# Duurzaamheid van fotovoltaïsche systemen op basis van geavanceerde silicium technologie

Erik Alsema

# met medewerking van: Mariska de Wild-Scholten (ECN) Edith Molenbroek (Ecofys)

Rapport vervaardigd voor het

#### Utrecht Centrum voor Energieonderzoek (UCE)

in het kader van het project

#### "Duurzaamheid van PV"

gefinancierd door NOVEM onder contractnr. 01460151500025

November 2003

NWS-E-2003-17 ISBN 90-393-3581-8

Universiteit Utrecht Copernicus Instituut Sectie Natuurwetenschap en Samenleving

#### Abstract

In this report an environmental Life Cycle Assessment (LCA) is made of advanced production technologies for crystalline silicium modules in comparison with the existing production technology. Among the investigated technologies are Solsilc solar-grade silicium, Ribbon-Growth-on-Substrate and Edge-defined Film-fed Growth. Also an assessment is made of new solar inverter types and novel roof-integration concepts, like PV-wirefree. Based on these analyses potential improvements in the environmental profile of photovoltaic systems are evaluated. Also energy pay-back times and CO<sub>2</sub> emissions of the considered PV systems are calculated. Finally options for technological improvement are presented.

Keywords: Life Cycle Assessment, photovoltaic systems, crystalline silicon solar cells

#### Verantwoording

Dit rapport is opgesteld in het kader van het projekt "Duurzaamheid van PV". Dit project uitgevoerd door de Universiteit Utrecht, sectie Natuurwetenschap en Samenleving in samenwerking met het Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN) en Ecofys Energieen Milieuprojecten in opdracht van het Utrecht Centrum voor Energieonderzoek (UCE). Het onderzoek werd mogelijk gemaakt door financiële steun van Novem onder contractnr. 01460151500025.

Dit rapport kan worden gedownload van de website van het UCE: <u>http://www.uce-uu.nl</u> of de website van de de sectie NW&S: <u>http://www.chem.uu.nl/nws</u>

# Inhoud:

1	Inleiding	. 5
	1.1 Achtergrond	. 5
	1.2 Onderzoeksvraag	. 6
	1.3 Onderzochte productieprocessen en BOS componenten	. 6
	1.4 Openbaarheid van gegevens en wijze van publicatie resultaten	. 8
2	LCA methode	10
	2.1 Doel en reikwijdte van de analyse	10
	2.2 Functionele eenheid	10
	2.3 Methode voor effectbeoordeling	10
	2.4 LCA database	11
	2.5 Aannames voor het elektriciteitsproductiesysteem	11
3	Inventarisatie van procesdata	12
	3.1 Algemeen	12
	3.2 Silicum feedstock processen	12
	3.2.1 Algemeen	12
	3.2.2 MG-Silicium produktie	12
	3.2.3 Siemens proces	13
	3.2.4 Solsile proces	13
	3.2.5 Solar world / Baver proces.	14
	3.3 Vervaardiging van sheets / wafers	14
	3.3.1 Casting + wafer sawing	14
	3.3.2 RGS	15
	3.3.3 EFG	16
	3.4 Produktie van zonnecelmodules	16
	3.4.1 Cell processing	16
	3.4.2 Module assemblage	16
	3.4.3 Geavanceerde processen voor cel- en moduleproduktie en opschaling naa	ar
	50-100 MWp/vr	17
	3.5 BOS componenten	18
4	Resultaten	19
-	4.1 Modules	19
	4.2 Inverters	27
	4.3 Ondersteuning en bekabeling	31
	4 4 Systemen	35
	4.5 CO <sub>2</sub> emissies en energieterugverdientiid	40
5	Discussie	42
-	5.1 Onzekerheden	42
	5.2 Vergelijking met andere energietechnologieën	43
	5.3 Verbeteropties	44
6	Samenvatting en conclusies	45
0	6.1 Doel en aanpak	45
	6.2 Resultaten moduletechnologie	46
	6.3 Resultaten inverters.	46
	6.4 Resultaten ondersteuning en bekabeling	46
	6.5 Resultaten systemen	47

6.6	6 CO <sub>2</sub> emissie en energieterugverdientijd	
6.7	7 Verbeterpunten	
6.8	8 Eindconclusie	
7	Referenties	

**Appendix 1**: BOS-componenten-analyse ten behoeve van "PV duurzaamheid", Ecofys rapport E21308, Februari 2003

**Appendix 2**: Life Cycle Inventory data: PV-wirefree, Notitie ten behoeve van project "PV duurzaamheid", ECN, Augustus 2003

# 1 Inleiding

#### 1.1 Achtergrond

Een belangrijk kenmerk van PV zonne-energie is dat het in vergelijking tot andere bronnen voor energieproductie een milieuvriendelijke energiebron is. De milieubelasting is echter niet nul. De milieubelasting van PV kan op vele manieren beïnvloed worden, zowel op moduleniveau als op systeemniveau. Op *moduleniveau* kan dit gebeuren bijvoorbeeld door de keuze en hoeveelheid van de gebruikte celmaterialen, keuze van hulpmaterialen, recycling van modules en het maximaliseren van de praktische levensduur van modules. Op *systeemniveau* kan de milieubelasting (gunstig) beïnvloed worden onder andere door een materiaalzuinig ontwerp en de keuze van materialen met een geringe milieubelasting.

Tot nu toe is het minimaliseren van de milieubelasting en veiligheidsrisico's slechts in beperkte mate een leidraad geweest bij het ontwikkelen van (nieuwe) PV-technologie. Overwegingen over milieubelasting spelen in de huidige productieprocessen nog geen grote rol. Men focust (terecht) op lage productiekosten en hoge conversierendementen. De feitelijke belasting van het milieu door de huidige technologie is ook gering vanwege de kleine schaal waarop PV nu wordt toegepast. Omdat milieu een belangrijke motivatie voor het toepassen van PV is, is het echter van groot belang om de milieu-effecten op lange termijn en bij grootschalige inzet van PV systemen te kennen en daarmee nu rekening te houden bij de beleidsmatige keuzes door de overheid en door de industrie voor ontwikkeling en toepassing van PV-technologie.

Een belangrijke overweging bij de analyse van milieu-impacts is dat naar nu verwacht wordt kristallijn silicium de komende 10-20 jaar op grote schaal toegepast zal blijven worden, waar eerder verwacht werd dat de overgang naar dunne-laag modules voor die tijd zou plaatsvinden. Bovendien is er nog geen duidelijke dominante technologie onder de diverse typen dunne-laag modules.

De komende jaren zal de productie van kristallijn-silicium (c-Si) modules naar verwachting een sterke verandering doormaken. Opschaling naar sterk gemechaniseerde productielijnen met een capaciteit van 30-100 MWp, het mogelijk gebruik van solar grade silicium en andere modulematerialen en het mogelijk toepassen van direct casting en ribbon growth bij waferproductie kunnen een groot effect hebben op de milieuparameters op moduleniveau. Daarnaast zullen nieuwe inverter- en integratietechnieken beschikbaar komen die invloed hebben op de milieuaspecten op systeemniveau.

Om deze redenen is met steun van de Novem een studie gestart naar de duurzaamheid van PV systemen op basis van kristallijn silicium technologie, waarbij expliciet vooruit zou worden gekeken naar nieuwe productietechnologieën en systeemcomponenten. Dit onderzoek wordt uitgevoerd met behulp van de methodiek voor milieugerichte Levens Cyclus Analyse (LCA).

Veel van de bestaande LCA studies voor silicium zonnecellen grijpen (deels) nog terug op het werk van Hagedorn in de vroege jaren negentig [Hagedorn and Hellriegel, 1992]. Phylipsen en Alsema hebben in 1995 een studie gepubliceerd waarin ook toekomstige kristalijn silicium technologiën werden onderzocht [Phylipsen and Alsema, 1995], maar ook deze studie is in een aantal opzichten verouderd. Later zijn nog wel bepaalde updates gepubliceerd [Jungbluth and Frischknecht, 2000] maar hieraan lag geen nieuwe dataverzameling aan te grondslag en er werd ook niet vooruit gekeken naar nieuwe productietechnieken.

Omdat veel milieu-effekten gerelateerd zijn aan het energiegebruik tijdens de produktie heeft Alsema in een reeks publicaties de energiebalans en CO<sub>2</sub> emissies van PV systemen nader geanalyseerd [Alsema, 1998, 2000a, Alsema and Nieuwlaar, 2000]. In deze publicaties werd ook een eerste schatting gemaakt van het effect van nieuwe productietechnieken. Ook is de milieu-impact van systeemcomponenten buiten de modules nader onderzocht in een studie naar Solar Home Systemen [Alsema, 2000b] en PV-systemen in dakopstelling [Alsema and Nieuwlaar, 2002].

Er bestaat ook behoefte aan goed gevalideerde LCA data van PV componenten ten behoeve van milieu- en energiebeleid, bijvoorbeeld op het gebied van duurzaam bouwen [Sporenberg *et al.*, 2002]. Tenslotte moeten naast de werkelijke milieu-effecten ook effecten op de beeldvorming zorgvuldig benaderd worden. Zo zijn nog onlangs pessimistisch getinte publicaties verschenen die waren gebaseerd op verouderde basisgegevens [Knapen *et al.*, 2000].

Om deze reden is in het onderhavige project een eerste stap gezet om de LCA van met name de kristallijn silicium PV modules te verbeteren met specialle aandacht voor meer geavanceerde productietechnologieën Daarnaast een aantal nieuwe componenten voor zonnecelsystemen te onderzoeken op hun milieuprofiel.

#### 1.2 Onderzoeksvraag

In de hier gepresenteerde studie zal op basis van een onderbouwde inschatting van de richting waarin kristallijn silicium PV-systemen zich ontwikkelen, een Levenscyclus analyse van deze systemen worden uitgevoerd. Daarbij is het de bedoeling om een range van waarden te bepalen die karakteristiek is voor geavanceerde, grootschalige productie en installatie. Naast de bestaande silicium- en wafertechnologie zal gekeken worden naar productie van solar-grade silicium en ribbon-growth technieken. Ook wordt ingegaan op nieuwe inverter- en dak-integratieconcepten.

Op basis van deze analyses moet duidelijk worden welke verbetering te verwachten is in het milieuprofiel van kristallijn silicium PV systemen en welke knelpunten wellicht nadere aandacht vragen.

# 1.3 Onderzochte productieprocessen en BOS componenten

Na een eerste inventarisatie van relevante technologieën en beschikbare databronnen is een eerste selectie gemaakt van de processen en componenten die we in de studie nader willen onderzoeken. Van al deze processen / componenten verwachten we dat ze de komende 5-10 jaar een significante rol kunnen spelen.

Het betreft de volgende productieprocessen:

- bestaande proces voor electronic-grade silicium (Siemens-proces)
- proces voor productie solar-grade silicium op basis van carbothermische reductie van silica ("SolSilc")

- proces voor productie van solar-grade silicium op basis van silaan ("Bayerprocédé")
- bestaande technologie voor casting van multikristallijn silicium ingots en voor het zagen van wafers;
- Ribbon-Growth-on-Substrate (RGS) techniek voor vervaardiging van wafers;
- Edge-defined Film-fed Growth (EFG) techniek voor vervaardiging van wafers;
- bestaande proces voor vervaardiging van cellen en modules;
- bovenstaand proces na opschaling naar 30-100 MWp productiecapaciteit

Daarnaast worden de volgende BOS componenten geanalyseerd:

- a) het BOAL profielen systeem zoals toegepast in Nieuwland (Amersfoort)
- b) het TNO/Axys systeem van dakintegratie zoals dat wordt uitgevoerd bij de Stad van de Zon (Heerhugowaard)
- c) het PV-Wirefree concept dat wordt ontwikkeld door OKE-Services met een aantal partners.

Drie inverters waaronder twee types van 300 W die recent op de markt zijn geïntroduceerd:

- d) Mastervolt Sunmaster 2500 inverter (2500 W)
- e) Philips PSI 300 (300 W)
- f) NKF OK5 (300 W)

De combinatie a) en d) vertegenwoordigd gevestigde BOS-technologie en werd eerder geanalyseerd in een andere LCA studie [Alsema and Nieuwlaar, 2002]; de andere inverter/support-combinaties zijn representatief voor meer moderne BOS-technologie.

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de geselecteerde processen /componenten, hun huidige technologische status en de databronnen waarover we in deze studie konden beschikken.

Processtap	Procesnaam /	Huidige technol.	Bronnen voor
	component	status	data
	Siemens	commercieel	Literatuur + data
Si feedstock			fabrikant
	Solsilc	Pilot-schaal	Lit. + ECN intern
	Bayer	Lab-schaal	Lit.
	Casting/sawing	commercieel	Lit
Wafer prod.	RGS	Lab-schaal	Lit. + ECN intern
	EFG	commercieel	Lit.
	Screen printing	Commercieel	Lit. + data
Cel / module	Glas/Tedlar laminatie		bestaande fabriek +
productie			ECN intern
-	Idem opgeschaald 30-	tekentafel	Eigen schattingen
	100 MWp/jr		UU/ECN
	Sunmaster 2500	Commercieel	schatting Ecofys
	PSI 300 inverter	Commercieel	Data fabrikant

	OK5 inverter	Commercieel	Data fabrikant
	BOAL profielen	commercieel	schatting Ecofys
	TNO / Axys	commercieel	Data fabrikant +
Samenstelling BOS	ondersteunings-systeem		schatting Ecofys
	Bekabeling bij	commercieel	schatting Ecofys
	TNO/Axys en 300 W		
	inverter		
	PV wirefree	demo	Data fabrikant +
			schatting ECN/UU

Tabel 1: Overzicht van de geanalyseerde processen en systeemcomponenten

#### 1.4 Openbaarheid van gegevens en wijze van publicatie resultaten

Zoals in de tabel boven is te zien hebben we in een gevallen gebruik kunnen maken van interne gegevens van ECN of van een fabrikant. Voor een aantal processen zijn deze data alleen beschikbaar gesteld onder voorwaarde van vertrouwelijkheid. Ook mochten op basis van te publiceren resultaten geen procesgegevens herleid kunnen worden. Overigens gelden deze voorwaarden niet voor de BOS componenten.

De voorwaarde van vertrouwelijkheid legt niet alleen beperkingen op aan de presentatie van deze data zelf maar ook aan de weergave van de uiteindelijke resultaten. We hebben in overleg met de betrokkenen ervoor gekozen om een *drietal procesroutes* op te stellen voor PV modules waarvoor vervolgens *alleen geaggregeerde resultaten* worden gepubliceerd.

