

**TNO-rapport**

**2003-DEG-R011**

**Invloed vervuiling op de energieopbrengst van  
PV-elementen**

Datum 3 april 2003

Auteur(s)  
m.m.v. ing. H.P. Oversloot  
ing. M. Tijssen  
ing. M.N. Slappendel  
ir. B.J.M. van Kampen

Aantal pagina's 42  
Aantal bijlagen 6

Opdrachtgever Novem  
Novemnummer 146.230-142.1

Projectleider ing. H.P. Oversloot  
Projectnaam PV en Vervuiling  
Projectnummer 006.06601/01.01

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, foto-kopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor onderzoekopdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belang-hebbenden is toegestaan.

## Samenvatting

Tot op heden hebben in Nederland nog geen onderzoeken plaatsgevonden die bruikbare, kwantitatieve informatie geven over de vervuiling van PV-systemen in Nederland. Dit onderzoek, dat financieel ondersteund is door Novem, gaat in op een aantal aspecten van deze materie. Dit is bijvoorbeeld de hellingshoek van de panelen en de gevoeligheid voor vervuiling van verschillende soorten materialen, zoals glas, kunststof, ruw/glad oppervlak, vuilwerende coatings e.d. Om zoveel mogelijk invloedsfactoren uit te sluiten, is alleen de lichttransmissie door de transparante beschermlaag gemeten, dus zonder de actieve PV-cellen. Vermindering van lichttransmissie vertaalt zich namelijk (met voldoende nauwkeurigheid) rechtstreeks in opbrengstvermindering van het PV-systeem.

Naast een literatuur onderzoek, betreffende het optreden van vervuiling in Nederland, is een expositie proef ingericht, waarbij geselecteerde monsters onder verschillende hellingshoeken gedurende 1 jaar is blootgesteld. Voor de volledigheid is ter vergelijking ook een viertal modules bij een kleine hellingshoek getest. De proeven zijn uitgevoerd op het TNO Zuidpolder terrein in Delft.

De blootgestelde monsters zijn na 1 jaar in het laboratorium doorgemeten op transmissie. Daarna zijn de monsters gereinigd volgens adviezen van TNO PTC. De vier panelen zijn volgens een standaard flitstest doorgemeten bij ECN voor en na reiniging.

De uitkomsten van de buitenexpositie tonen voor de kunststof folies een verband met de hoek van opstelling, waarbij horizontale expositie meer vervuiling toont. Voor glasmonsters is dit verband niet zonder meer aantoonbaar. De gemeten vervuiling aan de kleine samples levert een relatieve afname in transmissie van maximaal 3% bij glas en 7% bij kunststof. De metingen aan de panelen tonen een afname in vermogen van 4,5% tot 7% voor gestructureerde glas en kunststof panelen. Een vlak glazen paneel toonde een terugval van 2%.

De spectrale metingen aan de kunststof folies laten zien, dat het vuil een spectraal verloop met de golflengte veroorzaakt. Hierdoor zal een amorf paneel van een identieke vuillaag iets meer last hebben dan een mono- of multikristallijn paneel.

De metingen tonen niet aan dat de cleanshield coating een positief effect heeft op de vervuiling van de monsters. De betreffende samples waren na afloop van de proef ook niet meer hydrofoob, wat erop duidt dat de laag verdwenen is.

Reinigen van panelen, waarvan de waarde van de geleverde elektriciteit op huishoudelijk tarief wordt afgerekend, is zonder meer lonend. Voor panelen die tegen grootverbruikerstarief worden afgerekend, ligt dit in een kritische zone. Reinigen wordt lonend als per jaar meer dan 3,5% elektriciteit meer wordt geleverd. Rekening houdend met het effect dat de reiniging slechts tijdelijk is, dient hiervoor de jaarlijkse vervuiling rond 6% te liggen. Dergelijke vervuiling wordt gemeten bij de buitenexpositie, maar een en ander betekent dat per geval moet worden bekeken aan de hand van prijsopgaven of reinigen zin heeft. Het lijkt echter wel raadzaam eenmalige schoonmaak acties van zwaar vervuilde panelen te ondernemen.

# Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Doelstelling, vragen en organisatie</b>	<b>5</b>
2.1	Doelstelling	5
2.2	Onderzoeksvragen	5
2.3	Organisatie	6
<b>3</b>	<b>Huidige kennis</b>	<b>7</b>
3.1	Soorten vervuiling	7
3.2	Invloed vervuiling (uit literatuur)	7
3.3	Plaatsafhankelijkheid	7
<b>4</b>	<b>Onderzoeksprogramma</b>	<b>9</b>
4.1	Samples	9
4.2	Hellingshoeken	10
4.3	Buitenexpositie	11
4.4	Lichttransmissie en normalisatie	11
4.5	Meetinstrumentatie	13
4.6	Programma pilotmetingen	13
4.7	Reinigen van de monsters	14
4.8	Visuele indruk na het reinigen	15
<b>5</b>	<b>Resultaten van de buitenexpositie</b>	<b>16</b>
5.1	Algemeen bij de buitenexpositie	16
5.2	Resultaten van de geïntegreerde metingen	17
5.2.1	Conclusies ten aanzien van de metingen aan de kleine samples	24
5.3	Meting van het vermogen aan complete panelen	24
5.3.1	Conclusies ten aanzien van de expositie van de panelen	25
5.4	Globale vertaling van de metingen naar de energieopbrengst in Nederland	25
5.4.1	Conclusies ten aanzien van reiniging	29
<b>6</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>30</b>
6.1	Conclusies getrokken uit observatie van de monsters	30
6.2	Conclusies ten aanzien van de metingen aan de kleine samples	30
6.3	Conclusies ten aanzien van de expositie van de panelen	30
6.4	Conclusies ten aanzien van reiniging	31
<b>7</b>	<b>Referenties</b>	<b>32</b>
	<b>Bijlage(n)</b>	
	Bijlage A Vervuilingkaarten van Nederland	33
	Bijlage B Winter condities ijs en rijpvorming	35
	Bijlage C Verschillende soorten vervuiling	37
	Bijlage D Vervuiling vergelijkbare systemen van dezelfde locatie en periode	39
	Bijlage E Microscopische opname van vervuiling	40
	Bijlage F Gegevens vermogensmeting	42

# 1 Inleiding

Een veel gehoorde vraag is wat de invloed is van vervuiling van het PV-element door stof/aarde, algaanslag, chemische verontreiniging, vogelfeces e.d. op de energieopbrengst. Vooral bij PV-elementen die onder een kleine hellingshoek staan opgesteld, kan de vervuiling een probleem gaan vormen.

Tot op heden hebben in Nederland nog geen onderzoeken plaatsgevonden die hierover bruikbare, kwantitatieve informatie geven. Uit onderzoek in de kassenbouw blijkt dat in sterk verontreinigde gebieden de vervuiling van het glas kan leiden tot een lichtverlies van ca. 10% [1]. Hoe groot is dit effect en welke rol speelt dit bij PV-systemen? Wordt deze lichtvermindering alleen veroorzaakt door vervuiling of misschien ook door degradatie van het glas zelf (bijv. door uitloging als gevolg van regen of degeneratie door UV)?

Deze vragen hebben bij dit onderzoek, dat financieel ondersteund is door Novem, gestaan. Hierbij zijn ook aspecten meegenomen zoals de invloed van de hellingshoeken (hoek van module t.o.v het maaiveld) en de gevoeligheid voor vervuiling van verschillende soorten materialen zoals glas, kunststof, ruw/glad oppervlak, vuilwerende coatings e.d. Om zoveel mogelijk invloedsfactoren uit te sluiten, is alleen de lichttransmissie door de transparante beschermlaag gemeten, dus zonder de actieve PV-cellen. Vermindering van lichttransmissie vertaalt zich namelijk (met voldoende nauwkeurigheid) rechtstreeks in opbrengstvermindering van het PV-systeem. Voor de volledigheid is ter vergelijking ook een viertal modules bij kleine hellingshoek getest

Op basis van de resultaten is vastgesteld wat de minimale hellingshoek zou moeten zijn voor een voldoende natuurlijke schoonspoeling. Ook is, afhankelijk van de hellingshoek en soort materiaal, een advies gegeven over de frequentie en middelen waarmee de PV-elementen, zonder kans op aantasting en beschadiging, kunnen worden schoongemaakt en is de financiële haalbaarheid hiervan berekend (m.b.v. kosten/batenanalyse).

Tenslotte is een inschatting gegeven van de invloed van vervuiling op de energieopbrengst van de PV-systemen die in Nederland geïnstalleerd zijn en is op basis hiervan vastgesteld hoe groot de geldbesparing is die door frequent schoonmaken op landelijk niveau te verwachten is.

De resultaten van dit onderzoek zijn bestemd voor eigenaren van PV-systemen op woonhuizen (eigenaar-bewoners, woningbouwverenigingen, verenigingen van eigenaren, energiebedrijven e.d.) en voor eigenaren van PV-installaties op/aan utiliteitsbouw (bedrijven, projectontwikkelaars, energiebedrijven e.d.). Met de resultaten kunnen zij voor de eigen situatie bepalen of het reinigen van PV-elementen noodzakelijk is en zo ja, hoe vaak dit dan moet gebeuren c.q. of dit financieel verantwoord is.

Door middel van de aan dit onderzoek gekoppelde klankbordgroep hebben Akzo Nobel, ECN, Free Energy Europe, Neco, Scheuten Solar Systems, Shell Solar en Siemens hun waardevolle ervaring en expertise met betrekking tot vervuiling van PV ingebracht, waarvoor hartelijk dank.

In hoofdstuk 2 worden de doelstelling, onderzoeksvragen en -aanpak behandeld. In hoofdstuk 3 gaan we in op de momenteel beschikbare gegevens over PV-vervuiling. In hoofdstuk 4 wordt in het onderzoeksprogramma de aanpak beschreven en in hoofdstuk 5 en 6 zijn respectievelijk de resultaten en conclusies vermeld.

## 2 Doelstelling, vragen en organisatie

### 2.1 Doelstelling

Het doel van dit project is:

*Het bepalen van de invloed van vervuiling van PV-elementen op de energieopbrengst afhankelijk van hellingshoek en soort oppervlak, en het vaststellen van een financieel verantwoorde schoonmaakprogramma.*

De belangrijkste onderzoeksinspanning die hieruit voortkomt is te kwantificeren hoe groot de invloed is van de natuurlijke vervuiling van PV-elementen op de energieopbrengst, met name gericht op de kleinere hellingshoeken. Als zou blijken dat de invloed hiervan vergelijkbaar is met die van bijvoorbeeld de opbrengstvermindering door temperatuurverhoging van het PV-element, dan dient aan dit aspect in de PV-praktijk veel meer aandacht te worden geschonken dan tot op heden het geval is geweest. Op basis van de resultaten kan dus een inschatting worden gemaakt in hoeverre in de praktijk hiermee rekening moet worden gehouden c.q. maatregelen moeten worden getroffen om vervuiling te voorkomen.

De verworven kennis en beoordelingsinstrumenten kunnen van nut zijn bij de vaststelling in hoeverre het zinvol is om PV-elementen regelmatig schoon te maken en, als dit zo blijkt te zijn, met welke frequentie dit dan moet gebeuren. Dit kan van nut zijn voor zowel eigenaren van PV-systemen om de opbrengst van het PV-systeem te maximaliseren alsook voor de overheid om het bereiken van de doelstellingen op gebied van de duurzame energie dichterbij te brengen.

### 2.2 Onderzoeksvragen

Op basis van bovengenoemde doelstelling is nagegaan welke kennis nog ontbreekt voor een goede beoordeling van de invloed van vervuiling op de energieopbrengst van PV panelen en welke onderzoeksvragen dientengevolge beantwoord moeten worden. Dit heeft geleid tot de navolgende onderzoeksvragen die als input hebben gediend voor het uiteindelijke onderzoekprogramma (zie hoofdstuk 4).

Aan het eind van het project moeten de volgende vragen kunnen worden beantwoord:

- Wat is de invloed van de hellingshoek, met name bij hoeken tussen 0 en 10°, op de vervuiling c.q. de energieopbrengst van PV-modulen.
- Wat is de invloed van de oppervlaktegesteldheid van PV-modulen op de vervuiling c.q. de energieopbrengst.
- Bij welke hellingshoeken is reinigen van de modules wenselijk of zelfs nodig.
- Bij welke schoonmaakfrequentie wegen de kosten van het schoonmaken op tegen de baten van de meeropbrengst van het PV-systeem.
- Wat is op landelijk niveau de vermindering van energieopbrengst als gevolg van vervuiling.

### 2.3 Organisatie

Voor begeleiding van dit onderzoek is een klankbordgroep ingesteld die uit vertegenwoordiger(s) van de volgende bedrijven bestaat: Akzo Nobel, ECN, Free Energy Europe, Neco, Scheuten Solar Systems, Shell Solar en Siemens. De producten van PV-panelen in deze groep hebben ook monstermateriaal aangeleverd voor het onderzoek.

Deze klankbordgroep is driemaal bijeen gekomen, t.w. eenmaal bij de start van het onderzoek, eenmaal halverwege de praktijkproef en een laatste keer ter bespreking van de onderzoeksresultaten.

Daarnaast is voor wat betreft schoonmaakadviezen en bepaling van de schoonmaakfrequentie een beroep gedaan op de deskundigheid van TNO PTC. Het onderzoek is uitgevoerd in de periode april 2000 tot april 2002, met inbegrip van een praktijkproef (buitenexpositie) van een jaar.

## 3 Huidige kennis

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de huidige kennis over vervuiling. Dit is onderverdeeld in de volgende aspecten:

### 3.1 Soorten vervuiling

Vervuiling kan een natuurlijke of menselijke oorzaak hebben. Voorbeelden van natuurlijke vervuiling zijn algen, aanslag, woestijnzand en vogelfeces. Voorbeelden waaraan menselijk handelen ten grondslag ligt is vervuiling veroorzaakt door industrie en verkeer (auto, trein e.d.), zoals uitstoot van chemische verontreiniging, roet, ijzerkoper- en roestdeeltjes.

Ook de wijze waarop de module vervuild is, kan een wezenlijk andere invloed hebben op de werking van het PV-systeem. Een gelijkmatig verspreide vervuiling over het paneel vermindert alleen de opbrengst, maar bij plaatselijk vervuiling zoals vogelfeces kan door lokale oververhitting het paneel beschadigen ("hotspot" effect).

