

2014•2015  
FACULTEIT BEDRIJFSECONOMISCHE WETENSCHAPPEN  
*master in de toegepaste economische wetenschappen*

Masterproef  
Recyclage van zonnepanelen: een kosten-baten analyse

Promotor :  
Prof.dr.ir Steven VAN PASSEL

Copromotor :  
De heer Rob HOOGMARTENS

Pieter Van den Bussche  
*Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de toegepaste economische wetenschappen*

2014•2015  
FACULTEIT BEDRIJFSECONOMISCHE  
WETENSCHAPPEN  
*master in de toegepaste economische wetenschappen*

## Masterproef

Recyclage van zonnepanelen: een kosten-baten analyse

Promotor :  
Prof.dr.ir Steven VAN PASSEL

Copromotor :  
De heer Rob HOOGMARTENS

Pieter Van den Bussche

*Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de toegepaste economische wetenschappen*



## **Woord vooraf**

Deze masterproef is een onderdeel van het masterjaar toegepaste economische wetenschappen beleidsmanagement en vormt het sluitstuk van mijn opleiding aan de universiteit van Hasselt. Deze masterproef heeft als titel: Recyclage van zonnepanelen in Vlaanderen: een kosten-batenanalyse. Zoals de titel al deels zegt zal er nagegaan worden of recyclage op Vlaams niveau financieel rendabel is. Dit zal gebeuren door middel van een kosten-batenanalyse. Ik heb gekozen voor dit onderwerp omdat het ten eerste aansluit bij mijn afstudeerrichting beleidsmanagement. Voorts wou ik een onderwerp dat de komende jaren nog heel actueel zal zijn, hetgeen bij dit onderwerp zeker het geval zijn. Bovendien heb ik ook een sterke interesse in milieu en klimaat en was dit onderwerp dan ook een logische keuze.

Graag zou ik ook nog enkele dankwoorden richten aan de personen die me geholpen hebben om deze masterproef tot een goed einde te brengen. In eerste instantie wil ik mijn promotor Prof.dr.ir Steven Van Passel bedanken voor het aanreiken van dit interessante onderwerp.

Ook mijn co-promotor Rob Hoogmartens verdient een groot woord van dank. Hij heeft mij gedurende heel de masterpoef intensief begeleid. Ik kon bij hem steeds terecht voor allerhande vragen en hij beantwoordde deze altijd met veel plezier. Bovendien wil ik hem ook bedanken voor het vele maal nalezen van mijn teksten en de bijhorende opbouwende feedback.

Bovendien zou ik ook graag Steve Vandenbroeck bedanken voor het nalezen van de volledige masterproef. Verder wil ik ook Evelyne Berden bedanken voor het nalezen van bepaalde delen van mijn masterproef en de tips die ze mij gaf in verband met lay-out.

Tot slot wil ik graag mijn ouders bedanken voor de financiële en morele ondersteuning die ze mij gegeven hebben. Zonder hen kon ik nooit beginnen aan deze opleiding en ze zeker ook niet tot een goed einde brengen. Helaas is mijn papa in het begin van dit academiejaar plots overleden. Daarom draag ik ook deze masterproef met veel plezier aan hem op.



## Samenvatting

We zijn steeds meer genoodzaakt om over te stappen op hernieuwbare energie om zowel de gevolgen van de opwarming van de aarde tegen te gaan, alsook de uitputting van grondstoffen tegen te gaan. Dit heeft er voor gezorgd dat we reeds massaal zijn overgeschakeld op hernieuwbare energie en dus ook op fotovoltaïsche panelen mede dankzij het subsidiesysteem van de groenestroomcertificaten. De sterke groei van de fotovoltaïsche panelen zal er voor zorgen dat er in de toekomst een grote stroom aan end-of-life panelen zal vrijkomen. Er zal dus nood zijn aan recyclagetechnieken om deze afvalstroom op te vangen en de uitputting van zeldzame (aard)metalen tegen te gaan die in fotovoltaïsche panelen zitten. De recyclage van fotovoltaïsche panelen is een nog niet veel besproken topic en zal daarom de focus vormen van deze thesis. Door middel van een literatuurstudie, kosten-baten analyses, sensitiviteitsanalyses en dynamische analyses zal nagegaan worden of het recycleren van fotovoltaïsche panelen financieel haalbaar is.

Er wordt ingegaan op de verschillende spelers die actief zijn op de markt: de producenten, leveranciers, de consumenten en PV Cycle met haar partners. Uit dit hoofdstuk blijkt dat er geen Belgische producenten meer zijn. Verder zijn er ongeveer 68 erkende leveranciers aanwezig en telt België begin 2015, 236.503 installaties. Tot slot wordt de recyclagemarkt georganiseerd door de non-profit organisatie PV-Cycle. Zij organiseren de inzameling, het transport en de recyclage van fotovoltaïsche panelen. Hiervoor werken ze samen met een aantal partners: leveranciers van fotovoltaïsche panelen, transportbedrijven en recyclagebedrijven voor de verwerking van de panelen.

Hierna zal het soort panelen besproken worden die gebruikt zullen worden in deze thesis en de materialenstroom. Uit dit hoofdstuk blijkt dat silicium panelen en koper-indium-gallium-seleniumpanelen (CIGS) de meest voorkomende panelen zijn en daarom zal er verder gewerkt worden met dit type panelen. Binnen dit hoofdstuk worden de voor- en nadelen van elk type van de panelen vergeleken alsook de samenstelling en de recycleerbaarheid. Uit deze bespreking kan er besloten worden dat de panelen voornamelijk uit glas en aluminium bestaan. Voorts bestaan de panelen ook uit een kleine fractie zeldzame materialen. Voor de silicium panelen zijn dit voornamelijk zilver en silicium en voor de CIGS zijn dit voornamelijk indium, selenium en gallium. Bovendien zijn deze zeldzame metalen nog niet goed recycleerbaar, het recyclagepercentage schommelt tussen 30 à 40%. Dit in tegenstelling tot bijvoorbeeld aluminium, waar het recyclagepercentage 100% is. Verder worden de samenstellingspercentages met de recyclagepercentages gecombineerd om de materialenstroom in kaart te brengen.

Kort zal er ook in gegaan worden op vier soorten wetgeving. De *Restriction of Hazardous Substances* wetgeving (RoHS), afgedankte elektrische en elektronische apparatuur wetgeving (AEEA), het Vlaams reglement betreffende het duurzaam beheer van materiaalkringlopen en afvalstoffen (VLAREMA) en tot slot de milieubeleidsvereenkomst. Algemeen kan er besloten worden dat deze wetgevingen tot doel hebben om het milieu en de gezondheid van de mens te beschermen. Deze wetgevingen leggen vooral de nadruk op de verantwoordelijkheid van de producenten. Zij mogen bijvoorbeeld geen schadelijke stoffen zoals lood en cadmium in de panelen verwerken. Voorts hebben zij een aanvaardingsplicht en moeten zij dus kosteloos de afgedankte panelen aanvaarden en ook zelf instaan voor de financiering hiervan.

Hierna zal overgegaan worden tot de kosten-batenanalyse van de recyclage van fotovoltaïsche panelen om zo de financiële haalbaarheid ervan na te gaan. Er kan kort besloten worden dat de recyclage van silicium panelen de dag van vandaag financieel rendabel is op Vlaams niveau. Met een volume in 2013 van ongeveer 182 ton end-of-life panelen wordt er een netto-baat van 51.121,34 euro gegenereerd. Voor CIGS panelen ziet er het minder rooskleurig uit. Met een volume van 38,93 ton end-of-life panelen wordt er een negatieve baat van -4.735,93 euro behaald, waardoor besloten kan worden dat de recyclage van dergelijke panelen financieel gezien nog niet aantrekkelijk is op Vlaams niveau.

Tot slot worden er in hoofdstuk 6 sensitiviteitsanalyses en dynamische analyses uitgevoerd om om te gaan met leereffecten en onzekere parameters zoals marktprijzen van grondstoffen, recyclagekosten en recyclagepercentages. Uit de sensitiviteitsanalyse blijkt dat de recyclage van silicium panelen in alle simulaties een netto-baat heeft en er een kans is van 99,49% dat de base case minstens behaald wordt. Voor de CIGS panelen is er slechts 53,89% kans dat er een positieve baat behaald wordt. Bij dit type panelen is het interessant om te kijken welke parameter het meeste invloed heeft op de netto-baat. Dit zijn het recyclagepercentage van gallium en de marktprijs van gallium. Door middel van nieuwe technologieën die er toe leiden dat het recyclagepercentage van gallium stijgt, kan de recyclage van CIGS panelen in de toekomst dus mogelijk rendabeler worden. Tot slot is er ook nog een dynamische analyse uitgevoerd. Binnen deze analyse is er een inschatting gemaakt van de toekomstige volumes en is er gewerkt met de volumes die vrijkomen over de jaren 2013 en 2039, omdat in deze periode de meeste end-of-life panelen zullen aanwezig zijn. Tegen 2039 is er een verdubbeling van acht keer het huidige volume van end-of-life fotovoltaïsche panelen. Door deze spectaculaire groei ontstaan er twee effecten, namelijk het leereffect en het optreden van schaalvoordelen. Deze twee effecten zijn in de dynamische analyse verwerkt als één parameter. Deze parameter zal invloed hebben op de gemiddelde recyclagekost. Door een verdubbeling van acht keer van het volume zal er dus een daling op te merken zijn in de gemiddelde recyclagekost. Wanneer we deze effecten toepassen op de silicium panelen kan er besloten worden dat de netto-baat sterk zal toenemen in de toekomst. Voor de CIGS panelen is er een opmerkelijk resultaat. Door de volumegroei en de bijhorende effecten zal ook dit type panelen enkel positieve ranges kennen vanaf 2037 wat de netto-baat van recyclage betreft. Ook hier heeft het recyclage percentage nog steeds de grootste invloed op de netto-baat van recyclage, maar op de tweede plaats staan nu de leereffecten.

Algemeen kan er aan de hand van dit onderzoek geconcludeerd worden dat op dit moment het recycleren van silicium panelen op Vlaams niveau een rendabele activiteit is. Voor de CIGS panelen is dit nog niet het geval. Uit de dynamische analyse blijkt echter dat door de toekomstige volumegroei en haar positieve effecten op de kosten dit wel het geval kan zijn. Als aanbeveling naar de industrie en de overheid toe kunnen er misschien nieuwere technologieën ontwikkeld worden tegen de laagst mogelijke kosten om de zeldzame aardmetalen zoals gallium nog beter te recycleren. Ook kunnen de arbeidskosten nog gedrukt worden door het recyclageproces op een nog betere manier te organiseren. Er kan bijvoorbeeld gekeken worden of bepaalde processen niet geautomatiseerd kunnen worden. Er is dus nog veel groeipotentieel mogelijk wat de recyclage van fotovoltaïsche panelen betreft op Vlaams niveau.

## Inhoudstafel

<b>Woord vooraf</b> .....	<b>I</b>
<b>Samenvatting</b> .....	<b>III</b>
<b>Lijst met figuren</b> .....	<b>IX</b>
<b>Lijst met tabellen</b> .....	<b>IX</b>
<b>Hoofdstuk 1: Onderzoeksplan</b> .....	<b>1</b>
1.1    Probleemstelling .....	1
1.1.1    Het inleidende probleem: de opwarming van de aarde en uitputting van grondstoffen en energiebronnen .....	1
1.1.2    Hernieuwbare energie .....	3
1.1.3    Duurzaam materialenbeheer .....	5
1.2    Centrale onderzoeksvraag en deelvragen .....	6
1.2.1    Centrale onderzoeksvraag .....	6
1.2.2    Deelvragen .....	6
1.3    Onderzoeksmethode .....	6
1.3.1    Deelvraag 1 .....	7
1.3.2    Deelvraag 2 .....	7
1.3.3    Deelvraag 3 .....	9
<b>Hoofdstuk 2: De markt van fotovoltaïsche panelen in Vlaanderen</b> .....	<b>11</b>
2.1    Volumes fotovoltaïsche panelen .....	11
2.2    De producenten van fotovoltaïsche panelen .....	11
2.3    De leveranciers van fotovoltaïsche panelen .....	12
2.4    De gebruikers van fotovoltaïsche panelen .....	12
2.5    De recyclagekant van fotovoltaïsche panelen .....	12
2.5.1    PV Cycle als organisator en haar partners .....	12
2.5.2    Hoe recycleert PV Cycle haar panelen? .....	14
2.5.3    Financieringsmodel .....	16
2.5.4    Resultaten PV cycle .....	17
2.5.5    Toekomst PV Cycle .....	18
<b>Hoofdstuk 3: Materialenstroom</b> .....	<b>19</b>
3.1    Type fotovoltaïsche panelen .....	19
3.1.1    Monokristallijn silicium paneel .....	19
3.1.2    Polykristallijn silicium paneel .....	19
3.1.3    Amorf silicium paneel .....	20
3.1.4    CIGS paneel .....	20
3.1.5    Besluit type panelen .....	21
3.2    Materialenstroom .....	24
3.2.1    Silicium kristallijne fotovoltaïsche panelen .....	24
3.2.2    CIGS panelen .....	25
<b>Hoofdstuk 4: Wetgevend kader recyclage van fotovoltaïsche panelen</b> .....	<b>27</b>
4.1    Richtlijn 2012/19/EU (AEEA) .....	27
4.1.1    Algemene doelstelling .....	27
4.1.2    Toepassingsgebied .....	27



4.1.3	Belangrijkste doelstellingen voor de lidstaten .....	27
4.1.4	Streefcijfers richtlijn.....	28
4.1.5	Besluit richtlijn .....	29
4.2	Restriction of Hazardous Substances (RoHS).....	29
4.2.1	Algemene doelstelling .....	29
4.2.2	Toepassingsgebied.....	29
4.2.3	Specifieke doelstelling .....	30
4.2.4	Verplichtingen verschillende partijen .....	30
4.2.5	Besluit.....	31
4.3	VLAREMA wetgeving .....	31
4.3.1	Algemene doelstelling .....	31
4.3.2	Afgedankte fotovoltaïsche panelen .....	31
4.3.3	Besluit.....	32
4.4	Startnota afgedankte fotovoltaïsche zonnepanelen .....	32
4.4.1	Doelstellingen .....	32
4.4.2	Financiering van de inzameling en verwerking .....	33
<b>Hoofdstuk 5: Kosten-batenanalyse .....</b>		<b>35</b>
5.1	Kosten-batenanalyse recycleurs .....	35
5.1.1	Silicium panelen .....	35
5.1.2	CIGS panelen .....	38
<b>Hoofdstuk 6: Sensitiviteitsanalyse .....</b>		<b>41</b>
6.1	De sensitiviteitsranges .....	41
6.2	Worst-case scenario .....	44
6.3	Best-case scenario.....	45
6.4	Monte-Carlosimulatie .....	46
6.4.1	Monte-Carlosimulatie silicium panelen .....	47
6.4.2	Monte-Carlosimulatie CIGS panelen .....	48
6.5	Dynamische analyse .....	49
6.5.1	Dynamische analyse silicium panelen .....	52
6.5.2	Dynamische analyse CIGS panelen .....	55
<b>Hoofdstuk 7: Conclusies en aanbevelingen .....</b>		<b>59</b>
<b>Lijst van geraadpleegde teksten .....</b>		<b>61</b>
<b>Bijlagen.....</b>		<b>65</b>
Bijlage 1: Aandeel energie uit hernieuwbare bronnen in bruto eindverbruik van elektriciteit in Vlaanderen, bron: VITO eindrapport 2014.....		65
Bijlage 2: Installaties met een vermogen van maximaal 250 kW: waarde van certificaat .....		66
Bijlage 3: Installaties met een vermogen van meer dan 250 kW: waarde van certificaat .....		66
Bijlage 4: overzicht bandingfactoren .....		67
Bijlage 5: evolutie van het aantal installaties .....		68
Bijlage 6: resultaten simulatie rendement fotovoltaïsche panelen .....		69
Bijlage 7: resultaten simulatie rendement fotovoltaïsche panelen GSC .....		71
Bijlage 8 resultaat Monte-Carlo simulatie silicium panelen .....		73
Bijlage 9: resultaat Monte-Carlo simulatie CIGS panelen .....		76

Bijlage 10: resultaat dynamische analyse niet-verdisconteerde netto-baten silicium panelen (2034-2039) .....	79
Bijlage 11: Resultaat dynamische analyse som verdisconteerde baten silicium panelen (2014-2039)	95
Bijlage 12: resultaat dynamische analyse niet-verdisconteerde baten CIGS panelen (2034-2039)	98
Bijlage 13: resultaat dynamische analyse som verdisconteerde baten CIGS panelen (2014-2039)	114



## Lijst met figuren

Figuur 1: uitputtingstijd energiebronnen en grondstoffen, bron: Vlaams Materialenprogramma.....	2
Figuur 2: prijsevolutie indium, bron: Smg Indium .....	2
Figuur 3: dienstverleningsmodel PV Cycle, bron: PV Cycle (2011) .....	14
Figuur 4: module recycling process, bron: First Solar (z.d.).....	16
Figuur 5: resultatenrekening PV Cycle 2013, bron: jaarlijks rapport PV Cycle, 2013 .....	18
Figuur 6: materialenstroom silicium panelen .....	25
Figuur 7: materialenstroom CIGS panelen.....	26
Figuur 8: histogram Monte-Carlo simulatie silicium panelen.....	48
Figuur 9: histogram Monte-Carlosimulatie CIG panelen.....	49
Figuur 10: evolutie end-of-life panelen .....	50
Figuur 11: economies of scale versus learning, bron: Pindyck & Rubinfeld, 2013.....	51
Figuur 12: evolutie gemiddelde recyclagekost silicium panelen .....	53
Figuur 13: histogram som netto verdisconteerde baten 2014-2039 .....	55
Figuur 14: evolutie gemiddelde recyclagekost CIGS panelen .....	56
Figuur 15: som netto-verdisconteerde baat CIGS 2014-2039 .....	57

## Lijst met tabellen

Tabel 1: aandeel energie uit hernieuwbare bronnen, bron: VITO eindrapport 2014.....	3
Tabel 2: evolutie van zonne-energie uit PV-panelen in Vlaanderen, Bron: VITO eindrapport 2014 ..	3
Tabel 3: de evolutie van inzamelpunten en aantal ton behandelde panelen in België, bron: interview PV Cycle.....	17
Tabel 4: overzicht huidige module rendementen, bron: Verhelst, 2012 .....	21
Tabel 5: overzicht meest voorkomende technologieën en hun eigenschappen, bron: Verhelst, 2012	22
Tabel 6: samenstelling silicium kristallijne fofovoltaïsche panelen, bron: Paiano, 2014.....	22
Tabel 7: recyclagepercentage materialen fofovoltaïsche panelen .....	23
Tabel 8: AEEA richtlijn inzameldoelstelling, bron: PV Cycle (2014) .....	28
Tabel 9: AEEA richtlijn: doelstelling nuttige toepassing, bron PV Cycle (2014) .....	29
Tabel 10: overzicht financiële kosten .....	35
Tabel 11: overzicht gemiddelde marktprijzen, 2014,2015 .....	36
Tabel 12: overzicht financiële baten .....	37
Tabel 13: overzicht financiële kosten en baten.....	38
Tabel 14: financiële kosten CIGS panelen .....	39
Tabel 15: overzicht financiële baten CIGS panelen .....	39
Tabel 16: overzicht financiële kosten en baten.....	40
Tabel 17: ranges marktprijzen grondstoffen in euro .....	42
Tabel 18: ranges recyclagepercentage grondstoffen .....	43
Tabel 19: ranges recyclagekost silicium panelen .....	44
Tabel 20: ranges recyclagekost CIGS panelen .....	44
Tabel 21: resultaat KBA worst case silicium panelen.....	45
Tabel 22: resultaat KBA worst case CIGS panelen .....	45
Tabel 23: resultaat KBA best case silicium panelen.....	46
Tabel 24: resultaat KBA best case CIGS panelen .....	46
Tabel 25: toekomstige evolutie end-of-life panelen, bron: gebaseerd op gegevens Vreg .....	50
Tabel 26: Resultaten KBA dynamische analyse siliciumpanelen (euro) .....	53
Tabel 27: resultaat KBA dynamische analyse.....	56



# Hoofdstuk 1: Onderzoeksplan

## 1.1 Probleemstelling

### 1.1.1 Het inleidende probleem: de opwarming van de aarde en uitputting van grondstoffen en energiebronnen

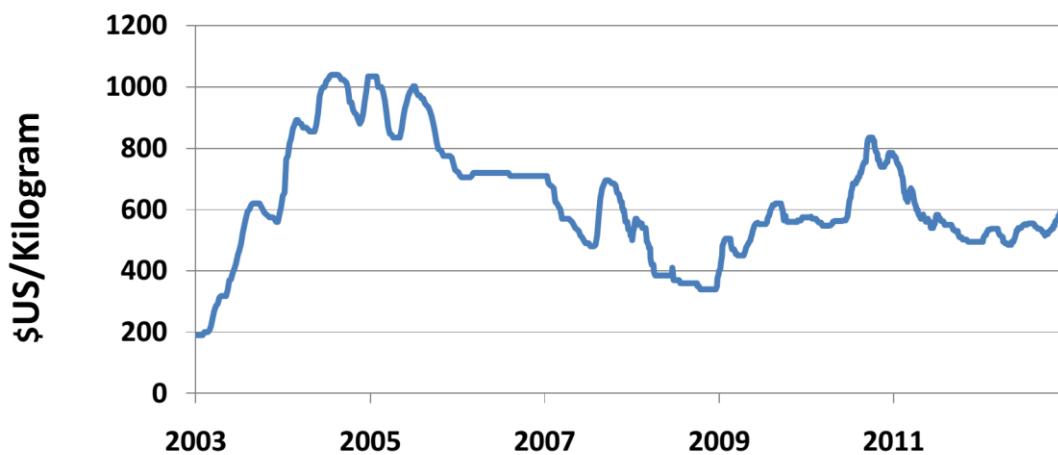
Vandaag de dag zijn we steeds meer genoodzaakt om over te stappen op hernieuwbare energie. Dit is omwille van de opwarming van de aarde en de uitputting van energiebronnen. Volgens een onderzoek van Bollen en Van Humbeeck (2002) is de grootste boosdoener de mens. Menselijke activiteiten, zoals het verbranden van fossiele brandstoffen en industriële processen, verhogen de natuurlijke concentratie van broeikasgassen. Angelo en Reilly-Brown (2014) benadrukken dat de uitstoot van broeikasgassen de belangrijkste oorzaak is van de klimaatverandering. De keuze van energie heeft een belangrijke impact op de CO<sub>2</sub>-uitstoot, omdat broeikasgassen het directe resultaat zijn van energiegebruik. Zo zijn energiecentrales voor 40 procent verantwoordelijk voor de uitstoot van broeikasgassen (Michael en Grainey, 2011). Als we niets aan onze activiteiten veranderen, zal de aarde de komende honderd jaar verder opwarmen met 1,4 à 5,8 °C. Door deze temperatuurstijging zou de zeespiegel met 15 tot 95 centimeter stijgen. Ook Blom-Zandstra en Goosen (2010) merken deze trend op. Zij zeggen dat de weersomstandigheden steeds grilliger gaan worden als we niets doen aan de opwarming van de aarde. De verdere opwarming van de aarde zal bijvoorbeeld leiden tot een daling van de voedselproductie en bijgevolg zullen de voedselprijzen stijgen. Uiteindelijk zal de ondervoeding bij kinderen toenemen. Dit maar om aan te tonen dat klimaatverandering desastreuze gevolgen kan hebben (Angelo en Reilly-Brown, 2014).

Niet enkel de opwarming van de aarde vormt een probleem. Er is ook steeds meer schaarste van bepaalde belangrijke grondstoffen en uitputting van energiebronnen. Volgens het Vlaams Materialenprogramma (2013), dit is een bundeling van de krachten van de overheid, industrie, kenniswereld en middenveld, zijn wij de eerste generatie die te maken zullen krijgen met grondstofschaarste. Zij stellen als oorzaak de steeds toenemende wereldbevolking en de hogere levensstandaard. Deze twee factoren zorgen ervoor dat er steeds meer vraag is naar bepaalde grondstoffen en dat de grondstoffen hierdoor alleen maar schaarser en duurder worden. Aardolie is hier een typisch voorbeeld van, maar ook kritieke metalen en zeldzame aardmetalen die nodig zijn voor de productie van groene technologie, zoals fotonvoltaïsche panelen, worden steeds schaarser en duurder. Volgens een *position paper* (z.d.) van het Vlaams Materialenprogramma dragen grondstoffen voor 30 tot 45 procent bij aan de kostenstructuur van KMO's. Dit creëert natuurlijk een probleem, want als grondstoffen steeds schaarser en duurder worden zullen de eindproducten ook steeds duurder worden en dit kan een economische achteruitgang betekenen. Figuur 1 toont nogmaals het probleem aan van de schaarste van grondstoffen. Neem nu het metaal indium. Indium vormt een belangrijke grondstof voor de productie van fotonvoltaïsche panelen. Volgens het huidig tempo van de productie en consumptie zal deze grondstof tegen ongeveer 2035 al uitgeput zijn. Dit vormt dus een zeer groot probleem wat de productie van fotonvoltaïsche panelen betreft. Uit figuur 2 kan er geconstateerd worden, dat de prijs van indium op 10 jaar tijd meer dan verdrievoudigd is. Dit bevestigt dus ook de stijgende trend die in het Vlaams Materialenprogramma (2013) vermeld werd. Ook wat de uitputting van energiebronnen betreft is er een groot probleem.

Volgens figuur 1 zal aardolie al tegen 2050 uitgeput zijn. Dit alles toont aan dat er dringend maatregelen moeten genomen worden. Ten eerste zal er nog meer overgeschakeld moeten worden naar hernieuwbare energie. Daarnaast speelt ook duurzaam materialenbeheer met daarbij in het bijzonder recyclage, een belangrijke rol om dit probleem op te lossen. Binnen dit laatste aspect zal mijn masterproef zich kaderen.



Figuur 1: uitputtingstijd energiebronnen en grondstoffen, bron: Vlaams Materialenprogramma



\* Prices based on Metals Bulletin's price of free market 99.99% purity indium ingots in U.S. Dollars per kilogram in Rotterdam warehouse. Displayed is the mid-point price for indium based on the high and low price range published by Metal Bulletin as posted on Bloomberg L.P.

Figuur 2: prijsevolutie indium, bron: Smg Indium

### 1.1.2 Hernieuwbare energie

Het is duidelijk dat er iets moet gebeuren aan de opwarming van de aarde. We zijn steeds meer genoodzaakt om over te stappen op hernieuwbare energie om de concentratie broeikasgassen te doen dalen en de niet-hernieuwbare bronnen te sparen. Eén van die hernieuwbare energiebronnen van de laatste jaren zijn fotovoltaïsche panelen. Als je rondom je kijkt, zie je deze panelen overal op de daken. Uit tabel 1 blijkt dat het aandeel van groene energie in Vlaanderen 5,6 procent bedraagt. In 2005 bedroeg dit nog maar 1,9 procent. Er is dus een enorme toename in het gebruik van groene energie. Wanneer er gekeken wordt naar het aandeel van fotovoltaïsche panelen, dan bedraagt deze in 2012 28,6 procent van de totale productie van groene energie, terwijl dit in 2004 nog maar 0,1 procent was. Tabel 2 geeft hier een overzicht van. Hieruit kan besloten worden dat fotovoltaïsche panelen enorm aan populariteit gewonnen hebben.

Tabel 1: aandeel energie uit hernieuwbare bronnen, bron: VITO eindrapport 2014

Jaartallen	Totaal eindverbruik energie uit hernieuwbare bronnen [PJ]	Totaal bruto totaal energieverbruik [PJ]	% hernieuwbare energie / totaal bruto totaal eindverbruik
2005	19,9	1.034,2	1,9
2006	22,5	1.041,5	2,2
2007	26,3	1.014,8	2,6
2008	29,5	1.014,2	2,9
2009	37,6	965,7	3,9
2010	46,5	1.040,4	4,5

Tabel 2: evolutie van zonne-energie uit PV-panelen in Vlaanderen, Bron: VITO eindrapport 2014

jaartallen	Aantal	Operationeel vermogen kWp	Bruto elektriciteitsproductie MWH	Vollastdraaiuren (=productie/ piekvermogen)	% aandeel tov totale bruto groene stroomproductie
2004	438	772	663	850	0,10%
2005	752	1.284	1.102	850	0,10%
2006	1.174	3.294	2.828	850	0,20%
2007	4.174	6.571	5.641	850	0,30%
2008	15.329	39.555	33.958	850	1,50%
2009	65.116	167.082	143.440	850	4,60%
2010	98.215	574.869	493.525	850	14,10%
2011	182.772	1.166.826	1.001.720	850	22,50%
2012	225.444	2.006.874	1.722.901	850	28,60%

Bijlage 1 illustreert nogmaals dat zonne-energie met een bruto energieproductie van 1722,9 GWh na biomassa de grootste energieopwekker is van hernieuwbare energie. Volgens een prognose van Briffaerts et al. uit 2009 zal de markt van fotovoltaïsche panelen jaarlijks met 5 procent groeien. Ook volgens een onderzoek van Schreurs (2009) blijkt dat fotovoltaïsche panelen in de lift zitten.



Er waren groeipercentages van 200 procent per jaar wat PV installaties betreft. Deze groei was te danken aan de subsidies van de overheid en de groenestroomcertificaten.

Volgens de instantie Bouwen Wonen en Energie Vlaanderen (z.d.) krijgt een eigenaar van fotovoltaïsche panelen groenestroomcertificaten onder bepaalde voorwaarden: wanneer er zonnepanelen op het dak van een woning geplaatst worden, dan krijgt de eigenaar van fotovoltaïsche panelen enkel groenestroomcertificaten wanneer het dak of de zoldervloer voldoende geïsoleerd is. Dit betekent dat de warmteweerstand ( $R_d$ ) van het volledige dak en/of zoldervloer ten minste  $3 \text{ m}^2 \text{ K/W}$  moet bedragen. Nadat de zonnepanelen worden geplaatst en voordat ze worden opgestart, is een AREI-keuring nodig. Tot op heden bestaan er twee systemen. Wanneer een eigenaar van fotovoltaïsche panelen deze voor 2013 heeft geplaatst krijgt hij één certificaat per 1.000 kWh elektriciteitsproductie, opgewekt door de panelen. Per certificaat wordt er een bepaald bedrag op de rekening van de houder van het certificaat gestort. Dit is afhankelijk van het maximaal AC-vermogen van de omvormers en van de datum van indiening van de fotovoltaïsche panelen. In bijlage 2 en 3 wordt er een overzicht gegeven van de verschillende waarden van de certificaten. Deze tabellen tonen aan dat de subsidies stelselmatig werden afgebouwd. In het begin waren deze zeer hoog om het plaatsen van fotovoltaïsche panelen te stimuleren, toen bedroegen de certificaten nog 450 euro per certificaat, maar al snel werd het duidelijk dat deze subsidies financieel niet meer haalbaar waren voor de overheid. Voor installaties vanaf 2012 hebben de certificaten nog een waarde van 90 euro per certificaat. Vanaf 2013 werd er een nieuw systeem ingevoerd. Nu krijgt een eigenaar van fotovoltaïsche panelen geen certificaat meer per 1000 kWh, maar wordt de hoeveelheid bepaald door een zogenaamde bandingsfactor. Deze factor bepaalt vanaf hoeveel kWh een eigenaar van fotovoltaïsche panelen recht heeft op één certificaat. Dit is ook weer afhankelijk van het maximaal AC-vermogen van de omvormers en van datum van indiening van de fotovoltaïsche panelen. In bijlage 4 wordt er een overzicht gegeven van deze bandingsfactoren. Tussen haakjes staat hoeveel kWh fotovoltaïsche panelen moeten produceren vooraleer een eigenaar van fotovoltaïsche panelen recht heeft op een certificaat. Vanaf 2013 hebben de groenestroomcertificaten een waarde van 90 euro per certificaat en deze zal 15 jaar lang worden uitgekeerd.

Vanaf 2010 is de groei van fotovoltaïsche panelen sterk afgenomen door de afname van deze subsidies en groenestroomcertificaten. Statistieken tonen aan dat de markt van fotovoltaïsche panelen sterk gegroeid is en in de toekomst nog verder zal groeien, maar dan niet meer zo fel. Door de afzwakking van de groenestroomcertificaten, waarvan de trend duidelijk te merken is in bijlage 2 en 3, zien de prognoses wat het aantal nieuwe installaties van fotovoltaïsche panelen betreft er minder rooskleurig uit. Volgens prognoses van VITO zal het geïnstalleerd vermogen van fotovoltaïsche installaties tot 2020 gemiddeld met 5 procent groeien (Briffaerts, et al., 2009). Dit ligt een stuk lager dan in de jaren 2008 en 2009. Zij geven ook als verklaring hiervoor de verlaagde minimumsteun door de overheid enerzijds en de kostprijs van de installaties die niet de verwachte verlaging zal vertonen, anderzijds. Belangrijk om te vermelden is dat als er fotovoltaïsche panelen op nieuwbouwwoningen geplaatst worden of op een woning die ingrijpend verbouwd wordt en waarvoor een stedenbouwkundige vergunning nodig is sinds 2014, een eigenaar van fotovoltaïsche panelen geen recht meer heeft op groenestroomcertificaten (Bouwen, Wonen en Energie, z.d.). De reden hiervoor is dat bij dit type woningen vanaf 1 januari 2014 een

minimum aandeel van energie uit hernieuwbare bronnen moet komen. Wanneer men deze verplichting niet nakomt zal er een administratieve geldboete opgelegd worden.

### **1.1.3 Duurzaam materialenbeheer**

Zoals reeds werd aangehaald, vormt de schaarste van bepaalde grondstoffen een probleem. Het metaal indium, dat nodig is voor de productie van zonnepanelen, zal zoals eerder vermeld tegen dit tempo al uitgeput zijn in 2035. Bijkomend is er ook nog een tweede probleem. De laatste jaren is zonne-energie sterk toegenomen. De vraag die hierbij moet gesteld worden is: wat moet er gedaan worden met de fotovoltaïsche panelen als ze hun end-of-life bereikt hebben? Doordat er steeds meer mensen fotovoltaïsche panelen nemen, zal het afval in deze sector sterk stijgen. Rond 2009 zijn er zeer veel mensen overgestapt naar fotovoltaïsche panelen, maar wat binnen 20 à 25 jaar als deze panelen versleten zijn? Volgens het onderzoek van Schreurs (2009) is de gemiddelde levensduurte van fotovoltaïsche panelen 20 à 25 jaar. Duurzaam materialenbeheer kan voor beide problemen een oplossing bieden.

Recyclage is niet enkel belangrijk voor het afvalprobleem, maar ook om de uitputting van belangrijke grondstoffen tegen te gaan. Volgens het Vlaams Materialenprogramma (2013) zijn er al veel successen geboekt door doorgedreven sorteer- en recyclagemaatregelen, talrijke bodemsaneringsprojecten, heffingen op storten en verbranden, milieubeleidsovereenkomsten, 'de vervuiler betaalt'-systemen, etc. De recyclage van waardevolle grondstoffen daarentegen zit nog niet op een vergevorderd niveau. Dit vormt nog steeds een moeilijk proces, wat veel energie en logistiek vraagt. De oplossing hiervoor is duurzaam materiaalbeheer. Volgens het Vlaams Materialenprogramma (2013) is hier meer nodig dan enkel efficiënte productieprocessen en innovatieve technologieën. Er zijn ook nieuwe business modellen en innovatieve dienstverlening nodig om de nood aan materialen te verminderen. Verder is er ook nood aan nieuwe samenwerkingsmodellen tussen ontwerpers, producenten en afvalverwerkers. Consumenten moeten geïnformeerd worden over de voetafdruk van producten en diensten. De logistiek moet materialen in gesloten kringlopen laten draaien. De overheid moet de transitie naar een kringloopeconomie ondersteunen via een gericht investeringsbeleid en een aangepast regelgevend kader. Dit is waarom in 2012 het Vlaams Materialenprogramma door OVAM in het leven is geroepen. De overheid, het bedrijfsleven, het middenveld, de kenniswereld en consument gaan samenwerken aan de transitie naar duurzaam materialenbeheer. Binnen het Vlaams Materialenprogramma wordt er gewerkt met drie pijlers. Een eerste pijler is Plan C, met als doelstelling om duurzaam materialenbeheer te versnellen door middel van lange termijn denken en experimenteren (Vlaams Materialenprogramma, 2013). Een tweede pijler is beleidsrelevant onderzoek. Om dit te realiseren brengt Steunpunt Duurzaam Materialenbeheer onderzoekers samen van de Universiteit van Gent, Leuven, Hasselt, Antwerpen en ook onderzoekers van VITO en HUB. Zij onderzoeken welke economische, beleidsmatige en maatschappelijke randvoorwaarden vervuld moeten zijn om de omslag naar een materiaalzuinige kringloopeconomie te realiseren (Vlaams Materialenprogramma, 2013). Een laatste pijler is Agenda 2020. Binnen dit kader worden tegen 2020 45 concrete projecten opgezet met betrekking tot duurzaam materialenbeheer. Er kan besloten worden dat recyclage binnen duurzaam materialenbeheer een sleutelfunctie zal hebben om de uitputting van grondstoffen tegen te gaan en een duurzame oplossing kan vormen.

Recyclage is het centrale thema in dit onderzoek. De vraag hierbij is, hoe we best omgaan met zonnepanelen wanneer ze hun end-of-life stadium bereiken. De focus in deze thesis zal liggen op de recyclage van fotovoltaïsche panelen. Het is dus belangrijk dat alle alternatieven van recyclage worden nagegaan en per alternatief een kosten-batenanalyse wordt uitgevoerd om de financiële haalbaarheid ervan te onderzoeken. Er zal enkel gekeken worden naar netgekoppelde fotovoltaïsche panelen. De term "fotovoltaïsch" is afgeleid van de Engelse term "Photovoltaic". Dit verwijst naar hardware die nodig is om zonne-energie om te zetten in bruikbare energie. (Lievens, 2009). Netgekoppelde toepassingen kunnen hun geproduceerde elektriciteit direct leveren aan een elektriciteitsnetwerk. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een inverter om gelijkstroom in wisselstroom om te zetten. Netgekoppelde systemen hebben geen batterij nodig omdat het openbare elektriciteitsnet dienst doet als virtuele opslag (Lievens, 2009).

Ten eerste zal er bestudeerd worden uit welke actoren de markt van fotovoltaïsche panelen bestaat. Vervolgens wordt er gekeken uit welke verschillende componenten de fotovoltaïsche panelen bestaan en per onderdeel wordt er beoordeeld of ze al dan niet recycleerbaar zijn en hoe fotovoltaïsch panelen gerecycleerd worden. Ook zal het wetgevend kader van de fotovoltaïsche markt bestudeerd worden. Tot slot zal er gekeken worden wat de kosten van deze recyclage zijn en welke baten er tegenover staan om zo de financiële haalbaarheid ervan na te gaan.