De gekozen procesroutes zijn:

- 1) Standaard jaar 2000, dit omvat:
  - Siemens Si feedstock
  - Standaard casting + wafer sawing
  - Standaard cell processing en laminatie
- 2) Geavanceerd I, dit omvat:
  - Solsilc solar-grade silicium
  - RGS wafers
  - Opgeschaalde cell processing en laminatie
- 3) Geavanceerd II, dit omvat:
  - Bayer solar-grade silicium
  - EFG wafers
  - Opgeschaalde cell processing en laminatie

Daarnaast bekijken we vier systeemconcepten voor de BOS, nl:

Systeem A: ondersteuning met BOAL profielen en Mastervolt Sunmaster 2500 Systeem B: TNO Axys ondersteuning met Philips inverter Systeem C: TNO Axys ondersteuning met NKF inverter (buiten geplaatst) Systeem D: PV wirefree systeem

# 2 LCA methode

### 2.1 Doel en reikwijdte van de analyse

Het doel van de voorliggende studie is – zoals eerder gezegd – het bepalen van het milieu-profiel van een zonnecelsysteem op basis van silicium modules bij gebruikmaking van geavanceerde productietechnologie en moderne BOS componenten, in vergelijking met de bestaande productie- en BOS-technologieën.

Met deze vergelijking willen we nagaan welke verbetering in de komende jaren verwacht mag worden met betrekking tot kristallijn silicium PV systemen en waar mogelijk nog knelpunten blijven bestaan die nadere aandacht verdienen.

Wat betreft de reikwijdte van de studie nemen we alle produktieprocessen voor vervaardiging van het PV systeem zo veel mogelijk in beschouwing, alsmede de energieproduktie tijdens de gebruiksfase. Voor de afvalfase beschouwing we alleen bestaande hergebruiktechnieken voor BOS componenten en stort van PV modules. Met betrekking tot recycling van PV modules is nog te weinig kennis over processen.

### 2.2 Functionele eenheid

In een eerdere studie is uitgebreid ingegaan op de mogelijk keuzes voor een functionele eenheid (= basis voor vergelijking van milieu-effecten) voor PV systemen [Alsema and Nieuwlaar, 2002], en de verschillen die dit oplevert. Hier zullen we ons beperken tot de functionele eenheid van één kWp opgesteld vermogen. Daarnaast zullen we resultaten geven voor 1 kWh opgewekte elektriciteit. Dit laatste maakt de vergelijking met andere energie-opwekkingstechnologieën mogelijk.

# 2.3 Methode voor effectbeoordeling

Voor de beoordeling van de milieu-ingrepen (impact assessment) volgen we de meest recente methode van het Centrum voor Milieukunde Leiden, de CML baseline 2000 [Guinée *et al.*, 2001]. Als normalisatie-dataset is gekozen voor W-Europa 1995, zodat alle impacts worden gerelateerd aan de impact van de jaarlijkse emissies die in dit gebied optraden.

Omdat energie een speciaal aandachtspunt is binnen deze studie hebben we de assessment methode uitgebreid met één extra impact categorie, namelijk het gebruik van fossiele energiebronnen (en uranium)<sup>1</sup>. Tevens is de uitputting van fossiele brandstoffen en uranium verwijderd uit de impact categorie "Abiotic Resource Depletion" zodat deze alleen nog de uitputting van minerale bronnen (bijv. zilver) weergeeft.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Als normalisatie factor is het primair energiegebruik van W-Europa exclusief het gebruik van hydroelektriciteit genomen (54 EJ).

### 2.4 LCA database

Als achterliggende database voor LCA gegevens van diverse niet-PV materialen is gebruik gemaakt van de IVAM database versie 4.0.

#### 2.5 Aannames voor het elektriciteitsproductiesysteem

Het is bekend dat bij zonnecellen het verbruik van elektrische energie verantwoordelijke is voor een zeer belangrijk deel van milieu-effecten. Daarom is het van belang welk aanname gemaakt wordt voor het elektriciteitsproductiesysteem.

Met betrekking tot de elektriciteitvoorziening hebben we de produktie van modules opgesplitst in twee delen:

- 1. van kwartszand tot poly-silicium (EG of SoG)
- 2. van poly-Si tot module

Voor beide delen kan afzonderlijk gekozen worden welke mix van elektriciteitsproduktieeenheden de benodigde stroom levert. Voor de eerste produktiestap kiezen we hetzij de mix van de gemiddelde Europese elektriciteitsproduktie ("UCPTE high voltage"), hetzij een voorziening volledig gebaseerd op hydropower. Dit laatste gaat uit van de veronderstelling dat de silicium feedstock produktie bij voorkeur plaatsvindt op een lokatie met lage stroomprijzen, d.w.z. met stroom uit hydropower.

Voor de vervaardiging van wafers en modules kiezen we vast voor de optie "UCPTE medium voltage", vanuit de redenering dat deze produktie op een willekeurige plek in Europa kan plaatsvinden.

De LCI data voor stroomvoorziening zijn gebaseerd op de dataset van de ETHZ [Suter and Frischknecht, 1996]<sup>2</sup>.

We hebben hier expliciet niet gekozen voor een Nederlandse stroomvoorziening omdat merendeel van de produktiefacilteiten toch waarschijnlijk in het buitenland zal staan<sup>3</sup>. Om deze reden kunnen de impacts en met name de broeikasgas-emissies verschillen van eerdere studies waarin wel een Nederlandse elektriciteitsvoorziening werd gehanteerd (bijv. [Alsema and Nieuwlaar, 2002]).

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Deze data zijn weliswaar enigzins verouderd (status ca. 1995) maar een meer recente dataset is nog niet beschikbaar (komt najaar 2003).

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Voor sommige hulpmaterialen wordt wel gebruik gemaakt van Nederlandse stroomvoorziening omdat dit zo in de standaard LCA database is opgenomen. Dit is echter een beperkt deel van de totale stroomlevering.

# 3 Inventarisatie van procesdata

## 3.1 Algemeen

In dit hoofdstuk zullen we een nadere beschrijving geven van "Life Cycle Inventory data", dat wil zeggen data over de materiaal-inputs, het energiegebruik en de emissies tijdens de levenscyclus van het fotovoltaïsche systeem. Omdat we met betrekking tot de processen voor moduleproductie veel gebruik maken van vertrouwelijke informatie kunnen we in deze gevallen geen details vermelden over de gebruikte data. Ook zullen we in deze gevallen niet aangeven om welke producent het gaat.

# 3.2 Silicum feedstock processen

#### 3.2.1 Algemeen

De gevestigde technologie voor zuivering van silicium tot halfgeleiderkwaliteit omvat twee stappen:

- 1. de reductie van silica tot metallurgical-grade silicium in een elektrische boogoven,
- 2. de omzetting van mg-Si tot trichloorsilaan, de destillatie hiervan en tot slot depositie van electronic grade silicium op verhitte staven.

De laatste stap staat bekend als het "Siemens-proces". Het op deze wijze geproduceerde silicium wordt voornamelijk geproduceerd voor de halfgeleider-industrie. In de praktijk gebruikt de PV-industrie vrijwel altijd een bepaalde vorm van door IC-industrie afgekeurd materiaal.

Alternatieve routes die specifiek bedoeld zijn voor produktie van "solar-grade"silicium zijn al sinds de jaren zeventig onderwerp van studie. Omdat de bestaande bron van silicium feedstock een beperkte omvang heeft, is de belangstelling voor solar-grade materialen weer opgeleefd. Twee procesroutes zullen hier beschouwd worden:

- 1. het Solsile proces dat ontwikkeld wordt door Sintef tezamen met ECN en dat is gebaseerd op carbothermische reductie van silica;
- 2. de technologie die door Bayer werd ontwikkeld en momenteel in handen is van Deutsche Solar en die gebaseerd is op productie van silaan dat wordt ontleed in een Fluidized Bed Reactor.

# 3.2.2 MG-Silicium produktie

Metallurgical-grade silicium wordt gebruikt als uitgangsmateriaal om electronic-grade silicium te maken met behulp van het Siemens procédé. Kwarts zand (SiO<sub>2</sub>) wordt in aanwezigheid van koolstofbronnen (hout, kolen) gereduceerd tot silicium in een elektrische boogoven. Het energieverbruik van dit proces ligt rond 12 kWh<sub>el</sub>/kg.

#### 3.2.3 Siemens proces

Het Siemens proces is het meest toegepaste proces om electronic-grade silicium te maken. Het start met de vervaardiging van trichloorsilaan (TCS) uit mg-Si onder toevoeging van HCl en H<sub>2</sub>. Na destillatie van het TCS wordt dit ontleedt in een "bell jar reactor", waarbij het Electronic Grade-silicium in polykristallijne vorm neerslaat op elektrisch verhitte staven. Met name de laatste stap vergt vrij veel energie. Het EG-Si wordt voornamelijk verkocht aan de elektronica industrie, en zo'n 10-15% wordt als "off-spec"materiaal verkocht aan de PV industrie<sup>4</sup>. De laatste jaren is het siliciumverbruik van de PV-industrie gegroeid naar zo'n 25% van de wereldproduktie. Tot voor tien jaar lag de prijs voor off-spec Si op ca. 10 \$/kg, wat minder is dan de produktiekosten van 30-45 \$/kg<sup>5</sup>[LIFE, 2002, Woditsch and Koch, 2002].

Over het energieverbruik van dit proces bestaat nog vrij veel onzekerheid, door vertrouwelijkheid en door de verwevenheid met andere processen. Williams [Williams *et al.*, 2002] schat het totale verbruik op 300 kWh<sub>el</sub>/kg maar zijn primaire bronnen zijn betrekkelijk oud [Rogers, 1990]. Andere bronnen noemen waarden van 120-210 kWh<sub>el</sub>/kg [Kato *et al.*, 1998, Nijs *et al.*, 1997]. Gezien de lagere economische waarde van het off-spec materiaal lijkt het reëel om slechts een kwart van de totale energieconsumptie (en andere milieu-ingrepen) te alloceren aan het pv-silicium. In lijn met onze eerdere schattingen [Alsema, 2000a] zullen we daarom een energieverbruik van 300  $MJ_{el}$  (=83 kWh<sub>el</sub>) per kg Si aanhouden voor het Siemens procédé.

## 3.2.4 Solsilc proces

This process is developed by SINTEF, SCANARC and ECN [Geerligs et al., 2002]. To reach the quality level for solar grade silicon *high purity* raw materials are used. The main raw materials are quartz and carbon black.

The used quartz is cleaned before use. The cleaning process consists of crushing, milling, high intensity magnetic separation, drying and screening of product.

The carbon black is produced from natural gas, which will lead to a depletion of resources.

The quartz is pelletised with carbon and sugar. Sugar is used as binder and increases the surface area, thereby the reactivity and thereby the yield.

The process consists of two main steps.

In the first step quartz is reacted with carbon to form silicon carbide:

 $SiO_2 + 3C = SiC + 2CO$ ).

In the second step the silicon carbide is used to produce silicon in a reaction with a second load of quartz

2SiC + SiO<sub>2</sub> = 3Si + 2CO

The overall reaction is

 $\mathrm{SiO}_2 + 2\mathrm{C} = \mathrm{Si} + 2\mathrm{CO}.$ 

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Door de teruggang in de electronica industrie en de sterke vraag uit de PV industrie wordt de laatste tijd ook een deel van het normale EG-silicium tegen gereduceerde prijzen geleverd aan de PV industrie

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> De laatste tien jaar is prijs voor solar silicon sterk gestegen door de toegenomen vraag.

Purification of the silicon is currently being investigated in the SPURT project (1-1-2002 / 31-12-2003).

The main emission from the reduction process is carbonmonoxide and siliconmonoxide. It is most likely that these emissions are treated through after burning resulting in carbonand silicondioxide. The silicondioxide is filtered from the gas stream with a baghouse filter and is sold for example as harmless filler. Carbondioxide emissions increase the greenhouse effect.

#### 3.2.5 Solar world / Bayer proces

Dit proces is aanvankelijk door Bayer ontwikkeld waarna de technologie is overgenomen door Deutsche Solar / Solar World. Het start met de productie van trichlorosilaan (TCS) op de gebruikelijke wijze uit mg-Si met toevoeging van H<sub>2</sub> en HCl. Deze stappen zijn nog gelijk aan het conventionele proces voor EG-Si productie.

Na destillatie van het TCS wordt silaan gevormd door middel van redistributie:  $3SiHCl_3 \xrightarrow{cat} > SiH_4 + 3 SiCl_4$ 

Vervolgens wordt het silaan ontleed tot polykristallijn solar-grade (SoG) silicium in een Fluidized Bed Reactor [LIFE, 2002, Woditsch and Koch, 2002]. In een Fluidized Bed Rector (FBR) vindt depositie plaats op het oppervlak van kleine Si-deeltjes die in een gasstroom zweven bestaande uit waterstof en silaan. Het grote aantal deeltjes die in het "bed" zweven bieden een uitzonderlijk groot oppervlak zodat de throughput van een FBR ongeveer 30 keer hoger is dan bij een Siemens-reactor van dezelfde diameter. Het specifieke energiegebruik is tenminste een factor 5 lager dan voor de Siemens reactor [LIFE, 2002].

Williams schat het energieverbuik voor de TCS produktie op 50 kWh<sub>el</sub>/kg [Williams *et al.*, 2002], terwijl het energieverbruik voor de silaandecomposite in een FBR op 5-8 kWh<sub>el</sub>/kg zou liggen [Ibrahim and Johnston, 1995].

Het energiegebruik van het totale proces is geschat op 43 kWh elektrisch per kg silicium en aanvullend is 20 kWh/kg aan energie uit stoom nodig [Pehnt, 2003]. Dit lijkt redelijk in lijn met de bovenstaande data van Williams en Ibrahim. We zullen daarom de waarde van 43 kWh<sub>el</sub>+ 20 kWh<sub>th</sub> per kg aanhouden.

#### 3.3 Vervaardiging van sheets / wafers

We bekijken drie processen om uit polykristallijn EG- of SoG-silicium dunne wafers te maken. Als wafer dimensies houden we  $12.5 \times 12.5 \text{ cm}^2$  aan en een dikte van  $300 \ \mu\text{m}$ .

#### 3.3.1 Casting + wafer sawing

Electronic-grade silicon forms the input for the casting process which is used to prepare large blocks of multicrystalline material, or *ingots*. In this process 150 kg of silicon feedstock is loaded in a quartz container, which is heated until the silicon has molten and

subsequently left to cool down slowly. The silicon in the crucible then solidifies in multicrystalline form. Typical ingot dimensions are  $55 \times 55 \text{ cm}^2$  and 22 cm height. The outer edges of the ingot are then cut off and discarded because the material has insufficient quality. The remaining ingot is sawed into rectangular bricks with a 12.5 x 12.5 cm<sup>2</sup> cross section. The overall material yield of this process is currently about 65% [Nijs *et al.*, 1997].