### 3.2 Invloed vervuiling (uit literatuur)

Er is tot op heden nog geen specifiek onderzoek gedaan naar de vervuilinginvloed op de energieopbrengst van PV-panelen. Wel zijn er op basis van praktijkervaringen van diverse projecten schattingen gemaakt. Hier volgt een opsomming van het resultaat van een beperkte literatuurstudie:

- Uit de glastuinbouwsector in ons land is bekend, dat bij dakhellingen boven de 20° het glas voldoende wordt schoongehouden via de reinigende invloed van regen ("natuurlijk schoonspoeling"). De gevoeligheid voor vervuiling is afhankelijk van de aanhechting op het oppervlak ("adhesie") en het verschil in ruwheid van het oppervlak met name veroorzaakt door chemische verontreiniging. Uit globale metingen in de omgeving van Rotterdam blijkt, dat de vervuiling van het tuinbouwglas al snel een verminderde lichttransmissie veroorzaakt van 3 a 4%, en soms zelfs tot 10% [1].
- In Solar Village (Saoudi Arabië) is al vele jaren een 3kW PV-systeem (1 en 2 assig tracking system) in bedrijf. In deze woestijnomgeving is ruwweg een gemiddeld verlies aan opbrengst geconstateerd van ca. 4%, met een maximum van 32% na een lange, droge periode en een minimum van 2% na een stevige regenbui [2].
- Bij kleine hellingshoeken (< 20°) en randprofiel dat ruim boven het laminaat uitsteekt, kan tegen het randprofiel langdurig water blijven staan, waardoor vervuiling en algengroei kan ontstaan [3].
- ECN schat de invloed van vervuiling van PV-panelen op de energieopbrengst op gemiddeld 3 a 4%, en langs de snelweg tot zelfs 10% [4].

### 3.3 Plaatsafhankelijkheid

De kans op vervuiling is op landelijk niveau afhankelijk van de locatie in Nederland en op lokaal niveau van de vervuilingbronnen in de directe omgeving, zoals een drukke verkeersweg, spoorbaan of chemische industrie.

In Bijlage 1 zijn vervuilingkaarten opgenomen, waarin de concentraties van enkele soorten vervuiling (stofdeeltjes en roet) zijn aangegeven die op de diverse locaties in Nederland worden aangetroffen. Daarin is duidelijk te zien dat in en rond stedelijke

gebieden de vervuiling aanzienlijk hoger ligt dan in landelijk gebied. Met name in het gebied in en rond Rotterdam zijn de vervuilingconcentraties erg hoog.

Uit onderzoek blijkt verder dat de vervuiling zich tot dicht bij spoortracés beperkt, met name koperdeeltjes vallen niet ver van de bovenleiding. Ongeveer 80% van de koperdeeltjes uit de bovenleiding komt op de spoorbaan zelf neer en ca. 20% in de directe omgeving (tot maximaal 19 meter) van de spoorbaan [5].

Ook de manier van positioneren van de PV-module op of aan het gebouw is van invloed op de vervuiling. Boven op een hellend dak geeft naar verwachting de minste problemen, maar als zonwering aan gevel is dit veel complexer. Enerzijds neemt de kans op vervuiling aanzienlijk toe door bijv. spinnenwebben (die zelf vuil aantrekken) en vogelfeces, anderzijds krijgt de regen vlak langs de gevel minder kans om zijn reinigende werking uit te oefenen.

De oriëntatie van het paneel is slechts beperkt van invloed op de vervuilingsscans. Positief aspect hierbij is dat de natuurlijk schoonspoeling het meest effect heeft als het paneel tussen zuid en zuidwest georiënteerd is, omdat de wind ook meestal uit deze richting komt en dus voor een extra reinigend effect zorgt.



## 4 Onderzoeksprogramma

Dit hoofdstuk behandelt wat en hoe er wordt gemeten in het kader van het project “Invloed vervuiling PV elementen op energie opbrengst”. Dit is vastgelegd in het navolgend onderzoeksprogramma.

### 4.1 Samples

Uit het marktaanbod van PV panelen worden 4 modules gekozen die een goede doorsnede van de toegepaste laminaten (glas en kunststof) in Nederland vertegenwoordigen. Ten behoeve van transmissiemetingen zijn kleine samples nodig van de geselecteerde laminaten.

Van de glaslaminaten worden 3 soorten getest, waarbij het voornaamste onderscheid in de afwerking van het glas zit. Naast ongecoat glas zijn samples van float- of gehard glas met een antireflex en/of vuilwerende coating gekozen. Van de kunststof laminaten worden 3 soorten getest. Naast de PV-folie, toegepast door United Solar, zijn 2 soorten gecoate folie meegenomen die AKZO voor flexibele zonnepanelen gaat toepassen. Van ieder soort is bovendien een sample in originele staat als referentie bewaard.

In tabel 4.1 staan de te testen modules en samples vermeld. De samples hebben een grootte van  $\pm 15 \times 15 \text{ cm}^2$ .

*Tabel 4.1: Geselecteerde modules en samples.*

Fabrikant	Type	modules	samples
AkzoNobel	folie “Helianthos 20”	-	7
	folie “Helianthos 50”	-	7
Free Energy Europe	amorfe Si module, glad laminaat	1	-
Scheuten Solar Systems	Solarglas Optiwhite+ Amiran + Clearshield	-	7
	Optiwhite+ Amiran	-	7
	Floatglas+ Clearshield	-	7
Shell Solar	Solarglas (Optisol) module <sup>1</sup>	1	-
Siemens	SM 130/110	1	-
standaard glas	floatglas	-	7
United Solar	flexibele Asi module	1	7

<sup>1</sup> Solarglas wordt door Flabeg (D) geproduceerd. Scheuten glas is de officiële vertegenwoordiger van Flabeg Solar PV-modulen in de Benelux, Shell past de laminaten toe in haar modules.

## 4.2 Hellingshoeken

PV wordt vaker in daken dan in gevels toegepast en omdat bij kleine hellingshoeken de meeste vervuiling is te verwachten, ligt in dit onderzoek het accent vooral op de invloed van vervuiling bij daken met kleine hellingshoeken.

De hellingshoeken zijn binnen de volgende randvoorwaarden gekozen:

**Ondergrens:** In de bouw worden hoeken kleiner dan  $2^\circ$  als plat beschouwd. Dit is dus de kleinste hoek waaronder samples in de praktijk worden toegepast en dus ook in ons onderzoek worden gemeten.

**Kritische hoek:** Volgens de literatuurbronnen ligt de kritische hoek voor natuurlijke schoonspoeling tussen de 8 en  $20^\circ$ .

**Referentie hoek:** Als referentiehoek wordt  $36^\circ$  genomen, omdat dit de optimale hellingshoek is voor zonne-energie toepassingen.

**Gevels:** Oorspronkelijk niet in het projectplan opgenomen, maar lijkt toch interessant om mee te nemen, omdat de praktijk laat zien dat het schoonspoel effect hier onvoldoende kan werken. Voor gevels wordt onder een hoek van  $90^\circ$  gemeten.

De hellingshoeken waaronder de samples worden getest staan in tabel 4.2. De modules worden alleen onder een hoek van  $2^\circ$  gemeten. De modules en samples zijn georiënteerd op het zuiden (zie foto 4.1 van de proefopstelling)

*Tabel 4.2: Hellingshoeken waaronder wordt getest.*

hellingshoek ( $^\circ$ )	opmerking
2	"plat"
5	"plat"
8	} kritisch gebied voor schoonspoeling
15	
20	
36	optimale hoek
90	gevelpositie



*Foto 4.1: Proefopstelling van de buitenexpositie van de samples en modules.*

### 4.3 Buitenexpositie

De samples en modules worden gedurende 12 maanden buiten opgesteld. Dit experiment vindt plaats bij TNO Bouw in Delft, aan de Schoemakerstraat 97 (Zuidpolder terrein), op een rek op het STF dak gelegen naast het Zonnehuis.

Tijdens het experiment worden de volgende grootheden gemeten:

- temperatuur;
- windkracht /richting;
- zoninstraling:
  - horizontaal globaal.
  - verticaal globaal.
  - horizontaal diffuus;
- relatieve luchtvochtigheid;
- absolute druk.

Elk kwartaal wordt een inspectie uitgevoerd, waarbij o.a. door middel van een digitale camera opnames worden gemaakt van de samples. Extra controles worden uitgevoerd in geval van bijzondere omstandigheden, zoals een eerste bui na lange tijd droogte, hevige storm gepaard gaand met regen, extra neerslag van stof (bijv. fijn woestijnzand getransporteerd in hoge luchtlagen), sneeuw, etc.

### 4.4 Lichttransmissie en normalisatie

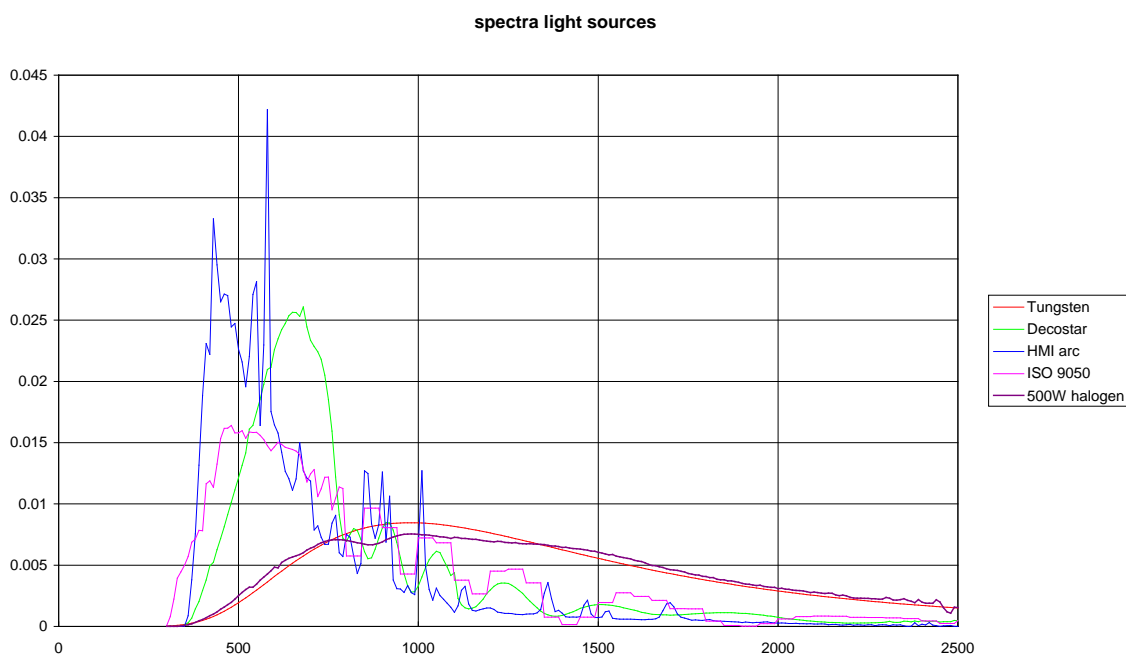
Voor wat betreft metingen naar optische eigenschappen van materialen is een aantal normen van belang. De aard van het materiaal kan hierbij een rol spelen of de betreffende norm geldigheid heeft. Voor wat betreft de afdekking van PV hebben we te maken met glasachtige materialen, die over het algemeen geen structuur kennen (helder), dan wel zijn voorzien van een diffuserende oppervlakte structuur (piramide) om direct doorzicht, reflecties c.q. oppervlakte spanning van water te verminderen (betere afwatering). Deze materialen vallen volledig onder de Europese norm EN410 [6]“determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance and ultra violet transmittance and related glazing factors”. De in het Bouwbesluit verplichte eisen op het gebied van licht (LTA, LRA) en zontransmissie (ZTA of g-waarde) zijn gebaseerd op deze relevante norm.

De EN-410 gaat uit van spectrale metingen aan materialen, waarbij voor diffuserende materialen een integrerende bol noodzakelijk is. Het golflengte bereik ligt tussen 250-2500 nm. De karakteristieke bepaling vindt plaats door integratie met het golflengte spectrum gebaseerd op AM 1.0 zonlicht. De EN-410 is in hoge mate identiek aan de norm ISO 9050 echter met dien verstande, dat in de ISO norm meerdere spectra zijn opgenomen namelijk AM 1.5 en AM 2.0. De verschillende zonlicht spectra zijn gebaseerd op zogenaamde AirMass, waarbij de AM indicatie een maat is voor de weglengte van het zonlicht door de atmosfeer. Hierbij vindt een filtering plaats door stof, waterdamp en andere verontreinigingen, waardoor bepaalde golflengten worden geabsorbeerd. AM 1.0 is de luchtmassa op de evenaar. In dat opzicht bekeken zijn dus voor gebruik in centraal europa de in ISO 9050 vastgelegde spectra van AM 1.5 en AM 2.0 veel beter dan het AM1.0 spectrum uit EN-410. Spectra voor AM 1.5 zonlicht zijn nader gedefinieerd in ISO 9845. Deze laatste bevat ook aanwijzingen voor het genereren van specifieke spectra. Figuur 4.1 geeft de spectra van een aantal lichtbronnen onder andere het AM 1.5 spectrum uit ISO 9050.

Het effect van een afname van transmissie hangt echter niet alleen af van het opvallende spectrum maar tevens van de gevoeligheid van de ontvanger. Een transmissie afname in het bereik waar de gevoeligheid reeds minimaal is, resulteert immers niet in meetbaar verlies aan energie-invangst. Derhalve is voor metingen aan PV tevens de celgevoeligheid van belang. Dit hangt natuurlijk af van het celmateriaal. Figuur 4.2 [8] geeft bijzonderheden weer, het maximum ligt meestal tussen 800-1100 nm. Het relevante gebied ligt eigenlijk tussen 400-1000 nm voor normaal siliciumachtige materialen. Nieuwe generatie materialen kennen een iets groter golflengte bereik.

Ten einde een goede indicatie te krijgen van de invloed van de vervuiling op de opbrengst van siliciumachtige materialen, volstaat het dus om metingen uit te voeren in het golflengte gebied van 400-1000 nm. Hierbij is maatgevend de geïntegreerde waarde van bron, materiaal transmissie en gevoeligheid van silicium.