## **1.2 Centrale onderzoeksvraag en deelvragen**

### **1.2.1 Centrale onderzoeksvraag**

Uit bovenstaande probleemstelling kan de volgende centrale onderzoeksvraag afgeleid worden: *Is recyclage van netgekoppelde fotovoltaïsche panelen financieel haalbaar?*

### **1.2.2 Deelvragen**

De daarbij horende deelvragen zijn:

*1. Hoe ziet de huidige marktsituatie van fotovoltaïsche panelen er uit in Vlaanderen?*

Binnen deze deelvraag zal als eerste worden ingegaan op de volumes van fotovoltaïsche panelen en alle actoren binnen de markt. Daarna zal er verder ingegaan worden op het wetgevend kader van fotovoltaïsche panelen.

*2. Welke soorten vormen van recyclage bestaan er al op het vlak van fotovoltaïsche panelen?*

Onder deze deelvraag wordt besproken uit welke verschillende componenten een fotovoltaïsch paneel bestaat en daarna wordt er gekeken hoe ze al dan niet gerecycleerd kunnen worden. Tot slot wordt de stroom van afgedankte fotovoltaïsche panelen tot de recyclage ervan in kaart gebracht.

*3. Welke alternatieven zijn financieel haalbaar en welke niet?*

Wanneer er geweten is welke componenten gerecycleerd kunnen worden, wordt er gekeken of de recyclage wel financieel haalbaar is. Dit houdt in dat de kosten van recyclage en de opbrengsten die het met zich meebrengt, door bijvoorbeeld bepaalde componenten door te verkopen aan andere producenten, zullen besproken worden.

## **1.3 Onderzoeksmethode**

### **1.3.1 Deelvraag 1**

Het doel van de studie bij deze deelvraag is een beschrijvend onderzoek. Er zal hier voornamelijk gewerkt worden met secundaire bronnen waaruit gegevens verzameld worden over de wetgeving van fotovoltaïsche panelen en de actoren die actief zijn op de recyclagemarkt.

Het onderzoek bij deze deelvraag zal kwalitatief zijn. Er wordt geprobeerd om de wetgeving te begrijpen en de verschillende actoren in kaart te brengen.

Het zal hier gaan om een correlatieve studie en zeker geen causale studie, omdat er geen interesse is in oorzaak-gevolg-relaties. Er zullen verschillende elementen geïdentificeerd worden die samenhangen met een bepaald fenomeen. Hier zijn de elementen de verschillende soorten wetgeving en de spelers op de markt.

Zoals al eerder gezegd is, gaat hier voornamelijk gewerkt worden met secundaire data. In de wetenschappelijke literatuur zal er gekeken worden welke wetgevingen er allemaal bestaan en deze synthetiseren. Er zal hier voornamelijk gewerkt worden met Eurolex, een databank die onder andere de Europese wetgeving bevat. Verder zal er ook nog gewerkt worden met Ejustice, een website die de Belgische wetgeving groepeerd. Tot slot zal er ook nog gebruik gemaakt worden van de websites van de verschillende spelers die actief zijn op de recyclagemarkt van fotovoltaïsche panelen. Wanneer de secundaire data niet voldoende zouden zijn, wordt er ook gebruik gemaakt van primaire data, maar de focus zal toch voornamelijk liggen op secundaire data.

De mate van onderzoek interferentie zal bij deze deelvraag minimaal zijn. De werkelijkheid zal zo goed mogelijk proberen behouden te blijven om de verschillende elementen te beschrijven.

Het zal een niet-experimenteel onderzoek zijn. Er worden dus geen twee groepen gemaakt, een controle groep en een experimentele groep, omdat dit bij deze vraag niet nodig is. Er wordt geprobeerd de realiteit zo goed mogelijk beschrijven. Dit lukt niet wanneer er met een experimenteel onderzoek gewerkt wordt.

Uit bovenstaande elementen volgt dat de onderzoekssetting een veldstudie zal zijn. Er wordt namelijk gewerkt met minimale interferentie en een correlatieve studie.

Er zal hier gewerkt worden op macro en micro niveau. De wetgeving die beschreven zal worden zal op macro niveau zijn; de verschillende spelers op micro niveau.

De scope van het onderzoek in deze deelvraag zal cross-sectioneel zijn. Op een bepaald moment zal er één meting gedaan worden bij een bedrijf. Aan de hand van deze meting is er de mogelijkheid om te verkennen en te beschrijven. Deze aanpak is ideaal voor een beschrijvend onderzoek. Het is niet nodig om deze metingen in de tijd te herhalen, omdat er geen interesse is in causale verbanden.

De onderzoeksstrategie zal dus eerder een literatuurstudie zal zijn. Er zal in de wetenschappelijke literatuur gekeken worden welke wetgeving er allemaal bestaat voor fotovoltaïsche panelen en er wordt ook een overzicht gegeven van de verschillende spelers op de markt.

### **1.3.2 Deelvraag 2**

Het doel van de studie bij deze deelvraag is een beschrijvend onderzoek. Er zal hier voornamelijk gewerkt worden met secundaire bronnen waaruit gegevens verzameld worden over de

verschillende componenten van fotovoltaïsche panelen en de recyclage ervan. Er zal letterlijk beschreven worden hoe fotovoltaïsche panelen gerecycleerd worden en wat de bijhorende materialenstroom is.

Het onderzoek bij deze deelvraag zal eerder kwalitatief zijn. Er wordt geprobeerd de fenomenen te begrijpen. Er zal in de diepte gekeken worden om inzicht te krijgen in de verschillende componenten van fotovoltaïsche panelen en de recyclagevormen ervan, alsook de materialenstroom.

Het zal hier gaan om een correlatieve studie en zeker geen causale studie, omdat er geen interesse is in oorzaak-gevolg-relaties. Er zullen verschillende elementen geïdentificeerd worden die samenhangen met een bepaald fenomeen. Hier zijn de elementen de verschillende componenten en recyclagevormen.

Zoals al aangehaald, gaat er hier voornamelijk gewerkt worden met secundaire data. In de wetenschappelijke literatuur zal er gekeken worden welke recyclagevormen er allemaal bestaan en deze gesynthetiseerd worden. De databank Ebscohost die de Universiteit Hasselt ter beschikking stelt, zal onder andere hiervoor gebruikt worden. Verder zal er nog gebruik gemaakt worden van Google Scholar om wetenschappelijke artikels te zoeken en ook nog van de verschillende overheidsdiensten om statistieken op te vragen, zoals bijvoorbeeld CREG. Aanvullend, wanneer de secundaire data niet voldoende zijn, wordt er ook gebruik gemaakt van primaire data.

De mate van onderzoek interferentie zal bij deze deelvraag minimaal zijn. De werkelijkheid zal zo goed mogelijk proberen behouden te blijven om de verschillende elementen te beschrijven.

Het zal een niet-experimenteel onderzoek zijn. Er worden dus geen twee groepen gemaakt, omdat dit bij deze vraag niet nodig is. Er wordt geprobeerd de realiteit zo goed mogelijk beschrijven. Dit gaat niet wanneer er met een experimenteel onderzoek gewerkt wordt.

Uit bovenstaande elementen volgt dat de onderzoekssetting een veldstudie zal zijn. Er wordt namelijk gewerkt met minimale interferentie en een correlatieve studie.

Er zal gewerkt worden op micro niveau. Er zullen verschillende organisaties bestudeerd worden hoe zij fotovoltaïsche panelen en de bijhorende componenten recycleren.

De scope van het onderzoek in deze deelvraag zal cross-sectioneel zijn. Op een bepaald moment zal er één meting gedaan worden bij een bedrijf. Aan de hand van deze meting is er de mogelijkheid om te verkennen en beschrijven. Deze aanpak is ideaal voor een beschrijvend onderzoek. Het is niet nodig om deze metingen in de tijd te herhalen, omdat er geen interesse is in causale verbanden.

De onderzoeksstrategie zal dus eerder een literatuurstudie zijn. Er zal in de wetenschappelijke literatuur gekeken worden wat de verschillende componenten zijn van een zonnepaneel en hoe een fotovoltaïsch paneel gerecycleerd wordt, alsook de bijhorende materialenstroom zal beschreven worden.

### **1.3.3 Deelvraag 3**

Het doel van de studie bij deze deelvraag is een verkennend onderzoek. Over deze deelvraag is nog maar weinig kennis beschikbaar in de wetenschappelijke literatuur. De verschillende elementen worden hier in kaart gebracht.

Het onderzoek bij deze deelvraag zal eerder kwantitatief van aard zijn. Door het combineren van gegevens over kosten en opbrengsten die gepaard gaan met het recycleren van fotonvoltaïsche panelen zal er een kosten-baten analyse uitgevoerd worden. Daarna wordt met behulp van cijfermateriaal de verschillende alternatieven bekeken en worden ze vergeleken om zo een beslissing te kunnen nemen of de huidige manier van recycleren al dan niet financieel haalbaar is. Dit wordt dan eerder gedaan aan de hand van kwantitatief onderzoek.

Het zal hier gaan om een correlatieve studie en zeker geen causale studie, omdat er geen interesse is in oorzaak-gevolg-relaties. De verschillende elementen worden geïdentificeerd die samenhangen met een bepaald fenomeen. In deze thesis worden de verschillende opbrengsten en kosten geïdentificeerd.

Er zal hier voornamelijk gewerkt worden met secundaire data. Er zal zoals hierboven al vermeld is gekeken worden in de wetenschappelijke literatuur wat de kosten en opbrengsten zijn van de recyclage van fotonvoltaïsche panelen om zo de financiële haalbaarheid na te gaan. Er zal hier onder andere gebruik gemaakt worden van Google Scholar.

De mate van onderzoek interferentie zal bij deze deelvraag minimaal zijn. De werkelijkheid zal zo goed mogelijk proberen behouden te worden om de verschillende opbrengsten en kosten te beschrijven.

Het zal een niet-experimenteel onderzoek zijn. Er zullen geen twee groepen gemaakt worden, omdat dit bij deze vraag niet nodig is. Er wordt getracht de realiteit zo goed mogelijk te beschrijven en dit gaat niet wanneer er met een experimenteel onderzoek gewerkt wordt.

Uit bovenstaande elementen volgt dat de onderzoekssetting een veldstudie zal zijn. Er zal namelijk gewerkt worden met minimale interferentie en een correlatieve studie.

De onderzoekseenheden zullen op micro niveau geïdentificeerd worden. Er zal gewerkt worden op micro niveau. In de wetenschappelijke literatuur zal er gezocht worden naar ervaringen van recyclagebedrijven om zo de kosten en opbrengsten te identificeren.

De scope van het onderzoek in deze deelvraag zal cross-sectioneel zijn. Er zal op een bepaald moment één meting gedaan worden bij een bedrijf. Aan de hand van deze meting is er de mogelijkheid om te verkennen en te beschrijven. Deze aanpak is ideaal voor een verkennend onderzoek. Het is niet nodig om de metingen in de tijd te herhalen, omdat er geen interesse is in causale verbanden. Er wordt hier gewoon getracht de verschillende opbrengsten en kosten van recyclage van de verschillende componenten in kaart te brengen.

Er kan besloten worden dat de onderzoeksstrategie een literatuurstudie zal zijn. Er binnen de wetenschappelijke literatuur gezocht worden naar opbrengsten en kosten van de recyclage van fotonvoltaïsche panelen.



## **Hoofdstuk 2: De markt van fotovoltaïsche panelen in Vlaanderen**

In dit hoofdstuk zal de Vlaamse marktsituatie beschreven worden van de fotovoltaïsche panelen. Eerst zal er kort worden ingegaan op de volumes van fotovoltaïsche panelen om daarna verder te gaan met de verschillende spelers binnen deze energiemarkt.

### **2.1 Volumes fotovoltaïsche panelen**

Uit een studie van Jaspers, Aernouts en Dams (2014) blijkt dat het totale bruto eindverbruik van elektriciteit voor 10,1% afkomstig is van hernieuwbare energie in 2012. Hiervan is 3,5% afkomstig van fotovoltaïsche panelen. In 2005 bedroeg het eindverbruik van elektriciteit uit hernieuwbare energie nog maar 1,9% waarvan er slechts 0,001% afkomstig was van fotovoltaïsche panelen. Er kan dus wel duidelijk gesteld worden dat fotovoltaïsche panelen een heuse opmars hebben gemaakt in de Belgische energiemarkt. Wanneer er gekeken wordt naar het aantal fotovoltaïsche installaties, staan er in januari 2015 236.503 geïnstalleerd. In bijlage 5 wordt een overzicht gegeven van de evolutie van het aantal installaties door de jaren heen. De jaren 2009 tot 2011 waren de meest opmerkelijke jaren wat de toename van het aantal installaties betreft. In het topjaar 2011 kwamen er 84.561 installaties bij. Na 2011 is er een forse afname; in 2012 kwamen er nog maar 44.138 bij en in 2013 nog slechts 4.053. De reden voor de forse daling vanaf 2012 was natuurlijk de afbouw van de groenestroomcertificaten. Uit bijlage 5 kan ook nog geconcludeerd worden dat de meeste installaties een vermogen hebben van minder dan 10 kW, wat er op wijst dat de meeste installaties terug te vinden zijn bij gezinnen en kleine bedrijven. Wanneer er nu naar de positie van België binnen Europa gekeken wordt, kan er geconcludeerd worden dat België eerder zwak scoort op vlak van fotovoltaïsche energie. Zij wekken slechts 2.983 MW op, op een totaal van 81.464 MW (EPIA, 2014). België draagt slechts 3,66% bij op het vlak van fotovoltaïsche energie. De koploper is Duitsland: zij zijn verantwoordelijk voor 43,8% van de elektriciteit afkomstig van zonne-energie.

### **2.2 De producenten van fotovoltaïsche panelen**

Nu de volumes van fotovoltaïsche energie bekend zijn, zal er kort ingegaan worden op de verschillende spelers. Als eerste zal er gestart worden met de producenten van fotovoltaïsche energie. Op Belgisch niveau kunnen we kort zijn over het de producenten. Vandaag de dag telt België geen producenten meer van fotovoltaïsche panelen. De laatste producent, Photovoltech te Tienen, sloot zijn deuren in 2012. Photovoltech was een spin-off bedrijf, opgericht door Imec in 2001. Zij stelden 276 mensen te werk. De reden voor het faillissement was de overcapaciteit van de markt en de dumpingsprijzen van de Aziatische producenten (De Standaard, 2012). Ook uit de studie van EPIA (2014) blijkt dat de opkomst van de Aziatische concurrenten de Europese markt van fotovoltaïsche panelen onder druk zet. Wanneer er gekeken wordt naar de marktaandeelen van de producenten van fotovoltaïsche panelen is het opnieuw duidelijk dat Aziatische producenten het grootste marktaandeel hebben. Yingli, een Chinese producent, heeft het grootste marktaandeel. Dit marktaandeel bedraagt 8,2%. Deze wordt gevolgd door Trina Solar, opnieuw een Chinese



producent. Dit bedrijf bezit een marktaandeel van 6,7%. De top drie wordt afgesloten door Sharp, een Japanse producent, met een marktaandeel van 5,4% (Statistia, 2015). Er is geen enkele Europese producent terug te vinden in de top 10.

### **2.3 De leveranciers van fotovoltaïsche panelen**

Na de bespreking van de producenten zal er verder gegaan worden met het bespreken van de installateurs van fotovoltaïsche panelen. Momenteel telt Vlaanderen 68 erkende leveranciers (zonnepanelenenergie.be). De meeste leveranciers zijn gelegen in Oost-Vlaanderen. Daar zijn er 22 gevestigd. West-Vlaanderen telt er 17, gevolgd door Limburg 11, Vlaams-Brabant 10 en Antwerpen 8.

### **2.4 De gebruikers van fotovoltaïsche panelen**

Tot slot is er ook nog een vraagzijde, namelijk de gebruikers van fotovoltaïsche panelen. Zoals al eerder in dit hoofdstuk vermeld, telt België begin 2015 236.503 installaties. Dit aantal stelt dan ook de totale omvang voor. Zoals al eerder vermeld, is er tot 2012 een forse toename geweest in het aantal gezinnen en bedrijven die fotovoltaïsche panelen lieten plaatsen.

Waarom zijn er zoveel mensen in het systeem van fotovoltaïsche panelen gestapt? Is dit omwille van de rendabiliteit? Hieronder zal worden gekeken wat fotovoltaïsche panelen opbrengen voor een gemiddeld gezin, bestaande uit drie personen. Eerst zal het rendement bepaald worden volgens het huidige regime, dus zonder groenestroomcertificaten. Volgens Vreg (z.d.) bedraagt het gemiddeld energieverbruik voor een dergelijk gezin 3.500 kWh. Verder wordt er aangenomen dat de eenmalige installatiekost 5.647 euro bedraagt om dergelijk verbruik te kunnen dekken. Voorts is er ook nog een jaarlijkse netvergoeding en deze bedraagt in deze simulatie 94,63 euro per KW. Daarna is de jaarlijkse elektriciteitskost berekend via de V-test van Vreg (2015). Hieruit bleek dat het goedkoopste tarief 718,90 euro bedraagt. Dit bedrag wordt gebruikt om de jaarlijkse besparing aan elektriciteit te berekenen. Deze bedraagt 0,2375 euro per opgewekte kWh. Tot slot werd er nog aangenomen dat er een gewenst rendement van 5% zou behaald worden. Na het uitvoeren van de simulatie blijkt dat dit rendement zelfs na 31 jaar niet bereikt wordt. Voor deze berekening werd er gebruik gemaakt van de simulatie van Zonnestraal (2015). Dit is de belangenvereniging voor particuliere duurzame energie. In bijlage 6 wordt het resultaat van de analyse weergegeven. Wanneer nu een gelijkaardige analyse wordt uitgevoerd wanneer je nog certificaten van 450 euro krijgt per 1000 kWh, bereik je een rendement van 5% al binnen 4 jaar. Dit resultaat wordt weergegeven in bijlage 7. Dit verklaart dan ook meteen waarom zoveel mensen in het systeem stapten en de enorme afname van het aantal installaties door het afschaffen van de groenestroomcertificaten.

### **2.5 De recyclagekant van fotovoltaïsche panelen**

#### **2.5.1 PV Cycle als organisator en haar partners**

##### **2.5.1.1 Wie is PV Cycle?**

PV Cycle is een non-profit onderneming die in 2007 is opgestart. Deze organisatie werd opgericht door enkele producenten van fotovoltaïsche panelen en heeft tot doel om end-of-life fotovoltaïsche panelen in te zamelen, te transporteren en uiteindelijk te recyclen. Zij werken enkel volgens het BATNEEC principe, *Best available techniques not entailing excessive costs*. Dit wil zeggen dat ze alleen maar de best beschikbare technieken gebruiken die geen overmatig hoge kosten met zich meebrengen. Verder hebben ze nog tot doel om hun inzamelnetwerk verder uit te breiden en het leveren van een waardevolle aanvullende adviesverlening. Uit een telefoonconferentie met PV

Cycle blijkt dat PV Cycle geen recyclagebedrijf is. Zij organiseren gewoon heel het recyclageproces. PV Cycle werkt hiervoor samen met verschillende partners. Zij hebben contracten met recyclagepartners, transportpartners en leden die de fotovoltaïsche panelen inzamelen. Zoals hierboven al vermeld, zijn ze een vzw en hun doelstelling is dus niet om winst te maximaliseren. Uit het interview bleek verder nog dat het hun missie is om de beste service voor afvalverwerking aan te bieden aan hun partners tegen een zo laag mogelijke kost en een zo hoog mogelijke uitkomst. In de beginjaren was dit een vrijwillig initiatief. Deze organisatie werd omwille van een interne milieucommitment opgericht. De stichters waren de wetgeving dus eigenlijk al voor en gingen zelf regels creëren zonder dat de wet er in tussen komt. Vanaf 2012 tot het eerste kwartaal van 2014 was er sprake van een overgangsfase, want vanaf dan werd de AEEA richtlijn 2012/19/EU herzien. Deze aanpassing zorgde ervoor dat ook fotovoltaïsche panelen onder deze regeling vallen. Zoals uit hoofdstuk drie zal blijken, moeten producenten van fotovoltaïsche panelen deze panelen kosteloos terugnemen en ze recyclen of hergebruiken. Verder moeten zij de financiering hiervan zelf organiseren. In 2013 ging PV Cycle zich voorbereiden op deze nieuwe wetgeving en in het eerste kwartaal van 2014 ging men de wetgeving implementeren. PV Cycle stond positief tegenover deze wetgeving, omdat het samenvalt met hun gedachtenlijn. In het tweede kwartaal van 2014 zal PV Cycle.BE worden opgericht, maar dit zal afhangen van het feit of de milieubeleidsvereenkomst in de drie gewesten ondertekend geraakt (PV Cycle, 2014).

#### **2.5.1.2 Hoe werkt PV Cycle?**

Stel dat fotovoltaïsche panelen hun end-of-life bereikt hebben, wat moet er dan mee gebeuren? Dan kan een particulier of de leverancier van fotovoltaïsche panelen via de website [pvcycle.org](http://pvcycle.org) het dichtstbijzijnde inzamelpunt opzoeken. Het inzamelpunt is ofwel een fabrikant, een zeer grote importeur of een lokale installateur of een groothandelaar. Deze groepen zijn allemaal lid van PV Cycle. Het is gratis om een PV Cycle inzamelpunt te worden. Het lidmaatschap heeft tal van voordelen, zoals het gratis mogen gebruiken van het PV Cycle logo en de contactgegevens worden kosteloos op de site van PV Cycle geplaatst, wat dus gratis publiciteit betekent. Verder kan een lid van PV Cycle klanten een duurzame dienstverlening aanbieden. Dit houdt in dat klanten er terecht kunnen voor zowel de aankoop van fotovoltaïsche panelen als het inleveren van end-of-life fotovoltaïsche panelen. Leden hebben natuurlijk ook enkele verplichtingen. Zo zijn ze verplicht om kleine hoeveelheden afgedankte fotovoltaïsche panelen kosteloos aan te nemen. Verder zijn leden ook verplicht tot het correct beheer van het inzamelen van kleine hoeveelheden afgedankte fotovoltaïsche panelen. Ondertussen zijn er in België al dertig inzamelpunten (PV Cycle, 2014).

Nadat het dichtstbijzijnde inzamelpunt gecontacteerd is, komt de installateur langs om de fotovoltaïsche panelen te demonteren of te renoveren. Zij nemen het afval en de panelen mee en brengen het naar het dichtstbijzijnde inzamelpunt. De particulier kan er ook voor opteren om zelf de panelen naar een inzamelpunt te brengen. Daar worden de fotovoltaïsche panelen in containers gedeponeerd. Wanneer de containers vol zijn, worden deze naar de recyclagecentra gebracht. Het transport gebeurt uitsluitend met vrachtwagens. In deze recyclagecentra worden de panelen gerecycleerd tot nieuwe grondstoffen. Op de inzamelpunten worden dan terug lege containers geplaatst. Momenteel heeft PV Cycle een 10-tal verwerkingspartners, verspreid over Europa, die de fotovoltaïsche panelen recyclen (PV Cycle, 2014). Deze verwerkingspartners zijn gelegen in België, Italië en Duitsland.

De procedure die hierboven beschreven is, is enkel maar geldig voor particulieren met kleine hoeveelheden fotovoltaïsche panelen. Voor bedrijven die grote hoeveelheden hebben, geldt een andere procedure: de pick-up service. Zij moeten een afspraak maken om een inzameling te plannen. Men komt de fotovoltaïsche panelen direct op de locatie inzamelen en verpakken en daarna worden ze direct naar een recyclagecentrum gebracht. De panelen mogen niet verontreinigd zijn met bijvoorbeeld modder, zand en dergelijke vervuiling, want dit bemoeilijkt het recyclageproces en doet de kosten stijgen (PV Cycle, 2014). Uit een interview met PV Cycle is gebleken dat momenteel 95 procent van de inzameling afkomstig is van deze pick-up service. De zonnepanelen afkomstig van huishoudens (particulieren), maken slechts een heel klein deel van het afval uit. Figuur 3 geeft nog een schematisch overzicht van beide procedures.

Figuur 3: dienstverleningsmodel PV Cycle, bron: PV Cycle (2011)



### 2.5.2 Hoe recycleert PV Cycle haar panelen?

Wat gebeurt er wanneer de panelen in de recyclagecentra zijn aangekomen? Zoals eerder vermeld, recycleert PV Cycle haar panelen volgens het BATNEEC-principe. Door dit principe toe te passen, is PV Cycle in staat om 85-90 procent van een fotovoltaïsch paneel te recyclen. Als je dit percentage vergelijkt met de streefcijfers van de AEEA wetgeving, zit PV Cycle hier al duidelijk boven. PV Cycle recycleert alle soorten panelen die op de markt verkrijgbaar zijn. Voor de recyclage werkt ze samen met bedrijfspartners en O&O bedrijven om ontwikkelingen en innovaties te bevorderen met als doel het bovengenoemde percentage nog te verhogen (PV Cycle, 2014).

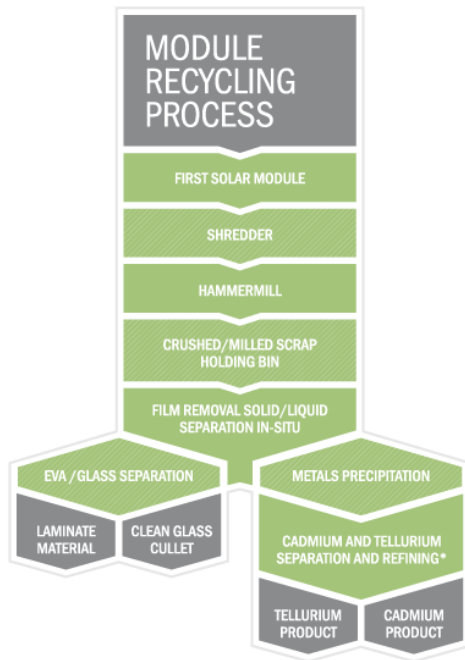
Wat het recyclageproces op zich betreft, moet er een onderscheid gemaakt worden tussen fotovoltaïsche panelen op basis van silicium en deze niet op basis van silicium. Beide soorten vereisen een ander recyclageproces.

Als eerste wordt er in gegaan op de analyse van fotovoltaïsche panelen op basis van silicium. Onder deze vorm horen volgende soorten fotovoltaïsche panelen: monokristallijn, multi-/polykristallijn en amorf. Deze soorten fotovoltaïsche panelen zijn zeer gelijkaardig aan de morfologie van vlakglas en zijn er dus gelijkaardige recyclagetechnieken als in de vlakglassector. Een interessant weetje is dat een fotovoltaïsche zonnepaneel ongeveer uit 80 procent glas bestaat. Het vlakglasrecyclageproces bestaat uit drie stappen. Ten eerste wordt het aluminium frame en de aansluitdoos verwijderd. Daarna wordt het glas vermalen en tot slot verwerkt in de vlakglasrecyclagelijijn. 85 tot 90 procent van het gewicht van dit type panelen kan terug gewonnen worden voor gebruik van nieuwe materialen. Uit een studie van Paiano (2014) blijkt dat men heel wat van de materialen kan recycleren: 95% glas, 100% aluminium, 76 tot 86 % silicium, 78 tot 100% aluminium en 30 tot 50% zilver. Het recyclageproces levert de volgende materialen op: ferro- en non-ferrometalen, glas, silicium-floats en kunststoffen. Het glas wordt met bestaande glasscherven gemengd en deels in de vorm van glasvezel of isolatieproducten en deels in de vorm van glasverpakkingsproducten opnieuw geïntroduceerd. De metalen en kunststoffen kunnen gebruikt worden voor de productie van nieuwe grondstoffen (PV Cycle, 2014).

Na de bespreking van de recyclage van fotovoltaïsche panelen op basis van silicium zal er verder in gegaan worden op de panelen die niet gebaseerd zijn op silicium. Hieronder vallen de koper-indium-(gallium)-selium panelen en de cadmium-telluride panelen. Voor deze panelen worden er speciale scheidingstechnieken gebruikt met een hoge output. Ze gebruiken in dit proces voornamelijk chemische mengsels om bepaalde stoffen uit de panelen te winnen. De cadmium-telluride panelen worden eerst in stukken gemalen en daarna worden er chemische baden gebruikt om de semi-conductor materialen er uit te halen. Voor de koper-indium-selium panelen worden er ook gelijkaardige baden gebruikt (Solar Waste, z.d.). Dit recyclageproces wordt ook bevestigd door het Emis (z.d.). Hiervoor werken ze samen met verschillende partners. Als eerste heb je First Solar en Abound Solar, beide lid van PV Cycle. Ze besturen hun eigen individuele systemen voor de CdTe-fotovoltaïsche panelen. In figuur 4 wordt er een schematisch overzicht gegeven van hoe First Solar de fotovoltaïsche panelen recycleert. Abound Solar is sinds 2012 failliet verklaard. Voor de technologie met het chemische bad werkt PV Cycle samen met twee Duitse ondernemingen die operationeel zijn sinds 2011. Voor dit type panelen kan tot op heden 90 procent van het gewicht gerecycleerd worden. Voor bepaalde halfgeleidermaterialen ligt dit percentage al op 95 procent (PV Cycle, 2014).

Uit het interview met de PR-verantwoordelijke van PV Cycle is gebleken dat volledige recyclage theoretisch gezien onmogelijk is. Er is altijd een verlies van materiaal en energie. Technisch gezien is wel alles mogelijk. Er moet altijd gekeken worden of het economisch en ecologisch waardevol is om verder te recycleren. Er moet altijd gekeken worden of er een markt voor bestaat: bestaat er een markt voor plastic? Bestaat er een markt voor aluminium? Voor deze beide producten bestaat er uiteraard een markt. De evolutie van het recyclagepercentage zal afhangen van de nieuwe technologieën die de komende jaren op de markt gebracht worden.

Figuur 4: module recycling process, bron: First Solar (z.d.)



### 2.5.3 Financieringsmodel

PV Cycle verkiest een pay-as-you-go systeem, omdat dit financieel gezien meer haalbaar is dan een voorgefinancierd model. De fotovoltaïsche panelen vallen onder huishoudelijke AEEA en bijgevolg is het de vervuiler die betaalt, de eindconsument dus (PV Cycle, 2014). Op de verschillende financieringsmodellen zal in hoofdstuk 4 verder ingegaan worden.

De hele financiering van het recyclageproces gebeurt via de bijdragen die de leden moeten betalen. Uit de telefoonconferentie met PV Cycle is gebleken dat leden van PV Cycle twee soorten bijdragen moeten betalen. Als eerste is er de administratieve bijdrage. Dit is een kleine bijdragen die de leden jaarlijks moeten betalen om het contract te onderhouden. Een tweede bijdrage is een contributievergoeding. De hoogte van deze bijdrage is afhankelijk van wat je als bedrijf op de markt brengt. Ook het aantal fotovoltaïsche panelen dat je op de markt brengt speelt een rol. Verder is de hoogte van deze bijdrage ook afhankelijk van waar je allemaal actief bent. Stel nu dat je actief bent in zowel België, Italië als Duitsland, dan moet je een vergoeding betalen aan zowel PV België, PV Italië als PV Duitsland. Vervolgens heeft het aantal spelers op de markt ook een invloed. Als er bijvoorbeeld maar 5 bedrijven op de markt actief zijn, zal de bijdrage veel hoger zijn dan wanneer er 100 bedrijven actief zijn. Tot slot speelt de kost om een module te verwerken ook een rol op de hoogte van de bijdrage.

Met deze twee bijdragen financiert PV Cycle al haar activiteiten. Jaarlijks wordt de contributie vergoeding aangepast aan de werkelijke kosten en de evolutie van de markt in de verschillende landen. Cijfers van deze vergoedingen kon PV Cycle niet geven omwille van competitieve redenen.

PV Cycle kon ook geen cijfers geven over de kosten van heel het recyclageproces. Uit het interview met PV Cycle is wel gebleken dat de hoogste kosten zich niet binnen het recyclageproces zelf bevinden, maar eerder op het vlak van transport en administratie worden gemaakt. Verder heeft de AEEA wetgeving een enorme invloed gehad op de kostenstructuur van PV Cycle. Zo moet ze

bijvoorbeeld financiële garanties bieden als landen dit vragen. PV Duitsland heeft hier al van gebruik gemaakt. Deze financiële garanties zijn bestemd voor de terugname en recyclage van fofovoltaïsche panelen (PV Cycle Netherlands, z.d.). Dit brengt natuurlijk extra kosten mee die PV Cycle moet incalculeren.

#### 2.5.4 Resultaten PV cycle

Volgens het jaarlijks rapport van 2013 heeft PV Cycle over de periode 2010-2014 al 9.774 ton afval behandeld. Het hoogste aantal komt vanuit Duitsland; daar hebben ze 5.555 ton behandeld. In België bedraagt dit 257 ton. In 2013 werd er in totaal 8.330 ton afval door PV Cycle ingezameld. Wanneer er gekeken wordt naar de recyclage van het type fofovoltaïsche panelen, worden er het meeste gerecycleerd van de op silicium gebaseerde panelen, met name 79,3 procent. De koper-indium-(gallium)-selenium staan op de tweede plaats met 17,6 procent. Daarna volgen de flexibele met 2,3 procent en als laatste cadmium-telluride panelen met 0,8 procent.

Wanneer we kijken naar de evolutie van het aantal inzamelpunten in België en het aantal ton verwerkte panelen van België, zien we een positieve evolutie. Deze evolutie wordt weergegeven in tabel 3. Het aantal inzamelpunten is geëvolueerd van 5 inzamelpunten in 2010 naar 31 inzamelpunten in 2014. Het aantal verwerkte ton panelen is mee geëvolueerd van 5 ton in 2010 naar 229 ton in 2013. Verder is uit de telefoonconferentie gebleken dat het aantal verwerkte ton de komende 5 à 10 jaar nog sterk zal toenemen. De reden hiervoor is dat de fofovoltaïsche panelen in de jaren 2000 sterk zijn opgekomen en ze een levensduurte hebben van 20 à 30 jaar. Hierdoor zullen al deze panelen binnen 10 à 15 jaar hun end-of-life stadium bereiken. Tegen eind dit jaar zal er 8 miljoen ton aan fofovoltaïsche installaties in heel Europa geïnstalleerd zijn en dit zal na verloop van tijd allemaal afval worden. Fofovoltaïsche panelen worden niet enkel weggedaan omwille van het bereiken van hun end-of-life stadium. Ook worden ze soms vervangen omwille van een nieuw type technologie van fofovoltaïsche panelen die meer rendement opbrengen, of omwille van schade bij het transporteren of installeren. Door deze verschillende variabelen kan PV Cycle geen voorspelling doen hoe sterk het aantal verwerkte modules volgend jaar zal groeien. Wat wel zeker is, is dat er de komende jaren een enorme stijging van het aantal modules zal zijn.

*Tabel 3: de evolutie van inzamelpunten en aantal ton behandelde panelen in België, bron: interview PV Cycle*

Jaartal	Aantal inzamelpunten	Aantal ton behandeld
	België	België
<b>2010</b>	5	5
<b>2011</b>	11	71
<b>2012</b>	21	168
<b>2013</b>	30	229
<b>2014</b>	31	31

De financiële resultaten van 2013 zien er echter minder rooskleurig uit. Uit figuur 5 blijkt dat ze een negatief geconsolideerd bedrijfsresultaat van 322.000 euro hebben neergezet. PV Cycle verklaart dat dit toch 503.000 euro beter is dan gebudgetteerd. De reden hiervoor is dat de 3.067 ton afval die ze hebben opgehaald, minder was dan ingeschat en dit heeft dus de operationele kosten verlaagd (Annual report PV Cycle, 2013). Wanneer er gekeken wordt naar de jaarrekening

van PV Cycle in België, is er een positief bedrijfsresultaat van 214.734 euro. Uit een interview met de PR-verantwoordelijke van PV Cycle wordt het verschil met het geconsolideerde resultaat toegeschreven aan opstartkosten, gecreëerd door nieuwe vertegenwoordigingen in verschillende Europese landen.

Figuur 5: resultatenrekening PV Cycle 2013, bron: jaarlijks rapport PV Cycle, 2013

2013 BALANCE SHEET  
In thousand EUR, rounded

Assets	2013 Consolidated	Liabilities	2013 Consolidated
<b>Fixed assets</b>	<b>296</b>	<b>Capital and Reserves</b>	<b>2,443</b>
- Intangible assets	171	<b>Result of the year</b>	<b>-322</b>
- Tangible assets	103	<b>Equity</b>	<b>2,121</b>
- Property, Plant & Equipment	75		
- Furniture & vehicles	28	<b>Amounts payable</b>	<b>1,002</b>
- Other tangible assets		- Amounts payable > 1 year	5
- Financial assets	22	- Amounts payable < 1 year	867
		- Accrued charges and deferred income	130
<b>Current assets</b>	<b>2,827</b>		
- Amounts receivable < 1 year	381		
- Cash at bank & in hand	2,393		
- Deferred charges and accrued income	53		
<b>TOTAL ASSETS</b>	<b>3,123</b>	<b>TOTAL LIABILITIES</b>	<b>3,123</b>

2013 P&L

In thousand EUR, rounded

	2013 Consolidated
<b>Turnover</b>	<b>2,319</b>
- Services and miscellaneous goods (-)	-1,794
<b>Gross operating margin (+)</b>	<b>525</b>
- Remuneration; social security and pensions (-)	-763
- Depreciation intangible and tangible fixed assets (-)	-101
- Amounts written off stocks; contracts in progress and trade debtors (+)(-)	11
- Provisions for liabilities and charges (+)(-)	
- Other operating charges (-)	-9
<b>Operating results (+)</b>	<b>-337</b>
- Financial income (+)	48
- Financial charges (-)	-32
<b>Result for the period before taxes (+)</b>	<b>-321</b>
- Income taxes (-) (+)	-1
<b>RESULT FOR THE PERIOD (+)</b>	<b>-322</b>

The consolidated result is a loss of 322,000 EUR, which is 503,000 EUR better than initially budgeted.  
We collected 3,067 tonnes of waste, which was less than the budgeted tonnes.  
This reduced our operational costs. Our actual administration costs were in line with the budget.



## 2.5.5 Toekomst PV Cycle

Nog dit jaar hoopt PV Cycle, PV Cycle.BE op te richten. Dit zal afhangen van de milieubeleidsvereenkomst die momenteel onderhandeld wordt. Wanneer er een compromis gevonden is, zal PV Cycle.BE opgericht worden. Dit was verwacht voor 1 juli 2014, maar de onderhandelingen zijn nog steeds bezig. Deze organisatie zal een VZW worden en zal hoogst waarschijnlijk bestaan uit de volgende leden: PV VLAANDEREN, FEDELEC, NELECTRA, LVMEB, PV CYCLE. Deze VZW zal verantwoordelijk zijn voor de registratie van de 'Producent' als lid die voldoet aan de AEEA wetgeving, de declaratie van op de markt gebrachte (nieuwe) zonnepanelen, inning van de bijdragen en uitvoering van de inzameling en verwerking van afgedankte zonnepanelen (PV Cycle, 2014).