The inventory data were derived from the ETHZ study[Suter and Frischknecht, 1996], except for the energy input. For a modern casting unit an energy consumption of 12 kWh/kg is specified [Schmela, 2001]. However the overhead energy consumption for maintaining a clean environment is usually fairly high. Also the block sawing process will require some energy. In line with our previous estimate we will therefore assume an electricity consumption of 120 MJ/ kg (=33 kWh/kg) [Alsema *et al.*, 1998], for the casting and block sawing processes and including overheads<sup>6</sup>.

The rectangular bricks are subsequently sawn into thin wafers of 300  $\mu$ m. In this process another 40% of the silicon is lost as kerf loss [Nijs *et al.*, 1997]. Note that the output of this process is expressed in m<sup>2</sup> of wafer area. To obtain 1 m<sup>2</sup> of wafer area at 300  $\mu$ m thickness an input of 1.17 kg of silicon ingot is needed. Other inventory data were taken from the ETHZ study, except for the energy consumption. The energy consumption of modern wire saws is 60-120 kWh/h [Schmela, 2002b], assuming a yield of 6 m<sup>2</sup> wafer hour, we arrive at a process energy consumption of 10-20 kWh/m<sup>2</sup>. This is in line with Nijs' estimate of 12.5 kWh/m<sup>2</sup> [Nijs *et al.*, 1997]. Therefore we will keep our previously estimated value of 70MJ per m<sup>2</sup> wafer (=19 kWh/m2), including overhead consumption [Alsema *et al.*, 1998]. Further note that a fairly large amount of slurry (about 1.5 kg/m<sup>2</sup>) is produced by the sawing process. This slurry, which is a mixture of mineral oil, silicon carbide, iron and silicon, has to be disposed of as industrial waste. Slurry recycling is gaining interest but is not common yet.

#### 3.3.2 RGS

A 'cold' (below silicon melting temperature) substrate is moved underneath a casting frame filled with liquid silicon (melting point 1414°C). Thus heat is extracted from the silicon melt forcing a crystallization process of silicon from the substrate into the silicon melt. During this process the substrate is moved underneath the casting frame and crystal growth is stopped at the moment the substrate leaves the casting frame. Thus crystal growth direction and silicon wafer production direction are perpendicular to each other, which allows the independent control of both. Therefore relatively slow crystal growth can be combined with high substrate transport speed and thus high production volume. After the casting frame, the wafer and the substrate are cooled down. During this process the wafer and the substrate separate, forced by their different thermal expansion coefficients. This allows the substrate to be re-used after the wafer has been picked-up [Hässler et al., 2000].

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> For a standard Czochralski ingot growing process an energy consumption of 100 kWh/kg is reported which can be reduced to 40 kWh/kg by applying a new energy-efficient method [Jester, 2002]. Casting is a quicker and more efficient process.

Data for energy and material consumption are estimated on the basis of calculations for a design of an RGS production equipment. These data cannot be given here because of their confidentiality.

# 3.3.3 EFG

EFG is een commercieel toegepaste techniek om uit gesmolten silicium direct ribbons te maken met een dikte van ca. 300  $\mu$ m. [Schmidt *et al.*, 2002]. De techniek is gebaseerd op de groei van octagonale buizen. Elke buis is een holle cilinder van 5-6 m lengte en een gemiddelde wanddikte van 300  $\mu$ m. De buis heeft acht zijden met een breedte van 10, 12.5 of 15 cm. Hieruit worden met een laser wafers gesneden met de gewenste afmeting. De overall yield van de huidige produktielijn is ca. 90% en men verwacht 95% te kunnen realiseren met een nieuwe lijn [Schmidt *et al.*, 2002].

In de MUSIC-FM studie [Bruton *et al.*, 1996] worden voor de energiekosten van EFG een getal genoemd dat neerkomt op 0.84 ECU/wafer. Gezien de totale wafer produktiekosten van 0.28 ECU/Wp lijkt dit geen geloofwaardig getal. Andere gegevens over het energieverbruik en andere consumables zijn niet bekend, we houden daarom dezelfde schatting van het energieverbruik aan als bij RGS. Bij EFG wordt weliswaar extra energie gebruikt voor het proces van laser cutting, maar een schatting op basis van de hoeveelheid te smelten silicium en een laser efficiency van 5% geeft aan dat dit verwaarloosbaar is.

# 3.4 Produktie van zonnecelmodules

# 3.4.1 Cell processing

De silicium wafers worden voorzien van een pn junctie en metaal contacten aan voor –en achterzijde. We gaan uit van een "standaard" proceslijn op basis van gasdiffusie en screen printing. Een typisch produktiecapaciteit van bestaande lijnen is 10 MWp/yr, hoewel veel grotere lijnen van 50-150 MWp recent opgestart of in voorbereiding zijn. We baseren onze LCI data op de gegevens verstrekt door een bestaande fabriek in West-Europa. Omdat deze gegevens vertrouwelijk zijn kunnen we ze niet verder toelichten.

# 3.4.2 Module assemblage

We gaan hier uit van een module bestaande uit 54 cellen van 12.5x125 cm<sup>2</sup> met een totaal oppervlak van 0.95 m<sup>2</sup> en een vermogen van 115 Wp ( $\eta_{mod}$ =12.1 %).

De LCI data zijn verkregen door opschaling van de gegevens voor een  $0.45 \text{ m}^2$  module zoals gebruikt in [Alsema, 2000b]. Het energieverbruik voor de module assemblage is hier geschat op 100 MJ<sub>el</sub> per m<sup>2</sup> module-oppervlak (=28 kWh).

Het energieverbruik van laminators kan variëren van 4-20 kWh/h per m<sup>2</sup> te lamineren module-oppervlak [Schmela, 2002a], bij een verwerkingscapaciteit van 2-2.5 modules per uur komen we dan op 2-10 kWh per m<sup>2</sup> module. Hierbij komt dan nog het solderen en het overheadverbruik. Een totaal verbruik van 28 kWh zou dan iets aan de hoge kant kunnen zijn.

Anderzijds sluit onze eerdere schatting goed aan bij de waarde van 26 kWh per module die Jungbluth heeft afgeleid uit de milieurapportage van een assemblagelijn [Jungbluth and Frischknecht, 2000]. We zullen daarom de waarde van 100 MJ<sub>el</sub> handhaven.

De aluminium frames worden steeds apart beschouwd van de modules omdat ook frameloze modules meer en meer toegepast worden. We gaan uit van een aluminiumgebruik van 350 g per meter framelengte en 4 m frame lengte voor module van  $1 \text{ m}^2$ .

#### 3.4.3 Geavanceerde processen voor cel- en moduleproduktie en opschaling naar 50-100 MWp/yr

Naast het bovenbeschreven "standaard" proces voor cel- en moduleproduktie zou men kunnen kijken naar meer geavanceerde processen. Hierbij valt te denken aan zure etsprocessen en toepassing van plasma CVD, leidend tot betere cel-rendementen. LCI data voor deze processen bleken echter niet zonder meer voorhanden te zijn. Bovendien is niet te verwachten dat ze tot erg grote extra milieu-ingrepen zouden leiden, hoewel de mogelijke emissie van broeikasgassen bij plasma-CVD wel aandacht verdient. Om deze redenen zijn deze nieuwe processen in deze studie buiten beschouwing gebleven. Het effekt van opschaling van cel- en moduleproduktie is eveneens lastig vast te stellen. Werkelijk gemeten data zijn niet verkrijgbaar dus we moeten ons beperken tot schattingen van het opschalingseffekt. Nu is enerzijds duidelijk dat machines met een grotere capaciteit meestal een lagere energieverbruik per eenheid cel- of waferoppervlak te zien geven, dit geldt met name bij laminatie-ovens en dergelijke [Schmela, 2002a]. Ook kan bij verdergaande automatisering door de vermindering van personeelsinzet het energieverbruik voor verlichting, ventilatie en klimaatbeheersing omlaag gaan. Anderzijds is het waarschijnlijk dat meer robotisering zal leiden tot een toename van het gebruik van perslucht en/of vacuüm en van elektriciteit voor motoren en procesbesturing. Het netto-effekt van deze autonome trends is erg lastig te schatten zonder data uit de praktijk.

In de tweede plaats kunnen we nadenken welke mogelijkheden er liggen indien men door gerichte ingrepen het energieverbruik wil verminderen. In de praktijk zullen zulke verbeteringen meestal plaats vinden in samenhang met investeringen gericht op kostenverlaging en/of capaciteitsuitbreiding.

Uit andere industrieën is wel bekend dat het zg. "debottlenecking", het wegnemen van bottlenecks in een produktieproces, kan leiden tot significante energiebesparingen omdat leegloop van machines verminderd wordt en omdat de produktiecapaciteit toeneemt. Bij produktie van kristallijn silicium modules lijken op dit punt ook wel mogelijkheden te liggen, gezien het grote aantal processtappen.

Opvallend in de zonnecelindustrie en andere hoog-technologische bedrijven is verder het hoge verbruik voor overhead of infrastruktuur. Hieronder vallen klimaatbeheersing, clean rooms, perslucht, demi water, behandeling van afgassen, etc. Een energieverbruik voor overhead dat 40-70% bedraagt van de procesenergie is niet uitzonderlijk [Alsema, 2000a, Knapp and Jester, 2001]. Een zorgvuldig ontwerp en goede afstelling van deze apparatuur

kan zeker resulteren in significante besparingen zonder dat op de kwaliteit van eindprodukt ingeleverd wordt.

Een ander aandachtspunt is gebruik van (gedemineraliseerd) water. Net als in de halfgeleiderindustrie is het gebruik van water in zonnecelindustrie vrij hoog. Door te kijken naar de aanpak binnen de halfgeleiderindustrie zouden op dit punt wellicht reducties bereikt kunnen worden.

Voor onze verdere beschouwingen zullen we aannemen dat het energie- en waterverbruik van modernere produktieprocessen 10% lager ligt dan ons "standaard" proces.

# 3.5 BOS componenten

Voor de beschrijving van de BOS componenten verwijzen we naar de rapportage van Ecofys over dit onderdeel (Appendix 1). Het PV wirefree concept en de aannames daaromtrent worden beschreven in Appendix 2.

Eén belangrijke kanttekening moet worden gemaakt bij de beoordeling van de inverters. Omdat voor bijna alle elektronische componenten geen bruikbare LCI data beschikbaar waren, met uitzondering van een Printed Circuit Board, hebben we de laatste gegevens ook gebruikt als benadering voor alle overige elektronische onderdelen zoals transformators, IC's, transistors, condensators, weerstanden, diodes, soldeer.

# 4 Resultaten

We zullen nu de resultaten van onze analyses laten zien. Omdat een deel van de LCI data vertrouwelijk is kunnen we alleen uitkomsten geven voor volledige produktielijnen, van grondstof tot modules dan wel systemen, zonder opsplitsing in deelprocessen. Dit beperkt helaas ook de mogelijkheden om de uitkomsten in detail te bespreken. Wel zullen we proberen lacunes in de kennis aan te geven.

We bespreken eerst de resultaten voor modules op basis van een functionele eenheid van 1 kWp.

# 4.1 Modules

Figure 1 en 2 geven de vergelijkende resultaten van de drie module-produktietechnieken, te weten:

- 1. "standaard" produktietechnologie anno 2000
- 2. produktie op basis van Solsile SoG silicium en RGS wafering-technologie
- 3. produktie op basis van Bayer/SolarWorld SoG silicium en EFG waferingtechnologie.

Merk op dat we alle drie de modules ongeframed veronderstellen.

De eerste figuur geeft de gekarakteriseerde milieu-impacts, terwijl de tweede figuur de impacts geeft na normalisatie<sup>7</sup>. Bij normalisatie worden de gevonden impact scores gedeeld door de impact score voor een referentiejaar voor een bepaalde regio. Hier is gekozen voor de normalisatie-set "Europa 1995".

Impact category	Unit	1 kWp standard modules (nf)	1 kWp EFG modules (nf)	1 kWp RGS modules (nf)
abiotic depletion	kg Sb eq	0.279	0.248	0.242
global warming (GWP100)	kg CO2 eq	1810	853	693
ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	0.000237	0.000108	0.000102
human toxicity	kg 1,4-DB eq	794	405	398
fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	78.9	34.4	35.3
marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	1410000	629000	572000
terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	6.49	2.24	1.8
photochemical oxidation	kg C2H2	0.414	0.187	0.151
acidification	kg SO2 eq	11.1	4.98	4.16
eutrophication	kg PO4 eq	0.611	0.318	0.277
energy (fossil+U)	MJ	35200	16600	13800
Tabel 2. Gekerekteriseerde	impactscores	voor 1 kWn me	dules (frameloo	с)

Tabel 2: Gekarakteriseerde impactscores voor 1 kWp modules (frameloos)

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Bij de genormaliseerde resultaten is de impact-categorie marine ecotoxicity weggelaten omdat deze alle resultaten domineert terwijl bekend is dat de normalisatie hiervoor zeer onzeker is [Huijbregts *et al.*, 2003].



Comparing 1 p assembly '1 kWp EFG modules (nf)' with 1 p assembly '1 kWp RGS modules (nf)' and with 1 p assembly '1 kWp standard modules (nf)'; Method: CML 2 baseline 2000 all +energy 2 / West Europe

Figure 1: Vergelijking van de *gekarakteriseerde* milieu-impacts van 1 kWp PV modules op basis van drie onderzochte produktietechnieken, nl. standaard-2000, Solsilc/RGS en Bayer/EFG.



Comparing 1 p assembly '1 kWp EFG modules (nf)' with 1 p assembly '1 kWp RGS modules (nf)' and with 1 p assembly '1 kWp standard modules (nf)'; Method: CML 2 baseline 2000 all +energy 2 / West Europe, 1995 / normalisation

Figure 2: Vergelijking van de genormaliseerde milieu-impacts van 1 kWp PV modules op basis van drie onderzochte produktietechnieken, nl. standaard-2000, Solsilc/RGS en Bayer/EFG.

We zien dat de resultaten voor beide geavanceerde moduletype elkaar weinig ontlopen maar dat ze wel 50-60% beter scoren dan de standaard technologie. Dit betekent dat beide geavanceerde silicium technologieën – indien ze hun beloftes waarmaken – een zeer significante verbetering zullen opleveren van het milieu-profiel van kristallijn silicium modules.

De hoogste genormaliseerde impactscores vinden we voor global warming, acidification (verzuring) en energy. De impactscore voor deze drie categorieën wordt hoofdzakelijk veroorzaakt door het gebruik van elektrische energie.

De opbouw van de impactscores voor één module wordt getoond in figuur 3 en 4. We zien dat de impactscores van de standaard module veel meer gedomineerd worden door de zonnecel, terwijl bij de RGS module de zonnecel minder overheerst. Dit komt natuurlijk door de meer efficiente processen om de silicum feedstock en de wafer te vervaardigen.

