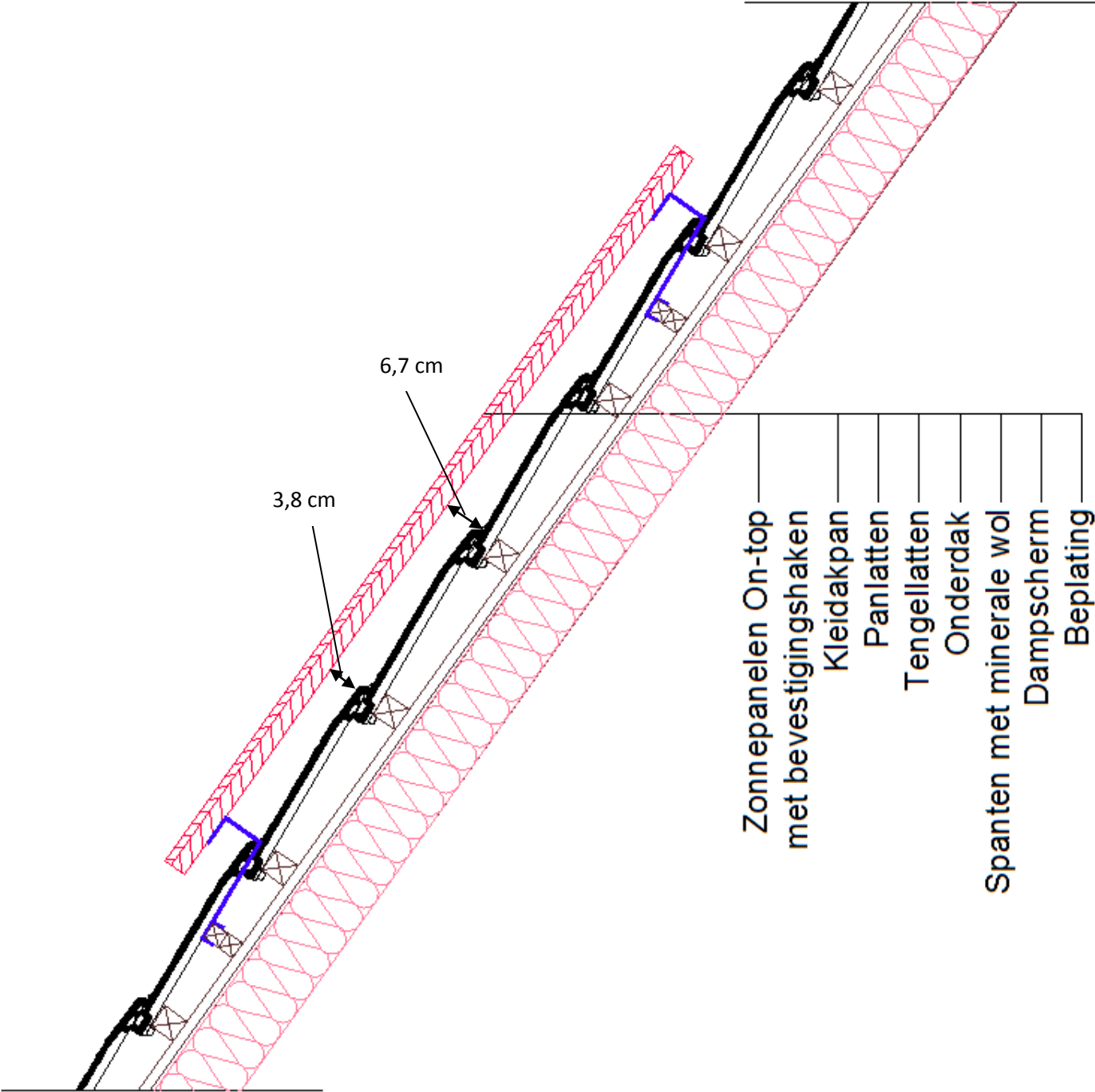
Tabel 2.1: SANDBERG M., MOSHFEGH, B., *Flow and heat transfer in the air gap behind photovoltaic panels*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2(3), 1998, p. 300.