## **Hoofdstuk 3: Materialenstroom**

Nu de markt van fotovoltaïsche panelen gekend is, zal in dit hoofdstuk de stroom van fotovoltaïsche panelen in kaart gebracht worden. Het uiteindelijke doel is om een schematisch overzicht te hebben van het end-of-life stadium van fotovoltaïsche panelen tot de uiteindelijke recyclage. Er zal gestart worden met de keuze van welke types fotovoltaïsche panelen er zullen besproken worden in deze thesis. Per type paneel zullen de eigenschappen en de componenten weergegeven worden. Wanneer dat gebeurd is, zal er gekeken worden hoeveel panelen hun end-of-life bereikt hebben en welke stroom er zal zijn van inzameling tot recyclage.

### **3.1 Type fotovoltaïsche panelen**

Vandaag de dag bestaan er een hele reeks types van fotovoltaïsche panelen. Binnen PV Cycle wordt er een onderscheid gemaakt tussen fotovoltaïsche panelen op basis van silicium en panelen niet op basis van silicium. Binnen deze masterproef zal er verder gewerkt worden met de panelen op basis van silicium en koper-indium-galliumselenide, hieronder afgekort als CIGS. De reden hiervan is dat deze twee type panelen het meest populair zijn. Ut een operationeel rapport van PV Cycle (2014) blijkt dat 79,7 procent van alle type zonnepanelen dat PV Cycle behandeld heeft van het type silicium zijn en 17 procent van het type CIGS. Ook Verhelst (2012) bevestigt dat panelen op basis van silicium het meest voorkomend zijn.

Binnen de silicium fotovoltaïsche panelen bestaan er nog eens drie types (Delmotte, 2013). Als eerste is er het monokristallijn silicium paneel. Verder heb je ook nog het polykristallijn silicium paneel en tot slot nog het Amorf silicium paneel. Hieronder zal er kort ingegaan worden op de eigenschappen en de samenstelling van deze types fotovoltaïsche panelen.

#### **3.1.1 Monokristallijn silicium paneel**

Dit type paneel wordt verkregen door het Czochralski-proces (Delmotte, 2013). Het is een proces waarbij er een staaf in een vat gesmolten silicium gestoken wordt. Het resultaat van dit proces zijn staven die uit één silicium kristal bestaan. Vervolgens worden deze staven in dunne schijven gesneden tot ze 250  $\mu\text{m}$  dik zijn. Daarna wordt dit op de zonnepanelen bevestigd. De bovenste elektroden bestaan uit een rastervormige structuur van dunne baantjes opgedampt metaal. Zo kan het zonlicht ongehinderd invallen op het silicium. De onderste elektronen hebben een reflecterende eigenschap, zodat het licht niet geabsorbeerd wordt en het paneel niet kan opwarmen, want dit zorgt voor rendementsverlies en verlaagt de levensduurte van het paneel. Vervolgens worden de afzonderlijke cellen uitgemeten en geselecteerd. De metalen strips worden aangebracht en op een glasplaat worden tientallen cellen samengebracht en in serie of parallel geschakeld. Hierboven komt opnieuw een glasplaat. Beide worden waterdicht verbonden. Het resultaat is een paneel van ongeveer 1 m<sup>2</sup>. Momenteel heeft dit type paneel het hoogste rendement. Ze hebben een efficiëntie van 13 tot 16 procent. Een groot nadeel van dit type panelen is de hoge kost om ze op grote schaal te produceren. Daarom werden de polykristallijn silicium panelen op de markt gebracht (Verhelst, 2012.)

#### **3.1.2 Polykristallijn silicium paneel**

Bij dit type panelen zijn er twee manieren om ze te produceren. Een eerste manier is om silicium te laten smelten en daarna in grote vierkante blokken te gieten en te laten stollen. Vervolgens worden de blokken in schijven gezaagd en is de verdere procedure gelijkaardig aan de monokristallijn. Enkel moet er hier nog een extra waterstofbehandeling uitgevoerd worden voor het passiveren van de korrelgrenzen. Het nadeel bij dit type panelen is een rendementsverlies doordat



bij het stollen van het silicium er zich defecten voordoen aan de grensvlakken. Dit rendementsverlies wordt deels gecompenseerd doordat er bij dit type panelen rechthoekige zonnecellen kunnen gemaakt worden en de panelen dus beter bedekt kunnen worden (Verhelst, 2012).

Een tweede methode is om het gesmolten silicium in linten te laten stollen in plaats van blokken. Dit wordt de *edge-defined film fed growth* techniek genoemd. Het voordeel van deze techniek is dat er minder materiaal nodig is en minder verloren gaat bij het versnijden van het gestold silicium (Verhelst, 2012). Dit type paneel heeft een efficiëntie van 12 tot 15 procent (Delmotte, 2013).

### **3.1.3 Amorf silicium paneel**

Verder zijn er ook nog de amorf silicium panelen. Deze panelen hebben als grootste nadeel dat ze het laagste rendement hebben. De reden hiervan is dat de atomen niet in een bepaalde volgorde gerangschikt worden en er dus geen kristallen gevormd worden (Verhelst, 2012).

Dit type panelen heeft echter ook een aantal voordelen. Het is veel goedkoper om te produceren. Verder is er ook veel minder silicium nodig dan voor de andere types, omdat bij dit type panelen een dunne film kan toegepast worden en niet moet worden gesneden uit wafers, daar waar dit wel het geval is bij de andere types. Nog een ander voordeel is dat amorf silicium straling 40 keer efficiënter absorbeert dan een monosilicium kristal. Een film van 1 micrometer kan 90% van het licht absorberen dat erop invalt. Een laatste voordeel is dat amorf silicium veel flexibeler is en dus ook in laminaatvorm kan toegepast worden. Dit is ideaal voor platte daken met weinig draagvermogen (Verhelst, 2012). Dit type paneel heeft een efficiëntie van 4 tot 6 procent (Delmotte, 2013).

### **3.1.4 CIGS paneel**

Tot slot is er nog het CIGS paneel. CIGS panelen behoren tot de tweede generatie technologieën. Ze zijn terug te vinden onder de dunne filmtechnologie. Bij dit type technologie zijn slechts dunne laagjes halfgeleidermateriaal nodig die bevestigd worden op een vast draagmateriaal. Volgens Tyagi et al (2013) kunnen de CIGS panelen zelfs efficiëntieniveaus bereikt tot 20% bereiken.

De CIGS panelen bestaan uit vijf dunne film lagen (Theys, 2013). Een eerste laag is het glassubstraat. Een dergelijk glassubstraat heeft een aantal vereisten waaraan het moet voldoen. Zo moet het zorgen voor een vochtbarrière. Deze vochtbarrière beschermt de zonnecel tegen het klimaat bij langdurig gebruik. Een andere vereiste is de chemische inertie van het substraat. Het mag dus niet reageren op andere materialen. Dit is om te voorkomen dat er roest optreedt bij het gebruik. Een tweede laag is het achtercontact. Dit is een dunlaagje, meestal van molybdeen. De functie van dit laagje is om de zonnecel beter te laten presteren. Een derde laag is de absorptie laag. Deze laag bestaat uit koper, indium, gallium en selenium. Deze materialen zorgen voor de absorptie van lichtdeeltjes. Ze hebben een hoger absorptievermogen dan de op silicium gebaseerde panelen. Een volgende laag is de bufferlaag. Deze bestaat meestal uit cadmiumsulfide. Deze laag wordt bevestigd door middel van een chemisch bad; de zogenaamde *chemical bath deposition* techniek. Deze laag dient als bescherming van de absorptie laag. Tot slot is er de vensterlaag. Dit is de toplaag van het paneel. Het is zeer belangrijk dat deze voldoende transparant is om lichtdeeltjes door te laten en ook zorgt voor een goede geleiding. Daarom wordt er meestal gebruik gemaakt van *transparent conduction oxides*. Verder zorgt deze laag ook voor stabiliteit van de zonnecel.

Het voordeel van deze panelen is dat ze goedkoper geproduceerd kunnen worden doordat ze veel dünnere lagen gebruiken en dus halfgeleidermaterialen uitsparen (Lievens 2009). Verder zijn ze veel flexibeler en kunnen ze dus beter geïntegreerd worden in de gebouwen. Dit type panelen kunnen bijvoorbeeld in de dakpannen ingewerkt worden. Verder hebben ze ook een kortere terugverdientijd en zijn ze onafhankelijk van tekorten aan silicium. Tot slot, en heel belangrijk, is dat ze een potentieel hoger rendement kunnen hebben. Helaas is het grote nadeel dat dit type technologie nog zeer duur in aankoop is en de technologie ook nog niet op punt staat.

### 3.1.5 Besluit type panelen

We kunnen besluiten dat er verschillende types panelen bestaan met elk hun voor- en nadelen. Hieronder wordt er nog een samenvattend overzicht gegeven van de verschillende types panelen. Tabel 4 maakt een vergelijking van de rendementen van de verschillende modules. In tabel 5 wordt er nog eens een overzicht gegeven van de voor- en nadelen van de verschillende types.

Tabel 4: overzicht huidige module rendementen, bron: Verhelst, 2012

Technologie	Productierendementen [%]
Monokristallijn	14 tot 20
Polykristallijn	12 tot 15
Amorf silicium	5 tot 10

Tabel 5: overzicht meest voorkomende technologieën en hun eigenschappen, bron: Verhelst, 2012

Soorten	Rendement	Kostprijs	kenmerken
Monokristallijn silicium	***	***	Hoog rendement
Polykristallijn silicium	**	**	Lage kostprijs
Amorf silicium (thin film)	*	*	Flexibel toepasbaar, goedkoop

Wat de samenstelling van de op silicium gebaseerde panelen betreft, gaan we werken met één gemiddelde, omdat de samenstellingen van de verschillende types fotovoltaïsche panelen niet zo erg veel verschillen. Volgens het interview met PV Cycle bestaan de panelen op basis van silicium voor 80 % uit glas, 10% uit metaal en 10% andere materialen (silicium, zilver, zink,...). Uit een studie van Bio Intelligence Service (2011) blijkt dat dit type paneel bestaat uit 74,16% glas, 10,30% aluminium, 6,55% EVA, 0,57% koper, 0,006% zilver, 0,12% tin, 0,07% lood, 3% silicium en 5,23% andere materialen. Deze gegevens zijn vrij gelijkaardig aan die van PV Cycle. Ook informatiedienst BINE (2010) toont gelijkaardige samenstellingen aan. Tot slot is er nog een studie van Paiano (2014). In tabel 6 wordt er een overzicht gegeven van de samenstelling van fotovoltaïsche panelen zoals die in de studie terug te vinden is. In deze thesis zal er verder gewerkt worden met de gegevens van Paiano (2014). De reden hiervoor is dat in deze studie een veel specifiekere uitsplitsing is gemaakt van de samenstelling. Dit zal een correctere kosten-batenanalyse opleveren. Er werd bij PV Cycle nagegaan of deze gegevens nog accuraat zijn en zij konden dat bevestigen.

Voor de samenstelling van de CIGS panelen zal er ook met de gegevens van Paiano (2014) gewerkt worden. Volgens deze studie bestaat een CIGS paneel uit 84% glas, 12% aluminium, 3% EVA, 0,8% koper, 0,12% zink, 0,05% lood, 0,0005% cadmium, 0,02% indium, 0,03% selenium en tot slot 0,01% gallium. In tabel 6 wordt dit nog eens overzichtelijk weergegeven.

Tabel 6: samenstelling silicium kristallijne fotovoltaïsche panelen, bron: Paiano, 2014

Proportion in %	c-Si	CIGS
<b>Glass</b>	74,16	84
<b>Aluminium</b>	10,30	12
<b>Polymers (e.g. EVA)</b>	6,55	3
<b>Backingfilm (Tedlar)</b>	3,60	
<b>Adhesive (e.g. silicone) potting compound hot melt glue</b>	1,116	
<b>Copper</b>	0,57	0,8
<b>Silver</b>	0,004-0,006	
<b>Tin</b>	0,12	
<b>Zinc</b>	0,12	0,12
<b>Silicon</b>	3,35	
<b>Lead</b>	0,06	0,05
<b>Cadmium</b>		0,0005
<b>Indium</b>		0,02
<b>Selenium</b>		0,3
<b>Gallium</b>		0,1

Tot slot gaan we nog kijken naar de recycleerbaarheid van de verschillende materialen in de panelen. In hoofdstuk 2.5 werden van enkele stoffen reeds de recycleerbaarheid besproken. In dit hoofdstuk gaan we verder in op tin, lood, zink, EVA, backingfilm, silicone en cadmium. Voor al deze stoffen zijn er helaas nog geen gegevens beschikbaar wat de recycleerbaarheid betreft van deze materialen, toegepast in fotovoltaïsche panelen. Daarom gaan we kijken naar de recycleerbaarheid bij andere toepassingen. Er dient ook wel opgemerkt te worden dat het hier gaat om technische recyclagepercentages. Voor tin is er gekeken naar de recycleerbaarheid ervan bij printplaten van computers. Volgens Pares, Pereira en Martins (2012) is er onder perfecte omstandigheden een recyclagepercentage mogelijk van 97,5%. Dit werd bekomen door elektrowinning. Dit is een techniek om metaalionen uit een geconcentreerde substantie te verwijderen (Benedict, z.d.). Verder werd er nog een gelijkaardig onderzoek gedaan, waarbij er opnieuw tin gewonnen wordt uit printplaten, maar nu van LCD schermen. Dit werd gedaan via elektrolyse (Lee, et al., 2014). Hier werd een recyclagepercentage bereikt van 93,2%. Dit ligt vrij dicht bij de resultaten van het ander onderzoek. Daarom zal er in deze thesis een gemiddelde van beide genomen worden, namelijk 95,35%. Wat lood betreft zal er gekeken worden naar het winningspercentage uit *lead acid batteries*. Hierover is al veel onderzoek gedaan en vrij unaniem kan er gesteld worden dat het

recyclagepercentage bijna 100% is. Een onderzoek van Pan, Zhang, Sun, Wang en Yang (2012) toont aan dat men 99,8% van het lood uit de batterijen kan halen. Hiervoor gebruiken ze de techniek elektrolyse. Ook Volpe, et al (2009) tonen een dergelijk hoge recovery rate aan. Zij hebben de een recovery rate becijferd op 99,7%. Wat het materiaal zink betreft zitten we volgens een artikel van de international zinc association (2011) rond 90%. Vmzinc (z.d.) spreekt zelfs van 95%. Kurama en Göktepe (2003) komen uit op een recovery rate van 87% van zink wanneer zij de techniek hydrometallurgical toepassen. In deze thesis zal er daarom gewerkt worden met een recyclagepercentage van 90%. Wat de recyclage van EVA betreft, is er nog niet veel informatie beschikbaar. Daarom zal er gekeken worden naar een studie van Membrane technology and research Inc (z.d.). Deze studie gaat over het recycleren van waardevolle materialen uit een reactor installatie van zuiveringsgas. Uit deze studie blijkt dat 80% van het ethyleen kan teruggewonnen worden. Dit is dan ook het recyclagepercentage waarmee er gewerkt zal worden. Het volgende materiaal is silicone. Silicone is zeer moeilijk recyclebaar, maar de laatste jaren zijn er nieuwe innovaties geweest op vlak van recyclage van silicone. Silicone wordt gerecycleerd door de devulcanizing methode. Deze recyclagemethode wordt voornamelijk gebruikt in de bandenindustrie. Volgens een experiment van banden- en rubberfabrikant Goodyear is er een recyclagepercentage van 80% mogelijk (about.com, z.d.). Dit is een enorme vooruitgang ten opzichte van oudere methodes waar slechts een percentage van 40% wordt behaald. Voor het volgende materiaal, de backing film, zal er de assumptie gemaakt worden dat deze voor 85% recycleerbaar is. De reden hiervoor is dat er geen gegevens beschikbaar zijn over het recyclagepercentage van dit materiaal. Er wordt voor 85% geopteerd, omdat volgens PV Cycle (2014) de meeste materialen voor gemiddeld 85% kunnen gerecycleerd worden. Tot slot is er nog het materiaal cadmium. Voor het recyclagepercentage wordt er gekeken naar de recyclage van batterijen op basis van cadmium. Volgens Fthenakis (2004) is er een recyclagepercentage van 99,95% en kan dit ook bereikt worden bij de recyclage van cadmium uit fotovoltaïsche panelen. Tabel 7 geeft alles nog eens overzichtelijk weer.

*Tabel 7: recyclagepercentage materialen fotovoltaïsche panelen*

<b>Materiaal</b>	<b>Recyclagepercentage</b>
<b>Glas</b>	95%
<b>Aluminium</b>	100%
<b>EVA</b>	80%
<b>Backing film</b>	85%
<b>Silicone</b>	80%
<b>koper</b>	89%
<b>zilver</b>	40%
<b>Tin</b>	95,35%
<b>Zink</b>	90%
<b>Silicium</b>	81%
<b>Lood</b>	100%
<b>Cadmium</b>	99,95%
<b>Indium</b>	30%

<b>Selenium</b>	30%
<b>Gallium</b>	30%

Nu er geweten is welke types van fotovoltaïsche panelen er in deze thesis gebruikt zullen worden, zal er in het volgende deel in gegaan worden op de stroom van de panelen.

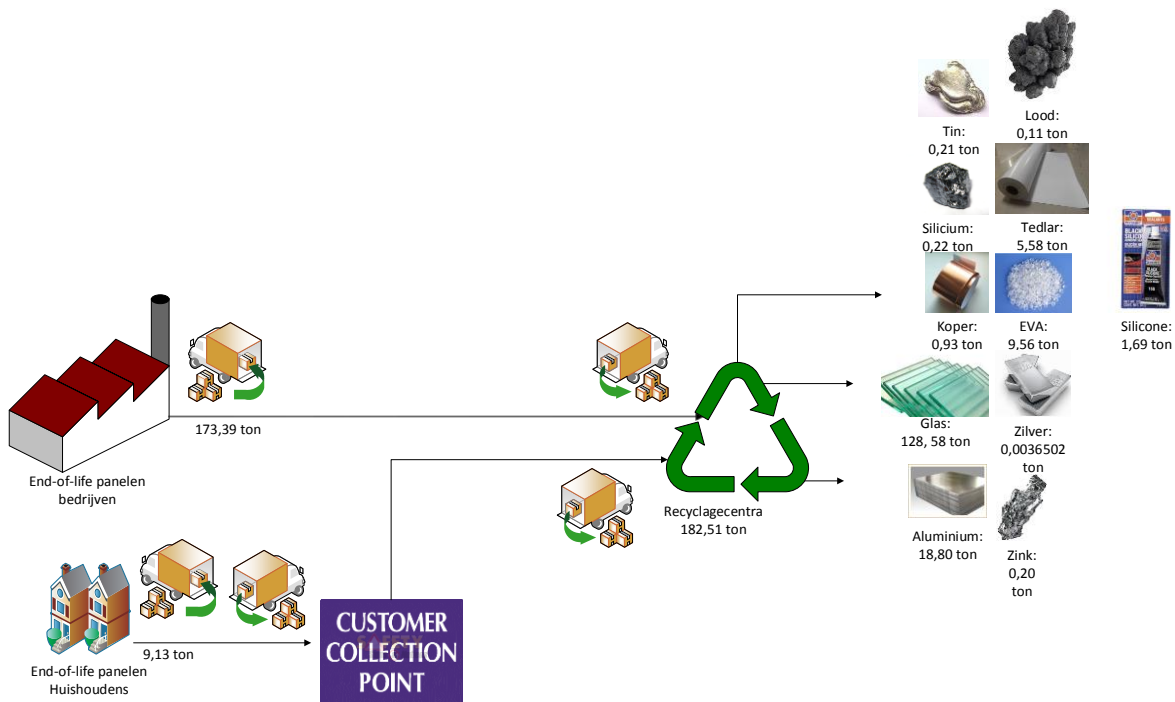
## **3.2 Materialenstroom**

In dit stuk zal verder gegaan worden met de materialenstroom van end-of-life fotovoltaïsche panelen. Er zal gekeken worden naar het aantal ton fotovoltaïsche panelen dat er bij de huishoudens en bedrijven opgehaald wordt en hoeveel en welk materiaal dit oplevert. Dit stuk zal eerder een samenvattend deel zijn van wat er in de voorgaande delen al gezegd is. Er zal gewerkt worden met gegevens die we gekregen hebben tijdens het interview met PV Cycle. Als eerste zal er ingegaan worden op de materialenstroom van silicium kristallijne fotovoltaïsche panelen en vervolgens wordt de materialenstroom van CIGS panelen besproken.

### **3.2.1 Silicium kristallijne fotovoltaïsche panelen**

Figuur 6 geeft een schematisch overzicht van de materialenstroom van de recyclage van fotovoltaïsche panelen met alle bijhorende tonnages. In 2012 werd er 9,13 ton van de huishoudens verzameld in de 30 collection points van PV Cycle in België. Via de pick up service van PV Cycle werd er 173,39 ton opgehaald bij de bedrijven. Hieruit kan afgeleid worden dat het overgrote deel afkomstig is van de bedrijven, namelijk 95 procent. In het totaal werd er 182,51 ton in de 10 recyclagecentra verspreid in België, Duitsland en Italië binnen gebracht. Eenmaal aangekomen in de recyclagecentra, worden de panelen ontmanteld en de materialen verder gerecycleerd. Na het recyclageproces blijft er 128,58 ton glas over. Een fotovoltaïsch paneel bestaat zoals eerder gezegd, voor 74,16% uit glas en gemiddeld kan men 95% van een paneel recycleren. Verder blijft er 18,80 ton aluminium over. Er is immers geweten dat een paneel gemiddeld uit 10,30% aluminium bestaat en aluminium 100% recycleerbaar is. Na de recyclage blijft er ook 9,56 ton EVA over. Er is geweten dat een paneel uit 6,55% EVA bestaat en dat EVA voor 80% recycleerbaar is. Dit is een slijtvaste kunststof genaamd Ethyleenvinylacetaat. Verder blijft er ook 0,93 ton koper over. Er is geweten dat een fotovoltaïsch paneel uit 0,57% koper bestaat en voor ongeveer 89% gerecycleerd kan worden. Na het recyclageproces blijft er ook nog 0,0036502 ton zilver over. Een fotovoltaïsch paneel bestaat ongeveer uit 0,005% zilver en zilver kan voor ongeveer 40% gerecycleerd worden. Voorts blijft er ook nog 4,95 ton silicium over. Een fotovoltaïsch paneel bestaat ongeveer uit 3,35% silicium en silicium kan men ongeveer voor 81% recupereren. Een fotovoltaïsch paneel bestaat uit 0,12% tin en is voor 95,35% recycleerbaar, dus blijft er 0,21 ton tin over. Een paneel bestaat ook uit 12% en zink is voor 90% recycleerbaar. Er blijft dus 0,20 ton over. Er is geweten dat een fotovoltaïsch paneel voor 0,06% uit lood bestaat en dat lood 100% recycleerbaar is. Na het recyclageproces blijft er dus 0,11 ton lood over. Voorts blijft er na het recyclageproces ook 5,58 Tedlar over. Tedlar is de merknaam voor de stof Polyvinylfluoride. Deze vormt de ruglaag van fotovoltaïsche cellen. Er is geweten dat een fotovoltaïsch paneel uit 3,60% backing film bestaat en er werd aangenomen dat deze voor 85% recycleerbaar is. Tot slot heb je nog silicone. Na het recyclageproces blijft er 1,69 ton silicone over. Er is geweten dat een paneel uit 1,16% silicone bestaat en voor 80% recycleerbaar.

Figuur 6: materialenstroom silicium panelen

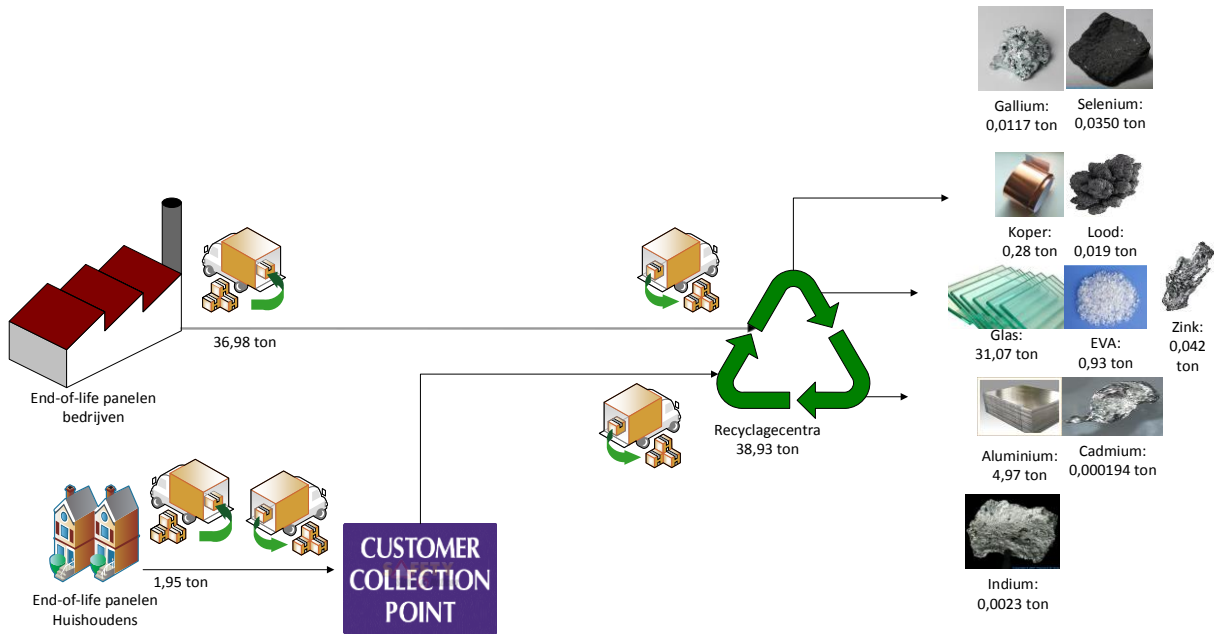


Het is duidelijk dat glas het grootste aandeel heeft in het totale eindproduct, hetgeen via de normale glasrecyclageprocessen verwerkt wordt. De kleinste hoeveelheden zijn zilver en silicium. Belangrijk om te zeggen is dat je deze materialen zeker niet mag verwaarlozen, omdat deze zeldzame materialen zijn. Zoals het Vlaams Materialenprogramma (2013) al reeds aangekaart heeft, is er nood aan zowel innovatieve technologieën, efficiënte productieprocessen, maar ook zeker nieuwe businessmodellen en kwalitatieve dienstverleningsmodellen om een nog hogere recyclage efficiëntie voor fotovoltaïsche panelen te bereiken om zo ook de zeldzame (aard)metalen beter te kunnen recycleren.

### 3.2.2 CIGS panelen

De analyse van de materialenstroom is gelijkaardig als die van de panelen op basis van silicium. Figuur 7 geeft deze materialenstroom weer. Ook hier kan opnieuw besloten worden dat glas en aluminium de grootste volumes vertegenwoordigen in de eindmaterialen. Belangrijk om op te merken is, dat het recyclagepercentage van selenium, gallium en indium slechts 30% is. Hier dient nog meer onderzoek te gebeuren om het percentage te verhogen, want deze stoffen zijn zeer zeldzaam.

Figuur 7: materialenstroom CIGS panelen



## **Hoofdstuk 4: Wetgevend kader recyclage van fotovoltaïsche panelen**

De markt van de fotovoltaïsche panelen, besproken in de voorgaande hoofdstukken, werkt natuurlijk binnen een wetgevend kader. In dit hoofdstuk worden de verschillende wetgevingen omtrent fotovoltaïsche panelen daarom ook toegelicht. Dit vormt namelijk een belangrijk onderdeel van de huidige marktsituatie. Het doel van dit hoofdstuk is om te weten te komen welke verplichtingen er momenteel al bestaan op het vlak van fotovoltaïsche panelen. Hierbinnen worden kort de verplichtingen van de verschillende partijen aangehaald. Als eerste wordt er in gegaan op de AEEA wetgeving, vervolgens wordt de RoHS wetgeving besproken, daarna de VLAMERA wetgeving en tot slot kort nog de milieubeleidsovereenkomst.

### **4.1 Richtlijn 2012/19/EU (AEEA)**

#### **4.1.1 Algemene doelstelling**

Deze richtlijn is een herschikking van de AEEA richtlijn, een Europese richtlijn die op 27 januari 2003 in het leven is geroepen. Deze richtlijn heeft tot doel: de preventie van afgedankte elektrische en elektronische apparatuur, ook wel "AEEA" genoemd. Verder richt deze richtlijn zich op het hergebruik, recyclage en andere vormen van nuttige toepassingen van dergelijke afvalstoffen. Voorts beoogt deze richtlijn een verbetering van de milieuprestaties van alle marktdeelnemers, zoals producenten en distributeurs, die bij de levenscyclus van elektrische en elektronische apparatuur betrokken zijn (RICHTLIJN 2012/19/EU, 2012).

#### **4.1.2 Toepassingsgebied**

Vanaf 2012 vallen fotovoltaïsche panelen ook onder de AEEA richtlijn, hetgeen voorheen nog niet het geval was. De definitie van AEEA is als volgt: "apparaten die elektrische stromen of elektromagnetische velden nodig hebben om naar behoren te kunnen werken en apparaten voor het opwekken, overbrengen en meten van die stromen en velden" (RICHTLIJN 2012/19/EU, 2012).

#### **4.1.3 Belangrijkste doelstellingen voor de lidstaten**

De lidstaten krijgen een hele reeks doelstellingen opgelegd, waaraan ze moeten voldoen.

Als eerste moeten de lidstaten de nodige inspanningen doen om de wettelijke en bestuursrechtelijke bepalingen in werking te doen treden om uiterlijk op 14 februari 2014 aan deze richtlijn te voldoen (RICHTLIJN 2012/19/EU, 2012).

Een tweede doelstelling is het ontwerp en de productie van elektrische en elektronische apparatuur met het oog voor het vergemakkelijken van de ontmanteling en nuttige toepassing, en in het bijzonder het hergebruik en recycleren van AEEA te stimuleren (RICHTLIJN 2012/19/EU, 2012).

Verder moeten de lidstaten passende maatregelen nemen om de samen met het ongesorteerd stedelijk afval te verwijderen AEEA tot een minimum te beperken en een hoog niveau van gescheiden inzameling van AEEA te bereiken. Het is de verantwoordelijkheid van de producten om terugnamesystemen voor AEEA in te voeren, waarbij de laatste houders en distributeurs dergelijke afvalstoffen kosteloos kunnen inleveren (RICHTLIJN 2012/19/EU, 2012). PV Cycle is hier een goed voorbeeld van. Zoals in hoofdstuk 2 besproken, is dit een non-profit organisatie die opgericht is door enkele producenten van fotovoltaïsche panelen. PV Cycle neemt de inzameling, transport en recycling van fotovoltaïsche panelen voor haar rekening (PV Cycle, 2014).



De lidstaten moeten er eveneens voor zorgen dat producenten of derden die in hun naam handelen, systemen invoeren voor de verwerking van AEEA, met het gebruik van de beste beschikbare technieken voor verwerking, nuttige toepassing en recycling (RICHTLIJN 2012/19/EU, 2012) .

Tot slot dragen de lidstaten er zorg voor dat de producenten voorzien in ten minste de financiering van de inzameling, verwerking, nuttige toepassing en milieuhygiënische verantwoorde verwijdering van AEEA van particuliere huishoudens en andere dan particuliere huishoudens (RICHTLIJN 2012/19/EU, 2012).

#### **4.1.4 Streefcijfers richtlijn**

Hieronder worden er twee tabellen weergegeven die de streefcijfers bevatten waaraan de lidstaten moeten voldoen. Tabel 8 heeft betrekking op de inzameldoelstelling en tabel 9 op de doelstellingen met betrekking tot de nuttige toepassing. Met nuttige toepassing wordt bedoeld dat men bepaalde componenten uit end-of-life fotovoltaïsche panelen niet zomaar vernietigt, maar dat het afval toch nog een nuttige functie heeft. Een voorbeeld hiervan is, het verbranden van afvalstoffen om industriële processen van energie te voorzien (IVCIE, z.d.). Tabel 9 is van toepassing op de categorie waaronder de fotovoltaïsche panelen vallen. Voor andere categorieën gelden andere streefcijfers.

*Tabel 8: AEEA richtlijn inzameldoelstelling, bron: PV Cycle (2014)*

<b>Vanaf 2012</b>	<b>vanaf 2016</b>	<b>Vanaf 2019</b>
Minimum 4kg/inwoner per jaar van AEEA van huishoudens of dezelfde ingezamelde hoeveelheid aan AEEA in België in de drie voorgaande jaren	Het minimum inzamelingspercentage bedraagt 45% van het gemiddeld gewicht aan EEA op de markt geplaatst in de betreffende lidstaat in de drie voorgaande jaren	Minimum inzamelingspercentage bedraagt 65% van het gemiddeld gewicht aan EEA op de markt geplaatst in de betreffende lidstaat in de drie (3) voorgaande jaren of 85% van voortgebracht AEEA in die lidstaat.

Tabel 9: AEEA richtlijn: doelstelling nuttige toepassing, bron PV Cycle (2014)

<b>Vanaf 13.08.2014 tot 14.08.2015</b>	<b>Vanaf 15.08.2015 tot 14.08.2018</b>	<b>Vanaf 15.08.2018</b>
Percentage nuttige toepassing tot ten minste 75 % van het gemiddelde gewicht per apparaat verhoogd	80% nuttige toepassing	85% nuttige toepassing
Ten minste 65% recyclage	70% voorbereid voor hergebruik en recyclage	80% voorbereid voor hergebruik en recyclage

Bron PV Cycle, 2014

#### **4.1.5 Besluit richtlijn**

Er kan besloten worden dat producenten van fotovoltaïsche panelen verplicht zijn om end-of-life panelen kosteloos terug te nemen en deze te recyclen of te hergebruiken. Zij staan dus zelf in voor de financiering van heel dit proces. Dit toont nogmaals aan waarom het interessant is om de recyclage van fotovoltaïsche panelen grondiger te bestuderen en waarom recyclage voor producenten belangrijk is.

## **4.2 Restriction of Hazardous Substances (RoHS)**

### **4.2.1 Algemene doelstelling**

Het is een Europese richtlijn van 8 juni 2011 die als doelstelling heeft om voorschriften te voorzien om het gebruik van gevaarlijke stoffen in AEEA te beperken en zo bij te dragen tot de bescherming van de volksgezondheid en het milieu (RICHTLIJN 2011/65/EU, 2011). Om deze richtlijn dwingend van aard te maken, moeten lidstaten sancties opleggen wanneer de betrokken partijen zich niet aan de hieronder opgelegde verplichtingen houden. Deze sancties moeten volgens de richtlijn doeltreffend, evenredig en afschrikkend zijn. De sancties worden geregeld in de wet van 21 december 1998. Er kunnen allerlei sancties worden opgelegd. Dit kan gaan van gevangenisstraffen van acht dagen tot drie jaar tot geldboetes van 160 euro tot vier miljoen euro (wet 21 december 1998, 1999).

### **4.2.2 Toepassingsgebied**

Deze richtlijn is van toepassing op een hele reeks van elektrische en elektronische apparatuur, waaronder ook fotovoltaïsche panelen. Meer in het bijzonder, fotovoltaïsche panelen die bestemd zijn voor gebruik in een systeem dat door vakmensen is ontworpen, gemonteerd en geïnstalleerd voor permanent gebruik op een bepaalde plaats om energie uit zonlicht te produceren voor openbare, commerciële, industriële en residentiële toepassingen (RICHTLIJN 2011/65/EU, 2011).

### **4.2.3 Specifieke doelstelling**

De RoHS richtlijn stelt dat de opgesomde EEA, waaronder de fotovoltaïsche panelen de volgende stoffen niet mogen bevatten:

- Lood
- Kwik
- Cadmium
- Zeswaardig chroom
- Polybroombifenylen (PBB's)
- Polybroomdifenylethers (PBDE's)

### **4.2.4 Verplichtingen verschillende partijen**

Voor de fabrikanten wordt er een hele lijst van verplichtingen opgesomd. Zo moeten fabrikanten waarborgen dat hun AEEA die ze op de markt brengen conform zijn aan de in bovenstaande vermelde eisen en verder moeten ze ook procedures hebben om de conformiteit van serieproducten te kunnen blijven waarborgen. Verder moeten fabrikanten de vereiste technische documentatie opstellen en een interne productiecontrole uitvoeren of laten uitvoeren om aan te tonen dat ze conform zijn. De fabrikanten zijn ook verplicht om een EU-conformiteitsverklaring op te stellen en het bekende CE label op het eindproduct aan te brengen. Zij moeten ook beide documenten 10 jaar bewaren en aan de bevoegde autoriteiten doorgeven om conformiteit aan te tonen. Ook moeten de fabrikanten een register bijhouden van non-conforme producten en terugroepen EEA en de distributeurs daarvan op de hoogte houden. Zij zijn tevens verplicht een identificatiemiddel en hun naam, geregistreeerde handelsnaam of hun geregistreeerde merknaam samen met het contactadres aan te brengen op de AEEA of de verpakking ervan. Tot slot nog een belangrijke verplichting: wanneer de op de markt gebrachte AEEA niet conform is met deze richtlijn, zijn fabrikanten verplicht om zo snel mogelijk corrigerende maatregelen te nemen of het product terug te roepen wanneer het een risico vertoont. Zij moeten de autoriteiten hiervan ook op de hoogte brengen (RICHTLIJN 2011/65/EU, 2011).

Ook voor de importeurs van de vernoemde AEEA gelden er een reeks verplichtingen. Zo mogen zij enkel AEEA invoeren binnen de Unie die aan de eisen van de richtlijn voldoet. Verder zijn de importeurs verplicht om te controleren of de fabrikant wel de juiste documenten heeft opgesteld en een correcte conformiteitsbeoordelingsprocedure heeft uitgevoerd of laten uitvoeren. Zij zijn verplicht om gedurende tien jaar een kopie van de EU-conformiteitsverklaring ter beschikking te houden van de markttoezichtautoriteiten. Wanneer importeurs vermoeden dat de AEEA niet conform is met deze richtlijn, moeten zij de fabrikant en de markttoezichtautoriteiten hiervan op de hoogte brengen en mogen zij het product niet op de markt brengen. Indien de importeurs vermoeden dat de AEEA niet conform is met de richtlijn en deze is al op de markt gebracht, moeten zij zo snel mogelijk corrigerende maatregelen nemen of de AEEA terugroepen wanneer er een risico is. Ook de importeurs zijn verplicht om hun naam, geregistreeerde handelsnaam of hun geregistreeerde merknaam en contactadres op de AEEA of verpakking te vermelden. Verder zijn ze ook, net zoals de fabrikanten, verplicht om een register bij te houden van non-conforme producten

en teruggeroepen AEEA. Zij moeten hiervan zowel de distributeurs als de nationale autoriteiten hiervan op de hoogte te brengen (RICHTLIJN 2011/65/EU, 2011).