Als gevoeligheidsanalyse kunnen we nog nagaan hoe de resultaten eruit komen te zien als we de silicium feedstock produktie voorzien van elektriciteit uit hydropower in plaats van de gemiddelde Europese elektriciteitsmix (zie discussie in sectie 2.5). De resultaten zijn te vinden in figuur 5 en 6, en we zien hier dat de verschillen tussen standaard en geavanceerde technologieën weliswaar geringer worden, maar toch nog behoorlijk zijn.



Analyzing 1 p material 'mc-Si module standard 115 Wp unframed'; Method: CML 2 baseline 2000 all +energy (w /o mar.ecotox) / West Europe, 1995 / characterisation

Figure 3: Opbouw van de impactscores voor 1 standaard module, met relatieve bijdragen van de zonnecel, afdekglas (float glas), EVA, achterfolie (PVF/AL), verbindingsstrips en het electricteitsgebruik voor moduleassemblage (MJel PV prod.)



Analyzing 1 p material 'mc-Si module RGS 115 Wp unframed'; Method: CML 2 baseline 2000 all +energy 2 / West Europe, 1995 / characterisation

Figure 4: Opbouw van de impactscores voor 1 RGS module, met relatieve bijdragen van de zonnecel, afdekglas (float glas), EVA, achterfolie (PVF/AL), verbindingsstrips en het electricteitsverbruik voor moduleassemblage (MJel PV prod.)



Comparing 1 p assembly '1 kWp EFG modules (nf)' with 1 p assembly '1 kWp RGS modules (nf)' and with 1 p assembly '1 kWp standard modules (nf)'; Method: CML 2 baseline 2000 all +energy 2 / West Europe, 1995 / characterisation

Figure 5: Gekarakteriseerde impacts voor 1 kWp modules wanneer silicium feedstock productie plaatsvindt met behulp van elektriciteit uit hydropower.



Comparing 1 p assembly '1 kWp EFG modules (nf)' with 1 p assembly '1 kWp RGS modules (nf)' and with 1 p assembly '1 kWp standard modules (nf)'; Method: CML 2 baseline 2000 all +energy 2 / West Europe, 1995 / normalisation

Figure 6: Genormaliseerde impacts voor 1 kWp modules wanneer silicium feedstock productie plaatsvindt met behulp van elektriciteit uit hydropower.

#### 4.2 Inverters

We hebben een drietal inverters bekeken: de Philips PSI 300, de NKF OK5 en de Sunmaster 2500. De eerste twee zijn moderne relatief kleine inverters met een vermogen van 300 W<sub>ac</sub>. De Sunmaster is een wat ouder type met een vermogen van 2.5 kW en is hier geëvalueerd op basis van data uit een eerder project [Alsema and Nieuwlaar, 2002]. In alle gevallen is zijn de elektronica componenten meegenomen als waren het Printed Circuit Boards (PCB) met eenzelfde gewicht<sup>8</sup>. Figuur 7 vergelijkt onder deze uitgangspunten de impacts van deze drie inverters. We zien dat in bijna alle categorieën de PSI 300 het slechtste scoort terwijl de Sunmaster en OK5 ongeveer gelijk uitkomen.. De PSI 300 wordt relatief zwaar aangeslagen door het schatten van de elektronica als ware het een PCB. Het totale gewicht van PCB plus elektronica voor de Sunmaster, PSI 300 en OK5 is namelijk resp. 0.7, 2.0 en 0.7 kg/kW. Met andere woorden de PSI 300 bevat relatief groot gewicht aan elektronicacomponenten. Daarnaast kan worden opgemerkt dat ook de aluminium omkasting van de PSI 300 nog bijdraagt aan de milieu-impacts (zie ook fig. 8 en 9).

Met het oog op de grote onzekerheid in de wijze van schatting voor de elektronica dient men erg voorzichtig te zijn om conclusies uit deze resultaten te trekken. Als beter bekend zou zijn wat de werkelijke impact van diverse elektronica-onderdelen is, zou het beeld er heel anders uit kunnen zien.

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Voor de Sunmaster is alleen het gewicht van het PCB inclusief componenten bekend, bij de andere twee zijn het PCB en diverse elektronische componenten afzonderlijk bekend. Gebrek aan LCI gegevens voor elektronica componenten verhinderd ons echter deze componenten beter te modelleren. Onbekend is of dit een onder- of overschatting oplevert.



Comparing 1 p assembly '1 kW of inverter OK5' with 1 p assembly '1 kW of inverter PSI 300' and with 1 p assembly '1 kW of inverter Sunmaster 2500'; Method: CML 2 baseline 2000 all +energy 2 / West Europe, 1995 / characterisation

Figure 7: Vergelijking van drie inverter-types allen geschaald naar 1kW uitgangsvermogen.



Analyzing 1 p assembly 'inverter PSI 300 total'; Method: CML 2 baseline 2000 all +energy 2 / West Europe, 1995 / characterisation

Figure 8: Karakterisatie van de PSI 300 inverter



Analyzing 1 p assembly 'inverter OK5 total'; Method: CML 2 baseline 2000 all +energy 2 / West Europe, 1995 / characterisation

Figure 9: Karakterisatie van de OK5 inverter

# 4.3 Ondersteuning en bekabeling

Drie typen ondersteuning werden onderzocht met de bijbehorende bekabeling, alsmede een variant met een verschillende inverter, te weten:

- BOAL systeem + bekabeling voor Sunmaster 2500 inverter
- TNO/Axys systeem + bekabeling voor PSI 300 inverter
- TNO/Axys systeem + bekabeling voor OK5 inverter (buiten geplaatst, zie app. I)
- PV-Wirefree systeem + bekabeling voor OK6 inverter

De inverters zijn nog niet in deze vergelijking opgenomen. Merk verder op dat het BOAL en PV-Wirefree-systemen uitgaan van ongeframede modules (laminaten)<sup>9</sup> terwijl de TNO/Axys systemen geframede modules vereisen. Dit verschil is hier nog niet verrekend.

Figuur 10 geeft een vergelijking van de impacts voor deze vier varianten. We zien dat de beide TNO/Axys systemen relatief hoge impact scores hebben, terwijl het PV-wirefree systeem vrij gunstig scoort. Ook blijkt dat de bekabeling voor de buitengeplaatste OK5 ca. 10% betere scores oplevert.

In de alle gevallen is het gebruik van aluminium vooral bepalend voor de eindscores, zoals blijkt uit fig. 11. Vergelijking van de resultaten van het TNO/Axys systeem en het PV-wirefree concept laten zien dat in dit laatste systeem de impact van bekabeling sterk is teruggedrongen.

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> In het BOALsysteem moeten de laminaten aan één lange zijde wel van een aluminium strip voorzien zijn. Dit materiaal is hier al wel meegerekend.



Comparing product stages; Method: CML 2 baseline 2000 all +energy 2 / West Europe, 1995 / characterisation

Figure 10: Vergelijking van support systemen en bijbehorende bekabeling (exclusief inverters en module frames)



Analyzing 1 p assembly '1kWp PV-wirefree support + cabling'; Method: CML 2 baseline 2000 all +energy 2 / West Europe, 1995 / characterisation

Figure 11: Karakterisatie voor het PV wirefree concept. Onderscheiden worden hier de aluminium dragers, de module-connectors en de (AC-)kabels (exclusief inverters).



Analyzing 1 p assembly '1 kWp Axys w PSI'; Method: CML 2 baseline 2000 all +energy 2 / West Europe, 1995 / characterisation

Figure 12: Karakterisatie voor het TNO/Axys syteem met bekabeling voor PSI 300 inverters (exclusief inverters)

#### 4.4 Systemen

We zullen nu een aantal concepten voor complete systemen onderling vergelijken op hun milieu-impacts. Om te beginnen vergelijken we drie systemen waarin gebruik wordt gemaakt van "standaard" modules (115 Wp) in combinatie met drie verschillende concepten voor ondersteuning en inverter, te weten

- a) BOAL met Sunmaster 2500 inverter
- b) TNO-Axys met PSI 300 inverter
- c) PV Wirefree met OK6 inverter

De lay-out van het systeem is steeds die voor een 3.4 kWp systeem, echter geschaald naar 1 kWp vermogen (=functionele eenheid). Figuur 13 geeft de vergelijking van deze drie systemen. We zien dat de BOAL en PV-Wirefree over het algemeen 10-40% beter scoren dat het TNO/Axys concept. In alle gevallen is het aluminium gebruik voor ondersteuning en frames sterk bepalend voor de uitkomst. De scores voor BOAL en PV-Wirefree ontlopen elkaar meestal niet veel. Het TNO/Axys systeem daarentegen, is in het nadeel doordat het relatief veel aluminium vergt, voor zowel de ondersteuning als de frames.

In figuur 14 wordt getoond hoe de toepassing van RGS/Solsilc moduletechnologie uitpakt in vergelijking met standaard modules. De BOS gaat uit van het PV-Wirefree concept. We zien dat de milieu-scores met de nieuwe module technologie gemiddeld zo'n 50% beter zijn.

Figuur 15 toont hoe de impacts voor PV-wirefree systeem zijn opgebouwd. We zien dat de modules nog altijd de grootste bijdrage leveren, zelfs op basis van de RGS/Solsilc technologie, maar ook de inverters leveren een flinke bijdrage. Als we de impacts verder willen terugdringen moeten we dus ook aan deze componenten aandacht besteden. De onderstaande tabel geeft de resultaten nog eens in getalvorm weer.

Impact category	Unit	Total	PV-wirefree (w/o inverter)	inverter OK6 (with connectors)	1 kWp RGS modules (nf)
abiotic depletion	kg Sb eq	0.249	0.00381	0.00374	0.242
global warming (GWP100)	kg CO2 eq	899	104	102	693
ozone layer depletion (ODP	)kg CFC-11 eq	0.000117	0.00000986	0.00000536	0.000102
human toxicity	kg 1,4-DB eq	731	238	94.7	398
fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	96.8	16.5	i 45	35.3
marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	748000	117000	59300	572000
terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	2.15	0.213	0.143	1.8
photochemical oxidation	kg C2H2	0.28	0.0359	0.0928	0.151
acidification	kg SO2 eq	7.49	0.861	2.47	4.16
eutrophication	kg PO4 eq	0.376	0.0363	0.063	0.277
energy (fossil+U)	MJ	17700	2320	1590	13800
T 1 1 0 T	1 1 117	• •		a/a 1 ·1 1 1	

Tabel 3: Impacts voor een 1 kWp PV-wirefree systeem met RGS/Solsilc modules



Comparing 1 p assembly '1 kWp sys Axys/stand/PSI' with 1 p assembly '1 kWp sys Boal/stand/Sunmaster' and with 1 p assembly '1 kWp sys Wirefree/stand'; Method: CML 2 baseline 2000 all +energy 2 / West Europe, 1995 / characterisatic

Figure 13: Vergelijking van drie systeemconcepten, nl. TNO/Axys met PSI 300 inverters, BOAL met Sunmaster 2500 inverter en PV-Wirefree met OK6 inverters. In alle drie gevallen zijn standaard modules toegepast.


Comparing 1 p assembly '1 kWp sys Wirefree/RGS' with 1 p assembly '1 kWp sys Wirefree/stand'; Method: CML 2 baseline 2000 all +energy 2 / West Europe, 1995 / characterisation

Figure 14: Vergelijking van systemen op basis van PV-wirefree concept met twee typen modules: standaard en RGS/Solsilc.



Analyzing 1 p assembly '1 kWp sys Wirefree/RGS'; Method: CML 2 baseline 2000 all +energy 2 / West Europe, 1995 / characterisation

Figure 15: Karakterisatie van een PV-Wirefree systeem met RGS/Solsilc modules.



Comparing product stages; Method: CML 2 baseline 2000 all +energy 2 / West Europe, 1995 / characterisation

Figure 16: Vergelijking van impactscores voor 1 kWh stroom uit resp. mix van Europese opwekkingseenheden, Nederlandse eenheden, PV-Wirefree systeem met RGS/Solsilc modules en hetzelfde systeem met standaard PV modules. De PV systemen staan opgesteld in Nederland, hebben een Performance Ratio van 0.75 en een levensduur van 25 jaar.

Vervolgens kunnen we de energie-opwekking met PV systemen vergelijken met die door andere technologieën. Daartoe stappen we over op een andere functionele eenheid namelijk de kWh. Verder veronderstellen we dat de PV systemen een levensduur hebben van 25 jaar (alle componenten, ook de inverters) en dat onder Nederlandse condities 750 kWh/kWp/jaar aan elektriciteit wordt gegenereerd. Verwerking van het PV systeem na beëindiging van de levensduur is niet in de beschouwing betrokken.

Figuur 16 geeft de impacts weer voor 1 kWh elektriciteit opgewekt door een PVwirefree systeem met standaard dan wel RGS/Solsilc modules in vergelijking met de opwekking van 1 kWh elektriciteit met de bestaande *mix* van het Europese opwekkingssysteem (UCPTE) dan wel de bestaande mix in Nederland. We zien dat de PV systemen op alle categorieën aanzienlijk beter scoren dan *bestaande* elektriciteitsopwekkingsystemen. Alleen voor grondstofuitputting (excl. fossiele brandstoffen en uraan) is de score voor PV systemen vergelijkbaar met die van de Nederlandse elektriciteitsvoorziening. Dit wordt met name veroorzaakt door het gebruik van zilver in de contacten.

## 4.5 CO<sub>2</sub> emissies en energieterugverdientijd

Figuur 17 toont specifiek de broeikasgasemissies per opgewekte kWh elektriciteit van enerzijds PV systemen op basis van verschillende technologieën en anderzijds voor twee verschillende locaties, Nederland en Zuid-Europa.



Figure 17: Broeikasgasemissies per opgewekte kWh electriciteit (g-CO<sub>2</sub>-eq/kWh) voor een aantal typen PV systemen gerekend over de levensduur van het systeem (25 jaar). Twee lokaties voor plaatsing van het PV systeem zijn weergegeven: Nederland (750 kWh/kWp/yr) en Zuid-Europa (1275 kWh/kWp/yr).

We zien dat in Nederland de emissie voor de huidige systemen op 110-120 g/kWh ligt, terwijl dit voor Zuid-Europa 60-70 g/kWh bedraagt. Wanneer RGS/Solsilc modules toegepast worden daalt dit tot ca. 50 resp. 30 g/kWh.

