

# Studie opbrengstgarantie residentiële zonnepaneleninstallaties Izen Energy Systems NV

Optimalisatie opbrengstformule met focus op de invloed van  
schaduw

**Merijn WUYTS**

Promotor: Werner Segers

Co-promotoren: Roel Stessens

Pieter Callebaut

Masterproef ingediend tot het behalen van de  
graad van master of science in de industriële  
wetenschappen: energie

Academiejaar 2016-2017

© Copyright KU Leuven

Zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van zowel de promotor(en) als de auteur(s) is overnemen, kopiëren, gebruiken of realiseren van deze uitgave of gedeelten ervan verboden. Voor aanvragen tot of informatie i.v.m. het overnemen en/of gebruik en/of realisatie van gedeelten uit deze publicatie, wendt u tot KU Leuven technologiecampus Geel, Kleinhoefstraat 4, B-2440 Geel, +32 14 80 22 40 of via e-mail [iiw.geel@kuleuven.be](mailto:iiw.geel@kuleuven.be).

Voorafgaande schriftelijke toestemming van de promotor(en) is eveneens vereist voor het aanwenden van de in deze masterproef beschreven (originele) methoden, producten, schakelingen en programma's voor industrieel of commercieel nut en voor de inzending van deze publicatie ter deelname aan wetenschappelijke prijzen of wedstrijden.

## **VOORWOORD**

Deze masterthesis is het resultaat en hoogtepunt van onze vier jaar durende opleiding tot het behalen van de graad van Master of Science in de Industriële Wetenschappen afstudeerrichting Energie (Merijn) en afstudeerrichting Elektromechanica (Thomas).

Om onze tijd optimaal te benutten, zijn we reeds in de maand juli op eigen initiatief begonnen aan de stage voor onze masterproef. We hebben ons gedurende het laatste jaar erg ingezet voor ons onderzoek en hebben dit tot een goed einde kunnen brengen dankzij de inspirerende omgeving en toffe collega's van Izen Energy Systems NV.

Deze tekst is het resultaat van een leerrijk proces en vlotte samenwerking binnen het bedrijf. We kijken hier met veel trots en tevredenheid op terug.

We menen dat dit ook een geschikt moment is om een woord van dank te richten aan enkele belangrijke mensen in ons project.

Eerst en vooral willen we onze promotor Werner Segers vermelden. We zijn nog steeds onder de indruk van zijn geduldige en aangename aanpak en ook wanneer we problemen hadden met ons onderzoek, stond hij ons bij met raad en daad. Vooral zijn technische kennis en leerrijke labo's hebben veel bijgedragen gedurende onze opleiding en daarvoor wensen we hem uitdrukkelijk te danken.

Eveneens speciale dank aan onze co-promotor Roel Stessens van Izen. Hij heeft ervoor gezorgd dat we snel onze weg vonden in het bedrijf en met de juiste mensen in contact kwamen. Roel heeft ons bijgestaan met de technische expertise en inzichten die vaak noodzakelijk waren om bepaalde problemen op te lossen. Ondanks zijn drukke agenda heeft hij het onderzoek steeds op de voet gevolgd en de resultaten frequent met ons besproken, waarvoor onze oprechte dank. Zonder hem was deze masterthesis absoluut niet mogelijk geweest.

Als marketingexpert heeft Pieter Callebaut rechtstreekse contacten met klanten en werfvoorbereiders en dit zorgde voor totaal andere inzichten tijdens ons onderzoek. Met hem hadden we regelmatig overleg over de lay-out en gebruiksvriendelijkheid van onze instrumenten. Hij bood de gelegenheid om samen met de werfvoorbereiders ideeën uit te wisselen zodat het uiteindelijke resultaat voor hen duidelijk en gebruiksvriendelijk zou worden.

De producten die voortvloeien uit de resultaten van onze masterthesis zijn een schaduwhandboek en een rekentool. Het schaduwhandboek werd ontwikkeld om een gefundeerd percentage schaduwverlies te bepalen. De rekentool daarentegen moet de werfvoorbereiders helpen om een snellere en meer accurate opbrengstberekening te simuleren.

Dank aan de firma Izen en hun medewerkers, voor hun gastvrijheid en onuitputtelijke behulpzaamheid. Mede dankzij hun ideeën, kritische bevindingen en duidelijke formuleringen van vooropgestelde criteria, kunnen we mooie resultaten voorleggen.

Tot slot willen we vrienden en familie bedanken voor de ongelofelijke steun tijdens onze opleiding, de geboden kansen en de momenten van ontspanning. Zonder hen hadden we dit traject niet succesvol kunnen afronden.

Thomas Raets – Merijn Wuyts

## SAMENVATTING

Bij Izen Energy Systems NV is er een methode aanwezig om een opbrengstgarantie te maken voor residentiële zonnepaneleninstallaties gedurende het eerste jaar na plaatsing. De opbrengstberekening gebeurt in twee stappen. Vooreerst werkt de werfvoorbereider ter plaatse een voorstel uit voor de klant. Dit berekent hij met een korte en eenvoudige formule, de dimensioneringsformule. Nadien volgt er een meer gedetailleerde berekening van de opbrengstgarantie op basis van het aantal voorgestelde zonnepanelen van de werfvoorbereider.

De garantieformule werkt aan de hand van een aantal factoren o.a. de oriëntatie en helling van het dak, het aantal zonnepanelen en de schaduw. Alle parameters behalve de factor schaduw, zijn goed gekend. Tot nu was er geen eenvoudige methode voorhanden die het opbrengstverlies als gevolg van schaduw in kaart bracht. De enige mogelijkheid om een idee te krijgen van het schaduweffect is met behulp van het simulatieprogramma PVsyst waarin de gebruiker alle parameters van de installatie gedetailleerd kan ingegeven om het schaduwverlies te berekenen. Het invoeren van de noodzakelijke parameters is een tijdrovend proces en daarom niet mogelijk voor iedere residentiële installatie. Izen past deze methode enkel toe voor grote projecten.

De opdracht bestond erin om, op een doordachte en wetenschappelijk onderbouwde manier, een instrument te ontwikkelen waarmee de werfvoorbereiders snel en eenvoudig het effect van schaduw kunnen opzoeken en berekenen.

Als Izen een opbrengstgarantie geeft aan de klant en de desbetreffende installatie de gegarandeerde opbrengst niet haalt, dan betaalt Izen het prijsverschil in kWh terug aan de klant. Vanzelfsprekend wenst Izen deze opbrengstgarantie zo nauwkeurig mogelijk te bepalen. Omdat schaduw een grote invloed heeft op de opbrengstberekening is het niet verwonderlijk dat het bedrijf een gedetailleerde studie wenst omtrent de invloed van schaduw op de opbrengst van de installatie.

In een eerste fase werd het simulatiepakket PVsyst grondig bestudeerd en werd bekeken hoe dit programma tot een resultaat komt. Vanuit het bedrijf werd duidelijk gecommuniceerd hoe de instellingen in PVsyst werden vastgelegd.

Daarna zijn er simulaties gemaakt in PVsyst van de voornaamste schaduwvormende elementen zoals een schouw, dakkapel, boom, overstaand en naastliggend gebouw, e.a. Bij elk element is afzonderlijk onderzocht welke factoren de grootste invloed hadden met betrekking tot schaduw. De belangrijkste parameters vormen de leidraad doorheen het handboek, terwijl de minder belangrijke parameters niet werden opgenomen. Op deze manier is het resultaat een gebruiksvriendelijk en bovendien nauwkeurig schaduwhandboek.

Nadien is er een formule ontwikkeld om het effect van meerdere schaduwvormende elementen te combineren tot één globaal percentage dat het gezamenlijke verlies weergeeft.

In eerste instantie bestond de opdracht erin om het effect van schaduw te onderzoeken. Naarmate de masterthesis vorderde, werd er beslist om nog andere factoren van de berekeningsformule dieper uit te werken. Zodoende werd de bestaande rekenmethode verder verfijnd.

Tot slot werd de rekentool in combinatie met het schaduwhandboek ingezet op een steekproef uit de tweede groepsaankoop van Antwerpen. Op die manier kon worden nagegaan in hoeverre de rekenmethode al dan niet afweek van de werkelijkheid.

## SUMMARY

Izen Energy Systems NV has its own method to calculate the gain of a residential photovoltaic system during the first year after installation. The calculated production serves as a warranty for the customer. The calculation consists of two phases: At first, the person preparing the proposal is making a suggestion to the customer based upon his energy consumption. With a simple formula, he calculates the number of solar panels the customer more or less needs. Afterwards is calculated how many solar panels the customer really needs using a more complex and detailed formula.

The formula to calculate the yield of the photovoltaic installation uses multiple parameters a.o. the orientation and the gradient of the roof, the number of solar panels and the shade. The influence of shadow is the most difficult factor to calculate. There is no real useful method available to calculate the exact effect the shadow has on the yield. The only way to have any idea is by using the simulation package PVsyst. This program allows its users to put in all parameters of the entire PV system and thus calculate the effect. However, despite the reliable outcome this program delivers, it can't be used on a permanent basis, due to the time needed to operate the entire system. Therefore, Izen only applies PVsyst to extensive projects.

Our task was to develop an instrument well considered and scientifically substantiated and moreover easy to handle by the person responsible in the field. The moment Izen gives a warranty of the yield to its customer, the installation has to perform as defined. Otherwise the company has to refund the customer the difference in kWh. It's an obvious conclusion that the calculated gain in the warranty has to be as accurate as possible. Because of the tremendous effect of shade on the calculation, it's easy to understand why the company opted for a detailed study regarding shade and its effect on the gain of the PV system.

During the first phase a rigorous study of the simulation program PVsyst was made, to learn how simulations are done within the software. Our promoter at Izen told us how to set the different options in PVsyst.

Then, simulations were made using different shading objects such as a chimney, a dormer, a tree, a building opposite or adjacent to the installation, etc. Each element was studied separately and the most important factors with respect to shadow e.g. a chimney, were determined. The most important parameters are the backbone of the shade manual. Abstraction was made of the less important parameters. They are not included in order to keep the manual user friendly but sufficiently precise.

Afterwards a formula was designed in which the effect of combined shadow elements resulted in an overall shade percentage.

At first our task was confined to the study of the effect of shadow on the yield of a PV system. During our research however, it was decided that more factors of the yield formula needed to be redesigned. This resulted in a more refined manner of calculating the yield.

Finally, the shade manual was combined with the calculation tool to a sample of PV installations of the second group purchase in Antwerp. This phase in our research made it possible to determine how the calculation method matches or differs from the reality.

# INHOUDSTAFEL

<b>VOORWOORD</b> .....	<b>3</b>
<b>SAMENVATTING</b> .....	<b>4</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>5</b>
<b>INHOUDSTAFEL</b> .....	<b>6</b>
<b>LIJST VAN GEBRUIKTE AFKORTINGEN EN SYMBOLEN</b> .....	<b>8</b>
<b>INLEIDING</b> .....	<b>9</b>
<b>1 PROBLEEMANALYSE EN DOEL</b> .....	<b>10</b>
<b>1.1 Situatie bij aanvang</b> .....	<b>10</b>
<b>1.2 Probleemanalyse</b> .....	<b>11</b>
<b>1.3 Doel</b> .....	<b>12</b>
<b>2 GROEPSAANKOOP II ANTWERPEN</b> .....	<b>13</b>
<b>2.1 Aanmerkingen</b> .....	<b>13</b>
<b>2.2 Opbouw databank</b> .....	<b>14</b>
<b>3 HESPUL</b> .....	<b>15</b>
<b>4 SCHADUWVERLIES</b> .....	<b>17</b>
<b>4.1 Simulatiesoftware</b> .....	<b>17</b>
4.1.1 Marktonderzoek .....	17
4.1.1.1 Google Project Sunroof .....	17
4.1.1.2 Zonnekaart Vlaanderen .....	18
4.1.1.3 PV*SOL .....	18
4.1.2 PVsyst .....	19
<b>4.2 Technologie</b> .....	<b>20</b>
4.2.1 Opbouw PV-installatie .....	20
4.2.2 IV-curve .....	20
4.2.3 Schaduweffect op elektrisch gedrag .....	23
4.2.3.1 Gebruikt materiaal .....	23
4.2.3.2 Metingen op één paneel .....	26
4.2.3.3 Metingen op twee panelen in serie .....	34
4.2.3.4 Metingen op twee panelen in parallel .....	36
<b>4.3 Schaduwverlies door omgevingselementen</b> .....	<b>38</b>
4.3.1 Installatie .....	39
4.3.2 Elementen .....	40
4.3.2.1 Steekproef .....	40
4.3.2.2 Schouw .....	41
4.3.2.3 Dakkapel .....	44
4.3.2.4 Boom .....	45
4.3.2.5 Elektriciteitskabel .....	45
4.3.2.6 Dakreling .....	45
4.3.2.7 Naastliggend gebouw .....	46
4.3.2.8 Overliggend gebouw .....	46
4.3.3 Meerdere strings .....	46
4.3.4 Structuur .....	46
4.3.5 Combinatieformule .....	47
4.3.6 Klassering van schaduw .....	49
<b>4.4 Schaduwverlies door installatie</b> .....	<b>49</b>
4.4.1 Opstelling .....	49
4.4.2 Onderzoek .....	50
<b>4.5 Controle</b> .....	<b>51</b>
4.5.1 Sensitiviteitsanalyse .....	52
4.5.1.1 Albedo .....	52
4.5.1.2 Gedetailleerde verliezen .....	53
4.5.1.3 MPPT .....	56

4.5.2	Testen van methode.....	62
4.5.2.1	Schatting en methode vergelijken met PVsyst .....	63
4.5.2.2	PVsyst vergelijken met monitoring .....	67
4.5.3	Gebruikstest.....	68
<b>5</b>	<b>BASIS GENORMALISEERDE OPBRENGST .....</b>	<b>70</b>
<b>5.1</b>	<b>Definitie .....</b>	<b>70</b>
<b>5.2</b>	<b>Bepaling .....</b>	<b>71</b>
<b>5.3</b>	<b>Extrapolatie .....</b>	<b>73</b>
5.3.1	Geografische extrapolatie.....	73
5.3.2	Historische extrapolatie .....	76
<b>6</b>	<b>AFTOPVERLIEZEN.....</b>	<b>77</b>
<b>7</b>	<b>REKENTOOL.....</b>	<b>78</b>
<b>7.1</b>	<b>Dimensioneringsberekening.....</b>	<b>79</b>
<b>7.2</b>	<b>Garantieberekening .....</b>	<b>80</b>
<b>7.3</b>	<b>Testen aan groepsaankoop .....</b>	<b>81</b>
7.3.1	Nauwkeurigheid .....	82
7.3.2	Opbrengstgarantie .....	83
	<b>BESLUIT .....</b>	<b>85</b>
	<b>ABSTRACT .....</b>	<b>86</b>
	<b>LITERATUURLIJST .....</b>	<b>87</b>

## LIJST VAN GEBRUIKTE AFKORTINGEN EN SYMBOLEN

A	Ampère
BNO	Basis genormaliseerde opbrengst
CAD	Computer-Aided Design
FF	Vulfactor
KMI	Koninklijk Meteorologisch Instituut van België
MPP	Maximum power point
MPPT	Maximum power point tracker
PV	Fotovoltaïsch
STC	Standaard testcondities
V	Volt
W	Watt



## INLEIDING

Izen Energy Systems NV is een bedrijf dat 30 jaar geleden startte met het verdelen van duurzame energieoplossingen voor residentiële toepassingen. Het bedrijf is uitgegroeid tot een kleine KMO met 85 medewerkers en installeert zowel kleine als zeer grote zonne-installaties op de nationale en internationale markt. Naast zonnepanelen installeert Izen zonneboilers, warmtepompboilers voor warm water, warmtepompen voor verwarming en spouwmuurisolatie.

Tijdens de opbrengstberekening van de zonne-installatie bepaalt de werfvoorbereider voor de verschillende factoren van de opbrengstformule een waarde. Oorspronkelijk zou deze studie de factor met betrekking tot schaduw onderzoeken. Naarmate de masterthesis vorderde, zijn er meerdere factoren van de formule dieper bestudeerd om zo tot een nauwkeurigere opbrengstberekening te komen.

De studie start met een degelijke analyse van de probleemstelling. De analyse van de probleemstelling resulteert in een opsomming van de noden. Eens de noden goed begrepen zijn, komt automatisch het doel van het onderzoek naar boven. Het resultaat van de studie kan enkel voldoen als het de vooropgestelde criteria haalt.

Het tweede hoofdstuk handelt over de tweede groepsaankoop in Antwerpen. Uit deze tweede groepsaankoop werden de installaties geselecteerd ter controle van de resultaten van het onderzoek.

Hoofdstuk drie tot en met zes handelen telkens over een factor van de opbrengstberekening. Niet elke factor is even gedetailleerd uitgewerkt. Het derde hoofdstuk legt uit op welke manier de factor 'HESPUL' een waarde krijgt toegewezen.

De kern van de studie is het vierde hoofdstuk over schaduw. Hierover is het meeste onderzoek verricht. Dit hoofdstuk start met een technische analyse van hoe een PV-installatie reageert op schaduw en de technologische oplossingen om de invloed van schaduw te beperken. In het onderdeel simulatiesoftware wordt er in kaart gebracht welke tools er nu al voorhanden zijn om de schaduwverliezen van een specifieke installatie te bepalen. Nadien wordt de factor 'schaduwverlies door omgevingselementen' gedetailleerd bekeken en de opbouw van het instrument dat daarbij moet helpen. Het volgende onderdeel rapporteert over het onderzoek naar de factor 'schaduwverlies door installatie'.

Hoofdstuk vijf omschrijft de studie van de factor 'basis genormaliseerde opbrengst'. Na een definitie van de factor volgt de studie om de factor van een waarde te voorzien.

Het zesde hoofdstuk bespreekt het 'aftopverlies', een factor die een grote invloed kan hebben op het resultaat. Ook hiervoor werd onderzocht hoe de factor een waarde krijgt toegekend.

Tot slot komt in hoofdstuk zeven alle onderzochte materie samen in een ontwikkelde rekentool. Dit laatste hoofdstuk bespreekt het tot stand komen en de werking van de tool.

Deze masterthesis heeft niet enkel een formule nauwkeuriger gemaakt, maar er is een heel kader en methodiek ontwikkeld voor het berekenen van de opbrengst van een PV-installatie.

Alle instrumenten die nodig zijn om de oude methodiek te vervangen, werden ontwikkeld met respect voor de huidige werkwijze. Hierdoor zijn de opbrengsten voor Izen uit dit onderzoek zeer concreet en onmiddellijk bruikbaar. Er rest het bedrijf enkel de beslissing om de ontwikkelde instrumenten geheel of gedeeltelijk in te zetten.

# 1 PROBLEMANALYSE EN DOEL

Er werd veel belang gehecht aan de captatie van de vraag, gesteld door de opdrachtgever. De behoefte van Izen werd grondig geanalyseerd met de uiteindelijke bedoeling om een probleem op te lossen.

Niet enkel de vraag was het uitgangspunt, het was bovendien essentieel om praktische ondervinding op te doen met het probleem om het uiteindelijke doel goed voor ogen te hebben. Om het probleem inzichtelijk te maken, is er heel transparant samengewerkt met alle partijen die betrokken zijn bij het resultaat van de studie. Finaal heeft het weinig of geen zin om instrumenten te maken die niet of nauwelijks bruikbaar zijn.

Gedurende de samenwerking kwamen meer onregelmatigheden en onnauwkeurigheden aan de oppervlakte. Ze hadden allemaal te maken met de berekening van de opbrengstgarantie. Deze problemen werden onder de loep genomen.

Dit hoofdstuk schetst eerst de oorspronkelijke situatie waarin de opbrengstberekeningen worden gemaakt. Hierbij is het belangrijk om de verschillende stappen in de werkwijze goed te analyseren. Grote wijzigingen in de aanpak zorgen vaak voor vele risico's en zullen de medewerkers van Izen er misschien van weerhouden om het resultaat toe te passen. De beschrijving van de situatie filtert de problemen en mogelijkheden eruit. Mogelijkheden bestaan vooral uit instrumenten die de werfvoorbereiders nu al inzetten. Daarna wordt gekeken waar en hoe de masterthesis makkelijk verbeteringen kan aanbrengen. De verbeteringen mogen geen extra kosten genereren, noch het werkproces vertragen. Met deze bepalingen voor ogen, komt meteen het doel van de masterthesis naar boven.

## 1.1 Situatie bij aanvang

Gedurende de stage werden twee dagen uitgetrokken om mee op pad te gaan met de werfvoorbereiders. Het zijn werknemers van Izen die als eersten contact maken met de klant. Ter plaatse zullen zij met behulp van hun tablet, een rapport opleveren op basis van de klantspecifieke situatie.

Bij dit proces hoort een dimensionering van de toekomstige PV-installatie. De werfvoorbereider berekent aan de hand van het jaarlijkse elektriciteitsverbruik van de klant het aantal zonnepanelen waaruit de installatie moet bestaan. Hiervoor gebruikt de werfvoorbereider een omzettingsfactor van het geïnstalleerd vermogen naar de opbrengst op jaarbasis die gelijk is aan 0,89 kWh/jaar/Wp. De gebruikte formule houdt rekening met de verliezen door schaduw en HESPUL. Dit zijn de verliezen die ontstaan doordat de zonnepanelen niet volgens de ideale oriëntatie of hellingshoek kunnen geïnstalleerd worden. De formule die de werfvoorbereider gebruikt heet dimensioneringsformule en wordt hieronder weergegeven.

$$N = \frac{E_{kl}}{O * P_{paneel} * H * (1 - S_{omg})}$$

$N$	= het aantal te installeren zonnepanelen
$E_{kl}$	= het jaarlijkse elektriciteitsverbruik van de klant [kWh/jaar]
$O$	= de omzettingsfactor van vermogen naar opbrengst per jaar [kWh/jaar/Wp]
$P_{paneel}$	= het maximumvermogen op STC van een zonnepaneel [Wp]
$H$	= HESPUL
$S_{omg}$	= het schaduwverlies door omgevingselementen

Om de installatie te berekenen gebruikt de werfvoorbereider een eenvoudig rekentoestel. De waarde voor HESPUL zoekt hij op in een tabel.

Voor het berekenen van het schaduwverlies door omgevingselementen heeft Izen geen instrument voorhanden. De werfvoorbereider moet hier op gevoel en goed geluk een inschatting maken.

Izen levert bij elke installatie een opbrengstgarantie af die niet ter plaatse, maar op kantoor wordt berekend. Deze formule is complexer dan de dimensioneringsformule. De werfvoorbereider gebruikt hiervoor een voorgeprogrammeerd rekenblad, ontwikkeld door de ingenieurs van Izen, in Excel. De garantieformule gebruikt een andere waarde als omzettingfactor in vergelijking met de dimensioneringsformule. De omzettingfactor bedraagt hier 0,9 kWh/jaar/Wp.

$$E_{gar} = O * P_{inst} * H * (1 - S_{omg}) * (1 - S_{inst}) * (1 - A)$$

$E_{gar}$  = de gegarandeerde opbrengst [kWh/jaar]

$P_{inst}$  = het geïnstalleerde vermogen van de PV-installatie [Wp]

$S_{inst}$  = het schaduwverlies door installatie

$A$  = het aftopverlies

Zowel HESPUL als de schaduwverliezen worden overgenomen van het verslag van de werfvoorbereider. Het schaduwverlies door installatie is gelijk aan 4,2% wanneer de zonnepanelen op een plat dak komen. Liggen de zonnepanelen op een schuin dak dan is er geen onderlinge beschaduwing en bedraagt het verlies 0%.

De aftopverliezen zijn afhankelijk van de verhouding tussen het geïnstalleerde vermogen en het nominaal vermogen van de omvormer. Er zit een correctie op die rekening houdt met HESPUL.

Het geïnstalleerde vermogen is de vermenigvuldiging van het aantal zonnepanelen en het maximumvermogen bij STC per zonnepaneel.

$$P_{inst} = N * P_{paneel}$$

## 1.2 Probleemanalyse

Momenteel is er geen instrument beschikbaar dat het schaduwverlies van de PV-installatie kan berekenen. De initiële vraag van Izen bestond erin om dergelijk instrument te ontwikkelen zodat de werfvoorbereiders dit kunnen meenemen op klantenbezoek. Het instrument moet de klant ervan overtuigen dat Izen gefundeerde kennis bezit over het fenomeen schaduw en de invloed ervan op de nieuwe installatie correct kan inschatten. Het onderstreept de professionele aanpak van het bedrijf als het over de opbrengst van de installatie gaat. Met deze kennis onderscheidt Izen zich van de concurrentie.

Verder zijn er nog een paar eigenaardigheden geconstateerd. Opvallend is dat Izen twee verschillende formules gebruikt voor één en dezelfde berekening. De uitkomst van beide formules is niet dezelfde. De garantieformule bestaat uit meer factoren dan de dimensioneringsformule. In principe kan de werfvoorbereider hiermee nauwkeurigere berekeningen maken. Vermits het om een complex en zwaar Excelbestand gaat, kan de werfvoorbereider dit programma niet op zijn tablet draaien waardoor hij de berekening tweemaal dient uit te voeren. Dit proces is bijgevolg niet efficiënt.

Verder zijn er nog een aantal factoren die in het oog springen. De omzettingfactor is niet gelijk voor beide formules. De schaduwverliezen bij een installatie op een plat dak zijn niet afhankelijk van de grootte of configuratie van de installatie. Intuïtief zou dit het geval moeten zijn. Meer rijen zonnepanelen betekent meer onderlinge beschaduwing. Het logisch gevolg is dat er meer schaduwverlies zal zijn.

### 1.3 Doel

Het doel van deze masterthesis is de werfvoorbereiders een instrument te bezorgen dat hun toelaat om op een eenvoudige en snelle manier, ter plaatse een dimensionering te kunnen maken voor de PV-installatie. Het instrument moet de werfvoorbereiders in staat stellen om meteen een opbrengstgarantie af te leveren.

Het zou niet haalbaar zijn voor de werfvoorbereider om alles te berekenen met een eenvoudig rekentoestel. De tablet biedt de mogelijkheid om een geschikt rekenblad te ontwikkelen. Echter, het rekenblad zal zo opgebouwd moeten worden dat de werkwijze van de werfvoorbereider min of meer onveranderd blijft. De masterthesis zou niet geslaagd zijn indien de werfvoorbereiders de rekentool niet wensen of kunnen gebruiken.

Het is vanzelfsprekend dat de berekening zo nauwkeurig mogelijk moet zijn. De basis is de huidige garantieformule. Omdat de gebruikte omzettingfactor voor deze formule niet éénvoudig is, is onderzoek noodzakelijk. Om nauwkeurigere opbrengstberekeningen te maken, moet de studie een duidelijk inzicht bieden op de schaduwverliezen. Om een schaduwverlies door omgevingselementen te bekomen, moet een apart instrument ontwikkeld worden wat eveneens gebruiksvriendelijk dient te zijn.

Uiteindelijk resulteert een nauwkeurigere berekening van de opbrengst in een wetenschappelijk onderbouwde opbrengstgarantie voor de klant. Een nauwkeurigere berekening kan resulteren in een scherpere offerte waardoor Izen meer klanten over de streep kan trekken, zonder hierbij zelf een groter risico te lopen.

Een te conservatieve, behoudsgezinde en veilige opbrengstberekening, die ver beneden de werkelijke opbrengst ligt, zal klanten doen aarzelen bij hun overweging om over te gaan tot de aankoop van een PV-systeem.

## 2 GROEPSAANKOOP II ANTWERPEN

Uiteindelijk zal het resultaat van dit onderzoek vergeleken moeten worden met de werkelijkheid. Om deze kwantitatieve studie goed te doen, is het noodzakelijk om steekproeven uit te voeren die representatief zijn voor de totale populatie. Izen is vooral actief in het Nederlandstalige gedeelte van België. De populatie van particuliere PV-installaties beperkt zich tot Vlaanderen.

De steekproef zal gebeuren op een groot deel van de installaties van de tweede groepsaankoop in Antwerpen, die op het einde van 2016, reeds één jaar operationeel waren. Deze installaties zijn de eerste met een monitoring en waarvoor een opbrengstgarantie gemaakt werd. De steekproef bestaat uit 201 residentiële installaties.

De informatie die verzameld is in deze databank is zeer uniek aangezien het de eerste groepsaankoop betreft waarbij er standaard een monitoring geïnstalleerd is. Er zijn maar weinige verdelers van PV-installaties die al deze informatie zo goed bijhouden als Izen. Zonder deze informatie zou het onderzoek onmogelijk zijn.

### 2.1 Aanmerkingen

Er kunnen meteen twee kanttekeningen bij deze steekproef worden gemaakt, die ervoor zorgen dat de steekproef niet aselekt gekozen is.

1. De installaties zijn geografisch ongelijkmatig verdeeld. Ze liggen namelijk allemaal in de provincie Antwerpen. De condities in deze provincie zijn niet gelijk aan die van de rest van Vlaanderen. Een betere geografische spreiding over Vlaanderen zou wellicht een nauwkeuriger beeld geven.
2. Een tweede beperking is dat de prestatie van zonnepanelen afhankelijk is van het weer en jaarlijks kan verschillen. Er moet onderzocht worden of het jaar van de meting bijvoorbeeld niet een uitzonderlijk goed of slecht jaar was.

De steekproef bestaat uit 201 installaties. Hiervan hebben ongeveer de helft een monitoring die een heel jaar degelijk gewerkt heeft. De omvormers met bijhorende monitoring die verkocht werden tijdens de groepsaankoop zijn van het merk SAJ. Izen kan de monitoring op een online platform aflezen dat door SAJ ter beschikking wordt gesteld en onderhouden. Voor quasi de helft van de installaties werkte het monitoringsysteem niet goed. Izen en SAJ moeten dit verder uitklaren.

Vermits een PV-installatie slechts kan opgestart worden na een officiële keuring, zal het werkelijke tijdstip van ingebruikstelling iets later liggen dan de officieel gekende keuringsdatum. Dit verschil van een paar dagen geeft mogelijk een kleine fout in de interpretatie van de exacte energieopbrengst. Vermits de installaties, onderzocht in de steekproef, werden opgestart in de wintermaanden, zal deze fout beperkt zijn aangezien de panelen niet veel energie opwekken tijdens deze maanden.

Voor elke installatie is er een opbrengstberekening gemaakt met de garantieformule. Op het moment van de eerste berekeningen van de opbrengstgarantie was er nog geen instrument voorhanden om het schaduwverlies te bepalen. Daarom werd de garantieopbrengst vastgelegd zonder rekening te houden met het mogelijke schaduwverlies. Dit geldt voor enkele installaties. Na enige tijd ging Izen wel rekening houden met het schaduwverlies.

## 2.2 Opbouw databank

Elke installatie vormde een record van de databank. De velden van de databank werden opgesplitst in vijf categorieën.

De eerste categorie bestaat uit velden die installatie-specifieke eigenschappen bevatten. Deze velden vormen de primaire sleutel van de databank. Zo bestaat deze categorie uit een veld met het ID-nummer van de installatie in de databank, de naam van de eigenaar en het plaatsingsadres. Deze laatste twee velden zijn nodig om de installatie terug te vinden in het klantenbestand van Izen en satellietfoto's van de installatie op te zoeken.

De tweede categorie, technische eigenschappen van de PV-installatie, bestaat uit de velden: oriëntatie, helling, geïnstalleerd vermogen aan zonnepanelen en nominaal omvormer vermogen. Deze technische gegevens over de installaties zijn terug te vinden in het klantenbestand van Izen.

De derde categorie komt later gedetailleerd aan bod en bestaat uit velden voor verschillende soorten schaduwelementen. Is het desbetreffende schaduwelement aanwezig, dan wordt dit aangeduid in het overeenkomstige veld. Om dit vast te stellen, moesten foto's van de installatie, gemaakt door de werfvoorbereider tijdens het huisbezoek, bekeken worden.

De vierde categorie gaat over de opbrengst. Hierin staan de velden van de gegarandeerde opbrengsten, berekend aan de hand van de garantieformule. Er is een veld dat weergeeft of de opbrengstberekening rekening heeft gehouden met de schaduwsituatie van de klant. Het veld van de gerealiseerde opbrengst komt overeen met de metingen van de monitoring. Met een kleurcode is aangeduid of de monitoring een heel jaar gewerkt heeft of niet.

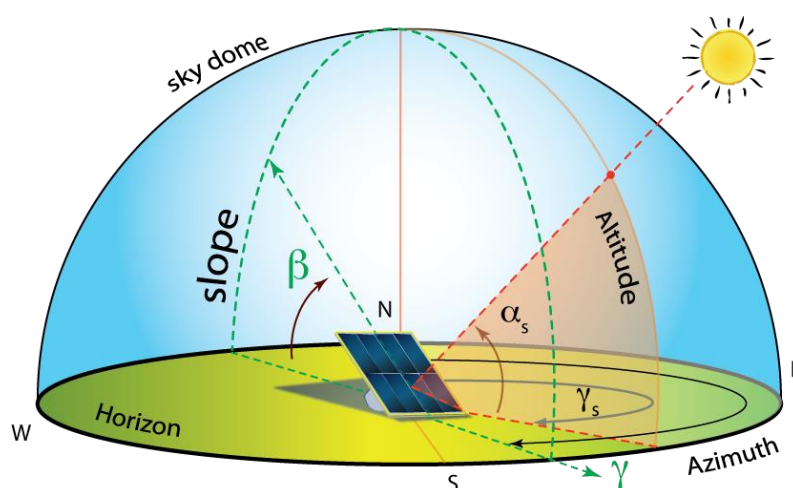
De vijfde en laatste categorie van velden is voorzien voor schaduw. Voor een specifieke installatie staan zowel de schatting van de werfvoorbereider zonder instrument als het vastgelegde schaduwverlies met de nieuw ontwikkelde schaduwhandboek in deze velden. Om een schaduwverlies door omgevingselementen met de ontwikkelde methode te bepalen, worden de foto's van de werfvoorbereider aangewend. Er wordt gebruik gemaakt van satellietfoto's en foto's die openbaar in de databank van Google ter beschikking zijn.

### 3 HESPUL

HESPUL is een non-profit vereniging die zich focust op alle activiteiten binnen het veld van rationeel energieverbruik en hernieuwbare energiebesparing door technische, educatieve en sociale activiteiten. HESPUL heeft onderzoek gedaan naar het effect van de oriëntatie en de helling van zonnepanelen op de opbrengst ervan. (HESPUL, s.a.).

Dankzij de tabel is het mogelijk om met gekende oriëntatie en dakhelling een verliesfactor te berekenen ten opzichte van de ideale positie. Om de perfecte oriëntatie en de tabel van HESPUL te gebruiken, is het noodzakelijk om eerst de positie van de zon doorheen het jaar te verklaren.

Er zijn twee begrippen die de positie van de zon omschrijven, de oriëntatie en de helling. De oriëntatiehoek of azimuth drukt de positie van de zon uit in kompasgraden. In de tabel van HESPUL wordt het zuiden aangeduid met  $0^\circ$  azimuth. Het westen is gelijk aan  $90^\circ$  en het oosten is  $-90^\circ$ . De hellingshoek drukt de hoek tussen de horizon en de zon in graden uit. Figuur 3.1 geeft de oriëntatiehoek of azimuth in het Engels als Azimuth en de helling als Altitude.