Tot slot gelden er ook nog een aantal verplichtingen voor distributeurs van AEEA. Zij moeten controleren of de AEEA voorzien is van de CE-markering en vergezeld gaat van de vereiste documenten in een taal die de consumenten en eindgebruikers begrijpen. Wanneer een distributeur vermoedt dat de AEEA die op de markt zal gebracht worden niet conform is met deze richtlijn, mag deze het product niet op de markt brengen alvorens ze conform gemaakt is en is de distributeur verplicht om de fabrikant of importeur en de markttoezichtautoriteiten hiervan op de hoogte te brengen. Wanneer distributeurs vermoeden dat de op de markt gebrachte AEEA niet conform is, zijn ze verplicht om zo snel mogelijk corrigerende maatregelen te nemen of het product terug te roepen wanneer er een risico is. Zij moeten dan ook onmiddellijk de bevoegde nationale autoriteiten op de hoogte brengen. Zij moeten ook op elk moment aan de bevoegde nationale autoriteiten kunnen aantonen door middel van de vereiste documenten of het product conform is aan de richtlijn (RICHTLIJN 2011/65/EU, 2011).

#### **4.2.5 Besluit**

Er kan besloten worden dat producenten, distributeurs en importeurs van fotovoltaïsche panelen aan een hele reeks verplichtingen moeten voldoen. De belangrijkste taak blijft toch nog altijd weggelegd voor de producenten. Zij moeten namelijk fotovoltaïsche panelen ontwikkelen die aan de norm van puntje 4.2.3. voldoen. Wanneer dit niet gebeurt, zullen er sancties opgelegd worden. Deze sancties moeten volgens de richtlijn doeltreffend, evenredig en afschrikkend zijn. Deze richtlijn moest uiterlijk tegen 22 juli 2013 omgezet zijn in nationale wetgeving. In België is dit op 17 maart 2013 in een koninklijk besluit gegoten.

### **4.3 VLAREMA wetgeving**

#### **4.3.1 Algemene doelstelling**

De Vlarema wetgeving is een reeks van omzettingen van Europese richtlijnen, waaronder ook de AEEA richtlijn van 2003. De algemene doelstelling van deze wetgeving is om op een verantwoorde wijze afvalstoffen in te zamelen en te verwerken (Vlarema, 2012).

#### **4.3.2 Afdankte fotovoltaïsche panelen**

Deze wetgeving voorziet ook enkele specifieke regels met betrekking tot fotovoltaïsche panelen. Zo is er een uitgebreide producentenverantwoordelijkheid voor wat de afdankte panelen betreft. De producent heeft sinds 1 januari 2013 namelijk een aanvaardingsplicht. Deze plicht houdt in dat de eindverkopers van fotovoltaïsche panelen verplicht zijn de afdankte panelen van de consumenten terug gratis in ontvangst te nemen. De producenten zijn dan weer verplicht om de in ontvangst genomen fotovoltaïsche panelen van de eindverkopers en tussenhandelaars gratis in ontvangst te nemen. Zelfs wanneer de consument geen vervangend product koopt moet de eindverkoper/producent de panelen gratis in ontvangst nemen. De producent kan enkel van deze aanvaardingsplicht afwijken wanneer hij de inzameling organiseert op collectieve verzamelpunten zoals containerparken en recyclagecentra. De producent staat zelf in voor de financiering van de aanvaardingsplicht. Dit kan zowel via een individuele als collectieve regeling (Vlarema, 2012).

De producent moet aan een reeks verplichtingen voldoen met betrekking tot de aanvaardingsplicht. Zo moet de producent een individueel afvalpreventie- en afvalbeheerplan opstellen en dit voorleggen aan de OVAM. Verder moet de producent een milieubeleidsvereenkomst opstellen. Beide documenten tonen aan hoe er aan de aanvaardingsplicht wordt voldaan. In deze plannen moet er bijvoorbeeld staan welke maatregelen er worden genomen voor de selectieve inzameling van de afvalstoffen, de optimale verwerking van de afvalstoffen, enz. (Vlarema, 2012).

Het ultieme doel van deze aanvaardingsplicht is het stimuleren van de inzameling van afgedankte fotovoltaïsche panelen. Buiten de aanvaardingsplicht zijn er nog een reeks andere verplichtingen die de producent heeft. Zo moeten de afgedankte panelen verwerkt worden met toepassing van de beste beschikbare technieken voor nuttige toepassingen. (Vlarema,2012)

Verder heeft de eindverkoper en tussenhandelaar jaarlijks de plicht om voor 1 juli een overzicht van de totale hoeveelheid fotovoltaïsche panelen, uitgedrukt in aantal en in kilogram, die in het kader van de aanvaardingsplicht in ontvangst werd genomen gedurende het voorgaande kalenderjaar, aan OVAM te bezorgen. (Vlarema, 2012)

Ten slotte moet de producent ook jaarlijks voor 1 juli aan OVAM een overzicht bezorgen van de volgende elementen: (Vlarema,2012)

- de totale hoeveelheid fotovoltaïsche panelen, uitgedrukt in aantal en in kilogram, die in het Vlaamse Gewest op de markt werd gebracht;
- de totale hoeveelheid afgedankte fotovoltaïsche panelen, uitgedrukt in aantal en in gewicht, die in het Vlaamse Gewest werd ingezameld in het kader van de aanvaardingsplicht.
- de inrichtingen waar en de wijze waarop de ingezamelde afgedankte fotovoltaïsche panelen werden verwerkt;
- de totale hoeveelheid van de stoffen die voortkomen uit de verwerking van de afgedankte fotovoltaïsche panelen , uitgedrukt in gewicht, die :
  - werd hergebruikt
  - werd gerecycleerd
  - werd nuttig toegepast
  - werd verwijderd

#### **4.3.3 Besluit**

Ook deze regelgeving wijst op de uitgebreide producentenverantwoordelijkheid van fotovoltaïsche panelen, zeker wat de aanvaardingsplicht betreft.

#### **4.4 Startnota afgedankte fotovoltaïsche zonnepanelen**

Hier zal er kort worden in gegaan op de milieubeleidsvereenkomst (MBO) die momenteel onderhandeld wordt voor afgedankte fotovoltaïsche panelen.

##### **4.4.1 Doelstellingen**

Deze MBO is een overeenkomst waar verschillende partijen onderhandelen om maximaal bij te dragen aan de algemene milieudoelstellingen van het materialendecreet. De doelstellingen zijn de volgende (Strybos, z.d.):

- Het vrijwaren van de gezondheid van de mens en het milieu tegen de potentieel schadelijke invloed van de productie en het beheer van afvalstoffen.
- het tegengaan van de uitputting van hernieuwbare en niet-hernieuwbare hulpbronnen, de verspilling van materialen en energie in het algemeen en de schadelijke gevolgen voor mens en milieu, verbonden aan materiaalgebruik en -verbruik.

Er werd overeengekomen om deze MBO een looptijd van vijf jaar te geven. De onderhandelingen zullen over een heel aantal thema's gaan. Van preventie en hergebruik tot sensibilisering en ook over de financiering van de inzameling en verwerking. Hieronder zal er enkel verder ingaan worden op de financiering, omdat dit een belangrijk onderdeel zal zijn om de kosten-batenanalyse op te baseren.

#### **4.4.2 Financiering van de inzameling en verwerking**

Er wordt een onderscheid gemaakt tussen huishoudelijke en professionele AEEA. Dit onderscheid is van belang, omdat er andere financieringsregelingen zijn voor beide classificaties. Met huishoudelijke AEEA wordt bedoeld dat de machines, apparaten, enz. zowel binnen particuliere huishoudens als bedrijven gebruikt worden (RICHTLIJN 2012/19/EU, 2012). Een typisch voorbeeld hiervan is, een koelkast. Deze wordt zowel binnen huishoudens, als bedrijven gebruikt. Met professionele AEEA wordt bedoeld dat de AEEA enkel maar binnen bedrijven worden gebruikt (RICHTLIJN 2012/19/EU, 2012). Dit kan bijvoorbeeld gaan om specifieke laboestellen. Bij de professionele AEEA moet de klant meestal pas betalen voor de verwerking en inzameling ervan op het moment van de afdanking en niet bij de aankoop. Fotovoltaïsche panelen vallen onder de categorie huishoudelijke AEEA, omdat deze zowel bij gezinnen als bij bedrijven terug te vinden zijn (Strybos, z.d.). Bij huishoudelijke AEEA is de producent/invoerder steeds zelf verantwoordelijk voor de financiering van de aanvaardingsplicht. Gebruikers van fotovoltaïsche panelen moeten zich er gratis van kunnen ontdoen. Mensen zullen veel meer geneigd zijn om hun fotovoltaïsche panelen af te danken aan een collectief systeem wanneer ze dit gratis kunnen doen in plaats van dat ze op dat moment er nog moeten voor betalen (Strybos, z.d.).

Er bestaan een hele reeks mogelijkheden om de aanvaardingsplicht te financieren. Enerzijds heb je een voorgefinancierd systeem en anderzijds een Pay-as-you-go systeem. Een voorgefinancierd systeem houdt in dat producenten de inzameling en verwerking van panelen op voorhand financieren, wanneer het nog geen afval is. Het voordeel hiervan volgens OVAM is, dat het garantie biedt op voldoende financiële middelen wanneer de panelen in hun afvalfase komen. PV Cycle is hier dan weer geen voorstander van. Uit een door hen uitgevoerde studie van 2009 blijkt dat zo'n systeem zo goed als onbetaalbaar is. De reden hiervan is de zeer lange levensduur van zonnepanelen. Een ander mogelijk systeem is een pay-as-you-go systeem. Bij dit systeem gaan producenten/invoerders de inzameling en verwerking pas financieren op het moment dat afval ontstaat. PV Cycle is van dit systeem wel een voorstander, mits wederkerige garantie. Met wederkerige garantie wordt bedoeld dat iedereen die lid is van het terugnamesysteem instaat voor de financiering van de inzameling en verwerking van de leden die uit het systeem stappen, zowel vrijwillig als gedwongen door bijvoorbeeld een faillissement. OVAM vindt dit dan weer geen optimaal systeem, omdat het de huidige consumenten zou bevoordelen, aangezien de eerste jaren na genoeg geen fotovoltaïsche zonnepanelen zullen afgedankt worden en er dus ook geen kosten zijn (Strybos, z.d.).

Elk systeem heeft zijn voor- en zijn nadelen. Er zal eerst een voorbereidende studie moeten gedaan worden waarbij de voor- en nadelen van elk systeem grondig worden bestudeerd. Bij het maken van de keuze van een welbepaald systeem moet er wel rekening gehouden worden met enkele principes (Strybos, z.d.). Zo moet het financieringsmodel in lijn liggen met de gemaakte keuze over de indeling huishoudelijk AEEA dan wel professioneel AEEA. Een tweede belangrijk principe is dat een consument nooit twee maal moet betalen. Verder moet er ook een eenduidige afspraak zijn over de financiering van de terugname van fotovoltaïsche panelen die op de markt gebracht worden voor de datum van invoering van de aanvaardingsplicht. Dit zijn maar enkele voorbeelden van principes. Dit is een goede illustratie van het feit dat de partijen weloverwogen een keuze moeten maken.

Dit jaar zal er verder onderhandeld worden over deze MBO. Het zal nog afwachten worden of de verschillende partijen een compromis zullen vinden.

## **Hoofdstuk 5: Kosten-batenanalyse**

Nu we de materialenstroom weten, kunnen we verder gaan met de kosten-batenanalyse. De analyse kan uitgevoerd worden vanuit verschillende perspectieven. In deze thesis zal er gewerkt worden vanuit het Vlaams perspectief van de recycleurs. De analyse zal toegepast worden op de panelen op basis van silicium en de CIGS panelen. Per categorie zullen eerst de verschillende financiële kosten in kaart gebracht worden. Daarna zal er verder ingegaan worden op de financiële baten.

### **5.1 Kosten-batenanalyse recycleurs**

#### **5.1.1 Silicium panelen**

##### **5.1.1.1 Financiële kosten**

Het verwerken en recyclen van fotovoltaïsche panelen gebeurt natuurlijk niet gratis door de recyclagebedrijven. End-of-life fotovoltaïsche panelen doorlopen een heel proces vooraleer ze gerecycleerd zijn. Dit proces is reeds besproken in puntje 3.3. Hier gaan we verder in op de financiële kosten van dit proces.

Een onderzoek van Frison, et al. (2000) splitst het recyclageproces op in vier kosten componenten: investeringskost, energiekost, ets- en schoonmaakkost en ten slotte arbeidskost. Met etsen wordt het verwijderen van materiaal door middel van chemische baden bedoeld. De investeringskost bedraagt 0,05 dollar per wafer, de energiekost 0,01 dollar, de ets- en schoonmaakkost 0,04 dollar en de arbeidskost 0,14 dollar. Agudo en Evrard (2010) voegen er nog een laatste component aan toe: de verzamelingskost. Deze bedraagt 0,030 dollar per wafer. Er kan besloten worden dat de arbeidskost de grootste component is. Deze kosten staan uitgedrukt per wafer in dollar, natuurlijk zullen deze nog omgezet moeten worden naar euro. Volgens een werknemer van het reeds failliete Photovoltech bestaat een paneel gemiddeld uit 60 wafers en bedraagt het gewicht van het paneel 19,31 kilo. Een wafer is een dunne plak monokristallijn halfgeleidermateriaal. De wisselkoers Amerikaanse dollar- euro bedroeg op 15 februari 2015 0,88 euro (wisselkoers.nl, 2015). Om nu de recyclagekost te berekenen vermenigvuldig je het totale aantal ton end-of-life fotovoltaïsche panelen, 182,51 ton, met 1000 om als eenheid kilo te bekomen. Daarna deel je dit door het gewicht per paneel, in dit geval 19,31 en zo bekom je het aantal panelen. Tot slot vermenigvuldig je het aantal panelen met de 60 wafers. Wanneer deze formule toegepast wordt, bedraagt het totaal aantal wafers 5.671.04,0911. Nu hoef je enkel nog maar de omgezette totale recyclagekost naar euro om te zetten. Deze bedraagt 0,22 euro per wafer. In tabel 10 wordt er een overzicht gegeven van deze recyclagekost. Er kan besloten worden dat de totale financiële kost 122.267,64 euro bedraagt.



Tabel 10: overzicht financiële kosten

Kostencomponent	kost per Wafer	kost per ton	Totale kost
<b>Investeringskost</b>	0,04136 euro	128,51 euro	23.455,43 euro
<b>energie-kost</b>	0,00968 euro	30,08 euro	5.489,57 euro
<b>cleaning-kost</b>	0,03256 euro	101,17 euro	18.464,91 euro
<b>arbeidskost</b>	0,1056 euro	328,12 euro	59.886,19 euro
<b>collectioncost</b>	0,0264 euro	82,02 euro	14.971,55 euro
<b>Totale kost</b>	0,2156 euro	669,9 euro	122.267,64 euro

### 5.1.1.2 Financiële baten

De financiële baten voor de recycleurs bestaan uit de opbrengst van de verkoop van de gerecycleerde materialen. Voor de verkoop van de materialen zal gekeken worden naar de marktprijzen van de eindproducten na recyclage. Een assumptie die er hier wel dient gemaakt te worden, is dat het marktprijzen zijn van nieuwe grondstoffen en niet van gerecycleerde grondstoffen.

Als eerste zal er gestart worden met aluminium. De marktprijs van aluminium bedroeg op 16 oktober 2014 1,4594 euro per kilo (aluminiumprijs.eu, 2014). De glasprijs per kilo bedraagt 0,05 euro (Bio intelligence Service, 2011). Cadmium bedraagt 1,65 dollar per kilo (metalprices.com, 2015). Omgerekend is dit 1,45 euro per kilo. De zinkprijs bedraagt 1,84 euro per kilo (zinkprijs.eu, 2014). Wat tin betreft, bedraagt de marktprijs 16,08 euro de kilo (lme-prijzen.nl, 2015). De prijs voor silicone was moeilijker te vinden. In deze thesis zal gewerkt worden met een siliconekit van het merk Moviset in hoeveelheden van 20 kg. De prijs per kg bedraagt hiervan 2,58 euro (groenebouwmaterialen.nl). De prijs voor de backing film van Tedlar bedraagt ongeveer 5,55 dollar per m<sup>2</sup> (Alibaba.com). Volgens een werknemer van het failliete Photovoltech wordt er per paneel 1,607m<sup>2</sup> van die folie gebruikt en weegt deze 635 gram. Zo komen we uit op een prijs van 12,36 euro per kilogram Voor de overige materialen zal er gewerkt worden met gemiddeldes die afkomstig zijn van het softwareprogramma CES Edupack (2014). In tabel 11 worden de verschillende opbrengsten weergegeven.

Tabel 11: overzicht gemiddelde marktprijzen, 2014,2015

Materiaal	Prijs (euro)/ kilo
<b>glas</b>	0,05 euro
<b>Aluminium</b>	1,46 euro
<b>EVA (kunststof)</b>	1,55 euro
<b>Tedlar</b>	14,05 euro
<b>Silicone</b>	2,58 euro
<b>Koper</b>	6,405 euro
<b>Zilver</b>	558,5 euro
<b>Tin</b>	16,08 euro
<b>Zink</b>	1,84 euro
<b>Silicium</b>	9,07 euro
<b>Lood</b>	5,335 euro
<b>Cadmium</b>	1,45 euro

Nu alle marktprijzen gekend zijn, kunnen de totale financiële baten die voortkomen uit de verkoop van eindproducten, berekend worden. In hoofdstuk 4.2 werd reeds berekend hoeveel ton van elk

eindproduct in 2013 uit het recyclageproces kwam. Zoals eerder vermeld zijn deze tonnages gebaseerd op theoretische veronderstellingen. Nu zullen die data gecombineerd worden met de gemiddelde marktprijzen om zo tot de financiële baten te komen. In tabel 12 wordt er een overzicht gegeven van de totale financiële baten van de recyclage van end-of-life fotovoltaïsche panelen. Er kan geconcludeerd worden dat bij een verwerkt volume van 182,51 ton end-of-life panelen, de totale financiële baat 173.799,37 euro bedraagt.

Tabel 12: overzicht financiële baten

<b>Materiaal</b>	<b>Aantal ton</b>	<b>Prijs per ton (euro)</b>	<b>Totale opbrengst per materiaal (euro)</b>	<b>Totaal (euro)</b>
<b>Glas</b>	128,5841	50	6.429,20	
<b>Aluminium</b>	18,7988	1.460	27.435,03	
<b>EVA</b>	9,5637	1.550	14.823,71	
<b>Tedlar</b>	5,5849	12.364	69.051,68	
<b>Silicone</b>	1,6295	2.580	4.204,05	
<b>Koper</b>	0,0926	6.405	593,03	
<b>Zilver</b>	0,0037	558.500	2.038,67	
<b>Tin</b>	0,2088	16.080	3.358,01	
<b>Zink</b>	0,1971	1.840	362,69	
<b>Silicium</b>	4,9525	9.070	44.919,09	
<b>Lood</b>	0,1095	5.335	584,22	
<b>Cadmium</b>	0	1550	0,00	
				<b>173.799,37</b>

### 5.1.1.3 Netto baten

Wanneer de financiële kosten en baten met elkaar geconfronteerd worden, is het duidelijk dat de baten groter zijn dan de kosten. Er is een overschot van 51.531,723 euro. In tabel 13 wordt nog eens een samenvattend overzicht gegeven van de financiële kosten en baten. Natuurlijk moeten hier wat nuances gemaakt worden. Zo zijn het recyclagepercentage van cadmium, EVA, enz. gebaseerd op ruwe schattingen, omdat er gebruik gemaakt is van andere toepassingen om het recyclagepercentage te weten te komen. Een andere nuancering zijn de opbrengsten van de materialen. Hier zijn de marktprijzen van een willekeurige dag genomen, maar deze kunnen echter sterk fluctueren in de tijd. Tot slot zijn de recyclagekosten afkomstig van data die al wat verouderd zijn, dus enig voorbehoud is daar wel nodig. Daarom zal er in het laatste stuk van deze thesis een sensitiviteitsanalyse uitgevoerd worden.

Tabel 13: overzicht financiële kosten en baten

<b>Financiële baten</b>	
Verkoop glas	6.429,20 euro
Verkoop aluminium	27.435,03 euro
Verkoop andere materialen	139.935,15 euro
<b>Totale financiële baten</b>	<b>173.799,37 euro</b>
<b>Financiële kosten</b>	
Investeringskost	23.455,43 euro
Energie-kost	5.489,57 euro
Cleaning-kost	18.464,91 euro
Arbeidskost	59.886,19 euro
Collectioncost	14.971,55 euro
<b>Totale financiële kost</b>	<b>122.267,64 euro</b>
<b>Saldo baten en kosten</b>	<b>51.531,723 euro</b>

### 5.1.2 CIGS panelen

Na het analyseren van de kosten en baten van de silicium panelen, zal er nu verder gegaan worden met een gelijkaardige analyse voor de CIGS panelen. Ook hier zal er eerst ingegaan worden op de financiële kosten om daarna verder te gaan met de financiële baten.

#### 5.1.2.1 Financiële kosten

Over de kostendata van CIGS panelen, is er nog niet veel onderzoek beschikbaar. Er zal hier gewerkt worden op basis van een studie van Fthenakis (2000). In deze studie worden verschillende manieren van de organisatie van de recyclage van CIGS panelen geanalyseerd. In deze thesis zal er gewerkt worden met de *generator based recycling* via rechtstreeks vervoer naar de smelterij. Binnen deze organisatievorm van recyclage zal de producent de end-of-life panelen rechtstreeks vervoeren naar de recycleur. Het nadeel van deze methode is dat er relatief hoge transportkosten zijn omwille van het feit dat er slechts kleine hoeveelheden in één keer getransporteerd kunnen worden. Dit zal verder ook resulteren in relatief hoge recyclagekosten omwille van de kleine hoeveelheden die er verwerkt worden. In het onderzoek van Fthenakis (2000) wordt er een onderscheid gemaakt tussen twee kostencomponenten: enerzijds heb je de transportkost en anderzijds de recyclagekost. De transportkost bedraagt 6,8 dollar cent per Watt en de recyclagekost bedraagt 4,6 dollar cent per Watt. Om van de prijs per Watt naar de prijs per ton te gaan, zal er met een CIGS paneel van Solyndra gewerkt worden. Er is geweten dat het paneel 31 kilogram weegt en een vermogen heeft van 188,5 Watt (Appropedia.org, z.d.). Om dan tot een prijs per ton te komen vermenigvuldigd je de prijs per Watt met het vermogen van het paneel. Daarna wordt de uitkomst gedeeld door het gewicht van het paneel om dit dan tenslotte te vermenigvuldigen met 1000 kilogram. Wanneer deze berekening toegepast wordt op de kostendata, wordt er een transportkost bekomen van 413,48 dollar per ton en een recyclagekost van 279,71 dollar per ton. Nu moet enkel de kost nog maar omgezet worden in euro. Met een wisselkoers van 0,88 euro bedragen beide kosten respectievelijk 363,86 euro en 246,14 euro. Wanneer beide kosten gesommeerd worden, bedraagt de totale kost voor de recyclage van CIGS panelen 610 euro per ton.

Nu de kostencomponenten bepaald zijn, moet dit enkel nog maar met het volume van 38,93 ton end-of-life CIGS panelen vermenigvuldigd worden. Het resultaat van deze berekening wordt in tabel 14 weergegeven. Er kan besloten worden dat de totale transportkost 14.165,07 euro

bedraagt en de recyclagekost 9.582,23 euro. Wanneer beide gesommeerd worden, bedragen de totale financiële kosten 23.747,3 euro

Tabel 14: financiële kosten CIGS panelen

Kostencomponent	kost per ton	Aantal ton	Totale kost	Totaal
<b>Transportkost</b>	363,86	38,93	14.165,07	
<b>Recyclagekost</b>	246,14	38,93	9.582,23	
				<b>23.747,3</b>

### 5.1.2.2 Financiële baten

Voor de financiële baten zal er opnieuw gekeken worden naar de marktprijzen van de grondstoffen. De CIGS panelen en de panelen op basis van silicium hebben een heel aantal grondstoffen gemeen. Deze marktprijzen zullen dan ook dezelfde zijn. Hier zullen dan ook enkel de marktprijzen van de nieuwe grondstoffen besproken worden. De marktprijs van indium bedraagt volgens metalprices.com (2014) ongeveer 624.800 euro per ton. Voor Selenium bedraagt de marktprijs 10.432,62 euro per ton (metal-pages.com, 2015). Tot slot is er ook nog gallium. Voor deze grondstof bedraagt de marktprijs gemiddeld 469.500 euro per ton (CES Edupack, 2014.). Nu alle marktprijzen gekend zijn, kan de financiële baat berekend worden door de marktprijs te vermenigvuldigen met het aantal ton van de grondstoffen dat overblijft na recyclage. Tabel 15 geeft hier een overzicht van. Er kan besloten worden dat de totale financiële baat 19.084,30 euro bedraagt.

Tabel 15: overzicht financiële baten CIGS panelen

Materiaal	Aantal ton	Prijs per ton (euro)	Totale opbrengst per materiaal (euro)	Totaal (euro)
<b>Glass</b>	31,06614	50	1.553,31	
<b>Aluminium</b>	4,6716	1.459,4	6.817,73	
<b>Polymers (e.g. EVA)</b>	0,93432	1.550	1.448,20	
<b>Copper</b>	0,2771816	6.405	1.775,35	
<b>Zinc</b>	0,0420444	1.840	77,36	
<b>Lead</b>	0,019465	5.335	103,85	
<b>Cadmium</b>	0,000194553	1.450	0,28	
<b>Indium</b>	0,0023358	624.800	1.459,41	
<b>Selenium</b>	0,035037	10.432,62	365,53	
<b>Gallium</b>	0,011679	469.500	5.483,29	
				<b>19.084,30</b>

### 5.1.2.3 Netto-baten

Na het afzonderlijk berekenen van de financiële kosten en baten, zullen ze hier met elkaar geconfronteerd worden. Tabel 16 geeft hiervan een overzicht. Uit deze tabel kan er besloten worden dat er een negatieve netto-baat is van 4.663 euro. De baten kunnen de kosten niet dekken. Zoals ook in de vorige analyse aangehaald werd, is er nood aan enig voorbehoud, omdat een heel aantal parameters onzeker zijn. Zo zijn de grondstofprijzen zeer volatiel, de kostendata van de recyclage zijn wat verouderd en de recyclagepercentages kunnen in de toekomst nog wijzigen. Daarom zal er in het volgende hoofdstuk een sensitiviteitsanalyse uitgevoerd worden.

Tabel 16: overzicht financiële kosten en baten

<b>Financiële baten</b>		
Verkoop glas	1.553,31 euro	
Verkoop aluminium	6.817,73 euro	
Verkoop andere materialen	10.713,26 euro	
<b>Totale financiële baten</b>		<b>19.084,30 euro</b>
<b>Financiële kosten</b>		
Transportkost	14.165,07	
Recyclagekost	9.582,23	
<b>Totale financiële kost</b>		<b>23.747,30 euro</b>
<b>Saldo baten en kosten</b>		<b>-4.663 euro</b>

## Hoofdstuk 6: Sensitiviteitsanalyse

In dit hoofdstuk zal als sluitstuk voor de kosten-batenanalyse een sensitiviteitsanalyse uitgevoerd worden. Bij een sensitiviteitsanalyse gaat er gekeken worden naar het effect op het resultaat wanneer significante parameters gewijzigd worden (Mercken, 2010). De reden waarom we een sensitiviteitsanalyse uitvoeren, is de onzekerheid over een groot aantal parameters binnen de kosten-batenanalyse. Door het uitvoeren van een sensitiviteitsanalyse zal er rekening gehouden worden met deze onzekerheid. Hierdoor zal de betrouwbaarheid van de kosten-batenanalyse toenemen. In dit hoofdstuk zullen achtereenvolgens volgende analyses gemaakt worden: *worst case* analyse, *best case* analyse, en Monte-Carlosimulatie. Tot slot zal er ook een dynamische analyse gemaakt worden, waarbinnen de toekomstige stroom van end-of-life panelen ingeschat wordt en de bijhorende schaalvoordelen en leereffecten in kaart worden gebracht. Voordat er aan dergelijke analyses kan begonnen worden, moeten de ranges waartussen de onzekere parameters kunnen schommelen, bepaald worden.

### 6.1 De sensitiviteitsranges

In de kosten-batenanalyse waren een heel aantal onzekere parameters. Deze parameters zijn de volgende: de marktprijzen van de grondstoffen, de recyclagekosten en het recyclagepercentage. Vooraleer er aan een sensitiviteitsanalyse begonnen kan worden, dienen eerst de ranges van de onzekere parameters bepaald te worden. Dit zal dan ook in dit deel besproken worden.

Voor de marktprijzen van de grondstoffen is er in deze thesis gekeken naar de minimum- en maximumprijs van de grondstoffen van de afgelopen jaren om zo de range te bepalen. Voor aluminium, koper, tin, zink en lood is er gekeken naar de prijsevolutie van de afgelopen vier jaar op de *Londen Metal Exchange*. Uit deze evolutie kan er besloten worden dat de range voor aluminium ligt tussen 1.210 en 1.590 euro per ton. Voor koper variëren de prijzen tussen 4.630 euro en 6.900 euro per ton. Voor tin is dit tussen 14.220 en 20.160 euro per ton. De marktprijzen van zink variëren tussen 1.270 euro en 1.910 euro per ton. De prijzen voor lood bevinden zich tussen 1.300 euro en 1.950 euro per ton (lme-prijzen.nl, 2015). Voor cadmium en indium is er gewerkt met de evolutie van de marktprijzen van de afgelopen vijf jaar. Voor cadmium variëren de prijzen tussen 1.500 euro en 5.500 euro per ton. Voor indium is dit tussen 462.000 euro en 748.000 euro per ton (metalprices.com, 2015). Voor EVA, silicium, selenium en gallium is er gewerkt met de gegevens van het softwarepakket *CES EduPack (2014)*. Voor EVA ligt de marktprijs tussen 1.510 euro en 1.660 euro per ton. Voor silicium is dit tussen 6.830 euro en 11.300 euro per ton. De prijs van selenium schommelt tussen 6.990 euro en 12.400 euro per ton. De prijs van gallium varieert tussen 357.000 euro en 582.000 euro per ton. Voor silicone is er gekeken naar de minimum en maximumprijs van rubber over de afgelopen 20 jaar. De prijs van rubber varieert tussen 1.280 en 4.410 euro (indexmundi.com, 2015). Voor de backingfilm is er op Aliexpress (2015) gekeken naar de minimum- en maximumprijs ervan. De prijs varieert tussen 12.360 euro en 29.811,75 euro per ton. Voor de marktprijs van zilver is er gezocht naar de minimum- en maximumprijs van de afgelopen vijf jaar. De prijs voor zilver varieert tussen 380.000 euro en 998.100 euro per ton (goudzilverprijs.nl, 2015). Voor glas is er geweten dat de prijs schommelt rond de 50 euro per ton (Eurostat, z.d.). In deze thesis zal er daarom gewerkt worden met een range van 45 tot 55 euro per ton. In tabel 17 wordt alles nog eens overzichtelijk weergegeven.

Tabel 17: ranges marktprijzen grondstoffen in euro

<b>Materiaal</b>	<b>Minimumprijs (euro)</b>	<b>Base case (euro)</b>	<b>Maximumprijs (euro)</b>
<b>Glas</b>	45	50	55
<b>Aluminium</b>	1.210	1459,4	1.590
<b>EVA</b>	1.510	1550	1.660
<b>Backing film (Tedlar)</b>	12.360	12364	29.811,75
<b>Silicone</b>	1.280	2580	4.410
<b>koper</b>	4.630	6405	6.900
<b>zilver</b>	380.000	558500	998.100
<b>Tin</b>	14.220	16080	20.160
<b>Zink</b>	1.270	1840	1.910
<b>Silicium</b>	6.830	9070	11.300
<b>Lood</b>	1.300	1587,52	1.950
<b>Cadmium</b>	1.500	1500	5.500
<b>Indium</b>	462.000	624800	748.000
<b>Selenium</b>	6.990	10432,62	12.400
<b>Gallium</b>	357.000	469500	582.000

Ook het recyclagepercentage is een onzekere parameter, omdat in de toekomst de recyclagetechnieken voor fotovoltaïsche panelen nog kunnen verbeteren. Als minimumrange wordt telkens het huidige recyclagepercentage genomen en de maximumrange wordt op 100% gezet, omdat in de toekomst gestreefd wordt naar volledige recyclage van fotovoltaïsche panelen. In tabel 18 worden de ranges van de recyclagepercentages weergegeven.

Tabel 18: ranges recyclagepercentage grondstoffen

<b>Materiaal</b>	<b>Minimum recyclagepercentage</b>	<b>Maximumrecyclagepercentage</b>
<b>Glas</b>	95,00%	100.00%
<b>Aluminium</b>	100,00%	100.00%
<b>EVA</b>	80,00%	100.00%
<b>Backing film</b>	85,00%	100.00%
<b>Silicone</b>	80,00%	100.00%
<b>koper</b>	89,00%	100.00%
<b>zilver</b>	40,00%	100.00%
<b>Tin</b>	95,35%	100.00%
<b>Zink</b>	90,00%	100.00%
<b>Silicium</b>	81,00%	100.00%
<b>Lood</b>	100,00%	100.00%
<b>Cadmium</b>	99,95%	100.00%
<b>Indium</b>	30,00%	100.00%
<b>Selenium</b>	30,00%	100.00%
<b>Gallium</b>	30,00%	100.00%

Tot slot is er ook nog onzekerheid over de recyclagekosten van fotovoltaïsche panelen. Als onzekere parameters voor de panelen op basis van silicium is er de arbeidskost en energiekost genomen. De cleaning kost, collection kost en investeringskost zijn vrij stabiele kostencomponenten en zullen dan ook niet als onzekere parameter opgenomen worden. Om de range van de arbeidskost te berekenen, is er gekeken naar de evolutie van de arbeidskost over de periode van 2008 tot 2012 op basis van gegevens van Eurostat (2014, a). Per jaar werd de procentuele verandering van de arbeidskost berekend om daarna het gemiddelde ervan te nemen over de jaren heen. Gemiddeld steeg de arbeidskost met 2,922% per jaar. Met dat percentage is er gekeken wat de arbeidskost is over 5 jaar. Er is dus een *future value* berekend. Na vijf jaar bedraagt de arbeidskost 0,138587 euro per wafer. De minimumwaarde voor arbeid is gelijk aan de huidige waarde, omdat arbeid jaar na jaar stijgt. Voor de energiekost is er een gelijkaardige redenering toegepast, maar dan door middel van de elektriciteitsprijzen over de periode van 2003-2014 (Eurostat, 2014, b). Gemiddeld genomen zijn de elektriciteitsprijzen jaarlijks met 4,22636% gestegen. Wanneer dan weer de *future value* berekend wordt, bedraagt de maximumrange 0,01353 euro per wafer. Ook hier is de minimumrange gelijk aan de huidige waarde, omdat er bij de elektriciteitsprijzen ook een stijgende trend te merken is. In tabel 19 wordt dit alles nog eens weergegeven per ton.



Tabel 19: ranges recyclagekost silicium panelen

Kostencomponent	Minimumkost per ton (euro)	Maximumkost per wafer (euro)
energie-kost	30,08	42,04
arbeidskost	328,12	430,62

Wat de ranges van de recyclagekost van CIGS panelen betreft, wordt er gewerkt met een even grote range als voor de silicium panelen. De procentuele verandering van de recyclagekosten tussen de minimum en maximum range bedraagt 8,618% bij de silicium panelen. Wanneer dit percentage toegepast wordt op de recyclagekosten van CIGS panelen, wordt er een maximum range bekomen van 267,35 euro per ton panelen wat de recyclagekost betreft en 395,22 euro per ton panelen wat de transportkosten betreft. Dit wordt weergegeven in tabel 20.

Tabel 20: ranges recyclagekost CIGS panelen

Kostencomponent	Minimumkost per ton panelen (euro)	Maximumkost per ton panelen (euro)
Transportkost	363,86	395,22
Recyclagekost	246,14	267,35

## 6.2 Worst-case scenario

Binnen een *worst-case* scenario worden alle onzekere parameters op de meest tegenvallende waarde ingesteld. Deze analyse zal zowel toegepast worden op de silicium panelen als op de CIGS panelen. Zo zullen de marktprijzen en de recyclagepercentages de minimumrange aannemen en de recyclagekosten de maximumrange aannemen. Het resultaat van deze analyse wordt weergegeven in tabel 21 voor de silicium panelen en tabel 22 voor de CIGS panelen. Uit tabel 21 kan er geconcludeerd worden dat ondanks de tegenzittende parameters er nog steeds een positieve netto-baat is van 20.286,56 euro voor de silicium panelen. Het recycleren van dit type panelen is zelfs onder de meest negatieve omstandigheden nog steeds rendabel. Er dient wel opgemerkt te worden dat de netto-baat wel meer dan gehalveerd is ten opzichte van de base-case. Bij de CIGS panelen is er onder het worst-case scenario een negatieve baat van 8.430,07 euro. Dit is een verdubbeling ten opzichte van de base-case.

Tabel 21: resultaat KBA worst case silicium panelen

<b>Financiële baten</b>	
<b>Verkoop glas</b>	5.786,28 euro
<b>Verkoop aluminium</b>	22.746,60 euro
<b>Verkoop andere materialen</b>	139.935,15 euro
<b>Totale financiële baten</b>	153.092,67 euro
<b>Financiële kosten</b>	
<b>Investeringskost</b>	23.455,43 euro
<b>Energie-kost</b>	6.752,17 euro
<b>Cleaning-kost</b>	18.464,91 euro
<b>Arbeidskost</b>	69.162,06 euro
<b>Collectioncost</b>	14.971,55 euro
<b>Totale financiële kost</b>	132.806,11euro
<b>Saldo baten en kosten</b>	<b>20.286,56 euro</b>

Tabel 22: resultaat KBA worst case CIGS panelen

<b>Financiële baten</b>	
<b>Verkoop glas</b>	1.397,98 euro
<b>Verkoop aluminium</b>	5.652,63 euro
<b>Verkoop andere materialen</b>	8.266,62 euro
<b>Totale financiële baten</b>	15.317,230 euro
<b>Financiële kosten</b>	
<b>Transportkost</b>	14.165,07 euro
<b>Recyclagekost</b>	9.582,230 euro
<b>Totale financiële kost</b>	23.747,3 euro
<b>Saldo baten en kosten</b>	<b>-8.430,07 euro</b>

### 6.3 Best-case scenario

Binnen een best-case scenario zullen alle parameters op de meest optimistische waarde ingesteld worden. De recycleerbaarheid van de grondstoffen zal allemaal op 100% gezet worden, de recyclagekosten zullen het niveau van de base case behouden en de marktprijzen van de grondstoffen zullen op de maximumrange ingesteld worden. Ook hier zal deze analyse opnieuw toegepast worden op zowel de silicium panelen als de CIGS panelen. Tabel 23 geeft het resultaat weer voor de silicium panelen en tabel 24 voor de CIGS panelen. Uit tabel 23 kan er een relatief hoge positieve netto-baat waargenomen worden voor silicium panelen. Wanneer de vergelijking gemaakt wordt met de base case kan er gesteld worden dat er in de meest positieve omstandigheden een toename van 334,17% mogelijk is. Voor de CIGS panelen is een positieve netto-baat op te merken van 19.624,40 euro terwijl dit saldo in de base case nog negatief was. Nu is het recycleren van CIGS panelen plots wel een rendabele activiteit. Bij de Monte-Carlo analyse kan het interessant zijn om te kijken hoeveel kans er is dat de netto-baten positief zijn en welke parameter het meeste invloed heeft op de netto baat.