Tabel 4 en 5 geven op basis van dezelfde veronderstellingen en resultaten de terugverdientijden weer voor energie respectievelijk broeikasgasemissies, bij plaatsing van PV-systemen in Nederland dan wel Zuid-Europa. Bij deze berekeningen is er nog een aanname nodig over de door PV-opwekking verdrongen stroom. Als verondersteld wordt dat deze stroom uit Nederlandse centrales afkomstig is met een relatief hoog conversierendement maar ook een relatief hoge CO<sub>2</sub> emissie, levert dit een andere terugverdientijd op dan wanneer de stroom was opgewekt door het gemiddelde West-Europese park dat een lager conversierendement kent én een lagere CO<sub>2</sub>-uitstoot (vgl. figuur 16). Deze karakteristieken van het bestaande elektriciteitspark verklaren de opvallende verschillen tussen energie- en broeikasgasterugverdientijden van PV-systemen in Nederland<sup>10</sup>.

	Boal/standard	Axys/standard	Wirefree/standard	Wirefree/RGS
EPBT-NL	5.4	5.9	5.4	2.4
EPBT-NL*	4.3	4.8	4.3	2.0
EPBT-SE*	2.6	2.8	2.6	1.2

Tabel 4: Energie-terugverdientijd (in jaren) voor drie PV-systeemtypes bij plaatsing in Nederland (NL) en Zuid-Europa (SE). Bij de bepaling van de EPBT-NL is uitgegaan van verdringing van stroom uit het gemiddelde *Nederlandse* park, voor berekening van EPBT-NL\* en EPBT-SE\* is verondersteld dat de verdrongen stroom is opgewekt met het gemiddelde *West-Europese park* (UCPTE). Dit laatste park heeft een lager conversierendement en leidt daarom kortere energieterugverdientijd.

	Boal/standard	Axys/standard	Wirefree/standard	Wirefree/RGS
GPBT-NL	3.7	4.2	3.6	1.6
GPBT-NL*	4.7	5.3	4.6	2.0
GPBT-SE*	2.8	3.1	2.7	1.2

Tabel 5: Broeikasgas-terugverdientijd (in jaren) voor drie PV-systeemtypes bij plaatsing in Nederland (NL) en Zuid-Europa (SE). Evenals boven is bij GPBT-NL\* en GPBT-SE\* uitgegaan van verdringing van stroom uit het West-Europese park. De relatief hoge CO<sub>2</sub> emissie van het Nederlandse park zorgt voor een relatief korte terugverdientijd voor broeikasgasemissies in vergelijking met de energie-terugverdientijd.

We zien dat energie-terugverdientijden in Zuid-Europa nu op 2.5-3.0 jaar liggen terwijl dit met RGS/Solsilc modules zou kunnen teruglopen tot 1.2 jaar. Voor de broeikasgas-terugverdientijd in Zuid-Europa gelden vergelijkbare waarden. In Nederland liggen de terugverdientijden een stuk hoger, oplopend tot 6 jaar voor een TNO/Axys systeem met standaard modules.

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> Merk ook op dat verondersteld is dat PV modules geproduceerd worden m.b.v. West-Europese stroom en niet met stroom uit het Nederlandse park.

# 5 Discussie

## 5.1 Onzekerheden

Er zijn nog een aantal onzekerheden in de gepresenteerde analyse die in de toekomst nader aandacht verdienen, nl:

- Het energieverbruik van verschillende silicium zuiveringsroutes. Alle aannames op dit punt betreffen schattingen, en de onzekerheid hierin kan een grote invloed hebben op het eindresultaat. Ook de verbruikscijfers voor het Solsilc-procédé zijn ontleend aan de (oudere) literatuur.
- Life Cycle Inventory data (verbruik- en emissies-cijfers) voor het RGS proces zijn gebaseerd op berekeningen en schattingen voor een pilot-proces en zijn nog niet aan de praktijk getoetst
- LCI-data voor het EFG proces waren niet voorhanden en zijn gelijk verondersteld aan die voor het RGS proces.
- Opbrengstcijfers voor het met name het RGS en EFG-proces zijn nog niet in de praktijk bewezen en deze aannames hebben een grote invloed op het eindresultaat.
- Er is weinig bekend over de effecten van opschaling van de cel- en moduleproductie op het verbruik van energie en andere hulpbronnen.
- LCI-data voor de elektronica-componenten in inverters waren niet voorhanden. Nu zijn ze gelijk gesteld aan de waarden die bekend zijn voor Printed Circuit Boards. Dit zou mogelijk een overschatting van de impacts kunnen opleveren<sup>11</sup>. In eerdere studies werd een andere aanname voor elektronica gemaakt hetgeen leidde tot een aanzienlijke lagere berekende milieubelasting voor inverters [Alsema and Nieuwlaar, 2002]. Voor de PSI 300 zou een berekening op basis van de oude aannames leiden *tot 30-80% lagere impactscores* (per inverter). Voor het totale systeem zou dit een vermindering van de scores met 10-30% betekenen.
- De levensduur van inverters is gelijk gesteld aan die van de modules (25 jaar). Bij vorige generaties inverters werd vaak verondersteld dat de levensduur van de inverter de helft korter was, zodat effectief twee inverters per levenscyclus nodig zijn [Alsema and Nieuwlaar, 2002]. De fabrikanten claimen dat de huidige generatie inverters een levensduur van tenminste 20 jaar heeft maar dit is nog niet in de praktijk bewezen.
- Recycling van modules is nog buiten beeld gebleven vanwege het ontbreken van gegevens over recyclingprocessen.
- De EPDM dakfolie die onder een PV-dak wordt gelegd is buiten beschouwing gebleven. Verondersteld is dat een vorm van dakbedekking altijd noodzakelijk is en dat het gebruik van EPDM wegvalt tegen de besparing op bijvoorbeeld dakpannen<sup>12</sup>.

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> Voor IC's vormt dit zeker een grote onderschatting, voor spoelen en trafo's *waarschijnlijk* een overschatting. Het laatste type componenten vormt een belangrijke fractie in het totale gewicht van de inverter-elektronica.

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup> De energie-inhoud van EPDM is hoger dan die van betonnen dakpannen maar de CO<sub>2</sub>-emissie is vergelijkbaar (per m<sup>2</sup> dakoppervlak)

Gezien de bovenstaande onzekerheden moeten we concluderen dat de gepresenteerde resultaten geen harde garantie geven dat toekomstige silicium-modules een beter milieuprofiel hebben dan de huidige generatie modules. Veel hangt af van daadwerkelijk gerealiseerde (energie-)inputs en procesopbrengsten (yields). Wel is duidelijk dat er mogelijkheden liggen om een significante verbetering te bewerkstelligen.

Aanzienlijke onzekerheid blijft ook bestaan omtrent de impacts van inverters. Betere LCI data voor een trafo's, spoelen en andere zwaarwegende componenten moeten hier meer helderheid in brengen.

## 5.2 Vergelijking met andere energietechnologieën

Figuur 18 vergelijkt de CO<sub>2</sub>-emissie van een tweetal PV systemen, bij plaatsing in Nederland, met een aantal concurrerende energietechnologieën. We zien dat PV elektriciteit aanzienlijk beter scoort dan conventionele elektriciteitsopwekking maar toch nog slechter dan biomassa en windmolens, ook als we gebruik maken van RGS/SolSilc technologie.

Dit betekent dat PV technologie in termen van CO<sub>2</sub> reductie per kWh toch een zeker nadeel heeft ten opzichte van concurrerende duurzame bronnen. Wel is bij toepassing van RGS/Solsilc én plaatsing in een zonnig klimaat het verschil tussen de duurzame opties niet zeer groot meer.



Figure 18: Broeikasgasemissies voor een kWh elektriciteit uit verschillende bronnen. De PV systemen zijn geplaatst in Zuid-Europa dan wel Nederland. Data voor wind en biomassa uit [IEA, 1998], conventionele opties op basis van Simapro database.

## 5.3 Verbeteropties

We kunnen de volgende verbeteringen voorstellen om het milieuprofiel van PV systemen te verbeteren:

- Een belangrijk deel van de verbeteringen die mogelijk gerealiseerd kunnen worden met RGS/Solsilc en verwante technologieën, ontstaat door de betere benutting van silicium in sheet-processen. Silicium van halfgeleider-kwaliteit is en blijft een relatief energie-intensief materiaal en goede uitnutting van dit materiaal en zo mogelijk recycling van produktie-afval en end-of-life wafers moet daarom een hoge prioriteit krijgen.
- Het gebruik van zilver moet kritisch bekeken worden en zo mogelijk teruggedrongen worden;
- In de produktie van cellen en modules zou als eerste stap het gebruik van energie, water, gassen en andere hulpmaterialen goed gemonitord moeten worden. Op basis van de verzamelde gegevens zou het energie- en hulpmateriaalverbruik voor processen maar vooral ook voor de overhead (bijv. ventilatie, perslucht) kritisch bekeken moeten worden. De ervaring uit andere industrieën leert dat dit vaak tot aanzienlijke besparingen kan leiden.
- Bij toepassing van hoge-temperatuurprocessen moet thermische isolatie van de reactiekamers en een energie-efficiënte wijze van verwarming aandacht krijgen.
- Gebruik en zeker emissie van CFK's bij processen moeten sterk ontraden worden.
- Bij toepassing van (hulp)materialen moet kritisch gekeken worden naar de minimaal vereiste zuiverheid. Harde cijfers hierover ontbreken nog grotendeels maar men mag er vanuit gaan dat hogere zuiverheidseisen vrijwel altijd zullen leiden tot extra energieverbruik in de produktie van het materiaal.
- Een aandachtspunt is ook het gebruik van (gedemineraliseerd) water. Net als in de halfgeleiderindustrie is het gebruik van water in zonnecelindustrie vrij hoog. Door te kijken naar de aanpak binnen de halfgeleiderindustrie zouden op dit punt wellicht reducties bereikt kunnen worden.
- Toepassing van secundaire (gerecyclede) materialen moet overwogen worden voor niet-kritische onderdelen in de BOS (bijv. dragers). Secundair aluminium vergt één-tiende van de energie-input van primair aluminium.
- Tenslotte: Verhoging van het modulerendement en verlenging van de levensduur zal uiteraard de life-cycle impacts per eenheid opgewekte energie naar rato verminderen.

# 6 Samenvatting en conclusies

### 6.1 Doel en aanpak

In deze studie zijn de milieuaspecten onderzocht van een aantal nieuwe technologieën voor produktie van kristallijn silicium modules en van nieuwe concepten voor systeemintegratie in de gebouwde omgeving. Doel van de studie is om een onderbouwde inschatting te maken van de richting waarin kristallijn silicium PV-systemen zich kan ontwikkelen, zodat duidelijk wordt welke verbetering te verwachten is in het milieuprofiel van deze systemen en welke knelpunten wellicht nadere aandacht vragen.

Daartoe werden de volgende combinaties van produktietechnologieën voor modules onderzocht:

- 1) Standaard jaar 2000 (aanduiding: "standaard"), dit omvat:
  - Siemens Si feedstock
  - Standaard casting + wafer sawing
  - Standaard cell processing en laminatie
- 2) Geavanceerd I (aanduiding: "RGS/Solsilc"), dit omvat:
  - proces voor productie van solar-grade silicium op basis van carbothermische reductie van silica ("SolSilc")
  - Ribbon-Growth-on-Substrate (RGS) techniek voor vervaardiging van wafers
  - Opgeschaalde cell processing en laminatie
- 3) Geavanceerd II (aanduiding: EFG/Bayer), dit omvat:
  - proces voor productie van solar-grade silicium op basis van silaan ("Bayer-procédé")
  - Edge-defined Film-fed Growth (EFG) techniek voor vervaardiging van wafers
  - Opgeschaalde cell processing en laminatie

Daarnaast bekijken we vier systeemconcepten voor de BOS, nl:

Systeem A: ondersteuning met BOAL profielen en Mastervolt Sunmaster 2500 inverter

Systeem B: TNO Axys ondersteuning met Philips PSI 300 inverter Systeem C: TNO Axys ondersteuning met NKF OK5 inverter (buiten geplaatst) Systeem D: PV wirefree systeem

De ontwikkelingsfase van deze technologieën varieert van op ruime schaal commercieel toegepast (standaard module technologie met systeemconcept A) tot R&D stadium (RGS/Solsilc en systeemconcept D).

Gegevens over deze technologieën werd ontleend aan interne, deels vertrouwelijke kennis en aan de openbare literatuur. Gedetailleerde procesgegevens en resultaten kunnen daarom vooralsnog niet gepubliceerd worden. De analyses van milieuprofielen zijn uitgevoerd met behulp van de Environmental Life Cycle Assessment methode. De impact assessment was daarbij gebaseerd op een aangepaste<sup>13</sup> versie van de zg. CML 2000 methode [Guinée *et al.*, 2001].

## 6.2 Resultaten moduletechnologie

Uit de analyses van module technologieën blijkt dat beide geavanceerde moduletypes elkaar weinig ontlopen maar dat ze wel 50-60% beter scoren dan de standaard technologie. Dit betekent dat beide geavanceerde silicium technologieën – indien ze hun beloftes waarmaken – een zeer significante verbetering zullen opleveren van het milieu-profiel van kristallijn silicium modules. De hoogste genormaliseerde impactscores worden gevonden voor global warming, acidification and energy. Deze scores worden hoofdzakelijk veroorzaakt door het gebruik van elektrische energie. Van de drie belangrijkste impacts van de standaard module wordt ongeveer 80% bijgedragen door de vervaardiging van de zonnecellen zelf (inclusief alle up-stream processen). Bij de RGS/Solsilc en EFG/Bayer modules is dit percentage gedaald tot 50%. De verbeterde benutting van silicium binnen de RGS en EFG processen is duidelijk debet aan deze ontwikkeling.

Wel moet worden opgemerkt dat er nog een vrij grote onzekerheid bestaat in de gevonden scores voor modules omdat voor bepaalde belangrijke processen geen gemeten data beschikbaar was. We kunnen dan ook geen harde garantie geven dat toekomstige silicium-modules een beter milieuprofiel hebben dan de huidige generatie modules. Veel hangt af van daadwerkelijk gerealiseerde (energie-)inputs en procesopbrengsten (yields). Wel is duidelijk dat er mogelijkheden liggen om een significante verbetering te bewerkstelligen.

## 6.3 Resultaten inverters

Met betrekking tot inverters kan worden geconcludeerd dat de impactscores sterk worden gedomineerd door de bijdrage van de Printed Circuit Boards en de overige elektronica-componenten. Helaas bevat deze laatste bijdrage ook een aanzienlijke onzekerheid omdat geen LCA data beschikbaar was voor specifieke componenten zoals spoelen, trafo's en elco's, zodat moest worden volstaan met een generieke schatting die mogelijk te hoog ligt. Aan gevonden verschillen tussen inverters mag dan ook niet te veel waarde worden toegekend. Wel is duidelijk dat de PSI 300 inverter relatief een veel hoger gewicht aan elektronica bevat en daarom relatief slecht lijkt te scoren. Ook lijkt duidelijk dat vroegere aannames met betrekking tot elektronica leidden tot een onderschatting van de impacts van inverters.