Figuur 3.1: zonnestand (The Pennsylvania State University, s.a.)

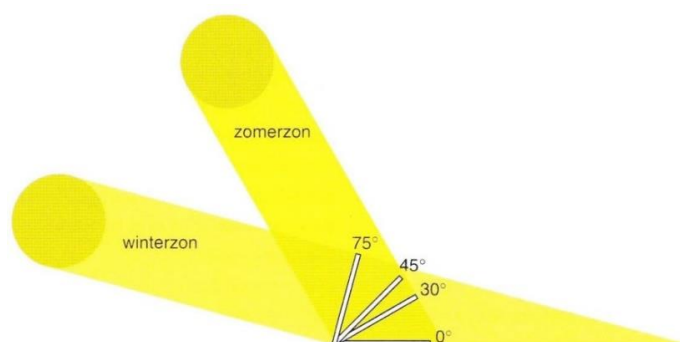
De zon bereikt steeds zijn hoogste punt in het zuiden. Wanneer het zonnepaneel richting zuid georiënteerd is, zal er in de voormiddag en in de namiddag steeds instraling zijn op het zonnepaneel. Wanneer de positie van het paneel afwijkt van de zuidelijke oriëntatie, zal de straling achter of in het verlengde van het paneel niet meer op het paneel invallen. In die gevallen is er volgens HESPUL een correctiefactor noodzakelijk.

De zon komt tijdens de winter en de zomer niet altijd op dezelfde plaats aan de horizon op. Rond 21 juni staat de zon het hoogste en reikt zij ongeveer  $63^\circ$  boven de horizon in het zuiden. Rond 21 december staat de zon het laagste boven de horizon en reikt zij ongeveer  $16^\circ$  boven de horizon. Gemiddeld genomen staat de zon in Vlaanderen  $40^\circ$  boven de horizon, dezelfde waarde die terug te vinden is in de tussenmaanden maart en september.

(Deboosere, s.a.; Brackenridge, s.a.).

Idealiter vallen de zonnestrallen loodrecht in op het zonnepaneel. In deze opstelling werkt het paneel optimaal. Als de zon gemiddeld  $40^\circ$  boven de horizon staat, is de ideale hellingshoek van het paneel  $50^\circ$ . De hoek tussen de zonnestrallen en het paneel bedraagt dan  $90^\circ$ .

De straling afkomstig van de zon zet het zonnepaneel om in elektrische energie. Hoe meer straling op het paneel invalt, hoe meer energie het paneel opwekt. Eén vierkante meter zonnestraling, wordt in de winter verdeeld over een oppervlakte die vier keer groter is dan in de zomer. Figuur 3.2 illustreert dit.



Figuur 3.2: stand van de zon tijdens zomer- en wintermaanden (Deurloo BV, s.a.)

Tijdens de zomermaanden is er veel meer opbrengst dan in de wintermaanden omdat de zon geconcentreerder instraalt op de panelen. De helling van de zon tijdens de zomermaanden heeft meer invloed op de opbrengst dan de helling tijdens de wintermaanden. Tijdens de zomermaanden duren de dagen langer dan in de winter, waardoor de zomermaanden veel zwaarder doorwegen dan de wintermaanden.

Het is met andere woorden interessanter om de zonnepanelen op een helling te leggen die kleiner is dan  $50^\circ$ , omdat deze in de zomermaanden beter renderen. HESPUL heeft dit proefondervindelijk vastgelegd en gesteld dat de zonnepalen het best worden gelegd onder een hoek van  $35^\circ$  in België. Deze helling van de zonnepanelen komt overeen met een zonnestand van  $55^\circ$  voor een loodrechte projectie van de zonnestrallen.

Figuur 3.3 toont een sectie uit de tabel van HESPUL voor hellingshoeken van  $0^\circ$  tot  $90^\circ$  en een oriëntatie van  $15^\circ$  richting het westen tot  $15^\circ$  richting het oosten.

		Kompas : afwijking van het ideale zuiden						
		-15	-10	-5	0	5	10	15
Dakhelling (graden)	0	86,4	86,4	86,4	86,4	86,4	86,4	86,4
	5	89,6	89,7	89,7	89,7	89,7	89,7	89,6
	10	92,8	92,9	93,0	93,0	92,9	92,8	92,8
	15	95,0	95,1	95,2	95,3	95,1	95,0	94,8
	20	97,2	97,3	97,4	97,5	97,3	97,2	96,9
	25	98,3	98,4	98,6	98,6	98,5	98,3	98,0
	30	99,3	99,6	99,8	99,8	99,6	99,3	99,0
	35	99,4	99,8	100,0	100,0	99,9	99,7	99,0
	40	99,5	99,8	99,8	99,8	99,8	99,4	98,9
	45	98,5	98,6	98,7	98,8	98,5	98,2	97,8
	50	97,4	97,5	97,7	97,8	97,4	97,1	96,8
	55	95,3	95,4	95,6	95,7	95,3	95,0	94,7
	60	93,2	93,3	93,5	93,7	93,3	93,0	92,6
	65	90,1	90,3	90,4	90,6	90,3	89,9	89,5
	70	87,1	87,3	87,4	87,5	87,2	86,8	86,4
	75	83,1	83,2	83,3	83,4	83,1	82,8	82,4
	80	79,1	79,2	79,3	79,3	79,0	78,8	78,4
85	74,4	74,4	74,5	74,5	74,3	74,0	73,7	
90	69,7	69,7	69,8	69,8	69,5	69,3	69,0	

Figuur 3.3: deel uit de tabel van HESPUL



## 4 SCHADUWVERLIES

Dit hoofdstuk bespreekt het grootste deel van de onderzochte materie, namelijk schaduw en het effect ervan op de PV-installatie. Achtereenvolgens komen de simulatiesoftware met focus op PVsyst en de technologie van de PV-installatie aan bod. Om het schaduwverlies volledig in kaart te brengen, is het noodzakelijk om eerst het effect van schaduw op celniveau van een zonnepaneel te bespreken. Er wordt aangetoond wat het effect van schaduw teweegbrengt, evoluerend vanaf het celniveau tot op het niveau van zonnepanelen in strings.

Nadien komt de ontwikkeling van de nieuwe methode aan bod. Deze bepaald de waarde van de factor 'schaduwverlies door omgevingselementen'. Om deze factor een waarde toe te kennen is een schaduwhandboek noodzakelijk. Dit instrument hanteren de werfvoorbereiders tijdens een klantenbezoek.

Vervolgens wordt de factor 'schaduwverlies door installatie' bekeken. Hier wordt duidelijk hoe een waarde aan deze factor in de berekeningsformule wordt toegekend.

Ten slotte behandelt hoofdstuk 4 de controle van het uitgevoerde onderzoek. De gehanteerde tests en de mogelijke foutenmarges op de resultaten worden uitgelegd.

### 4.1 Simulatiesoftware

Dit onderdeel behandelt eerst een marktonderzoek naar simulatiesoftware die de invloed van schaduw op de opbrengst van de PV-installatie onderzoekt. Daarna komt het softwarepakket dat gebruikt is voor dit onderzoek, namelijk PVsyst, meer in detail aan bod.

#### 4.1.1 Marktonderzoek

##### 4.1.1.1 Google Project Sunroof



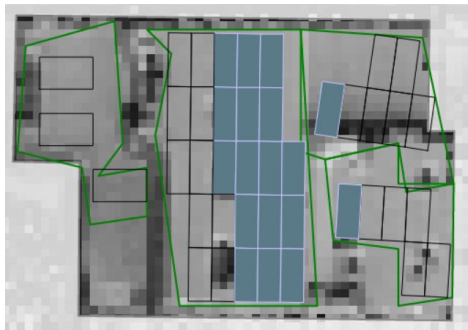
*Figuur 4.1: Google Project Sunroof (Google, s.a.)*

Google gebruikt zijn geografische kaarten en 3D-modulering in combinatie met weergegevens van het National Renewable Energy Laboratory om schaduwberekeningen te maken. Bovenstaande figuur geeft, met behulp van een kleurencode op het dak, aan welke delen van het dak meer of minder geschikt zijn voor een PV-installatie. Het programma houdt geen rekening met dakvensters of de stabiliteit van het dak. Bij het ingeven van een adres berekent de tool het aantal bruikbare uren zonlicht op jaarbasis en de beschikbare dakoppervlakte voor PV. Op basis van de maandelijkse elektriciteitsfactuur en de hoeveelheid zoninstraling op het dak, berekent de software het benodigde geïnstalleerde vermogen. Vervolgens berekent het de financiering.

(Google, s.a.)

De software voorziet geen berekening van de mogelijke opbrengst. Google Project Sunroof is enkel geschikt om na te gaan welke delen van het dak geschikt zijn voor het plaatsen van zonnepanelen. De software, ontwikkeld door Google, is nog niet beschikbaar voor België.

#### 4.1.1.2 Zonnekaart Vlaanderen



*Figuur 4.2: Zonnekaart Vlaanderen (Vlaanderen is energie, 2017)*

De Zonnekaart Vlaanderen is ontwikkeld door de Vlaamse overheid. Met hoogtemetingen over het Vlaamse landschap bepaalt de software de oppervlakte, de helling en de oriëntatie van alle daken in Vlaanderen. Deze gegevens combineert het programma met weerkaarten van het KMI. Zo bekijkt de Zonnekaart Vlaanderen voor elk dakdeel of het geschikt is voor plaatsing van zonnepanelen.

De tool houdt hierbij geen rekening met dakramen of de stabiliteit van de daken. Op het geselecteerde dak kan de gebruiker een ontwerp maken van de PV-installatie zoals de bovenstaande figuur weergeeft. Er is keuze uit drie verschillende PV-panelen, elk met een verschillende vermogensopbrengst. Aan de hand van de gewenste elektriciteitsproductie kan de gebruiker het aantal panelen kiezen. Door middel van de aankoopprijs van de installatie en de jaarlijkse opbrengst berekent deze tool de terugverdientijd.

(Vlaanderen is energie, 2017)

Echter, de hoogtemetingen en schaduwberekeningen zijn onnauwkeurig. Een aantal factoren, zoals albedo, zijn niet in rekening gebracht. Het concept zit in de goede richting maar zou met meer instelparameters, zoals omvormervermogen, moeten werken.

#### 4.1.1.3 PV\*SOL



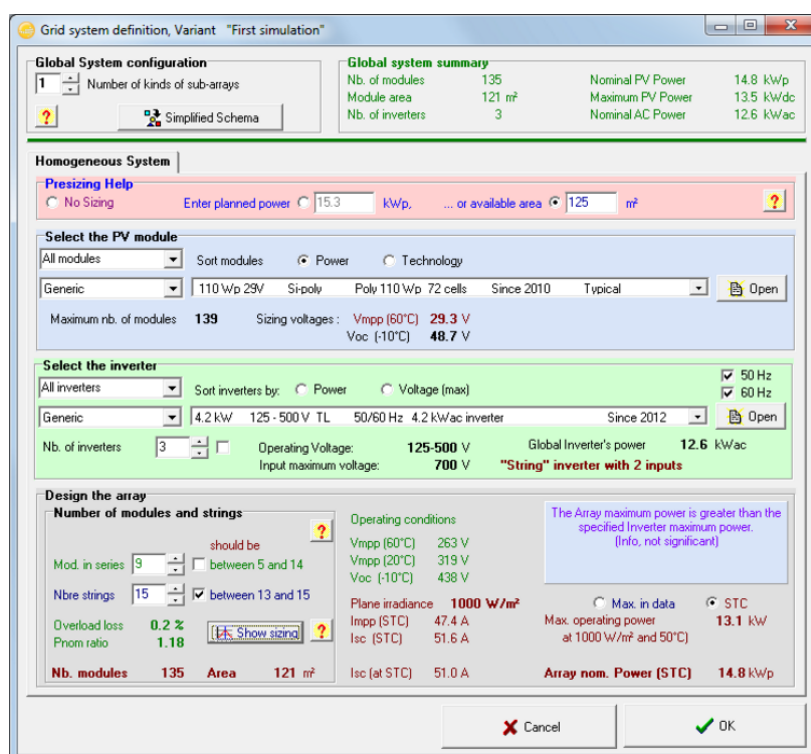
*Figuur 4.3: PV\*SOL (Valentine Software, s.a.)*

Met een 3D-tekening (Figuur 4.3) kan de gebruiker de omgeving ontwerpen. Op basis van de weergegevens van een te kiezen weerstation in België berekent PV\*SOL de schaduw. De gebruiker kan de PV-installatie en de omgeving dimensioneren in 3D. Het is mogelijk om voor een specifiek type van PV-module een omvormer te kiezen.

De installatie kan ingedeeld worden in strings. Aan de hand van al deze instellingen en de schaduwberekening berekent het softwarepakket de jaarlijkse energieopbrengst. (Valentine Software, s.a.)

De grafische weergave is heel duidelijk. De softwareontwikkelaars steken veel tijd en energie in het gebruiksvriendelijk maken van het ontwerpproces, maar het blijft voorlopig tijdrovend. Om heel specifieke berekeningen te maken, is het programma niet gedetailleerd genoeg en beperkt in het aantal in te geven parameters.

#### 4.1.2 PVsyst



Figuur 4.4: PVsyst (PVsyst, s.a.)

Het simulatiepakket PVsyst vormt de rode draad in het onderzoek. Het is mogelijk voor de gebruiker om in het programma zeer nauwkeurig verliezen in te stellen. Met de weergegevens van een gemiddeld jaar opgemeten door het weerstation in Ukkel en een 3D-model berekent dit softwarepakket de schaduwverliezen specifiek voor de ingestelde PV-installatie. Op welke manier de panelen zijn ingedeeld in strings, het type omvormer, het type paneel, ... wordt geconfigureerd tijdens het systeemontwerp. De bovenstaande figuur van de interface toont de hoeveelheid informatie die PVsyst weergeeft aan de hand van de gekozen instellingen. Met de optie 'Tools' kan de gebruiker zeer veel informatie opvragen over de panelen, het weer, enz.

PVsyst maakt heel gedetailleerde berekeningen met als gevolg dat het proces tijdrovend is. Anderzijds is er een enorme bron van informatie beschikbaar door o.a. de optie van de Tools. Dit maakt deze simulatiesoftware het meest geschikt voor het onderzoek.

## 4.2 Technologie

Dit onderdeel bespreekt hoe een PV-installatie reageert op schaduw aan de hand van I/V-curves en P/V-curves. Tijdens de stage is er tijd vrijgemaakt om deze curves te meten. Dit experimenteel onderzoek gaf een duidelijk inzicht en verklaring waarom zonnepanelen minder opbrengen als ze aan schaduw onderworpen worden.

Technologische ontwikkelingen onderdrukken de effecten van schaduw. Hoe de technologieën in de PV-installatie geïntegreerd zijn en op welke manier een PV-installatie is opgebouwd, staat in het eerste deel. Enkel het essentiële om de toelichting over de I/V-curve te verduidelijken, komt aan bod.

### 4.2.1 Opbouw PV-installatie

Ongeveer driekwart van het totaal aantal zonnepanelen wereldwijd bestaat uit zonnecellen van kristallijn silicium. Vermits Izen hoofdzakelijk dit type zonnepanelen verdeelt, zal de tekst zich enkel hiertoe beperken.

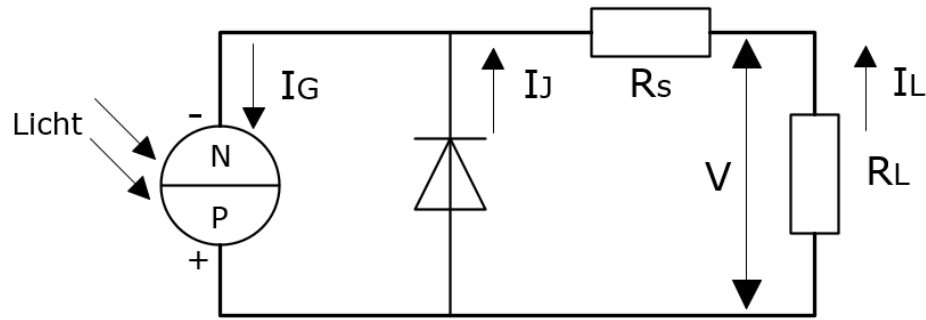
Dit type zonnepaneel bestaat uit meerdere zonnecellen in serie. De zonnecellen bestaan uit gedopeerd silicium. Er ontstaat een P/N-overgang. Wanneer er licht op de zonnecel invalt, genereert deze typisch een spanning van 0,6 V. De fabrikanten plaatsen in een paneel meestal zestig cellen in serie om een voldoende hoge spanning te krijgen, in dit geval 36 V. Als nu één cel van het zonnepaneel onder invloed is van schaduw, is de hele kring onderbroken. Om dit te voorkomen, plaatst de fabrikant over ongeveer twintig cellen een bypassdiode. Deze groep van cellen is een array. Wanneer een cel door schaduw wordt beïnvloed, zal de betreffende bypassdiode de stroom van de array omleiden.

De installateurs plaatsen zonnepanelen in serie om de opgewekte spanning verder op te drijven. Deze serieschakeling van zonnepanelen wordt een string genoemd. De spanning die de zonnecellen produceren, is gelijkspanning. Een omvormer tussen de string en de residentiële elektrische installatie zet de gelijkspanning om naar een bruikbare wisselspanning. Elke omvormer beschikt over een maximum power point tracker. Deze MPPT zorgt ervoor dat de PV-installatie steeds optimaal werkt waardoor de installatie het meeste vermogen levert.

Er bestaan systemen waarbij elk zonnepaneel een MPPT heeft. Elk zonnepaneel kan dan autonoom werken volgens zijn optimale werkingpunt. In het kader van schaduw biedt dit systeem voordelen op het moment van lichte beschaduwing. Bij zware schaduwvorming treedt de bypassdiode in werking. De autonome werking heeft dan geen zin meer.  
(Ouwehand, 2016)

### 4.2.2 IV-curve

Het elektrisch gedrag van een zonnepaneel wordt afgeleid uit de IV-curve van het zonnepaneel. De IV-curve geeft de overeenkomstige hoeveelheid stroom weer, bij een bepaalde spanning die het zonnepaneel produceert. Dit hoofdstuk legt de opbouw van de IV-curve uit.



Figuur 4.5: elektrisch equivalent schema van een zonnecel (Ouwehand, 2016)

De bovenstaande figuur geeft het elektrisch equivalent schema van een zonnecel. Het licht dat invalt op de cel genereert een elektrische stroom. De cel kan voorgesteld worden als een ideale stroombron die een stroom  $I_G$  produceert.  $V$  is de spanning die de zonnecel hierbij opwekt. De stroom is gericht van het N-gedopeerd naar het P-gedopeerd materiaal van de zonnecel.

Er bevinden zich twee weerstanden in het elektrisch schema.  $R_s$  stelt de inwendige verliezen van de zonnecel voor. Deze zijn meestal te verwaarlozen. De weerstand  $R_L$  staat symbool voor de belastingweerstand. Door de belasting stroomt een belastingstroom  $I_L$ .

Omdat de zonnecel uit een P/N-junctie bestaat treedt er een diodefunctie op in de cel. Het equivalent schema stelt dit effect voor, door middel van een diode die in anti-parallel staat met de stroombron. De diode zorgt voor een junctiestroom  $I_J$ . De gekende formule voor halfgeleidermateriaal berekent de waarde van de junctiestroom.

$$I_J = I_s * \left( e^{\frac{q*V}{k_b*T}} - 1 \right)$$

- $I_J$  = de junctiestroom [A]
- $I_s$  = de sperstroom [A]
- $q$  = de lading van een elektron [ $1,6*10^{-19}$  C]
- $V$  = de junctiespanning [V]
- $k_b$  = de constante van Boltzman [ $1,38*10^{-23}$  J/K]
- $T$  = de celtemperatuur [K]

De sperstroom is zeer klein. Hierdoor kan de algemene formule vereenvoudigd worden tot de onderstaande vorm.

$$I_J = I_s * e^{\frac{q*V}{k_b*T}}$$

Door de eerste wet van Kirchhoff toe te passen in het equivalent schema wordt de onderstaande vergelijking bekomen.

$$I_L = I_g - I_s * e^{\frac{q*V}{k_b*T}}$$

- $I_L$  = de belastingsstroom [A]
- $I_g$  = de stroom gegenereerd door de PV-cel [A]

Deze vergelijking beschrijft de IV-curve van een zonnecel. Figuur 4.6 geeft het verloop van de IV-curve weer. Uit deze formule blijkt dat de grootte van de belastingstroom niet enkel afhankelijk is van de spanning. Hij is afhankelijk van de celtemperatuur, de sperspanning en de stroom gegenereerd door de PV-cel.

Deze formule bepaalt de kortsluitstroom  $I_{sc}$  en de openklemspanning  $V_{oc}$  van de zonnecel. Dit zijn karakteristieke waarden van een zonnecel.

De kortsluitstroom ontstaat wanneer de belastingweerstand  $R_L$  gelijk is aan nul ohm. De spanning  $V$  is dan gelijk aan nul volt. Als dit in de bovenstaande vergelijking wordt ingevuld, ontstaat het onderstaande resultaat.

$$I_{sc} = I_g$$

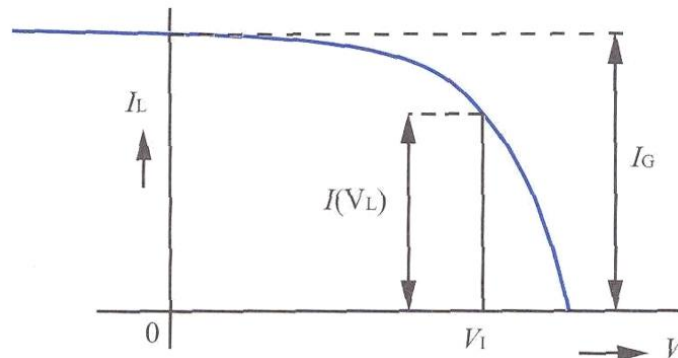
$I_{sc}$  = de kortsluitstroom [A]

Wanneer de spanning boven de nul volt stijgt, vergroot het aandeel  $I_J$  van  $I_G$  dat door de junctie terugstroomt.  $I_L$  neemt dan af. Figuur 4.6 illustreert dit. Wanneer de zonnecel onbelast is, is  $R_L$  oneindig. Alle stroom die de zonnecel opwekt, gaat door de junctie.  $I_L$  is gelijk aan nul ampère. Dit gegeven vormt de bovenstaande vergelijking om tot volgende formule:

$$V_{oc} = \frac{k_b * T}{q} * \ln \left( 1 + \frac{I_g}{I_s} \right)$$

$V_{oc}$  = de openklemspanning [V]

De onderstaande figuur geeft een algemeen verloop van een IV-curve. Het punt waar de curve de y-as snijdt, geeft de kortsluitstroom aan. Het gemeenschappelijk punt van de IV-curve en de x-as bepaalt de openklemspanning.



Figuur 4.6: algemene IV-curve van een zonnecel (Ouwehand, 2016)

Uit de onderstaande formule is af te leiden dat de PV-curve afhankelijk is van de IV-curve.

$$P = I * V$$

$P$  = het elektrisch vermogen [W]

$I$  = de elektrische stroom [A]

$V$  = de elektrische spanning [V]

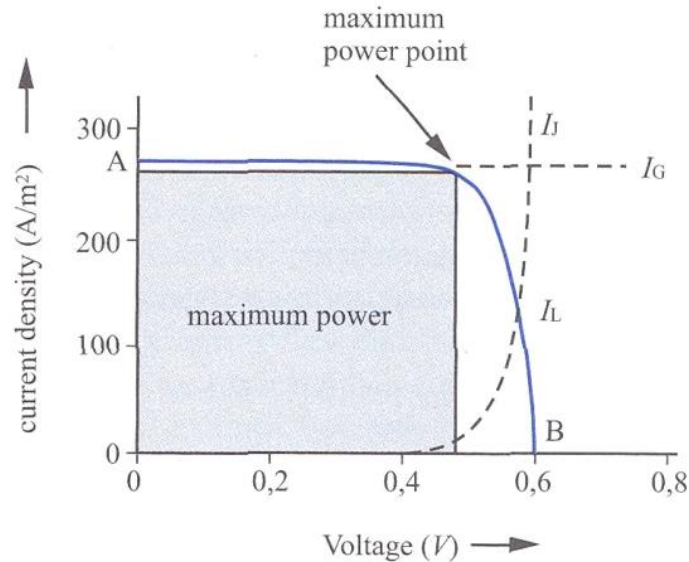
Figuur 4.7 geeft dezelfde IV-curve. De rechthoek die in de grafiek staat, is een maat voor het opgewekte vermogen door de cel. Het punt van de IV-curve waarvoor de rechthoek het grootst is, en de cel het meeste vermogen genereert, heet het maximum power point of MPP.

De vulfactor 'FF' van de zonnecel is op dit punt maximaal. De vulfactor is een maat voor hoe effectief de zonnecel wordt benut. De onderstaande formule berekent de vulfactor.

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc} * V_{oc}}$$

$FF$  = de vulfactor

$P_{max}$  = het maximaal op te wekken vermogen [W]



Figuur 4.7: IV-curve met een vermogenrechthoek (Ouwehand, 2016)

De vulfactor tracht samen met het rendement een kwaliteit aan een zonnecel te geven. De volgende formule berekent het rendement aan de hand van het maximaal vermogen en de zonnestraling.

$$\eta = \frac{P_{max}}{I_0}$$

$\eta$  = het rendement

$I_0$  = energie van opvallend licht [W]

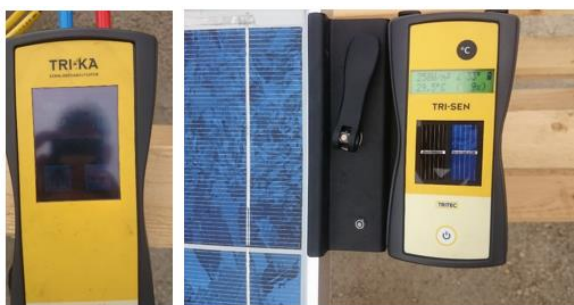
(Ouwehand, 2016)

### 4.2.3 Schaduweffect op elektrisch gedrag

Dit hoofdstuk bespreekt het elektrisch gedrag van PV-panelen die onder invloed van schaduw staan. Dit werd experimenteel onderzocht. De metingen vonden plaats op 19/09/2016 bij Izen Energy Systems NV (Hoeksken 56, 2275 Lille).

#### 4.2.3.1 Gebruikt materiaal

#### Meettoestel



*Figuur 4.8: TEITEC-TRI-KA*

De meettoestellen van het pakket TEITEC-TRI-KA van TRITEC zijn ontwikkeld om de IV-curve van zonnepanelen te meten. Dit pakket bestaat uit 2 toestellen.

Het eerste toestel, de KENNLINIEANALYSATOR (Figuur 4.8: links), meet zowel de spanning als de stroom van het PV-paneel. Dit toestel berekent en tekent de IV- en PV-curves. Om de curves op te meten, worden de klemmen van de module aangesloten op dit toestel.

Het meettoestel dat rechts staat op figuur 4.8 heet TRI-SEN en meet de oppervlaktetemperatuur en hellingsgraad van het paneel en de hoeveelheid instraling van de zon. De module wordt met een houder in het vlak van de module geplaatst.

De twee toestellen staan draadloos met elkaar in verbinding. De KENNLINIEANALYSATOR kan de meetwaarde van de TRI-SEN opvragen. Met deze meetwaarde kan de KENNLINIEANALYSATOR correcties uitvoeren op de gemeten IV-curve (Raw) om de IV-curve bij standaard testcondities (STC) te bekomen. De berekende curve komt overeen met de IV-curve van de datasheet (ideal STC) van het gemeten zonnepaneel. (TRITEC, 2010)

## **PV-module**



*Figuur 4.9: geteste PV-module*

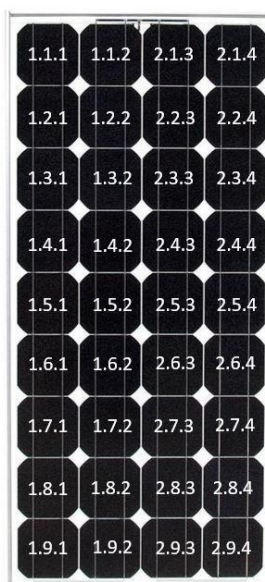
Figuur 4.9 geeft het zonnepaneel weer dat gebruikt is voor de test. Het paneel is van het merk Kyocera. De onderstaande tabel vermeldt de specificaties van deze module.



Tabel 4.1: specificaties geteste PV-module

<b>Model</b>	KC120-2	<b>Nom Short Circuit Current</b>	7,45 A
<b>Date</b>	2002.09	<b>Nom Max Output Voltage</b>	16,9 V
<b>Nom Max Output</b>	120 W	<b>Nom Max Output Current</b>	7,10 A
<b>Nom Open Circuit Voltage</b>	21,5 V	<b>Max System Voltage</b>	750 V

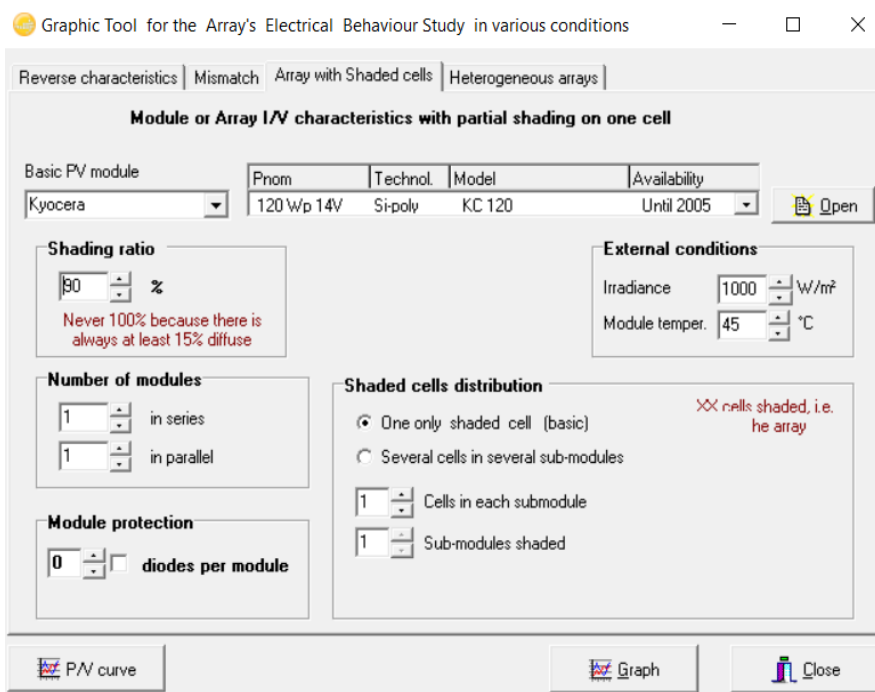
Met behulp van stukken karton zijn delen van het PV-paneel afgedekt, om schaduw na te bootsen. Elke cel van de module heeft een code gekregen om gemakkelijker aan te duiden welke cel of cellen van de module zijn afgedekt. De code bestaat uit drie cijfers, gescheiden van elkaar, door een punt. Het eerste cijfer geeft aan tot welke array de cel behoort. Het tweede cijfer geeft de verticale coördinaat weer. Het derde cijfer geeft de horizontale coördinaat. De onderstaande afbeelding maakt dit duidelijk.



Figuur 4.10: overzicht codering PV-cel (Gensolar, s.a.)

### Simulatiesoftware

Ter controle van de metingen werden situaties waarbij verduidelijking nodig is, gesimuleerd. PVsyst heeft een tool die de IV-curves van PV-modules en -cellen, uit zijn databank, onder diverse omstandigheden berekent. Onderstaande figuur toont de interface van de tool.



Figuur 4.11: interface PVsyst tool voor IV-curves (PVsyst, 2016)

#### 4.2.3.2 Metingen op één paneel

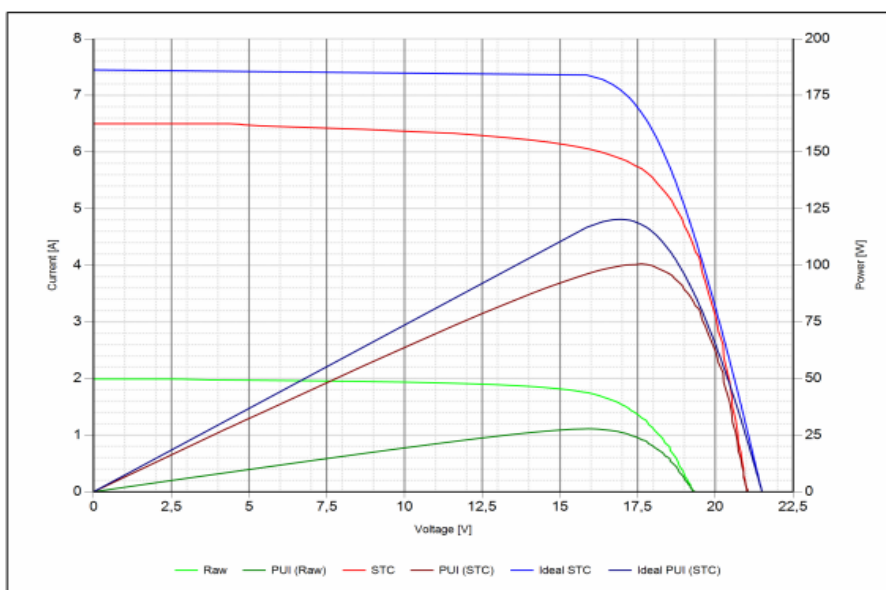
##### Meetsituatie



Figuur 4.12: meetsituatie geen schaduw, met bewolking

De TRI-SEN legt de situatie waarin de metingen plaatsvinden, vast. Het paneel is opgesteld onder een helling van  $35,1^\circ$  en exact naar het zuiden. De opstelling is zo geplaatst dat de PV-module niet onderhevig is aan schaduw. De metingen starten om 11:45u. De radiatie van de zon schommelt rond  $350 \text{ W/m}^2$ . Deze waarde is eerder aan de lage kant voor dit moment van het jaar. De bovenstaande figuur geeft duidelijk aan dat het wolkendek hiervan de oorzaak is. De oppervlaktetemperatuur van de panelen bedraagt  $29,5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### Meting 1: geen schaduw, met bewolking



Figuur 4.13: meting 1 (TRI-KA PC Software, 2013)

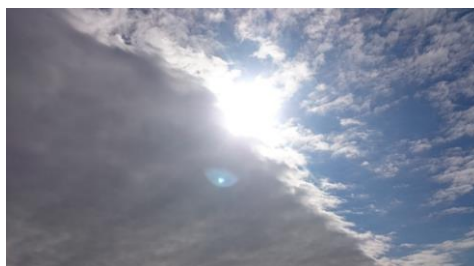
Op de bovenstaande figuur is duidelijk te zien dat de Raw-curve (groen) veel lager ligt dan de STC-curve (rood) en de Ideal-curve (blauw). Dit is logisch omdat de instraling maar  $306 \text{ W/m}^2$  bedraagt bij een temperatuur  $29,5^\circ\text{C}$ . Beide waarden hebben een nadelig effect op de IV-curve t.o.v. de STC van  $1000 \text{ W/m}^2$  en  $25^\circ\text{C}$ .