Tabel 23: resultaat KBA best case silicium panelen

<b>Financiële baten</b>	
Verkoop glas	7.444,34 euro
Verkoop aluminium	29.890,15 euro
Verkoop andere materialen	308.667,92 euro
<b>Totale financiële baten</b>	<b>346.002,41 euro</b>
<b>Financiële kosten</b>	
Investeringskost	23.455,43 euro
Energie-kost	5.489,57 euro
Cleaning-kost	18.464,91 euro
Arbeidskost	59.886,19 euro
Collectioncost	14.971,55 euro
<b>Totale financiële kost</b>	<b>122.267,64 euro</b>
<b>Saldo baten en kosten</b>	<b>223.734,77 euro</b>

Tabel 24: resultaat KBA best case CIGS panelen

<b>Financiële baten</b>	
Verkoop glas	1.798,57 euro
Verkoop aluminium	7.427,84 euro
Verkoop andere materialen	34.145,29 euro
<b>Totale financiële baten</b>	<b>43.371,70 euro</b>
<b>Financiële kosten</b>	
Transportkost	14.165,07 euro
Recyclagekost	9.582,230 euro
<b>Totale financiële kost</b>	<b>23.747,3 euro</b>
<b>Saldo baten en kosten</b>	<b>19.624,40 euro</b>

#### 6.4 Monte-Carlosimulatie

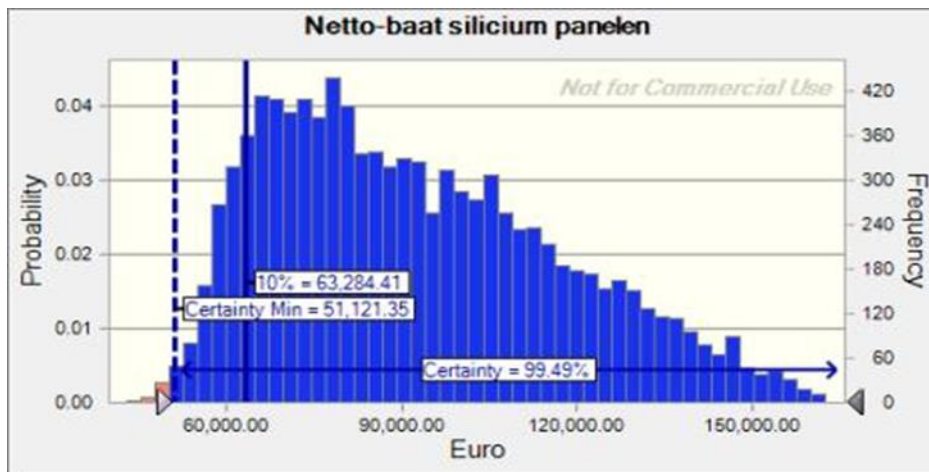
De Monte-Carlosimulatie is ook een analysemethode om onzekerheid mee in rekening te brengen. Deze methode gaat verder dan de twee bovenstaande 'wat als- analyses', omdat er hier rekening gehouden wordt met elke mogelijke waarde die een variabele kan aannemen en elk scenario gewogen wordt op basis van de kans dat het scenario zich zal voordoen (Vose, 2008). Met een Monte-Carlo analyse worden er duizenden simulaties uitgevoerd op basis van de ranges van de onzekere parameters en de kansverdeling die aan de parameters gegeven wordt. Door het herhaaldelijk uitvoeren van de simulaties, wordt er een waarschijnlijkheidsverdeling van de netto-  
baat bepaald (Dupont, 2011). Dit wordt dan weergegeven in een histogram.

In deze thesis is gebruik gemaakt van het software programma Oracle Crystal Ball. Dit is een Add-on voor Microsoft Office Excel. Hieronder zal kort beschreven worden hoe deze software werkt. Een eerste stap is het selecteren van de onzekere parameters. Binnen deze thesis zijn de marktprijzen en recyclagepercentages van de grondstoffen en de recyclagekosten onzekere parameters. Wanneer deze geselecteerd zijn, dient er een minimum- en maximumrange aangeduid te worden. Dit is reeds besproken in hoofdstuk 6.1. Wanneer dit gebeurd is, dien je een kansverdeling te bepalen. In deze thesis wordt er geopteerd voor een driehoeksverdeling. Bij een driehoeksverdeling is er een toenemende waarschijnlijkheid dat een onzekere parameter zich

voordoet vanaf het minimum tot de middelste waarde. De middelste waarde heeft de meeste kans om zich voor te doen. Vanaf deze waarde tot het maximum is er een dalende kans dat de waarde zich voordoet. Er dient dus een minimumwaarde, meest waarschijnlijke waarde en maximumwaarde geselecteerd te worden. De minimum- en maximumwaarde zijn voor onze simulatie al gedefinieerd in hoofdstuk 6.1. Voor de meest waarschijnlijke waarde worden de gegevens van de base case gebruikt. Tot slot dient er ook nog de variabele geselecteerd te worden waarvoor een voorspelling dient gemaakt te worden. In onze simulatie zal dat de netto-baat zijn van silicium panelen en CIGS panelen. Nu alle parameters ingesteld zijn, kunnen de simulaties uitgevoerd worden. Voor deze masterproef is er geopteerd om 10.000 simulaties uit te voeren. Na het uitvoeren ervan krijg je een histogram met de frequentieverdeling van de mogelijke netto-baten.

#### **6.4.1 Monte-Carlosimulatie silicium panelen**

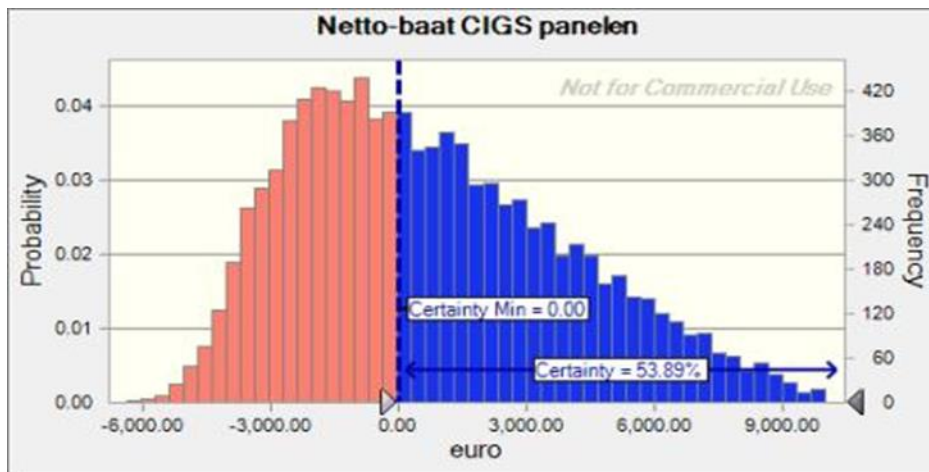
Na de beschrijving van de werking van een Monte-Carlosimulatie, kan er overgegaan worden tot het uitvoeren van een dergelijke simulatie. In dit deel zal worden ingegaan op de resultaten van de simulatie van de silicium panelen. De volledige output van deze simulatie is terug te vinden in bijlage 8. De analyse werd uitgevoerd met een betrouwbaarheidsinterval van 95%. Na het uitvoeren van de 10.000 simulaties is er een standaardafwijking van de gemiddelde netto-baat van 249,35 euro. Verder valt in het histogram, weergegeven in figuur 8, ook een licht rechtse scheefheid op. De statistiek *skewness* bevestigt dit ook, omdat deze een waarde van 0,56 heeft en dit is groter dan nul. De waarde van de statistiek *kurtosis* bedraagt 2,56. Deze positieve waarde duidt op een piekvormige verdeling. Vermits de *skewness* verschillend is van nul en de *kurtosis* verschillend is van drie kan er besloten worden dat het hier gaat om een niet normale verdeling. Voorts kan er waargenomen worden dat de netto-baat gelegen is tussen 43.007,78 euro en 172.465,25 euro. De gemiddelde netto-baat bedraagt 92.654,35 euro. Uit deze analyse kan er besloten worden dat er een zekerheid is van 99,49% dat minstens onze base case behaald wordt. Verder valt het ook op dat er nergens negatieve baten voorkomen. De minimale netto-baat bedraagt 43.007,78 euro. Er kan dus wel gesteld worden dat het recycleren van silicium panelen een veilige en rendabele activiteit is. Wanneer er nu gekeken wordt welke parameter het meeste invloed heeft op de netto-baat, kan er duidelijk geconcludeerd worden dat dit de marktprijs van Tedlar is. De verkoopprijs van dit materiaal is namelijk voor 93,8% verantwoordelijk voor het resultaat van de netto baat. De variatie in de marktprijs van Tedlar kan het resultaat van de kosten-baten analyse drastisch beïnvloeden.



Figuur 8: histogram Monte-Carlo simulatie silicium panelen

#### 6.4.2 Monte-Carlosimulatie CIGS panelen

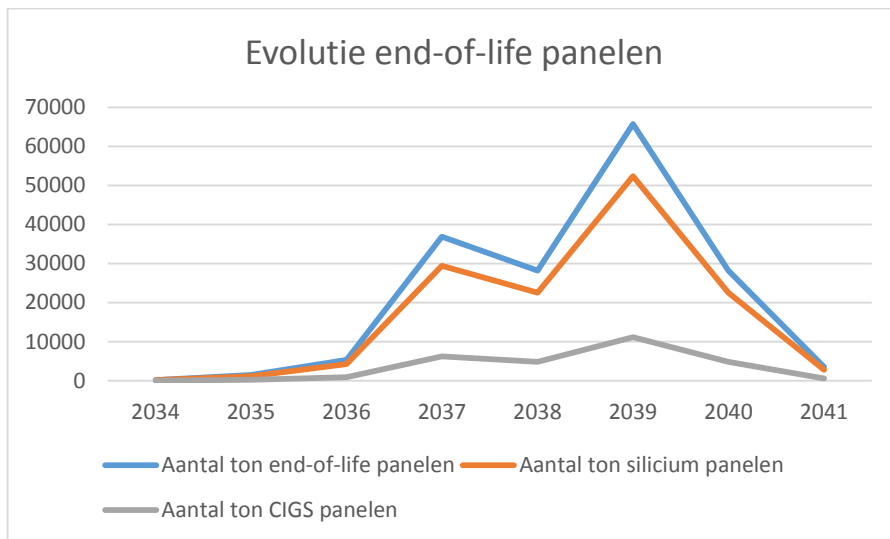
Na het bespreken van de resultaten van de simulatie bij silicium panelen, zal er hier ingegaan worden op de resultaten van de Monte-Carlosimulatie voor de CIGS panelen. De volledige output is terug te vinden in bijlage 9. De simulatie werd uitgevoerd op een betrouwbaarheidsinterval van 95%. Na het uitvoeren van deze simulatie bedraagt de standaardafwijking van de gemiddelde netto-baat 32,78 euro. Ook hier is een rechts scheve verdeling op te merken in het histogram, die terug te vinden is in figuur 9, en dit wordt opnieuw bevestigd met een skewness van 0,594. Voorts is de verdeling ook piekvormig omdat de kurtosis positief is. Ook hier is er geen sprake van een normale verdeling omdat de skewness verschillend is van nul en de kurtosis verschillend is van 3. Uit deze output kan er geconcludeerd worden dat de netto-baat gelegen is tussen -6,373.15 en 13,591.22 euro. De gemiddelde baat bedraagt 341,70. Het is interessant om na te gaan hoe groot de kans bedraagt dat de netto-baat positief is. Uit de analyse blijkt dat deze kans 53.89% bedraagt. Er is dus ook een relatief hoge kans dat er een negatieve baat is. Wanneer er gekeken wordt welke parameter het meeste invloed heeft op de netto baat, kan er besloten worden dat dit het recyclagepercentage van gallium is. Dit percentage is verantwoordelijk voor 85,2% van de netto-baat. Het recyclagepercentage gallium kan dus het verschil maken tussen een positieve en een negatieve netto-baat. De reden dat dit zo een hoog percentage is, heeft te maken met twee zaken. Ten eerste is er een groot verschil tussen de minimum range en de maximumrange; een verschil van 60 %. Indium en selenium hebben ook hetzelfde percentage, maar deze grondstoffen komen in een veel kleinere hoeveelheid voor in een paneel. Dit betekent dat de hoeveelheid grondstof een tweede verklaring is. Ook de marktprijs van gallium heeft een zekere invloed. Het percentage bedraagt namelijk 7,1%. Dit wordt gevolgd door het recyclagepercentage van indium met 4,9%. Uit deze resultaten kan besloten worden dat de netto baat van de recyclage van CIGS panelen in de toekomst een positieve baat kan worden indien er nieuwe recyclagetechnieken ontwikkeld worden om het recyclagepercentage van gallium en indium te verhogen.



Figuur 9: histogram Monte-Carlosimulatie CIG panelen

## 6.5 Dynamische analyse

In voorgaande analyses werd het volume van end-of-life panelen constant gehouden omdat er gewerkt werd met één jaartal, namelijk 2013. In realiteit zal de komende 20 à 30 jaar het volume van end-of-life panelen echter sterk toenemen. In de dynamische analyse zal de volumegroei dan ook in rekening gebracht worden. Uit hoofdstuk 2 is al gebleken dat 2011 het topjaar was van het aantal nieuwe fotovoltaïsche installaties. Toen werd er 822 MWp aan installaties geplaatst (ode, z.d.). Er is geweten dat een gemiddeld paneel een vermogen heeft van 250 Wp (energieleveranciers.nl, z.d.). Hieruit kan het gemiddeld aantal panelen berekend worden. In 2011 kwamen er zo gemiddeld 3.288.000 nieuwe panelen bij. Bij dit aantal is er nog geen opsplitsing gemaakt per type paneel. Dit komt ongeveer overeen met 65.750 ton panelen. Er is algemeen geweten dat een paneel tussen de 25 à 30 jaar meegaat, gemiddeld dus 28 jaar. In 2039 zal er dus ongeveer 65.750 ton end-of-life panelen vrij komen. Voorts kan er ook gesteld worden dat voor 2034 amper sprake zal zijn van hoge volumes, omdat er voor 2006 slechts 320 ton aan panelen geïnstalleerd werd en dit volume grotendeels pas tegen 2034 vrijkomt. De echte volumegroei zal zich pas voordoen van 2034 tot 2039 omdat volgens onze inschatting zal in deze periode het volume ingezamelde end-of-life panelen een heel aantal keer verdubbelen. De echte piek in toename van het volume ligt zoals eerder vermeld in 2039. Daarna zal er niet direct nog sprake zijn van een verdubbeling. Deze evolutie is terug te vinden in figuur 10.



Figuur 10: evolutie end-of-life panelen

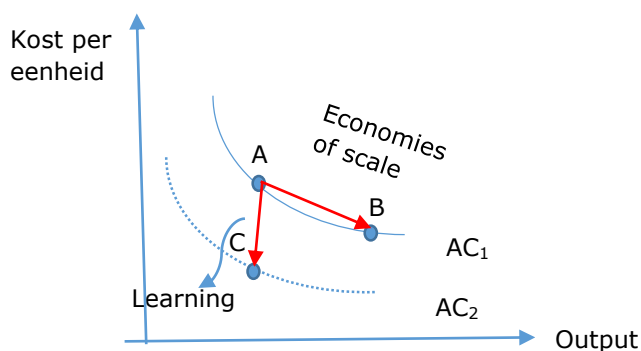
De dynamische analyse zal uitgevoerd worden over de jaren 2013 tot 2039, met 2013 als basisjaar. Als assumptie wordt er wel gesteld dat de verhouding tussen silicium panelen en CIGS panelen gelijk blijft. Verder wordt er ook aangenomen dat het volume tussen de jaren 2014 en 2033 nagenoeg constant blijft, omdat er voor 2006 amper fotovoltaïsche installaties geplaatst zijn. Uit hoofdstuk 3 is er al geweten dat de markt uit 79,9% silicium panelen bestaat en voor 17% uit CIGS panelen. In tabel 25 wordt het ingeschatte jaarlijkse volume weergegeven van zowel de silicium panelen als de CIGS panelen.

Tabel 25: toekomstige evolutie end-of-life panelen, bron: gebaseerd op gegevens Vreg

Jaartal	Aantal ton end-of-life panelen	Aantal ton silicium panelen	Aantal tont CIGS panelen
<b>Jaarlijks voor 2034</b>	229	182,51	38,93
<b>2034</b>	192	153,02	32,64
<b>2035</b>	1.440	1.147,68	244,8
<b>2036</b>	5.360	4.271,91	911,2
<b>2037</b>	36.880	29.393,36	6.269,6
<b>2038</b>	28.240	22.507,28	4.800,8
<b>2039</b>	65.760	52.410,72	11.179,2

Er zal dus een enorme toename zijn vanaf 2035 in het volume van end-of-life panelen. Bij beide type panelen is er van nu tot 2039 sprake van een achtvoudige verdubbeling in volume over de jaren heen. Dit is een vrij zekere parameter omdat een verdubbeling van zeven keer van 2013 tot in 2039 overeenkomt met 29.312 ton end-of-life panelen. Het verwacht volume tegen 2039 zal echter veel hoger worden, zodat zeker de verdubbeling van acht keer bereikt wordt. Een

verdubbeling van negen keer zou inhouden dat er tegen 2039 een volume van 111.248 ton end-of-life panelen zou zijn. Dit is dan weer veel te hoog, dus een verdubbeling van negen keer zit er niet in. Dit toont aan dat een verdubbeling van acht keer als een vrij zekere parameter kan beschouwd worden. Door deze spectaculaire groei in het volume van ingezamelde end-of-life panelen, kunnen er zich bij de recyclageactiviteiten over de jaren heen twee effecten voordoen: schaalvoordelen en leereffecten. Schaalvoordelen worden in de literatuur als volgt omschreven: wanneer de output stijgt zal de gemiddelde kost van het produceren van die output afnemen tot een bepaald punt (Pindyck & Rubinfeld, 2013). Er zijn verschillende verklaringen waarom de gemiddelde kost daalt. Wanneer een bedrijf werkt op grotere schaal, kunnen werknemers zich beter specialiseren en zijn ze productiever. Voorts kan het productieproces op zich beter georganiseerd worden en sommige inputs kunnen in grotere aantallen gekocht worden en zijn dus goedkoper. De lange termijn gemiddelde kostencurve heeft dus eerst een dalend verloop wanneer de output stijgt (Pindyck & Rubinfeld, 2013). Het begrip leereffecten wordt dan weer als volgt beschreven: wanneer management en arbeid ervaring opdoen bij de productie, zullen de marginale en gemiddelde kosten van het produceren van een bepaalde hoeveelheid output dalen. Hier zijn ook weer een aantal redenen voor. In het begin duurt het langer vooraleer arbeiders een bepaalde taak kunnen afwerken, maar hoe vaker ze het doen, hoe sneller zij de taak kunnen afwerken. Managers worden beter in het plannen van het productieproces. Leveranciers leren hoe ze de vereiste materialen beter kunnen behandelen en dit kan ook resulteren in lagere kosten (Pindyck & Rubinfeld, 2013). Bij het leereffect is er een verschuiving van de gemiddelde kosten curve op te merken, terwijl bij schaalvoordelen dit niet het geval is. Dit verschil wordt nogmaals weergegeven in figuur 11. Bij schaalvoordelen is er een dalende gemiddelde kostencurve en bij leereffecten zal deze gemiddelde kostencurve evenwijdig naar beneden schuiven. Er kan besloten worden dat bij beide effecten een daling op te merken valt van de gemiddelde kosten. In deze thesis zal verder gewerkt worden met één dalingspercentage waar beide effecten in vervat zitten. De reden hiervoor is dat beide effecten resulteren in een daling van de gemiddelde kosten en beide effecten zich samen zullen voordoen in het geval van een volume stijging van end-of-life fotovoltaïsche panelen. Uiteindelijk zullen ze hetzelfde effect bereiken, namelijk een daling van de gemiddelde recyclagekosten.



Figuur 11: *economies of scale versus learning, bron: Pindyck & Rubinfeld, 2013*

Tussen de jaren 2034 en 2039 zullen er zich leereffecten voordoen, omdat tussen deze periode het volume tegen 2039 acht keer zal verdubbelen. Door deze verdubbelingen zal de gemiddelde recyclagekost van de fotovoltaïsche panelen afnemen. Er dient opgemerkt te worden dat voor 2034



er zich geen verdubbelingen voordoen en daarom dus ook geen noemenswaardige leereffecten, omdat er werd aangenomen dat er hier pas sprake is van een leereffect bij een verdubbeling van de output. Er dient opgemerkt te worden dat in realiteit voor 2034 zich misschien wel een leereffect voordoet, maar dit zal toch vrij minimaal zijn.

### **6.5.1 Dynamische analyse silicium panelen**

Nu de volumes gekend zijn, kan er verder gegaan worden met de dynamische analyse van de silicium panelen. Uit een onderzoek van Hax en Majluf (1982) blijkt dat het leereffect schommelt tussen 10% en 25% in de verschillende industrieën. Dus als de output verdubbelt, dan dalen de gemiddelde kosten tussen de 10% en 25%. NASA onderscheidt dan weer de volgende leereffecten (fas.org,z.d.) bij de productie van ruimteschepen:

- Aerospace 15%
- Scheepsbouw 15-20%
- Complexe gereedschapsmachines voor nieuwe modellen 15-25%
- Repetitieve Electronics Manufacturing 5-10%
- Repetitieve bewerkingen en punch-pers operaties 5-10%
- Repetitieve elektrische operaties 15-25%
- Repetitieve laswerkzaamheden 10%
- Grondstoffen 4-7%
- Gekochte onderdelen 12-15%

Voor deze thesis zal er een gemiddelde genomen worden van bovenstaande percentages. Zo wordt er een gemiddeld leereffect van 13% bekomen. Vooraleer er een Monte-Carlo simulatie zal uitgevoerd worden, zal er ook hier eerst met een base case gewerkt worden

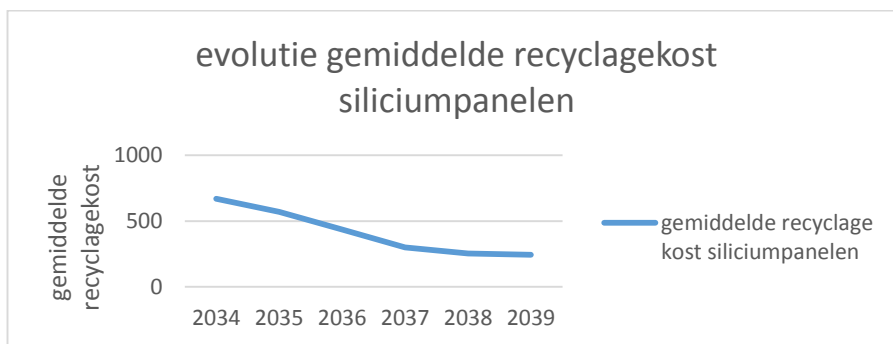
#### **6.5.1.1 Base case silicium panelen**

De input gegevens van de base case zijn gelijkaardig aan die van de vorige in hoofdstuk 5 op een aantal verschillen na. Zo zullen er in deze base case verschillende jaren onder de loep genomen worden, namelijk 2014 tot en met 2039, waarin telkens het volume wijzigt. Voorts zullen ook jaarlijks de recyclagekosten wijzigen omwille van het leereffect. Ook wordt er een discontovoet gehanteerd van 5% om de kosten en baten uit te drukken in geldwaarde van het basisjaar 2013. Er zal dus met andere woorden rekening gehouden worden met de tijdswaarde van het geld. Zo kunnen de kosten en baten over de jaren heen gesommeerd worden om als recycleur te kijken of het vandaag de dag interessant is om te investeren in de recyclage van siliciumpanelen. Tabel 26 geeft het resultaat weer van de base case. Hieruit kan er geconcludeerd worden dat er nergens negatieve netto-baten te bespeuren zijn. Wanneer alle netto verdisconteerde baten opgeteld worden, wordt er een totale positieve netto-baat bekomen van 22.472.808, 14 euro. Dit is dus een zeer positief resultaat. Omwille van het leereffect wordt de stijging van de totale kosten getemperd wat leidt tot een jaarlijkse stijging van de netto-baat. Figuur 12 geeft visueel het leereffect weer als daling van de gemiddelde recyclagekosten. Deze daling heeft ervoor gezorgd dat de stijging van de verdisconteerde kosten getemperd wordt. Voornamelijk tussen 2035 en 2037 is er een sterke daling van de recyclagekosten op te merken. Daarna speelt het leereffect veel minder.

Tabel 26: Resultaten KBA dynamische analyse siliciumpanelen (euro)

Jaartal	2014-2033	2034	2035	2036	2037
<b>Baten</b>	2.160.810,09	372.721,08	1.321.286,35	8.658.322,80	6.314.198,84
<b>Kosten</b>	1.523.720,61	223.667,29	605.856,87	2.740.321,59	1.679.738,85
<b>Netto-baten</b>	637.089,48	149.053,78	715.429,48	5.918.001,21	4.634.459,99

Jaartal	2038	2039	Som netto-baten (2014-2039)
<b>Baten</b>	6.314.198,84	14.003.160,52	
<b>Kosten</b>	1.679.738,85	3.599.777,03	
<b>Netto-baten</b>	4.634.459,99	10.403.383,49	<b>1.583.105,94</b>



Figuur 12: evolutie gemiddelde recyclagekost silicium panelen

### 6.5.1.2 Monte-Carlo simulatie silicium panelen

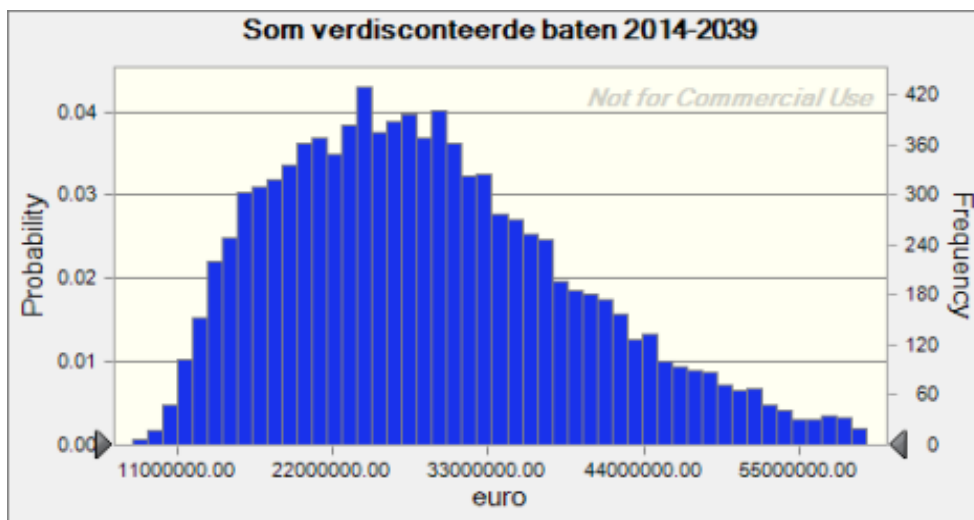
Na het in kaart brengen van de base case, kan er over gegaan worden tot de Monte-Carlo simulatie om zo rekening te houden met de onzekerheid van bepaalde paramaters. Er zullen twee types Monte-Carlo simulaties worden uitgevoerd, één Monte-Carlo simulatie per jaar over de jaren 2034 tot en met 2039 en dan nog een Monte-Carlo simulatie voor de som van de netto-verdisconteerde baten over de periode 2013-2039. Die opsplitsing wordt gemaakt omdat we met de eerste analyse willen nagaan in welke jaren er zich eventueel negatieve baten zouden voordoen en in welke mate het leereffect jaarlijks speelt. In dit eerste type analyse zal er gewerkt worden met niet-verdisconteerde waarde. Het verdisconteren wordt hier nog buiten beschouwing gelaten om de invloed van het leereffect veel duidelijker te maken. Wanneer er hier gewerkt zou worden met een discontovoet, zou deze een zeer groot effect hebben op de netto-baat. Dit willen we nog even buiten beschouwing laten om echt eerst te kunnen inzoomen op het leereffect. Met de tweede analyse wordt er getracht om na te gaan hoe de huidige netto actuele waarde van alle netto-baten over de jaren 2013-2039 kan variëren om zo na te gaan of het interessant is om verder te investeren in de recyclage van fotovoltaïsche panelen. Er wordt de assumptie gemaakt dat het volume van end-of-life panelen tussen 2014 en 2033 constant blijft op 182,51 ton voor de silicium panelen. Voor deze analyse zijn dezelfde onzekere parameters gebruikt als bij de Monte-Carlo analyse van de base case, namelijk de recyclagekosten, de recyclagepercentages en de marktprijzen van de grondstoffen. Bovendien komen er ook twee nieuwe onzekere parameters in

de analyse, namelijk de leereffecten en de discontovoet. Voor de leereffecten wordt er een minimumrange gehanteerd van 5% en een maximumrange van 25%. Deze ranges zijn gebaseerd op ervaringen van leereffecten van NASA bij het bouwen van ruimteschepen. Voor de discontovoet zal er een minimumrange van 2,5% genomen worden, namelijk de risicovrije rentevoet (Rienstra & Groot, 2012). Voor de maximumrange zal er gewerkt worden met een discontovoet van 10% omwille van de grote onzekerheid over de uitkomst van de netto-baten. Er komt bovenop de meest waarschijnlijke discontovoet nog een risico-opslag. Zo kan bijvoorbeeld het leereffect tegenvallen, waardoor de recyclagekosten hoger liggen of er kunnen in de toekomst meer concurrenten zich op de recyclagemarkt begeven van de end-of-life fotonvoltaïsche panelen, waardoor de baten en de leereffecten minder hoog zullen liggen.

Nadat de onzekere parameters gekend zijn kan er verder gewerkt worden met de eerste type Monte-Carlo simulatie. De volledige output hiervan is terug te vinden in bijlage 10. Over de periode 2034-2039 is er nergens een negatieve range te bespeuren van de niet-verdisconteerde netto-baten van de silicium panelen. Wat ook opvalt is de sterke toename van de netto-baten over deze periode. In 2034 schommelt deze nog tussen 40.650,63 en 150.209,71 euro, terwijl deze in 2039 al tussen 27.907.146,24 en 79.816.206,03 euro schommelt. Wanneer er nu gekeken wordt welke parameters voornamelijk een invloed hebben op de netto-baat kan er besloten worden dat dit nog steeds de marktprijs van Tedlar is. In 2034 bepaald deze marktprijs voor 93,7% de niet-verdisconteerde netto-baat. Er dient wel opgemerkt te worden dat deze invloed doorheen de jaren afneemt en overgeheveld wordt aan het leereffect. In 2034 was er volgens de sensitiviteitsgrafiek nog geen sprake van de invloed van het leereffect. In 2035 is dit gestegen naar 4,7%. De grootste stijging van de invloed van het leereffect deed zich in 2036 voor, daar bedraagt de invloed op de netto-baat 16,9%. Daarna stijgt het leereffect nog lichtjes om haar top te bereiken in 2038, met 24,8%. In dit jaar bedraagt de invloed van de marktprijs van Tedlar 71,2%. Er kan dus besloten worden dat een groot deel van de toekomstige evolutie afhankelijk is van een exogene parameter, namelijk de marktprijs van Tedlar. Het leereffect begint echter ook een steeds grotere invloed te hebben op de netto-baat. Er is dus nog veel groeipotentieel mogelijk voor de netto-baat van silicium panelen. Voorts kan er ook nog besloten worden dat de recyclage van silicium panelen een rendabele activiteit is, omdat er nergens over de jaren heen negatieve baten te bespeuren zijn.

Nu zal er dieper ingegaan worden op de gesommeerde netto-verdisconteerde baten van silicium panelen over de jaren 2014-2039. De volledige output van deze Monte-Carlo analyse is terug te vinden in bijlage 11. Uit deze analyse kan er besloten worden dat ook hier opnieuw geen negatieve totale verdisconteerde netto-baten op te merken zijn, zoals al eerder is gebleken uit de Monte-Carlo analyse per jaar. De totale verdisconteerde netto-baat varieert tussen 7.765.677,34 en 75.157.555,72 voor de silicium panelen. Figuur 13 geeft dit visueel weer. Wat opvalt in deze figuur is opnieuw de rechtse scheefheid. Dit wordt verklaard door de positieve skewness van 0,722. Voorts valt er ook nog een piekvormige verdeling op. Dit wordt verklaard door de positieve waarde van de kurtosis, 3,33. Aan de hand van beide statistieken kan er besloten worden dat er sprake is van een niet-normale verdeling. Voorts dient er ook opgemerkt te worden dat de range van de netto-baten zeer breed is. Het is daarom interessant om te kijken wat de uitkomsten van de totale verdisconteerde netto-baten bepalen. Uit de sensitiviteitsgrafiek is een opmerkelijk resultaat vast te stellen. De marktprijs van Tedlar is immers een zeer groot deel van zijn invloed verloren, deze bedraagt nog maar 12,8%. Het is voornamelijk de discontovoet die de totale verdisconteerde

netto-baten bepalen, namelijk voor -83,1%. De keuze van een discontovoet heeft dus een groot effect op de totale verdisconteerde netto-baat van de recyclage van silicium panelen. Het is een negatief percentage, dus een stijging van de discontovoet zal leiden tot een sterke daling van de netto-baat, wanneer de andere parameters constant blijven. Er kan hier opnieuw algemeen besloten worden dat de recyclage van silicium panelen een rendabele activiteit is omdat er geen negatieve baten te bespeuren zijn. Er is dus nog zeker een ruime marge om te investeren in bijvoorbeeld nieuwe technieken en machines om het recycleren van silicium panelen nog meer te optimaliseren.



Figuur 13: histogram som netto verdisconteerde baten 2014-2039

## 6.5.2 Dynamische analyse CIGS panelen

Na het uitvoeren van de dynamische analyse voor silicium panelen, zal er voor de CIGS panelen een gelijkaardige analyse uitgevoerd worden. Voor dit type panelen zal er met dezelfde leereffecten gewerkt worden als de silicium panelen. Ook hier zal er eerst kort gekeken worden naar de base case over de jaren 2014 tot 2039.

### 6.5.2.1 Base case CIGS panelen

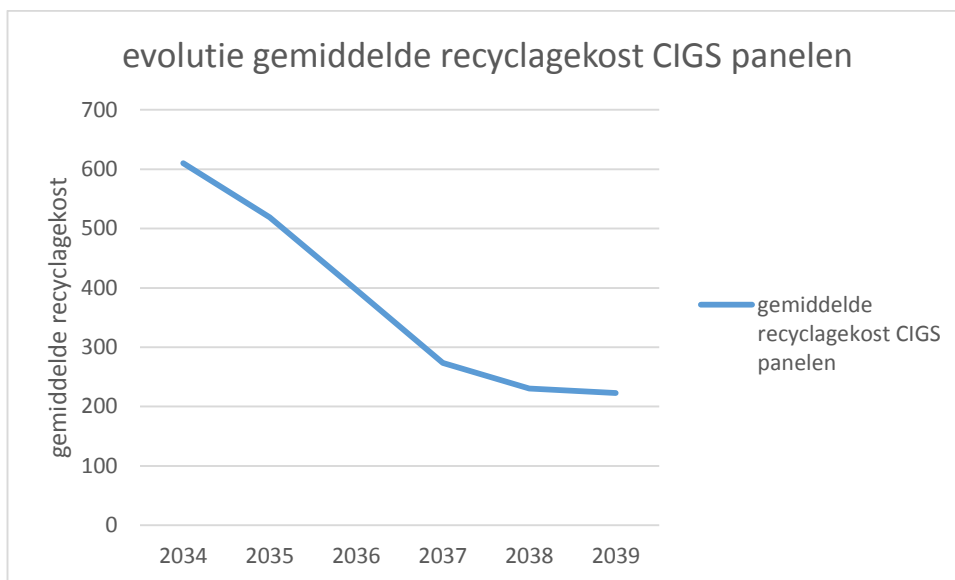
Voor deze base case is er opnieuw gewerkt met een leereffect van 13% en een discontovoet van 5%. De resultaten van de kosten-batenanalyse worden weergegeven in tabel 27. Uit deze tabel kan er besloten worden dat er in de periode 2014-2035 nog steeds negatieve verdisconteerde netto-baten op te merken zijn. Hier speelt het leereffect nog niet genoeg om de recyclage kosten voldoende te laten dalen. De jaren nadien is er een sterke stijging op te merken in de verdisconteerde netto-baat. De reden hiervan is de sterke volumegroei waardoor het leereffect meer uitgesproken wordt. In figuur 14 wordt het leereffect als daling van de gemiddelde kost visueel weergegeven. Tussen 2035 en 2037 is de sterkste daling op te merken. Daarna speelt het leereffect veel minder. Wanneer nu alle verdisconteerde netto-baten over de periode 2014-2039 opgeteld worden, komen we uit op een positieve netto-baat van 1.5834.105,94, wat er op wijst dat het wel de moeite is om te investeren in de recyclage van CIGS panelen. Er dient wel opgemerkt te worden dat het recycleren pas in 2036 in rendabele activiteit wordt.

Tabel 27: resultaat KBA dynamische analyse

Jaartal	2014-2033	2034	2035	2036	2037
<b>Baten</b>	295.943,85	5.721,42	40.867,28	144.873,42	949.348,24
<b>Kosten</b>	236.923,63	7.146,69	43.436,21	117.618,03	532.187,08
<b>Netto-baten</b>	-59.020,22	-1.425,27	-2.568,93	27.255,39	417.161,15

Jaartal	2038	2039	Som netto-baten (2014-2039)
<b>Baten</b>	692.325,02	1.535.386,94	
<b>Kosten</b>	326.246,41	699.761,75	
<b>Netto- baten</b>	366.078,61	835.625,19	<b>1.583.105,94</b>



Figuur 14: evolutie gemiddelde recyclagekost CIGS panelen

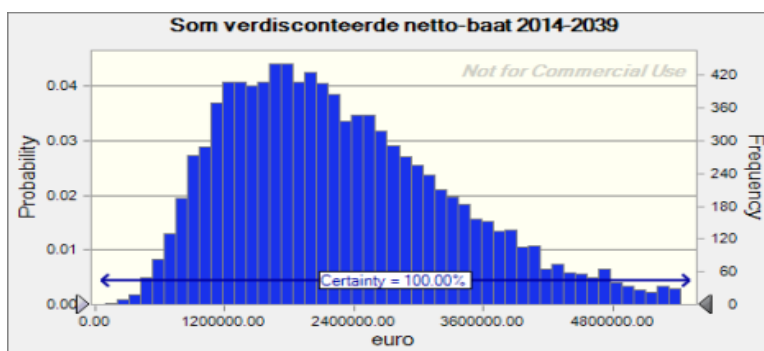
### 6.5.2.2 Monte-Carlo analyse CIGS panelen

Nu kan er overgegaan worden naar de Monte-Carlo simulatie. Ook hier werd weer met dezelfde twee typen Monte-Carlo simulaties gewerkt alsook met dezelfde onzekere parameters als bij de Monte-Carlo analyse van de silicium panelen.