## 6.4 Resultaten ondersteuning en bekabeling

Wat betreft module-ondersteuning en bekabeling komt het PV-wirefree concept duidelijk als beste uit de bus. Het TNO/Axys concept daarentegen scoort relatief slecht, vooral doordat het veel aluminium vergt voor de ondersteuning. Daar komt nog bij dat het TNO/Axys concept uitgaat van geframede modules terwijl bij BOAL en PV-wirefree ongeframede laminaten worden toegepast. Op systeemniveau (incl.

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> De aanpassing behelsde de toevoeging van een nieuwe impactcategorie "energy (fossile + uranium)" én de verwijdering van energiedragers uit de impactcategorie "abiotic resource depletion".

modules en inverters) liggen belangrijke<sup>14</sup> impactscores bij PV wirefree 15-30% lager dan bij TNO/Axys. Binnen het laatste concept is de variant met de (buitengeplaatste) OK5 inverter iets gunstiger dan die met de PSI 300 omdat daarvoor minder bekabeling nodig is.

## 6.5 Resultaten systemen

Zoals reeds opgemerkt scoren systemen op basis van PV wirefree beter dan de andere systeem concepten. Toepassing van RGS/Solsilc modules (i.p.v. standaard modules) levert een verdere verbetering van rond de 50%. In een PV-wirefree systeem met RGS modules wordt van de belangrijke impacts nog steeds 60-80% veroorzaakt door de modules.

Op kWh-basis zijn de vrijwel alle milieu-impacts van PV systemen aanzienlijk lager dan die van de bestaande elektriciteitsvoorziening in Nederland of Europa. Alleen de scores voor grondstofuitputting zijn voor PV en conventionele elektriciteitsopwekking grofweg gelijk. Dit wordt met name veroorzaakt door het gebruik van zilver.in zonnecellen.

## 6.6 CO<sub>2</sub> emissie en energieterugverdientijd

Voor de huidige generatie systemen in Nederland liggen de emissies rond de 110-120 g/kWh, terwijl dit voor Zuid-Europa 60-70 g/kWh bedraagt. Wanneer echter RGS/Solsilc modules toegepast worden daalt dit tot ca. 50 resp. 30 g/kWh. Daarmee scoort PV elektriciteit aanzienlijk beter dan conventionele elektriciteitsopwekking maar toch nog slechter dan biomassa en windmolens (resp. 20 en 8 g/kWh), ook als we gebruik maken van RGS/SolSilc technologie. Dit betekent dat PV technologie in termen van  $CO_2$  reductie per kWh toch een zeker nadeel heeft ten opzichte van concurrerende duurzame bronnen.

Energieterugverdientijden van PV systemen liggen in Zuid-Europa nu op 2.5-3.0 jaar<sup>15</sup> terwijl dit met RGS/Solsilc modules zou kunnen teruglopen tot 1.2 jaar. In Nederland liggen de terugverdientijden een stuk hoger, oplopend tot 6 jaar<sup>16</sup> voor een TNO/Axys systeem met standaard modules en 2.4 jaar voor PV-wirefree met RGS/Solsilc modules.

## 6.7 Verbeterpunten

De volgende technologische verbeteringen zouden bijdragen om de milieu-effecten van kristallijn silicium zonnecelsystemen te verminderen:

- betere benutting van silicium door efficiëntere productieprocessen en recycling;
- reductie van het zilvergebruik;
- monitoring van energie- en materiaalverbruik in cel- en moduleproductie en aandacht voor efficientie van overhead-energieverbruik;
- vermijding van CFK's in produktieprocessen;
- toepassing secundaire materialen in BOS componenten;

<sup>&</sup>lt;sup>14</sup> Dat wil zeggen impacts waarvoor de genormaliseerde score relatief hoog ligt, dit zijn global warming, acidification en energy

<sup>&</sup>lt;sup>15</sup> Uitgaande van verdringing van gemiddelde *W.-Europese* elektriciteitsopwekking.

<sup>&</sup>lt;sup>16</sup> Uitgaande van verdringing van gemiddelde *Nederlandse* elektriciteitsopwekking.

- verhoging conversierendement en verlenging levensduur van modules en inverters.

De volgende punten met betrekking tot de LCA van zonnecelsystemen zouden verdere verbetering behoeven:

- betere onderbouwing van schattingen met betrekking tot silicium- en waferproduktieprocessen;
- betere gegevens met betrekking tot milieu-ingrepen van elektronica in inverters, met name voor trafo's, spoelen en elektrolytische condensatoren.

## 6.8 Eindconclusie

Binnen de kristallijn silicium technologie liggen er goede mogelijkheden om het milieuprofiel van PV systemen te verbeteren, mogelijk met een factor twee. Daarmee zou PV technologie een aanzienlijk betere positie verkrijgen in de vergelijking met concurrerende duurzame opties zoals biomassa en wind. Harde garanties dat de geschetste verbetering zal worden gerealiseerd kunnen echter niet worden gegeven, omdat er nog aanzienlijke onzekerheden bestaan omtrent de mogelijk te realiseren procesrendementen en energiegebruikscijfers.

# 7 Referenties

Alsema, E.A. (1998), 'Energy Requirements of Thin-Film Solar Cell Modules - A Review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **2**, 4, p. 387-415.

Alsema, E.A. (2000a), 'Energy Pay-Back Time and CO2 emissions of PV Systems', *Progress In Photovoltaics: Research and Applications*, **8**, 1, p. 17-25.

Alsema, E.A. (2000b), Environmental Life Cycle Assessment of Solar Home Systems, Report NWS-E-2000-15, Dept. of Science, Technology and Society, Utrecht University, Utrecht.

Alsema, E.A., P. Frankl, and K. Kato (1998), *Energy Pay-back Time of Photovoltaic Energy Systems: Present Status and Prospects*, 2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, 6-10 July.

Alsema, E.A. and E. Nieuwlaar (2000), 'Energy viability of photovoltaic systems', *Energy Policy*, **28**, 14, p. 999-1010.

Alsema, EA and E Nieuwlaar (2002), Levenscyclusanalyse van fotovoltaïsche systemen met dak-opstelling - Een LCA studie gericht op de bijdrage van Balance-of-System componenten in het milieuprofiel van PV-systemen op daken, Report NWS-E-2002-04, Vakgroep Natuurwetenschap en Samenleving, Utrecht.

**Bruton, T., J. Woodcock, K Roy, et al. (1996)**, Multimegawatt upscaling of silicon and thin film solar cell and module manufacturing (MUSIC FM), Final Report, BP Solar, Sunbury-on-Thames.

Geerligs, L.J., G.P. Wyers, R. Jensen, O. Raaness, A.N. Waernes, S. Sant, A. Reinink, and B. Wiersma (2002), Solar-grade silicon by a direct route bases on carbothermic reduction of silica: requirements and production technology, NREL.

Guinée, JB, M Gorrée, R. Heijungs, et al. (2001), LCA - An operational guide to the ISO-standards, Final Report, CML, Leiden,.

Hagedorn, G. and E. Hellriegel (1992), Umwelrelevante Masseneinträge bei der Herstellung verschiedener Solarzellentypen - Endbericht - Teil I: Konventionelle Verfahren, Forschungstelle für Energiewirtschaft, München, Germany,

**Hässler, C., H.-U. Höfs, S. Thurm, O. Breitenstein, and M. Langenkamp (2000),** Electronic activity of inversion channels: exceptionally high short circuit currents >30 mA/cm2 on small grain ribbon growth on substrate (RGS) silicon.

Huijbregts, MAJ, L Breedveld, G Huppes, L de Koning, L van Oers, and S Suh (2003), 'Normalisation figures for environmental life-cyle assessment - The Netherlands (1997/1998), Western Europe (1995) and the world (1990 and 1995)', *Journal of Cleaner Production*, **11**, p. 737-748.

**Ibrahim, J and SW Johnston (1995)**, *High purity polysilicon production from silane by Fluidized Bed process,* Ethyl Corporation, Houston.

**IEA (1998)**, *Benign Energy? The environmental implications of renewables*, International Energy Agency, Paris,

Jester, T.L. (2002), 'Crystalline silicon manufacturing progress', *Progress In Photovoltaics: Research and Applications*, 10, 2, p. 99-106.

Jungbluth, N and R. Frischknecht (2000), Literaturstudie Ökobilanz Photovoltaikstrom und Update der Ökobilanz für das Jahr 2000, ESU-services, Uster, Switzerland.

Kato, K., A. Murata, and K. Sakuta (1998), 'Energy Payback Time and Life-Cycle CO2 Emission of Residential PV Power System with Silicon PV Module', *Progress in Photovoltaics*, 6, 2, p. 105-115.

Knapen, M., D. Anink, and G. Donze (2000), Solar Energy Systems: sustainable or not?, Eurosun, Copenhagen.

Knapp, KE and TL Jester (2001), 'Empirical investigation of the energy payback time for photovoltaic modules', *Solar Energy*, **71**, 3, p. 165-172.

**LIFE (2002)**, *SAHARA - A Task Force for the Creation of a Consortium to Set-up a SoG-Si Production Plant, Final Report,* LIFE S.R.L., Rome.

Nijs, J., R. Mertens, R. van Overstraeten, J. Szlufcik, D. Hukin, and L. Frisson (1997), *Energy payback time of crystalline silicon solar modules*, in: *Advances in Solar Energy*, Vol 11, K.W. Boer (Eds.), American Solar Energy Society, Boulder, CO, p. 291-327.

**Pehnt, M (2003)**, *data Bayer process*, personal communication, IFEU, Heidelberg, April/may 2003.

**Phylipsen, G.J.M. and E.A. Alsema (1995)**, *Environmental life-cycle assessment of multicrystalline silicon solar cell modules*, Report 95057, Dept. of Science, Technology and Society, Utrecht University, Utrecht.

**Rogers, L.C. (1990)**, *Polysilicon preparation,* in: *Handbook of semiconductor silicon technology*, W.C. O'Mara, R.B. Herring, and L.P. Hunt (Eds.), Noyes Publications, New Jersey, p. 32-93.

Schmela, M (2001), 'Let it grow - Market survey of crystal growth equipment', *Photon International*,Issue February, p. 31-35.

Schmela, M (2002a), 'Market survey on laminators', *Photon International*, Issue August, p. 41-52.

Schmela, M (2002b), 'Market survey on wire saws', *Photon International*, Issue May, p. 46-51.

Schmidt, W, B Woesten, and JP Kaleis (2002), 'Manufacturing technology for ribbon silicon (EFG) wafers and solar cells', *Progress In Photovoltaics: Research and Applications*, **10**, 2, p. 129-140.

**Sporenberg, H., D. Anink, and A. Veenstra (2002)**, *De gevolgen van het MMG voor de PV-branche*, Report nr. 2002-DEG-R028, TNO Bouw, Delft.

Suter, P. and R. Frischknecht (1996), *Ökoinventare von Energiesystemen, 3. Auflage,* ETHZ, Zürich.

Williams, E, RU Ayres, and M Heller (2002), 'The 1.7 kg microchip: Energy and material use in the production of semiconductor devices', *Environmental Science and Technology*, November 2002.

Woditsch, P and W Koch (2002), 'Solar grade silicon feedstock supply for PV industry', *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **72**, p. 11-26.

# Appendix 1: BOS-componenten-analyse ten behoeve van "PV duurzaamheid"

Ecofys rapport E21308



#### Ecofys bv

P.O. Box 8408 NL-3503 RK Utrecht Kanaalweg 16-G NL-3526 KL Utrecht The Netherlands www.ecofys.nl

tel +31 (0)30 280 83 00 fax +31 (0)30 280 83 01 e-mail info@ecofys.nl

# BOS-COMPONENTEN-ANALYSE TEN BEHOEVE VAN 'PV-DUURZAAM'

Dr. E.C. Molenbroek

**Februari 2003** E 21308 Copyright Ecofys,

in opdracht van: Utrecht Centrum voor Energieonderzoek (UCE) Met steun van: Novem (contractnr. 01460151500025)

# DANKWOORD

Bij deze dank aan de volgende personen die zich ingezet hebben om de informatie in dit rapport te verzamelen:

Voor de Philips inverter:	Onno van Tertholen, Philips Lighting
Voor de OK5-inverter:	Diederik Jaspers, NKF
Voor de onderconstructie:	Wouter Borsboom, TNO
	W.J. Koppen, VPO
Voor de bekabeling:	P. Deege, Ecofys

# INHOUDSOPGAVE

1	INL	EIDING	1
2	ACH	ITERGROND EN SELECTIE COMPO	NENTEN.2
	2.1	Inverters	2
	2.2	Onderconstructie en PV-modules	3
3	INV	ENTARISATIE - WERKWIJZE	5
	3.1	Tabellen	5
4	RES	BULTATEN	
	4.1	Overzicht systeem	7
	4.2	Inverters	9
	4.3	Bekabeling	10
	4.4	Onderconstructie	10
	4.5	Systeem	11

REFERENTI	ES		•••••		14
BIJLAGE I:	MATE	RIAALOVER	ZICHT	INVERT	ERS.15
BIJLAGE II	: BEKA	BELING			16
BIJLAGE Struct	:  E	MATERIAAI	LOVERZ	снт	CON- 18

## **1** INLEIDING

De BOS-componentenanalyse is een onderdeel van het project "Duurzaamheid van PV". Het project 'Duurzaamheid van PV' heeft als doel het bepalen van de milieuwaarde van netgekoppelde PV-systemen gemaakt met grootschalige productietechnologie op basis van kristallijn silicium. Hierbij wordt uitgegaan van technologie die naar verwachting rond 2010 in gebruik zal zijn.

Doel van de BOS-componentenanalyse is het bepalen van de componenten en materialen van een aantal BOS-concepten. De tijdshorizon van deze studie is eveneens 10 jaar. Echter, in tegenstelling tot de productietechnologie van de panelen is in deze studie uitgegaan van bestaande concepten, die naar verwachting rond 2010 nog in gebruik zullen zijn. Hiertoe is het volgende gedaan:

- Voor inverters is een globale inventarisatie van concepten gemaakt, op basis waarvan twee concepten zijn gekozen voor inventarisatie van componenten en materialen.
- Voor dakintegratietechnieken is een concept gekozen waarvan kan worden verwacht dat het op termijn van ongeveer 10 jaar (nog) in gebruik zal zijn.
- Van het systeem dat voor de dakintegratietechniek is gekozen, is een globaal elektrotechnisch ontwerp gemaakt ten einde de geselecteerde inverters mee te nemen en de hoeveelheden overige materialen (kabels) te kunnen bepalen.