Een zeer snelle bepaling zou kunnen plaatsvinden door gebruik te maken van een bron met het juiste spectrum en een silicium detector met relevant spectrum in combinatie met een integrerende bol. Hierbij is dan nog wel van belang de afmeting van de opening in de bol teneinde voldoende te middelen om al te zeer lokale effecten van vervuiling te vermijden.



**Figuur 4.1:** Spectra van verschillende lichtbronnen genormaliseerd op 1.  
ISO 9050 betreft zonlicht met AM 1.5.

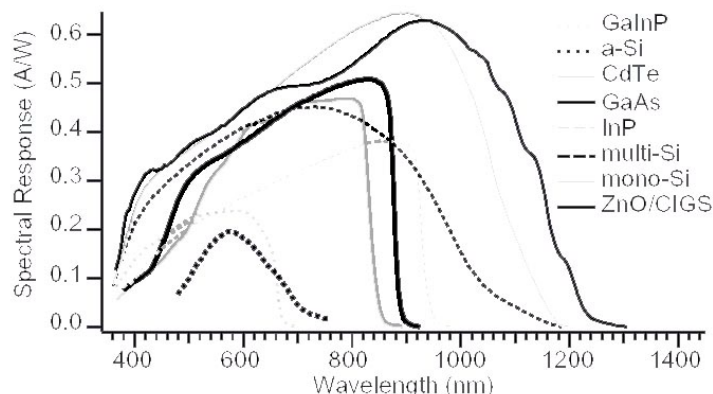


Fig.2 The spectral response characteristics of the test cells.

*Figuur 4.2: Responsiekenmerken voor verschillende cellen.*

#### 4.5 Meetinstrumentatie

Bij TNO Bouw is een spectrofotometer met integrerende bol aanwezig, waarmee de golflengte afhankelijke eigenschappen van materialen kunnen worden bepaald. Er is tevens een grote integrerende bol aanwezig, waarmee met een maximale bundelafmeting van 12 cm kan worden gemeten. Hierbij kan worden beschikt over een Oriël Xenon lichtbron met AM2.0 filters. Indien dit aangevuld wordt met een niet-gefilterde Silicium sensor, wordt voldaan aan bovenstaande snelle bepalingsmethode. Momenteel is alleen een ooggecorrigeerde siliciumsensoren aanwezig (naast breedband zonlicht). Beide metingen zijn uitgevoerd als single beam instrumenten zodat ten behoeve van de backreflectie een eenvoudige correctie nodig is. Voor onderlinge vergelijking is dit overigens niet relevant. Gezien de naar verwachting geringe verschillen in onderlinge reflectie, mag dit globaal gebeuren aangezien het hier gaat om een tweede orde effect. Calibratie van deze opstelling gebeurt aan de hand van NIST referentiematerialen.

Afgeleide metingen zoals bijvoorbeeld UV veroudering, lijken niet aan de orde gezien het feit dat het Nederlandse klimaat geen relevante veroudering laat zien in vergelijking tot meer zuidelijke locaties. (IEA MSTC microklimaat onderzoek), hetgeen ook door de meetresultaten wordt bevestigd.

#### 4.6 Programma pilotmetingen

Voor de pilot metingen is besloten van een beperkt aantal samples de metingen spectraal uit te voeren in het golflengte gebied van 300-1100 nm. Daarnaast zijn geïntegreerde metingen uitgevoerd met behulp van de AM2.0 lichtbron en sensoren met verschillende respons. Dit betreft metingen voor breedband zonlicht AM2.0, visueel aandeel Vis en Silicium respons SIL.

De metingen worden uitgevoerd aan monsters in de volgende staat:

- Nieuw;
- Vervuild;
- Gereinigd.

Er zijn totaal 7 samples onder 7 hoeken, totaal dus 2x105 metingen spectraal en geïntegreerd, indien alle samples identiek worden behandeld. Gezien het budget moet hier een reële beperking worden aangebracht. In eerste instantie worden alle monsters geïntegreerd gemeten en aanvullend de horizontale en voor 20 graden eveneens spectraal. Na reiniging wordt bekeken of alle samples dienen te worden bemeten of dat volstaan kan worden met een steekproef.

Voor en na het reinigen is wellicht een digitale microscopische opname van belang om het onderscheid vast te leggen. Dit betreft enkele representatieve samples.

Uit ervaring met het IEA microklimaat onderzoek is bekend dat het deels reinigen van kleine monsters om de proef later voort te zetten praktisch gezien weinig succesvol is. Dit kan echter ook afhangen van de gevolgde technieken voor het reinigen.

#### **4.7 Reinigen van de monsters**

Ten einde alleen de vervuiling te meten, welke daadwerkelijk afkomstig is van de blootstelling aan de buitenlucht, dienen de monsters eerst aan de achterzijde te worden gereinigd. De monsters worden daartoe in vochtige toestand van de opstelling opgenomen en gedroogd met behulp van kunstlicht in het laboratorium. Daarna zijn de monsters aan de achterzijde voorzichtig gereinigd. De reiniging werd als volgt uitgevoerd:

1. reinigen met een tissue bevochtigd met kraanwater (9°DH) en referentie spoelmiddel type C (EN 50242);
2. spoelen met demi-water;
3. licht nawrijven met tissue met alcohol;
4. spoelen met alcohol;
5. drogen aan de lucht.

De alcohol vereenvoudigt het droogproces. De folie wordt ietwat weker bij behandeling met alcohol. Hierbij moet dus voorzichtigheid worden betracht.

De monsters van de panelen zijn, gezien de betrokken oppervlakten, gereinigd met leidingwater en referentie spoelmiddel. Hiervoor is de volgende procedure gevolgd:

1. voorreinigen door afspoelen met lauw water;
2. reinigen met een sopje met referentiespoelmiddel IKW-Standard L18-10007;
3. afspoelen met schoon lauw water;
4. wissen of Afdruipen op zwaartekracht en nazemen;
5. drogen aan de lucht.

Normale zachte reinigingshulpmiddelen, zoals spons, zeem en zachte borstel, waren voldoende om de panelen geheel te reinigen tot min of meer nieuwe staat. Alleen op plaatsen waar het water regelmatig indampst, bijvoorbeeld langs de onderrand van de module kaders, vormt zich een kalk laag die zich op deze wijze niet laat verwijderen. Omdat deze randen echter altijd buiten het celoppervlak vallen heeft dit voor de opbrengst van de modules geen betekenis. In de praktijk kan het referentiespoelmiddel worden vervangen door een normale allesreiniger voor huishoudelijk gebruik.

#### **4.8 Visuele indruk na het reinigen**

Met de beschreven schoonmaakmethodes zijn de geëxposeerde materialen volledig te reinigen van het aanwezige vuil. Alleen de ingedroogde kalk randjes, daar waar de materialen vastgeklemd zijn geweest, blijven achter. Deze randjes zijn wel te verwijderen met andere middelen, echter in het algemeen niet van belang, omdat ze niet het actieve celoppervlak betreffen. Deze randjes zijn ook buiten de transmissiemetingen gehouden. Na schoonmaken zijn alle monsters onderling vergeleken onder belichting om een indruk te krijgen van het proces. Behoudens wat kleine artefacten kan men bij de glasmonsters stellen, dat met het oog geen verschil met nieuwe samples is vast te stellen. Dit is niet zo bij de kunststof folie, maar dat heeft te maken met opgetreden beschadigingen. De monsters zelf lijken goed schoon.

## 5 Resultaten van de buitenexpositie

### 5.1 Algemeen bij de buitenexpositie

De transmissiemetingen zijn uitgevoerd met behulp van de 65 cm integrerende bolopstelling, waarbij gebruik is gemaakt van een bundeldiameter van 12,5 cm. In de praktijk wordt dus gemiddeld over ruim 50% van het oppervlak. Hierdoor wordt de invloed van kleine vervuilingen dus ruimschoots uitgemiddeld. De spectrale metingen zijn uitgevoerd tot in een golflengte bereik van 300-1100 nm. Daarnaast zijn geïntegreerde metingen uitgevoerd voor verschillende bandbreedtes, zoals beschreven in paragraaf 4.7

De volgende sample nummering is aangehouden in de tabellen

*Tabel 5.1: Overzicht 15 x 15 cm<sup>2</sup> samples.*

7	floatglas
6	Optiwhite + Amiran + clearshield
5	Floatglas + clearshield
4	Optiwhite + Amiran
3	Unisolar
2	Helianthos 20
1	Helianthos 50

Ten aanzien van de buitenexpositie zelf kunnen nog de volgende opmerkingen worden gemaakt. De gekozen bevestigingsmethode om door middel van 2 horizontale lijsten de folies te klemmen op de ondergrond, was achteraf gezien ongelukkig voor de kunststof folies. Door de grote temperatuurschommelingen zagen deze kans zich los te werken. In combinatie met een storm zijn hierdoor de folies onder 36 graden verloren gegaan. Dit verschijnsel heeft nog andere bijwerkingen veroorzaakt. De achterzijde van de folie vertoont een dofte glans wat ontstaan is door talloze oppervlakkige krasjes door het continue verschuiven. Hierdoor bereiken de schoongemaakte kunststof folies niet meer dezelfde transmissie als in nieuwe toestand. Dit wordt dus niet veroorzaakt door vuil, de folies zelf zijn op het oog volledig schoon. Met name bij de Unisolar folie ondervonden we problemen door beschadiging, waardoor de resultaten hiervan minder relevant geacht moeten worden.

Daarnaast dient men nog op te merken, dat hierdoor de kunststof folies niet volledig vlak lagen. Plaatselijk is de hellingshoek wat anders, waardoor het vuil zich wat kan verzamelen in natte plekken. Door met een grote bundel te meten wordt dit effect uitgemiddeld, echter doen zich hierdoor toch wat andere omstandigheden voor dan bij de glasfolies.

Bij de meetnauwkeurigheid van de monsters spelen een groot aantal factoren een rol. Enkele hiervan zijn thermische drift in detectieinstrumentatie (een sensor is gevoelig tot 50 micron), instabiliteiten in de positie van de lichtboog, herhaald positioneren van de samples in identieke positie, ruis in de lock-in amplifier, single beam correctie, onvlakheid van de foliemonsters etc. Derhalve dient een overall onnauwkeurigheid aangehouden te worden van  $\pm 0.004$ . Individuele metingen kunnen echter veel beter uitkomen. De geïntegreerde meetwaarden zijn gemiddelden van tenminste 4 metingen. Voor de spectrale metingen geldt een standaard deviatie van 0.0015 in het zichtbare



deel van het spectrum. Bij pieken in het spectrum en filterwisselingen is dit wat ongunstiger. De spectrale metingen mogen alleen onderling vergeleken worden aangezien (i.t.t. de geïntegreerde metingen) de correctie voor de single beam metingen niet is opgenomen. Deze ligt voor dit type monster tussen 0.980 en 0.99. De 100% transmissie ligt dus in werkelijk iets hoger.

## 5.2 Resultaten van de geïntegreerde metingen

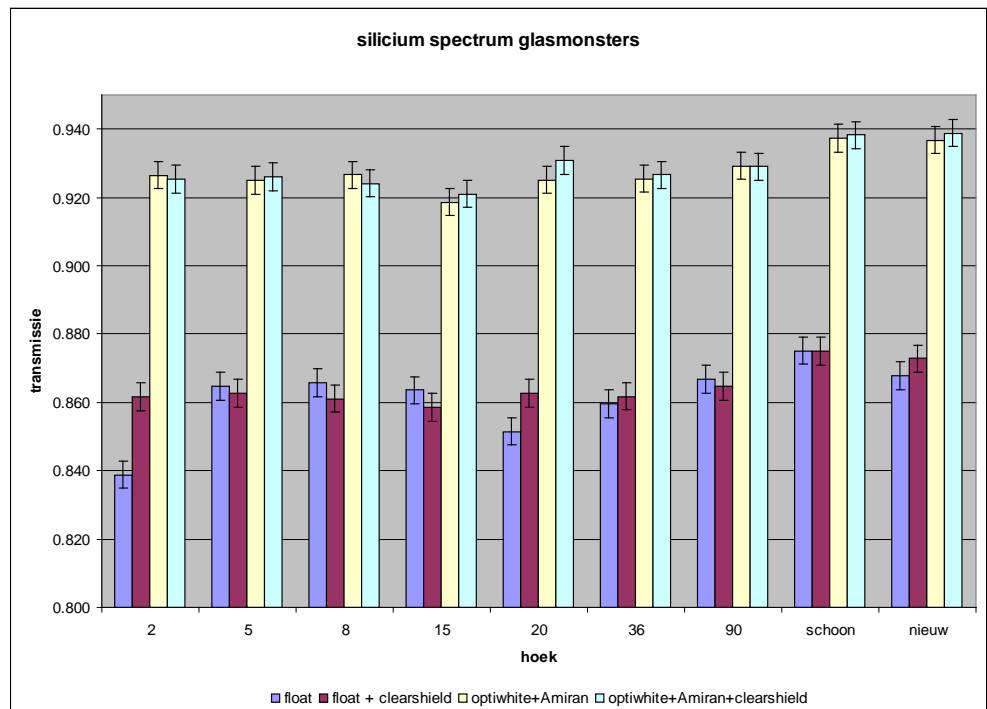
Er is gebruik gemaakt van 2 sensoren, waarmee gelijktijdig metingen zijn verricht. De metingen voor het gehele zonnenspectrum zijn aangeduid met airmass 2, dit is het spectrum van de gebruikte lichtbron met een bereik van ca. 300-2200 nm. De tweede sensor is een sensor op basis van silicium en alleen gevoelig in het kortgolfige bereik tussen 300-1100 nm. De data uit de navolgende tabellen is grafisch weergegeven in de daarop volgende figuren, waarbij de kunststof monsters afzonderlijk zijn weergegeven.