Er zal gestart worden met een Monte-Carlo simulatie waarin gewerkt wordt met niet-verdisconteerde waarden op jaarbasis (2034-2039). Het resultaat van deze analyse is terug te vinden in bijlage 14. Uit deze analyse kan er besloten worden dat er de eerste drie jaren nog negatieve niet-verdisconteerde netto-baten mogelijk zijn. In 2034 is er zelfs nog maar een kans van 40,77% dat de niet-verdisconteerde netto-baat positief is. In 2035 is dit 84,98%. In 2036 is de kans toegenomen tot 99,58%. Het is interessant om in deze drie jaren eens te kijken welke parameters het meeste invloed hebben op de niet-verdisconteerde netto-baat. In deze jaren is het het recyclagepercentage van gallium dat de meeste invloed heeft. In 2034 heeft het een invloed van 78,7% en in 2035 73,3%. 2036 is dan weer een opmerkelijk jaar, want hier bedraagt de

invloed van het recyclagepercentage van gallium nog maar 56,3%. In dit jaar heeft het leereffect ook een sterke invloed op de netto-baat, namelijk 31,3%. De jaren nadien zijn er geen negatieve baten meer en is er een sterke stijging op te merken van de netto-baten. In 2034 schommelen de netto-baten nog maar tussen -7.575,38 en 10.957,45 euro. In 2039 bedraagt deze range al 676.603,80 en 9.014.411,57 euro. Wanneer gekeken wordt welke parameters het meeste invloed hebben op de netto-baat kan er besloten worden dat het leereffect een sterke stijging kent wat de invloed op de netto-baat betreft. In 2037 heeft het leereffect bijna even veel invloed op de netto-baat (43,7%) als het recyclagepercentage van gallium (46,8%). Uit deze analyse kan besloten worden dat er nog veel groeipotentieel mogelijk is in de toekomst. De volumegroei en het bijhorende leereffect zullen er voor zorgen dat in de toekomst het recycleren van CIGS panelen veel rendabeler wordt en dat er geen negatieve netto-baten meer te bespeuren zijn.

Tot slot zal er nog even ingegaan worden op de som van de netto-verdisconteerde baten over de jaren 2014-2039. Het resultaat van deze Monte-Carlo simulatie is terug te vinden in bijlage 15. Uit deze analyse kan er besloten worden dat de som van de verdisconteerde netto-baten in geen enkele simulatie negatief wordt. Deze schommelt tussen 93.590,16 en 8.180.602,07 euro. Figuur 15 geeft dit visueel weer. Wat ook opvalt is de sterk asymmetrische vorm van het histogram. Deze heeft een zeer uitgerekte rechter staart. Dit wordt verklaard door een vrij hoge positieve skewness van 0,96. Voorts is het histogram ook piekvormig. Dit wordt dan weer verklaard door een hoge positieve kurtosis van 4,23. Aan de hand van beide statistieken kan er besloten worden dat dit histogram zeker niet normaal verdeeld is. Opnieuw is hier een zeer brede range van totale verdisconteerde netto-baten op te merken. Het is ook hier weer interessant om te kijken wat het resultaat van de netto-baten beïnvloed. De discontovoet heeft de grootste invloed op de netto-baat, namelijk -59,1%. Dit percentage is negatief, dus wanneer de discontovoet stijgt en de andere parameters zijn constant zal er een opmerkelijke daling zijn van de netto-baat. De keuze van de discontovoet heeft dus een groot effect op de rendabiliteit van de recyclage van CIGS panelen. Ook het recyclagepercentage van gallium heeft een zekere invloed, 19,6%, alsook het leereffect met 16,7%. Er kan dus algemeen besloten worden dat ook het recycleren van CIGS panelen een rendabele activiteit zal worden in de toekomst, voornamelijk door het leereffect dat de gemiddelde recyclagekost zal doen dalen. Het recyclagepercentage van gallium dient ook niet vergeten te worden. Door het ontwikkelen van nieuwe technieken tegen de laagste kost voor het recycleren van gallium kan de totale netto-baat van het recycleren van CIGS panelen nog een boost krijgen.



Figuur 15: som netto-verdisconteerde baat CIGS 2014-2039



## Hoofdstuk 7: Conclusies en aanbevelingen

In dit afsluitende hoofdstuk zal aan de hand van bovenstaande analyses een antwoord gegeven worden op de centrale onderzoeksvraag. Voorts zullen aan de hand van deze conclusies ook enkele aanbevelingen gedaan worden op vlak van beleid voor de overheid en de recyclagebedrijven.

Met de huidige stand van technologie en marktprijzen van grondstoffen en inputs (arbeid, energie,..), bleek uit de base case van silicium panelen dat er een positieve netto-baat van 51.121,36 euro bestaat. Uit deze base case kan eenvoudig besloten worden dat het recycleren van end-of-life silicium panelen vandaag de dag rendabel is. Voor de CIGS panelen is er een heel ander verhaal. Daar is er een negatieve baat van 4.735,94 euro. Voor dit type panelen is de recyclage momenteel nog niet rendabel. Mogelijke verklaringen zijn dat de recyclage technologieën voor indium, selenium en gallium nog niet voldoende ontwikkeld zijn. Bij dit type grondstoffen worden momenteel nog maar recyclagepercentages van 30% bereikt. Er gaat met andere woorden 70% van de materialen verloren. Dit betekent een zeer groot verlies, want de huidige marktprijzen voor deze grondstoffen liggen zeer hoog. Voor indium bijvoorbeeld ligt de marktprijs op 624.800 euro per ton. Dit verklaart waarom CIGS panelen zoveel minder rendabel zijn. Bij de silicium panelen is er eigenlijk slechts één grondstof waar een zeer laag recyclagepercentage bereikt wordt, namelijk zilver. Dit kan momenteel voor slechts 40% gerecycleerd worden. Een mogelijke oplossing om de baten te verhogen is het zoeken naar nieuwe technologieën tegen een zo laag mogelijke kost om de zeldzame aardmetalen beter te kunnen recycleren. Er ligt zowel een verantwoordelijkheid bij de recyclagebedrijven, door meer te investeren in onderzoek en ontwikkeling als bij de overheid, die de bedrijven ook een stimulans kan geven om te investeren in onderzoek en ontwikkeling door nieuwe recyclagetechnieken te subsidiëren. Aan de kostenzijde kan er misschien ook nog bespaard worden door het recyclageproces efficiënter te organiseren door bijvoorbeeld meerdere processen te automatiseren, zodat er op arbeidskosten kan bespaard worden. Eenvoudig kan er dus besloten worden dat op vandaag het recycleren van silicium panelen financieel haalbaar is. Voor CIGS panelen is dit nog niet het geval.

Naast deze base case werd er ook nog een sensitiviteitsanalyse uitgevoerd om de onzekerheid omtrent bepaalde parameters, zoals grondstofprijzen en recyclagekosten in rekening te brengen. Uit de Monte-Carlo simulatie van de silicium panelen kon er met een betrouwbaarheid van 95% afgeleid worden dat de netto-baat in geen geval negatief zou worden. Dit werd ook aangetoond met de worst-case analyse. De netto-baten voor silicium panelen varieerden in de analyse tussen de 43.007,78 en 172.465,25 euro. Voorts kon er ook nog geconcludeerd worden dat de base case met 99,49% zekerheid bereikt of overschreden wordt. Het was voornamelijk de marktprijs van Tedlar die de netto-baat bepaalt (93,8%). Hier heeft het recyclagebedrijf natuurlijk weinig invloed op. Voor de CIGS panelen is er een heel ander verhaal. De range van de netto-baat bevat zowel positieve als negatieve waarden. Uit de analyse bleek dat de netto-baat ligt tussen -6.373,15 en 13.591,22 euro. Er is 53,89% kans dat de netto-baat positief is. Bij deze analyse was het belangrijk om te kijken welke parameters het meeste invloed hebben op de netto-baat. Dit is het recyclagepercentage van gallium, 85,2%, gevolgd door de marktprijs van gallium met 7,1% en het recyclagepercentage indium met 4,9%. Zoals eerder gezegd, dienen recyclagebedrijven samen met de overheid en de academische wereld onderzoek te doen om het recyclagepercentage van gallium en indium op te krikken en er zo voor te zorgen dat de kans vergroot dat er een positieve baat



ontstaat voor de recyclage van CIGS panelen. Aan de hand van de Monte-Carlo simulatie kan er besloten worden dat de recyclage van silicium panelen nog steeds rendabel is, zelfs als de onzekere parameters een ongunstige waarde aannemen. Wat de CIGS panelen betreft zijn er mogelijkheden in de toekomst dat de netto-baat positief wordt en dus het recycleren van CIGS panelen rendabel wordt.

Tot slot werd er nog een dynamische analyse uitgevoerd om de volumetoename en het bijhorende leereffect in rekening te brengen. Voor de silicium panelen kan er een gelijkaardige conclusie getrokken worden als bij de Monte-Carlo simulatie van de base case. De netto-baten zijn over de jaren heen zelfs in de meest negatieve omstandigheden positief. Het enige verschil tussen de Monte-Carlo simulatie van de base case en de dynamische analyse is, dat de netto-baten veel hoger liggen door de volumegroei en de lagere recyclagekosten door het leereffect. De eerste twee jaren heeft voornamelijk de marktprijs van Tedlar een grote invloed op de netto-baten, maar nadien heeft het leereffect steeds meer invloed gekregen, in 2038 zelfs 24,8%. Het leereffect heeft dus een matig positieve invloed op de netto-baat, omdat dit de recyclagekost doet dalen en dus de netto-baat doet stijgen. De grootste invloed blijft hier opnieuw weggelegd voor de marktprijs van Tedlar. De resultaten bij de CIGS panelen zijn veel opmerkelijker. Door het in rekening brengen van de volumegroei en leereffecten kan de recyclage van CIGS panelen een rendabele activiteit worden. Enkel de eerste drie jaren is er nog een kans op negatieve netto-baten, in 2034 bedraagt deze kans zelfs 59,23%. Vanaf 2037 zijn er geen negatieve netto-baten meer te bespeuren. Wanneer er gekeken wordt naar welke parameters het meeste invloed hebben, is dit in de beginjaren voornamelijk het recyclagepercentage van gallium. Later is de invloed van het leereffect sterk toegenomen. De leereffecten zullen dus een zeer grote invloed hebben op de netto-baat omdat het de recyclagekosten doet dalen. Uit de dynamische analyse kan er kort besloten worden dat door de volumegroei van end-of-life panelen de netto-baten van zowel silicium panelen als CIGS panelen sterk zullen toenemen. Ook zal de recyclage van CIGS panelen in de toekomst rendabel worden. Er hoeven dus niet altijd technologische veranderingen te zijn om negatieve baten om te zetten in positieve baten. Het beter worden en sneller worden in het recycleren van fotovoltaïsche panelen, samen met een volumegroei kan er voor zorgen dat de recyclagekost sterk daalt en dus de negatieve baten bij CIGS panelen wegwerkt.

## Lijst van geraadpleegde teksten

About.com, (z.d.). *Goodyear Patents Devulcanizing Process*, opgevraagd op 3 februari, 2015, via <http://composite.about.com/od/inthenews/l/blgoodyear1.htm>.

Agudo, J., & Evrard, W., (2010). *Closing the solar cell circle* [masterproef]. Katholieke Unversiteit Leuven, Faculteit Ingenieurswetenschappen.

Alibaba.com (z.d). *Competitive price 0.3mm thickness thin film PV solar backsheets for solar module*. Opgevraagd op 17 februari, 2015, via [http://www.alibaba.com/product-detail/Competitive-price-0-3mm-thickness-thin\\_1857167952.html](http://www.alibaba.com/product-detail/Competitive-price-0-3mm-thickness-thin_1857167952.html).

Aliexpress, (2015). Opgevraagd op 5 maart, 2015, via [http://www.aliexpress.com/price/tedlar-sheet\\_price\\_1.html](http://www.aliexpress.com/price/tedlar-sheet_price_1.html).

Angelo, M., & Reilly-Brown, J., (2014). *Whole-system agricultural certification: using lessons learned from leed to build a resilient agricultural system to adapt to climate change* [elektronische versie]. University of Colorado Law Review, 85, 689-758.

*Annual report PV Cycle*. (2013). Opgevraagd op 8 augustus, 2014, via [http://belgium.pvcycle.org/wp-content/uploads/2014/06/Annual-Report\\_2013\\_LR.pdf](http://belgium.pvcycle.org/wp-content/uploads/2014/06/Annual-Report_2013_LR.pdf).

Appropedia.org, (z.d.). *Viability of Recycling Copper Indium Gallium Selenide (CIGS) in Photovoltaic Cells*. Opgevraagd op 4 maart, 2015, via [http://www.appropedia.org/Viability\\_of\\_Recycling\\_Copper\\_Indium\\_Gallium\\_Selenide\\_%28CIGS%29\\_in\\_Photovoltaic\\_Cells#cite\\_note-.5B025.5D-28](http://www.appropedia.org/Viability_of_Recycling_Copper_Indium_Gallium_Selenide_%28CIGS%29_in_Photovoltaic_Cells#cite_note-.5B025.5D-28).

Benedict, M., (z.d.). *Electrowinning*. Opgevraagd op 3 februari, 2015, via <http://www.pprc.org/cpc/workshops/electrowinning.pdf>.

Blom-Zandstra, G., & Goosen, H., (2010). *Klimaatverandering: kansen voor de landbouw*. Opgevraagd op 14 maart, 2014, via [http://www.ltonoord.nl/binaries/10642702\\_rapport-345-totaal-sec-1-greet-blom-en-hasse-goosen-kleine-versie-tbv-internet.pdf](http://www.ltonoord.nl/binaries/10642702_rapport-345-totaal-sec-1-greet-blom-en-hasse-goosen-kleine-versie-tbv-internet.pdf).

Bine. (2010). *Recycling photovoltaic modules*. Opgevraagd op 14 november, 2014, via [http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Englische\\_Infos/projekt\\_0210\\_engl\\_internet\\_x.pdf](http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Englische_Infos/projekt_0210_engl_internet_x.pdf).

Bio Intelligence Service. (2011). *Study on photovoltaic panels supplementing the impact assessment for the recast of the WEE directive*. Opgevraagd op 13 november, 2014, via <http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/pdf/Study%20on%20PVs%20Bio%20final.pdf>.

Bollen, A., & Van Humbeeck, P., (2002). *Klimaatverandering & Klimaatbeleid een leidraad*. Gent: Academia Press.

Bouwen, Wonen en Energie Vlaanderen, (z.d). *Groenestroomcertificaten voor zonnepanelen*. Opgevraagd op 12 augustus, 2014, via <http://www.vlaanderen.be/nl/bouwen-wonen-en-energie/elektriciteit-en-aardgas/groenestroomcertificaten-voor-zonnepanelen>.

Briffaerts, K., et al. (2009). *Prognoses voor hernieuwbare energie en warmtekrachtkoppeling tot 2020*. Opgevraagd op 7 juli, 2014, via [http://www2.vlaanderen.be/economie/energiesparen/milieuvriendelijke/Cijfers&statistieken/Prognosestudie\\_HEB\\_WKK\\_tot\\_2020.pdf](http://www2.vlaanderen.be/economie/energiesparen/milieuvriendelijke/Cijfers&statistieken/Prognosestudie_HEB_WKK_tot_2020.pdf).

CES EduPack, (2014). Softwarepakket verkregen via co-promotor Rob Hoogmartens

Delmotte, P., (2013). *Invloed van spanningsdips op het gedrag van invertoren in fotovoltaïsche installaties*. Opgevraagd op 18 september, 2014, via <http://dspace.howest.be/bitstream/10046/1013/1/Masterproefverslag.pdf>.

De Standaard, (2012). *Photovoltech stopt productie*. Opgevraagd op 27 februari, 2015, via [http://www.standaard.be/cnt/dmf20120914\\_167](http://www.standaard.be/cnt/dmf20120914_167).

Dupont, G., (2011). *Gebruik van de reële optiebenadering voor investeringsevaluatie door Belgische ondernemingen* [masterproef]. Universiteit Hasselt, faculteit bedrijfseconomische wetenschappen.

Emis. (z.d.). *Fotovoltaïsche panelen*. Opgevraagd op 1 februari, 2015, via <http://afss.emis.vito.be/afvalstroom/fotovolta%C3%AFsche-pv-panelen>.

Energieleveranciers.nl, (z.d.). *Opbrengst zonnepanelen*. Opgevraagd op 17 maart, 2015, via <http://www.energieleveranciers.nl/zonnepanelen/opbrengst-zonnepanelen>.

Epia, (2014). *Global market outlook for photovoltaics 2014-2018*. Opgevraagd op 25 februari, 2015, via <http://www.epia.org/news/publications/global-market-outlook-for-photovoltaics-2014-2018/>.

Eurostat, (2014,a). *Labour costs annual data*. Opgevraagd op 5 maart, 2015, via <http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=1&pcode=tps00173&language=en>.

Eurostat, (2014,b). *Electricity prices by type of user*. Opgevraagd op 5 maart, 2015, via <http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&init=1&language=en&pcode=ten00117&plugin=1>.

Eurostat, (z.d.). *Recycling – secondary material price indicator*. Opgevraagd op 9 maart, 2015, via [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Recycling\\_%E2%80%93\\_secondary\\_material\\_price\\_indicator](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Recycling_%E2%80%93_secondary_material_price_indicator).

Fas.org, (z.d.). *Learning Curve Calculator*. Opgevraagd op 23 maart, 2015, via <http://fas.org/news/reference/calc/learn.htm>.

Fthenakis, V., (2000). End-of-life management and recycling of PV modules. *Energy Policy*, 28, 1051-1058.

Fthenakis, V., (2004). Life cycle impact analysis of cadmium in CdTe PV production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8(4), 303-334.

Frison, L., et al., (2000). *Recent improvements in industrial PV module recycling*. Paper gepresenteerd op de 16<sup>de</sup> Photovoltaic Solar Energy Conference van 1-5.05.2000 in Glasgow, Verenigd Koninkrijk.

Goudzilverprijs.nl, (2015). *Zilverprijs per kilo in euro- 5 jaar*. Opgevraagd op 5 maart, 2015, via <http://goudzilverprijs.nl/>.

Groenebouwmaterialen.nl (z.d.). *Moviset vuurvaste kit 20kg*. Opgevraagd op 17 februari, 2015, via <http://www.groenebouwmaterialen.nl/a-26090148/vuurvaste-mortels-beton-en-kit/moviset-vuurvaste-kit-20kg/>.

Hax, A., & Majlu, N., (1982). Competitive Cost Dynamics: The Experience Curve. *Interfaces*, 12, 50-61.

<http://www.aluminiumprijs.eu/>

Indexmundi.com, (2015).

International Zinc Association, (2011). *Zinc recycling*. Opgevraagd op 2 februari, 2015, via [http://www.zinc.org/basics/zinc\\_recycling](http://www.zinc.org/basics/zinc_recycling).

IVCIE, *nuttige toepassing*, opgevraagd op 16 september, 2014, via <http://www.ivcie.be/nl/page.php?pageId=479>.

Jespers, K., Aernouts, K., & Dams Y., (2014). *Inventaris duurzame energie in Vlaanderen 2012 deel I: hernieuwbare energie*. Opgevraagd op 7 juli, 2014, via [http://www2.vlaanderen.be/economie/energiesparen/milieuvriendelijke/Cijfers&statistieken/Rapport\\_duurzame\\_energie\\_inventaris\\_2012.pdf](http://www2.vlaanderen.be/economie/energiesparen/milieuvriendelijke/Cijfers&statistieken/Rapport_duurzame_energie_inventaris_2012.pdf).

Kurama, H., & Göktepe, F., (2003). Recovery of zinc from waste material using hydro metallurgical processes [elektronische versie]. *Environmental Progress*, 22 (3), 161-166

Lee, S., et al., (2014). Electrolytic Recovery of Tin from Printed Circuit Boards (PCBs) Disassembled from Waste Liquid Crystal Displays (LCDs): Selection of H<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Leaching Solution over Two-stage Leaching in HNO<sub>3</sub> and HCl. *Current Nanoscience*, 10, 104-107

Lievens J., (2009). *Holistische visie van duurzaam ondernemen: de case van energieproductie met fotovoltaïsche panelen*. Opgevraagd op 8 juli, 2014, via [http://lib.ugent.be/fulltxt/RUG01/001/392/220/RUG01-001392220\\_2010\\_0001\\_AC.pdf](http://lib.ugent.be/fulltxt/RUG01/001/392/220/RUG01-001392220_2010_0001_AC.pdf).

LME-prijzen.nl., (2015). *LME Tinprijs*. Opgevraagd op 17 februari, 2015, via <http://www.lme-prijzen.nl/tinprijs/>.

Membrane Technology and Research Inc, (z.d.). *Recovery and Recycling of Valuable Feedstock From Plant Reactor Purge Gas*. Opgevraagd op 3 februari, 2015, via <http://www.epa.gov/ncer/sbir/success/pdf/recovery.pdf>.

Mercken, R., (2010). *De investeringsbeslissing*. Antwerpen-Apeldoorn: Garant.

Michael, W., & Grainey, T., (2011). *Global warming and its impact on water supply. The energy implications of climate change and the effects of our energy choices* [elektronische versie]. *Willamet Law Review*, 47, 593-626.

Metal-pages.com

Metalprices.com, (2015).

Ode, (z.d.). *Marktgroei Vlaamse PV-markt tot eind 2013*. Opgevraagd op 17 maart, 2013, via <http://www.ode.be/zonnestroom/de-cijfers/marktgegevens>.

*Operational status report PV Cycle*. (2014). Opgevraagd op 1 februari, 2015, via <http://belgium.pvcycle.org/wp-content/uploads/2013/09/OPS-Status-Report-December-1.pdf>.

Paiano, P., (2014). Photovoltaic waste assessment in Italy [elektronische versie]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 41, 99-112.

Pan, J., Zhang, C., Sun, Y., Wang, Z., & Yang, Y., (2012). A new process of lead recovery from waste lead-acid batteries by electrolysis of alkaline lead oxide solution. *Electrochemistry Communications*, 19, 70-72.

Peres, AEC., Pereira, C.A., & Martins, A.H., (2012). Tin recovery by recycling of printed circuit boards from obsolete computers in Brazil. *Revista ingenieria*, 27, 45-50.

Pindyck, R., & Rubinfeld, D., (2013). *Microeconomics*. United States: Pearson.

*Position paper Vlaams Materialenprogramma*, (z.d.). Opgevraagd op 12 augustus, 2014, via [http://www.ovam.be/sites/default/files/atoms/files/Position\\_Paper\\_Vlaams\\_Materialenprogramma.pdf](http://www.ovam.be/sites/default/files/atoms/files/Position_Paper_Vlaams_Materialenprogramma.pdf).

PV Cycle., (2014). *Aanvaardingsplicht voor afgedankte fotovoltaïsche zonnepanelen*. Opgevraagd op 21 juli, 2014, via <http://www.intersolution.be/gallery/documents/infosessies2014/pv-cycle-intersolutions-jan-clyncke-final-2014-nl.pdf>.

PV Cycle Netherlands. (z.d.). Opgevraagd op 1 februari, 2015, via [http://netherlands.pvcycle.org/wp-content/uploads/2014/06/PV\\_CYCLE\\_WEEE\\_netherlands\\_2014\\_nl\\_online.pdf](http://netherlands.pvcycle.org/wp-content/uploads/2014/06/PV_CYCLE_WEEE_netherlands_2014_nl_online.pdf).

RICHTLIJN 2011/65/EU, (2011). Publicatieblad Europese Unie. Opgevraagd op 26 juli, 2014, via <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:174:0088:0110:NL:PDF>.

RICHTLIJN 2012/19/EU, (2012). publicatieblad Europese unie. Opgevraagd op 21 juli, 2014, via <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:197:0038:0071:NL:PDF>.

Rienstra, S., & Groot, W., (2012). *Advies te hanteren discontovoet bij de Life Cycle Cost analyse*. Opgevraagd op 4 april, 2015, via [www.rijksoverheid.nl/...discontovoet.../discontovoet-bij-de-life-cycle.pdf](http://www.rijksoverheid.nl/...discontovoet.../discontovoet-bij-de-life-cycle.pdf).

Schreurs, E., (2009). *Verantwoording en vergelijking van de overheidssteun in Vlaanderen aan warmtekrachtkoppeling en fotovoltaïsche zonne-energie*. Opgevraagd op 14 maart, 2014, via <https://uhdspace.uhasselt.be/dspace/handle/1942/10106>.

Solar Waste., (z.d.). *Collection and recycling*. Opgevraagd op 29 november, 2014, via <http://www.solarwaste.eu/collection-and-recycling/>.

Statista, (2015). Global market share of solar module manufacturers in 2013. Opgevraagd op 27 februari, 2015, via <http://www.statista.com/statistics/269812/global-market-share-of-solar-pv-module-manufacturers>.

Strybos, z.d. *Startnota afgedankte fotovoltaïsche panelen*. Opgevraagd op 18 augustus, 2014, via <http://ovam.be/sites/default/files/Startnota%20MBO%20Afgedankte%20fotovolta%C3%AFsche%20zonnepanelen.pdf>.

Theys, J., (2013). *Technisch-economische analyse van CIGS BIPV in Vlaanderen*. Opgevraagd op 2 februari, 2015, via <https://uhdspace.uhasselt.be/dspace/handle/1942/15655>.

Tyagi, V., et al. (2013). Progress in solar PV technology: Research and achievement [elektronische versie]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20(0), 443-461.

Verhelst, B., (2012). *Technologieën voor PV systemen*. Opgevraagd op 18 september, 2014, via <https://biblio.ugent.be/input/download?func=downloadFile&recordOID=3065116&fileOID=3065117>.

Vlaams Materialenprogramma, (2013). Opgevraagd op 12 augustus, 2014, via <http://www.vlaamsmaterialenprogramma.be>

Vlarema 17 februari 2012, (2012). Kruispuntbank Wetgeving. Opgevraagd op 26 juli, 2014, via [http://www.ejustice.just.fgov.be/cgi\\_loi/change\\_lg.pl?language=nl&la=N&cn=2012021718&table\\_name=wet](http://www.ejustice.just.fgov.be/cgi_loi/change_lg.pl?language=nl&la=N&cn=2012021718&table_name=wet).

Volpe, M., et al., (2009). Metallic lead recovery from lead-acid battery paste by urea acetate dissolution and cementation on iron. *Hydrometallurgy*, 96, 123-131.

Vose, D. (2008). *Risk analysis. A quantitative guide*. West Sussex, Engeland: John Wiley and Sons.

Vmzinc, (z.d.). *Rolled zinc is recyclable*. Opgevraagd op 2 februari, 2015, via <http://www.vmzinc-us.com/zinc-and-sustainability/rolled-zinc-is-recyclable.html>.

Vreg, (z.d.). *Gemiddeld energieverbruik van een gezin*. Opgevraagd op 28 februari, 2015, via <http://www.vreg.be/nl/gemiddeld-energieverbruik-van-een-gezin>.

Vreg, (2015). V-test, opgevraagd op 28 februari, 2015, via <http://www.vreg.be/nl/doe-de-v-test-voor-gezinnen>.

Wet 21 december 1998, (1999). Opgevraagd op 26 juli, 2014, via [http://www.ejustice.just.fgov.be/cgi\\_loi/change\\_lg.pl?language=nl&la=N&cn=1998122141&table\\_name=wet](http://www.ejustice.just.fgov.be/cgi_loi/change_lg.pl?language=nl&la=N&cn=1998122141&table_name=wet).

Wisselkoers.nl, (2015). Opgevraagd op 15 februari, 2015, via <http://www.wisselkoers.nl/>.

Zinkprijs.eu (2014). *Zinkprijs in euro per kilo en US Dollar per pound*. Live zink prijs koersen. Opgevraagd op 10 december, 2014, via <http://www.zinkprijs.eu/>.

Zonnepanelenenergie.be, (z.d.). *zonnepanelen installateurs*. Opgevraagd op 27 februari 2015, via <http://zonnepanelenenergie.be/installateurs/zonnepanelen-installateurs>.

## Bijlagen

### Bijlage 1: Aandeel energie uit hernieuwbare bronnen in bruto eindverbruik van elektriciteit in Vlaanderen, bron: VITO eindrapport 2014

#### AANDEEL ENERGIE UIT HERNIEUWBARE BRONNEN IN HET BRUTO EINDVERBRUIK VAN ELEKTRICITEIT IN VLAANDEREN

<b>Productie groene stroom GWh (bruto)</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>
<b>Waterkracht (genormaliseerd)</b>	2,5	3,7	3,6	3,6	3,6	3,5	3,5	3,4
<b>Windenergie (genormaliseerd)</b>	175,2	221,2	264,1	313,7	398,2	473,0	576,0	701,4
<b>Zon (PV)</b>	1,1	2,8	5,6	34,0	143,4	493,5	1.001,7	1.722,9
<b>Afvalverbranding</b>	176,1	208,4	260,0	274,8	351,3	438,4	461,4	460,8
<b>Biomassa</b>	607,6	981,9	1.051,1	1.373,3	1.885,2	1.767,7	1.996,9	2.634,0
<b>Biogas</b>	126,3	154,9	156,3	191,7	319,4	406,8	403,8	507,9
<b>Totale bruto groene stroom productie (incl. normalisering)</b>	1.088,8	1.573,0	1.740,8	2.191,1	3.101,3	3.582,9	4.443,3	6.030,3
<b>Totaal bruto eindverbruik van elektriciteit (GWh)</b>	58.524,4	60.180,7	60.383,2	60.247,4	56.825,6	61.628,3	59.235,6	59.485,6
<b>% energie uit hernieuwbare bronnen in het bruto eindverbruik van elektriciteit in Vlaanderen</b>	<b>1,9</b>	<b>2,6</b>	<b>2,9</b>	<b>3,6</b>	<b>5,5</b>	<b>5,8</b>	<b>7,5</b>	<b>10,1</b>

**Bijlage 2: Installaties met een vermogen van maximaal 250 kW: waarde van certificaat**

Datum indienname	Minimumsteun per certificaat	Duur
2006-2009	450 euro	20 jaar
2010	350 euro	
januari tem juni 2011	330 euro	
juli tem september 2011	300 euro	
oktober tem december 2011	270 euro	
januari tem maart 2012	250 euro	
april tem juni 2012	230 euro	
juli 2012	210 euro	
augustus tem december 2012	90 euro	10 jaar

*Bron Vreg*

**Bijlage 3: Installaties met een vermogen van meer dan 250 kW: waarde van certificaat**

Datum indienname	Minimumsteun per certificaat	Duur
2006-2009	450 euro	20 jaar
2010	350 euro	
januari tem juni 2011	330 euro	
juli tem september 2011	240 euro	
oktober tem december 2011	150 euro	
januari tem juli 2012	90 euro	
augustus tem december 2012	90 euro	10 jaar

## Bijlage 4: overzicht bandingfactoren

### Installaties in dienst genomen in 2013

Bandingfactor van toepassing voor de productie in periode				
Max AC-vermogen omvormers	1 jan tem 31 juli 2013	1 aug 2013 tem 16 febr 2014	17 februari tem 31 juli 2014	Vanaf 1 aug 2014
≤ 10 kW	0,23 (4.348 kWh)	0,28 (3.571 kWh)	0,00 (Geen certificaten voor productie in deze periode *)	0,0847 (11.806 kWh)
> 10 en ≤ 250 kW	0,63 (1.587 kWh)	0,72 (1.389 kWh)	0,954 (1.048 kWh)	
> 250 en ≤ 750 kW	0,49 (2.041 kWh)	0,57 (1.754 kWh)	0,788 (1.269 kWh)	

\* Installaties in dienst genomen in 2013 krijgen geen groenestroomcertificaten voor de elektriciteitsproductie tussen 17 februari en 31 juli 2014. De elektriciteitsproductie van voor 17 februari waarvoor nog geen groenestroomcertificaat werd uitgereikt, wordt meegenomen wanneer u een nieuwe meterstand doorgeeft. U kan pas een meterstand doorgeven zodra uw zonnepanelen voldoende produceerden voor minstens één groenestroomcertificaat.

### Installaties in dienst genomen tussen 1 januari en 1 juli 2014

Max AC-vermogen omvormers	Bandingfactor voor productie in periode	
	1 jan tem 31 juli 2014	Vanaf 1 aug 2014
≤ 10 kW	0,268 (3.731 kWh)	0,0394 (25.381 kWh)
> 10 en ≤ 250 kW	0,522 (1.916 kWh)	0,710 (1.408 kWh)
> 250 en ≤ 750 kW	0,436 (2.294 kWh)	0,610 (1.639 kWh)

### Installaties in dienst genomen tussen 1 juli 2014 en 1 januari 2015

Max AC-vermogen omvormers	Bandingfactor vanaf 1 juli 2014



≤ 10 kW	0,00 (Geen certificaten voor productie in deze periode )
> 10 en ≤ 250 kW	0,687 (1.456 kWh)
> 250 en ≤ 750 kW	0,593 (1.686 kWh)

## Installaties in dienst genomen vanaf 1 januari 2015

Max AC-vermogen omvormers	Bandingfactor vanaf 1 januari 2015
≤ 10 kW	0,00 (Geen certificaten voor productie in deze periode )
> 10 en ≤ 250 kW	0,596 (1.678 kWh)
> 250 en ≤ 750 kW	0,493 (2.028 kWh)

Bron Vreg

### Bijlage 5: evolutie van het aantal installaties

Aantal installaties											
	voor 2006	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
<b>≤ 10 kW</b>											
jaarlijkse toename		410	2.942	10.993	48.500	32.044	82.414	43.012	3.979	5.529	169
totaal aantal	720	1.130	4.072	15.065	63.565	95.609	178.023	221.035	225.014	230.543	230.712
<b>&gt; 10 kW en ≤ 250 kW</b>											
jaarlijkse toename		10	67	133	928	756	1.802	1.118	64	29	0
totaal aantal	1	11	78	211	1.139	1.895	3.697	4.815	4.879	4.908	4.908
<b>&gt; 250 kW</b>											
jaarlijkse toename		1	9	21	274	215	345	8	10	0	0
totaal aantal		1	10	31	305	520	865	873	883	883	883
<b>TOTAAL</b>											
jaarlijkse toename		421	3.018	11.147	49.702	33.015	84.561	44.138	4.053	5.558	169
totaal aantal	721	1.142	4.160	15.307	65.009	98.024	182.585	226.723	230.776	236.334	236.503

Bron Vreg, 2015

## Bijlage 6: resultaten simulatie rendement fotovoltaische panelen

Vermogen PV-installatie om uw verbruik volledig te dekken: (met een opbrengst-factor van 0.85 kWh/Wp/jaar)	3529 Wp
Installatiekost van de PV-installatie aan 1.6 €/Wp (incl. BTW):	5647 €
In jaar 0 heeft u eenmalige baten en kosten van (incl. BTW):	0 €
Uw netbeheerder:	PBE
Jaarlijks netvergoeding per kW max AC vermogen omvormer incl. 21% BTW:	94.63 €
Besparing op electriciteitskosten per opgewekt kWh:	0.2375 €
Uw gewenst rendement van 5% wordt behaald na (zie "NPV"):	>31 jaar

Jaar	Ele kWh	Ele €	NV €	Vast €	GSC €	CF €	DCF €	NPV €
0	0	0	0	0	0	-5647	-5647	-5647
1	2978	721	-307	-51	0	364	346	-5301
2	2956	730	-313	-52	0	366	332	-4969
3	2934	739	-319	-53	0	367	317	-4652
4	2912	749	-325	-54	0	369	304	-4348
5	2890	758	-332	-55	0	371	291	-4057
6	2869	767	-339	-56	0	373	278	-3779
7	2848	777	-345	-57	0	374	266	-3513
8	2827	787	-352	-59	0	376	254	-3259
9	2806	796	-359	-60	0	377	243	-3015
10	2785	806	-366	-61	0	379	233	-2783
11	2764	816	-374	-62	0	380	222	-2560
12	2744	827	-381	-1351	0	-906	-505	-3065
13	2723	837	-389	-65	0	383	203	-2862
14	2703	847	-397	-66	0	385	194	-2667
15	2683	858	-405	-67	0	386	186	-2482
16	2663	868	-413	-69	0	387	177	-2304
17	2644	879	-421	-70	0	388	169	-2135
18	2624	890	-429	-71	0	389	162	-1973
19	2605	901	-438	-73	0	390	155	-1819
20	2585	912	-447	-74	0	391	148	-1671
21	2566	924	-456	-76	0	392	141	-1530
22	2547	935	-465	-77	0	393	134	-1396
23	2528	947	-474	-79	0	394	128	-1268
24	2510	959	-484	-1368	0	-893	-277	-1544
25	2491	971	-493	-82	0	395	117	-1428
26	2472	983	-503	-84	0	396	111	-1316
27	2454	995	-513	-85	0	397	106	-1210
28	2436	1007	-523	-87	0	397	101	-1109
29	2418	1020	-534	-89	0	397	97	-1012

Jaar	Ele kWh	Ele €	NV €	Vast €	GSC €	CF €	DCF €	NPV €
30	2400	1033	-544	-91	0	397	92	-920

Bron: zonnestraal (2015), opgevraagd op 28 februari, 2015, via [http://www.zonstraal.be/vzw/pvinvest.php?ele\\_usage=3500&persons=4&v\\_cost=718.90&pc=3440&calc\\_wp=on&interest=5&price\\_wp=1.6&onetime\\_benefits=0&return\\_factor=0.85&degradation=80\\_30&generator\\_repl=on&annual\\_maint=50&years\\_gsc=15&price\\_gsc=0&fixed\\_ele=6.34&index\\_ele=2&index\\_nv=2&index\\_nc=2](http://www.zonstraal.be/vzw/pvinvest.php?ele_usage=3500&persons=4&v_cost=718.90&pc=3440&calc_wp=on&interest=5&price_wp=1.6&onetime_benefits=0&return_factor=0.85&degradation=80_30&generator_repl=on&annual_maint=50&years_gsc=15&price_gsc=0&fixed_ele=6.34&index_ele=2&index_nv=2&index_nc=2).