De reden dat de STC-curve niet gelijk is aan de Ideal-curve, is te wijten aan het verouderde paneel dat niet langer de performantie biedt, beschreven in de datasheet van de fabrikant. De panelen zijn namelijk in onbruik geraakt omdat hun prestaties zo snel verminderden.

De nominale openklemspanning en de nominale kortsluitstroom van de Ideal STC-curve komen overeen met de waarden opgegeven in tabel 4.1. De top van de Ideal PUI-grafiek geeft het nominale maximumvermogen. De afgelezen waarde komt overeen met die van tabel 4.1.

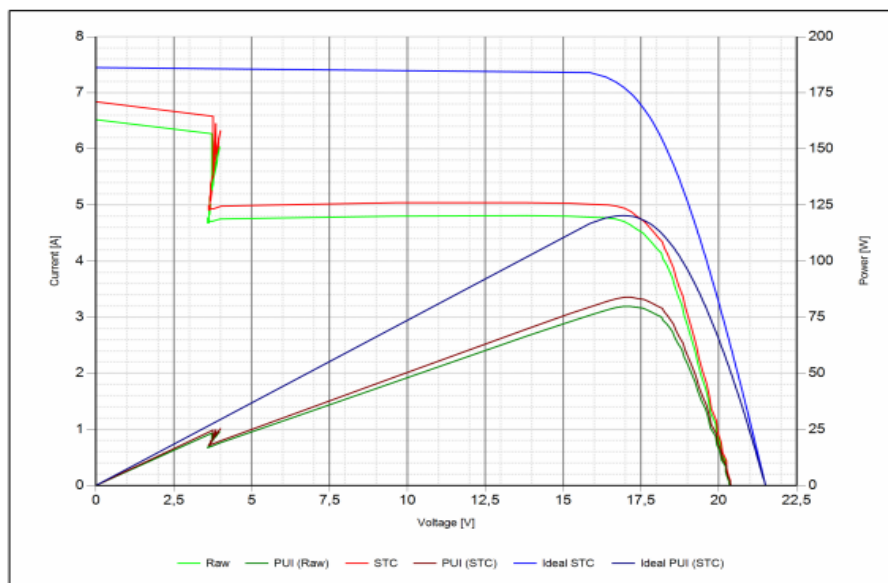
Dezelfde redenering gaat op voor de PV-curves. Aan de hand van de PV-curve kan de omvormer het MPP bepalen. De MPPT van de omvormer stelt de spanning van het hoogste punt van de PV-curve in. Het punt op de IV-curve met dezelfde spanning heet het MPP.

### Meting 2: geen schaduw, geen bewolking



Figuur 4.14: meetsituatie geen schaduw, geen bewolking

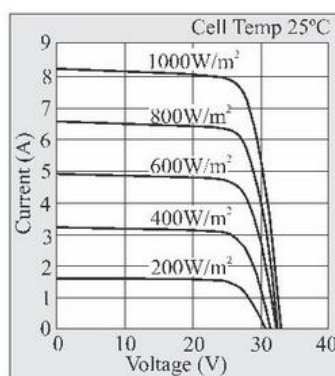
De zon komt achter de wolken vandaan. De nieuwe meetsituatie zal aanhouden voor verdere metingen. De radiatie verhoogt tot  $900 \text{ W/m}^2$  maar is onstabiel omdat wolken snel voorbijgaan. Het paneel is afgekoeld tot  $25^\circ\text{C}$ . Deze situatie benadert beter de standaard testcondities. Dit is te zien in de onderstaande grafiek. De gemeten curve in het groen is bijna gelijk aan de gecorrigeerde curve in het rood.



Figuur 4.15: meting 2 (TRI-KA PC Software, 2013)

De onregelmatigheid in de curve tussen 2,5 V en 5 V ontstaat door een plots afnemende radiatie. De voorbijgaande wolken zoals hierboven vermeld, veroorzaken de schommeling.

Uit de vergelijking tussen metingen 1 en 2 valt duidelijk op dat de stroom voor eenzelfde spanning afneemt bij een zwakkere instraling. De volgende figuur uit de literatuur bevestigt dit. (Roberto & Denizar 2012)

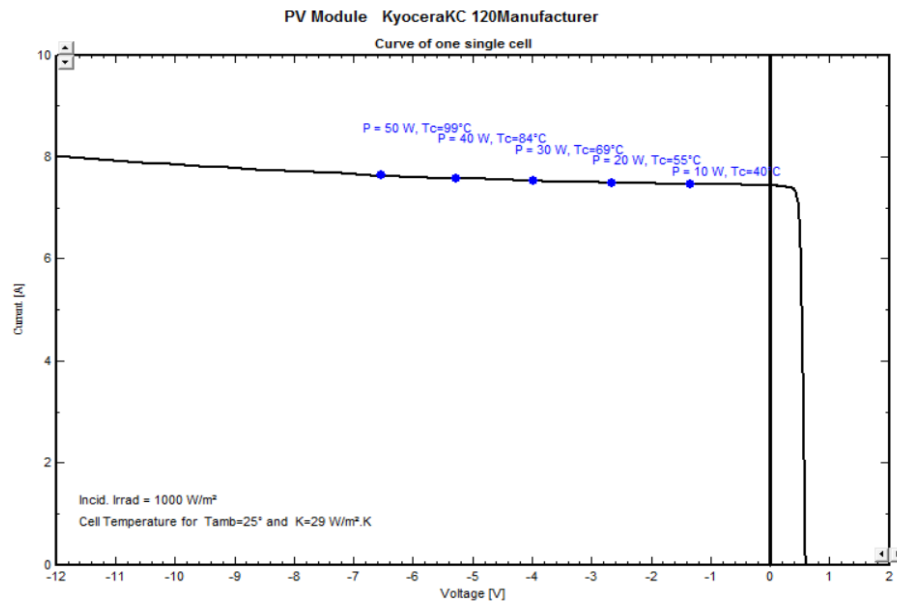


Figuur 4.16: invloed van instraling (Roberto & Denizar, 2012)

### Meting 3: cel 1.1.1 afgedekt

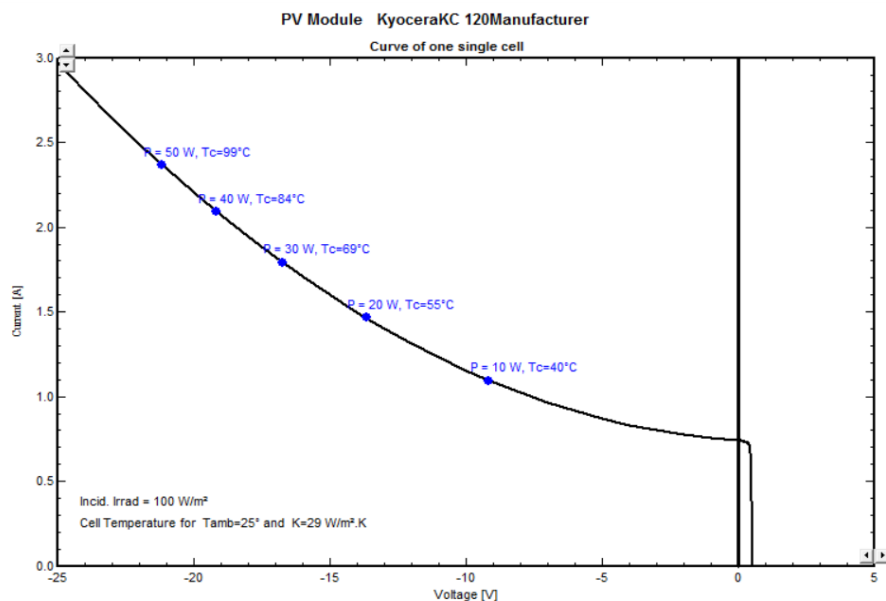
Voor deze meting wordt cel 1.1.1 volledig afgedekt. Vooraleer tot het resultaat van de meting te komen, geeft dit deel een opbouwende verklaring voor het resultaat.

De relatie tussen de spanning en de stroom bij een cel is niet lineair. Een tool van PVsyst kan de IV-karakteristiek van een beschaduwde cel van een ingesteld type paneel berekenen. Zoals eerder besproken, kan het simulatiepakket de IV-curve berekenen bij instelbare omstandigheden. De volgende figuren zijn gegenereerd met deze tool.



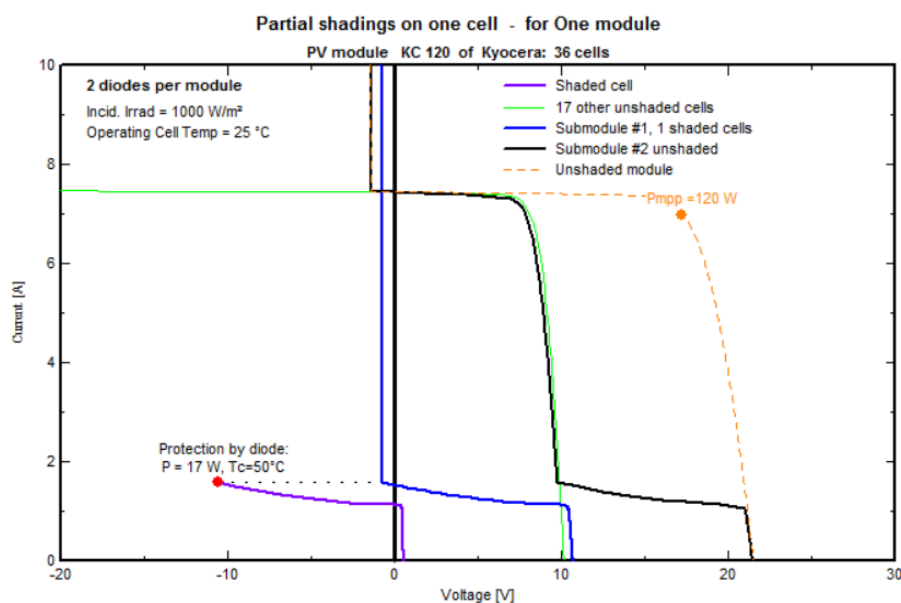
Figuur 4.17: niet beschaduwde PV-cel (PVsyst, 2016)

De bovenstaande grafiek (Figuur 4.17) geeft de IV-curve van één cel die niet beschaduwd is. De onderstaande grafiek (Figuur 4.18) geeft de curve van een cel die wel beschaduwd is. Deze curve geldt voor cel 1.1.1. Wanneer er bijvoorbeeld 2 A door de cellen van de PV-module stroomt, genereert de beschaduwde cel een negatieve spanning. De cel dissipeert ongeveer 40 W aan warmte. Hierdoor stijgt de temperatuur van de cel tot ongeveer 84 °C. De cellen die niet onderhevig zijn aan schaduw produceren een positieve spanning.



Figuur 4.18: beschaduwde PV-cel (PVsyst, 2016)

Aan de hand van de gegevens van de fabrikant berekent PVsyst met dezelfde tool het elektrisch gedrag van een beschaduwd paneel bij ingestelde omstandigheden. De onderstaande figuur geeft de theoretische onbeschaduwde en beschaduwde IV-curve op dezelfde grafiek. De beschaduwde grafiek is een simulatie van de PV-curve waarbij er één cel beschaduwd is.



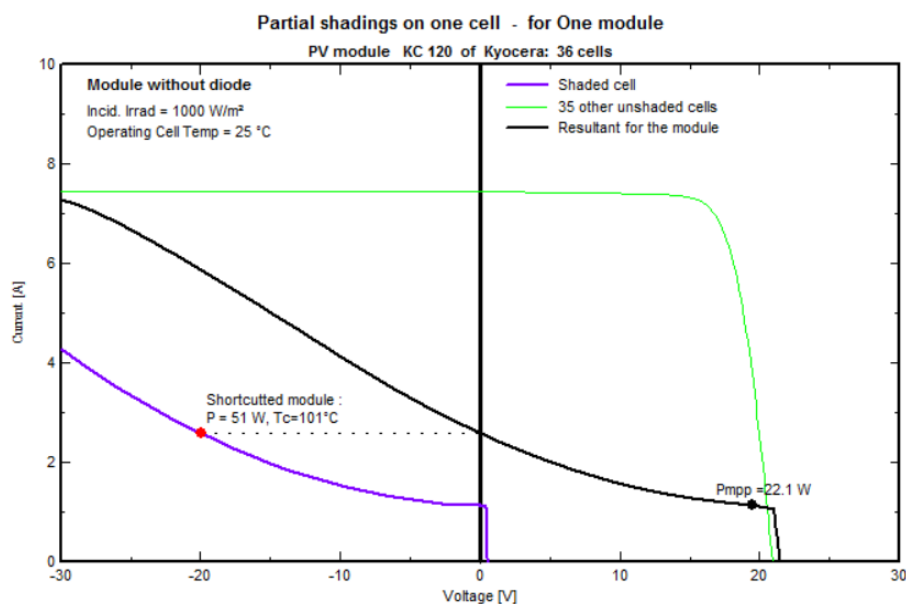
Figuur 4.19: gesimuleerde IV-curve (PVsyst, 2016)

De paarse grafiek is de IV-curve van de beschaduwde cel. Deze komt overeen met de grafiek van figuur 4.17. Zoals boven vermeld, genereert deze cel vanaf een bepaalde stroom een negatieve spanning.

Bij een iets grotere stroom wordt deze celspanning zo negatief dat de hele spanning van de array waarin de cel zich bevindt, negatief wordt. De blauwe grafiek beschrijft de IV-curve van de array waarin de beschaduwde cel zich bevindt. Vanaf een bepaalde stroom wekt heel de blauwe array een negatieve spanning op.

Het paneel heeft in totaliteit 36 cellen, twee arrays van 18 cellen. De blauwe curve is de som van de spanningen van de groene en paarse curve bij éénzelfde stroom. De groene curve is de IV-curve van zeventien onbeschaduwde cellen in de array van de beschaduwde cel. Wanneer de totale spanning van de beschaduwde array (blauwe curve) onder ongeveer  $-0,7$  V zakt, komt de bypassdiodes in geleiding. Dit is de doorslagspanning van de diode die parallel staat met één array. De zwarte grafiek geeft de globale IV-curve van de gehele module waarvan er één cel beschaduwd is. De zwarte grafiek is gevormd door de som van de spanningen van de beschaduwde (blauwe curve) en onbeschaduwde array van het zonnepaneel bij dezelfde stroom.

De onderstaande figuur geeft de IV-curve weer bij compleet dezelfde situatie. De bypassdiodes zijn nu uitgeschakeld zodat ze geen invloed hebben op de werking. De stroom gaat in dit geval wel door de beschaduwde cel.



Figuur 4.20: werking zonder bypassdiodes (PVsyst, 2016)

De vergelijking wordt gemaakt tussen figuur 4.19 en 4.20. Voor een spanning onder de tien volt genereert het paneel een beduidend lagere stroom indien er geen bypassdiodes aanwezig zijn. Dit betekent dat het vermogen veel lager ligt. Het vermogen van het MPP daalt van ongeveer 56 W naar 22,1 W. Dit toont aan dat de bypassdiodes de prestaties van een PV-module verhogen.

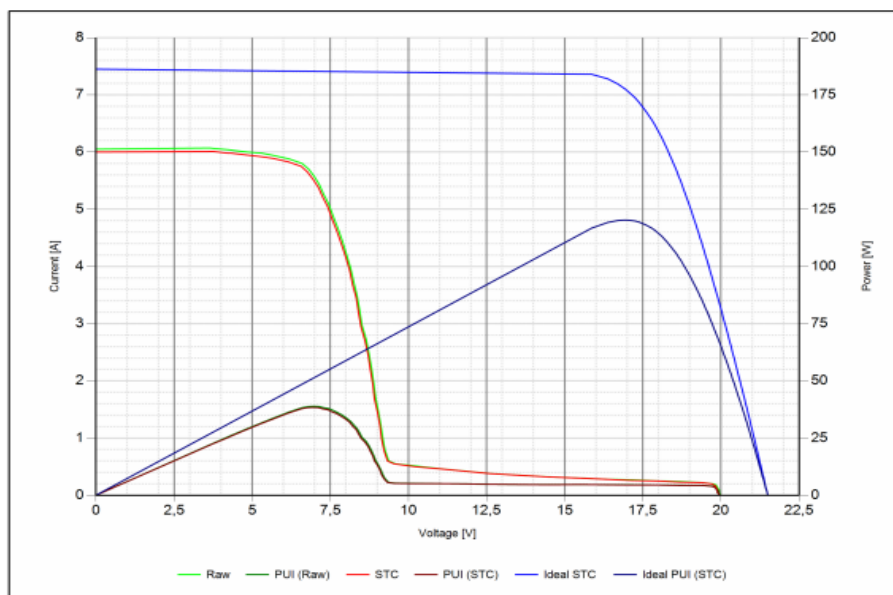
De rode markering op de paarse karakteristiek geeft de maximaal gedissipeerde warmtehoeveelheid in de beschaduwde cel weer. Wanneer er geen bypassdiodes aanwezig zijn (Figuur 4.20), ligt dit vermogen een stuk hoger dan wanneer er wel bypassdiodes in de module geïnstalleerd zijn (Figuur 4.19). Dit resulteert in een hogere celtemperatuur die schade aan de cel veroorzaakt. Deze beschadiging wordt een hotspot genoemd.



Figuur 4.21: bypassdiodes op testmodule

De bypassdiodes zijn van een cruciaal belang. De bovenstaande figuur toont de diodes die geïnstalleerd zijn op de geteste module. In de module zijn er geen twee maar zes diodes geïnstalleerd. Er zijn telkens drie diodes in parallel geschakeld om de stroom over de diodes te verdelen. Deze diodes zijn van het type RM3C. Ze kunnen maximaal een stroom van 2,5 A verdragen. Er zijn drie diodes van dit type in parallel geplaatst om bij de grootst mogelijke stroom, de kortsluitstroom (7,45 A), te kunnen geleiden. (EIC, 2005)

De onderstaande figuur geeft het resultaat van de meting in de situatie van een beschaduwde cel. De groene grafiek komt goed overeen met de door PVsyst gesimuleerde curve die hierboven (Figuur 4.20) besproken is.



Figuur 4.22: meting 3 (TRI-KA PC Software, 2013)

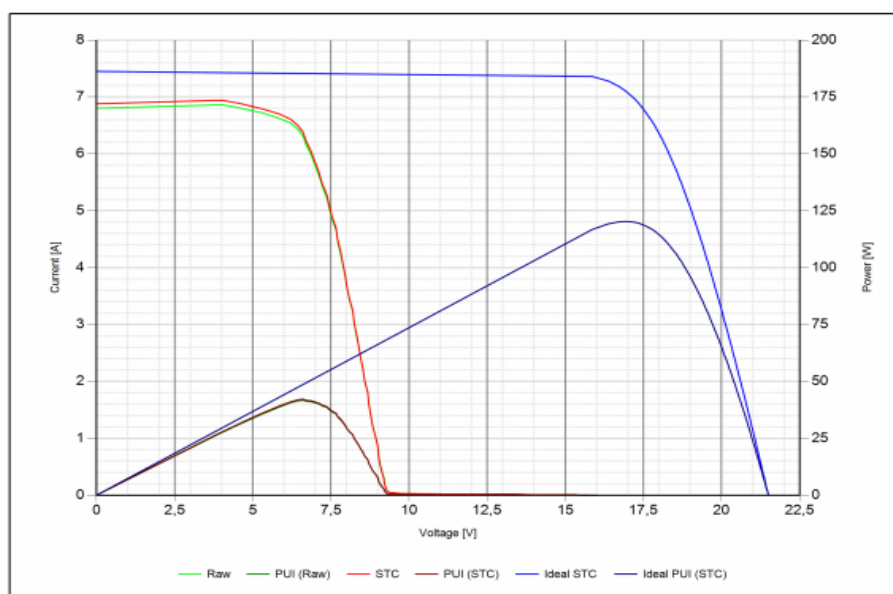
De groene IV-curve en PV-curve worden van rechts naar links besproken. Aanvankelijk is de kring open, vloeit er geen stroom en de openklemspanning heerst. De stroom neemt zeer licht toe en de spanning neemt af. Omdat de beschaduwde cel invloed uitoefent op heel de PV-module is het geproduceerde vermogen laag. Onder de negen volt gaat de bypassdiode van de array met de beschaduwde cel in geleiding. Vanaf dit punt stijgt de stroom sterk bij een kleine afname van de spanning. Logischerwijs stijgt het vermogen. Uiteindelijk bereikt de curve helemaal links de kortsluitstroom.

Bij het bekijken van de PV-curve valt op dat het MPP is verschoven naar zeven volt ten opzichte van meting 2 waar het MPP op ongeveer 17,5 V lag. De klassieke MPPT van een omvormer gaat het werkpunt van een omvormer verplaatsen door het vermogen van het paneel rond het huidige werkpunt te meten. Is bijvoorbeeld het geproduceerde vermogen bij een iets lagere spanning hoger, dan verplaatst de MPPT het werkpunt in die richting. Dit algoritme zorgt ervoor dat het werkpunt van de omvormer niet altijd overeenkomt met het MPP. Bij het concrete geval van meting 2 heeft het MPP een spanning van ongeveer 17,5 V indien er geen beschaduwing is. Het is mogelijk dat bij beschaduwing (meting 3) de spanning van het werkpunt van 17,5 V (meting 2) stijgt naar 19 V, hier is ook een top in de PV-curve (figuur 4.22). De MPPT zal het werkelijke MPP bij 7,5 V niet kunnen instellen als werkpunt. Om naar dit werkpunt te evolueren zal de omvormer eerst het vermogen moeten laten afnemen. Het algoritme van de traditionele MPPT laat dit niet toe. Fabrikanten van omvormers proberen dit op te lossen door nieuwe algoritmes voor een MPPT te lanceren.

#### Meting 4: cellen 1.x.x afgedekt

Heel de eerste array van de module is onderhevig aan schaduw. De onderstaande grafiek geeft de IV-curve.

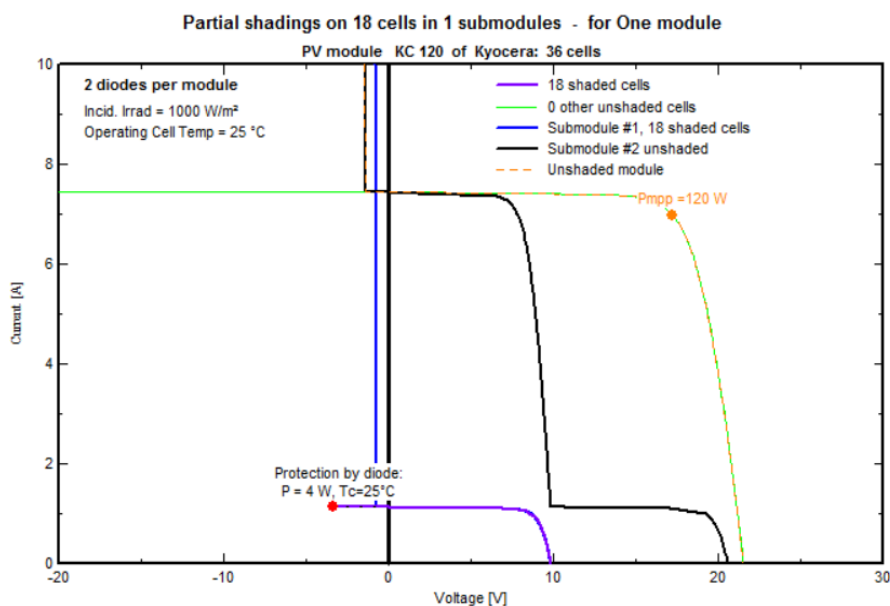




Figuur 4.23: meting 4 (TRI-KA PC Software, 2013)

De bijdrage van de beschaduwde array is minimaal. Boven de negen volt, wanneer de bypassdiode niet in werking is, produceert de module zo goed als geen vermogen. De vorm van de rode grafiek evenaart die van meting 3. Er kan besloten worden dat er weinig verschil is wanneer er 1 of meerdere cellen van een array beschaduwd zijn.

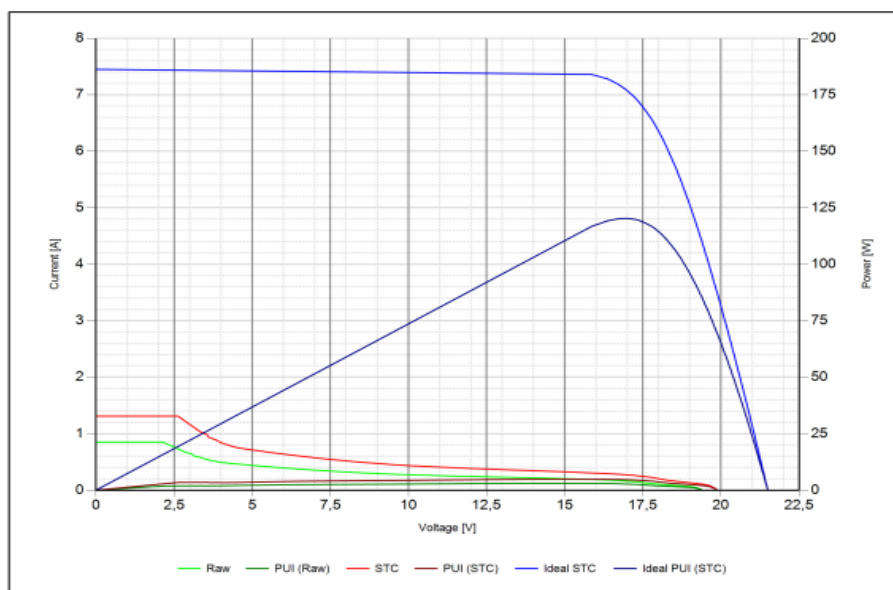
De gesimuleerde IV-curve van PVsyst toont aan dat de beschaduwde string toch nog een bijdrage kan leveren aan de productie. Dit komt omdat PVsyst geen volledige verduistering van een cel kan aannemen. De cellen bij de metingen zijn daarentegen volledig verduisterd. De volgende figuur geeft de simulatie.



Figuur 4.24: simulatie volledig beschaduwde array (PVsyst, 2016)

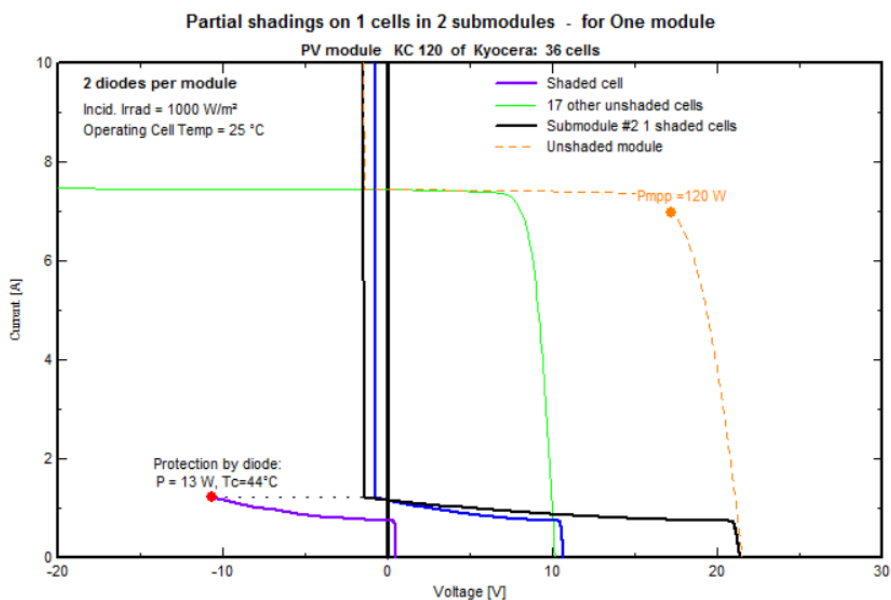
### Meting 5: cellen 1.1.2 en 2.1.3 afgedekt

Van beide arrays is een cel beschaduwd. De onderstaande figuur geeft aan dat zowel de bypassdiode van array één als van array twee gaan geleiden als de stroom te hoog wordt.



Figuur 4.25: meting 5 (TRI-KA PC Software, 2013)

Onderstaande grafiek, gesimuleerd in PVsyst, geeft hetzelfde resultaat. De blauwe IV-curve geldt zowel voor array één als voor array twee.



Figuur 4.26: simulatie één cel van twee array's beschaduwd (PVsyst, 2016)

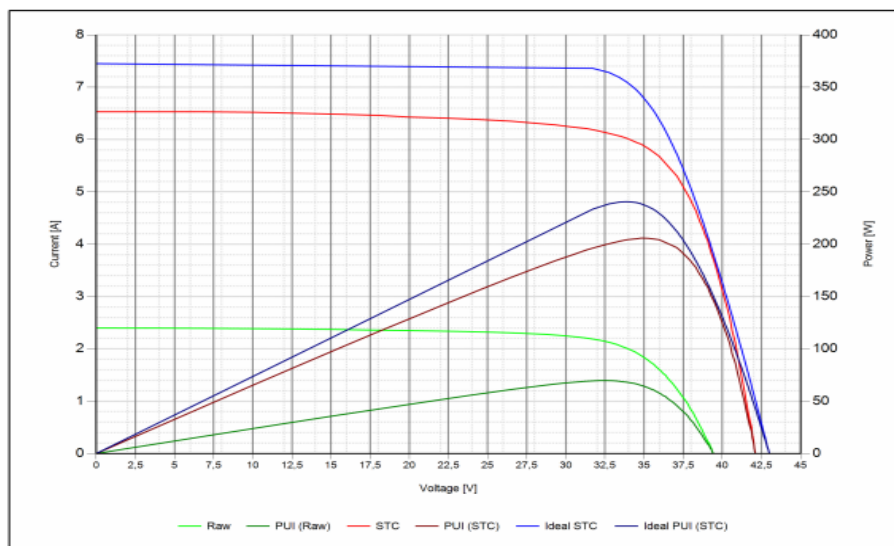
#### 4.2.3.3 Metingen op twee panelen in serie

De tweede reeks metingen start vanaf 14:20u. Er zijn twee PV-modules in serie geplaatst. Deze modules zijn uiteraard van hetzelfde type.

Aangezien de in serie geplaatste modules uit twee arrays bestaan, kan de installatie beschouwd worden als vier arrays in serie. Het huidige paneel krijgt code A. Het bijgeplaatste paneel krijgt code B.

### Meting 6: zonder schaduw, met bewolking

De meetresultaten van de onderstaande grafiek kunnen goed vergeleken worden met de meetresultaten van meting 1. De radiatie is terug afgenomen tot ongeveer  $367 \text{ W/m}^2$  en de oppervlaktetemperatuur van het zonnepaneel is toegenomen tot  $27^\circ\text{C}$ .

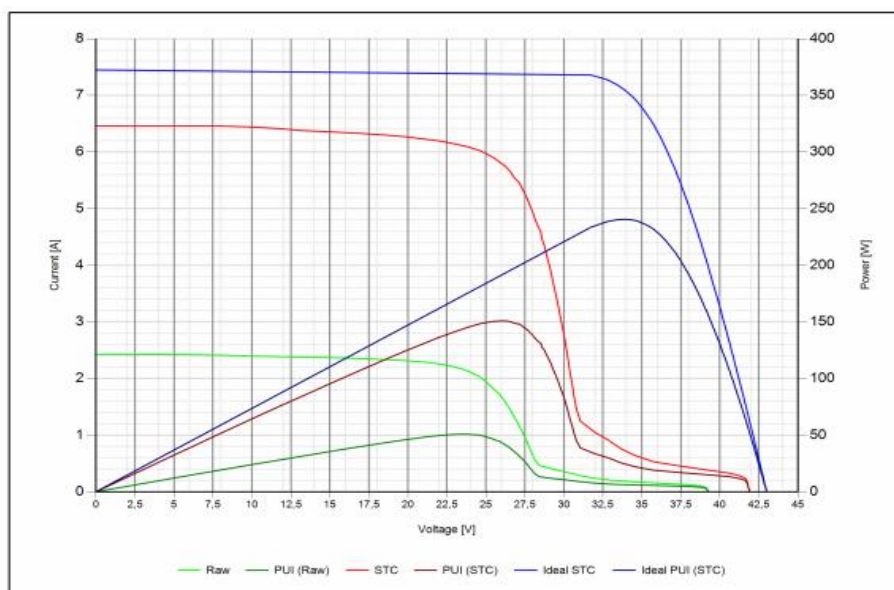


19-9-2016 15:37

Figuur 4.27: meting 6 (TRI-KA PC Software, 2013)

Er is duidelijk te zien dat de spanning bij meting 6 dubbel zo groot is bij éénzelfde stroom in vergelijking met de IV-curve van meting 1.

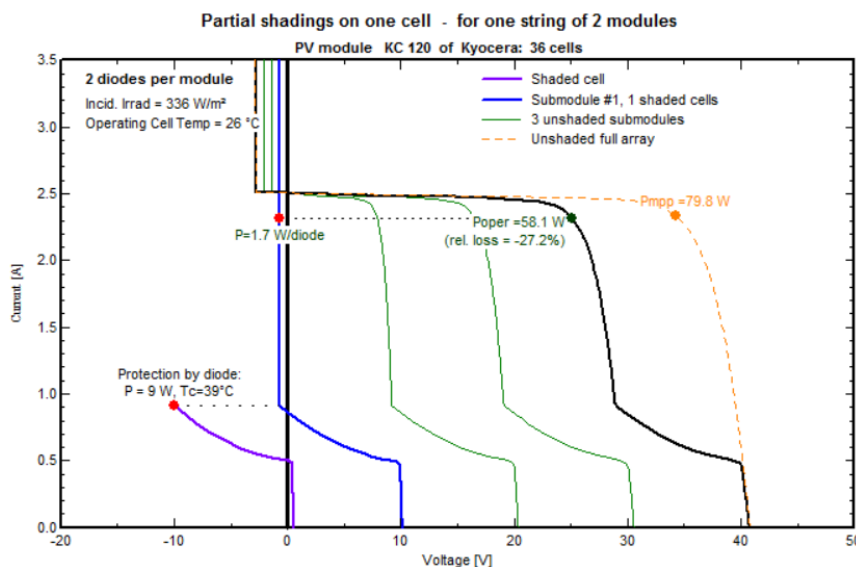
### Meting 7: cel 1.1.1 van paneel A afgedekt



Figuur 4.28: meting 7 (TRI-KA PC Software, 2013)

In dit geval is er één cel in de eerste van de vier arrays beschaduwd. Het principe blijft analogoog aan het voorgaande. Bij een te hoge stroom gaat de bypassdiode inschakelen. Aangezien de installatie nu uit vier arrays bestaat, zal maar een vierde van de spanning wegvallen wanneer de bypassdiode geleidt. Dit is te zien in de bovenstaande figuur.

De onderstaande IV-curve gesimuleerd door PVsyst maakt een berekening van het vermogenverlies door schaduw. Het procentueel verschil tussen het MPP van een onbeschaduwde installatie en het MPP van de beschaduwde installatie bedraagt 27,2%.