*Tabel 5.2: De meetdata van de geïntegreerde metingen voor airmass 2.*

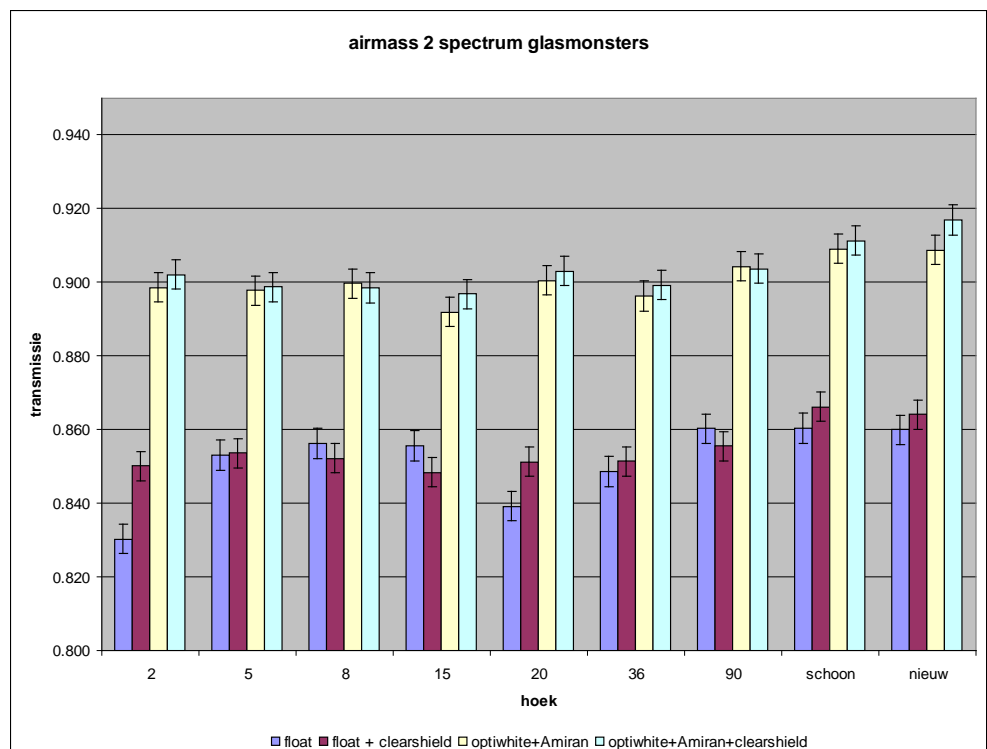
hoek	7	5	4	6	3	2	1
2	0.839	0.862	0.926	0.925	0.947	0.890	0.893
5	0.865	0.863	0.925	0.926	0.000	0.897	0.901
8	0.866	0.861	0.927	0.924	0.927	0.886	0.906
15	0.864	0.859	0.919	0.921	0.924	0.906	0.911
20	0.851	0.863	0.925	0.931	0.923	0.888	0.897
36	0.860	0.862	0.925	0.927			
90	0.867	0.865	0.929	0.929	0.923	0.911	0.919
schoon	0.875	0.875	0.937	0.938	0.944	0.935	0.959
nieuw	0.868	0.873	0.937	0.939		0.958	0.961

*Tabel 5.3: De meetdata van de geïntegreerde metingen met silicium sensor.*

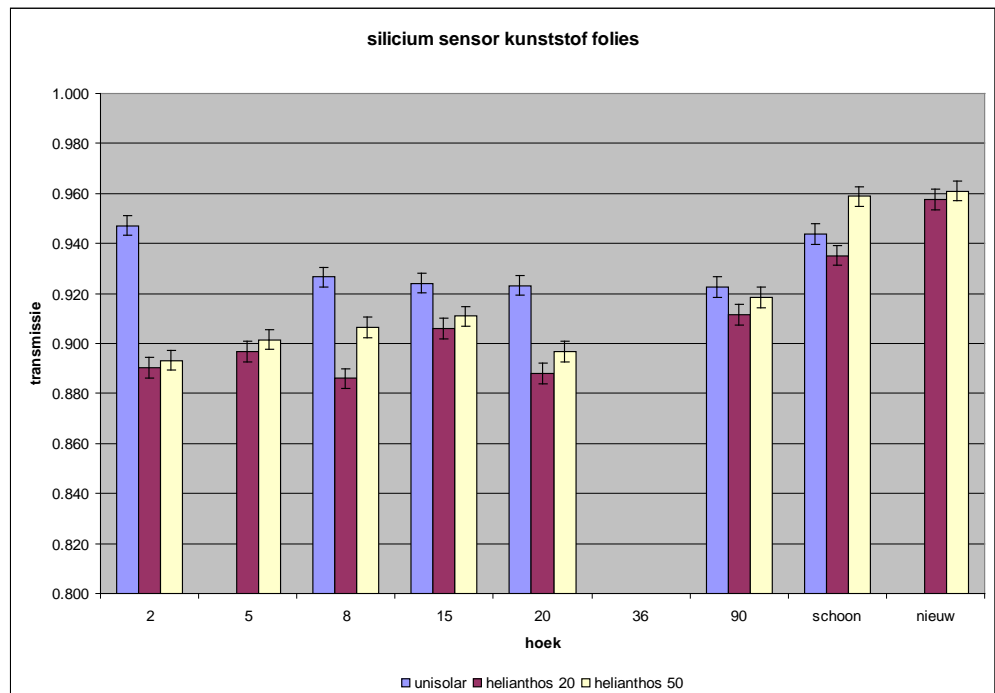
hoek	7	5	4	6	3	2	1
2	0.830	0.850	0.899	0.902	0.943	0.889	0.888
5	0.853	0.854	0.898	0.899	0.000	0.897	0.906
8	0.856	0.852	0.900	0.899	0.900	0.888	0.906
15	0.856	0.848	0.892	0.897	0.920	0.906	0.907
20	0.839	0.851	0.900	0.903	0.921	0.891	0.895
36	0.849	0.851	0.896	0.899			
90	0.860	0.855	0.904	0.904	0.922	0.914	0.918
schoon	0.860	0.866	0.909	0.911	0.945	0.936	0.958
nieuw	0.860	0.864	0.909	0.917	0.945	0.952	0.952



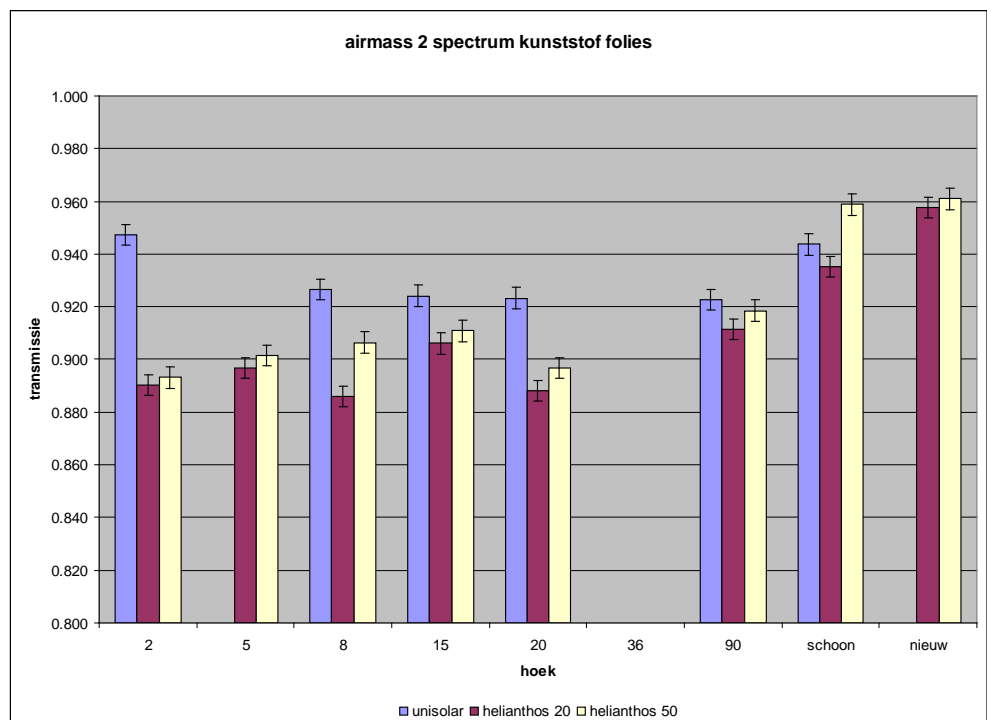
**Figuur 5.1:** Data van de glasmonsters uit tabel 5.2.



**Figuur 5.2:** Data van de glasmonsters uit tabel 5.3.

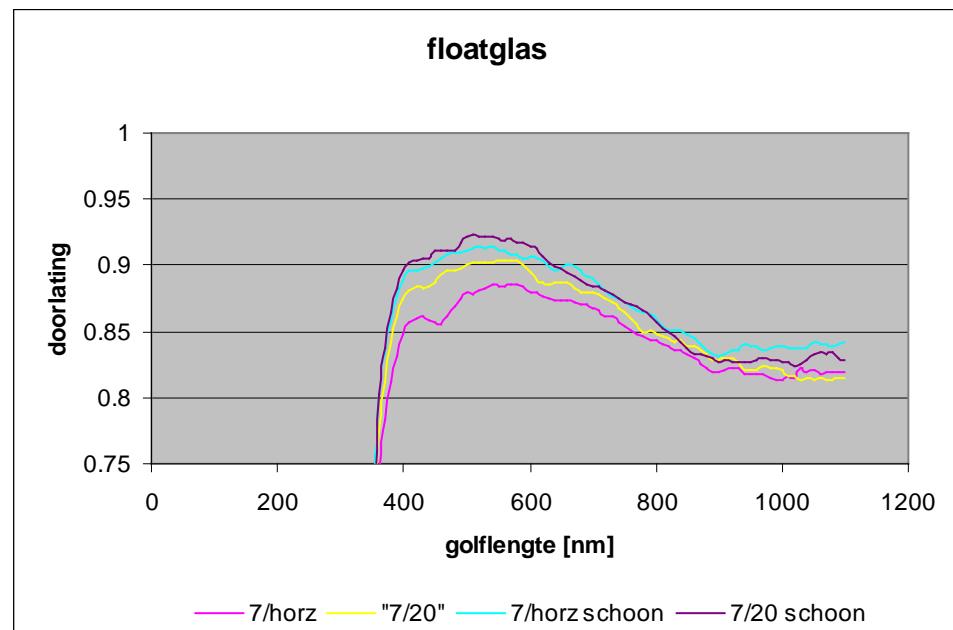


*Figuur 5.3: Data van de foliemonsters uit tabel 5.2.*

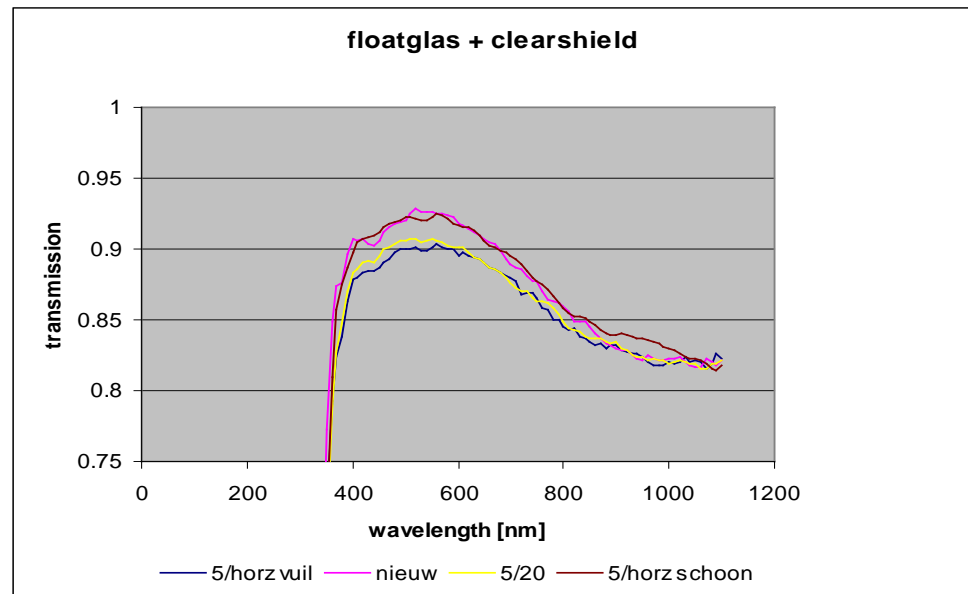


*Figuur 5.4: Data van de foliemonsters uit tabel 5.3.*

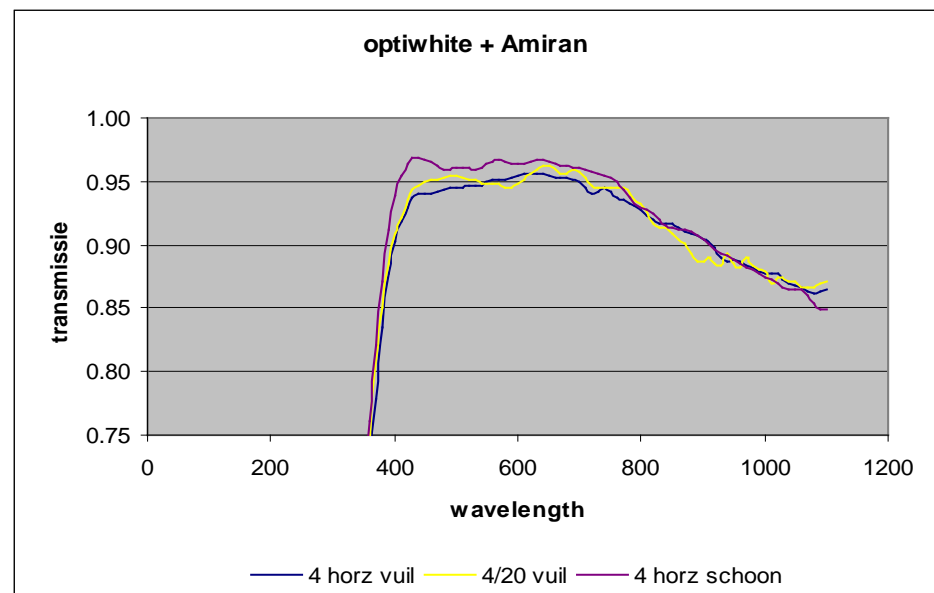
Wat opvalt uit deze figuren is, dat in tegenstelling tot de kunststof monsters er bij de glasmonsters niet een duidelijke trend aanwezig is tussen hoek en transmissie. Als er al een trend aanwezig is, dan is het omdat de monsters onder een hoek van ca. 20 graden wat vuiler lijken. Met uitzondering van de 2 floatglas monsters 2 en 20 graden, is er geen significant verschil tussen de monsters die behandeld zijn met clearshield en de onbehandelde. Dit duidt er dus op, dat coating geen wezenlijk effect sorteert. Geen van de samples met clearshield vertoont nog hydrofobe eigenschappen, wat erop duidt dat de coating na verloop van tijd verdwijnt. De relatieve verschillen tussen de vervuilde monsters en de schoongemaakte monsters bedraagt voor de glasmonsters gemiddeld 1,5%, maar voor de kunststoffolie 4,5%. De maximale relatieve vervuiling is respectievelijk 3% voor glas en 7% voor kunststof. De kunststoffen zijn dus duidelijk gevoeliger voor vervuiling. Ook bij de kunststof folies lijkt het alsof de monsters bij 20 graden wat meer vervuild zijn dan die bij 5 en 8 graden. Hier doet het ontbreken van dubbele samples zich duidelijk voelen, omdat niet meer informatie beschikbaar is en de samples bij een hoek van 36 graden verloren zijn gegaan. Artefacten op de samples in de vorm van nog deels aanwezig vogelfeces kunnen in lagere waarden sorteren.