Tabel 2.11: SKOPLAKI, E., BOUDOUVIS, A.G., A simple correlation for the operating temperature of photovoltaic modules of arbitrary mounting, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 92(11), 2008, p. 1399.

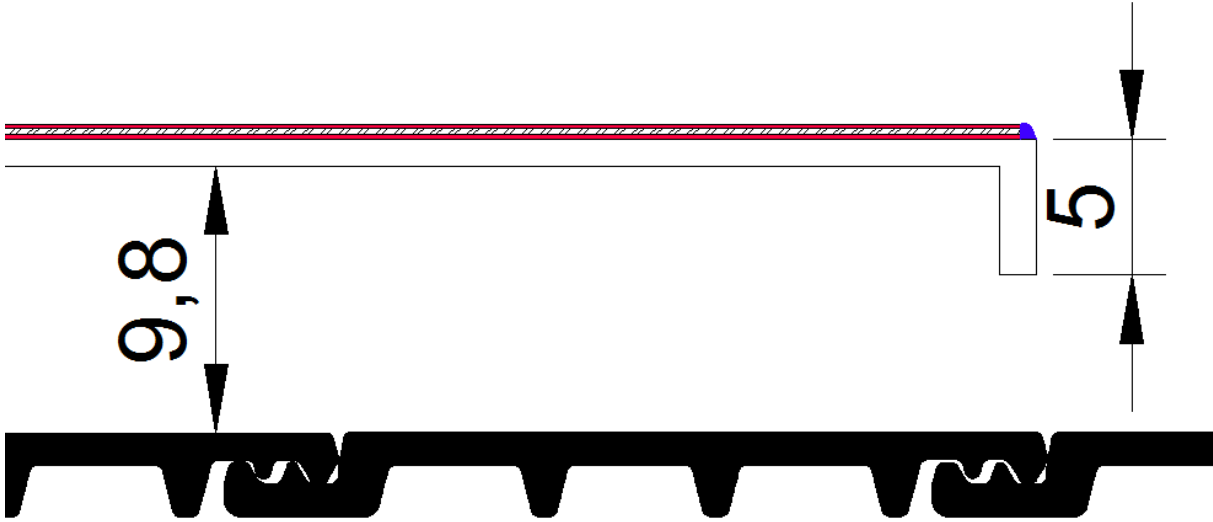
Tabel 2.12: <http://re.jrc.ec.europa.eu/PVgis/apps3/PVcalc.php>