## Bijlage 7: resultaten simulatie rendement fotovoltaïsche panelen GSC

Vermogen PV-installatie om uw verbruik volledig te dekken: (met een opbrengst-factor van 0.85 kWh/Wp/jaar)	3529 Wp
Installatiekost van de PV-installatie aan 1.6 €/Wp (incl. BTW):	5647 €
In jaar 0 heeft u eenmalige baten en kosten van (incl. BTW):	0 €
Uw netbeheerder:	PBE
Jaarlijks netvergoeding per kW max AC vermogen omvormer incl. 21% BTW:	94.63 €
Besparing op electriciteitskosten per opgewekt kWh:	0.2375 €
Uw gewenst rendement van 5% wordt behaald na (zie "NPV"):	4 jaar

Jaar	Ele kWh	Ele €	NV €	Vast €	GSC €	CF €	DCF €	NPV €
0	0	0	0	0	0	-5647	-5647	-5647
1	2978	721	-307	-51	1340	1704	1623	-4024
2	2956	730	-313	-52	1330	1696	1538	-2486
3	2934	739	-319	-53	1320	1688	1458	-1028
4	2912	749	-325	-54	1310	1680	1382	353
5	2890	758	-332	-55	1301	1672	1310	1663
6	2869	767	-339	-56	1291	1664	1241	2905
7	2848	777	-345	-57	1282	1656	1177	4081
8	2827	787	-352	-59	1272	1648	1115	5197
9	2806	796	-359	-60	1263	1640	1057	6254
10	2785	806	-366	-61	1253	1632	1002	7256
11	2764	816	-374	-62	1244	1624	950	8206
12	2744	827	-381	-1351	1235	329	183	8389
13	2723	837	-389	-65	1226	1609	853	9242
14	2703	847	-397	-66	1216	1601	809	10050
15	2683	858	-405	-67	1207	1593	766	10817
16	2663	868	-413	-69	0	387	177	10994
17	2644	879	-421	-70	0	388	169	11164
18	2624	890	-429	-71	0	389	162	11325
19	2605	901	-438	-73	0	390	155	11480
20	2585	912	-447	-74	0	391	148	11628
21	2566	924	-456	-76	0	392	141	11768
22	2547	935	-465	-77	0	393	134	11903
23	2528	947	-474	-79	0	394	128	12031
24	2510	959	-484	-1368	0	-893	-277	11754
25	2491	971	-493	-82	0	395	117	11871
26	2472	983	-503	-84	0	396	111	11982
27	2454	995	-513	-85	0	397	106	12089
28	2436	1007	-523	-87	0	397	101	12190

Jaar	Ele kWh	Ele €	NV €	Vast €	GSC €	CF €	DCF €	NPV €
29	2418	1020	-534	-89	0	397	97	12286

Bron: zonnestraal (2015). Opgevraagd op 28 februari, 2015, via [http://www.zonstraal.be/vzw/pvinvest.php?ele\\_usage=3500&persons=4&v\\_cost=718.90&pc=3440&calc\\_wp=on&interest=5&price\\_wp=1.6&onetime\\_benefits=0&return\\_factor=0.85&degradation=80\\_30&generator\\_repl=on&annual\\_maint=50&years\\_gsc=15&price\\_gsc=450&fixed\\_ele=6.34&index\\_ele=2&index\\_nv=2&index\\_nc=2](http://www.zonstraal.be/vzw/pvinvest.php?ele_usage=3500&persons=4&v_cost=718.90&pc=3440&calc_wp=on&interest=5&price_wp=1.6&onetime_benefits=0&return_factor=0.85&degradation=80_30&generator_repl=on&annual_maint=50&years_gsc=15&price_gsc=450&fixed_ele=6.34&index_ele=2&index_nv=2&index_nc=2).

## Bijlage 8 resultaat Monte-Carlo simulatie silicium panelen

### Crystal Ball Report - Full

Simulation started on 3/10/2015 at 0:48:50

Simulation stopped on 3/10/2015 at 0:48:59

#### Run preferences:

Number of trials run	10 000
Extreme speed	
Latin Hypercube (size)	50000
Random seed	
Precision control on	
Confidence level	95,00% Run

#### statistics:

Total running time (sec)	7,89
Trials/second (average)	1 267
Random numbers per sec	43 093

#### Crystal Ball data:

Assumptions	34
Correlations	0
Correlated groups	0
Decision variables	0
Forecasts	1

## Forecasts

Worksheet: [dataset analyseu.xlsx]KBA recycleurs

Forecast: Netto-baat silicium panelen

Cell: E33

Summary:

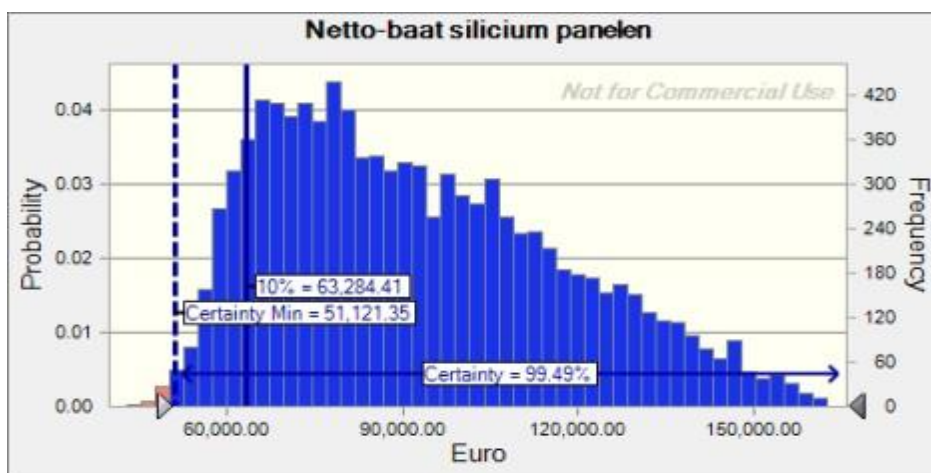
Certainty level is 99.49%

Certainty range is from 51,121.35 to Infinity

Entire range is from 43,007.78 to 172,465.25

Base case is 51,121.35

After 10,000 trials, the std. error of the mean is 249.35

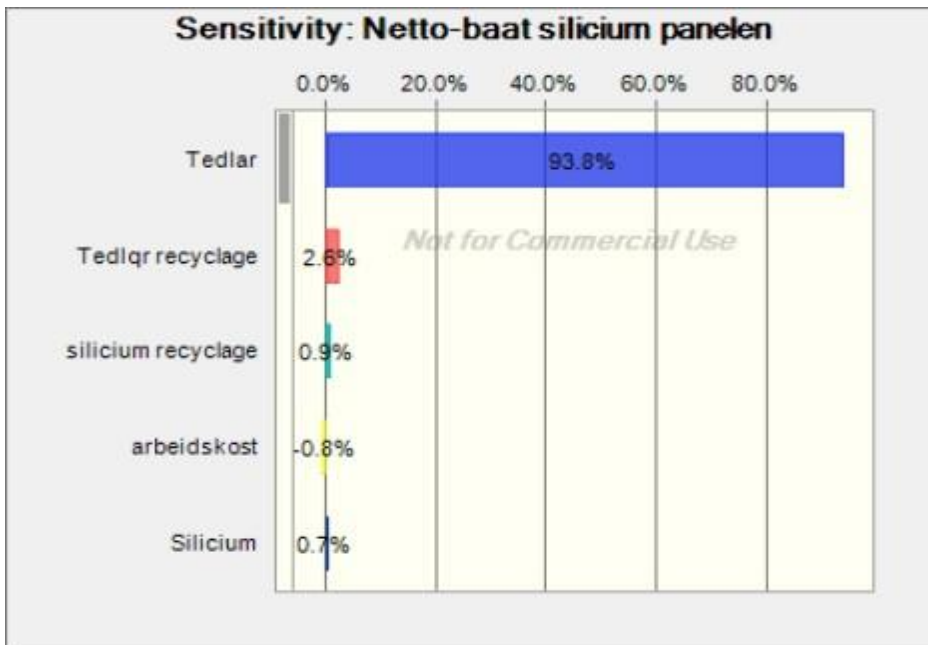


Statistics:	Forecast values
Trials	10 000
Mean	92 654,35
Median	88 706,93
Mode	---
Standard Deviation	24 935,15
Variance	621 761 658,37
Skewness	0,5614
Kurtosis	2,56
Coeff. of Variability	0,2691
Minimum	43 007,78
Maximum	172 465,25
Range Width	129 457,47
Mean Std. Error	249,35

**Forecast: Netto-baat silicium panelen (cont'd)**

**Cell: E33**

Percentiles:	Forecast values
0%	43 007,78
10%	63 284,41
20%	69 376,07
30%	75 424,21
40%	81 362,23
50%	88 705,00
60%	96 693,96
70%	105 080,04
80%	114 929,46
90%	129 053,89
100%	172 465,25





## Bijlage 9: resultaat Monte-Carlo simulatie CIGS panelen

### Crystal Ball Report - Full

Simulation started on 3/10/2015 at 1:43:34

Simulation stopped on 3/10/2015 at 1:43:44

#### Run preferences:

Number of trials run	10 000
Extreme speed	
Latin Hypercube (size)	50000
Random seed	
Precision control on	
Confidence level	95,00% Run

#### statistics:

Total running time (sec)	8,21
Trials/second (average)	1 218
Random numbers per sec	43 858

#### Crystal Ball data:

Assumptions	36
Correlations	0
Correlated groups	0
Decision variables	0
Forecasts	1

**Forecast  
s**

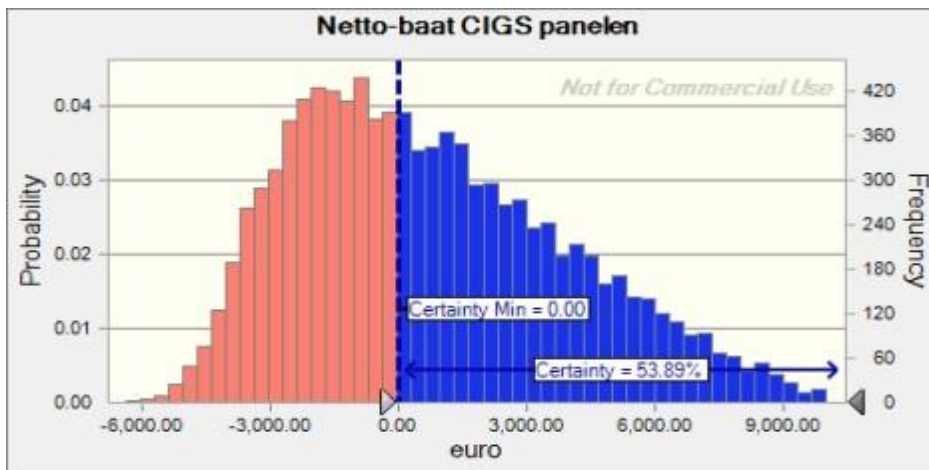
Worksheet: [dataset analyseu.xlsx]KBA recycleurs

Forecast: Netto-baat CIGS panelen

Cell: F55

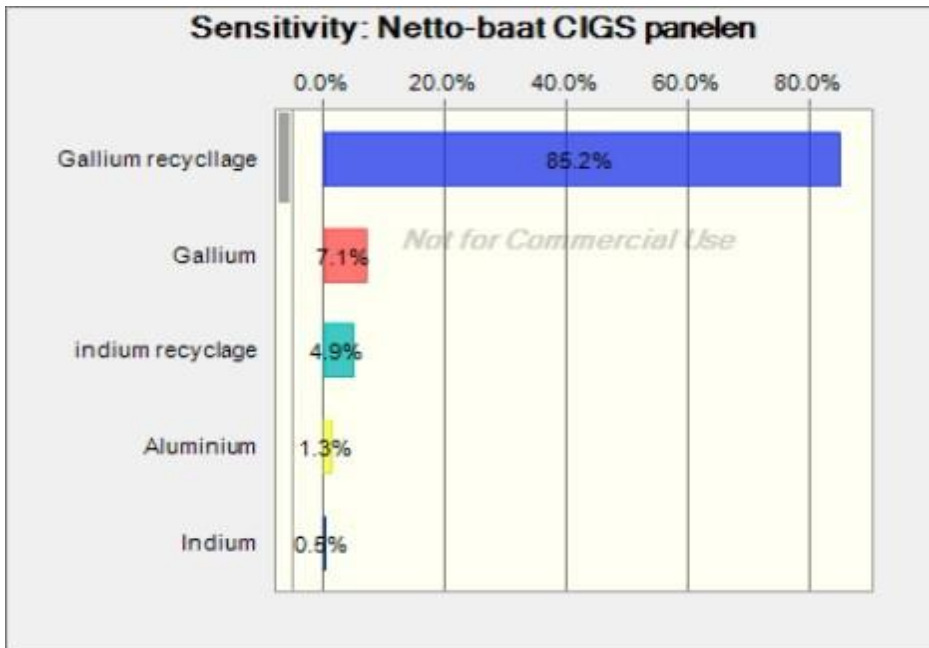
Summary:

Certainty level is 53.89%  
 Certainty range is from 0.00 to Infinity  
 Entire range is from -6,373.15 to 13,591.22  
 Base case is -4,735.94  
 After 10,000 trials, the std. error of the mean is 32.78



Statistics:	Forecast values
Trials	10 000
Mean	829,53
Median	341,70
Mode	---
Standard Deviation	3 278,44
Variance	10 748 149,98
Skewness	0,5941
Kurtosis	2,85
Coeff. of Variability	3,95
Minimum	-6 373,15
Maximum	13 591,22
Range Width	19 964,37
Mean Std. Error	32,78

Sensitivity Charts



**Bijlage 10: resultaat dynamische analyse niet-verdisconteerde netto-baten  
silicium panelen (2034-2039)**

**Crystal Ball Report - Full**

Simulation started on 2/1/2013 at 0:22:56

Simulation stopped on 2/1/2013 at 0:23:06

Run preferences:

Number of trials run	10 000
Extreme speed	
Latin Hypercube (size)	50000
Random seed	
Precision control on	
Confidence level	95,00% Run

statistics:

Total running time (sec)	7,65
Trials/second (average)	1 306
Random numbers per sec	48 336

Crystal Ball data:

Assumptions	37
Correlations	0
Correlated groups	0
Decision variables	0
Forecasts	6

### Forecasts

Worksheet: [dynamische analyse.xlsx]KBA

Forecast: Niet-verdisconteerde netto-baat silicium 2034

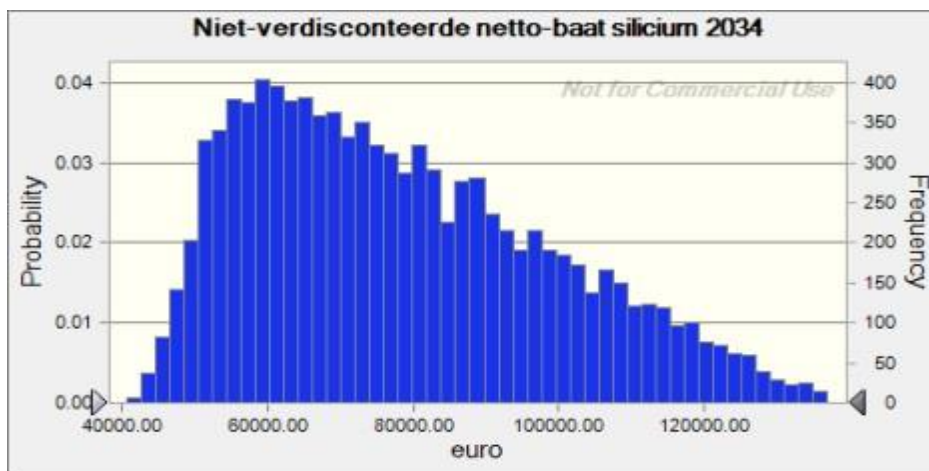
Cell: C25

Summary:

Entire range is from 40650.63 to 150209.71

Base case is 42877.95

After 10,000 trials, the std. error of the mean is 209.11



Statistics:	Forecast values
Trials	10 000
Mean	78396,29
Median	74942,44
Mode	---
Standard Deviation	20910,78
Variance	437260587,75
Skewness	0,5710
Kurtosis	2,55
Coeff. of Variability	0,2667
Minimum	40650,63
Maximum	150209,71
Range Width	109559,08
Mean Std. Error	209,11

**Forecast: Niet-verdisconteerde netto-baat silicium 2034 (cont'd)**

**Cell: C25**

Percentiles:	Forecast values
0%	40650,63
10%	53507,50
20%	58839,83
30%	63811,92
40%	69108,18
50%	74940,96
60%	81376,04
70%	88557,47
80%	97388,08
90%	109010,99
100%	150209,71

**Forecast: Niet-verdisconteerde netto-baat silicium 2035**

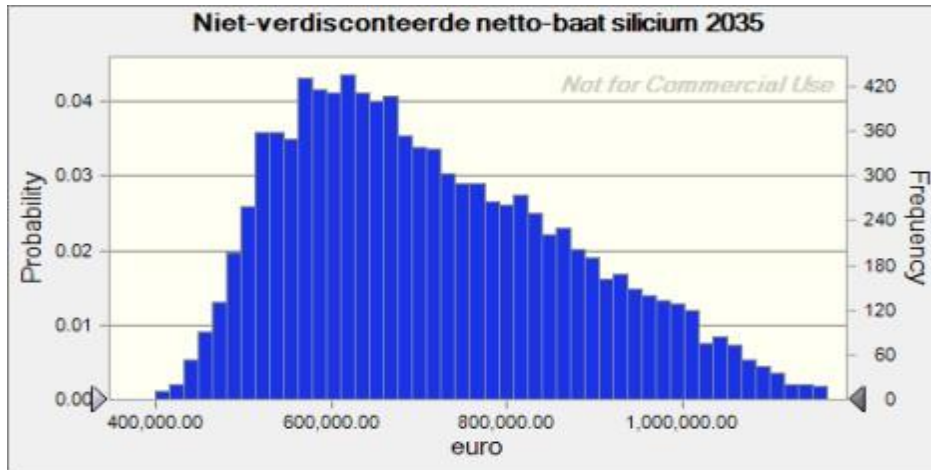
**Cell: D25**

Summary:

Entire range is from 366,963.90 to 1,283,141.51

Base case is 436,021.18

After 10,000 trials, the std. error of the mean is 1,605.78



Statistics:	Forecast values
Trials	10 000
Mean	715 305,17
Median	688 285,79
Mode	---
Standard Deviation	160 577,67
Variance	25 785 188 064,88
Skewness	0,5453
Kurtosis	2,60
Coeff. of Variability	0,2245
Minimum	366 963,90
Maximum	1 283 141,51
Range Width	916 177,61
Mean Std. Error	1 605,78

**Forecast: Niet-verdisconteerde netto-baat silicium 2035 (cont'd)**

**Cell: D25**

Percentiles:	Forecast values
0%	366 963,90
10%	523 732,85
20%	568 985,18
30%	607 136,28
40%	646 793,50
50%	688 284,79
60%	737 399,09
70%	795 611,82
80%	860 559,14
90%	950 136,87
100%	1 283 141,51



**Forecast: Niet-verdisconteerde netto-baat silicium 2036**

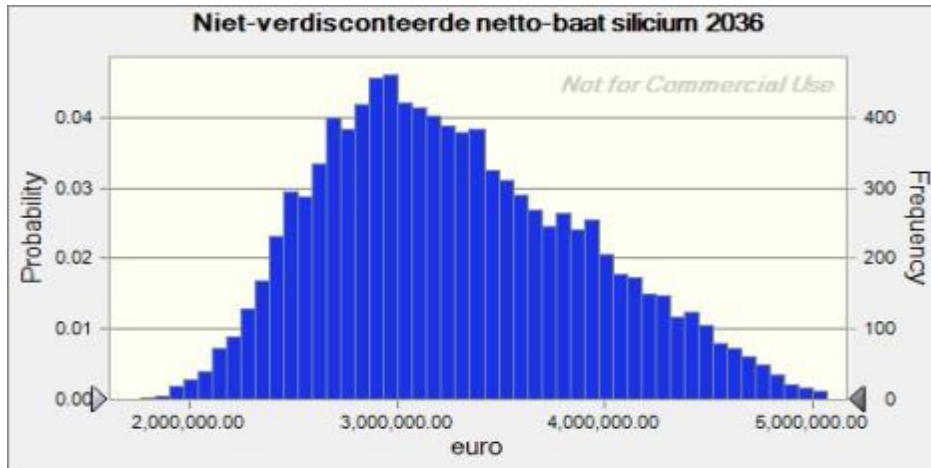
**Cell: E25**

Summary:

Entire range is from 1,693,803.29 to 5,616,309.00

Base case is 2,197,458.66

After 10,000 trials, the std. error of the mean is 6,400.72



Statistics:	Forecast values
Trials	10 000
Mean	3 281 883,86
Median	3 201 868,70
Mode	---
Standard Deviation	640 071,58
Variance	#####
Skewness	0,4525
Kurtosis	2,68
Coeff. of Variability	0,1950
Minimum	1 693 803,29
Maximum	5 616 309,00
Range Width	3 922 505,71
Mean Std. Error	6 400,72

**Forecast: Niet-verdisconteerde netto-baat silicium 2036 (cont'd)**

**Cell: E25**

Percentiles:	Forecast values
0%	1 693 803,29
10%	2 503 621,13
20%	2 712 295,56
30%	2 880 693,66
40%	3 031 400,54
50%	3 201 822,07
60%	3 378 591,52
70%	3 592 632,32
80%	3 856 391,67
90%	4 188 540,64
100%	5 616 309,00

**Forecast: Niet-verdisconteerde netto-baat silicium 2037**

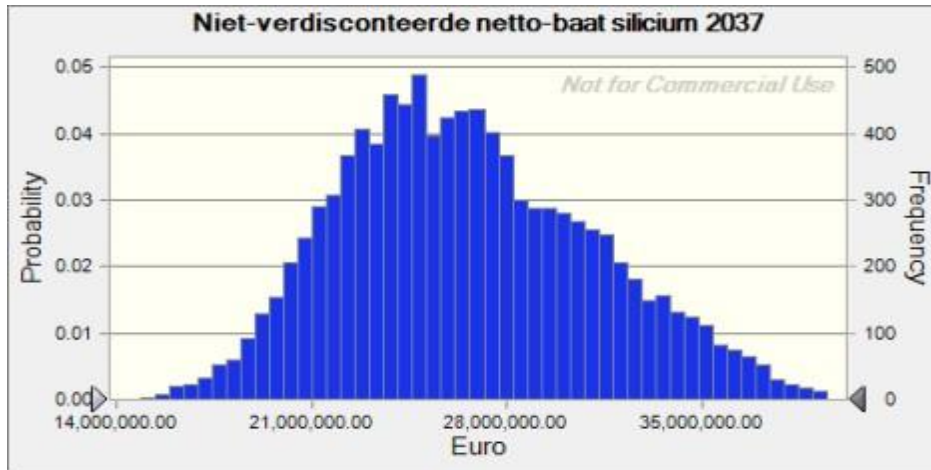
**Cell: F25**

Summary:

Entire range is from 14,361,895.91 to 43,183,757.75

Base case is 19,086,145.36

After 10,000 trials, the std. error of the mean is 46,027.68



Statistics:	Forecast values
Trials	10 000
Mean	26 622 461,13
Median	26 185 092,71
Mode	---
Standard Deviation	4 602 767,70
Variance	#####
Skewness	0,3697
Kurtosis	2,72
Coeff. of Variability	0,1729
Minimum	14 361 895,91
Maximum	43 183 757,75
Range Width	28 821 861,84
Mean Std. Error	46 027,68

**Forecast: Niet-verdisconteerde netto-baat silicium 2037 (cont'd)**

**Cell: F25**

Percentiles:	Forecast values
0%	14 361 895,91
10%	20 994 421,56
20%	22 594 724,76
30%	23 873 447,73
40%	24 952 363,20
50%	26 184 460,89
60%	27 369 572,32
70%	28 846 913,21
80%	30 687 505,40
90%	33 057 561,92
100%	43 183 757,75

**Forecast: Niet-verdisconteerde netto-baat silicium 2038**

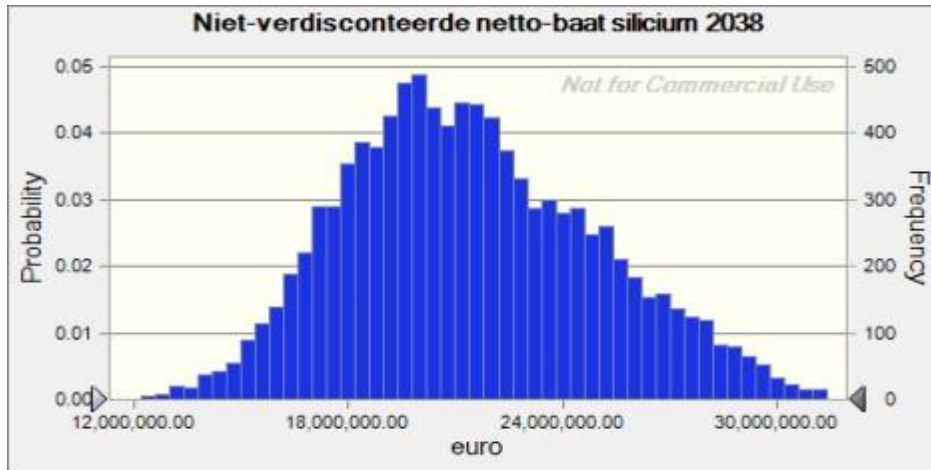
**Cell: G25**

Summary:

Entire range is from 11,816,190.91 to 34,121,043.42

Base case is 15,693,926.50

After 10,000 trials, the std. error of the mean is 35,478.53



Statistics:	Forecast values
Trials	10 000
Mean	21 452 070,81
Median	21 122 227,47
Mode	---
Standard Deviation	3 547 852,64
Variance	#####
Skewness	0,3464
Kurtosis	2,73
Coeff. of Variability	0,1654
Minimum	11 816 190,91
Maximum	34 121 043,42
Range Width	22 304 852,51
Mean Std. Error	35 478,53

**Forecast: Niet-verdisconteerde netto-baat silicium 2038 (cont'd)**

**Cell: G25**

Percentiles:	Forecast values
0%	11 816 190,91
10%	17 112 381,00
20%	18 358 496,69
30%	19 354 333,96
40%	20 199 650,34
50%	21 121 915,22
60%	22 032 830,59
70%	23 166 596,05
80%	24 557 743,39
90%	26 403 262,07
100%	34 121 043,42

**Forecast: Niet-verdisconteerde netto-baat silicium 2039**

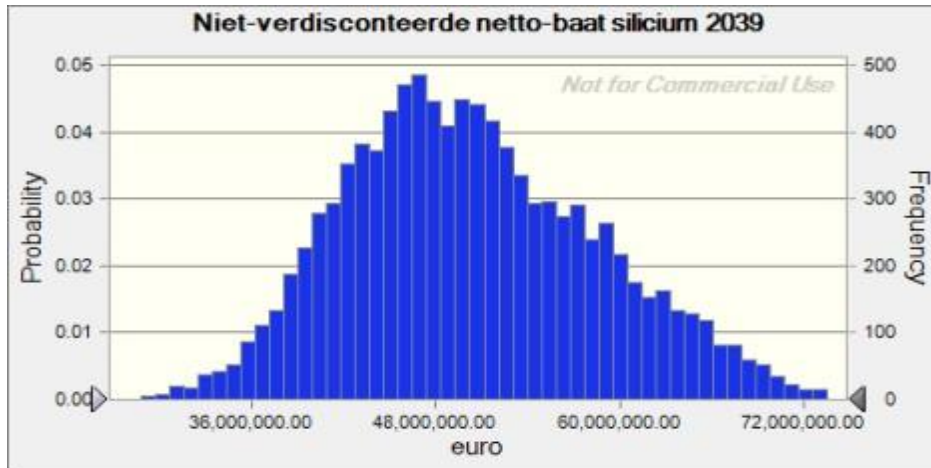
**Cell: H25**

Summary:

Entire range is from 27,907,146.24 to 79,816,206.03

Base case is 36,991,026.52

After 10,000 trials, the std. error of the mean is 82,539.24



Statistics:	Forecast values
Trials	10 000
Mean	50 382 142,99
Median	49 612 468,07
Mode	---
Standard Deviation	8 253 923,72
Variance	#####
Skewness	0,3447
Kurtosis	2,73
Coeff. of Variability	0,1638
Minimum	27 907 146,24
Maximum	79 816 206,03
Range Width	51 909 059,79
Mean Std. Error	82 539,24

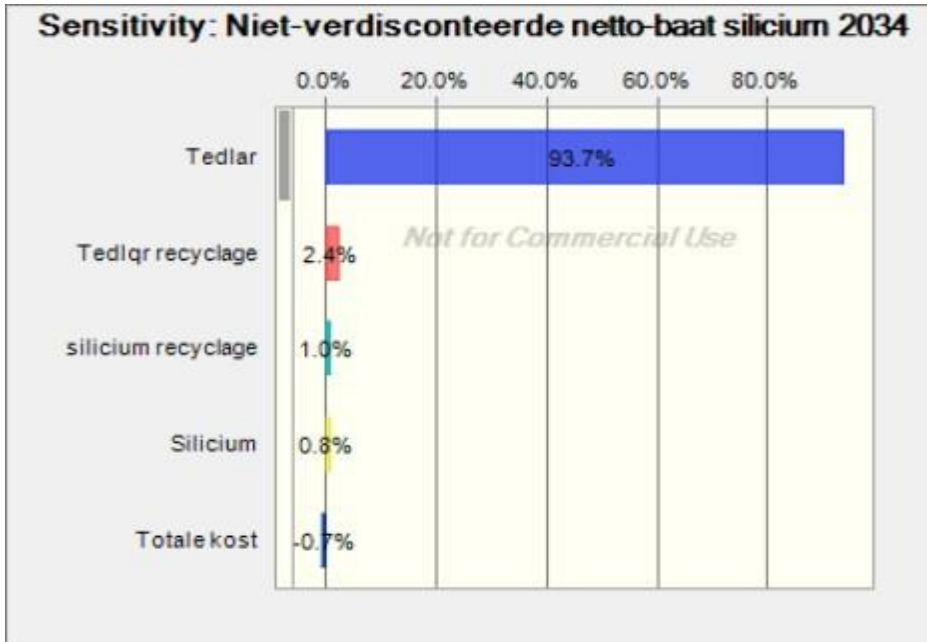
**Forecast: Niet-verdisconteerde netto-baat silicium 2039 (cont'd)**

Cell: H25

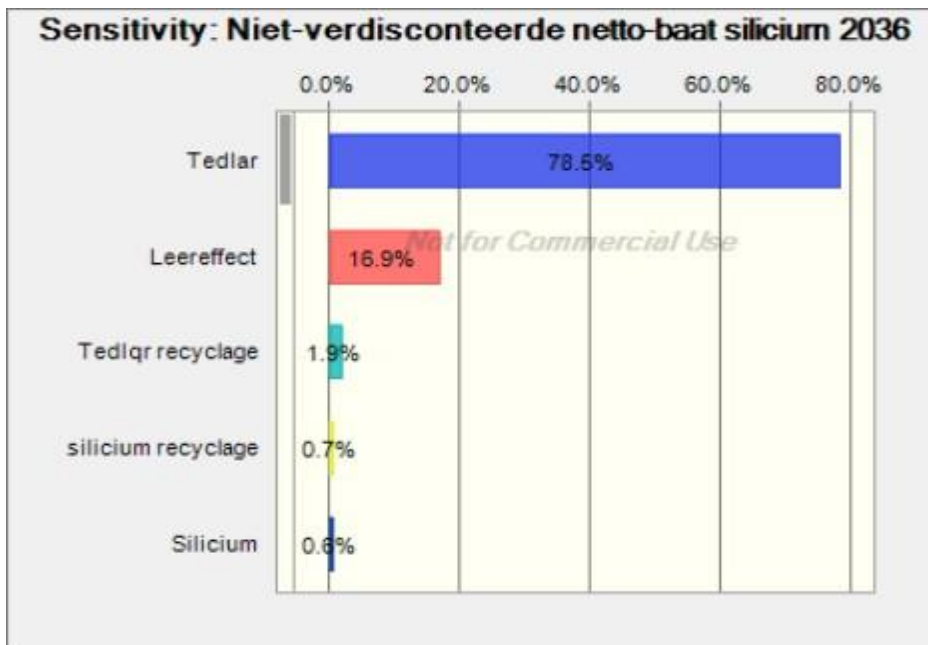
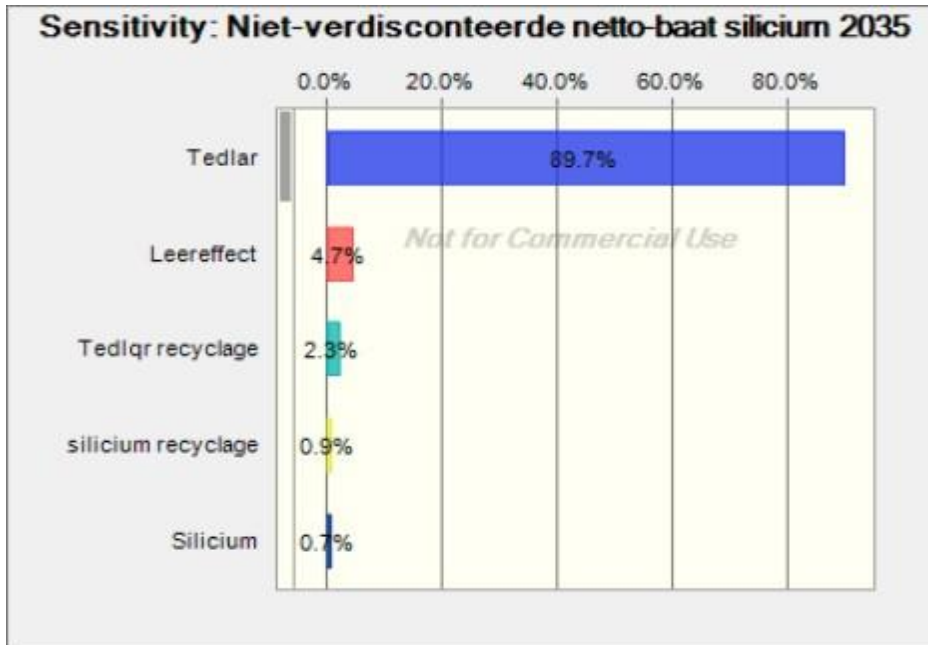
Percentiles:	Forecast values
0%	27 907 146,24
10%	40 295 268,09
20%	43 189 457,00
30%	45 513 858,67
40%	47 462 729,94
50%	49 611 326,63
60%	51 735 301,55
70%	54 384 182,65
80%	57 615 324,09
90%	61 914 683,27
100%	79 816 206,03

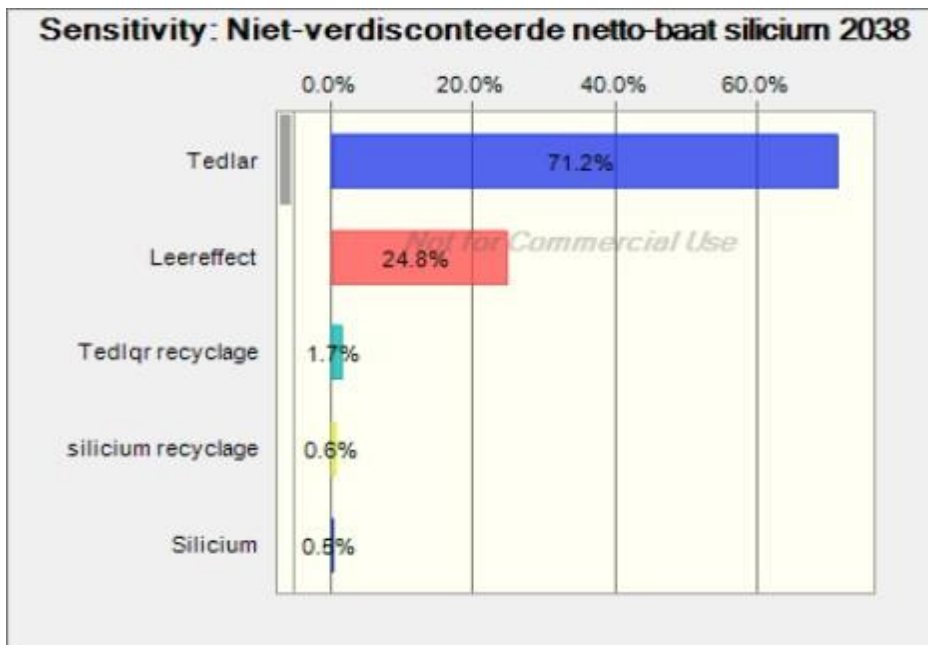
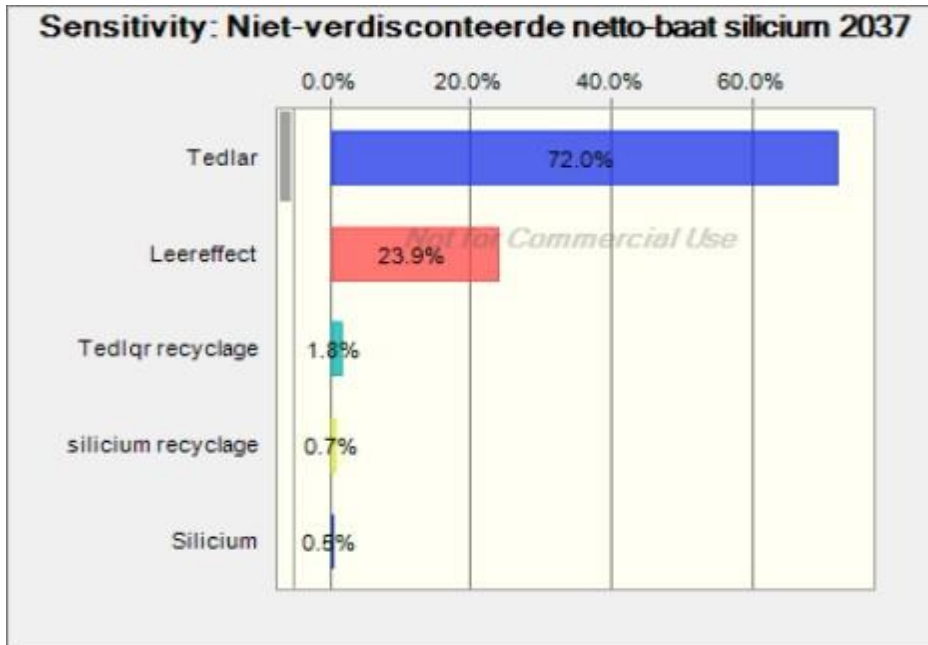
End of Forecasts