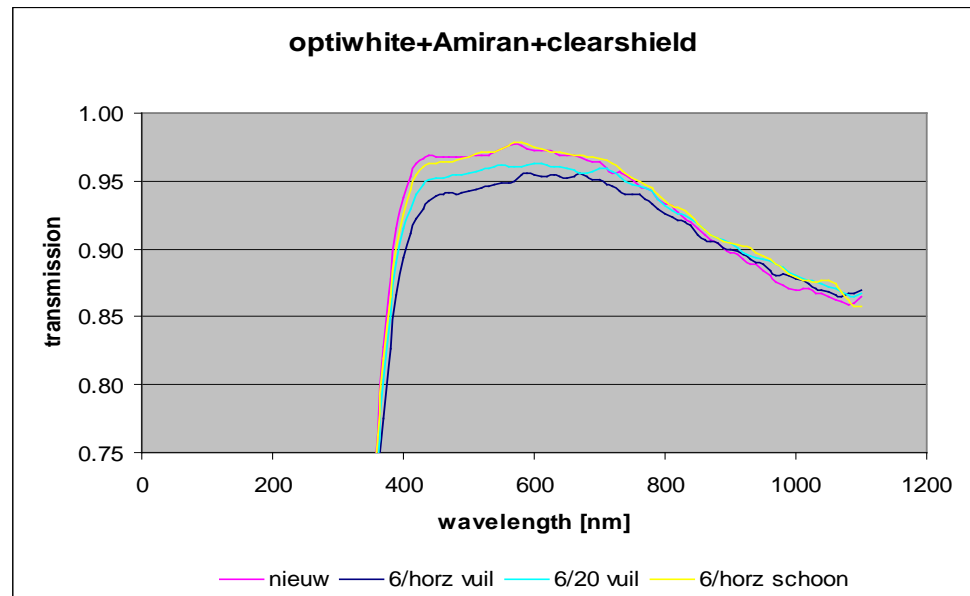
*Figuur 5.5: Spectraal verloop van de vuile en schoon gemaakte monsters op floatglas.*



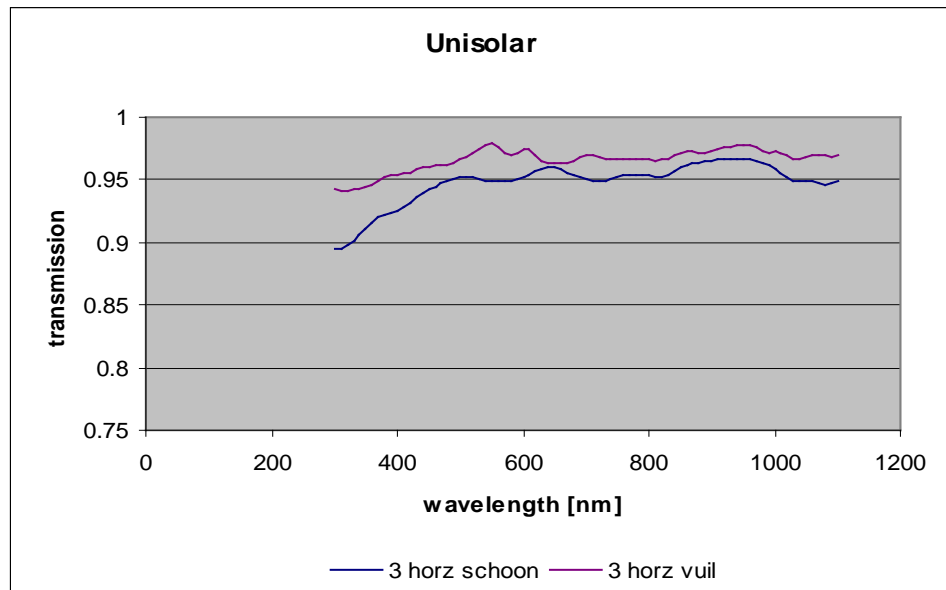
**Figuur 5.6:** Spectraal verloop van de vuile en schoon gemaakte monsters op floatglas met clearshield coating.



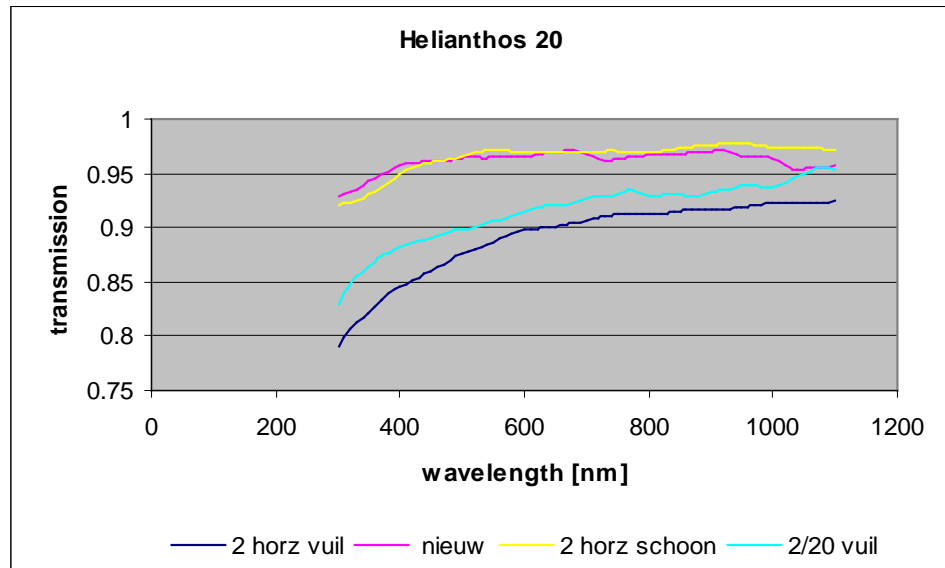
**Figuur 5.7:** Spectraal verloop van de vuile en schoon gemaakte monsters op sample 4 optiwhite+ Amiran.



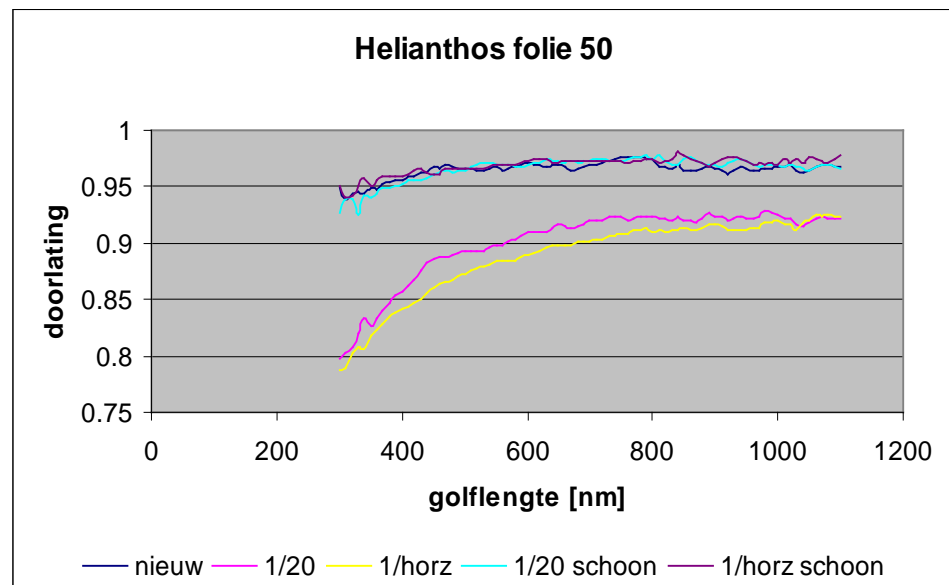
**Figuur 5.8:** Spectraal verloop van de vuile en schoon gemaakte monsters op sample6 optiwhite + Amiran + clearshield.



**Figuur 5.9:** Spectraal verloop van de vuile en schoon gemaakte Unisolar folie. N.B. deze folie vertoont veel beschadigingen en lijkt niet karakteristiek.



**Figuur 5.10:** Spectraal verloop van de vuile en schoon gemaakte samples 1, Helianthos 20 folie.



**Figuur 5.11:** Spectraal verloop van de vuile en schoon gemaakte samples 1, Helianthos 50 folie.

De figuren 5.5 tot en met 5.11 geven het spectrale verloop van de verschillende monsters weer voor blootstelling onder horizontale (2 graden) en 20 graden helling. Nadere bestudering laat zien, dat alle samples meer of minder duidelijk een spectraal verloop tonen in de vervuiling. Het meest duidelijk is dit bij de kunststof folies, echter ook de glassamples vertonen dit verschijnsel. Technisch kan dit verklaard worden door de deeltjesverdeling op de samples. Een van de mechanismen van verstrooiing is een golflengte afhankelijke verstrooiing als gevolg van zeer kleine deeltjes, die de ordegruote van de golflengte van het licht benaderen. Dat deze deeltjes daadwerkelijk aanwezig zijn tonen de microscopische opnamen in de bijlage.

### 5.2.1 *Conclusies ten aanzien van de metingen aan de kleine samples*

De kunststof folies tonen duidelijk meer vervuiling dan de glazen samples. Een duidelijk verband tussen hellingshoek en vervuiling kan niet worden gelegd voor de glazen samples. Hier lijkt het eerder dat het zwaartepunt ligt bij een hellingshoek van 20 graden. Bij de kunststof folies lijkt er wel sprake van een verband met de hellingshoek. Hier tonen de horizontale monsters 2-2,5% meer afname in transmissie. Ook hier lijkt echter dat de hellingshoek van 20 graden een piek in de vervuiling toont.

De vervuiling is golflengte afhankelijk, waarbij aan de kortgolvlige zijde van het spectrum de vervuiling duidelijk groter is dan aan de langgolvlige zijde. Dit betekent dus dat de celmaterialen die hun maximum bij 500-600 nm, zoals bijvoorbeeld amorf silicium, meer last zullen hebben van identieke vervuiling dan mono- of multikristallijn, waarbij het zwaartepunt meer rond de 800 nm ligt.

De werking van de cleanshield coating is niet aantoonbaar. De samples zijn na de buitenexpositie niet meer hydrofoob, wat erop duidt dat de coating na afloop niet meer aanwezig is.

Door de beperkte opzet van de proef waarbij niet gewerkt is met dubbele samples en het verloren gaan van enkele samples maakt dat verschillen niet altijd hard kunnen worden aangetoond. De individuele kleine samples kunnen gemakkelijk artefacten oplopen, waardoor onderlinge verschillen ontstaan die niet uitsluitend op de hellingshoek zijn terug te voeren.

## 5.3 **Meting van het vermogen aan complete panelen**

De praktijk van alledag kent hier tenminste 3 parameters. Namelijk mono-/multikristallijn en amorf Silicium, glad en getextureerd oppervlak, kunststof en glas oppervlak. Er zijn slechts vier complete panelen getest in de buitenopstelling, hiermee zijn dus zeker niet alle mogelijkheden afgedekt.

De volgende panelen zijn getest onder een hoek van 2 graden.

*Tabel 5.4: Overzicht geteste panelen en afwerking.*

<b>Fabrikant</b>	<b>Type</b>	<b>Afdekking</b>
<b>Neste</b>	A13R 12 W (a-Si)	Glas glad
<b>Shell Solar Energy</b>	RSM 110 (mc-Si)	Glas getextureerd
<b>Siemens</b>	SM130/110 (m-Si)	Glas glad
<b>Unisolar</b>	US 42 (a-Si)	Kunststof getextureerd

Na afloop zijn de panelen door ECN getest volgens de STC standaard test (flitsmeting). Onmiddellijk na de eerste test is het paneel gereinigd en opnieuw in schone toestand door gemeten. Beide testen zijn in duplo uitgevoerd. De gedetailleerde uitkomsten zijn in de bijlage opgenomen. De tabel 5.5 geeft de uitkomsten van deze metingen.



*Tabel 5.5: overzicht van gemeten verandering in het geleverd vermogen. Zie bijlage F voor details.*

Fabrikant	type	Pmp(Wp) vuil	Pmp(Wp) schoon	Reductie	Relatief %
<b>Neste</b>	A13R 12W	9.57	10.13	0.945	-5.50
<b>Shell Solar Energy</b>	RSM 110	103.08	107.88	0.956	-4.45
<b>Siemens</b>	SM 130 / 110	92.51	94.52	0.979	-2.12
<b>Unisolar</b>	US 42	40.02	43.36	0.923	-7.71

Hoewel men voorzichtig moet zijn met de interpretatie van deze tabel vallen een aantal zaken op. De amorfe panelen geven een grotere terugval te zien. Dit is in overeenstemming met de metingen aan de folie, waarbij de indruk bestaat dat aan kortgolvlige kant van het spectrum een lagere transmissie door het vuil wordt veroorzaakt. Aangezien de gevoeligheid van Amorf silicium in dit gebied valt is hierdoor ook een groter verschil te verklaren. Daarnaast lijkt het geribbelde oppervlak van de Unisolar wat meer vuil te verzamelen. Dit geribbelde oppervlak zou eveneens het verschil kunnen verklaren tussen de Shell en Siemens panelen. De opbrengst van het Siemens paneel is buiten specificatie. Onbekend is of dit veroorzaakt is door de buitenexpositie of doordat het paneel bij aanvang reeds defect was. Enkele cellen vertonen wat kleine visuele defecten en delaminatie van de kunststof.