Figuur 4.29: simulatie van één cel beschaduwd bij twee panelen in serie (PVsyst, 2016)

#### 4.2.3.4 Metingen op twee panelen in parallel

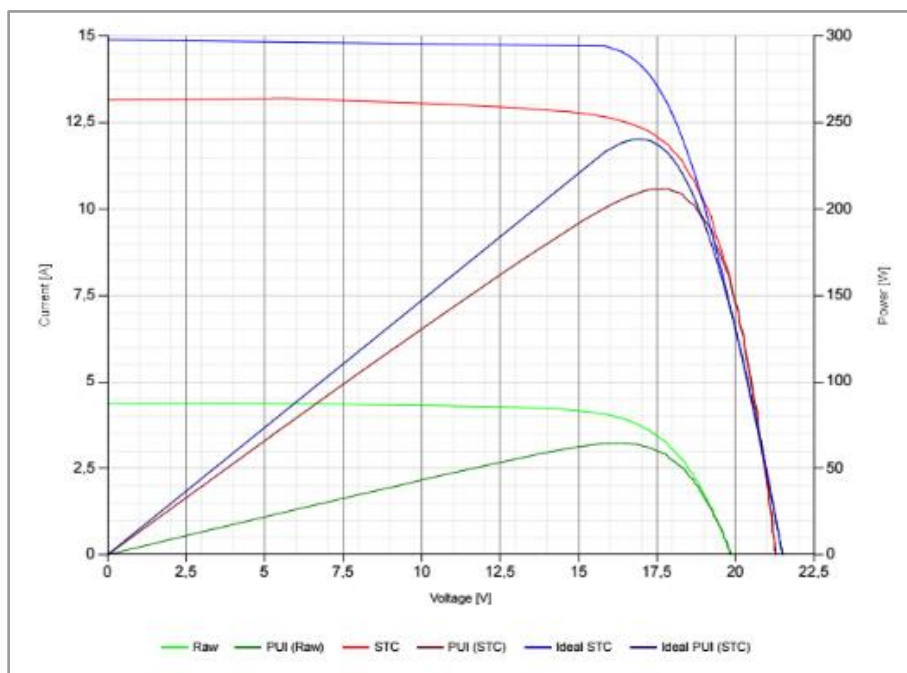
In de praktijk schakelen installateurs zonnepanelen bijna nooit in parallel. Voor dit onderzoek leek het daarentegen interessant om dit toch na te gaan. De metingen zijn gestart op 23/09/2016 om 15:30u. Op dat moment was het zeer bewolkt.



Figuur 4.30: situatie van parallelmetingen

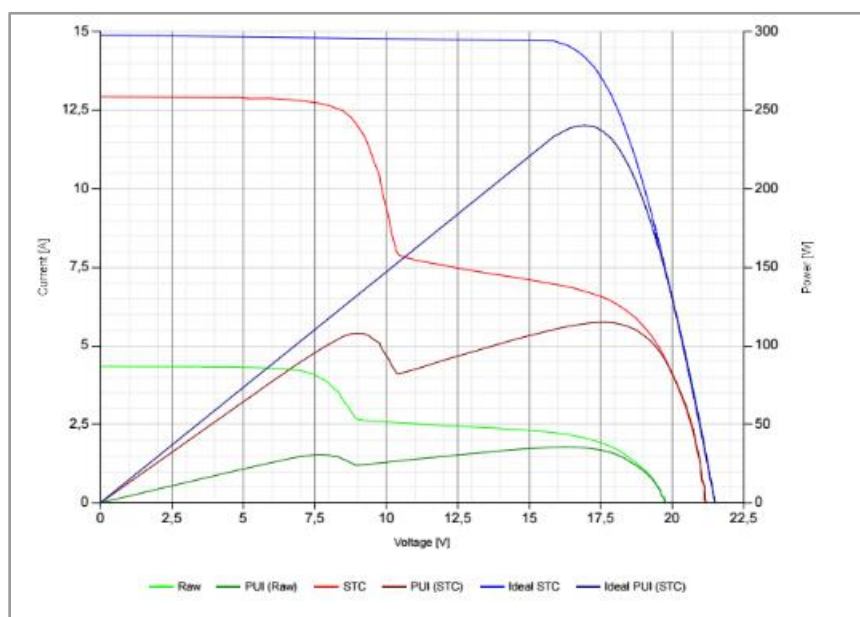
#### Meting 8: zonder schaduw met bewolking

Deze meting valt goed te vergelijken met meting 1. De radiatie bedraagt 332 W/m<sup>2</sup> en temperatuur van de cellen bedraagt 26,7°C. In vergelijking met de IV-curve van meting 1 valt op dat, voor dezelfde spanning, de stroom in de onderstaande IV-curve dubbel zo groot is.



Figuur 4.31: meting 8 (TRI-KA PC Software, 2013)

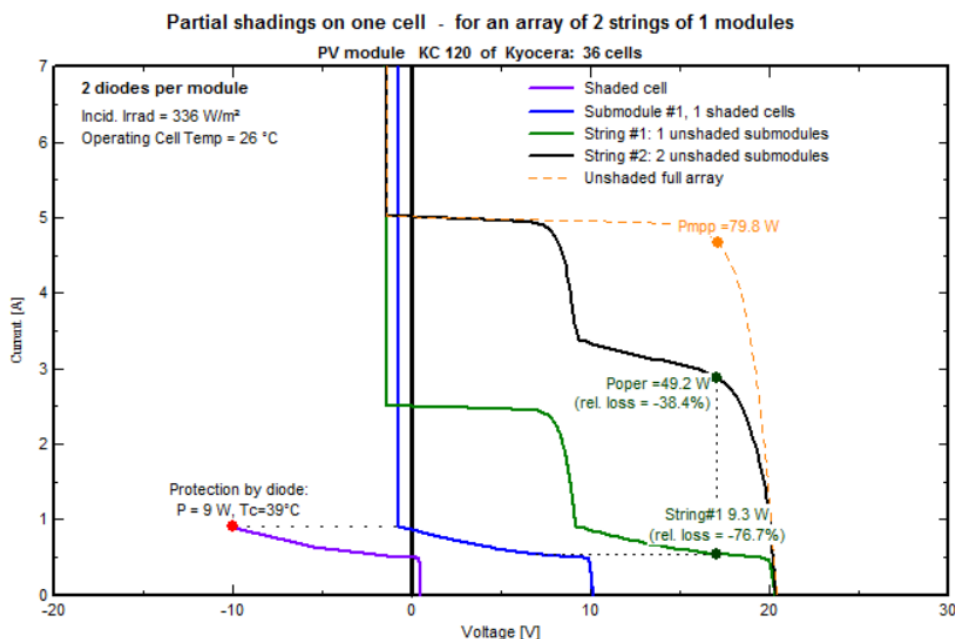
### Meting 9: cel 1.1.1 van paneel A afgedekt



Figuur 4.32: meting 9 (TRI-KA PC Software, 2013)

In de bovenstaande grafiek is te zien dat wanneer de bypassdiode in werking treedt ongeveer de helft van de stroom wegvalt en niet de volledige stroom zoals in meting 3 en meting 7. Nu valt het knikpunt, wanneer de diode in werking treedt, wel in de helft van het spanningsbereik. Dit was niet het geval wanneer de zonnepanelen in serie stonden.

De onderstaande IV-curve gesimuleerd door PVsyst maakt een berekening van het vermogenverlies door schaduw. Het procentueel verschil tussen het MPP van een onbeschaduwde installatie en het MPP van de beschaduwde installatie bedraagt 38,4%. De metingen 3, 7 en 9 geven aan dat onder invloed van schaduw het geproduceerde vermogen van de PV-installatie in het MPP afneemt.



Figuur 4.33: simulatie twee panelen in parallel waarvan één cel beschaduwd (PVsyst, 2016)

### 4.3 Schaduwverlies door omgevingselementen

Nu de werking en het effect van schaduw op een zonnepaneel duidelijk is, wordt het schaduwverlies door omgevingselementen uitvoeriger besproken. De nieuw ontwikkelde methode voor het bepalen van het schaduwverlies door omgevingselementen bestaat uit drie stappen.

Eerst wordt aan de hand van het ontwikkelde schaduwhandboek het schaduwverlies van elke element afzonderlijk bepaald.

In de tweede stap worden de afzonderlijke schaduwelementen gecombineerd tot één globaal schaduwverlies van de PV-installatie.

Ten slotte wordt dit percentage afgerond.

De waarde van het geklasseerde schaduwverlies wordt gebruikt in de opbrengstformule als factor 'schaduwverlies door omgevingselementen'.

De opbouw van het schaduwhandboek komt terug in dit onderdeel. Eerst wordt aangegeven hoe het schaduwhandboek het schaduwverlies van elk afzonderlijk element weergeeft en hoe het schaduwhandboek gesimuleerd is met PVsyst. Daarna volgt het onderzoek naar de formule om deze aparte verliezen te combineren tot één schaduwverlies. Tot slot is er aandacht besteedt aan de regels voor het klasseren van het schaduwverlies tot de uiteindelijke waarde. Deze methodiek is volledig uitgewerkt in het schaduwhandboek. Zo hebben de werfvoorbereiders enkel het schaduwhandboek nodig om de waarde van de factor 'schaduwverlies door omgevingselementen' te bepalen.



### 4.3.1 Installatie

Om het schaduwhandboek op te stellen, werden een aantal parameters die minder invloed hebben op het resultaat, constant gehouden. De instellingen van de installatie bijvoorbeeld. De ingenieurs van Izen zorgden ervoor dat deze instellingen volgens de normen van Izen correct waren. De sensitiviteit van deze instellingen komt aan bod in deel 4.5.1.

In PVsyst is het mogelijk om een gedetailleerde berekening te maken van een PV-installatie. Naast een heleboel gedetailleerde instellingen, zijn er een aantal basiszaken nodig om een berekening te doen. De eerste in te stellen parameters zijn de gegevens van de installatie. Het aantal zonnepanelen, het type zonnepaneel, het aantal strings en het type omvormer zijn hier de voornaamste instellingen. Het aantal strings is het aantal takken van in serie geschakelde zonnepanelen. Twee strings wil zeggen, twee aparte takken met zonnepanelen in serie. In onderstaande afbeelding is een screenshot van deze instellingen weergegeven.

The screenshot displays the PVsyst software interface for configuring a PV system. It is divided into several sections:

- Global System configuration:** Shows 1 sub-array, 10 modules, 16 m² area, and 1 inverter.
- Global system summary:** Lists Nominal PV Power (2.6 kWp), Maximum PV Power (2.3 kWdc), and Nominal AC Power (2.0 kWac).
- Sub-array #1:**
  - Name and Orientation:** Name: Sub-array #1, Orient: Fixed Tilted Plane, Tilt: 13°, Azimuth: -15°.
  - Presizing Help:** Options for 'No Sizing' (with 2.6 kWp and 16 m² area) or 'Enter planned power'.
  - Select the PV module:** Talesun Solar (Zhongli) 260 Wp 26V Si-polv TP660P-260. Sizing voltages: Vmpp (60°C) 25.5 V, Voc (-10°C) 42.4 V.
  - Select the inverter:** Ginlong Technologies 2.0 kW 50-400 V TL 50/60Hz Solis-2000-mini. Operating Voltage: 50-400 V, Input maximum voltage: 500 V, Global Inverter's power: 2.0 kWac.
  - Design the array:**
    - Number of modules and strings:** Mod. in series: 10, Nbre strings: 1.
    - Operating conditions:** Vmpp (60°C) 25.5 V, Vmpp (20°C) 31.1 V, Voc (-10°C) 42.4 V.
    - Plane irradiance:** 1000 W/m².
    - Max. operating power:** 2.3 kW at 1000 W/m² and 50°C.
    - Array nom. Power (STC):** 2.6 kWp.

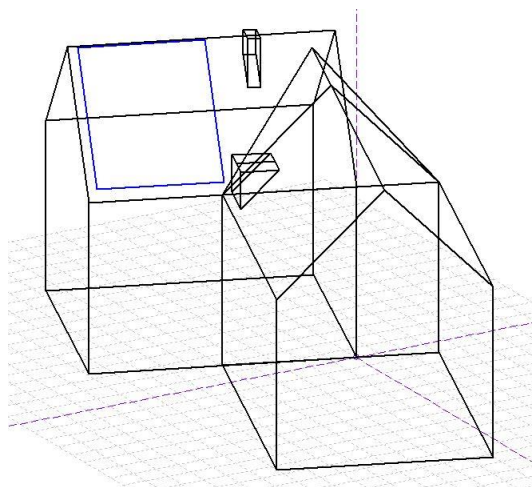
Figuur 4.34: instellingen installatie (PVsyst, 2016)

In samenspraak met de ingenieurs van Izen is er gekozen om de simulaties met een schuin dak te berekenen met tien zonnepanelen van Talesun en een omvormer van Ginlong. Deze keuze vloeit voort uit de gangbare praktijk bij Izen. Izen installeert per string meestal tien zonnepanelen. Op deze manier is de invloed van schaduw op één string onderzocht. De invloed van meerdere strings komt later nog aan bod.

Voor een schuin dak worden tien zonnepanelen in serie geplaatst onder een hellingshoek van 30° op een omvormer van Ginlong. Een installatie op een plat dak gebruikt dezelfde omvormer, maar er worden maar negen zonnepanelen aangesloten. De reden hiervoor komt aan bod bij schaduwverlies door de installatie. De hellingshoek van 30° wordt eveneens later verantwoord. Alle simulaties uit het schaduwhandboek zijn gemaakt met deze twee installaties.

Nadien is het aan de gebruiker van PVsyst om een zo gedetailleerd mogelijke tekening te maken aan de hand van het programma. Het huis waarop de installatie voorzien wordt, de ligging van de zonnepanelen en alle mogelijke objecten die schaduw werpen op de installatie moeten uitgetekend worden.

Daarna moeten enkel nog de panelen worden toegewezen aan de gewenste string en PVsyst kan met de gegevens van een gemiddeld jaar een kilowattuuropbrengst berekenen voor de installatie. Op onderstaande afbeelding is een simulatie gemaakt van een installatie. PVsyst biedt geen gemakkelijk te hanteren en goed ondersteunend CAD-programma. Dat is de reden waarom een goede simulatie zo lang duurt.



Figuur 4.35: tekening in PVsyst (PVsyst, 2016)

De gedetailleerde tekening en de vele parameters die ingesteld dienen te worden, zorgen ervoor dat de werfvoorbereiders deze techniek niet kunnen toepassen voor elke residentiële PV-installatie.

Tijdens alle uitgevoerde simulaties is enkel het driedimensionale ontwerp van het huis en omgeving met de desbetreffende schaduwelementen aangepast, zonder aan de installatie wijzigingen door te voeren. Alle andere parameters werden constant gehouden. Op deze manier is een wijziging in opbrengst rechtstreeks te wijten aan een wijziging van het schaduwobject. Het percentage schaduw in elk afzonderlijk geval wordt verkregen door volgende formule:

$$x = 1 - \frac{E_{met\ schaduw}}{E_{zonder\ schaduw}}$$

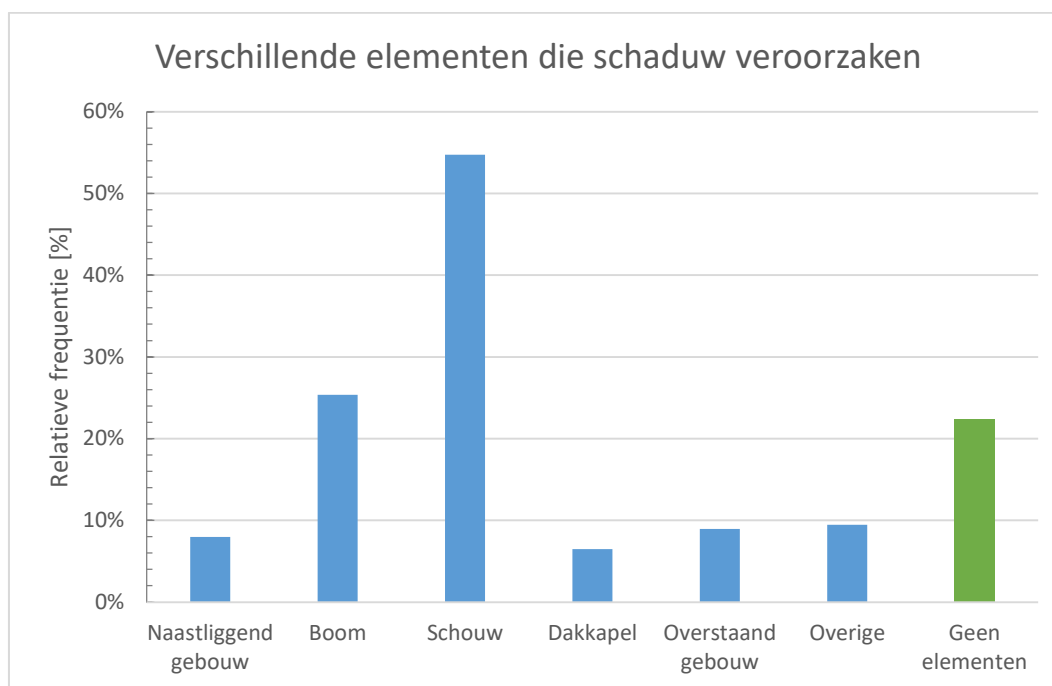
$x$  = het schaduwverlies van een afzonderlijk element [%]  
 $E_{met\ schaduw}$  = de energieproductie van de PV-installatie [kWh/jaar]  
 $E_{zonder\ schaduw}$  = de energieproductie zonder schaduw [kWh/jaar]

## 4.3.2 Elementen

### 4.3.2.1 Steekproef

Bij aanvang van de simulaties is er gekeken naar de tweede groepsaankoop van Antwerpen om na te gaan welke de meest voorkomende schaduwobjecten zijn binnen de steekproef. Per installatie is gekeken welk schaduwobject er al dan niet voorkwam. De resultaten van dit onderzoek staan in onderstaande figuur.





Figuur 4.36: onderzoek naar de schaduwobjecten

Op de horizontale as staan de meest voorkomende schaduwelementen. De verticale as geeft het percentage installaties weer, waar dat specifiek schaduwobject aanwezig was binnen de groepsaankoop. Er moet opgemerkt worden dat de globale som van alle percentages groter is dan 100%. Dit komt omdat meerdere installaties in plaats van slechts één, meerdere schaduwobjecten bezitten.

Aan de hand van deze resultaten zijn de simulaties gemaakt om de meest voorkomende elementen af te dekken. In de kolom 'overige' staan elementen die weinig voorkwamen binnen het onderzoek: beschaduwing van eigen dak, verlichtingspalen, zonneboilers, ...

#### 4.3.2.2 Schouw

De schouw werd als allereerste element van naderbij onderzocht. Een schouw heeft drie kenmerkende grootheden: de hoogte, de breedte en de dikte. Initieel werd telkens één parameter afzonderlijk bekeken terwijl de andere parameters constant werden gehouden. Op die manier is de invloed van elke parameter afzonderlijk onderzocht.

De breedte en dikte kwamen eerst aan bod. Eerst en vooral werd de opbrengst berekend van de PV-installatie met tien panelen op een schuin dak zonder schouw. Vervolgens werd de schouw op een bepaalde positie en afstand van de PV-installatie getekend. Het percentage schaduw wordt door de reeds gekende formule bekomen:

$$x = 1 - \frac{E_{met\ schaduw}}{E_{zonder\ schaduw}}$$

Daarna werden de dikte en breedte van de schouw op dezelfde manier aangepast en opnieuw gesimuleerd om de invloed van deze wijzigingen vast te stellen. Dit werd uitgevoerd met de schouw gepositioneerd in elke windrichting en met verschillende afstanden van de schouw tot de installatie. Op deze manier werd de invloed van de breedte en dikte zichtbaar in elke richting en voor diverse afstanden.

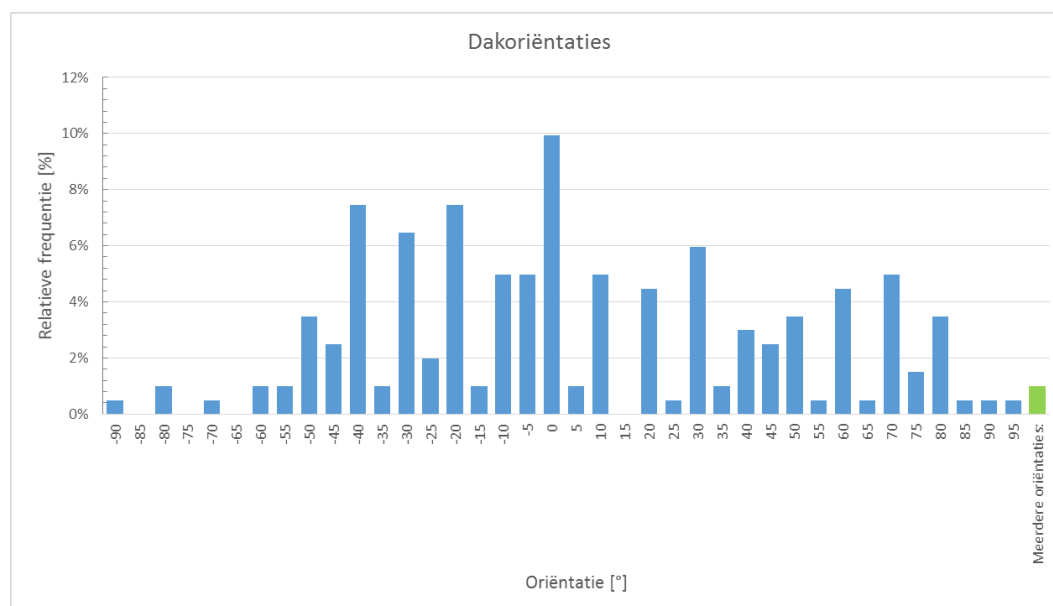
Al snel werd duidelijk dat de afstand van de schouw tot de installatie een veel grotere invloed heeft in vergelijking met het wijzigen van de breedte en dikte van de schouw.

Het belangrijkste besluit is dat een wijziging van de breedte en dikte van de schouw weinig of geen invloed heeft.

Vervolgens werd de hoogte van de schouw onderzocht. De uitwerking is volledig analoog aan voorgaande beschrijving. In plaats van de breedte en dikte aan te passen werd enkel de hoogte gewijzigd.

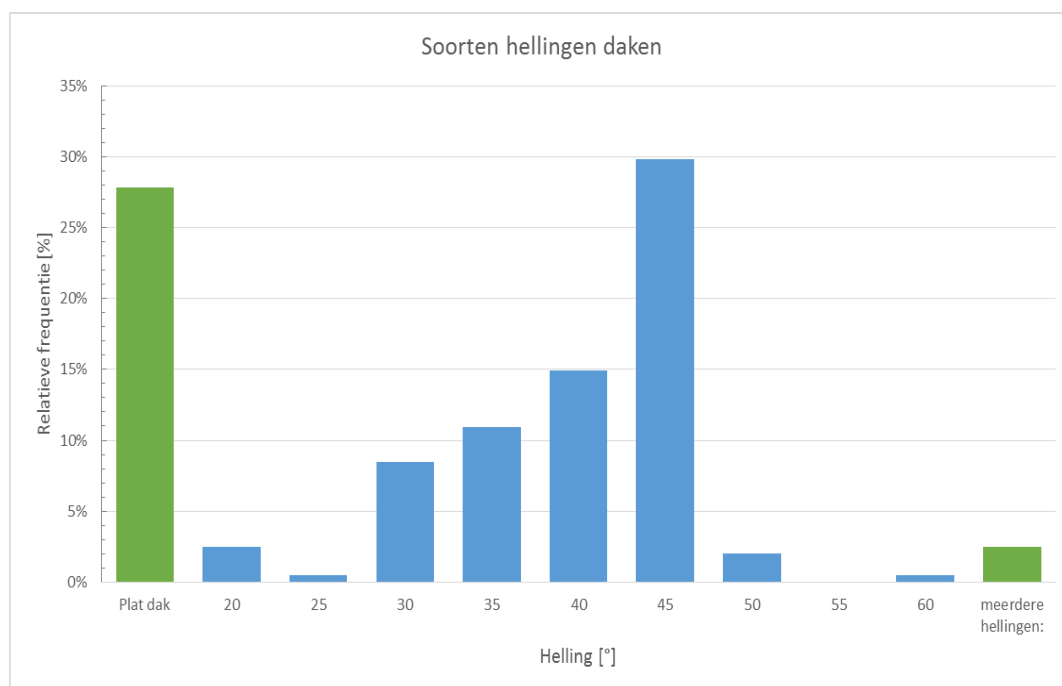
Dit heeft veel meer invloed in vergelijking met de dikte en breedte van de schouw. Bij het onderzoek naar het effect van de hoogte werd de installatie richting zuiden geplaatst, zodat de invloed steeds het grootst zou zijn en snel vastgesteld kan worden of er veel of weinig invloed is.

De invloed van de dakoriëntatie is vervolgens onder de loep genomen en deze parameter bleek een grote invloed te hebben op het resultaat. Gebaseerd op de tweede groepsaankoop van Antwerpen, werd onmiddellijk duidelijk dat er een grote verscheidenheid aan dakoriëntaties is. Deze parameter dient zeker in het eindresultaat verwerkt te worden. Uit onderstaande figuur is af te leiden dat een aantal installaties bestaat uit meerdere oriëntaties. Binnen één installatie zijn diverse panelen op verschillende daken met een andere oriëntatie geplaatst. Dit kwam slechts vijf keer voor en om het eindresultaat niet complexer te maken wordt er abstractie van gemaakt.



Figuur 4.37: onderzoek dakoriëntaties groepsaankoop

De dakhelling werd aangepast om te zien in hoeverre deze parameter invloed had. Naarmate de hellingshoek toeneemt zal de invloed van de schoorsteen afnemen. Als het dak platter is zal de schaduw verder reiken en zal er meer oppervlakte beschaduw worden. In de steekproef is eveneens onderzocht welke hellingsgraden er voorkwamen in de werkelijkheid. Figuur 4.38 toont hiervan de resultaten.



Figuur 4.38: onderzoek dakhellingen groepsaankoop

Alle simulaties werden gemaakt met een vaste dakhelling van 30°. De meeste daken hebben een hellingshoek gelijk aan, of groter dan 30°. Als de hellingshoek afwijkt van de 30° die gebruikt is bij de simulaties, zal het resultaat bijna altijd positiever uitvallen. In de gevallen dat de hellingshoek kleiner is dan 30° zullen de resultaten minder goed de simulaties benaderen, maar deze daken komen weinig voor in de realiteit. Platte daken komen voor in ongeveer 28% van de gevallen. Daarom is het zinvol om deze apart te onderzoeken. Tot slot blijkt dat er maar in 2,5% van de gevallen sprake is van meerdere hellingen. Dit is een installatie waarbij de panelen op meerdere daken met verschillende hellingen geplaatst zijn. Deze gevallen zijn niet apart opgenomen, ze zouden het eindresultaat onnodig complexer maken.

Het gedrag van de installatie is onderzocht indien het zwaarst beschaduwde paneel weggelaten werd. De conclusie luidde dat het rendement van de installatie toenam, maar de totale opbrengst van de installatie afnam. Omdat de meeste eigenaars opteren voor een maximale opbrengst, is dit niet verder uitgediept.

Tot slot is er gekeken of dezelfde opbrengst gehaald kon worden met een andere omvormer die het MPP op dezelfde manier zoekt. Aangezien de omvormer weinig invloed op het resultaat heeft, is dit buiten beschouwing gelaten. Als de omvormer op een andere manier het MPP zoekt is de invloed niet te verwaarlozen. Dit komt later aan bod.

Tijdens de voorgaande simulaties werd aangetoond dat de invloed van het schaduwobject beduidend lager is wanneer het op een halve meter van de installatie geplaatst is in plaats van er vlak tegenaan. Dit besluit is algemeen geldig voor elk type schaduwobject.

Niet elke invloedfactor kan worden meegenomen in het eindresultaat. Het zou leiden tot een onoverzichtelijk en bovendien gebruiksonvriendelijk instrument. Daarom is er geopteerd om enkel de belangrijkste parameters in te sluiten. Voor de schouw is dit de hoogte, de afstand tot de installatie en de oriëntatie van het dak.

Op basis van deze besluiten is er een algemene werkwijze gecreëerd om elk schaduwobject op dezelfde manier te benaderen. Per schaduwobject zijn er een aantal basisgevallen met vaste afmetingen uitgetekend. Elk schaduwtype met willekeurige afmetingen in overweging nemen zou een onmogelijke opgave betekenen. De basisgevallen werden voor elk object steeds gemaakt aan de hand van concrete voorbeelden van reële situaties binnen de steekproef gecombineerd met de grootste invloedparameter uit de simulaties, intuïtie en op basis van gezond verstand.

Voorbeeld voor de schouw. Er zijn drie types van schouwen getekend. Een willekeurige schouw zou bij één van deze drie gevallen moeten aansluiten:

- een schouw van 0,50 m hoog en 0,20 m breed/dik, eerder een pijp dan een schouw,
- een schouw van 1,40 m hoog en 0,70 m breed/dik,
- een schouw van 2,00 m hoog en 0,70 m breed/dik.

Bij de volgende simulaties werd volgens deze methode gewerkt. Niet elke parameter werd nog apart gesimuleerd maar er werd op een doordachte manier een aantal standaard- of basismodellen vooropgesteld waaruit de werfvoorbereider kan kiezen. De basismodellen moeten zo gekozen worden dat ze bijna elk willekeurige situatie kunnen afdekken.

#### 4.3.2.3 Dakkapel

Bij de simulatie van de dakkapel zijn er drie gevallen onderzocht: de dakkapel met zadeldak (links), de dakkapel met plat dak (midden) en de uitbouw van een dak of grote dakkapel met zadeldak (rechts). De drie types staan in onderstaande figuur.



*Figuur 4.39: soorten dakkapellen (Slimster B.V., s.a.; realiseerjedroomhuis, s.a.; Dakgigant, 2016)*

Een dakkapel heeft in alle gevallen twee kenmerkende grootheden, de hoogte en de breedte. Bij een dakkapel met zadeldak wordt de hoogte gemeten tot de nok.

De breedte werd eerst onderzocht. De werkwijze is identiek aan die van de schouw en de dakkapel werd in elke positie en op elke afstand van de installatie gezet om de invloed ervan te bepalen. Daarna werd hetzelfde gedaan voor een dakkapel met een andere breedte. Dezelfde werkwijze geldt om de hoogte te onderzoeken. De hoogte van de dakkapel heeft veel meer invloed dan de breedte van de dakkapel.

Vervolgens werden drie basisgevallen van een dakkapel vastgelegd waarbij vooral de hoogte van de dakkapel werd aangepast:

- een zadeldakkapel van 1,50 m hoogte tot aan de nok, 1,50 m breed,
- een dakkapel met plat dak van 1,50 m hoog, 1,50 m breed,
- een grote dakkapel van 4,50 m hoogte tot aan de nok, 5,00 m breed.

De uitwerking in het schaduwhandboek is identiek aan de uitwerking voor de schouw. Behalve de keuze uit één van de drie basisgevallen zijn de afstand van de dakkapel en de positie ten opzichte van de installatie en de dakoriëntatie de benodigde parameters om tot een resultaat te komen.

#### 4.3.2.4 Boom

Een schoorsteen en dakkapel bevinden zich op een dak. Een boom en alle volgende elementen staan rond het huis en de installatie.

Vooreerst dient opgemerkt dat PVsyst een boom als een volledig opaak object beschouwd. Dit wil zeggen dat er geen zonlicht door het bladerdak kan schijnen. Op deze manier zijn de gemaakte simulaties veilig vermits in realiteit de zon nog steeds gedeeltelijk door het bladerdek schijnt.

Ook voor de boom zijn er drie standaarden gecreëerd omdat het onmogelijk is om alle types van bomen te simuleren. De belangrijkste factoren bij een boom zijn: de hoogte tot de top van de kruin en de diameter van de kruin. De hoogte en dikte van de stam zijn niet meegenomen omdat ze minder invloed hebben en meestal enkel het bladerdak boven de dakgoot uitsteekt. Dit zijn de drie standaarden:

- kruinbreedte 5,00 m en 8,00 m hoogte,
- kruinbreedte 3,00 m en 10,00 m hoogte,
- kruinbreedte 10,00 m en 18,00 m hoogte.

De te nemen afstand is de afstand van de stam van de boom tot de rand van het huis. Dit is makkelijk op te meten voor de werfvoorbereider. De gevolgde werkwijze in het schaduwhandboek is identiek aan die van voorgaande beschrijvingen. Behalve de drie basisgevallen zijn de afstand tot de rand van het huis, de positie ten opzichte van de installatie en de dakoriëntatie de benodigde parameters om tot een resultaat te komen.

#### 4.3.2.5 Elektriciteitskabel

Een spanningskabel komt nog regelmatig voor in het straatbeeld. De werfvoorbereiders wisten niet goed of ze hiermee rekening moesten houden, aangezien de kabel meestal op dezelfde hoogte hangt als de PV-installatie. De uitwerking van de spanningskabel is niet gedetailleerd. Hij kwam in de steekproef amper voor als schaduwelement.

Voor de simulaties is één type kabel onderzocht. Twee kabels van vooropgestelde afmetingen hingen boven elkaar met een tussenafstand van één meter. Enkel de afstand tussen de kabels en de gevel van het huis, en het hoogteverschil tussen de kabels en de dakgoot werden nu nog aangepast. De installatie werd richting zuiden geplaatst omdat er op deze manier gerekend werd onder de zwaarste invloed.

#### 4.3.2.6 Dakreling

Op een plat dak kan een dakreling gemonteerd zijn voor de veiligheid. Aangezien Izen veel installaties plaatst op een plat dak, vroegen de werfvoorbereiders om dit te onderzoeken. De uitwerking is niet gedetailleerd aangezien dit weinig voorkwam in de steekproef. Twee specifieke gevallen zijn als basisreling genomen en deze zijn analoog aan voorgaande elementen op alle afstanden en oriëntaties geplaatst om op deze manier tot een resultaat te komen.



Figuur 4.40: voorbeeld dakreling (Simplified Safety, s.a.)

#### 4.3.2.7 Naastliggend gebouw

Het kan voorkomen dat een aangrenzend gebouw voor schaduwvorming zorgt op de installatie. Zowel de installaties die op een plat dak als op een schuin dak gelegen zijn, werden apart onderzocht. In deze opstelling ligt het aangrenzende gebouw tegen het gebouw waarop de panelen zijn geïnstalleerd. Het hoogteverschil tussen de aangrenzende gebouwen is hier de belangrijkste parameter. De gebouwen werden weer in elke windrichting gedraaid om hiervan een beeld te krijgen.

#### 4.3.2.8 Overliggend gebouw

Een overliggend gebouw kan voor schaduwvorming zorgen. Bij een overliggend gebouw zijn alle opstellingen onderzocht. Het dak waarop de panelen liggen kan plat of schuin zijn, maar tevens het dak van de overbuur kan plat of schuin zijn. Alle combinaties zijn onderzocht. Bij deze is de afstand tussen de gevels van de huizen en het hoogteverschil tussen de daken van belang. De huizen werden weer in elke windrichting georiënteerd.

### 4.3.3 Meerdere strings

Alle voorgaande simulaties zijn gemaakt met tien zonnepanelen op één string. Om de invloed te bekijken van meerdere strings zijn van elk type schaduwelement willekeurige gevallen gesimuleerd met meerdere strings om de invloed te bekijken. Aangezien er geen algemene regel geldig is, is per element omschreven wat de invloed van schaduw zal zijn bij meerdere strings. In een deel van de gevallen halveert de invloed terwijl in het andere deel van de gevallen het schaduwverlies vermindert maar minder dan de helft. In die gevallen is er conservatief besloten dat het schaduwverlies hetzelfde blijft. Op deze manier is de keuze van het schaduwhandboek veilig.