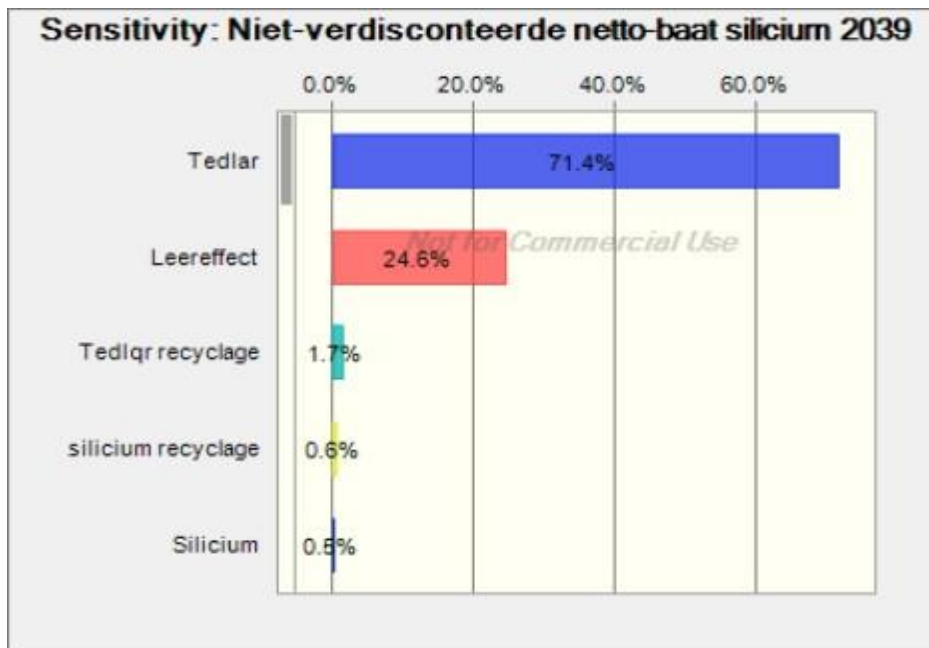
**Sensitivity Charts**











**Bijlage 11: Resultaat dynamische analyse som verdisconteerde baten silicium panelen (2014-2039)**

**Crystal Ball Report - Full**

Simulation started on 2/1/2013 at 0:28:43

Simulation stopped on 2/1/2013 at 0:28:52

Run preferences:

Number of trials run	10 000
Extreme speed	
Latin Hypercube (size)	50000
Random seed	
Precision control on	
Confidence level	95,00% Run

statistics:

Total running time (sec)	7,72
Trials/second (average)	1 295
Random numbers per sec	47 931

Crystal Ball data:

Assumptions	37
Correlations	0
Correlated groups	0
Decision variables	0
Forecasts	1

**Forecasts**

**Worksheet:** [dynamische analyse.xlsx]KBA

**Forecast:** Som verdisconteerde baten 2014-2039

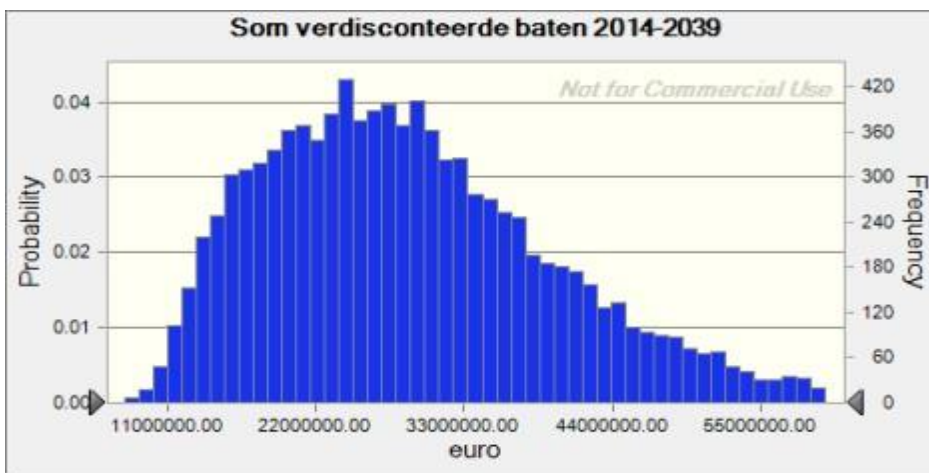
**Cell:** J27

Summary:

Entire range is from 7765677.34 to 75157555.72

Base case is 23671519.34

After 10,000 trials, the std. error of the mean is 109828.21



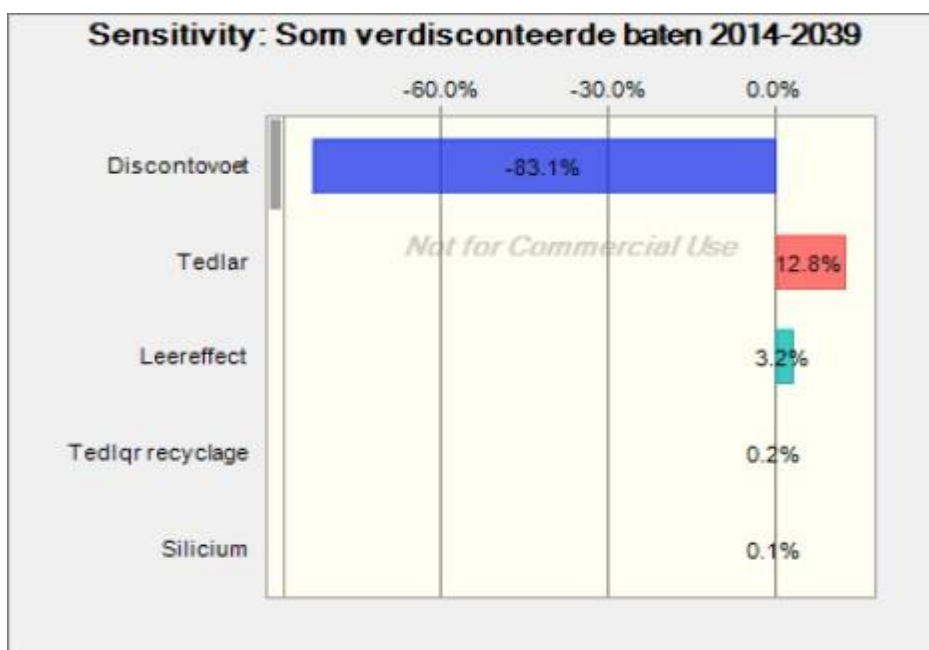
Statistics:	Forecast values
Trials	10 000
Mean	29072762,55
Median	27640943,59
Mode	---
Standard Deviation	10982821,30
Variance	#####
Skewness	0,7222
Kurtosis	3,33
Coeff. of Variability	0,3778
Minimum	7765677,34
Maximum	75157555,72
Range Width	67391878,38
Mean Std. Error	109828,21

**Forecast: Som verdisconteerde baten 2014-2039 (cont'd)**

Cell: J27

Percentiles:	Forecast values
0%	7765677,34
10%	15937666,75
20%	19265340,52
30%	22259055,82
40%	24901401,56
50%	27639053,33
60%	30372695,96
70%	33681756,46
80%	37872754,48
90%	44247541,48
100%	75157555,72

End of Forecasts



End of Sensitivity Charts

**Bijlage 12: resultaat dynamische analyse niet-verdisconteerde baten CIGS panelen (2034-2039)**

**Crystal Ball Report - Full**

Simulation started on 2/1/2013 at 0:38:25  
Simulation stopped on 2/1/2013 at 0:38:35

Run preferences:

Number of trials run	10 000
Extreme speed	
Latin Hypercube (size)	50000
Random seed	
Precision control on	
Confidence level	95,00% Run

statistics:

Total running time (sec)	7,75
Trials/second (average)	1 291
Random numbers per sec	47 752

Crystal Ball data:

Assumptions	37
Correlations	0
Correlated groups	0
Decision variables	0
Forecasts	6

### Forecasts

Worksheet: [dynamische analyse.xlsx]KBA

Forecast: Niet-verdisconteerde netto-baat CIGS 2034

Cell: C52

Summary:

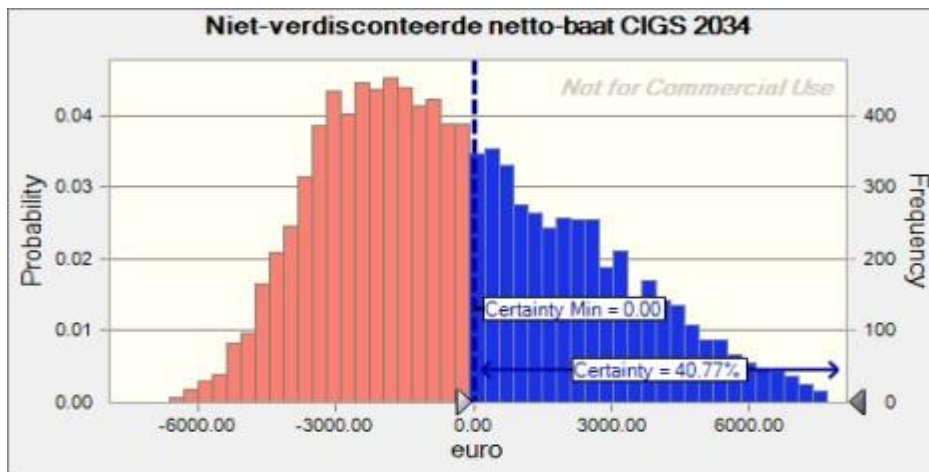
Certainty level is 40.77%

Certainty range is from 0.00 to Infinity

Entire range is from -7575.38 to 10957.45

Base case is -3970.74

After 10,000 trials, the std. error of the mean is 28.76



Statistics:	Forecast values
Trials	10 000
Mean	-324,96
Median	-738,86
Mode	---
Standard Deviation	2875,83
Variance	8270408,40
Skewness	0,5308
Kurtosis	2,78
Coeff. of Variability	-8,85
Minimum	-7575,38
Maximum	10957,45
Range Width	18532,83
Mean Std. Error	28,76



**Forecast: Niet-verdisconteerde netto-baat CIGS 2034 (cont'd)**

**Cell: C52**

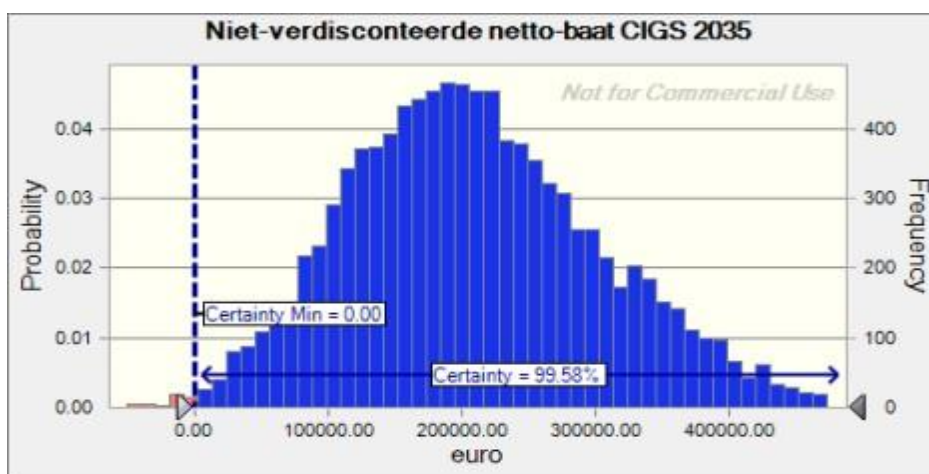
Percentiles:	Forecast values
0%	-7575,38
10%	-3724,45
20%	-2905,04
30%	-2176,82
40%	-1477,81
50%	-739,20
60%	71,62
70%	1025,39
80%	2244,68
90%	3779,88
100%	10957,45

**Forecast: Niet-verdisconteerde netto-baat CIGS 2035**

**Cell: E52**

Summary:

Certainty level is 99.58%  
 Certainty range is from 0.00 to Infinity  
 Entire range is from -51322.81 to 562786.65  
 Base case is 83715.59  
 After 10,000 trials, the std. error of the mean is 944.24



Statistics:	Forecast values
Trials	10 000
Mean	209512,34
Median	201971,00
Mode	---
Standard Deviation	94424,23
Variance	8915934900,45
Skewness	0,3335
Kurtosis	2,85
Coeff. of Variability	0,4507
Minimum	-51322,81
Maximum	562786,65
Range Width	614109,46
Mean Std. Error	944,24

**Forecast: Niet-verdisconteerde netto-baat CIGS 2035 (cont'd)**

**Cell: E52**

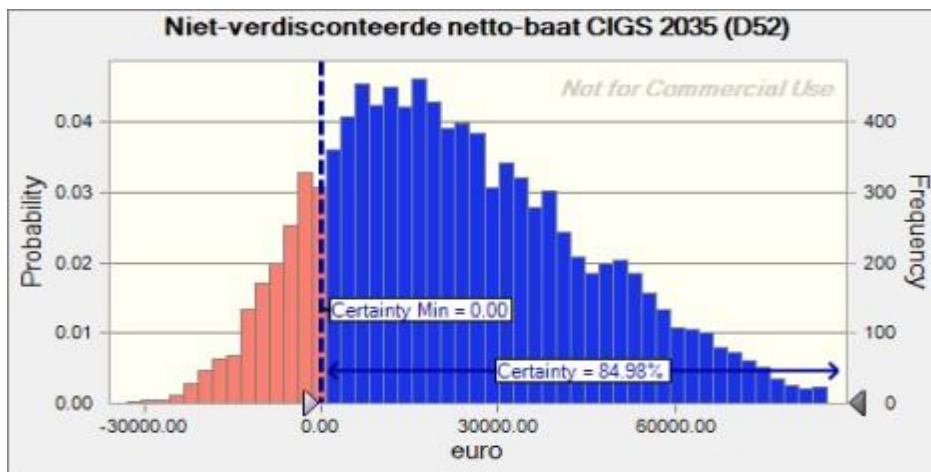
Percentiles:	Forecast values
0%	-51322,81
10%	93466,73
20%	127161,06
30%	154929,99
40%	179734,21
50%	201970,95
60%	225919,60
70%	254145,06
80%	288888,47
90%	339718,60
100%	562786,65

**Forecast: Niet-verdisconteerde netto-baat CIGS 2035 (D52)**

**Cell: D52**

Summary:

Certainty level is 84.98%  
 Certainty range is from 0.00 to Infinity  
 Entire range is from -32956.81 to 109951.38  
 Base case is -7514.79  
 After 10,000 trials, the std. error of the mean is 224.00



Statistics:	Forecast values
Trials	10 000
Mean	23046,97
Median	20159,78
Mode	---
Standard Deviation	22400,28
Variance	501772430,61
Skewness	0,4871
Kurtosis	2,83
Coeff. of Variability	0,9719
Minimum	-32956,81
Maximum	109951,38
Range Width	142908,19
Mean Std. Error	224,00

**Forecast: Niet-verdisconteerde netto-baat CIGS 2035 (D52) (cont'd)**

**Cell: D52**

Percentiles:	Forecast values
0%	-32956,81
10%	-3771,81
20%	3460,68
30%	9121,53
40%	14699,68
50%	20157,88
60%	26188,39
70%	33547,25
80%	42159,05
90%	54639,98
100%	109951,38

**Forecast: Niet-verdisconteerde netto-baat CIGS 2036**

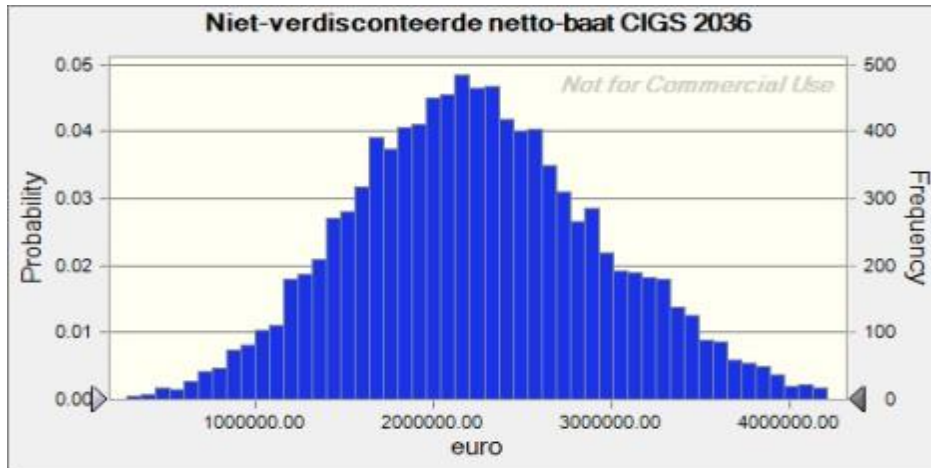
**Cell: F52**

Summary:

Entire range is from 151885.11 to 4749634.02

Base case is 1345386.42

After 10,000 trials, the std. error of the mean is 7011.66



Statistics:	Forecast values
Trials	10 000
Mean	2247197,93
Median	2215311,92
Mode	---
Standard Deviation	701165,57
Variance	491633152142,39
Skewness	0,1997
Kurtosis	2,86
Coeff. of Variability	0,3120
Minimum	151885,11
Maximum	4749634,02
Range Width	4597748,92
Mean Std. Error	7011,66

**Forecast: Niet-verdisconteerde netto-baat CIGS 2036 (cont'd)**

**Cell: F52**

Percentiles:	Forecast values
0%	151885,11
10%	1370917,21
20%	1650099,71
30%	1860852,99
40%	2044856,31
50%	2215165,97
60%	2387955,57
70%	2586504,41
80%	2837513,13
90%	3202175,22
100%	4749634,02

**Forecast: Niet-verdisconteerde netto-baat CIGS 2037**

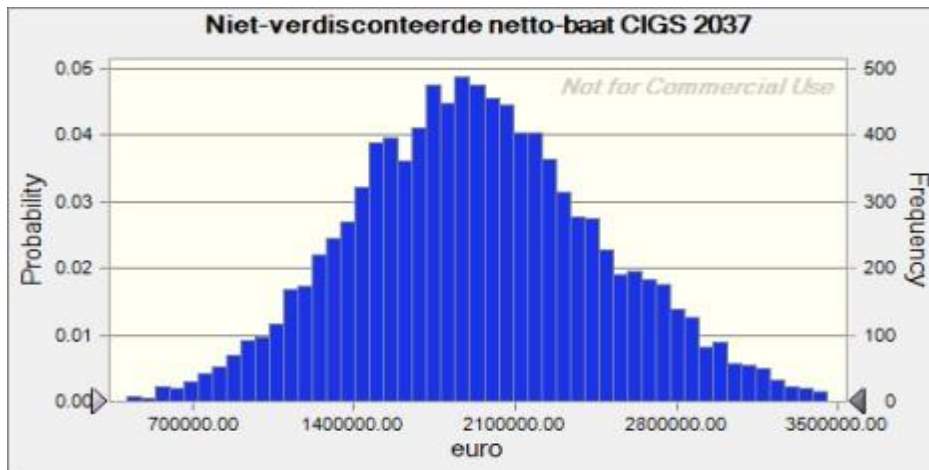
**Cell: G52**

Summary:

Entire range is from 261613.76 to 3841355.69

Base case is 1239672.13

After 10,000 trials, the std. error of the mean is 5429.44



Statistics:	Forecast values
Trials	10 000
Mean	1933489,10
Median	1913366,55
Mode	---
Standard Deviation	542944,25
Variance	294788455404,30
Skewness	0,1583
Kurtosis	2,87
Coeff. of Variability	0,2808
Minimum	261613,76
Maximum	3841355,69
Range Width	3579741,93
Mean Std. Error	5429,44



**Forecast: Niet-verdisconteerde netto-baat CIGS 2037 (cont'd)**

**Cell: G52**

Percentiles:	Forecast values
0%	261613,76
10%	1246675,09
20%	1476314,77
30%	1639452,73
40%	1780727,61
50%	1913035,44
60%	2046582,97
70%	2198191,75
80%	2391324,92
90%	2669585,18
100%	3841355,69

**Forecast: Niet-verdisconteerde netto-baat CIGS 2039**

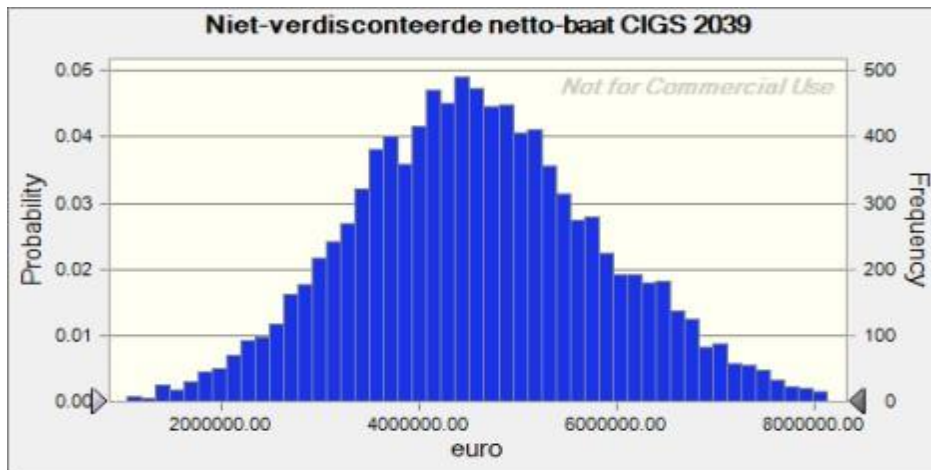
**Cell: H52**

Summary:

Entire range is from 676603.80 to 9014411.57

Base case is 2971209.68

After 10,000 trials, the std. error of the mean is 12627.79



Statistics:	Forecast values
Trials	10 000
Mean	4585801,60
Median	4541605,81
Mode	---
Standard Deviation	1262779,21
Variance	#####
Skewness	0,1534
Kurtosis	2,88
Coeff. of Variability	0,2754
Minimum	676603,80
Maximum	9014411,57
Range Width	8337807,77
Mean Std. Error	12627,79

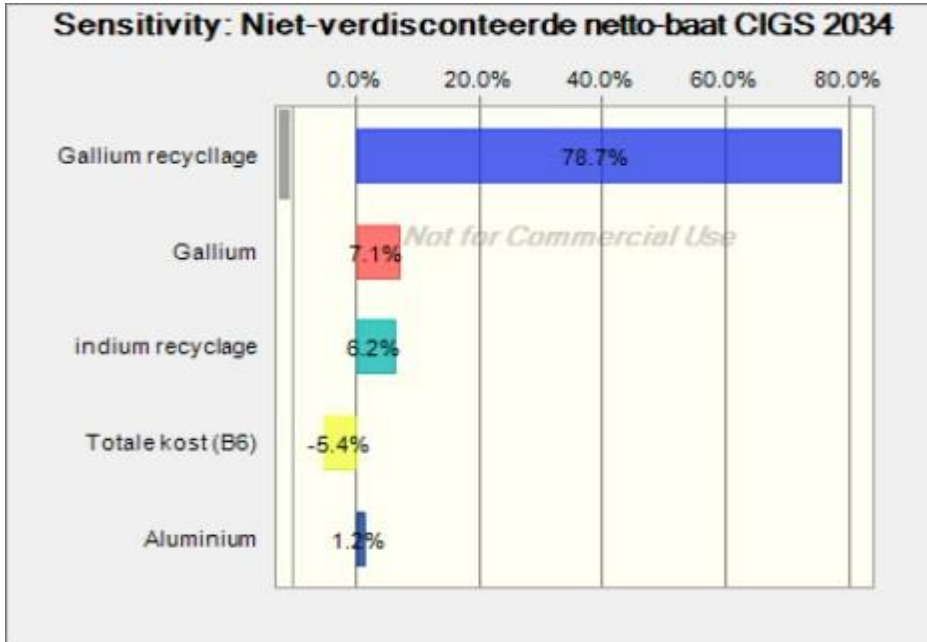
**Forecast: Niet-verdisconteerde netto-baat CIGS 2039 (cont'd)**

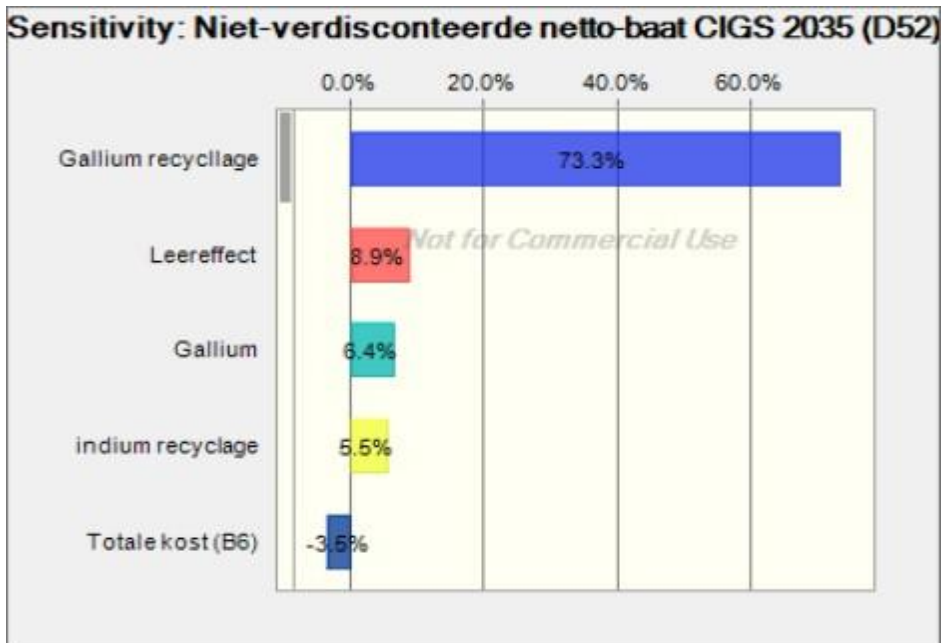
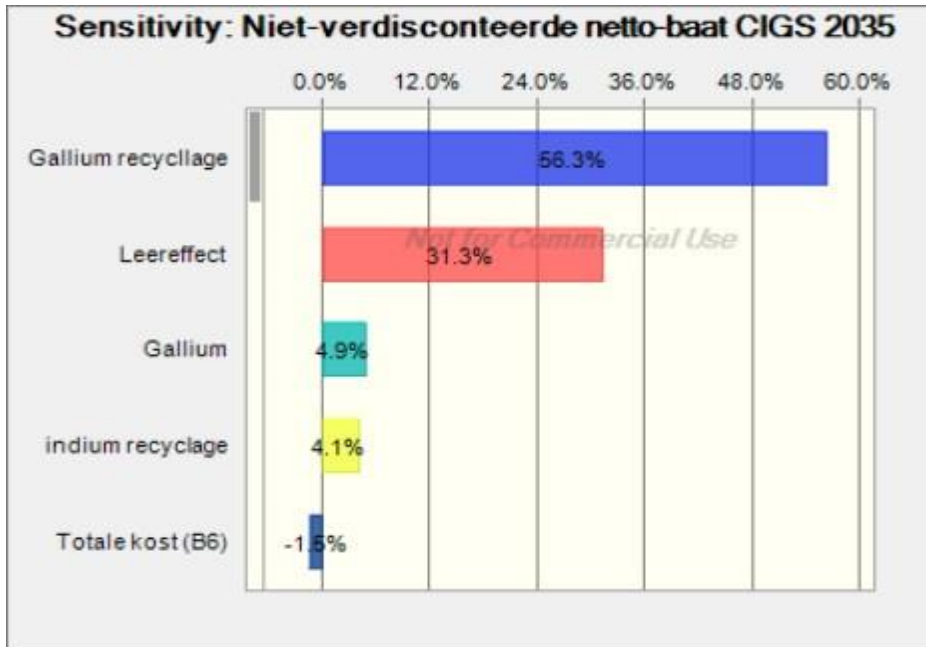
Cell: H52

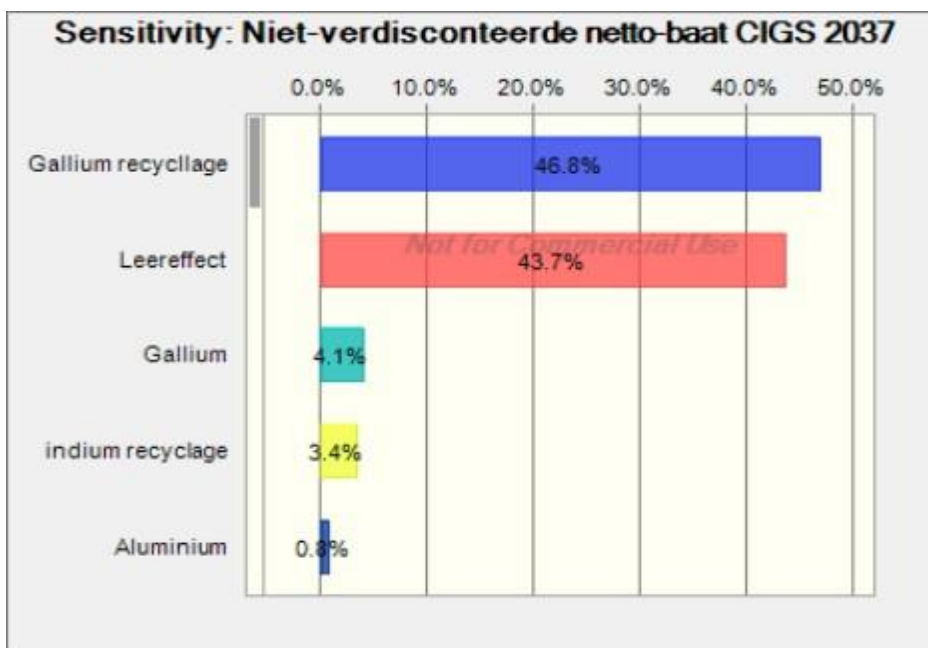
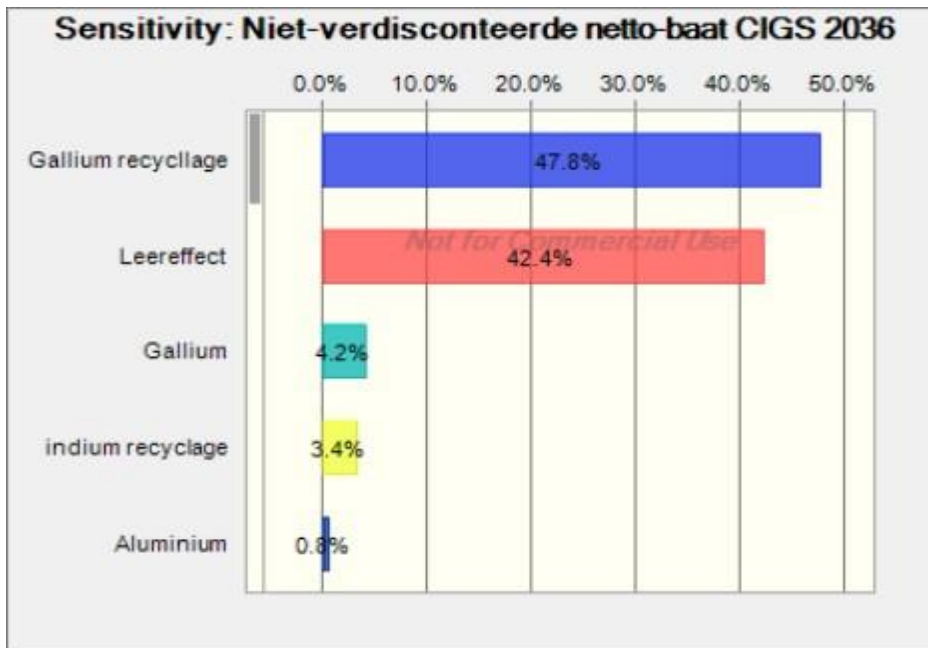
Percentiles:	Forecast values
0%	676603,80
10%	2986769,05
20%	3524973,19
30%	3905426,25
40%	4230908,00
50%	4541367,71
60%	4850108,17
70%	5201275,73
80%	5650700,14
90%	6298100,51
100%	9014411,57

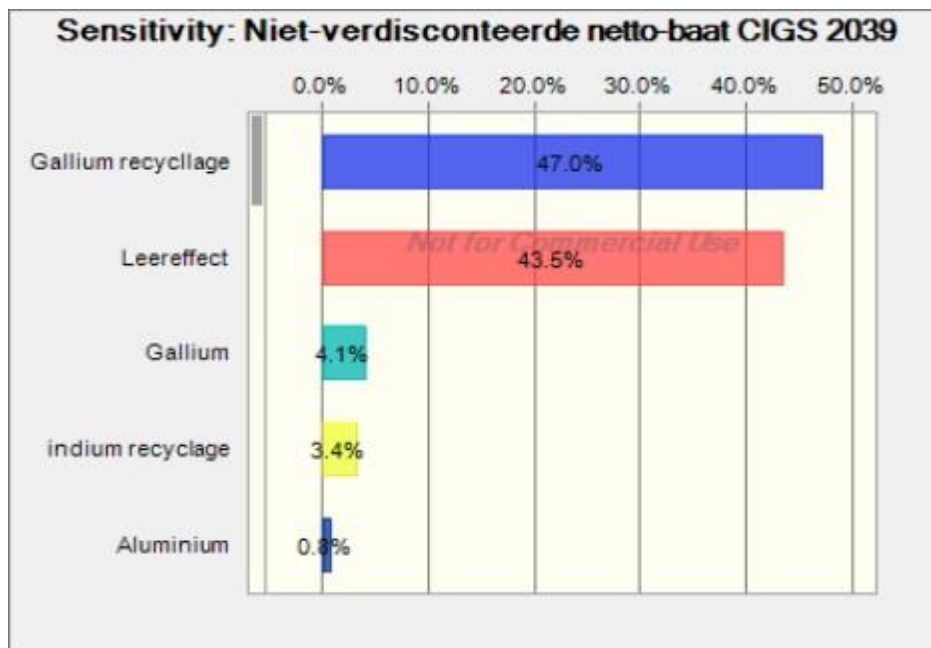
End of Forecasts

**Sensitivity Charts**









**Bijlage 13: resultaat dynamische analyse som verdisconteerde baten CIGS panelen (2014-2039)**

**Crystal Ball Report - Full**

Simulation started on 2/1/2013 at 0:44:01

Simulation stopped on 2/1/2013 at 0:44:10

Run preferences:

Number of trials run	10 000
Extreme speed	
Latin Hypercube (size)	50000
Random seed	
Precision control on Confidence level	95,00% Run

statistics:

Total running time (sec)	7,67
Trials/second (average)	1 304
Random numbers per sec	48 254

Crystal Ball data:

Assumptions	37
Correlations	0
Correlated groups	0
Decision variables	0
Forecasts	1

### Forecasts

Worksheet: [dynamische analyse.xlsx]KBA

Forecast: Som verdisconteerde netto-baat 2014-2039

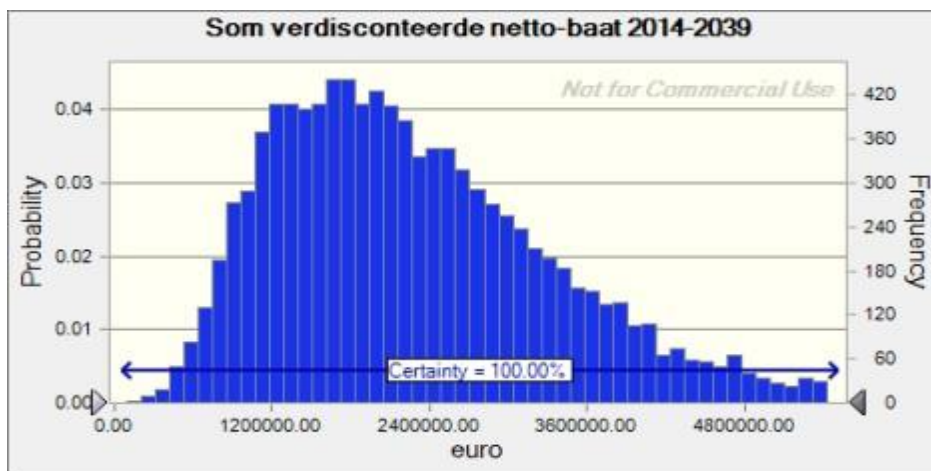
Cell: J54

Summary:

Entire range is from 93590.16 to 8180602.07

Base case is 1583105.94

After 10,000 trials, the std. error of the mean is 11141.62



Statistics:	Forecast values
Trials	10 000
Mean	2308759,39
Median	2120256,65
Mode	---
Standard Deviation	1114162,40
Variance	#####
Skewness	0,9625
Kurtosis	4,23
Coeff. of Variability	0,4826
Minimum	93590,16
Maximum	8180602,07
Range Width	8087011,90
Mean Std. Error	11141,62

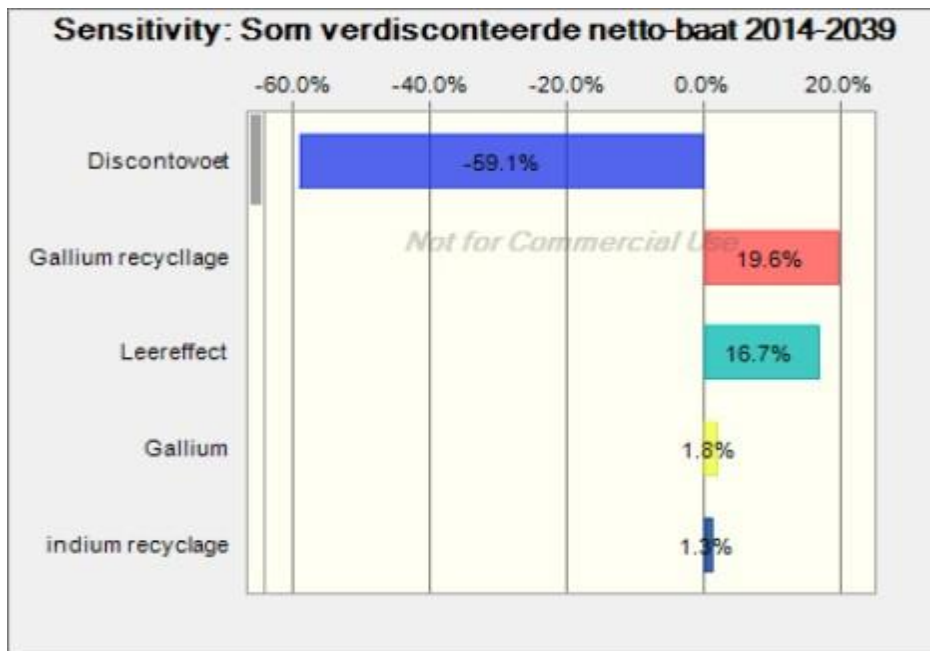


**Forecast: Som verdisconteerde netto-baat 2014-2039 (cont'd)**

**Cell: J54**

Percentiles:	Forecast values
0%	93590,16
10%	1056962,58
20%	1337179,64
30%	1609313,86
40%	1855655,38
50%	2120135,37
60%	2417655,49
70%	2749252,89
80%	3168301,57
90%	3815714,77
100%	8180602,07

End of Forecasts



End of Sensitivity Charts

# Auteursrechtelijke overeenkomst

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:

**Recyclage van zonnepanelen: een kosten-baten analyse**

Richting: **master in de toegepaste economische wetenschappen-beleidsmanagement**

Jaar: **2015**

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze overeenkomst.

Voor akkoord,

**Van den Bussche, Pieter**

Datum: **1/06/2015**