### 5.3.1 *Conclusies ten aanzien van de expositie van de panelen*

De bij de kleine samples geconstateerde spectrale vervuiling lijkt bevestigd te worden door STC meting aan de panelen. De amorfe panelen lijken meer last te hebben van vervuiling dan de mono- en multikristallijne. Echter sommige panelen hebben gestructureerde oppervlakken, waardoor andere effecten eveneens een rol spelen. De panelen tonen tenminste net zo of nog meer last te hebben van vervuiling dan op grond van de kleine samples werd verwacht. De gemeten relatieve afname in vermogensopbrengst ligt tussen 4,4% en 7,7%. Van slechts één paneel was de afname met 2,2% vergelijkbaar aan de kleine samples, maar dit paneel toont echter andere defecten, waardoor deze waarde voorzichtig dient te worden gehanteerd.

## 5.4 **Globale vertaling van de metingen naar de energieopbrengst in Nederland**

Voor een vertaling van de metingen naar een opbrengstreductie van PV in Nederland, dienen we voorzichtig te zijn. Hier staan ons immers slechts zeer globale cijfers ter beschikking. Zeker omdat er veel ruisbronnen aanwezig zijn.

De meest recente cijfers [9] geven per 31/12/2001 de volgende opgave van het geplaatste oppervlak aan PV

*Tabel 5.6: Geïnstalleerd PV vermogen in Nederland.*

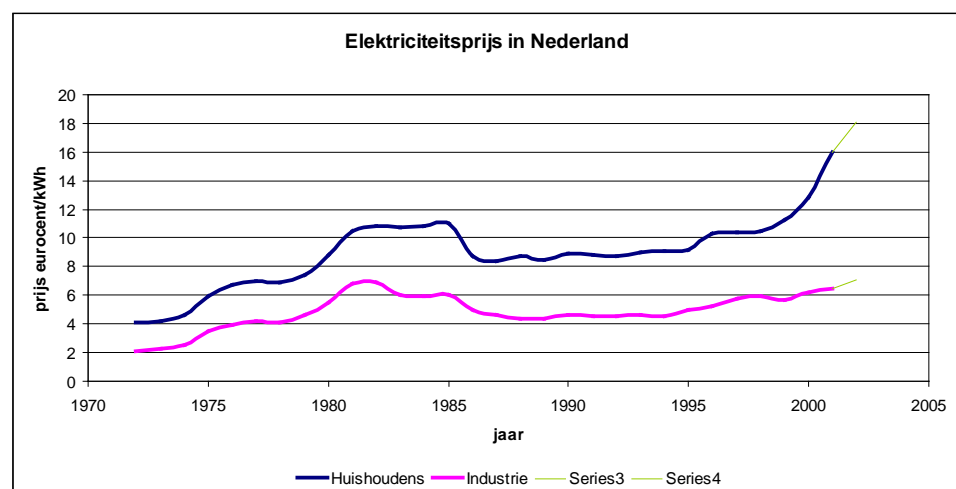
Geïnstalleerd PV 31/12/2001 [9]	kWp
niet-gekoppeld niet huishoudelijk	4330
net gekoppelde PV centrales	2480
net gekoppeld gedistribueerd	13699
<b>Totaal</b>	<b>20509</b>

Deze tabelgegevens gekoppeld aan de opbrengst van PV-systemen in Nederland en de kosten van elektriciteit, maken het mogelijk een schatting te maken van de gederfde inkomsten door vervuiling. Daarnaast is een inschatting mogelijk van het reinigen van de PV-systemen. De kosten van elektriciteit verschillen van de toepassing. Daarnaast is deze hele markt in beweging door de liberalisatie. De kosten voor huishoudelijk gebruik over de laatste jaren zijn zeer sterk zijn gestegen. Dit wordt geïllustreerd door de figuur 5.11 [11]. In de industrie komt de prijs op 6,5 eurocent in 2001 met trendvoorspelling naar 7,1. Voor huishoudens en andere kleinverbruikers ligt dit aanzienlijk hoger met 16 eurocent in 2001 en een trend naar 18 eurocent.

Rekening houdend met geplaatste systemen komt een 100Wp gemiddeld overeen met een paneel oppervlakte van 1 m<sup>2</sup>. Hierin zitten dan onder andere in verdisconteerd een klein aandeel minder efficiënt amorf en een minder gunstige plaatsing. Uitgaande van [10] levert een 1kWp PV-systeem circa 800 kWh op jaarbasis.

**Tabel 5.7:** Een schatting van de kosten van reiniging.

kosten reiniging		27000euro per fte ( bron CBS)
effectief uren/jaar		1500(schatting)
Productiewerk type3		60m <sup>2</sup> /uur [12]
schoonwerk		100m <sup>2</sup> /uur ( tel. Informatie)
lijstwerk		50 m <sup>2</sup> /uur ( tel. Informatie)
<b>kosten</b>	<b>per m<sup>2</sup></b>	<b>0.18à0.36euro/m<sup>2</sup> 1x jaar</b>



**Figuur 5.12:** Verloop van de elektriciteitsprijs in eurocent over de laatste 30 jaar. [11]

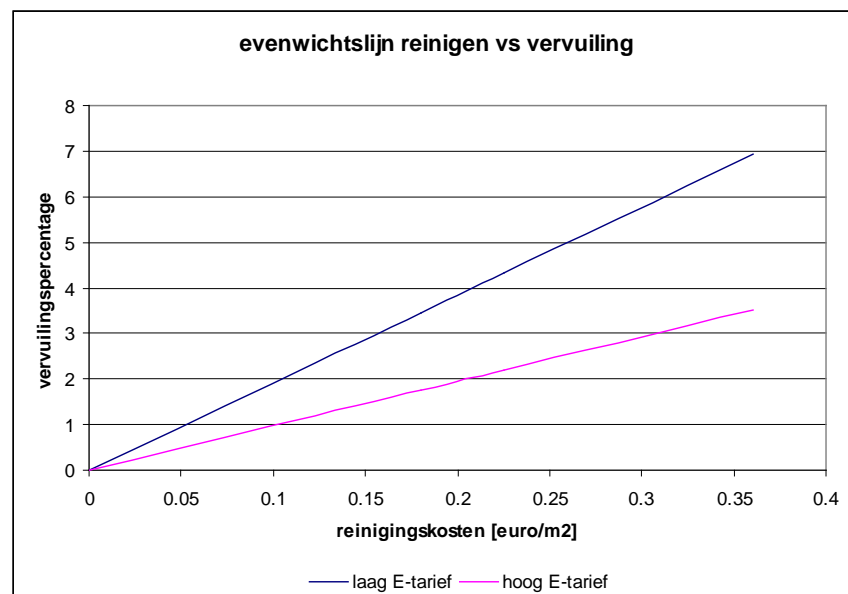
Met behulp van deze getallen kunnen we een berekening opzetten of de bereikte besparing door reiniging van de panelen opweegt tegen de kosten van reiniging. De kosten van reiniging staan vermeld in tabel 5.7. Hierbij valt aan te tekenen dat de kosten van reiniging sterk zullen afhangen van de omstandigheden. De in de tabel vermelde kosten zijn voor goed toegankelijke dakopstellingen zonder lijsten. Het meenemen van lijstwerk doet namelijk de kosten verdubbelen terwijl dit voor de opbrengst weinig zal brengen. Daarnaast verschillen de kosten ook per bron. De haalbare productie in vierkante meters volgens de Arbo lijst [12] is aanzienlijk lager dan de telefonische

referentie. Wel neemt volgens de Arbolijs de productie toe indien herhaling optreedt, bij 12x per jaar neemt dit toe tot 80m<sup>2</sup>. Het lijkt gerechtvaardigd te veronderstellen dat een dergelijk effect ook geldt voor een gespecialiseerd schoonmaakbedrijf dat op verschillende locaties identiek gebouwde systemen onderhoudt. De tabel 5.8 is gebaseerd op een vervuiling met een afname van 3,5% tegen meest gunstige schoonmaaktarief van 18 eurocent/m<sup>2</sup>. Dit vervuilingpercentage ligt precies op het evenwichtspunt tussen kosten en besparingen gebaseerd op de elektriciteitskosten voor grootverbruikers.

**Tabel 5.8:** Kosten van verliezen bij 3,5% vervuiling en kosten van reiniging bij industriële toepassingen tegen een tarief van 0.18 euro/m<sup>2</sup>.

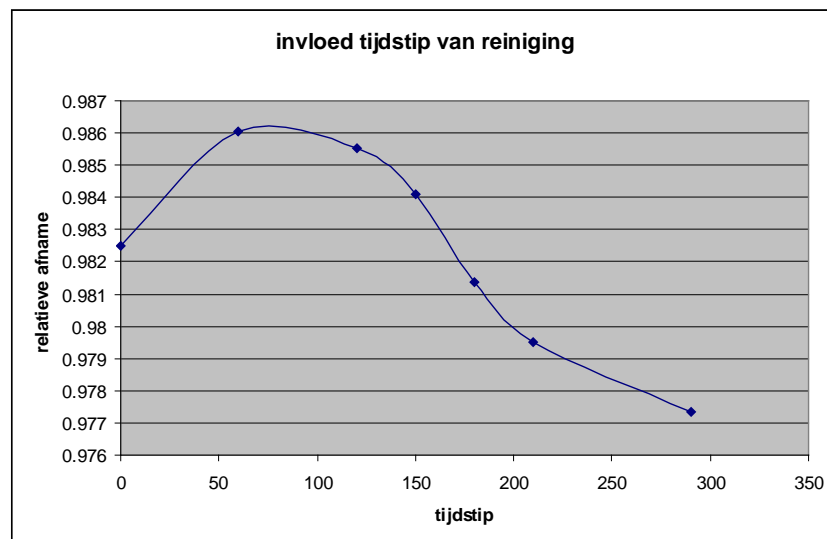
Geïnstalleerd PV 31/12/2001	kWp	m <sup>2</sup>	opbrengst	Kosten	Reinigings-
			10 <sup>6</sup> * kWh/jaar	verliezen euro	kosten euro
niet-gekoppeld niet huishoudelijk	4330	43300	3.464	7795	7794
net gekoppelde PV centrales	2480	24800	1.984	4465	4464
net gekoppeld gedistribueerd	13699	136990	10.9592	60705	24658
Totaal	20509	205090	16.4072	72965	36916

Gezien de gemeten vervuilingpercentages met een ordegrootte van >3,5% blijkt dus dat reinigen van systemen die opbrengsten leveren tegen huishoudelijk tarief, zonder meer lonend is. Figuur 5.13 geeft het beeld weer als we de reinigingskosten als variabele nemen en berekenen bij welk percentage vervuiling de kosten en opbrengsten in evenwicht zijn. Indien het percentage vervuiling hierboven komt dan gaat de reiniging dus lonen.



**Figuur 5.13:** Evenwichtslijn tussen vervuilingpercentage en reiniging voor verschillende elektriciteitstarieven. Indien de vervuiling zich boven deze lijn bevindt wordt reiniging lonend.

In werkelijkheid is de materie voor de industriële systemen nog kritischer, omdat nog een tweede effect een rol speelt. Reinigen helpt immers slechts tijdelijk. Dus 1x per jaar schoonmaken halveert ruwweg het effectieve vervuilingpercentage. Daarnaast is de zoninstraling niet evenredig verdeeld over het hele jaar, maar geconcentreerd in het zomerseizoen. Voor een aangenomen situatie, dat de vervuiling lineair opbouwt tot een vervuiling van circa 3,5% (afname fractie van  $-0.0001$  per dag) op jaarbasis kunnen we de effecten inschatten. Dit is uitgezet in figuur 5.14, waarbij de dag van schoonmaken is gevarieerd in een zestal stappen over het jaar. Hieruit blijkt duidelijk, dat reiniging in het voorjaar het meest effectief is. De vervuiling neemt dan effectief af tot een verlies van 1,5% op jaarbasis. Dit betekent dat de reiniging voor industriële systemen zich slechts terugverdient als er sprake is van een snellere vervuiling (verdubbeling tot ca. 6%) of de waarde van de geleverde elektriciteit toeneemt. Dit laatste is op basis van figuur 5.12 zeker te verwachten. In werkelijkheid zal vervuiling wat meer klimaatgebonden zijn en schoksgewijs verlopen. Dit doet echter geen afbreuk aan het feit dat schoonmaken in het voorjaar het meeste effect sorteert op de opbrengst.



**Figuur 5.14:** Invloed van het tijdstip van reiniging en de verwachte opbrengst bij een systeem met 3,5% afname in opbrengst door vervuiling in 1 jaar blootstelling. Duidelijk is dat reinigen meer effectief sorteert in het voorjaar.

Omdat de blootstelling in deze proef niet langer dan 1 jaar heeft geduurd, kunnen geen uitspraken worden gedaan of de vervuiling nog verder oploopt.

Alleen een meer gedetailleerde berekening op basis van een aantal proefsystemen met exacte prijsopgaven en opbrengsten, kan hier meer inzicht in verschaffen. Het lijkt zinnig dit als proef in een demonstratieproject op te nemen.

#### 5.4.1 *Conclusies ten aanzien van reiniging*

Reiniging van PV-systemen, waarvan de besparingen op elektriciteit in het huishoudelijk tarief vallen, zijn zonder meer lonend. Voor systemen die onder het grootverbruikers tarief vallen, is dit echter niet zonder meer het geval. De reinigingskosten kunnen zich terugverdienen indien op jaarbasis door reiniging 3,5% of meer energie wordt geleverd. Voor grote systemen met kunststof afdekking of gestructureerde afdekkingen, lijkt dit eerder lonend, omdat deze in de proef meer vervuiling toonden. Rekening houdend met het feit, dat de effecten van schoonmaken tijdelijk zijn, lijkt er momenteel een evenwichtssituatie te bestaan tussen kosten en opbrengsten voor grootverbruikers. Dit betekent, dat de situatie op individuele basis per systeem dient te worden beoordeeld. Het eenmalig schoonmaken van sterk vervuilde systemen lijkt zeker aanbevelenswaardig.

Het effect van reinigen is maximaal indien dit in het begin van het voorjaar plaats vindt.