### 4.3.4 Structuur

Alle voorgaande simulaties resulteren in een percentage schaduwverlies door een omgevingselement. De manier waarop de werfvoorbereider tot een percentage moet komen in het schaduwhandboek, is bij elk schaduwobject bewust hetzelfde gehouden. Dit is de structuur. De belangrijkste parameters bij elk type schaduwobject zijn: de afmetingen, de afstand en positie van het object ten opzichte van de installatie, de dakoriëntatie en het type dak.

Allereerst kiest de werfvoorbereider een schaduwobject, vervolgens bepaalt hij of het dak plat of schuin is en daarna kiest hij de oriëntatie van het dak. Dan bepaalt hij de afmetingen van het object en stelt hij de positie van het object vast om tot slot de afstand van het object tot de installatie te kiezen. Op die manier komt hij snel en eenvoudig steeds op dezelfde manier tot het correcte resultaat.

Afmetingen schouw: 200 x 70 x70				
	0m tussen object en installatie	0,5m tussen object en installatie	1m tussen object en installatie	2m tussen object en installatie
Boven	6,0%	3,8%	2,3%	0,8%
Linksboven	4,1%	2,6%	1,5%	0,5%
Links	9,4%	6,1%	3,3%	1,3%
Linksonder	6,7%	4,7%	3,0%	1,6%
Onder	9,9%	7,6%	5,3%	2,8%
Rechtsonder	1,4%	0,9%	0,6%	0,3%
Rechts	1,2%	0,6%	0,4%	0,1%
Rechtsboven	0,5%	0,3%	0,2%	0,0%

Figuur 4.41: voorbeeld resultaat schaduwhandboek

In figuur 4.41 is een screenshot getoond van een deel van het schaduwhandboek. In dit voorbeeld heeft de werfvoorbereider een schouw op een schuin dak gekozen in een vastgelegde oriëntatie, namelijk het oosten. Bovenstaande figuur wordt dan verkregen. De groene cirkel duidt de grootte van het schaduwobject aan. De blauwe cirkel geeft de positie van het object tot de installatie aan en de rode bepaalt de afstand van het object tot de installatie. Dit bleek een snelle en eenvoudige werkmethode. In totaal werden in het schaduwhandboek een honderdtal tabellen voor de verschillende situaties opgenomen.

#### 4.3.5 Combinatieformule

Om het verlies te bepalen van meerdere schaduwobjecten tot één gezamenlijk schaduwverlies, is onderzocht op welke manier de individuele schaduwverliezen gecombineerd kunnen worden. Er werden vijf formules vooropgesteld om schaduw te combineren.

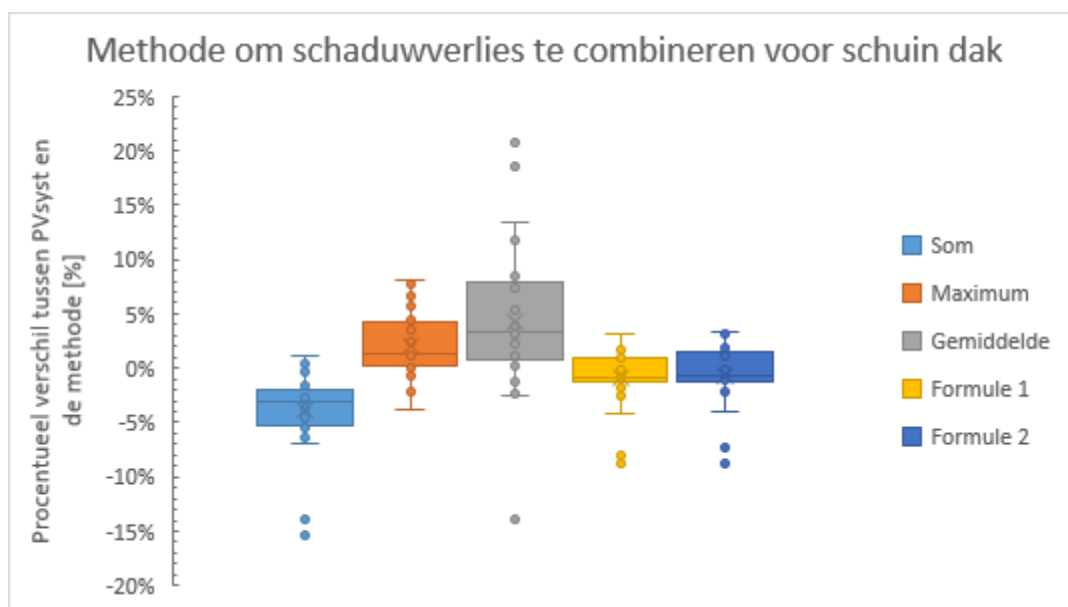
Er is een formule die de som neemt van de individuele schaduwpercentages. Een volgende formule neemt het maximumverlies als resultaat. Nog een andere formule berekent het gemiddelde van de verliezen. Formule 1 in figuur 4.42 neemt het grootste verlies samen met de som van de andere verliezen gedeeld door twee. Formule 2 in figuur 4.42 tot slot neemt het grootste verlies samen met de helft van het tweede verlies samen met een derde van het derde grootste verlies enz.

Vervolgens zijn er zestig totaal willekeurige gevallen vooropgesteld, dertig op een plat dak en dertig op een schuin dak. Samen met elke installatie zijn er twee of meerdere schaduwobjecten willekeurig gekozen.

Per willekeurig geval zijn in het schaduwhandboek de schaduwelementen opgezocht om de schaduwinvloed van de elementen apart te bepalen. Daarna zijn ze gecombineerd met elk van de vijf formules.

Dan is met PVsyst de situatie uitgetekend en gekeken hoeveel percentage verlies het programma geeft in die situatie.

Tot slot is er gekeken welke formule het beste de werkelijkheid, in dit geval PVsyst, benadert. Die formule is gekozen om schaduwobjecten te combineren.



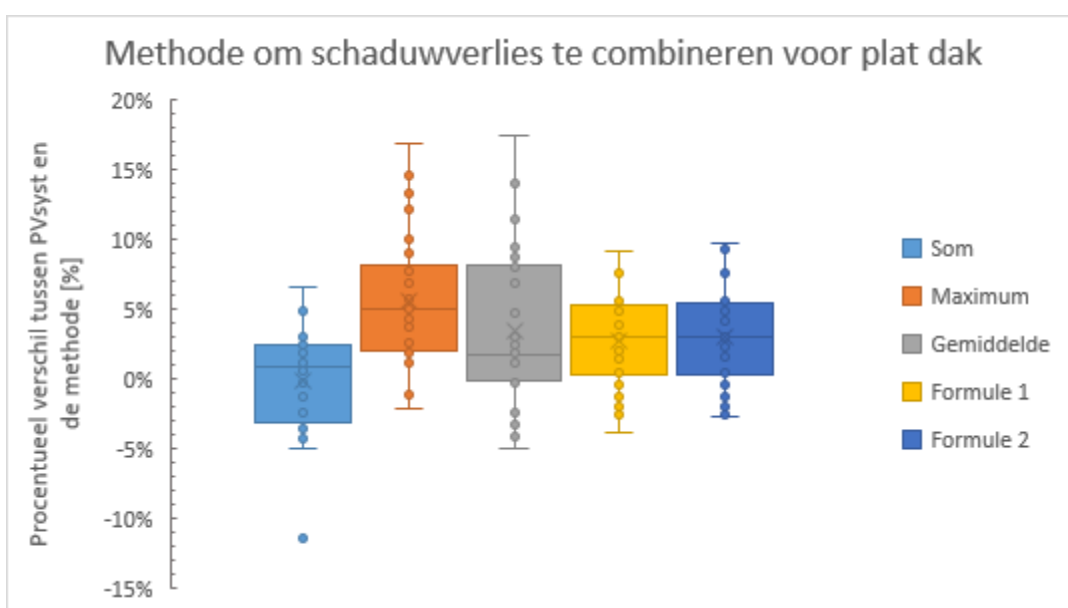
Figuur 4.42: formule voor schaduwcombinatie schuin dak

In figuur 4.42 is het procentuele verschil tussen de vijf formules en PVsyst uitgezet. De box-plot geeft het gemiddelde en de spreiding van het verschil weer tussen PVsyst en de beschouwde formule. Voor een schuin dak is formule 1 gekozen als beste benadering door de kleine spreiding en omdat het gemiddelde goed 0% benadert.

Stel dat  $x_1$ ,  $x_2$  en  $x_3$  de schaduwinvloeden zijn, waarvan  $x_1$  de grootste invloed is. Dan zegt formule 1 dat:

$$y = x_1 + \frac{x_2 + x_3}{2}$$

$y$  = het gecombineerde schaduwverlies van een PV-installatie [%]



Figuur 4.43: formule voor schaduwcombinatie plat dak



In figuur 4.43 is duidelijk te zien dat de somformule de beste benadering geeft voor een plat dak. Het gemiddelde benadert in dit geval het beste 0%.

Stel dat  $x_1$ ,  $x_2$  en  $x_3$  de schaduwinvloeden zijn, waarvan  $x_1$  de grootste invloed is. Dan zegt de somformule dat:

$$y = x_1 + x_2 + x_3$$

#### 4.3.6 Klassering van schaduw

De werfvoorbereiders van Izen ronden bij de opbrengstberekening de waarde van het schaduwverlies voor een bepaalde PV-installatie af op intuïtie tot 0%, 5%, 10%, 20% en >20%. Deze afrondingen zijn in de nieuw ontwikkelde methode aangehouden. Bij een schaduwverlies boven de 20% berekent Izen geen opbrengstgarantie. Omdat in de nieuwe rekentool een dimensionering plaatsvindt, moet er wel een berekening met het schaduwverlies boven 20% gebeuren. De nieuwe methode zal de percentages hoger dan 20% moeten behandelen. De rekentool zal wel duidelijk moeten weergeven dat in zo'n geval de opbrengstgarantie niet geldt.

Stel dat het totaal bekomen schaduwpercentage, volgend uit de combinatieformules (zie 4.3.5)  $y$  genoemd wordt en de uiteindelijke geklasseerde invloed  $z$ . Dan gelden volgende regels:

$$z = 0\% \Leftrightarrow y \in [0\%; 1\%]$$

$$z = 5\% \Leftrightarrow y \in ]1\%; 6\%]$$

$$z = 10\% \Leftrightarrow y \in ]6\%; 11\%]$$

$$z = 20\% \Leftrightarrow y \in ]11\%; 20\%]$$

$$z = y \Leftrightarrow y \in ]20\%; 100\%]$$

$z$  = het geklasseerde schaduwverlies van een PV-installatie [%]

De waarde van het geklasseerde schaduwverlies van een PV-installatie kan als de factor 'schaduwverlies door omgevingselementen' gebruikt worden in de opbrengstformule.

## 4.4 Schaduwverlies door installatie

Dit onderdeel bespreekt de waardebepaling van de factor 'schaduwverlies door installatie' bij de opbrengstberekening. Deze waarde is afhankelijk van de afmetingen van de opstelling op het platte dak.

### 4.4.1 Opstelling

Bij installaties op een plat dak, kunnen zonnepanelen elkaar beschaduen omdat ze onder een helling geplaatst worden. Om die reden zijn in bovenstaande simulaties met een plat dak, negen zonnepanelen gekozen. Met negen zonnepanelen kan de 3x3-configuratie, bestaande uit drie rijen en drie kolommen, gebouwd worden. Dit geheel is mooi symmetrisch en kan gemakkelijk gepositioneerd worden ten opzichte van schaduwelementen, daken, enz. Met tien zonnepanelen zou er steeds één paneel naast een 3x3 opstelling liggen.

Izen maakt gebruik van de FlatFix Fusion van het bedrijf Esdec BV om zonnepanelen snel en eenvoudig op het dak te monteren. De opstelling van Esdec bestaat uit aluminiumprofielen die in kunststofhouders worden geklikt om op die manier een draagstructuur te krijgen. Door het eenvoudige kliksysteem is er slechts één stuk gereedschap nodig om de panelen te installeren. Dit is een belangrijk voordeel. (Esdec, s.a.)

Tot slot worden de panelen op de dragende structuur vastgeschroefd. Onderstaande figuur geeft een zijaanzicht van zonnepanelen gemonteerd op de Esdec-draagstructuur om belangrijke parameters uit te leggen.



*Figuur 4.44: Opstelling FlatFix Fusion (zonnepanelenwestfriesland, s.a.)*

De panelen worden op het dak gemonteerd op een afstand van 1,50 m van elkaar en onder een hoek van  $13^\circ$ . Op deze manier wordt er minder direct zonlicht opgevangen wanneer de zon er recht over staat, maar vangen ze gedurende de dag meer indirect licht op. Dit systeem zorgt ervoor dat de omvormers gelijkmatiger belast worden en er op het einde van de dag evenveel wordt opgewekt, dan wanneer ze plat op het dak geïnstalleerd worden. Izen kiest voor deze opstelling omdat volgens hen dit systeem een goed compromis is tussen het benutten van de beschikbare oppervlakte en de schaduwverliezen. De opstelling heeft een bijkomend voordeel dat de benodigde hoeveelheid ballast, om de zonnepanelen op hun plaats te houden, laag is. (Van de Zon, 2014)

Als de zon laag staat, zal de kans dat de zonnepanelen alsnog onderling schaduw op elkaar werpen, toenemen. Die invloed is apart opgenomen in dit hoofdstuk.

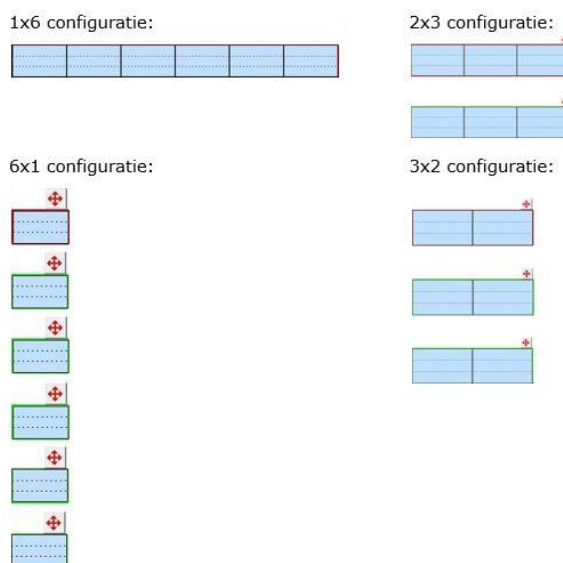
#### **4.4.2 Onderzoek**

Onderlinge schaduwwerping was nog niet nader onderzocht door Izen. Deze factor werd conservatief op 4,2% verlies, ingesteld. Binnen PVsyst gebruikt Izen een dimensioneringstool 'Unlimited Sheds'. Dit is een benadering voor een opstelling op een plat dak waarbij de gebruiker geen schaduwmodel tekent zoals in de simulaties, maar direct de hellingshoek, de oriëntatie, de rijafstand, enz. ingeeft. Unlimited wil zeggen dat de rijen oneindig lang zijn. Aangezien er op deze manier geen zon langs de zijkant van de panelen op de volgende rij kan schijnen is deze situatie als worst case genomen. De gebruiker kan het aantal rijen ingeven en de eerste rij wordt als onbeschadwd gerekend. Het bleek dat 999 rijen het grootste percentage schaduwinvloed oplevert, namelijk 4,2%. Veiligheidshalve houdt Izen dit percentage aan, in de wetenschap dat geen enkele installatie in realiteit slechter zal zijn. Om deze parameter toch enigszins te verfijnen, is er onderzoek naar verricht. Er is bewust gewerkt naar een concept waarbij men enkel het aantal zonnepanelen hoeft te kennen om de onderlinge schaduwwerping op te zoeken.

Zonnepanelen kunnen op een plat dak op verschillende manieren geïnstalleerd worden, afhankelijk van de beschikbare plaats. De opstelling van de installatie bepaalt samen met het aantal panelen hoeveel schaduwverlies er is.

Beschouw volgend voorbeeld:

Een installatie van zes zonnepanelen moet op een plat dak geïnstalleerd worden. De panelen kunnen op volgende manieren geplaatst worden.



Figuur 4.45 Bovenaanzicht van installaties zonnepanelen op een plat dak (PVsyst, 2016)

Figuur 4.45 toont de vier opstellingen die geplaatst kunnen worden met zes zonnepanelen. Het eerste cijfer slaat terug op het aantal rijen, het tweede cijfer op het aantal kolommen. Elke opstelling is in PVsyst uitgetekend en het percentage schaduwverlies berekend. Daarna is telkens het grootste schaduwverlies genomen. In bovenstaand voorbeeld gaf de 3x2 configuratie het grootste schaduwverlies, namelijk 2,3%. Indien de installatie op een plat dak uit zes zonnepanelen bestaat, is de waarde van de factor 'schaduwverlies door installatie' gelijk aan 2,3%, onafhankelijk van de configuratie. Het resultaat is nog altijd beduidend lager dan de 4,2% schaduwverlies die Izen in rekening brengt.

Voor elk aantal zonnepanelen is dit gesimuleerd. Telkens is de opstelling die het grootste schaduwverlies opleverde, als resultaat genomen. Bij meer dan twintig zonnepanelen komt het schaduwverlies overeen met de conservatieve 4,2% van Izen.

Op die manier is er een nauwkeurigere maar toch veilige methode ontwikkeld om de waarde van de factor 'schaduwverlies door installatie' te bepalen. Met enkel het aantal zonnepanelen kan deze methode een schaduwinvloed bepalen. Deze parameter gebruikt de werfvoorbereider nu al bij de opbrengstberekening. Er moeten niet nog extra parameters worden bepaald. Dit maakt de methode gemakkelijk integreerbaar bij de berekening van de opbrengst.

## 4.5 Controle

Dit deel bespreekt de controles die zijn uitgevoerd op de ontwikkelde methodes voor het bepalen van de schaduwverliezen. Er zijn drie controles uitgevoerd. De eerste controle bestond uit een sensitiviteitsanalyse van de instellingen van PVsyst. De resultaten van de methode zijn getoetst aan de werkelijkheid. Dit is de tweede controle. Ten slotte is de gebruiksvriendelijkheid van de het schaduwhandboek getest.

### 4.5.1 Sensitiviteitsanalyse

Tijdens een sensitiviteitsanalyse wordt onderzocht in hoeverre het resultaat van het onderzoek wijzigt door in dit geval de instellingen te veranderen. (Minerva, s.a.)

Binnen PVsyst bestaan er twee soorten instellingen, namelijk albedo en gedetailleerde verliezen. Enerzijds werden de parameters die constant bleven bij het opstellen van het schaduwhandboek nu gewijzigd. Het effect van deze wijziging op het schaduwverlies wordt onderzocht. Anderzijds werden de parameters die wijzigden tijdens het opstellen van het schaduwhandboek nu constant gehouden. Zo is een PV-installatie op een schuin dak met een oriëntatie naar het zuiden en een schouw als schaduwobject gekozen om er een sensitiviteitsanalyse op uit te voeren. De schouw zorgde in deze situatie voor een schaduwverlies van 5,10%.

De instellingen waarop de sensitiviteitsanalyse is uitgevoerd, worden achtereenvolgens overlopen.

#### 4.5.1.1 Albedo

De 'albedo' van een object is het weerkaatsingsvermogen van dat object, gedefinieerd als de verhouding tussen de hoeveelheid invallende en gereflecteerde (...) straling. Deze verhouding hangt in de eerste plaats af van het materiaal van het object, maar is tevens afhankelijk van de golflengte van de straling.' (Wikipedia, 2017)

Hoe groter de albedowaarde van de ondergrond is, hoe meer invallende straling wordt gereflecteerd en hoe meer straling de kans heeft om op een zonnepaneel in te vallen. Hoe hoger deze parameters worden ingesteld, hoe meer opbrengst verwacht mag worden. In PVsyst kunnen in het tabblad albedo verschillende gegevens worden ingesteld. De albedowaarde is uiteraard de belangrijkste. Het programma geeft zelf een lijst met waarden afhankelijk van de ondergrond. In stedelijke toepassingen ligt de waarde meestal tussen 0,14 en 0,22. De standaard albedowaarde bedraagt 0,20. Dit wil zeggen dat er 20% van de invallende straling weerkaatst wordt. In de praktijk is deze waarde van minder belang aangezien de albedocomponent een redelijk klein aandeel heeft in de globale irradiatie. In onderstaande figuur staan een aantal waarden afgebeeld met hun bijhorende ondergrond.

Usual values for albedo	
Urban situation	0.14 - 0.22
Grass	0.15 - 0.25
Fresh Grass	0.26
Fresh snow	0.82
Wet snow	0.55 - 0.75
Dry asphalt	0.09 - 0.15
Wet asphalt	0.18
Concrete	0.25 - 0.35
Red tiles	0.33
Aluminium	0.85
New galvanised steel	0.35
Very dirty galavanised stee	0.08

Figuur 4.46: richtwaardes albedo (PVsyst, 2016)

Uit de figuur is bijvoorbeeld af te leiden dat verse sneeuw een albedowaarde van 0,82 heeft. Dat is logisch aangezien sneeuw veel straling weerkaatst. De hoogste waarde 0,85 is voor aluminium. Vervuild gegalvaniseerd staal heeft met 0,08 de laagste reflectiewaarde.

Tabel 4.2: invloed albedowaarde

Albedowaarde	Opbrengst met schouw (kWh/jaar)	Opbrengst zonder schouw (kWh/jaar)	Schaduwverlies (%)
<b>0,20</b>	2510	2645	5,10
<b>0,08</b>	2495	2629	5,10
<b>0,85</b>	2591	2730	5,09

In tabel 4.2 is eenzelfde situatie gesimuleerd met andere albedowaarden. De minimale, de maximale en de gemiddelde albedowaarde zijn in de tabel opgenomen. Het is duidelijk dat naarmate de albedowaarde stijgt, de opbrengst zal stijgen. Dit effect vindt zowel plaats in het geval met of zonder schouw. Het schaduwpercentage blijft nagenoeg hetzelfde, ongeacht een gewijzigde albedowaarde.

#### 4.5.1.2 Gedetailleerde verliezen

Binnen PVsyst zijn er nog zeer veel gedetailleerde verliezen die de gebruiker kan instellen. Albedo handelt meer over de weersomstandigheden en de overeenkomstige instellingen terwijl de gedetailleerde verliezen meer te maken hebben met specifieke instellingen aangaande de installatie.

### Thermische parameters

Het thermisch gedrag van de PV-installatie dat de elektrische prestaties sterk kan beïnvloeden, wordt bepaald door een energiebalans tussen de omgevingslucht en de opwarmende cellen door de instraling:

$$U * (T_{cell} - T_{amb}) = Alpha * G_{inc} * (1 - Effic)$$

$U$  = de thermische verliesfactor [ $W/m^2 \cdot K$ ]

$T_{cell}$  = de celtemperatuur [K]

$T_{amb}$  = de omgevingstemperatuur [K]

$Alpha$  = de absorptiecoëfficiënt van de zonnestraling, typisch 0,9

$G_{inc}$  = de instraling in het vlak [ $W/m^2$ ]

$Effic$  = de PV-efficiëntie

Waar mogelijk wordt de PV-efficiëntie berekend met de bedrijfsomstandigheden van de module. De PV-efficiëntie is de hoeveelheid energie die uit de module gehaald kan worden. Als deze niet berekend kan worden, stelt PVsyst deze zelf in op 10%. Het thermisch gedrag wordt gekarakteriseerd door een thermische verliesfactor namelijk  $U$  (ook K-waarde genoemd). De waarde van  $U$  is op te delen in een constante factor  $U_c$  en een factor evenredig met de windsnelheid  $U_v$ :

$$U = U_c + U_v * v$$

$U_c$  = de thermische geleidingsfactor [ $W/m^2 \cdot K$ ]

$U_v$  = de thermische convectiefactor [ $(W/m^2 \cdot K)/(m/s)$ ]

$v$  = de windsnelheid [m/s]

De constante verliesfactor is afhankelijk van de opstelling van de zonnepanelen. Hoe vrijer de panelen zijn opgesteld, hoe meer lucht rond de panelen kan circuleren, hoe meer energie er kan worden afgegeven aan de omgeving en hoe hoger deze waarde. De bepaling van de parameters is zeer moeilijk correct in te schatten. PVsyst stelt de volgende gevallen voor:

- geïntegreerde panelen met volledig geïsoleerde achterzijde:  $U_c = 15 \text{ W/m}^2\text{K}$
- semi-geïntegreerde panelen met luchtstroom erachter door:  $U_c = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$
- vrij opgestelde panelen met luchtcirculatie:  $U_c = 29 \text{ W/m}^2\text{K}$

Aangezien Izen gebruik maakt van een opstelling die tussen de twee laatste gevallen zit stellen ze deze factor in op  $22 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

De convectiefactor die rekening houdt met de wind is nog moeilijker te bepalen aangezien de wind een zeer plaatselijk gegeven is.

In oude versies van PVsyst was de default instelling van deze parameter  $U_v = 6 \text{ (W/m}^2\text{K)/(m/s)}$ . Dit was opgemeten aan de hand van verschillende installaties op een plat dak met vrije luchtcirculatie rondom. PVsyst gebruikte echter te hoog gemeten windsnelheden waardoor het warmteverlies fout gedimensioneerd werd. Op basis van eigen metingen van gebruikers van PVsyst werd deze parameter ingesteld op  $U_v = 1,2 \text{ (W/m}^2\text{K)/(m/s)}$ . Sinds de laatste versie van PVsyst werd de standaardwaarde gelijk genomen aan nul. Izen gebruikt  $U_v = 0 \text{ (W/m}^2\text{K)/(m/s)}$  omdat hieromtrent nog te veel twijfel is.

Beschouw terug de beginformule:

$$U * (T_{cell} - T_{amb}) = Alpha * G_{inc} * (1 - Effic)$$

Stel dat alle parameters behalve de verliesfactor 'U' en de efficiëntie 'Effic' constant blijven. Wanneer de verliesfactor 'U' toeneemt, dan zal de efficiëntie afnemen. Er gaat meer warmteverlies naar de omgeving waardoor er minder elektrische energie wordt opgewekt in het paneel en de efficiëntie daalt. Er zal meer energie via de omgeving verloren gaan en minder opgewekt worden dan in normale omstandigheden.

Als alle parameters behalve de celtemperatuur en de efficiëntie 'Effic' constant blijven, zal een stijgende celtemperatuur 'Tcell' ervoor zorgen dat de efficiëntie daalt. Dit is correct omdat een kouder paneel meer energie opwekt in vergelijking met een warmer paneel.

Alle parameters, met uitzondering van de verliesfactor 'U', liggen vast binnen PVsyst en de simulaties en de invloed van de U-factor op het resultaat werd onderzocht. Opnieuw is het voorbeeld met de schouw onderzocht.

Tabel 4.3: invloed verliesfactor U

U-waarde ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )	Opbrengst met schouw ( $\text{kWh/jaar}$ )	Opbrengst zonder schouw ( $\text{kWh/jaar}$ )	Schaduwverlies (%)
<b>22</b>	2510	2645	5,10
<b>10</b>	2245	2365	5,07
<b>35</b>	2575	2713	5,09

Tabel 4.3 leidt tot de conclusie dat het aanpassen van de U-factor hetzelfde effect op de energieopbrengst heeft bij de simulatie met of zonder schouw. Aangezien het schaduwpercentage berekend wordt met de verhouding van de simulatie met en zonder schouw, zal de invloed weg gedeeld worden.

Uit het resultaat is af te leiden dat een stijging van de U-waarde een stijging van de efficiëntie en een stijging van de opbrengst teweegbrengt. Dit is enkel te verklaren doordat een stijging van de U-waarde gepaard gaat met een afkoeling van de celtemperatuur. Door de U-waarde te verhogen zal de celtemperatuur zo sterk dalen dat de linkse term van de initiële energiebalans daalt waardoor de efficiëntie toeneemt.

### **Ohmse verliezen**

Onder de Ohmse verliezen vallen zowel de dc- als de ac-kabelverliezen. Dit zijn weerstandsverliezen in zowel het gelijkspannings- als wisselspanningsgedeelte. Bij grote projecten, waarvoor Izen PVsyst gebruikt, zijn deze parameters gedetailleerd berekend waardoor deze nauwkeurig ingesteld zijn. In het kader van het onderzoek werden deze twee factoren toch aangepast om het effect te bestuderen. Net zoals bij albedo en de thermische verliezen hebben deze factoren zowel invloed op installaties met en zonder schaduw. De invloed wordt in de formule weg gedeeld, waardoor het effect van schaduw hetzelfde blijft.

### **Modulekwaliteit**

Deze parameter geeft aan in welke mate de gebruiker geloof hecht aan de door de fabrikant opgegeven specificaties en prestaties van de panelen. Als deze parameter negatief wordt ingesteld door de gebruiker, betekent dit dat de panelen beter zullen presteren dan door de fabrikant opgegeven. Bij het ingeven van een positieve waarde wordt aangenomen dat de panelen iets minder goed presteren. Tijdens de simulaties zal deze factor een constant vermogensverlies induceren op het MPP tijdens de gebruikscondities. Wanneer deze parameter wordt aangepast, zal het effect zich weer weg delen en zal in het eindresultaat geen invloed merkbaar zijn.

### **Mismatch verlies**

Het mismatch verlies treedt op doordat de panelen in een string nooit exact dezelfde karakteristieken vertonen. In de reële situatie wordt een I/V-curve bekomen van de reële karakteristieken van de panelen. Deze factor stelt eigenlijk het verschil in tussen de werkelijke I/V-curve en de I/V-curve wanneer alle panelen 100% hetzelfde zijn. Deze invloed wordt in het eindresultaat weg gedeeld.

### **Andere verliezen**

De voornaamste instellingen zijn uitgelegd. Andere instellingen zoals degradatie van de panelen zijn niet van toepassing gedurende het eerste operationele jaar. Nog andere instellingen zoals een fout in de panelen werden verwaarloosd. Er werd vanuit gegaan dat alles naar behoren functioneerde. De overige verliezen of instellingen werden niet aangepast of werden overgenomen zoals men ze momenteel binnen het bedrijf hanteert.

De sensitiviteitsanalyse maakt duidelijk dat de eventuele fout op de instellingen geen invloed heeft op het resultaat van het schaduwverlies.

#### 4.5.1.3 MPPT

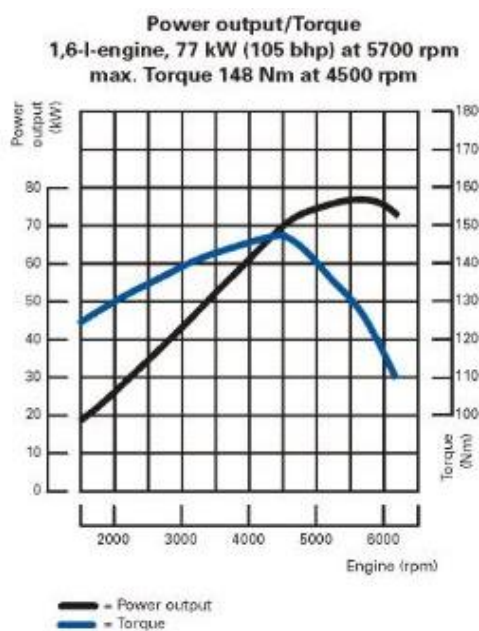
MPPT ofwel maximum power point tracker, is de functie van de omvormer die ervoor zorgt dat op elk moment het maximale vermogen uit de panelen wordt gehaald. Deze functie moet ervoor zorgen dat er op elk moment zoveel mogelijk vermogen opgewekt wordt.

Onder sommige omstandigheden komt het voor dat de omvormer een fout MPP vindt waardoor het optimale vermogen niet uit de panelen gehaald wordt. De volgende sectie handelt hierover.

Het zou te ver leiden om een gedetailleerde werking van het MPPT-mechanisme te beschrijven. Er komt veel elektronica en software bij kijken die in dit onderzoek van ondergeschikt belang zijn. Het basisidee wordt meegegeven om de gedachtegang te kunnen volgen. Dit gedeelte van het onderzoek is bedoeld om de gevolgen te bekijken en niet zozeer om de werking te verklaren.

Vooreerst wordt een voorbeeld gegeven uit een andere context, namelijk de verbrandingsmotor. Vaak wordt onterecht en foutief verondersteld dat het vermogen en koppel van een verbrandingsmotor het hoogste is bij het grootste toerental.

Beschouw onderstaande figuur.



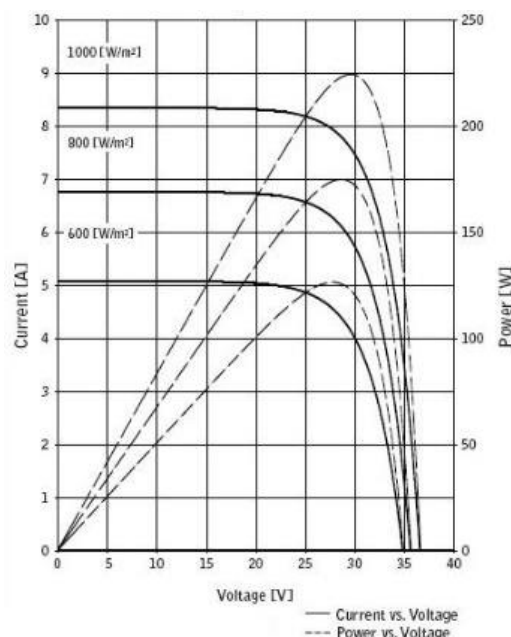
*Figuur 4.47: koppel-toerentalkarakteristiek verbrandingsmotor (Zonnepaneelkiezen, s.a.)*

Bij maximale belasting werkt de motor niet per se optimaal en ook niet bij een laag toerental. Ergens tussenin is zowel individueel het koppel als vermogen optimaal waardoor bij dit overeenkomstig toerental de algemene prestaties optimaal zullen zijn.

Zonnepanelen werken op een identieke manier: waar het toerental en het werkingpunt van de verbrandingsmotor wordt ingesteld door de gebruiker (met het gaspedaal), wordt het werkingpunt bij zonnepanelen ingesteld door de stroom in te stellen die de panelen leveren. De stroom die van de panelen naar de omvormer vloeit, wordt door de omvormer zelf ingesteld. De omvormer bepaalt hoe zwaar de belasting van de panelen is.



Een zonnepaneel zal niet optimaal werken wanneer het maximaal belast wordt. Andersom zal het niet optimaal werken indien er te weinig belasting is. Ergens tussenin moet een evenwicht gezocht worden, het MPP.