Tabel 2.13: <http://re.jrc.ec.europa.eu/PVgis/apps3/PVcalc.php>

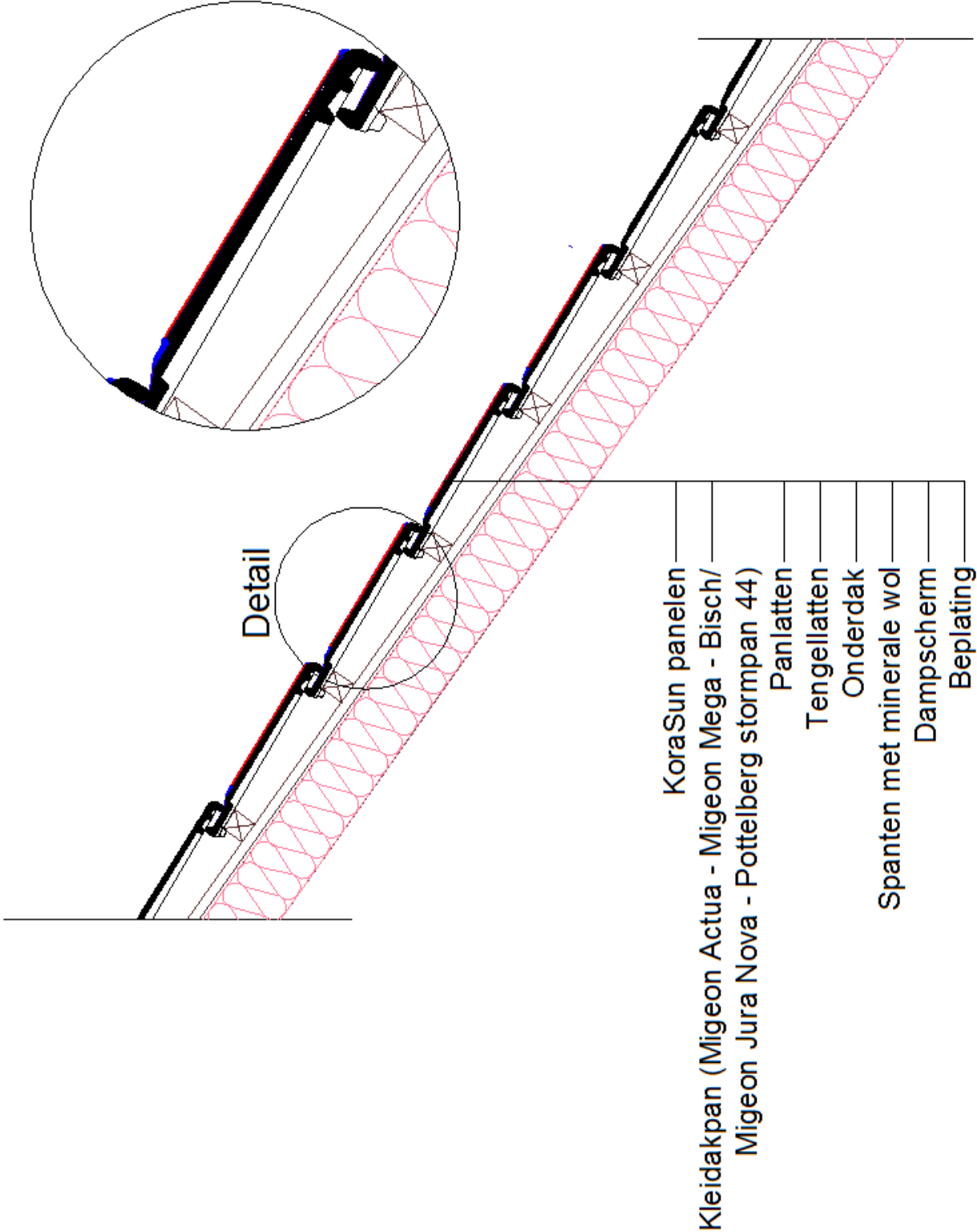
Bijlage A: On-top zonnepaneel in Autocad



Dwarse doorsnede van On-top zonnepaneel



Bijlage B: KoraSun zonnepaneel in Autocad



Bijlage C: Technische fiche KoraSun zonnepaneel

KoraSun® STD 78 - PV paneel

Toepassing	
Elektriciteitsproductie geïntegreerd in gebouwen	
Geïntegreerd in daken of wanden	
Voor netgekoppelde installaties	

Elektrische waarden (STC)	
Maximaal vermogen	78 Wp +/- 3%
Spanning bij maximaal vermogen (Vmpp)	10,4 V
Stroom bij maximaal vermogen (Impp)	7,5 A
Openklemspanning (Voc)	13,2 V
Kortsluitstroom (Isc)	8,0 A
Vermogen cellen	14,6 %

Garantievoorwaarden en meetcondities	
Norm	IEC 61215
Minimale vermogensgarantie voor 12 jaar	90 %
Minimale vermogensgarantie voor 25 jaar	80 %
Meetcondities : 1 kW/m ² , Am 1,5 (ASTM E0892), Temp. 25 °C	

Specificatie	
Cellen 156mm x 156mm	Silicium polykristallijn
Aantal cellen	22
Maximale systeemspanning	750 V
Inkapsulatie	Glas /EVA /Tedlar
Gehard glas met anti-reflectie	
Beveiligingsdiode	geïntegreerd
Aansluiting	Kabels met MC3 connectoren
Gewicht	8,55 kg
Omkadering	Polyurethaan ColoFast®
Elektrische isolatie van het kader	60000 Volt DC

Thermische invloed	
Variatie openklemspanning (Voc)	- 44 mV/ °C
Variatie kortsluitstroom (Isc)	+ 5,5 mA/ °C
Vermogensvariatie (Pmpp)	- 0,4 %/°C