## 6 Conclusies en aanbevelingen

### 6.1 Conclusies getrokken uit observatie van de monsters

- Dit onderzoek bevestigt dat wat ook elders reeds geconstateerd is, namelijk, dat bij gebruik van frames, waardoor er een opstaande rand ontstaat waar vuil zich kan nestelen, de afstand tussen frame en PV laminaten zeer belangrijk is en niet te klein genomen moet worden, zodat de cellen gevrijwaard blijven.
- Na drie dagen mooi weer is zichtbare vervuiling waarneembaar.
- Na een motregenbui krijgt de vervuiling een 'drabberig' uiterlijk.
- Na een fikse regenbui zijn alle monsters weer (visueel) schoongespoeld.

### 6.2 Conclusies ten aanzien van de metingen aan de kleine samples

De kunststof folies tonen duidelijk meer vervuiling dan de glazen samples. Een duidelijk verband tussen hellingshoek en vervuiling, kan niet worden gelegd voor de glazen samples. Hier lijkt het eerder, dat de meest vervuilinggevoelige hellingshoek ligt bij een hellingshoek van 20 graden. Bij de kunststof folies lijkt er wel sprake van een verband met de hellingshoek. Hier tonen de horizontale (hellingshoek 2 graden) monsters 2-2,5% meer afname in transmissie. Ook hier lijkt echter, dat een hellingshoek van 20 graden een piek in de vervuiling toont. Voor de kunststof folies ligt bij deze hellingshoek de relatieve afname voor de AM2 en Silicium golflengte band op ca. 7%, terwijl dit voor het glas slechts ca. 2,5% is.

De vervuiling is golflengte afhankelijk, waarbij aan de kortgolfige zijde van het spectrum de vervuilinginvloed duidelijk groter is dan aan de langgolfige zijde. Dit betekent, dat de celmaterialen die hun maximum bij 500-600 nm, zoals bijvoorbeeld amorf silicium, meer last zullen hebben van identieke vervuiling dan mono- of multikristallijn, waarbij het zwaartepunt meer rond de 800 nm ligt.

De werking van de cleanshield coating is niet aantoonbaar. De samples zijn na de buitenexpositie niet meer hydrofoob, wat erop zou kunnen duiden, dat de coating na afloop niet meer aanwezig is.

Door de beperkte opzet van de proef, waarbij niet gewerkt is met dubbele samples en het verloren gaan van enkele samples, maakt dat niet altijd harde verschillen kunnen worden aangetoond. De losse samples kunnen gemakkelijk artefacten oplopen, waardoor onderlinge verschillen ontstaan die niet uitsluitend op de hellingshoek zijn terug te voeren.

### 6.3 Conclusies ten aanzien van de expositie van de panelen

De bij de kleine samples geconstateerde spectrale vervuiling lijkt bevestigd te worden door STC meting aan de panelen. De amorfe panelen lijken meer last te hebben van vervuiling dan mono- en multikristallijne. Echter sommige panelen hebben gestructureerde oppervlakken, waardoor andere effecten eveneens een rol spelen.

De panelen blijken meer last te hebben van vervuiling dan op grond van de kleine samples werd verwacht. De gemeten relatieve afname in opbrengst ligt tussen 4,4 en 7,7%. Van een paneel was de afname 2,2%, maar dit paneel toont echter andere defecten, waardoor deze waarde voorzichtig dient te worden gehanteerd.

#### **6.4 Conclusies ten aanzien van reiniging**

Reiniging van systemen, waarvan de besparingen op elektriciteit in het huishoudelijk tarief vallen, zijn zonder meer lonend. Voor systemen die onder het grootverbruikers tarief vallen, is dit echter niet zonder meer het geval. De reinigingskosten kunnen zich terugverdienen indien op jaarbasis door reiniging 3,5% meer energie wordt geleverd. Voor grote systemen met kunststof afdekking of gestructureerde afdekkingen lijkt dit eerder lonend, omdat deze in de proef meer vervuiling toonden. Rekening houdend met het feit dat de effecten van schoonmaken tijdelijk zijn, lijkt er momenteel een evenwichtssituatie te bestaan tussen kosten en opbrengsten voor grootverbruikers. Dit betekent dat de situatie op individuele basis per systeem dient te worden beoordeeld. Het eenmalig schoonmaken van sterk vervuilde systemen lijkt zeker aanbevelenswaardig.

Het effect van reinigen is maximaal indien dit in het begin van het voorjaar plaats vindt.

Delft, 10 juli 2003  
OTH011, NOV (slla)

Ir. B.J.M. van Kampen  
Hoofd afdeling  
Duurzame Energie en Gebouwen

Ing. H.P. Oversloot  
Auteur

## 7 Referenties

- [1] Kwaliteit van kassen: Verslag van een onderzoek naar de kwaliteit en de toepassingsmogelijkheden van kasomhullingsmaterialen, TNO Bouw, 1985.
- [2] Artikel "Life after Oil", Refocus, maart, 2001.
- [3] Artikel "Langzeitbetrieb von Standardmodulen", Sonne Wind & Warme maart 2000.
- [4] Gesprek met Jaap Eikelenboom van ECN, d.d. 29 oktober 1999.
- [5] Informatiekaart van HSL, Elsbeth Pinksterboer, maart 1999.
- [6] EN 410 Glass in building-Determination of luminous and solar characteristics of glazing.
- [7] ISO 9845 , Solar energy; reference solar spectral irradiance at the ground at different receiving conditions. Part 1 direct normal irradiance for airmass 1.5
- [8] Solar Cell spectral response errors related to spectral bandwidth and chopped light waveform, H. Field, NREL, 26<sup>th</sup> IEEE PV specialists conference Anaheim 1997 California.
- [9] IEA task1, National Survey Report PV Power Applications in the Netherlands 2001, Novem onderzoek 2021-02-41-03-003 , Beco Group B.V. Zwolle , A. v. Beek, M. Maris en J. Roersen.
- [10] Leidraad pv-project NOVEM, leidraad bij de voorbereiding en begeleiding van pv-projecten in de woning- en utiliteitsbouw.  
*utrecht, oktober 1998, dv 1.1.122.98.10 emil ter horst*
- [11] Referenties: Elektriciteit in Nederland, Sep/EnergieNed; Vergelijking verkoopprijzen elektriciteit op basis van standaard verbruikssituaties, EnergieNed
- [12] Glazenwaswerk, arbeidsnormen, Elsevier FM-praktijk Facilitair nr1, jan 2002

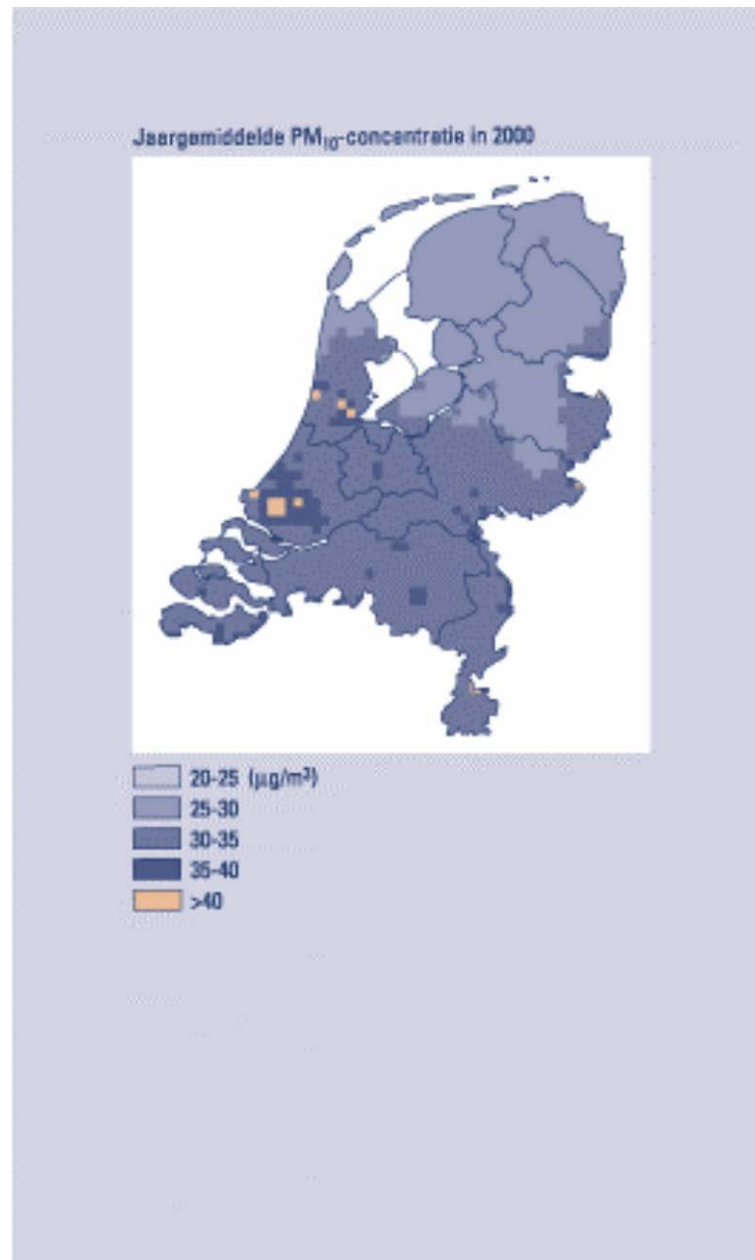
### *Algemeen*

- a Bealging van de gebouwde omgeving (SBR, 1997)

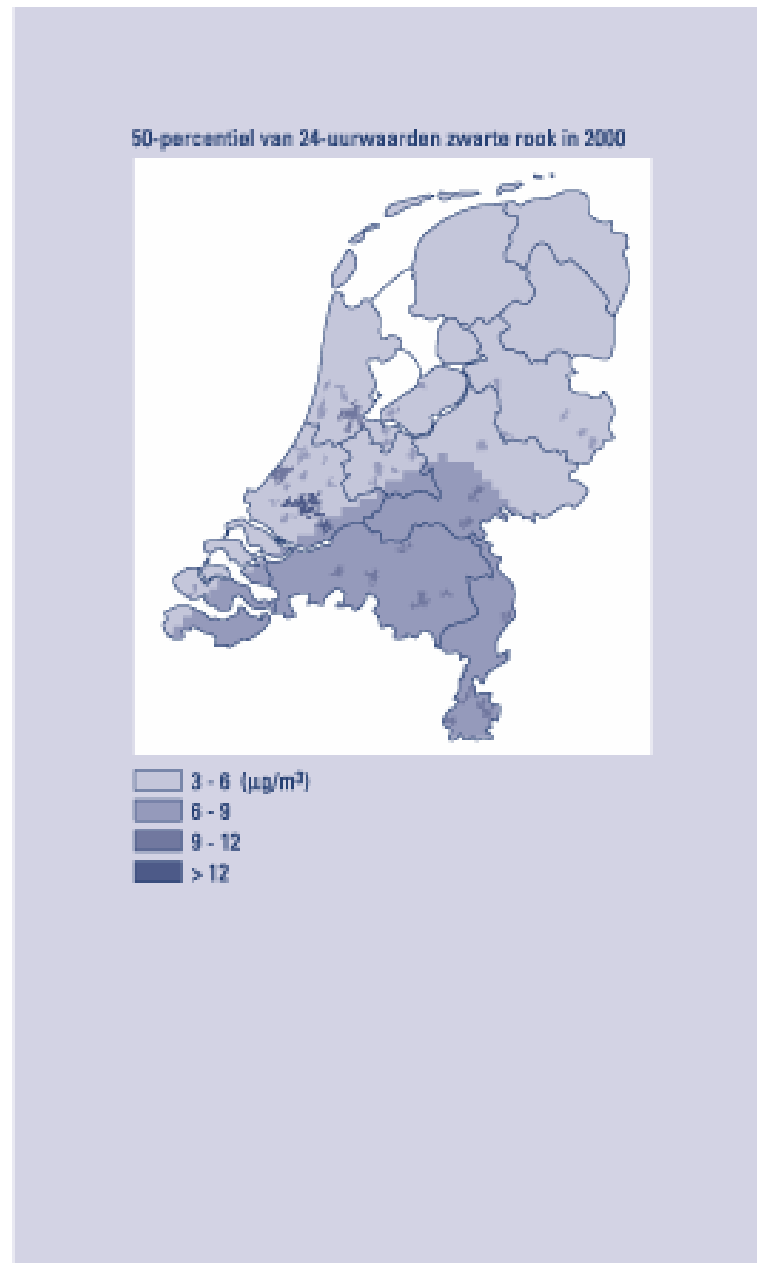


## Bijlage A Vervuilingkaarten van Nederland

Verdeling van de (jaargemiddelde) luchtconcentratie van stofdeeltjes in Nederland (2000).