Aan de hand van deze gegevens is de inventarisatie aan BOS-componenten ter input van de levenscyclusanalyse gemaakt.

## 2 ACHTERGROND EN SELECTIE COMPONENTEN

#### 2.1 INVERTERS

In een eerdere studie die BOS-componenten meegenomen heeft in de LCA van een PVsysteem bleek dat de inverter op de milieu-indicator 'terrestrische toxiciteit' een significante score maakte, terwijl de overige scoren in verhouding tot de PV-panelen gering waren<sup>1</sup>. Dit gaf aanleiding om in dit onderzoek twee zaken iets anders aan te pakken: (1) in de vorige inventarisatie zijn inverters geanalyseerd die opgenomen waren in werkelijk gerealiseerde systemen, terwijl in deze studie gekozen is om twee typen inverters uit te kiezen aan de hand van hun eigenschappen, en (2) in de huidige inventarisatie is een veel fijnere onderverdeling in materialen en componenten gemaakt, waarbij veel van de informatie direct van de fabrikant afkomstig is.

Voor de selectie van inverters is gebruik gemaakt van het inverteroverzicht van Photon van maart  $2002^2$ . In dit overzicht wordt het 'concept' van een inverter met vier kenmerken gekarakteriseerd:

- 1. Of de inverter een hoogfrequent, laagfrequent of helemaal geen transformator voor netscheiding heeft
- 2. De schakelfrequentie
- 3. Of het zelf een sinus genereert dan wel van het net kopieert,
- 4. Het type halfgeleider dat gebruikt wordt (IGBT, thyristor of powerMOSFET).

Wat betreft bovenstaande kenmerken is vooral het eerste kenmerk van belang wat betreft materiaalgebruik. Een inverter met laagfrequent trafo zal doorgaans meer materiaalgebruik vergen dan een inverter met een hoogfrequent trafo of zonder een trafo voor netscheiding. Naast bovenstaande kenmerken wordt in het overzicht zowel het uitgangsvermogen als het gewicht van de inverter gegeven.

De hoeveelheid gewicht per eenheid vermogen is voor deze inventarisatie een interessante parameter. Dit is nader onderzocht door het gewicht per kW van alle inverters uit het overzicht van Photon te nemen en deze uit te zetten tegen het gewicht van de inverter, zie figuur  $1^2$ . In Figuur 1a) zijn alle inverters te zien, waarbij het opvalt dat de grote inverters (> 10 kW) meestal meer gewicht per kW hebben dan de middelgrote. Wordt er ingezoomd op inverters < 10 kW in figuur 1b, dan blijkt er wel enige correlatie met van het specifiek vermogen (kW/kg) te zijn, maar er zijn ook kleine inverters bij die ook bij zeer laag vermogen al een zeer gunstig vermogen per kg hebben.



Figuur 1. b) kg/kW als functie van het nominaal uitgangsvermogen van de inverter b) idem, voor inverters tot 10 kW.

Het minimum lijkt rond de 5 kg/kW te liggen. Hiermee is uiteraard niet gezegd wat hiervan de oorzaak is en of deze inverters automatisch het meest milieuvriendelijk zijn. Naast het eerder genoemde kenmerk van de scheidingstrafo speelt de behuizing een belangrijke rol in het gewicht en daarmee het materiaalverbruik. De behuizing kan van kunststof of van metaal zijn. Waarschijnlijk hangt ook het IP-nummer van de behuizing met het gewicht samen. Grotere inverters dienen buiten geplaatst te kunnen worden en worden daardoor zwaarder uitgevoerd.

Uiteindelijk is besloten twee typen inverters elk met een nominaal vermogen van 300 W nader te onderzoeken. Het gelijke vermogen maakt vergelijking makkelijker. Beide typen scoren gunstig qua kg/kW (3.4 respectievelijk 5.0 kg/kW), komen eind dit jaar op de markt en zullen naar verwachting enige jaren op de markt blijven, waarmee zo veel mogelijk aan het criterium van de tijdshorizon van 10 jaar voldaan wordt. Het zijn tevens twee typen van Nederlandse makelij die naar verwachting de komende jaren veel toegepast zullen worden.

### 2.2 ONDERCONSTRUCTIE EN PV-MODULES

Voor de onderconstructie is besloten het systeem ontwikkeld door TNO/Axys en toegepast in de Stad van de Zon (HAL-lokatie) te analyseren. Het systeem is nog redelijk nieuw, scoort gunstig qua prijs, voldoet aan bouwkundige eisen die aan een dak gesteld worden en zal naar verwachting ook enige jaren meegaan.

Ten behoeve van LCA-analyse is de vraag gesteld wat het effect is van het vergroten van de maat van modules. Aan de ene kant zou materiaal bespaard kunnen worden, zoals frames van de modules en mogelijk ook onderconstructie. Aan de andere kant vergt een grotere module meer dragermateriaal om bij een grotere overspanning de mechanische sterkte op peil te houden. Een korte analyse heeft opgeleverd dat, uitgaande van een modulemaat van rond de 1 m<sup>2</sup>, het vergroten van de modulemaat vanuit het oogpunt van het besparen van materialen waarschijnlijk weinig zin heeft.

Bij het vergroten van de lengte van een PV-module bij constante breedte dient, om de spanning in het glas constant te houden, de dikte van het glas evenredig toe te nemen met de lengte van de module. Dit houdt in dat het gewicht van een module per Wattpiek ook vrijwel evenredig toeneemt. Dit betekent dus meer modulemateriaal per Wp, en waarschijnlijk ook meer materiaal voor de draagconstructie. Hoewel dit slechts een grove theoretische benadering is op basis van de berekende spanning in het glas (geen rekening houdend met zaken als maximale buigstraal van de cellen, effect van lamineren met Tedlar o.i.d., al dan niet voldoende inklemdiepte van het glas in het frame, mogelijkheid tot het aanpassen van het frame, eventuele wens tot optimalisatie verhouding lengte en breedte van de module) kan het effect geïllustreerd worden met een voorbeeld uit de praktijk: een ASE-module van 100 W en 0.83 m<sup>2</sup> oppervlak weegt 8.5 kg, terwijl een ASE-module van 252 W en 2.17 m<sup>2</sup> oppervlak 55 kg weegt! Dit betekent 2.5 maal zoveel gewicht per Wp, terwijl het oppervlak eveneens met een factor 2.5 toeneemt. De dikte van het frame gaat hierbij van 35 naar 51 mm.

# **3 INVENTARISATIE - WERKWIJZE**

De werkwijze voor het bepalen van het materiaalgebruik van de geselecteerde componenten en het daaruit opgebouwde systeem is gebaseerd op de werkwijze en ervaring uit een eerder project waarin LCA-analyse van BOS-componenten is verricht<sup>3</sup>. In het voorgaande project is een analyse van werkelijk bestaande systemen gedaan. De analyse in dit rapport is gebaseerd op een systeem, waarvan de onderconstructie, systeemgrootte en het moduletype overeenkomt met werkelijk geplaatste systemen in de Stad van de Zon.

De elektrische configuratie is echter aangepast vanwege de keuze van de invertertypen. Hiervoor is een globaal ontwerp gemaakt, op basis waarvan de gebruikte componenten en materiaalhoeveelheden bepaald konden worden. Er is voor zover mogelijk gebruikt gemaakt van componenten en kabeltypen die in de vorige studie reeds geanalyseerd waren. Voor gebruikte materialen en materiaalhoeveelheden van de inverters is overleg gepleegd met de fabrikanten. Beide fabrikanten hebben de materiaalhoeveelheden voor hun inverters aangeleverd. Van de onderconstructie hebben TNO en projectontwikkelaar VOS gegevens aangeleverd.

Evenals in de vorige studie volgt hieronder een toelichting van de tabellen 'Overzicht systeem' en 'Overzicht materialen'. Alle tabellen zijn als spreadsheet bijgeleverd.

#### 3.1 TABELLEN

Allereerst zijn in een overzichtstabel de belangrijkste gegevens van het PV-systeem weergegeven. Tevens is een energieopbrengst per jaar gegeven. Dit is de energieopbrengst gebaseerd op de opbrengst van een state-of-the-art PV-systeem voor een klimatologisch gemiddeld jaar in De Bilt (974 kWh/m<sup>2</sup>) bij optimale hellingshoek en oriëntatie. Er zijn geen gegevens zijn die specifiek voor het woningblok (zoals hellingshoek en orientatie) meegenomen. Dit is met opzet gedaan om vergelijking met andere systemen mogelijk te maken.

De inventarisatie van de gebruikte materialen is opgedeeld in de categorieën Inverter, Bekabeling(+overige), Constructie.

Op de geschatte geïnstalleerde kabellengte is dit maal geen extra lengte ten behoeve van het installeren meegenomen.

De categorie 'bekabeling' bevat overigens ook componenten uit de groepenkast die de PV op het net aansluit.



De hoeveelheden en type materiaal voor de constructie van het TNO/Axys systeem is bepaald door middel van tekeningen en enkele voorbeeldstukjes, die gewogen konden worden om het gewicht per lengte-eenheid te bepalen.

Uit de tabellen Inverter, Bekabeling en Constructie, die alle in de bijlagen (en bijgeleverde spreadsheets) zijn weergegeven, is door eenvoudig optellen een overzichtstabel van de gebruikte materialen per systeem gemaakt.

In de tabellen is de in het globaal ontwerp toegepaste verhouding invertervermogen/paneelvermogen als uitgangspunt genomen.

### 4.1 OVERZICHT SYSTEEM

De analyse in dit rapport is gebaseerd op een systeem, waarvan de onderconstructie, systeemgrootte en het moduletype overeenkomt met werkelijk geplaatste systemen in de Stad van de Zon. Een foto van dit systeem is hieronder weergegeven.



Figuur 2: systeem met BP Solar panelen en onderconstructie ontwikkeld door TNO/Axys, HAL-lokatie. Foto: J.Oldengarm, TNO Bouw

Een overzicht van de belangrijkste systeemparameters zijn gegeven in tabel I.

Nominaal vermogen systeem	3.4	kWp	Opmerkingen
Aantal panelen	40		
Nominaal vermogen panelen	85	Wp	BP Solar
Afmetingen	1204x537	mm	voor het laminaat
Gewicht	7.7	kg	voor een module inclusief frame
Aantal cellen / module	36		
Afmetingen cellen	125 x 125	mm	'Pseudosquare'
nominaal vermogen inverter	0.3	kW	
Aantal inverters	10		4 modules in serie per inverter
Oppervlakte	30.8	m <sup>2</sup>	
Energieopbrengst systeem	3000	kWh	geschat door BPS
Verhouding inverter / paneelvermogen	0.88		

#### Tabel I Systeemparameters

Voor de Philips inverter is de elektrische configuratie is schematisch weergegeven in figuur 2 voor de Philips inverter. De Philips inverters kunnen alleen binnen geplaatst worden.



Figuur 2 schema van het 3.4 kWp-systeem uit de HAL locatie uitgevoerd met Philips inverter

Van de OK5-inverter is in figuur 3 een voorbeeldschets van een deelsysteem gegeven. In tegenstelling tot wat de schets suggereert, is aangenomen dat er een aparte groep gemaakt zou zijn voor de PV, wat inhoudt dat er een aparte ac-kabel van het dak / de zolder van een huis naar de meterkast geïnstalleerd zou worden. Ook is in de analyse aangenomen



dat de OK5-inverters buiten (achter de modules) gemonteerd zijn in plaats van binnen. Voor de OK5 is dit allebei mogelijk.



Figuur 2: Voorbeeldschets van deel van PV-systeem met OK5 inverter (afkomstig uit productinformatie NKF).

### 4.2 INVERTERS

In Bijlage I is een overzicht gegeven van de hoeveelheden en aard van de materialen toegepast in de OK5-inverter van NKF respectievelijk de Philips inverter.

Elektrische contacten worden nog veelal met loodhoudende soldeer gemaakt. Het loodgehalte in soldeer dient volgens een EU-richtlijn die in ontwikkeling is binnen een aantal jaren tot nul teruggebracht te worden. De verwachting is dat het er over 10 jaar, de tijdshorizon van deze studie, niet meer in zit. Het soldeer komt niet explicitiet in de materiaalhoeveelheden voor omdat er uitgegaan is van het wegen van losse componenten en het soldeer qua gewicht zeer weinig toevoegt.

Beide inverters zijn ontworpen voor een levensduur van twintig jaar. De gebruikte componenten zijn hier ook op uitgezocht. Een levensduur van twintig jaar is uiteraard nog niet in het veld aangetoond. Momenteel wordt aangenomen dat inverters ongeveer tien jaar meegaan. Garanties op inverters tot vijf jaar met geringe meerkosten worden al regelmatig afgegeven. Echter, van de inverters die over tien jaar geplaatst zullen worden lijkt het niet onredelijk om aan te nemen dat deze 15 jaar mee kunnen gaan.

### 4.3 BEKABELING

Er is verondersteld dat vanaf het dak waar het PV-systeem ligt, 13 m bekabeling nodig is om in de meterkast uit te komen.

De aardkabel wordt gebruikt om de aluminium profielen door te verbinden en komt eveneens in de meterkast uit. Dezelfde kabeltypen zijn gehanteerd in het globaal ontwerp voor beide typen inverters. Verschillen in kabellengte ontstaat doordat aangenomen is dat OK5 inverters buiten op het dak gemonteerd worden, terwijl de Philips inverters binnen gemonteerd worden. De O5 inverters zouden ook binnen geplaatst kunnen worden. Tabel II laat zien wat de aannamen zijn voor de hoeveelheden kabel, afhankelijk van of de inverters binnen of buiten geplaatst zijn.

Tabel II Kabellengtes

	Philips / OK5-binnen (m)	OK5 - buiten (m)	
modules onderling - dc (1 ader)	97.5		97.5
module naar inverter - dc (1 ader)	60		16
inverters onderling - ac (2/3 aders)	0		7
zolder - meterkast - ac (2/3 aders)	10		13
aardkabel	17.5		17.5

Daarnaast is aangenomen dat het Philips systeem een 3-aderige ac-kabel heeft, terwijl het OK5 systeem een 2-aderige kabel heeft. In het ontwerp met de inverters binnen geplaatst geeft het toepassen van een 2-aderige kabel in plaats van 3-aderige kabel overigens minder dan 2% reductie in de totale (gewichts)hoeveelheid kabel.

Om het OK5-systeem met de inverters binnen door te rekenen kan de kolom 'bekabeling' uit het Philips-systeem (tabel III) genomen worden.

## 4.4 ONDERCONSTRUCTIE

In dit constructiesysteem vervullen de panelen geen waterkerende functie, maar is een EPDM-folie onder de panelen toegepast om deze taak over te nemen.