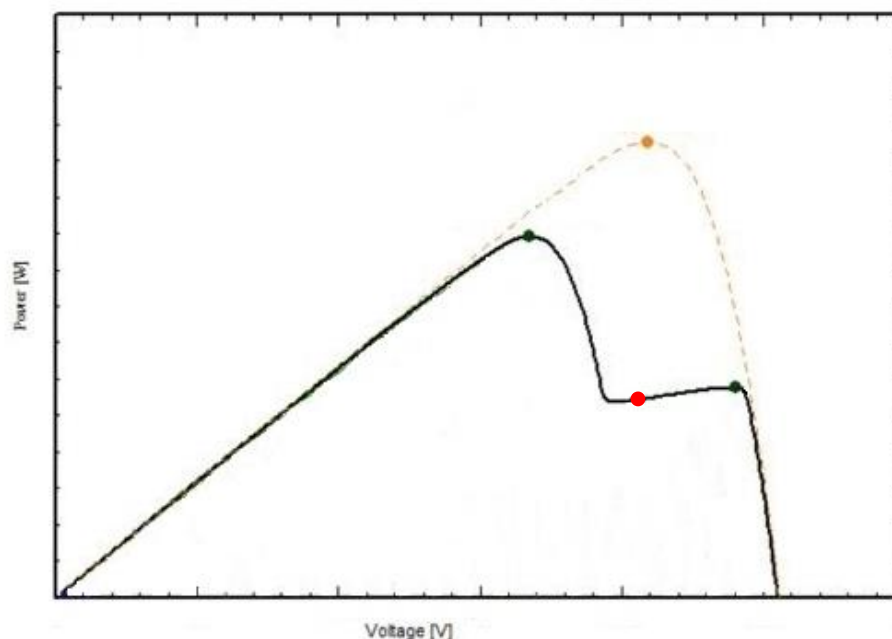
Figuur 4.48: IV- en PV-curve van een zonnepaneel (Zonnepaneelkiezen, s.a.)

Figuur 4.48 geeft de IV- en PV-curves van hetzelfde paneel weer. Eerst wordt de IV-curve besproken. Als de omvormer kiest om het paneel zijn maximale stroom te laten leveren (helemaal links in de figuur), dan is de spanning van het paneel gelijk aan nul. Het vermogen in dat punt is gelijk aan nul.

Stel dat de omvormer ervoor kiest om zo veel mogelijk spanning uit het paneel te trekken, dan bedraagt de stroom nul. Het vermogen is wederom gelijk aan nul. Deze twee uitersten zijn te vermijden. Tussen deze twee uitersten ligt een punt waarbij het product van spanning en stroom, het vermogen, maximaal is.

In de figuur is het mogelijk om op deze manier uit de IV-curve van het paneel bij 1000 W/m<sup>2</sup> af te leiden dat dit punt voorkomt bij 30 V en 7,5 A dit geeft een vermogen van 225 W. Uit de IV-curve is het mogelijk om eenvoudig de PV-curve af te leiden.

Het punt van maximumvermogen is geen vast punt, er zijn een aantal parameters die hierop invloed hebben. De instraling, temperatuur, schaduw, enz.... hebben allemaal invloed. In figuur 4.48 verschuift het MPP naar links wanneer de instraling daalt. Het is de taak van de omvormer om op ieder moment het MPP te zoeken om zoveel mogelijk vermogen op te wekken. Dit wordt MPPT of maximum power point tracking genoemd. (Zonnepaneelkiezen, s.a.)



Figuur 4.49: PV-curve met schaduw (PVsyst, 2016)

Bovenstaande figuur bespreekt twee curves, zowel die van een niet als wel beschaduwd paneel. De stippellijn curve van een niet beschaduwd paneel heeft maar één punt van maximumvermogen. De omvormer zal steeds in dit punt komen. Hoe dit gebeurt, volgt later. Wanneer een cel of paar cellen beschaduwd zijn, zal de PV-curve in stippellijn evolueren naar de curve in volle lijn. Zoals aangeduid, zijn er twee maxima in die curve. Het kan gebeuren dat de omvormer het verkeerde punt vindt en onder het maximumvermogen werkt terwijl er een beter punt mogelijk was.

Een omvormer kan op een paar manieren het MPP zoeken. Het is voor dit onderzoek enkel relevant om de eenvoudigste werking uit te leggen. De omvormer begint de curve af te zoeken, en zolang het vermogen stijgt, gaat de omvormer in diezelfde richting de curve aflopen. Vanaf het ogenblik dat het vermogen daalt, gaat hij iets terug in de curve om op het maximum punt te blijven. Op die manier vindt de omvormer steeds één maximum op de curve in stippellijn.

Tijdens de werking gaat de omvormer op regelmatige tijdsbasis links en rechts van zijn werkingpunt kijken of daar meer vermogen te halen is. Als dat het geval is, zal hij opschuiven in de curve, indien niet behoudt hij zijn actuele werkingpunt. Wanneer de omvormer bijvoorbeeld in het middelste punt van de volle curve werkt, zal hij naar rechts opschuiven, het vermogen stijgt. Terwijl het vermogen in het linkse MPP op de volle curve beduidend hoger ligt.

Sommige omvormers werken anders en gaan op frequente tijdsbasis de hele curve scannen en controleren of hun werkingpunt effectief het maximum is. Deze worden niet besproken omdat in het onderzoek de klassieke omvormer werd ingezet.

PVsyst is een wiskundig model dat bij het simuleren steeds in het maximale MPP zal werken. Het houdt geen rekening met de vorige stand van de MPP. In dit opzicht zijn de simulaties voor het schaduwhandboek niet streng genoeg. In de toekomst, zodra de MPPT beter zal werken, zal deze fout minder doorwegen.

Het resterende deel van dit hoofdstuk doet een poging om de invloed van deze fout te onderzoeken.

De situatie gebruikt voor de sensitiviteitsanalyse wordt hier eveneens toegepast: een eenvoudig huis met een schoorsteen en een installatie met tien zonnepanelen. Daarna werden twaalf dagen gesimuleerd om gedurende elk kwartier het maximum en het minimum MPP te zoeken. Het vermogen in beide punten werd genoteerd. Om een zo goed mogelijk beeld te krijgen van de werkelijke situatie dienen zoveel mogelijk dagen per jaar gecontroleerd te worden. Aangezien de waarden per kwartier genoteerd zijn voor dit onderzoek, is dit onbegonnen werk om veel dagen te simuleren. Een andere werkwijze werd gehanteerd om toch een overzicht te krijgen.

Het jaar werd in de vier 'seizoenen' ingedeeld. De term seizoenen klopt niet helemaal omdat de indeling niet exact overeenkomt met de bestaande seizoenen. Voor de eenvoud gebruikt de studie toch de term seizoenen. Per seizoen werden er telkens drie referentiedagen gekozen: een bewolkte dag met nauwelijks zonnestraling, een dag met gemiddelde zonnestraling en een zonnige dag met veel zonnestraling. Voor iedere dag, twaalf in totaal, werden het maximum en minimum MPP per kwartier genoteerd. Nadien zijn deze twaalf dagen op een doordachte manier geëxtrapoleerd naar een heel jaar.

De opdeling van het jaar ziet er als volgt uit:

05-02 tot 05-05: seizoen 1 lente  
 05-05 tot 05-08: seizoen 2 zomer  
 05-08 tot 05-11: seizoen 3 herfst  
 05-11 tot 05-02: seizoen 4 winter

De referentiedagen zijn hieronder weergegeven.

Lente:            Bewolkte dag: 23-03-90 (1,8 kWh/m<sup>2</sup>)  
                     Gemiddelde dag: 20-03-90 (4,0 kWh/m<sup>2</sup>)  
                     Zonnige dag: 21-03-90 (6,8 kWh/m<sup>2</sup>)

Zomer:            Bewolkte dag: 20-06-90 (3,4 kWh/m<sup>2</sup>)  
                     Gemiddelde dag: 22-06-90 (7,3 kWh/m<sup>2</sup>)  
                     Zonnige dag: 24-06-90 (8,8 kWh/m<sup>2</sup>)

Herfst:            Bewolkte dag: 16-09-90 (2,3 kWh/m<sup>2</sup>)  
                     Gemiddelde dag: 17-09-90 (5,0 kWh/m<sup>2</sup>)  
                     Zonnige dag: 18-09-90 (6,9 kWh/m<sup>2</sup>)

Winter:            Bewolkte dag: 08-12-90 (0,8 kWh/m<sup>2</sup>)  
                     Gemiddelde dag: 11-12-90 (1,9 kWh/m<sup>2</sup>)  
                     Zonnige dag: 07-12-90 (3,4 kWh/m<sup>2</sup>)

Naast elke dag is de opbrengst in kWh/m<sup>2</sup> genoteerd als referentie. De onderzochte dagen vallen telkens ongeveer in het midden van elk seizoen. Voor elk van bovenstaande dagen zijn er per kwartier twee vermogens genoteerd, één in elk MPP. Voor die referentiedag zijn alle gegevens gesommeerd zodanig dat er uiteindelijk nog maar twee globale vermogens overblijven, de ene keer indien de omvormer in het maximum MPP werkt en een ander keer wanneer hij in het minimum MPP werkt.

Daarna zijn de gegevens van een typisch jaar opgevraagd als referentie. Dit zijn de opbrengstgegevens per dag uitgedrukt in kWh/m<sup>2</sup>. PVsyst stelt 1990 gelijk aan een typisch jaar, vandaar deze data. De gegevens zijn van Ukkel uit de MeteoNorm 7.1 databank.

Om de twee vermogens van elk van de drie referentiedagen per seizoen te extrapoleren naar twee vermogens voor heel dat seizoen, is een tussenstap nodig. Het is noodzakelijk om aan elk van de drie referentiedagen per seizoen een wegingsfactor toe te kennen om deze te kunnen extrapoleren. Deze dagen vormen samen met hun wegingsfactor een resultaat dat representatief is voor heel de periode.

Alle dagen van een typisch jaar in PVsyst zijn ondergebracht in hun seizoen. Per dag is de opbrengst in kWh/m<sup>2</sup> gekend. Per seizoen is de slechtste en de beste dag geselecteerd, met andere woorden die dagen met een maximale en minimale opbrengst. Tussen het minimum en het maximum zijn twee tussenwaarden genomen zodat er drie ranges ontstaan.

Een voorbeeld voor seizoen 1:

Tabel 4.4: seizoen 1

<b>SEIZOEN 1</b>	<b>Bewolkt</b>	<b>Gemiddeld</b>	<b>Zonnig</b>
<b>Instraling referentiedag (kWh/m<sup>2</sup>)</b>	1,8	4	6,8

De minimale opbrengst voor een dag in dat seizoen bedroeg: 0,404 kWh/m<sup>2</sup>

De maximale opbrengst voor een dag in dat seizoen bedroeg: 7,632 kWh/m<sup>2</sup>

Deze waardes werden gevonden in de dagen van het typische jaar in PVsyst.

De drie ranges werden als volgt opgedeeld;

Range 1: 0,404 – 2,900 kWh/m<sup>2</sup>

Range 2: 2,900 – 5,400 kWh/m<sup>2</sup>

Range 3: 5,400 – 7,632 kWh/m<sup>2</sup>

De ranges zijn zo gekozen dat de referentiedag net in het midden van een range valt. De opbrengst van de dagen van een typisch jaar die bij seizoen 1 behoren, kunnen nu in exact één range per seizoen worden ingedeeld aan de hand van hun opbrengst in kWh/m<sup>2</sup>. Op die manier zijn alle dagen van het typische jaar opgedeeld in juist één range binnen één seizoen. Vervolgens worden alle opbrengsten per range gesommeerd. Deze kWh/m<sup>2</sup> opbrengst per range is het gewicht dat gekoppeld wordt aan de bijhorende referentiedag per range. Voorbeeld voor seizoen 1.

Tabel 4.5: ranges voor seizoen 1

	<b>Range 1</b>	<b>Range 2</b>	<b>Range 3</b>	<b>Totaal</b>
<b>Aantal dagen van typisch jaar per range</b>	48	24	17	89
<b>Opbrengst (kWh/m<sup>2</sup>)</b>	77,488	96,351	110,273	284,112
<b>Gewicht</b>	0,273	0,339	0,388	1

Voor elke range is er één referentiedag en per referentiedag zijn er twee vermogens (die van het maximum MPP en het minimum MPP). Voor Range 1 worden deze twee gegevens vermenigvuldigd met 0,273. Voor range 2 en 3 wordt een analoge vermenigvuldiging gemaakt. Daarna worden al deze vermogens gesommeerd, zodat er per seizoen nog maar twee vermogens overblijven.

Nu moeten de vier periodes nog worden doorgerekend voor een heel jaar. De zomer kan immers harder doorwegen dan de wintermaanden. Als gewicht is de som van de opbrengsten van alle dagen van een seizoen gebruikt.

Tabel 4.6: opbrengst per seizoen

	<b>Opbrengst (kWh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Procentueel</b>
<b>Seizoen 1</b>	284,112	24%
<b>Seizoen 2</b>	445,701	38%
<b>Seizoen 3</b>	330,038	28%
<b>Seizoen 4</b>	114,401	10%
<b>Som</b>	1174,252	100%

De twee vermogens per seizoen worden met de procentuele verhouding van tabel 4.6 vermenigvuldigd. De gegevens van seizoen 1 worden vermenigvuldigd met 24%. Per seizoen wordt dit gedaan en tot slot gesommeerd. Op deze manier zijn er twaalf referentiedagen, degelijk onderbouwd en doorgerekend, om de invloed voor een heel jaar te bepalen. De jaarresultaten zijn in onderstaande tabel weergegeven:

Tabel 4.7: invloed MPP op jaarbasis

<b>Maximum MPP (Watt)</b>	<b>Minimum MPP (Watt)</b>
61837,05	49743,80
100%	80%

Conclusie:

Het verschil tussen het vermogen opgewekt in het maximale MPP en het vermogen opgewekt in het minimale MPP bedraagt 20% op jaarbasis. Dit grote verschil kan te verklaren zijn door de extrapolatie van slechts 12 dagen naar een volledig jaar.

Deze extrapolatie is op een weldoordachte maar misschien foute manier gebeurd.

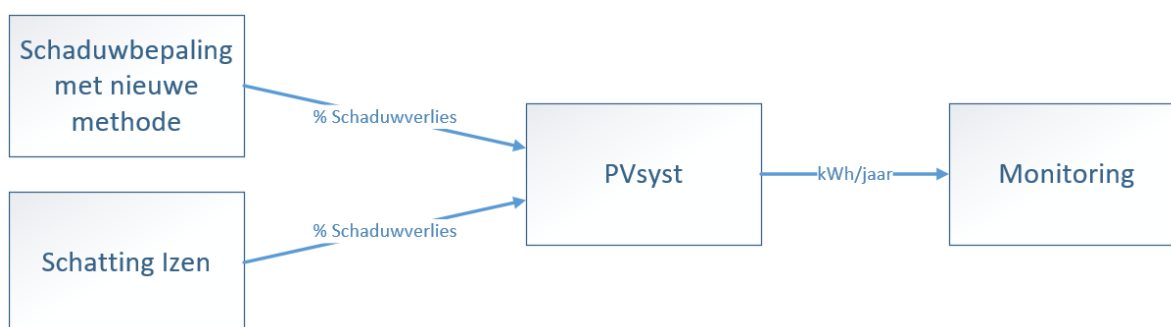
Deze besluitvorming rond MPP-tracking is gebaseerd op één willekeurig gekozen concreet voorbeeld en vermoedelijk geeft dit toch een vertekend beeld van de werkelijkheid. Om betere resultaten te verkrijgen is het noodzakelijk om meerdere gevallen te simuleren en de gegevens binnen een zo klein mogelijke tijdsbasis te noteren. Door tijdsgebrek en irrelevantie voor deze masterthesis is er niet verder op ingegaan.

Tot slot is het belangrijk om op te merken dat de gebruikte vermogens telkens om de 15 minuten genoteerd zijn. Het is mogelijk dat net tussen deze twee meetpunten er van veel schaduw naar geen schaduw wordt overgegaan. Als dit het geval is, vertoont de IV-curve ineens een sprong waarbij men kan veronderstellen dat de omvormer in het slechte MPP zit te werken, terwijl in werkelijkheid de grafiek tijdens het kwartier op een zodanige manier is geëvolueerd dat er toch in het maximale MPP gewerkt wordt. Dit is een onvermijdbare fout.

Omdat het resultaat zo onzeker is, wordt dit niet verwerkt in de opbrengstberekening. Het fenomeen dat PVsyst steeds in het maximaal MPP werkt en dit in werkelijkheid niet het geval kan zijn, wordt in het achterhoofd gehouden. Het kan een mogelijke verklaring zijn indien blijkt dat de nieuw ontwikkelde methode het schaduwverlies systematisch te laag inschat. Het volgende hoofdstuk onderzoekt dit.

#### 4.5.2 Testen van methode

De methode die in deel 4.3 ontwikkeld is om een percentage schaduwverlies te berekenen, dient afgetoetst te worden aan de realiteit. Schaduwverlies is in werkelijkheid niet te meten, de kilowattuuropbrengst wel. PVsyst zorgt voor de nodige tussenstap aangezien PVsyst de kilowattuuropbrengst en het schaduwpercentage kan berekenen. De schaduw-schattingen van Izen gebruiken dezelfde tussenstap om te toetsen aan de realiteit.

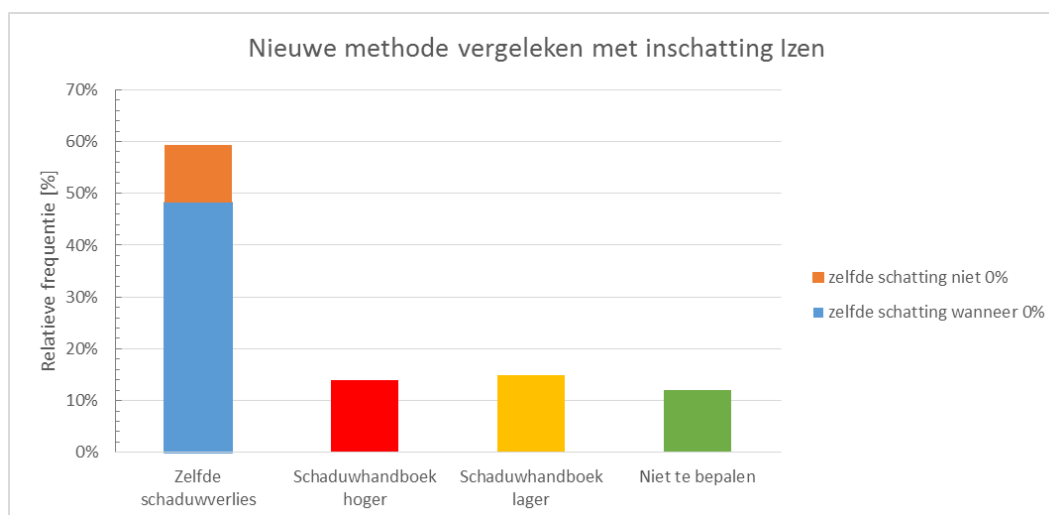


Figuur 4.50: werkwijze voor controlemethode schaduwbepaling

De bovenstaande figuur toont hoe PVsyst een vergelijking maakt tussen de schaduw-schattingen van Izen en de bepaling van het schaduwverlies met de nieuw ontwikkelde methode.

Vooraleer de correctheid van de nieuwe methode te onderzoeken, worden de absolute waarden van het schaduwverlies geschat door Izen en het schaduwverlies bepaald door de nieuwe methode met elkaar vergeleken aan de hand van eenzelfde situatie. De onderstaande figuur geeft het resultaat voor de vergelijking bij de groepsaankoop.

Indien er schaduw is, geeft Izen ongeveer voor één op vijf van de gevallen hetzelfde schaduwverlies als de nieuw ontwikkelde methode. In drie van de vijf gevallen is er geen overeenkomst. Voor een ander gedeelte was het niet mogelijk om met de schaduwhandboek een concreet schaduwverlies te bepalen. Dit komt omdat er schaduw-elementen zijn die niet in het schaduwhandboek werden opgenomen of omdat er niet genoeg gegevens voorhanden waren om een beeld van de situatie te krijgen.



Figuur 4.51: schaduwverlies methode vergeleken met schaduwverlies Izen voor de groepsaankoop

Voor de volgende nauwkeurigheidstests wordt een query gemaakt uit de steekproef van installaties die voldoen aan onderstaande voorwaarden:

- De monitoring van de installatie heeft een volledig jaar gewerkt.
- Met behulp van de nieuw ontwikkelde methode is een schaduwverlies bekomen, niet gelijk aan 0%.
- De nieuw ontwikkelde methode kan het schaduwverlies vastleggen.
- De zonnepanelen van de installatie zijn allemaal op dezelfde manier georiënteerd en hebben allemaal dezelfde helling.
- Er zijn voldoende gegevens voorhanden om de PV-installatie en omgeving te tekenen met PVsyst.

Er zijn 22 installaties die voldoen aan deze voorwaarden. Het was beter geweest indien de installaties geïnstalleerd op een plat dak eruit gelaten werden, zodat de fout door deze factor geen invloed heeft op de controle van de schaduwverliezen. 22 installaties is echter een laag aantal om wetenschappelijk onderzoek mee te verrichten. Om deze reden neemt de query de installaties geïnstalleerd op een plat dak, op. Er is op het moment van het onderzoek niet meer data beschikbaar. Om het onderzoek te verbeteren, kan in toekomst de inhoud van de query uitgebreid worden door blijvend de installaties op te volgen.

#### 4.5.2.1 Schatting en methode vergelijken met PVsyst

In deze eerste stap beschouwen de tests PVsyst als werkelijkheid. De daaropvolgende stap vergelijkt PVsyst met de monitoring van de installaties.

Elke installatie uit de query is tweemaal gesimuleerd in PVsyst. De eerste keer zonder en de tweede keer met schaduwelementen van de omgeving. Het procentueel verschil tussen deze simulaties is het schaduwverlies. Drie tests vergelijken elk op een andere manier het percentage schaduwverlies van Izen en het percentage van de nieuwe methode met het gesimuleerde schaduwverlies door PVsyst. De vergelijkingen krijgen de benaming test 1, test 2 en test 3.

De tekst wordt verduidelijkt aan de hand van een voorbeeld:

Izen schat een schaduwverlies van 10%, de nieuwe methode resulteert in een schaduwverlies van 5%. Het schaduwpercentage gesimuleerd door PVsyst bedraagt 6,6%.

## Test 1

De eerste test bestaat uit een scoresysteem waarbij Izen en/of de nieuwe methode één punt krijgt als het schaduwverlies van PVsyst in dezelfde klasse ligt. Zoals eerder uitgelegd klasseert de nieuwe methode de schaduw als volgt:

$$z = 0\% \Leftrightarrow y \in [0\%; 1\%]$$

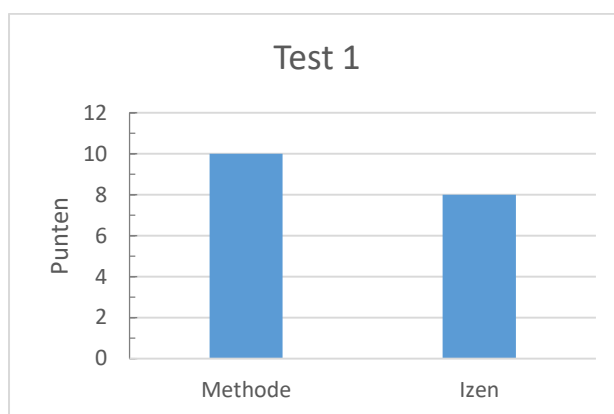
$$z = 5\% \Leftrightarrow y \in ]1\%; 6\%]$$

$$z = 10\% \Leftrightarrow y \in ]6\%; 11\%]$$

$$z = 20\% \Leftrightarrow y \in ]11\%; 20\%]$$

$$z = y \Leftrightarrow y \in ]20\%; 100\%]$$

Uit de klasseringsmethode van Izen volgt dat het gesimuleerd schaduwpercentage van 6,6% overeenkomt met 10% schaduwverlies. Daardoor krijgt Izen een punt en de methode niet. De onderstaande figuur geeft het eindresultaat van deze test voor alle gevallen weer.



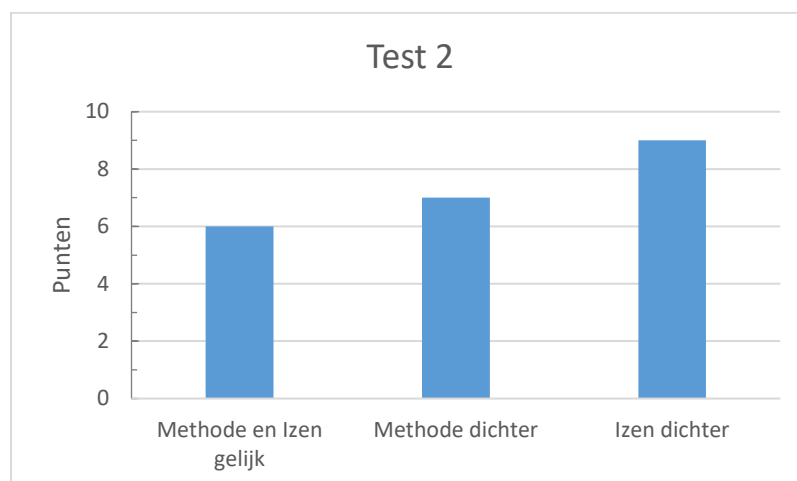
*Figuur 4.51: test 1*

De resultaten van deze test geven aan dat de nieuw ontwikkelde methode het schaduwverlies beter inschat. Het is wel op te merken dat de som van het aantal punten van de steekproef kleiner is dan 22. In sommige gevallen schatten zowel het schaduwhandboek als Izen verkeerd.

## Test 2

De tweede test berekent het absoluut verschil tussen het schaduwverlies van Izen en PVsyst enerzijds en het absoluut verschil tussen de methode en PVsyst anderzijds. Het schaduwverlies, hetzij van Izen of van de methode, dat het kleinste verschil geeft met het schaduwverlies van PVsyst krijgt een punt. In geval van het voorbeeld zou nu de methode een punt krijgen en Izen niet. Het onderstaande staafdiagram geeft het resultaat voor alle gevallen weer.





Figuur 4.52: test 2

Uit het resultaat blijkt dat Izen beter het schaduwverlies inschat. Het resultaat is onderworpen aan een statistische test. Het besluit wordt genomen op basis van een 5% significantieniveau.  $\pi$  stelt de proportie voor. Dit is de kans dat de nieuwe methode het schaduwverlies even goed of beter bepaalt dan de werfvoorbereiders van Izen.

H0 hypothese: de nieuw ontwikkelde methode benadert het schaduwverlies van PVsyst even goed als de schattingen van Izen. ( $\pi = 0,5$ )

H1 hypothese: de nieuw ontwikkelde methode benadert het schaduwverlies van PVsyst minder goed dan de schattingen van Izen. ( $\pi < 0,5$ )

De Z-test van de proportie berekent in dit geval  $p=0,1969$ . De kans op een type I fout waarbij het besluit H0 verwerpt, hoewel H0 toch waar is, is groter dan de kritische waarde van 0,05. Er is geen significante aanwijzing om de H0 hypothese te verwerpen. Er mag aangenomen worden dat de nieuw ontwikkelde methode het schaduwverlies van PVsyst even goed benadert als de schattingen van Izen.

Opmerking: de Z-test mag enkel gebruikt worden bij normaliteit. De binomiaal verdeling  $B(22;0,5)$  mag enkel normaal benaderd worden als ze voldoet aan de voorwaarden in onderstaande tabel:

Tabel 4.8: voorwaarden tot normaliteit nagaan

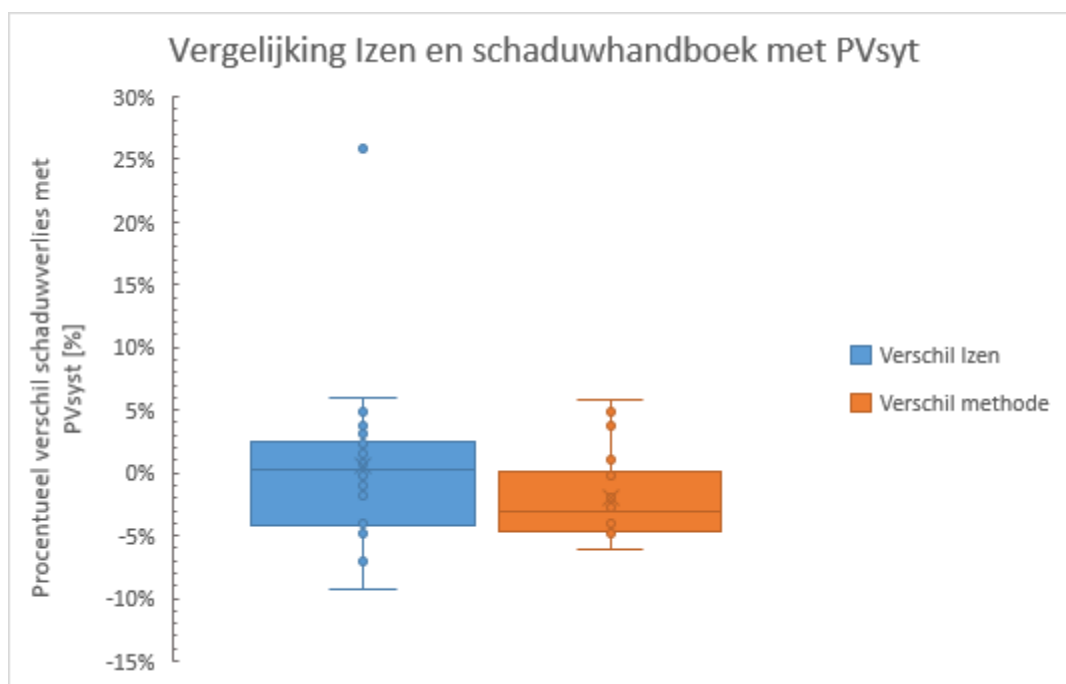
Voorwaarde	Berekening	Besluit
$n \geq 30$	$n = 22$	Voldoet niet
$n * \pi > 5$	$n * \pi = 22 * 0,5 = 11$	Voldoet
$n * (1 - \pi) > 5$	$n * (1 - \pi) = 22 * (1 - 0,5) = 11$	Voldoet

Deze controle leidt tot het besluit dat de test niet sterk genoeg is, omdat de geteste getallenreeks niet de normaliteit kan benaderen.  
(Coppens, s.a. a; Coppens, s.a. b)

### Test 3

Test 3 is een 'winner takes all' methode. Wanneer bijvoorbeeld in de eerste situatie Izen het beste resultaat geeft en de nieuwe methode net iets slechter, dan gaat het punt naar Izen. In het tweede geval kan de nieuwe methode het beste resultaat geven en Izen een veel slechter. Na deze twee gevallen zou de stand 1 tegen 1 staan, hoewel de nieuwe methode globaal gezien een correctere inschatting van het schaduwverlies geeft.

Om dit in rekening te brengen, zijn de absolute verschillen van test 2 uitgezet in boxplots. Deze zijn in de onderstaande figuur te zien.



Figuur 4.53: vergelijking absolute verschillen tussen PVsyst schaduwverlies en schaduwverlies door Izen of de nieuwe methode

De boxplots tonen dat Izen een kleinere systematische fout heeft, maar dat de spreiding met de nieuwe methode kleiner is. De onderstaande tabel met de kenmerkende getallen bevestigt dit. Het schaduwverlies vastgelegd door middel van de nieuw ontwikkelde methode overschat systematisch het werkelijke schaduwverlies. Hier zijn twee verklaringen voor. Ten eerste is het schaduwhandboek opgebouwd op basis van steeds veilige beslissingen. Ten tweede trekt de nieuwe methode bij het klasseren het schaduwverlies op.

Tabel 4.9: statistische kenmerken voor getallenreeks van Izen en methode

	<b>Izen</b>	<b>Methode</b>
<b>Mediaan</b>	0,2%	-3,1%
<b>Gemiddelde</b>	0,5%	-2,0%
<b>Standaardafwijking</b>	6,7%	3,4%

Test 3 geeft het meest gedetailleerde resultaat weer. De test is doorslaggevend inzake conclusies over de nieuw ontwikkelde methode. Izen opteert liever voor een methode die systematisch een iets te groot schaduwverlies berekent. De nieuwe methode geeft tevens een lagere spreiding. Deze twee redenen zorgen ervoor dat de nieuwe methode op functioneel vlak geslaagd is.

#### 4.5.2.2 PVsyst vergelijken met monitoring

In het vorige deel werden de schaduwpercentages, door PVsyst gesimuleerd, voor werkelijkheid aangenomen. Dit is niet helemaal correct. De tweede stap onderzoekt de fout tussen de simulatie van PVsyst en de werkelijkheid. De fout tussen de monitoring en de werkelijkheid wordt verwaarloosd.

Alle installaties in de query zijn getekend in PVsyst. Veel van de afstanden zijn geschat. Hiervoor zijn foto's van de werfvoorbereiders, satellietfoto's en openbare foto's van de databank van Google gebruikt. Het tekenen van de omgeving is daardoor onnauwkeurig. Voor enkele installaties was een degelijke schatting onmogelijk en daarom niet opgenomen in de query.

Om PVsyst te vergelijken met de werkelijkheid wordt de jaarlijkse energieopbrengst die gesimuleerd is door PVsyst vergeleken met de energieopbrengst van de monitoring. Het absolute verschil van twee installaties kan niet vergeleken worden. Er zijn immers PV-installaties die veel energie genereren, bv. 8000 kWh/jaar, en installaties die minder energie genereren, bv. 2000 kWh/jaar.

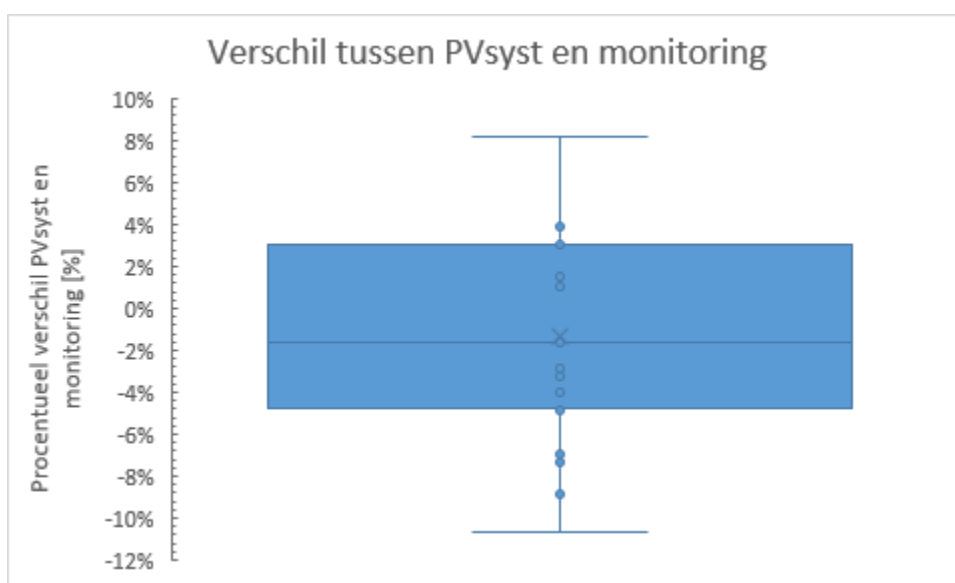
Wanneer de rekentool voor twee verschillende installaties, een opbrengst met een absoluut verschil van 200 kWh/jaar zou berekenen, dan zou de benadering voor de grote installatie veel beter zijn in vergelijking met de kleine installatie. Het absolute verschil is nochtans gelijk. Om die reden gebruikt de test het procentueel verschil van elke PV-installatie. De onderstaande formule berekent het procentueel verschil:

$$V = \frac{E_{verw}}{E_{mon}} - 1$$

$V$  = het procentuele verschil [%]

$E_{mon}$  = de gemonitorde energieopbrengst [kWh/jaar]

De onderstaande figuur geeft het verschil in procenten weer.