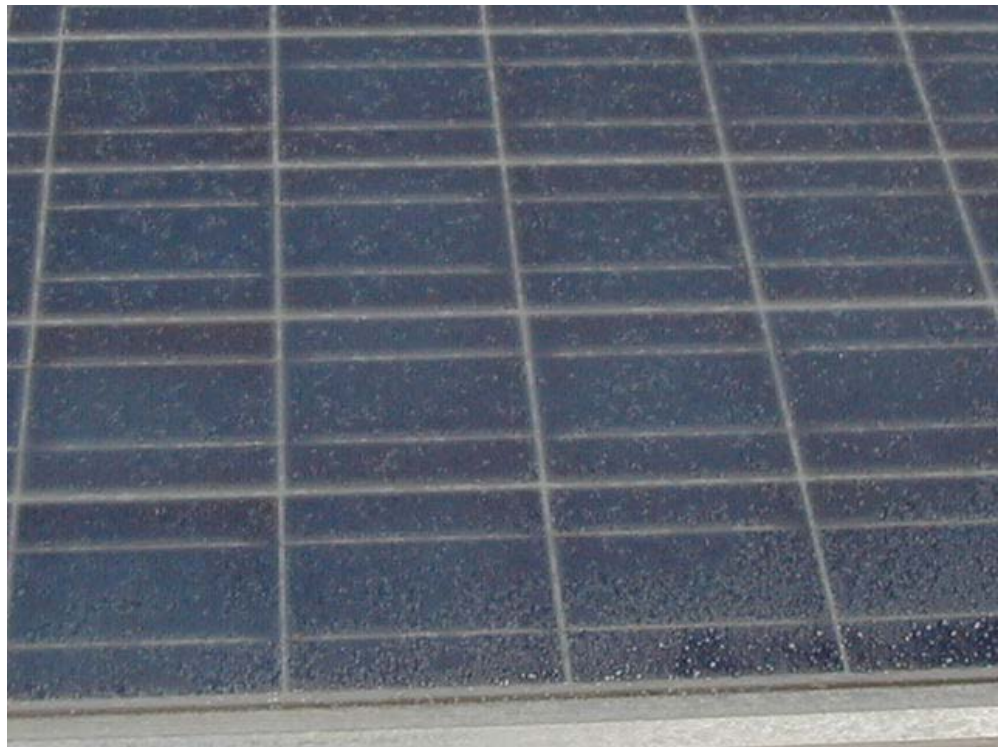
Bron: RIVM



Bron: RIVM

## Bijlage B Winter condities ijs en rijpvorming







## Bijlage C Verschillende soorten vervuiling

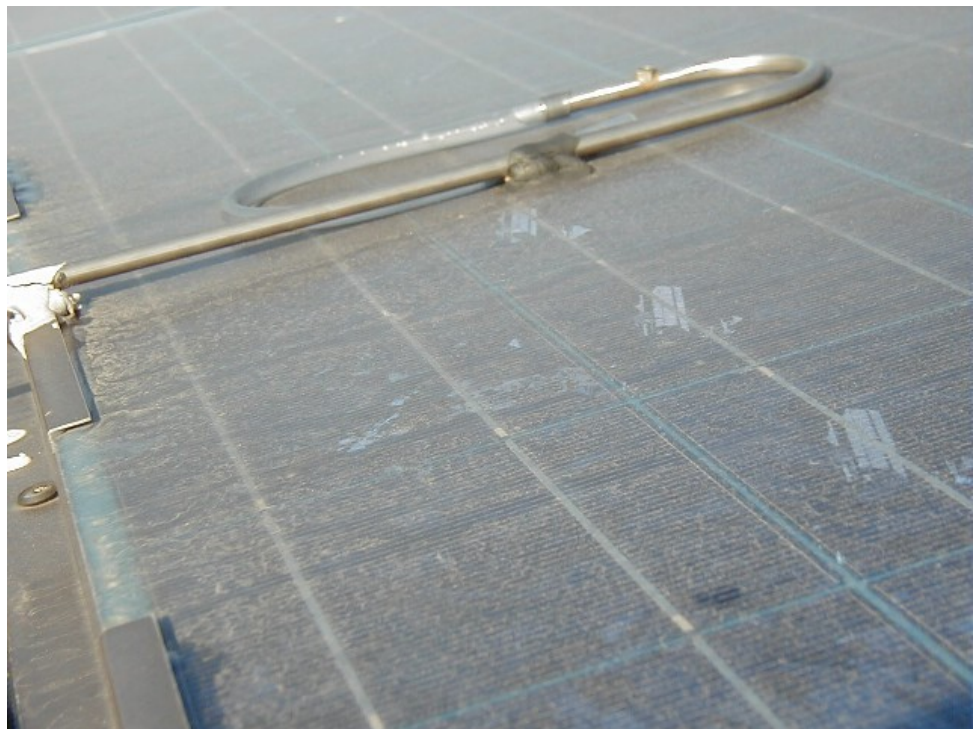




## Bijlage D Vervuiling vergelijkbare systemen van dezelfde locatie en periode

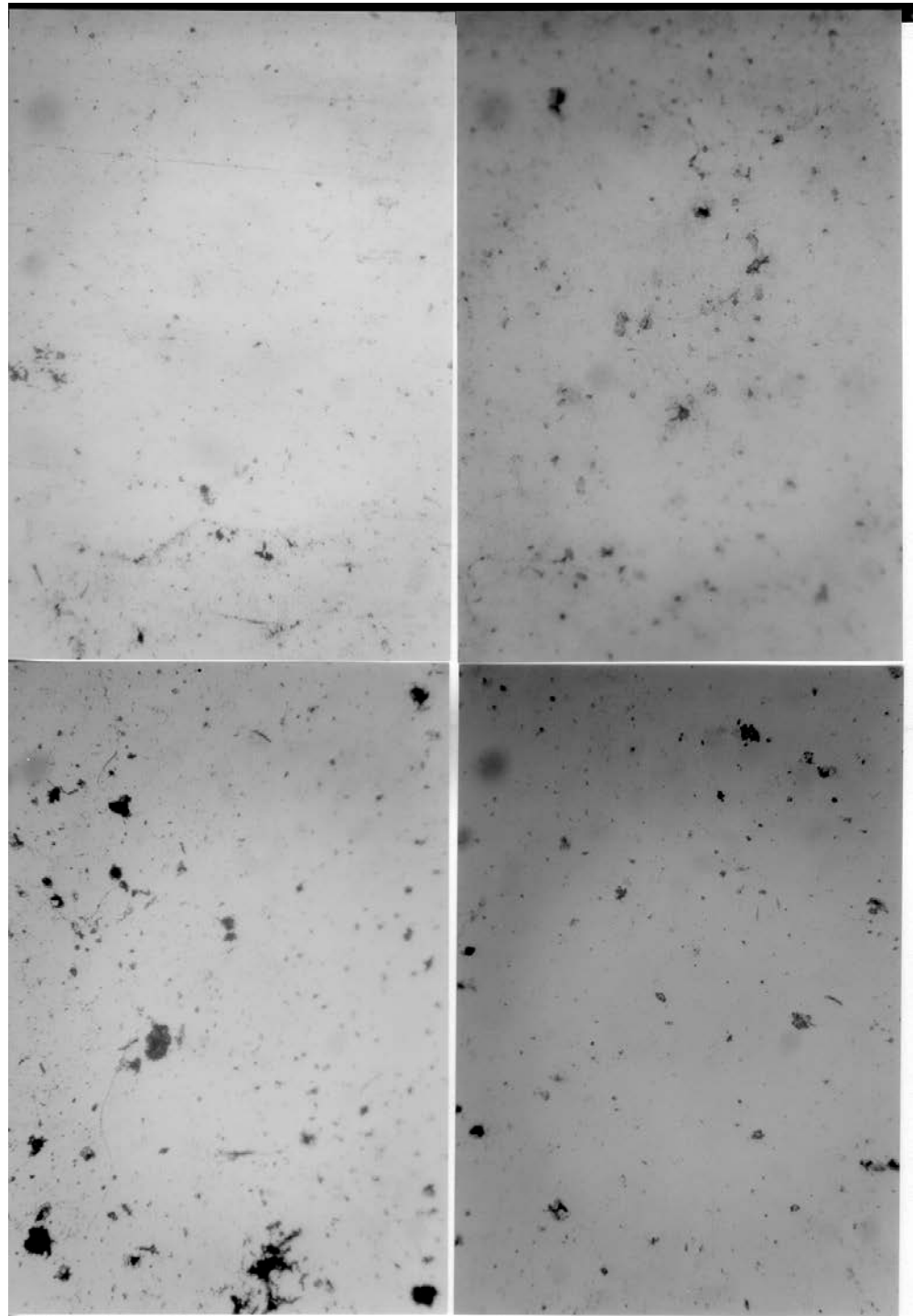


*Zonnecollector onder 50 graden helling (stof stroomt ook af bij condens).*



*PV panelen onder 30 graden dakhelling (weinig afstromen stof door condens).*

## Bijlage E Microscopische opname van vervuiling



**Boven links:** Helianthos 50 horizontaal;

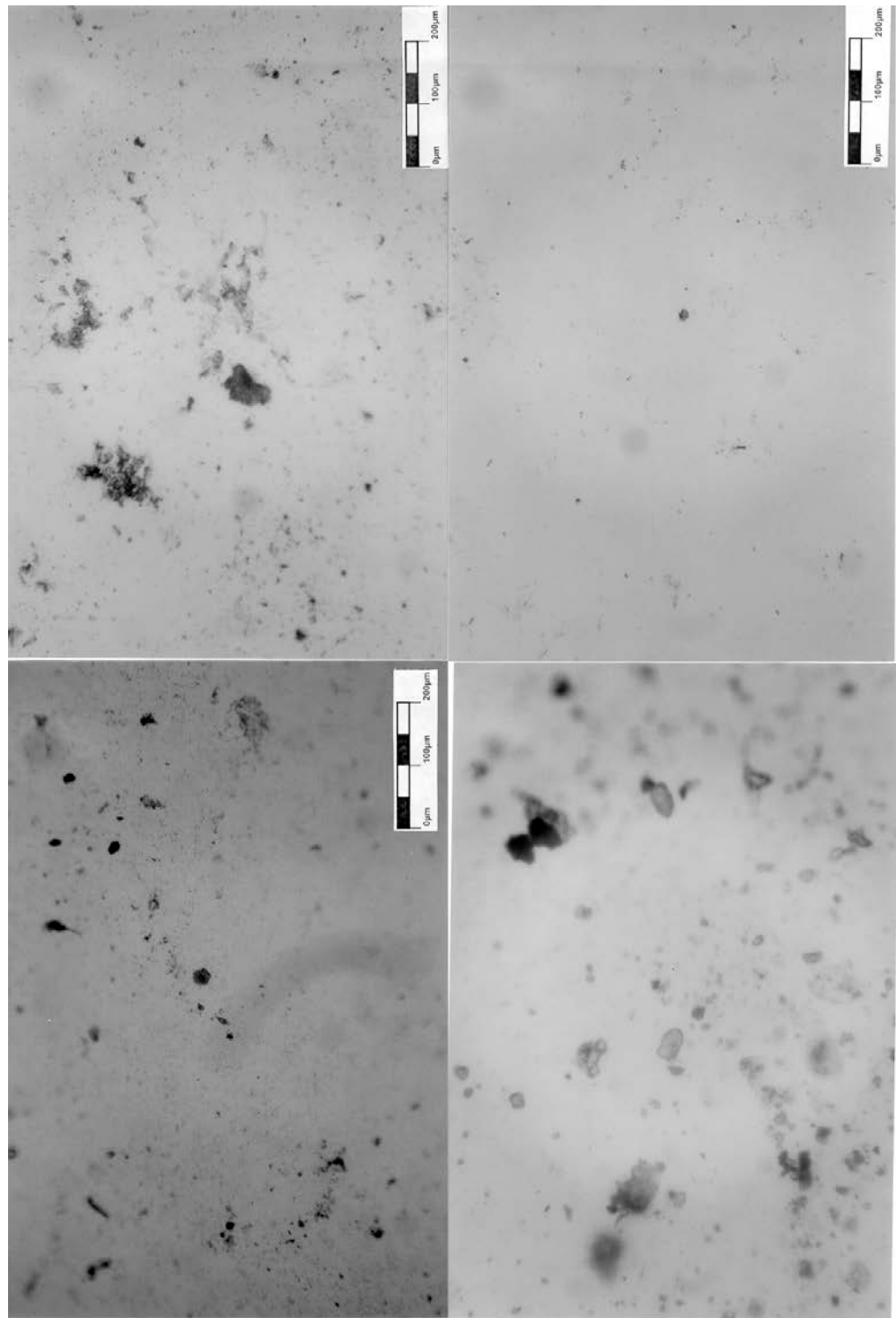
**Boven rechts:** Helianthos 50 30 graden;

**Onder links:** floatglas horizontaal;

**onder rechts:** floatglas 30 graden.

*Alle foto's belichtingstijd 1/250 s. Vergroting als op pagina 43.*





**Boven links:** sample 6/horizontaal;  
**Boven rechts:** sample 6 verticaal.  
(beide optiwhite glas met coatings)

**Onder links:** sample 1/verticaal;  
**Onder rechts:** sample 1/15.  
(beide kunststof)

## Bijlage F Gegevens vermogensmeting

Overzichtstabel met de bij ECN gemeten elektrische eigenschappen voor en na reiniging.

Manufacturer	Product ID	Isc(A)	Voc(V)	Imp(A)	Vmp(V)	Pmp(W)	Module eff.	Cell eff.	Fill factor	Module Notes
<b>Neste</b>	A13R 12W	0.872614	22.19	0.624455	15.3394	9.57874	3.35862	4.12879	49.4685	Module vuil 1
<b>Neste</b>	A13R 12W	0.871786	22.17	0.615746	15.54	9.56869	3.3551	4.12445	49.5082	Module vuil 2
<b>Neste</b>	A13R 12W	0.916546	22.3812	0.654997	15.4643	10.1291	3.55285	4.36756	49.3777	Module schoon 1
<b>Neste</b>	A13R 12W	0.915919	22.3614	0.663496	15.272	10.1329	3.55419	4.36921	49.4739	Module schoon 2
<b>Unisolar</b>	US 42	3.17375	22.82	2.42625	16.5	40.0332	5.81907	7.64837	55.2754	Module vuil 1
<b>Unisolar</b>	US 42	3.1729	22.7959	2.43848	16.4059	40.0054	5.81504	7.64307	55.3102	Module vuil 2
<b>Unisolar</b>	US 42	3.41536	23.1394	2.62735	16.5093	43.3758	6.30481	8.2868	54.8857	Module schoon 1
<b>Unisolar</b>	US 42	3.41465	23.0994	2.59752	16.6893	43.3509	6.30133	8.28223	54.9606	Module schoon 2
<b>Shell Solar Energy</b>	RSM 110	4.38463	31.7571	4.05903	25.4121	103.148	9.95021	12.2292	74.0778	Module vuil 1
<b>Shell Solar Energy</b>	RSM 110	4.37973	31.7517	4.05764	25.3888	103.019	9.93771	12.2138	74.0801	Module vuil 2
<b>Shell Solar Energy</b>	RSM 110	4.56758	31.9757	4.22617	25.5431	107.949	10.4099	12.7942	73.912	Module schoon 1
<b>Shell Solar Energy</b>	RSM 110	4.56928	31.9349	4.19285	25.713	107.811	10.3966	12.7778	73.8837	Module schoon 2
<b>Siemens</b>	SM 130 / 110	4.19384	39.3329	3.2031	28.8882	92.5318	7.10146	9.77079	56.0948	Module vuil 1
<b>Siemens</b>	SM 130 / 110	4.19015	39.3329	3.17201	29.1564	92.4845	7.09783	9.76579	56.1156	Module vuil 2
<b>Siemens</b>	SM 130 / 110	4.24745	39.6829	3.19376	29.6209	94.6019	7.26003	9.98896	56.1266	Module schoon 1
<b>Siemens</b>	SM 130 / 110	4.24631	39.6429	3.21745	29.3493	94.43	7.24683	9.9708	56.0961	Module schoon 2