Wat de onderconstructie betreft: het PV systeem bestaande uit verticalen profielen wordt rechtstreeks aangebracht op EPDM. Deze zelfklevende EPDM dakbedekking wordt op het dakbeschot aangebracht. Voor de vergelijking met een pannendak dienen tengels en panlatten dus nog afgetrokken te worden. In plaats van een gewone dampremming wordt een Hygrodiode ingezet. Dit is een folie die uit meerdere lagen bestaat en die 's zomers vocht naar buiten kan afvoeren en winter geen vocht doorlaat.

De PV panelen zitten boven en onder met in totaal 4 clips op de profielen. Aangezien elke clip 2 panelen inklemt zijn er 2 clips per paneel.

Bij dit systeem worden geframede modulen ingezet, type BP 585 F. Het materialenoverzicht van de onderconstructie is weergegeven in Bijlage III.



Met het vergelijken van de hoeveelheid aluminium per systeemeenheid van dit systeem met het BOAL profielensysteem dat in het eerdere project geanalyseerd is, valt op dat er in dit systeem veel meer aluminium gebruikt wordt. De verticale profielen in het BOAL systeem wegen 0.43 kg/m, terwijl de verticale profielen van het TNO/Axys-systeem 0.83 kg/m bevat (90% meer). Uitgedrukt in kg/kWp bevat het TNO-systeem zoals hier geanalyseerd 10.7 kg/kWp voor TNO tegenover 5.8 kg/kWp voor het systeem met BOAL geanalyseerd in het vorige project (85% meer). Daar komt nog bij dat het TNO/Axyssysteem geframede modules bevat terwijl het BOAL systeem uitgaat van laminaten met 1 strip aluminium. Al deze getallen variëren uiteraard met modulegrootte, maar duidelijk is dat er grote verschillen in materiaalgebruik zijn tussen de twee systemen.

### 4.5 SYSTEEM

In tabel III is een overzicht van materialen gegeven in een systeem met Philips inverters en in tabel IV is een overzicht van materialen gegeven in een systeem met OK5 inverters.

gewicht per kWp PV	4.5	7.0	32.7	43.8
TOTAAL PER ONDERDEEL	15.25	23.85	111.21	148.97
RVS			3.30	3.30
EPDM (zelfklevend, gewapend)			71.14	71.14
aluminium (not primary)			36.40	36.40
TPE, Thermoplastic Elastomer		0.19		
messing + 6 $\mu$ m tin		0.15		
PA+metaal, 1/4 3/4		0.03		0.03
XLEVA <sup>2</sup>		13.25		
EPR rubber		3.67		
XLPE		0.49		0.64
drakavinyl (PVC)	0.02	0.73		0.90
elektrolytisch koper	0.02	5.34		5.28
steel, electrogalvanized	0.20			
transistor diode, general	0.10			
capacitor, CMC	0.05			
resistor (5MD)	0.01			
PWB (FR-4, 297,5 cm <sup>2</sup> )	1.01			
connector (av)	0.02			
ELCO	0.32			
film capacitor	0.43			
transistor (upright 2/3 pin)	0.08			
IC	0.06			
coil (average)	0.47			
wire-wound (average)	2.89			
'kunststof'	0.51		0.01	
ABS thermoplast <sup>1</sup>	1 48		0.36	1 84
aluminium (primary)	6.82			6.82
PE (average)	0.00			0.01
Ilzer	0.08			0.08
Polycarbonaat	0.68			0.68
Water aantype / component	(10  stuks)	bekabeling	constructie	MATERIAAL (kg)
Materiaalture / component	Inverter	bekebeling	ondersteunings	TOTAAL DED

Tabel III: materiaaloverzicht systeem met Philips inverters

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Acrylonitrile Butadiene Styrene <sup>2</sup> crosslinked Ethylene Vinyl Acetate

Materiaaltype / component	Inverter (10 stuks)	bekabeling	ondersteunings- constructie	TOTAAL PER MATERIAAL (kg)
Printed Circuit Board <sup>3</sup>	0.77			0.77
Electronica	0.29			0.29
Keramiek (trafo kern)	0.62			0.62
Keramische condensatoren SMD	0.06			0.06
Electrolytische condensatoren	0.41			0.41
PBT kunststof (Pocan, Bayer)	5.71			
Evopreen kunststof	0.08			
Koper	0.45			
Aluminium	0.96			
Kunststof: bakeliet / phenolhars	0.17			
Aluminium	0.58			
Staal	0.02			
Kunststof/koper	0.16			
Div. / polyester	0.02			
elektrolytisch koper		4.70		4.44
drakavinyl (PVC)		1.14		1.23
XLPE		0.96		0.99
EPR rubber		2.64		
XLEVA		9.55		
PA+metaal, 1/4 3/4		0.03		0.03
messing + 6 mm tin		0.15		
TPE, Thermoplastic Elastomer		0.19		
ABS thermoplast			0.36	
kunststof			0.01	
aluminium (not primary)			36.40	36.40
EPDM (zelfklevend, gewapend)			71.14	71.14
RVS			3.30	3.30
TOTAAL PER ONDERDEEL	10.30	19.35	111.21	136.91
gowight nor hW- DV	3.0	5 7	22.7	40.3
gewicht per kwp PV	3.0	5./	32.1	40.3

### Tabel IV: materiaaloverzicht systeem met OK5 inverters

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Kunststof/koper/tin

## REFERENTIES

 <sup>&</sup>lt;sup>1</sup> E.A. Alsema, E. Nieuwlaar, 'Levenscyclusanalyse van fotovoltaïsche systemen met dak-opstelling', Rapport NWS-E-2002-04, juli 2002.
<sup>2</sup> Photon, maart 2002
<sup>3</sup> E.C. Molenbroek, P. Deege, 'Inventarisatie materiaalverbruik BOS-

E.C. Molenbroek, P. Deege, 'Inventarisatie materiaalverbruik BOScomponenten', Ecofys rapport nr. E21085.



# BIJLAGE I: MATERIAALOVERZICHT INVERTERS

(vertrouwelijk, niet in openbare rapport)

# **BIJLAGE II: BEKABELING**

#### Onderdeel Type Materiaal lengte (m) Totale hoeveelheid (kg) Aardkabel (DC+AC) Geleider elektrolytisch koper, 10 mm2 1.56 17.5 drakavinyl (PVC), opp. 9.9 Isolatie 17.5 0.23 mm2 DC-bekabeling Draka DC kabel elektrolytisch koper, 2.5 mm2 157.5 3.12 EPR rubber 157.5 3.67 XLEVA (cross linked Ethylene 157.5 13.25 Vinyl acetate) AC-bekabeling 10 Geleiders elektrolytisch koper 0.67 Iso-1: mantel om ko-PVC 10 0.07 per Iso-2: middensteman- XLPE 10 0.49 tel 10 PVC Iso-3: buitenmantel 0.44 MultiContact connec-metaaldeel (messing met 6um 30 0.15 toren tin) isolatiedeel (TPE, Thermoplas-0.19 30 tic Elastomer)

#### **Met Philips inverters**
# ECO**FYS**

#### Met OK5 inverters

Onderdeel	Type Materiaal	lengte (m)	Totale hoe- veelheid (kg)
Aardkabel (DC+AC)			
Geleider	elektrolytisch koper, 10 mm2	17.5	1.56
Isolatie	drakavinyl (PVC), opp. 9.9 mm2	17.5	0.23
DC-bekabeling			
Draka DC kabel	elektrolytisch koper, 2.5 mm2	78	1.54
	EPR rubber	78	1.82
	XLEVA (cross linked Ethylene Vinyl acetate)	78	6.56
AC-bekabeling			
Geleiders	elektrolytisch koper	20	1.34
Iso-1: mantel om ko- per	so-1: mantel om ko-PVC		0.13
Iso-2: middensteman- XLPE		20	0.99
Iso-3: buitenmantel	PVC	20	0.88
MultiContact connec- toren	metaaldeel (messing met 6um tin)	30	0.15
	isolatiedeel (TPE, Thermoplas- tic Elastomer)	30	0.19



# BIJLAGE III: MATERIAALOVERZICHT CON-Structie

Onderdeel	Type Materi- aal	Aan- tal	Lengte/ opp. (m/m2)	Gew./ lengte	Totaal (kg)	Opm.
				(kg/m)		
Verticale profiel (+ aluminium clips)	aluminium	24	44		36.4	/m
EPDM strip onder het profiel			44	0.07	2.992	/m
EPDM dakbedekking			40	1.700	68	/m2
ring	kunststof		192	0.3 gram	0.01	
schroef + (RVS clips)	rvs		192		3.30	
clips	ABS thermoplast		72		0.36	
Dakdoorvoer: EPDM manchet + kunst-	EPDM	1.00	0.4 m2	n.v.t.	0.15	0.15 kg heel
stof buis (0,3 m)						dak
Totaal					111	

## Appendix 2: Life Cycle Inventory data: PV-wirefree

Notitie ten behoeve van project "PV duurzaamheid"

ECN, Augustus 2003

## LCI (Life Cycle Inventory) data: PV-wirefree<sup>1</sup>

Bron:	Henk Oldenkamp ( <u>Henk.Oldenkamp@NKF.nl</u> ) &
	Bart de Boer ( <u>b.deboer@ecn.nl</u> )
Samensteller:	Mariska de Wild
Datum:	8-8-2003

Aan de materialen wordt als eis gesteld dat de levensduur minimaal 20 jaar is.



#### **PV** wirefree laminaat

#### PV wirefree module connector

Ter vervanging van aluminium frame, junction box en hoge spanning DC connector.



De opbouw van de connector is volgens het laatste onderwerp en is dus nog in ontwikkeling

Aan 1 module zitten 2 elektrische connectoren vast (aangezien er connectoren gedeeld worden met de buurpanelen: 1 elektrische connector per module). In een eerder ontwerp was dit aan 1 module 4 connectoren, waarvan 2 elektrisch. Het is afhankelijk van de tengelmaat welke variant gekozen wordt.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> <u>http://www.pv-wirefree.com/</u>

Kunststof. De eerst gekozen materialen zijn geselecteerd op hoge brandwerendheids eisen. Dit blijkt echter niet noodzakelijk. Derhalve lijkt het mogelijk om milieuvriendelijker materialen toe te passen. Een keuze is nog niet gemaakt. Er wordt gekeken naar materialen als Lexan en Valox.

#### PV wire free stroom bus/rail/drager/geleider

Ter vervanging van high voltage DC kabels en gedeelte van support structuur.

### Bekabeling

#### Inverters



De inverter is nog in ontwikkeling. Het wordt de OK6 (een rij-inverter oftewel 1 inverter per rij panelen).

De plek in het systeem wordt buiten, onder het laminaat.

#### Onderdak

EPDM

#### GEEN

geen: stekkers

geen: veiligheidsonderdelen/onderdelen ter voorkoming hot spots zoals class II isolatie, bypass of bedrading van de bypass diodes geen: hoge spanning DC connectoren, hoge spanning DC kabels geen: blocking diodes

geen: DC zekeringen

geen: veiligheidsmaatregelen wegens hoge DC-voltage zoals overvoltage protection, DC isolatie monitoring, aarding van het systeem.

Tabel I Systeemparameters

			Opmerkingen
Nominaal vermogen systeem	3.4	kWp	
Aantal panelen	40		
Nominaal vermogen panelen	85	Wp	BP Solar
Afmetingen	933 x 677	mm	voor het laminaat
Gewicht	ca 7	kg	glas van 4 mm dik
Aantal cellen / module	35		5 kolommen van 7 cellen in serie
Afmetingen cellen	125 x 125	mm	
nominaal vermogen inverter	600	kW	
Aantal inverters	5		8 modules parallel per inverter
Oppervlakte	25	m²	
Energieopbrengst systeem	3150-3300	kWh	De verwachting is dat er 5-10% meer opbrengst is, vergeleken met standaard systemen. $3000 \times 1,05 = 3150$ $3000 \times 1,10 = 3300$
Verhouding inverter / paneelvermogen	0,88		= 3000/3400

#### Tabel II Kabellengtes

	OK6 - buiten (m)
modules onderling - dc (1 ader)	
module naar inverter - dc (1 ader)	
inverters onderling - ac (2/3 aders)	7
zolder - meterkast - ac (2/3 aders)	13
aardkabel	

Dezelfde lengte genomen als Edith.

## **BIJLAGE I: MATERIAALOVERZICHT**

#### PV Wirefree systeem met 40 modules

Onderdeel	Type materiaal/component	Totale hoe- veelheid (kg)
40 x (1 PV wirefree module		
connector / module):		
40 x (contact 2x)	aluminium 40 x 2 x 1,2 cm <sup>3</sup>	0,26
40 x (veertje/spring 2x)	rvs? 40 x 2 x $cm^3$	?
40 x klem/clamp	kunststof 40 x 2,88 cm <sup>3</sup>	0,11
40 x deksel/cover	kunststof ? 40 x cm <sup>3</sup>	?
40 x voetje/pod (voor verbinding connector met EPDM)	kunststof 40 x 11,58 cm <sup>3</sup>	0,45
PV wirefree stroom bus/rail/drager/geleider	aluminium geëxtrudeerd 40 x 2 x 0.7 m x 150 mm <sup>2</sup>	22.7
5 OK6 inverters		
grootte OK6 = 1,5 x OK5		
5 x heat sink	aluminium 5 x 546 cm°	7,4
5 x (isolatieblokjes 2x)	kunststof 5 x 2 x 70 cm <sup>3</sup>	0,672
5 x Plus-plaat (voor bevestiging van inverter aan stroom bus)	aluminium 5 x 46 cm <sup>3</sup>	0,62
5 x Min-plaat (voor bevestiging van inverter aan stroom bus)	aluminium 5 x 39 cm <sup>3</sup>	0,53
	Totaal:	

aluminium (2.702 g	g/cm <sup>3</sup> ) 3	1,5
	J - /	,

?

rvs kunststof (HDPE 0,96 g/cm<sup>3</sup>) > 1,23

# **BIJLAGE II: BEKABELING**

Dezelfde lengtes genomen als Edith.

Onderdeel	Type Materiaal	lengte (m)	Totale hoe- veelheid (kg)
AC-bekabeling			
Geleiders	elektrolytisch koper	10	0,67
lso-1: mantel om koper	PVC	10	0,07
Iso-2: middenstemantel	XLPE	10	0,49
Iso-3: buitenmantel	PVC	10	0,44
MultiContact connectoren ?	metaaldeel (messing met 6um tin)		
	isolatiedeel (TPE, Thermoplastic Elastomer)		

EPDM onderdak. Bevestiging van de connectoren aan de EPDM m.b.v. EPDM schroeven van RVS doorsnede 6,5 mm en lengte 66 mm.

Dezelfde gegevens nemen als Edith.