Figuur 4.54: verschil in procenten tussen jaaropbrengst PVsyst en monitoring

De onderstaande tabel geeft de statistische kenmerkende getallen van de boxplot. Om te kunnen besluiten dat PVsyst voldoende goed de realiteit benadert, zou er geen systematische fout mogen zijn en moet de spreiding klein genoeg zijn.

Tabel 4.10: kenmerkende getallen van verschil tussen PVsyst en monitoring

<b>Gemiddelde</b>	-1,3%	<b>Maximum</b>	8,2%
<b>Mediaan</b>	-1,6%	<b>Minimum</b>	-10,7%
<b>Standaardafwijking</b>	4,8%		

Gebaseerd op de mediaan en het gemiddelde blijkt dat PVsyst de opbrengst systematisch een klein beetje beter inschat dan ze in werkelijkheid is. Een statistische test controleert of dit werkelijk zo is. Het besluit wordt genomen op basis van een 5% significantieniveau.  $\mu_D$  stelt de verwachtingswaarde voor van de absolute verschillen tussen de werkelijke en de berekende opbrengst bij een bepaalde installatie.

H0 hypothese: het gemiddelde is gelijk aan 0 ( $\mu_D = 0$ )

H1 hypothese: het gemiddelde is niet gelijk aan 0 ( $\mu_D \neq 0$ )

De T-test gebruikt het absolute verschil tussen de installaties. Deze geeft als uitkomst  $p=0,8826$ . De kans dat een type I fout wordt gemaakt, is groter dan de vooropgestelde 0,05. H0 wordt niet verworpen. Er is geen systematische fout. De resultaten van PVsyst voldoen aan de eerste voorwaarde.

Er is geen kritische waarde gegeven over de spreiding. Hier is een beschrijvend besluit genomen. Uitgaande van de minimumwaarde, de maximumwaarde en standaardafwijking in de bovenstaande tabel wordt besloten dat het toch moeilijk is om de installaties en omgeving te tekenen met de gegevens die voorhanden zijn. (Coppens, s.a. a; Coppens, s.a. b)

#### 4.5.3 Gebruikstest

Deze test gaat na, in welke mate de werfvoorbereiders met het schaduwhandboek kunnen werken. De bedoeling is dat ze een specifiek percentage schaduw uit het schaduwhandboek halen.

De test bestaat uit vijf situaties waarvoor de werfvoorbereiders in totaal zeven schaduwpercentages moeten zoeken. De oefeningen zijn zo opgebouwd dat de percentages één op één in het schaduwhandboek te vinden zijn. De werfvoorbereiders moeten niet interpoleren tussen twee resultaten. Dit neemt alle subjectiviteit weg.

Vijf werfvoorbereiders hebben zich kandidaat gesteld. De werfvoorbereiders hebben een digitale versie van de pdf gekregen zonder enige uitleg over de werking van het schaduwhandboek. Ze moeten de werkwijze terugvinden in het schaduwhandboek. De onderstaande tabel geeft de resultaten.

Tabel 4.11: resultaten werfvoorbereiders

	Schaduwverlies per element	Globaal geklasseerd schaduwverlies per installatie
<b>C.B.</b>	7/7	5/5
<b>B.B.</b>	4/7	4/5
<b>J.H.</b>	2/7	2/5
<b>M.G.</b>	5/7	5/5
<b>G.V.</b>	3/5*	3/4*
<b>Totaal</b>	<b>64%</b>	<b>79%</b>

\*G.V. heeft niet alle oefeningen gemaakt.

De meeste fouten zijn gemaakt door het niet juist kiezen tussen een plat of een schuin dak. Daarna zijn de meeste fouten gemaakt, in geval van meerdere strings, door de regel niet goed toe te passen. Deze fouten zijn vooral te wijten aan het ontbreken van een goed overzicht bij de digitale pdf en doordat er geen uitleg aan de oefeningen voorafging. Een woordje uitleg vooraf had het belang van de regel duidelijk kunnen maken.

Het systeem is robuust gebleken. De werfvoorbereider mag zelfs een aantal schaduwverliezen van afzonderlijke elementen fout inschatten vooraleer het globaal geklasseerde schaduwverlies toegekend aan een installatie, totaal fout is.

Aan de werfvoorbereiders werd nog gevraagd wat ze van het schaduwhandboek vonden. Uit onderstaande citaten blijkt dat de werfvoorbereiders zeer tevreden zijn over het schaduwhandboek.

'Ik ben waarschijnlijk al te laat maar bij deze wou ik toch nog even zeggen dat ik jullie tabellenboek heel erg handig vind. Dit zorgt ervoor dat het maken van een inschatting vlotter en gemakkelijker verloopt!' (Breugelmans, 2017)

'Zoals ook vorige keer gezegd, ben ik wel fan van dit boekje. Eens je er wat meer mee gewerkt hebt, zal alles nog een stuk vlotter gaan om op te zoeken.' (Gilis, 2017)

'Boek is zeer overzichtelijk en makkelijk te gebruiken. Zeer goed voor een inschatting te maken op een korte tijd.' (Van Hoolst, 2017)

## 5 BASIS GENORMALISEERDE OPBRENGST

De huidige formules waarmee Izen de opbrengst van residentiële PV-installaties berekent, bevatten een omzettingsfactor. Deze factor zet het geïnstalleerd vermogen van een installatie om in een energieopbrengst op jaarbasis. De waarde van deze omzettingsfactor is voor de twee gebruikte formules, de dimensioneringsformule en de garantieformule, verschillend.

Dit hoofdstuk begint met een onderzoek naar de omzettingsfactor. Het geeft een definitie en naam aan deze omzettingsfactor en bepaalt nadien de waarde ervan. Het onderzoek gebruikt hiervoor de databank van de installaties van de tweede groepsaankoop van Antwerpen. Omdat deze steekproef niet aselekt is, dient de gemaakte fout onderzocht te worden.

### 5.1 Definitie

Het resultaat van het onderzoek van de masterthesis is gebaseerd op de huidige garantieformule:

$$E_{gar} = O * P_{inst} * H * (1 - S_{omg}) * (1 - S_{inst}) * (1 - A)$$

De omzettingsfactor 'O' in deze formule zet het geïnstalleerd vermogen van de PV-installatie om in een energieopbrengst op jaarbasis. Later brengt deze formule een aantal verliezen in rekening zoals de verliezen door HESPUL, de verliezen door schaduw en de aftopverliezen. Deze verliezen zijn voor elke individuele installatie verschillend. Er zijn echter nog factoren die invloed hebben op de energieopbrengst waarmee de formule geen rekening houdt. Voorbeelden hiervan zijn: kabelverliezen, stofbedekking, convectieve afkoeling door wind, albedo-effect door omgeving, ... Per installatie zijn deze invloeden nooit dezelfde.

Om een nauwkeurigere berekening voor een specifieke installatie te maken, zouden meer factoren onderzocht moeten worden. De werfvoorbereider zou de grootte van elke invloed voor elke installatie vast moeten leggen. Een nieuwe formule verrekenet al deze factoren in de opbrengst. Dit zou de berekening voor de werfvoorbereider veel te complex en tijdrovend maken. Daarom wordt een andere methode toegepast. Het doel van de masterthesis is om een rekentool te voorzien die een goede balans biedt tussen nauwkeurigheid en gebruiksgemak. Daarom werden enkel de factoren van de garantieformule onderzocht.

Alle invloeden die niet specifiek in rekening zijn gebracht met deze formule, zitten vervat in de omzettingsfactor. Omdat de invloeden variëren van installatie tot installatie, heeft de omzettingsfactor een spreiding en een gemiddelde. Het zou niet correct zijn om de waarde die het onderzoek later toekent aan de omzettingsfactor als volledig accuraat te beschouwen. Deze factor heeft een onvermijdbare onnauwkeurigheid omdat hij een heleboel invloeden bevat die installatie-afhankelijk zijn. De opbrengstformule kan slechts met één getal rekenen. Daarom zal de omzettingsfactor in feite het gemiddelde zijn van alle omzettingsfactoren.

In samenspraak met de co-promotor heeft de omzettingsfactor in deze formule de naam 'basis genormaliseerde opbrengst' of BNO gekregen. Deze factor wordt als volgt gedefinieerd:

De basis genormaliseerde opbrengst is de gemiddelde verhouding tussen de geproduceerde energie op jaarbasis [kWh/jaar] van een PV-installatie in Vlaanderen en het geïnstalleerde vermogen van dezelfde PV-installatie [Wp]. De basis genormaliseerde opbrengst houdt geen rekening met het schaduweffect, aftopverliezen en de HESPUL-afwijkingen van de PV-installatie. Deze factoren moeten afzonderlijk in rekening gebracht worden.

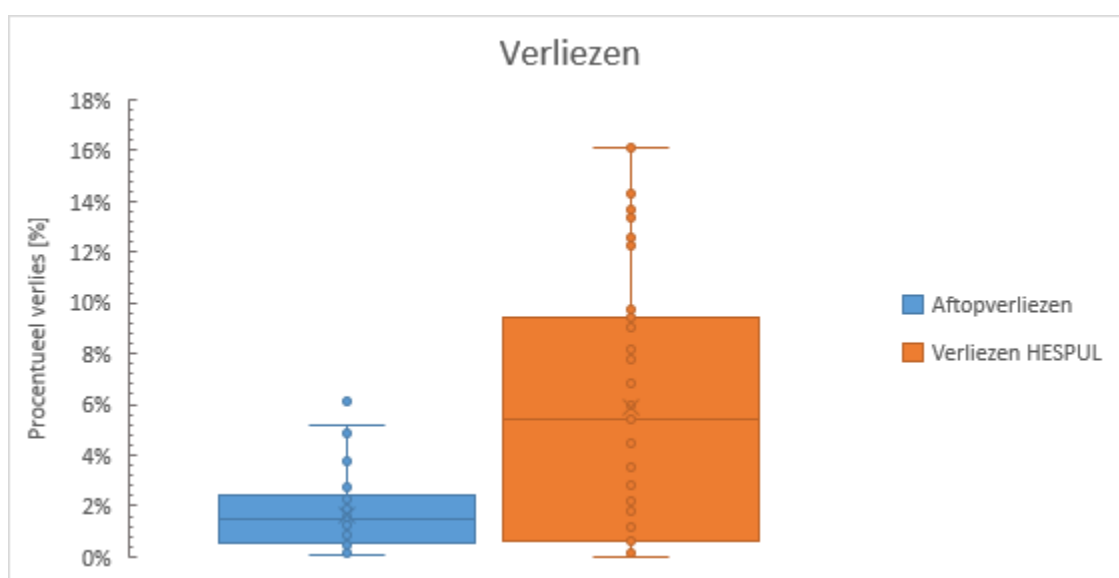
## 5.2 Bepaling

Om een waarde voor de basis genormaliseerde opbrengst te bepalen wordt een query gemaakt uit de databank van installaties van de tweede groepsaankoop van de provincie Antwerpen. De installaties in de query moeten voldoen aan de volgende voorwaarden:

- De monitoring van de installatie heeft een volledig jaar gewerkt.
- De werfvoorbereider schat 0% verlies door schaduw van omgevingselementen.
- De nieuwe ontwikkelde methode legt 0% schaduwverlies door omgevingselementen vast.
- De PV-installatie is niet op een plat dak gemonteerd.
- De zonnepanelen van de installatie zijn allemaal op dezelfde manier georiënteerd en hebben dezelfde helling.

De selectie bestaat uit 39 van de 201 installaties uit de databank. Om de onnauwkeurigheden op het schaduwverlies niet door te trekken naar het resultaat van de BNO, selecteert de query enkel installaties die niet onderhevig zijn aan schaduwverlies. Om zeker te zijn dat er daadwerkelijk geen schaduwverlies door omgevingselementen is, moet zowel de schatting van de werfvoorbereider als de schaduwbeoordeling met de nieuwe methode 0% zijn. Om geen schaduwverlies door eigen installatie te krijgen, neemt de query installaties op platte daken niet op.

De factoren aftopverliezen en HESPUL kunnen niet geëlimineerd worden. Er wordt vanuit gegaan dat de foutmarge op de tabel van HESPUL klein is. De tabel is op een hoogwetenschappelijk niveau ontwikkeld. De onnauwkeurigheid op het berekenen van de aftopverliezen beïnvloedt het resultaat wel. De onderstaande figuur geeft links de boxplot weer van de aftopverliezen voor de 39 geselecteerde installaties. Aan de rechterkant staan de verliezen door HESPUL.



Figuur 5.1: verliezen van de installaties van de query

Er wordt aangenomen dat de fout op de waarde van een verliesfactor zich lineair verhoudt t.o.v. de absolute waarde van het verlies. Relatief is de fout op een factor dezelfde. Hiermee wordt bedoeld dat als de waarde van een verliesfactor groot is, de absolute waarde van de fout op die waarde groot is en andersom. Uit de vergelijking van de boxplots valt af te leiden dat aftopverliezen relatief klein zijn t.o.v. verliezen door HESPUL. Het gemiddelde aftopverlies bedraagt 1,67%. De voorgaande redenering leidt tot het besluit dat de fout op de waarde van de aftopverliezen klein is. Omdat de fout klein is, weegt de fout op de aftopverliezen niet zwaar door op het resultaat van de basis genormaliseerde opbrengst. Later zal uit het onderzoek blijken dat de mogelijke fout op de verliezen door overbelasting te verwaarlozen zijn ten opzichte van de standaardafwijking op de BNO.

Om de waarde van de basis genormaliseerde opbrengst te bepalen, wordt de BNO variabel gemaakt. De volgende formule berekent de opbrengst van de 39 installaties:

$$E_{verw} = BNO * P_{inst} * H * (1 - A)$$

$E_{verw}$  = de verwachte energieopbrengst [kWh/jaar]

De factoren van de schaduwverliezen zijn geëlimineerd. Door de waarde van de BNO aan te passen, wijzigt de verwachte opbrengst. Het procentueel verschil tussen deze verwachte opbrengst en de opbrengst geregistreerd door de monitoring maakt de vergelijking tussen deze grootheden.

De Wat-Als-Analyse van Excel berekent de BNO waarvoor het gemiddelde van de procentuele verschillen van alle 39 installaties gelijk is aan nul procent. Het resultaat bezit volgende statistische gegevens.

*Tabel 5.1: statistische gegevens getallenreeks*

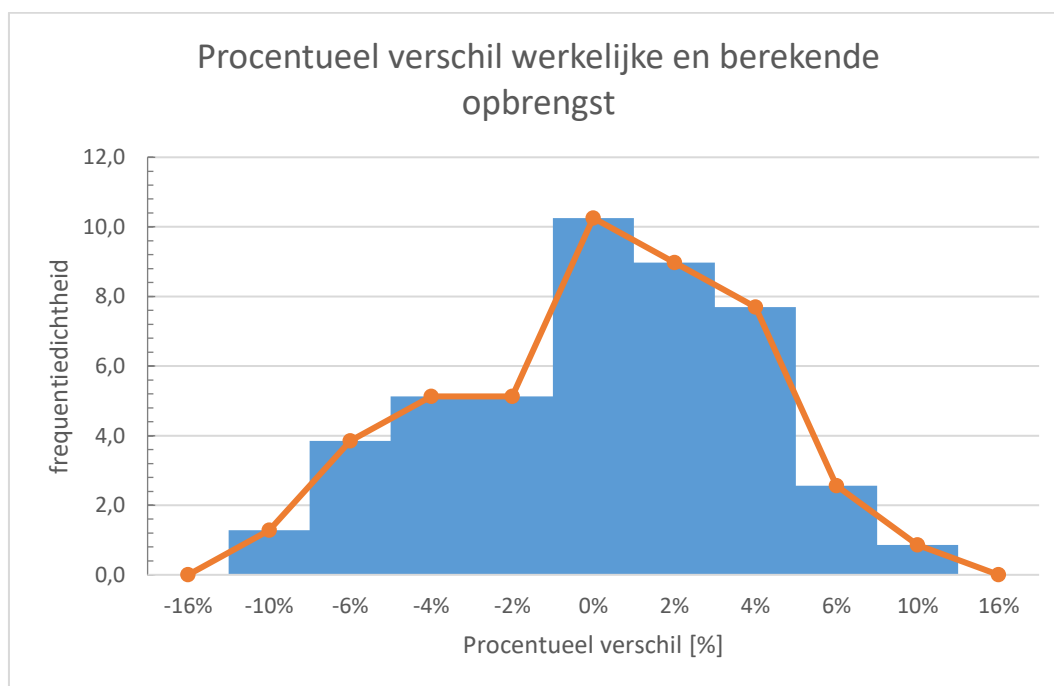
<b>Minimum</b>	-11,0%	<b>Standaardafwijking</b>	4,91%
<b>Mediaan</b>	0,0%	<b>Gemiddelde</b>	0,0%
<b>Maximum</b>	12,5%		

Om de getallenreeks correct wetenschappelijk weer te geven, zijn de continue stochastische veranderlijken opgedeeld in klassen met een veranderlijke grootte. De staafjes van het histogram grenzen aan elkaar zodat het continue karakter beter tot uiting komt.

Een frequentiepolygoon is in dit geval vereist. Omdat de klassebreedtes niet gelijk zijn, geeft de frequentiedichtheid de hoogte van de staafjes aan. Het verworven histogram geeft op deze manier geen vertekening van het resultaat. De onderstaande figuur geeft het resultaat.

(Coppens, s.a. a)





Figuur 5.2: procentueel verschil tussen werkelijke- en verwachte opbrengst

De waarde basis genormaliseerde opbrengst gebruikt om dit resultaat te bekomen, is 1,06 kWh/jaar/Wp.

## 5.3 Extrapolatie

Zoals boven vermeld, is de steekproef aselekt. De installaties zijn niet verspreid over heel Vlaanderen. De gemonitorde periode is ruwweg het jaar 2016. De basis genormaliseerde opbrengst moet echter bruikbaar zijn voor heel Vlaanderen en voor de toekomstige jaren. Het is mogelijk dat het jaar van de metingen een uitzonderlijk goed of slecht jaar was voor de opbrengst van zonnepanelen en dat de metingen plaatsvonden in een gebied dat beduidend beter of slechter is voor zonnepanelen.

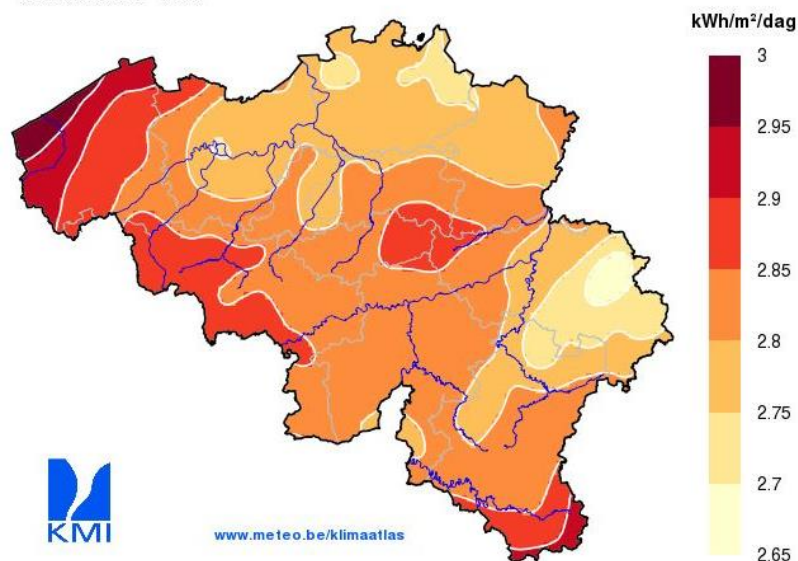
Om de waarde van 1,06 kWh/jaar/Wp te gebruiken over heel Vlaanderen voor de toekomstige jaren zal deze waarde historisch en geografisch extrapoleerbaar moeten zijn. Eventueel moeten er correcties op gemaakt worden. Bij het onderzoek van de deze extrapolatie vroeg Izen om veilige keuzes te maken.

Om de extrapolatie te onderzoeken, is ervan uitgegaan dat er een lineair verband bestaat tussen de jaaropbrengst van zonnepanelen en de instraling van de zon in het horizontale vlak.

### 5.3.1 Geografische extrapolatie

De globale zoninstraling in het horizontale vlak is niet in heel Vlaanderen gelijk. De onderstaande figuur illustreert de spreiding van de gemiddelde dagelijkse globale zoninstraling uitgemiddeld tussen 1984 en 2013 op jaarbasis over heel Vlaanderen.

Dagelijkse waarde van de jaarlijks gemiddelde globale zonnestraling  
Normalen 1984 - 2013



Figuur 5.3: dagelijkse waarde van de jaarlijks gemiddelde globale zonnestraling (KMI, s.a. a)

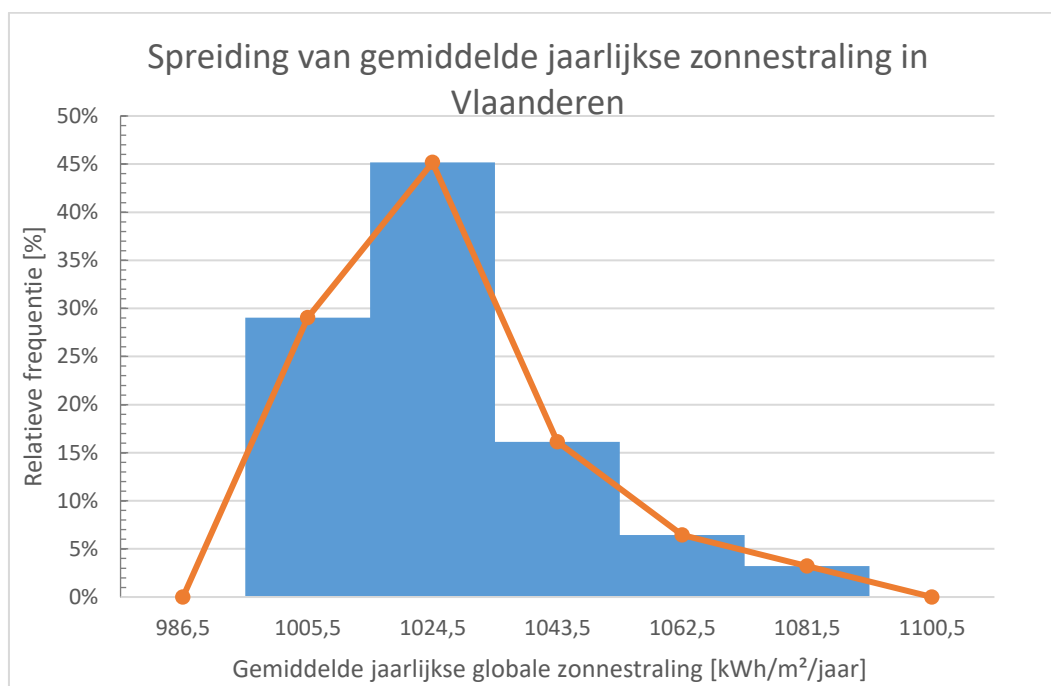
Het valt meteen op dat de provincie Antwerpen een zone is waar er op jaarbasis minder instraling is van de zon ten opzichte van de andere provincies in Vlaanderen. De gemiddelde bewolgingsgraad en de breedteligging verklaren dit verschil. De breedteligging bepaalt de theoretisch maximaal mogelijke zonnestraling.

Om een beter beeld te krijgen van de spreiding van de jaarlijkse gemiddelde globale zonnestraling, werden er in elke provincie 6 steden geselecteerd. Samen vormen ze een goede spreiding over heel Vlaanderen. Van deze steden is de gemiddelde zonnestraling op jaarbasis opgezocht in de klimaatatlas van het KMI. De hoofdstad Brussel is hieraan toegevoegd zodat er een totaal van 31 metingen zijn verzameld. De onderstaande tabel geeft de statistische gegevens van deze steekproef weer. (KMI, s.a. a; KMI, s.a. b)

Tabel 5.2: statistische gegevens steekproef jaarlijkse waarde gemiddelde globale zonnestraling

<b>Minimum</b>	996 kWh/m <sup>2</sup> /jaar	<b>Gemiddelde</b>	1025 kWh/m <sup>2</sup> /jaar
<b>Mediaan</b>	1022 kWh/m <sup>2</sup> /jaar	<b>Standaardafwijking</b>	19,2 kWh/m <sup>2</sup> /jaar
<b>Maximum</b>	1086 kWh/m <sup>2</sup> /jaar	<b>Steekproef grootte</b>	31

Figuur 5.4 geeft de reeks van gemiddelde jaarlijkse globale zonnestraling weer in een staafdiagram. Dit diagram geeft aan dat die spreiding rechtsscheef is.



*Figuur 5.4: spreiding van gemiddelde jaarlijkse globale zonnestraling in Vlaanderen*

De onderstaande tabel geeft de gemiddelde jaarlijkse globale zonnestraling weer, voor de meest voorkomende gemeenten in de query, die gemaakt is om de waarde van de BNO te bepalen. Deze zijn te vinden op de site van het KMI. (KMI, s.a. b)

*Tabel 5.3: zonnestraling van installaties in query*

	<b>Gemiddelde jaarlijkse globale zonnestraling [kWh/m<sup>2</sup>/jaar]</b>
<b>Beerse</b>	1002
<b>Wuustwezel</b>	1010
<b>Lille</b>	1003
<b>Antwerpen</b>	1006
<b>Essen</b>	1012

De waarden van de bovenstaande tabel en figuur 5.4 kunnen vergeleken worden. De waarden van de tabel liggen allemaal in de klassen met klassemidden 1005,5 kWh/m<sup>2</sup>/jaar. De gemeenten waar de meeste installaties van de query zijn geïnstalleerd liggen duidelijk in een zone waar de gemiddelde jaarlijkse globale zonnestraling laag is. In dit opzicht is de BNO met een veilige steekproef vastgelegd.

De BNO voor andere delen van Vlaanderen zal hoger zijn. Omdat Izen prefereert om minder opbrengst te berekenen in plaats van meer, wordt er om deze reden geen correctie gemaakt op de BNO door de geografische extrapolatie.

### 5.3.2 Historische extrapolatie

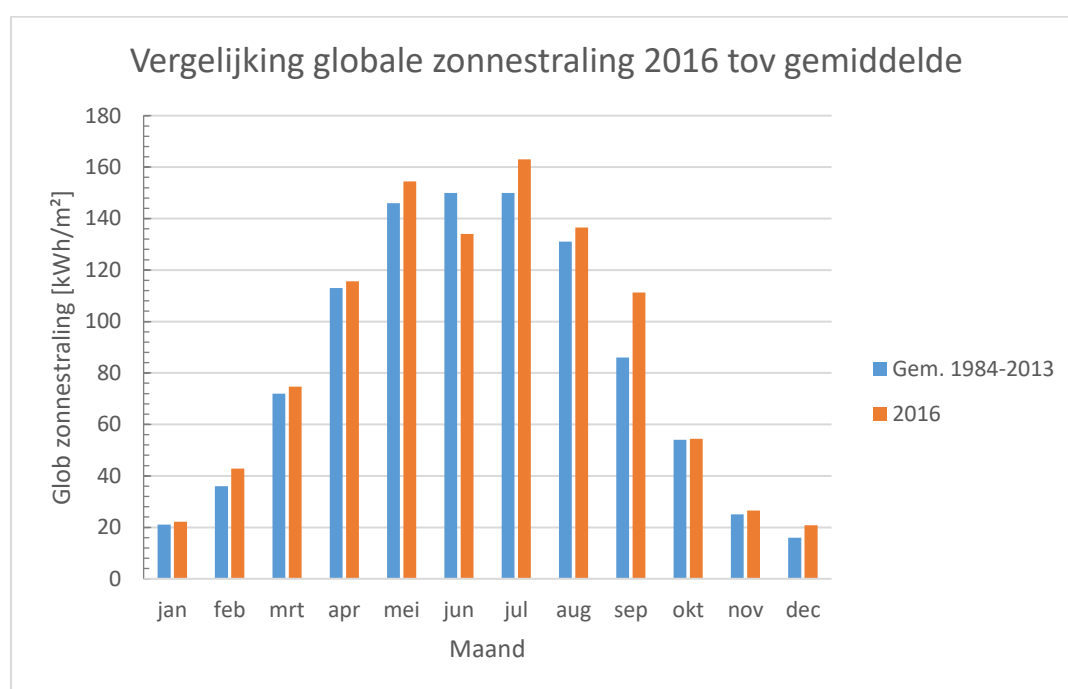
Via het KMI zijn meetgegevens aangekocht van een weerstation in Retie. De meetgegevens betreffen de dagelijkse globale zonnestraling in het horizontale vlak over het jaar 2016. Dit is het jaar dat de installaties hoofdzakelijk operationeel zijn geweest. Door de meetgegevens van éénzelfde maand te sommeren, wordt het maandtotaal bekomen.

(Debontridder, 2017)

Het KMI heeft op zijn website een klimaatatlas staan die iedereen gratis kan raadplegen. De gebruiker kan voor elke gemeente specifieke gegevens opvragen. De meetgegevens zijn een uitmiddeling van 1984 tot 2013. Voor de gemeente Retie zijn de maandelijkse globale zonnestralinggegevens in het horizontale vlak opgezocht. Deze gegevens kunnen eveneens doorgetrokken worden voor een gemiddeld jaar.

(KMI, s.a. c)

De onderstaande figuur vergelijkt deze twee reeksen van maandelijkse meetgegevens.



*Figuur 5.5: vergelijking van de globale maandelijkse zonnestraling van het jaar 2016 en een gemiddeld jaar*

In de figuur is te zien dat de globale zonnestraling van 2016 vaak hoger is dan die van een gemiddeld jaar. Tijdens het jaar 2016 was er meer zonnestraling dan tijdens het gemiddelde jaar. Op jaarbasis is er een procentueel verschil van 5%.

Om de basis genormaliseerde opbrengst in de toekomst nauwkeurig te gebruiken, wordt er een correctie van 5% op de waarde 1,06 kWh/jaar/Wp uitgevoerd. De nieuwe, gecorrigeerde basis genormaliseerde opbrengst bedraagt 1,01 kWh/jaar/Wp. De onderstaande formule geeft aan hoe deze waarde is verkregen:

$$BNO = (100\% - 5\%) * 1,06 \text{ kWh/jaar/Wp} = 1,01 \text{ kWh/jaar/Wp}$$

## 6 AFTOPVERLIEZEN

Aftopverliezen kunnen voorkomen wanneer het vermogen van de panelen groter is dan het vermogen van de omvormer. Wanneer dit gebeurt, zal de omvormer op bepaalde ogenblikken het vermogen 'aftoppen' omdat hij anders stuk gaat. Izen kiest er meestal voor om een omvormer met een iets kleiner vermogen te combineren met een iets groter vermogen aan zonnepanelen. Dit heeft een aantal redenen:

- ten eerste zal een kleinere omvormer financieel voordeliger zijn ten opzichte van een groter model, waardoor de totaalprijs interessanter wordt.
- ten tweede komt het weinig voor dat een PV-installatie gedurende het hele jaar op volledig vermogen draait. Enkel in ideale condities zal de installatie zijn maximum leveren. Gedurende die momenten wordt het vermogen een beetje afgetopt. Maar gedurende de rest van het jaar zal het opgewekte vermogen van de installatie dicht bij het maximumvermogen liggen van de omvormer en zal deze een beter rendement hebben. Kort samengevat is het rendement gedurende de grootste tijd van het jaar beter indien een kleinere omvormer wordt genomen.
- ten derde betaald de cliënt een lager prosumententariaf voor een PV-installatie die een omvormer met een kleiner vermogen bevat.

Indien de omvormer te veel aftopt wordt het verlies te groot. Het teveel aan energie kan immers op geen enkel moment gerecupereerd worden waardoor dit als een puur verlies geldt.

Deze verliezen werden niet apart onderzocht, toch zijn de waarden die Izen gebruikt geanalyseerd. Het aftopverlies is afhankelijk van de zogenaamde dc/ac-ratio en HESPUL. De dc/ac-ratio is de verhouding tussen het vermogen van de zonnepanelen (aan de gelijkspanningskant) op het vermogen van de omvormer (aan de wisselspanningskant). Hoe groter deze verhouding, hoe meer verliezen. De dc/ac-ratio wordt gecorrigeerd aan de hand van oriëntatie en helling van de zonnepanelen. Wanneer de oriëntatie van de zonnepanelen slecht is, zullen er minder momenten optreden dat de zonnepanelen een vermogen produceren dat groter is dan het vermogen van de omvormer. Aan de gecorrigeerde ac/dc-ratio is een aftopverlies gekoppeld.

Het is opmerkelijk dat een gecorrigeerde dc/ac-ratio van één niet resulteert in 0% aftopverlies. Het wattpiekvermogen van de zonnepanelen is bepaald onder STC-voorwaarden. Tijdens het jaar zijn er momenten dat de omstandigheden beter zijn dan STC, bijvoorbeeld koude panelen die plots veel zon krijgen. Tijdens deze momenten zullen de panelen meer opwekken dan het wattpiekvermogen. Als het resultaat van de gecorrigeerde dc/ac-ratio gelijk aan één is, zal de omvormer alsnog een deel aftoppen en is er verlies. Vandaar dat een gecorrigeerde dc/ac-ratio van 0,8 resulteert in ongeveer 0% verlies opgegeven door Izen. Een gecorrigeerde verhouding van 1,4 echter, resulteert al in 5% verlies. Vandaar dat een goede combinatie van panelen/omvormer essentieel is. Izen zal in normale omstandigheden nooit een combinatie nemen waarbij de dc/ac-ratio hoger is dan 1,4 maar houdt bij deze keuze geen rekening met de correctie.

Izen heeft deze waarden zelf onderzocht en weerhouden omdat ze het beste resultaat bieden.

## 7 REKENTOOL

Heel het onderzoek van deze masterthesis komt samen in de rekentool. De rekentool staat garant voor nauwkeurigheid en eenvoud in gebruik. Essentieel is dat de werfvoorbereider met deze rekentool zowel de dimensionering als de opbrengstgarantie tegelijkertijd berekent. De onderstaande figuur geeft de interface van de ontwikkelde rekentool.

**Schatting aantal zonnepanelen**

Energieverbruik per jaar: 2300 kWh

Installatie	
Wp per module	290
Gem aftopverliezen	1,06%

Dak	
Plat dak?	Ja
Oriëntatie	35
Heiling (Plat dak = 15°)	15
HESPUL	0,93

Schaduw	
% Invloed 1	4,7
% Invloed 2	15,3
% Invloed 3	2,7
% Invloed 4	0
% Totale invloed	>20
% Gem invloed plat dak	3,0

Locatie	
Vlaanderen	1,01

Voorgesteld aantal modules: 11,4

---

**Berekening energieopbrengst per jaar**

Installatie	
Aantal modules	12
Wp per module	290
Geïntalleerd Vermogen	3480
Pac omvormer	3000
Aftopverliezen	0,36%

Hespul	
Plat dak?	Ja
Oriëntatie	35
Heiling (Plat dak = 15°)	15
HESPUL	0,93

Schaduw	
% Invloed 1	4,7
% Invloed 2	15,3
% Invloed 3	2,7
% Invloed 4	0
% Totale invloed	>20
% invloed plat dak	3,10

Locatie	
Vlaanderen	1,01

Verwachte opbrengst per jaar: 2446 kWh  
 gegarandeerde opbrengst per jaar: 2216 kWh  
 gegarandeerde opbrengst per jaar: 2101 kWh

Geen opbrengstgarantie, want schaduwinvloed boven 20%

Made by M. Wuyts, T. Raets & R. Stessens ©

Figuur 7.1: interface rekentool

De rekentool is gemaakt in Google spreadsheets zodat de werfvoorbereiders hem op hun Android-tablet kunnen gebruiken. Zo kan de klant meekijken hoe de berekeningen verlopen. Deze tool komt professioneler over dan het eenvoudige rekentoestel dat de werfvoorbereider nu gebruikt. De werkwijze zal de klant overtuigen van de professionaliteit van Izen en aantonen dat er meer kennis en ervaring aanwezig is in vergelijking met andere verdelers van residentiële PV-installaties.

De tool is beveiligd zodat de werfvoorbereiders enkel de 'lichtblauwe' invoervakken kunnen bewerken. Een achterliggende map waarin de berekeningen gebeuren, is vergrendeld en onzichtbaar. Enkel een administrator kan hier wijzigingen aanbrengen. Deze maatregelen beschermen de gebruiker van de tool tegen foutief gebruik.

De rekentool bestaat uit twee delen gescheiden door middel van een horizontale zwarte lijn. Dit hoofdstuk bespreekt eerst het dimensioneringsgedeelte (het bovenste deel) daarna het garantiegedeelte (het onderste deel).

## 7.1 Dimensioneringsberekening

Dit gedeelte zorgt voor een schatting van het aantal zonnepanelen. Om de werkwijze van de werfvoorbereider niet te veel te verstoren, is besloten om dit deel eveneens in de tool onder te brengen. De onderstaande figuur geeft het dimensioneringsdeel weer.

**Schatting aantal zonnepanelen**

Energieverbruik per jaar: 2300 kWh

Installatie	
Wp per module	290
Gem aftopverliezen	1,06%

Dak	
Plat dak?	Ja
Oriëntatie	35
Helling (Plat dak = 15°)	15
HESPUL	0,93

Schaduw	
% Invloed 1	4,7
% Invloed 2	15,3
% Invloed 3	2,7
% Invloed 4	0
% Totale invloed	>20
% Gem invloed plat dak	3,0

Locatie	
Vlaanderen	1,01

Voorgesteld aantal modules: 11,4

Figuur 7.2: dimensioneringsgedeelte van de rekentool

Bovenaan in het gele balkje geeft de werfvoorbereider het jaarlijkse elektriciteitsgebruik van de klant in. Vaak wenst de klant zijn PV-installatie zo te dimensioneren dat de installatie het jaarverbruik volledig dekt.

De tool is verdeeld in diverse categorieën met daaronder hun specifieke parameters.

Linksboven onder 'Installatie' komt het vermogen van het gekozen type paneel. Dit invoervak is uitgerust met een rolkeuzemenu waar de werfvoorbereider het piekvermogen van het gekozen type paneel aangeeft. Er zijn immers maar een aantal mogelijke keuzes.

Een administrator kan, indien gewenst, de lijst met keuzes makkelijk aanpassen in de achterliggende map van de spreadsheet.

Onder het veld van het geselecteerde paneel bevindt zich het veld met het gemiddeld aftopverlies. Het aftopverlies is afhankelijk van het aantal zonnepanelen. In deze berekeningsfase is het aantal zonnepanelen nog niet gekend waardoor de tool het exacte aftopverlies nog niet kan berekenen.

Onder de categorie 'Dak' geeft de gebruiker aan of de installatie al dan niet op een plat dak komt. Daaronder voert de werfvoorbereider de oriëntatie en de helling in. Voor al deze invoervakken zijn eveneens rolkeuzemenu's voorzien. Wanneer de installatie op een plat dak komt, stelt de werfvoorbereider een helling van 15° in. Uit de helling en de oriëntatie berekent de tool zelf de HESPUL-afwijking.

In het gedeelte 'Schaduw', rechts bovenaan, berekent de spreadsheet twee verliezen; de totale invloed en de gemiddelde invloed van een plat dak. De werfvoorbereider zoekt in het schaduwhandboek de schaduwverliezen van de omgevingselementen op en geeft ze één voor één in. Er is ruimte voor vier schaduwverliezen uit het schaduwhandboek. Deze invloeden combineert de rekentool tot één globaal geklasseerd schaduwverlies. De gebruikte combinatieformule is afhankelijk van de dakhelling, plat of schuin. Daaronder komt het gemiddeld schaduwverlies afhankelijk van de installatie.

Indien de installatie zich niet op een plat dak bevindt, is dit schaduwverlies gelijk aan nul. Omdat het aantal panelen nog niet bekend is, kan de tool het schaduwverlies door installatie, welke afhankelijk is van het aantal panelen, nog niet exact berekenen.

Rechts onderaan toont de tool onder locatie de basis genormaliseerde opbrengst. De werfvoorbereider hoeft hier niets in te voeren, maar kan aan de klant uitleggen waar deze factor vandaan komt. Tijdens de oorspronkelijke werkwijze deed de werfvoorbereider dit al.

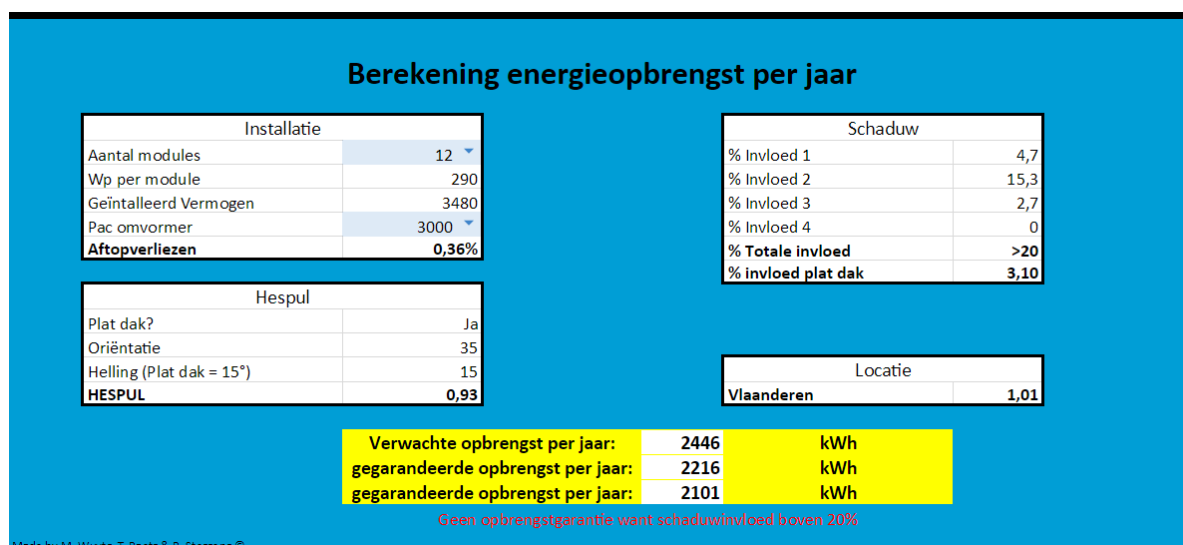
Afhankelijk van de ingegeven parameters suggereert de tool een aantal zonnepanelen. De dimensioneringsberekening van de tool is gebaseerd op de onderstaande formule:

$$N = \frac{E_{kl}}{BNO * P_{paneel} * H * (1 - S_{omg}) * (1 - S_{inst}) * (1 - A)}$$

Deze formule heeft meer factoren dan de originele dimensioneringsformule en kan in principe met meer invloeden rekening houden. De rekentool toont het resultaat onderaan in het groene kader. Er is bewust gekozen om het resultaat op één cijfer na de komma weer te geven. Zo wordt het meteen duidelijk dat het aantal zonnepanelen nog niet definitief is.

## 7.2 Garantieberekening

De onderstaande figuur geeft het garanti gedeelte van de tool weer. De meeste gegevens vanuit het dimensioneringsdeel kopieert de rekentool naar het onderdeel garantieberekening.



Figuur 7.3: garanti gedeelte van de rekentool

Op basis van het aantal gesuggereerde zonnepanelen, geeft de werfvoorbereider bij dit deel een effectief aantal te installeren zonnepanelen in. Dit spreadsheet vermenigvuldigt het aantal panelen met het piekvermogen van het gekozen type zonnepanelen en geeft het geïnstalleerd vermogen van de PV-installatie.

Afhankelijk van het geïnstalleerd vermogen stelt de werfvoorbereider het nominaal uitgangsvermogen van de omvormer in. Uit deze berekeningen kunnen twee indicaties voortvloeien:



- de tool geeft enerzijds aan als het AC-vermogen van de omvormer te groot of te klein is gekozen.
- de tool verwittigt indien het uitgangsvermogen van de omvormer de grens van 5000 VA of 10 000 VA overschrijdt:
  - in het geval dat het vermogen van de omvormer groter is dan 5000 VA waarschuwt de tool dat de PV-installatie driefasig moet worden aangesloten.
  - kiest de klant voor een omvormer groter dan 10 000 VA, dan geeft de tool een signaal, vermits voor dit type van installaties andere voorwaarden gelden, uitgeschreven door de distributienetbeheerder. (Eandis, 2015)

Nu het aantal zonnepanelen en het AC-vermogen van de omvormer gekozen zijn, kan de tool nauwkeurig het aftopverlies en het schaduwverlies van de PV-installatie berekenen. Aan de hand hiervan berekent de tool een te verwachten energieopbrengst op jaarbasis. De formule waarop de rekentool gebaseerd is, staat hieronder weergegeven:

$$E_{verw} = BNO * P_{inst} * H * (1 - S_{omg}) * (1 - S_{inst}) * (1 - A)$$

De uitkomst van de garantieberekening kan verschillend zijn van het energieverbruik van de klant dat helemaal bovenaan werd ingegeven. De werfvoorbereider kan door het ingegeven aantal zonnepanelen aan te passen deze waarden zo goed mogelijk op elkaar afstemmen.

Uit de verwachte opbrengst wordt een opbrengstgarantie berekend. Hoe dit gebeurt, komt aan bod in het volgende deel.

Op dit ogenblik heeft Izen nog niet beslist welke zekerheid het bedrijf wil hanteren wanneer een opbrengstgarantie wordt afgeleverd. Daarom berekent de tool nu nog twee verschillende opbrengstgaranties namelijk 97,7% en 99,8%. Wanneer Izen hierover een beslissing neemt, valt één van de twee berekeningen weg. Wanneer het schaduwverlies door omgevingselementen hoger is dan 20% geeft Izen geen opbrengstgarantie en dit wordt door de tool op die manier aangegeven. Op figuur 7.3 staat onderaan deze waarschuwing.

### 7.3 Testen aan groepsaankoop

Een geslaagd onderzoek vereist dat de rekentool uitvoerig getest is. Hiervoor wordt de verwachte opbrengst vergeleken met de werkelijk gemonitorde opbrengst. Er is een query gemaakt van alle installaties van de databank die voldoen aan onderstaande voorwaarden:

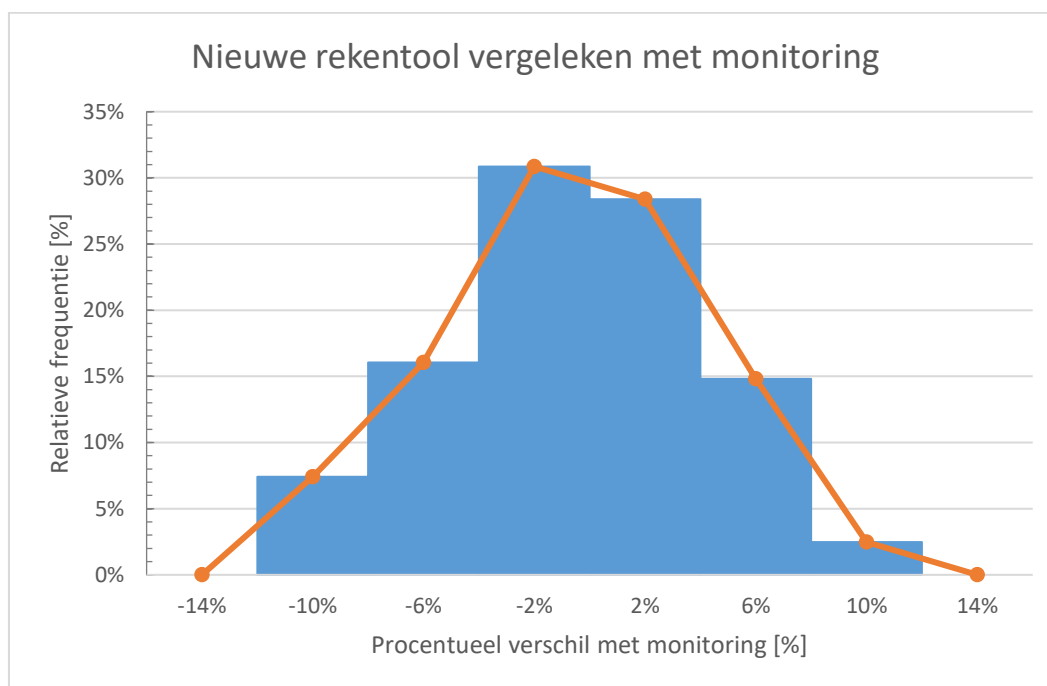
- De monitoring van de installatie heeft een volledig jaar gewerkt.
- De nieuw ontwikkelde methode kan voor de situatie een schaduwverlies vastleggen.
- De zonnepanelen van de installatie zijn allemaal op dezelfde manier georiënteerd en hebben dezelfde helling.

Er zijn 81 van de 201 installaties die voldoen aan deze voorwaarden. Er wordt een procentueel verschil berekend tussen de berekende opbrengst van de tool en de gemonitorde opbrengst. Het eerste deel van de test bestaat erin om de nauwkeurigheid van de tool na te gaan. Het tweede deel bestaat uit een onderzoek naar de garantie die Izen in de toekomst kan geven in vergelijking met nu.

### 7.3.1 Nauwkeurigheid

Om de nauwkeurigheid van de tool te onderzoeken, houdt dit deel nog geen rekening met de correcties die gemaakt zijn op de BNO. Dit komt bij de bespreking van het resultaat aan bod.

Dit deel kijkt na of de waardebepaling van alle factoren correct is. De onderstaande figuur geeft het procentueel verschil tussen de verwachte opbrengst en gemonitorde opbrengst.



Figuur 7.4: de verwachte opbrengst van de rekentool vergeleken met monitoring

Het gemiddelde en mediaan van deze getallenreeks zou 0% moeten zijn en de spreiding zo laag mogelijk. Indien de correctie op de BNO hier al toegepast was, zou het gemiddelde verschoven zijn naar ongeveer 4,5%. Dit zou een vertekend beeld van het resultaat geven. De onderstaande tabel geeft de statistische gegevens van de getallenreeks weer.

Tabel 7.1: statistische gegevens procentuele verschillen tussen berekende en werkelijke opbrengst

<b>Minimum</b>	-11,3%	<b>Standaardafwijking</b>	4,7%
<b>Mediaan</b>	-0,5%	<b>Gemiddelde</b>	-0,7%
<b>Maximum</b>	10,0%		

De tabel suggereert dat de rekentool geen systematische fout maakt. Een statistische test moet hierover zekerheid geven. Het besluit wordt genomen op basis van een 5% significantieniveau.  $\mu_D$  stelt de verwachtingswaarde voor van de absolute verschillen tussen de werkelijke en de berekende opbrengst.

H0 hypothese: het gemiddelde is gelijk aan 0 ( $\mu_D = 0$ )

H1 hypothese: het gemiddelde is niet gelijk aan 0 ( $\mu_D \neq 0$ )

De T-test onderzoekt het absolute verschil tussen de opbrengsten. Deze test geeft als uitkomst  $p=0,6167$ . De kans op een type I fout is bij gevolg groter dan 0,05.  $H_0$  wordt niet verworpen. Er is geen systematische fout.

Er is geen kritische waarde gegeven over de spreiding. Hier is een beschrijvend besluit genomen. Uitgaande van de minimumwaarde, de maximumwaarde en standaardafwijking in de bovenstaande tabel wordt besloten dat de factoren van de rekentool voldoende goed zijn vastgelegd doorheen dit onderzoek.

De standaardafwijking is zelfs afgenomen in vergelijking met de standaardafwijking bij het bepalen van de BNO in hoofdstuk 5.2. Dit leidt tot het besluit dat de schaduwverliezen en aftopverlies goed benaderd kunnen worden.

(Coppens, s.a. a; Coppens, s.a. b)

### 7.3.2 Opbrengstgarantie

Bij het geven van garanties is het noodzakelijk te weten wat de kans is dat de desbetreffende installatie voldoet aan de belofte. Om hierover een uitspraak te kunnen doen, is het belangrijk dat de curve uit figuur 7.4 voldoende goed het theoretische model van de normaliteit benadert. Het besluit wordt genomen op basis van een 5% significantieniveau.

$H_0$  hypothese: de resultaten komen overeen met een normaalverdeling

$H_1$  hypothese: de resultaten komen niet overeen met een normaalverdeling

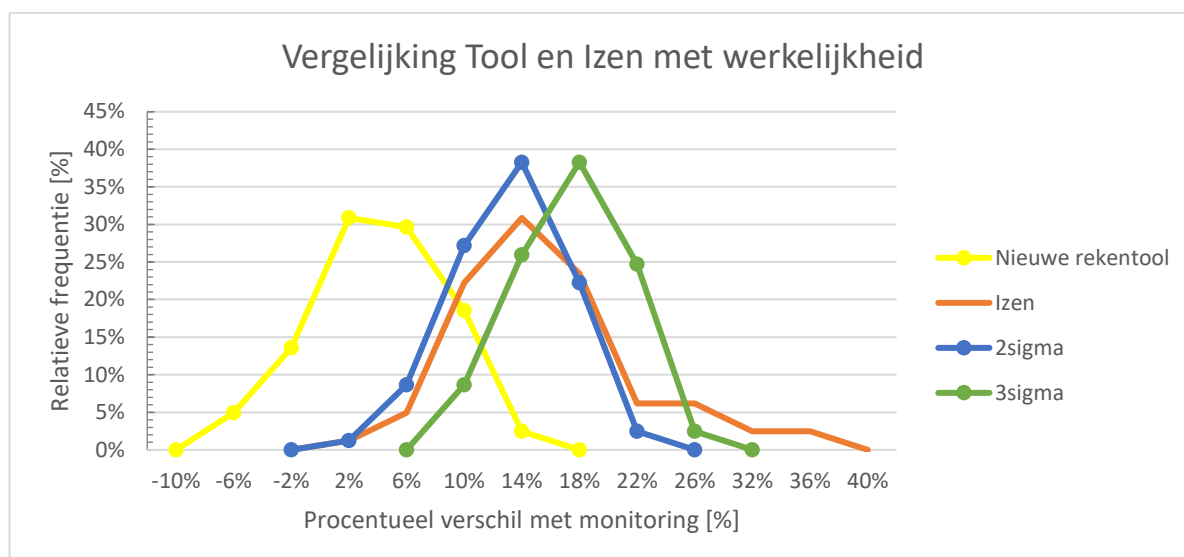
De Kolmogorov-Smirnov-test behandelt de procentuele verschillen tussen de berekende en de werkelijke opbrengst. Deze test geeft als uitkomst  $p=0,2$ . De gebruikte software, SPSS, lijkt bij deze test nooit een kans op een type I fout groter dan 0,2 te geven. Er wordt aangenomen dat het resultaat eventueel groter kan zijn dan 0,2. De kans op een type I fout is daarmee groter dan 0,05. Hypothese  $H_0$  wordt niet verworpen.

Er kan gesteld worden dat de getallenreeks van de procentuele verschillen overeenkomt met de normaalverdeling  $N(-0,7\%;4,7\%)$ .

(Coppens, s.a. a; Coppens, s.a. b)

De standaardafwijking kan gebruikt worden om een zekerheid voor de opbrengstgarantie in te bouwen. De onderstaande figuur vergelijkt de garantie afgegeven door Izen en de verwachte opbrengst uit de tool. Merk op dat de correctie op de BNO nu mee wordt verrekend. De frequentiepolygoon van figuur 7.4 is nu verschoven naar rechts en vormt de gele frequentiepolygoon in figuur 7.5. Verder staan in de grafiek de curves van de 2sigma garantie en de 3sigma garantie. De 2sigma biedt 97,7% zekerheid terwijl de 3sigma 99,8% kans op slagen heeft.

(wikipedia, s.a.)



*Figuur 7.5: vergelijkingen van verwachte opbrengst, de garantie door Izen en de berekende garanties*

Als Izen de 2sigma garantie had gegeven aan de installaties uit de query, dan zou het bedrijf niets moeten compenseren door foute opbrengstgaranties.

De onderstaande tabel vergelijkt de 2sigma garantie en de garantie van Izen. De 2sigma garantie is nauwkeuriger dan de garantie afgegeven door Izen omdat bij deze laatste de spreiding veel hoger ligt. De 2sigma garantie geeft gemiddeld meer opbrengstgarantie. Dit kan meer klanten overtuigen om een PV-installatie aan te schaffen. Het is echter een beslissing die het bestuur van Izen nog moet nemen.

*Tabel 7.2: gemiddelde en standaardafwijking van 2sigma en Izen*

	<b>2sigma</b>	<b>Izen</b>
<b>Gemiddelde</b>	8,8%	15,5%
<b>Standaardafwijking</b>	4,2%	6,2%

## BESLUIT

Uit dit onderzoek blijkt dat de huidige werkmethode van Izen met betrekking tot het berekenen van de opbrengst van een residentiële PV-installatie, geoptimaliseerd kan worden zowel in snelheid als in nauwkeurigheid. De inschatting van schaduwverlies door omgevingselementen was tot dusver niet wetenschappelijk onderbouwd. Verder toonde de studie dat andere factoren binnen de berekeningsmethode, zoals schaduwverlies door installatie en de BNO, nauwkeuriger bepaald konden worden. De opbrengstgarantie werd blind gegeven, nl. zonder kennis over de kans op het behalen ervan.

Het resultaat van de masterproef is een rekentool en een schaduwhandboek: twee gebruiksvriendelijke en accurate instrumenten die de werking van het bedrijf reëel kunnen verbeteren. Het onderzoek toont aan dat de nieuwe manier van werken beter is in verschillende opzichten. Het stelt de werfvoorbereider in staat om op een eenvoudige en nauwkeurige werkwijze een doordachte schaduwinschatting en opbrengstberekening te maken. Slechts één berekening is nodig om zowel de installatie te dimensioneren als een bijhorende opbrengst te garanderen.

Bij de ontwikkeling van de rekentool en het schaduwhandboek is voldoende aandacht geschonken aan gebruiksvriendelijkheid en gemak voor integratie in de huidige werkwijze. Een test heeft aangetoond dat gebruiksvriendelijkheid van het schaduwhandboek uitstekend wordt bevonden door de toekomstige gebruikers: de werfvoorbereiders.

Door een query te nemen uit de steekproef konden de resultaten van het onderzoek vergeleken worden met de huidige situatie en de werkelijkheid. De nauwkeurigheid van de nieuw ontwikkelde methode voor het bepalen van het schaduwverlies door omgevingselementen is op meerdere manieren getest.

De nauwkeurigheid van de opbrengstberekening en de daaraan gekoppelde opbrengstgarantie zijn gecontroleerd en goed bevonden. Zo bepaalt de studie de kans dat de PV-installatie de gegarandeerde opbrengst haalt. De opbrengstgarantie is op deze manier wetenschappelijk gedefinieerd.

Het schaduwhandboek en de rekentool werken nauwkeuriger en efficiënter dan de huidige methode, waardoor de professionaliteit ten opzichte van de klant aanzienlijk verhoogt. De klant kan vaststellen dat Izen tools inschakelt die op basis van wetenschappelijke studies zijn onderbouwd. Het vertrouwen bij de klant stijgt en de kans dat de klant voor Izen kiest, vergroot.

Dit onderzoek biedt mogelijkheden tot vervolgstudies. Hoewel er al een grote stap voorwaarts is gezet, zal er steeds ruimte zijn voor verfijning of uitbreiding. Sommige factoren die invloed hebben op de energieopbrengst kwamen in het kader van het onderzoek minder aan bod: aftopverliezen worden in de nieuwe rekentool op identiek dezelfde manier berekend als voorheen. Verder onderzoek kan uitwijzen of deze methode voldoende correct is.

De steekproef van dit onderzoek is beperkt: zowel naar tijd, locatie, als naar bruikbare installaties in de controlegroep. Een meer uitgebreide steekproef, een meer continue opvolging van de opbrengsten en verzameling van data kan een nauwkeuriger resultaat opleveren.

De masterthesis blijkt voor de werking van Izen op het vlak van opbrengstberekening een substantiële bijdrage te hebben geleverd. Hopelijk vinden de ontwikkelde instrumenten hun weg binnen het bedrijf.

## ABSTRACT

The research in this study leads to the conclusion that the current method used by Izen to determine the yield of a residential photovoltaic installation could be optimized both in terms of speed and accuracy. So far, the estimation of the impact of shade caused by surrounding elements was not scientifically investigated nor approved. Furthermore, there was room for optimizing some of the other factors in the formula: the impact of shade caused by the installation itself and the BNO, basic normalized yield. The warranty of the yield is, so to speak, handed over without substantiated knowledge of its feasibility.

The outcome of this masterthesis is a calculation tool and a shade manual: two instruments that are user friendly and accurate and that can really improve the operations within the company. The research shows that the new working method has significantly improved the existing method and this with respect to several aspects. The person responsible in the field is now capable of making a calculation of the impact of shadow and production at the same time. Instead of two separate calculations, only one is required for dimensioning the installation as well as providing a warranty of the yield.

During the development of the calculation tool and the shade manual extensive attention was drawn to usability for the workers and integration of the tools within the current ways of operation. A test carried out among the users of both instruments has proven its usability. The users explicitly gave their approval.

A query in the sample was set up to compare the results of this study with the current situation and the monitored reality of the installations. The reliability of the new method used for estimating the loss caused by shade of surrounding elements has been tested in several different ways. The accuracy of the calculation of the yield and the thereto coupled warranty are sufficiently controlled and approved. Hence the study determines the possibility that a PV-installation will actually attain the yield and the given warranty is scientifically defined.

It appears that the shade manual and the calculation tool prove to be more accurate and efficient than the current methods used. Therefore, Izen will be perceived and considered by its customers as a professional service provider. The higher the confidence of the customer, the higher the possibility that customers opt for the company.

This study offers several possibilities for further research. Although this study is a leap forward, there's no doubt room for refinement and elaboration. Some factors influencing the yield were not sufficiently scrutinized in this study: e.g. overload losses are calculated in the new tool exactly in the same way as before. Future research is needed to prove if this method is sufficiently correct. The sample used in this research is limited in time, location and limited with respect to usable installations in the control group. A more elaborate sample, a continuous gathering of data with respect to the yield of installations can lead to more accurate results.

The master thesis seems to contribute positively and substantially to the calculation of the yield. Hopefully both instruments will find their way within the company.

## LITERATUURLIJST

- Albedo*. (2017, 27 maart). Gevonden op 4 april 2017 op het internet: <https://nl.wikipedia.org/wiki/Albedo>
- Brackenridge, M. (s.a.). *SunPosition Calculator*. Gevonden op 27 maart 2017 op het internet: <http://sunposition.info/sunposition/spc/locations.php#1>
- Breugelmans, C. (2017, 14 maart) *Tabellenboek* [mail]. s.i.
- Coppens, M. (s.a. a) *Statistiek deel 1*. Geel: Campinia Media
- Coppens, M. (s.a. b) *Statistiek deel 2*. Geel: Campinia Media
- Dakdek-gigant. (2016, 14 oktober). *Wat kost een nieuw dak?*. Gevonden op 16 april 2017 op het internet: <https://www.dakdek-gigant.nl/wat-kost-een-nieuw-dak/>
- Debontridder, L. (2017, 20 maart). *Dagelijkse globale zonnestraling (Wh/m<sup>2</sup>) in Retie – 2016* [Brief]. Brussel: KMI. Onuitgegeven
- Deboosere, F. (s.a.). *Komt de zon winter en zomer altijd op op dezelfde plaats aan de horizon?*. Gevonden op 27 maart 2017 op het internet: <http://www.frankdeboosere.be/vragen/vraag100.php>
- Deurloo BV. (2016, 23 juli). *Wat is de jaarlijkse zon-instraling in Nederland?*. Gevonden op 27 maart 2017 op het internet: <http://deurlooinstallaties.nl/deurloo-bieb/jaarlijkse-zon-instraling-nederland/>
- De verschillende soorten dakkapellen - Welke kiest u?*. (s.a.). Gevonden op 3 april 2017 op het internet: <http://www.realiseerjedroomhuis.nl/de-verschillende-soorten-dakkapellen-welke-kiest-u/>
- Eandis. (2015, maart). *Zonnepanelen ≤ 10 kVA*. Gevonden op 6 april 2017 op het internet: [https://www.eandis.be/sites/eandis/files/9010111-lokale\\_produktie\\_10kva\\_final.pdf](https://www.eandis.be/sites/eandis/files/9010111-lokale_produktie_10kva_final.pdf)
- EIC. (2005, 2 december). *RM3-RM3C* [Datasheet]. Gevonden op 20 september 2016 op internet: [http://www.eicsemi.com/datasheet/RM3\\_C.pdf](http://www.eicsemi.com/datasheet/RM3_C.pdf)
- Esdec. (s.a.). *FlatFix Fusion*. Gevonden op 28 maart 2017 op het internet: <https://www.esdec.com/Flatfix/FlatFix-Fusion.htm>
- Gensolar. (s.a.). *Panel Solar 100W*. Gevonden op 7 april 2017 op het internet: [http://gensolar.cl/index.php?route=product/product&product\\_id=56](http://gensolar.cl/index.php?route=product/product&product_id=56)
- Gilis, M. (2017, 1 maart). *Oefeningen werfvoorbereiders + boekje* [mail]. s.i.
- Google. (s.a.). *Frequently Asked Questions*. Gevonden op 3 april 2017 op het internet: <https://www.google.com/get/sunroof/faq/>
- HESPUL. (s.a.). *HESPUL is a non-profit association*. Gevonden op 27 maart 2017 op het internet: <http://www.hespul.org/english/>
- IZEN. (s.a.). *Al 30 jaar installateur zonnepanelen*. Gevonden op 21 maart 2017 op het internet: <HTTP://WWW.IZEN-ZONNEPANELEN.BE/INSTALLATEUR-ZONNEPANELEN>

KMI. (s.a. a). *Dagelijkse waarde van de jaarlijks gemiddelde globale zonnestraling*. Gevonden op 7 maart 2017 op het internet: <https://www.meteo.be/meteo/view/nl/16788784-Klimaatatlas.html>

KMI. (s.a. b). *Het klimaat in uw gemeente*. Gevonden op 7 maart 2017 op het internet: <http://www.meteo.be/meteo/view/nl/27484519-Klimaat+in+uw+gemeente.html>

KMI. (s.a. c). *Klimaatstatistieken van Belgische gemeenten: Retie (NIS13036)*. Gevonden op 25 maart 2017 op het internet: [http://www.meteo.be/resources/climateCity/pdf/climate\\_INS13036\\_RETIE\\_nl.pdf](http://www.meteo.be/resources/climateCity/pdf/climate_INS13036_RETIE_nl.pdf)

Minerva. (s.a.). *Resultaat met woordenlijst (28)*. Gevonden op 4 april 2017 op het internet: <http://www.minerva-ebm.be/Results/Glossary/1701>

MPPT – *Maximum Power Point Tracker*. (s.a.). Gevonden op 6 april 2017 op het internet: <https://zonnepaneelkiezen.nl/mppt>

*Normale verdeling*. (2016, 12 februari). Gevonden op 7 april 2017 op het internet: [https://nl.wikipedia.org/wiki/Normale\\_verdeling](https://nl.wikipedia.org/wiki/Normale_verdeling)

Ouwehand, J., Papa, T., Gilijamse, W., De Geus, J. & De Wit, J. (2016). *Duurzame energietechniek*. Amsterdam: Boom.

PVsystem. (s.a.). *General features*. Gevonden op 3 april 2017 op internet: <http://www.pvsyst.com/en/software/functionalities>

PVsystem. (version 6.4.7.). [Software]. (2016). Verkrijgbaar via [pvsyst.com](http://www.pvsyst.com/en/software/download): <http://www.pvsyst.com/en/software/download>

Roberto, F.C. & Denizar, C.M. (2012). *An Optimized Maximum Power Point Tracking Method Based on PV Surface Temperature Measurement*. Gevonden op 19 september 2016 op internet: <https://www.intechopen.com/books/sustainable-energy-recent-studies/an-optimized-maximum-power-point-tracking-method-based-on-pv-surface-temperature-measurement>

Simplified Safety. (s.a.). *Risico's bij daken met zonnepanelen*. Gevonden op 3 april 2017 op het internet: <http://simplifiedsafety.nl/blog/risicos-bij-daken-met-zonnepanelen/>

Slimster B.V. (s.a.). *Nieuwe dakkapel laten plaatsen?*. Gevonden op 3 april 2017 op het internet: <https://dakkapellen.com/>

The Pennsylvania State University. (s.a.). *Collector Orientation*. Gevonden op 27 maart 2017 op het internet: <https://www.e-education.psu.edu/eme810/node/576>

TRI-KA PC Software (version 1.4.2.0) [Software]. (2013). Verkrijgbaar via [tritec-energy.com](http://www.tritec-energy.com/en/service/product-software/): <http://www.tritec-energy.com/en/service/product-software/>

TRITEC. (2010, november). *OPERATING INSTRUCTIONS TRI-KA*. Gevonden op 19 september 2016 op het internet: [http://www.tritec-energy.com/common/pdf/tritec-service/TRI-KA\\_Operating-instructions\\_en.pdf](http://www.tritec-energy.com/common/pdf/tritec-service/TRI-KA_Operating-instructions_en.pdf)

Valentine Software. (s.a.). *PV\*SOL*. Gevonden op 3 april 2017 op het internet: <http://www.valentin-software.com/en/products/photovoltaics/57/pvsol-premium>



Van de Zon. (2014, 13 december). *FlatFix Fusion: het revolutionaire lichtgewicht plat daksysteem voor zonnepanelen!*. Gevonden op 28 maart 2018 op het internet:  
<https://www.youtube.com/watch?v=29jPYRVy6m0>

Van Hoolst, G. (2014, 14 maart). *Oefeningen schaduw Gregory* [mail]. s.i.

Vlaanderen is energie. (2017). *Zonnekaart Vlaanderen: hoe geschikt is uw dak voor zonnepanelen of een zonneboiler?*. Gevonden op 3 april 2017 op het internet:  
<http://www.energiesparen.be/zonnekaart>

Zonnepanelen West-Friesland. (s.a.). *Montagesysteem voor plat dak met allerlaagste dakbelasting*. Gevonden op 28 maart 2017 op het internet:  
<http://zonnepanelenwestfriesland.weebly.com/plat-dak.html>



FACULTEIT INDUSTRIËLE INGENIEURSWETENSCHAPPEN  
TECHNOLOGIECAMPUS GEEL  
Kleinhoefstraat 4  
2440 GEEL, België  
tel. + 32 14 80 22 40  
iiw.geel@kuleuven.be  
iiw.kuleuven.be

