



Dorpstraat 50
3411 AG Lopik
secretariaat@voam.nl
T 0348 478 057
F 0348 478 051



Onderzoeksprotocol zonnepaneel incidenten versie 3.0

23 juni 2022

Titel	Onderzoeksprotocol zonnepaneel incidenten
Auteur(s)	VOAM

Inhoud

1	Onderwerp en toepassingsgebied	6
1.1	Algemeen / toepassingsgebied	6
1.2	Onderwerp(en)	6
1.3	Achtergrond informatie	6
1.4	Typen zonnepanelen	7
1.4.1	Opbouw zonnepaneel	7
1.5	Brand	9
1.6	Mogelijke schadelijke effecten van depositie	9
2	Aanpak zonnepaneel incidenten	11
2.1	Kenmerken van zonnepaneel incidenten	11
2.2	Incident met zonnepanelen	11
2.2.1	Schema zonnepaneel incidenten (zie figuur 2.1)	11
3	Bepalen verspreidings-/ saneringsgebied bij zonnepaneel incidenten	13
3.1	Apparatuur en benodigdheden	13
3.2	Inkadering van het verspreidingsgebied	13
3.3	Het brongebied / brandhaard	14
3.4	Schoonmaken en eindinspectie	14
3.5	Explosie	15
4	Rapportage, advies en conclusies	16

Bijlage 1: Typen zonnepanelen

Termen en definities

AGS	Adviseur Gevaarlijke Stoffen. Piketfunctionaris van de brandweer.
Bevoegd gezag	Het bestuursorgaan dat bevoegd is omtrent die zaak besluiten te nemen of beschikkingen af te geven. Dat is/kan zijn: gemeente, Omgevingsdienst (OD) /Regionale Uitvoeringsdienst (RUD) of Provincie.
BV	Bevelvoerder. Piketfunctionaris werkzaam bij brandweer, als leidinggevende van de basiseenheid (TS, Tankautospuiter).
CoPI	Commando Plaats Incident. Groep leidinggevend van verschillende disciplines (brandweer, politie, GHOR en gemeente) belast met de coördinatie van de inzet ter plaatse.
CVE	Coördinator Verkenningseenheid (zie ook VE). Voorheen: meetplanleider (MPL, brandweer).
DIZI	Deskundig Inventariseerder Zonnepaneel Incidenten (DIZI). Werkzaam voor een commercieel bedrijf of voor de overheid, die een zonnepanelen restanten inkadering mag uitvoeren en is geregistreerd in het VOAM register als deskundige.
Eindinspectie	Controle na beroepsmatige verwijdering van restanten PV-installatie onderdelen, om vast te stellen of er geen visueel zichtbare restanten zonnepanelen zijn achtergebleven. De controle moet worden uitgevoerd door een DIZI.
GGD	Gemeentelijke (gemeenschappelijke) Gezondheidsdienst.
GMK	Gemeenschappelijke Meldkamer van de overheidshulpdiensten.
GRIP	Gecoördineerde Regionale Incidentenbestrijdingsprocedure. GRIP kan worden afgekondigd door operationeel leidinggevend. Denk aan een Ovd. GRIP kent verschillende alarmeringsniveaus afhankelijk van de (verwachte) impact van een incident: GRIP 0 en 1 bij bronbestrijding, GRIP 2 en hoger (tot 5) bij incidenten met duidelijke uitstraling naar de omgeving.
IBGS	Incidentbestrijding Gevaarlijke Stoffen. Afkorting in gebruik bij de brandweer (voorheen OGS).
IFV	Instituut Fysieke Veiligheid.
IL&T	Inspectie Leefomgeving & Transport. Valt onder het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.
Inkaderingsbedrijf	Een (geregistreerd) inkaderingsbedrijf waar tenminste 1 geregistreerde DIZI in dienst is.
NLA	Nederlandse Arbeidsinspectie.
OD (H-)Ovd	Omgevingsdienst. (Hoofd) Officier van Dienst. Piketfunctionaris werkzaam bij brandweer (Ovd-B), Politie (Ovd-P), GHOR (Ovd-G, Geneeskundig) of de gemeente (Ovd-Bz, bevolkingszorg).

Primaire emissie	Stoffen uit PV-installaties die tijdens een incident in eerste instantie vrijkomen door onder andere brand.
RIVM	Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu. Valt onder het Ministerie van Volksgezondheid, Welzijn en Sport.
RUD	Regionale Uitvoeringsdienst. Voert milieutaken uit namens provincie en gemeenten.
Secundaire emissie	Verdere vorming, vrijkomen en verspreiding van stoffen uit PV-installaties naar de omgeving en/of binnenruimten uit neergeslagen restanten PV-deeltjes; dit kan gebeuren door bijvoorbeeld verwaaiing of menselijke verspreiding via schoeisel/voertuigen.
Taakcommandant	Hoogste leidinggevende v/d brandweer ter plaatse (BV, OVD, H-OVD)
TNO	Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek.
VE	Verkenningseenheid. Voorheen: Waarschuwing- en Verkenningdienst van de brandweer (WVD). De VE staat onder leiding van de Coördinator Verkenningseenheid (CVE).
Verspreidingsgebied	Gebied waarin restanten uit PV-installaties (flinters, stukjes) terecht zijn gekomen.
Zonnepanelen Brand	Brand waarbij restanten zonnepanelen uit elkaar vallen en waarbij deze flinters en/of restanten zonnepanelen in de omgeving vrijkomen.
Zonnepanelen deskundige	Onafhankelijk werknemer van een gespecialiseerd bedrijf die aantoonbaar beschikt over deskundigheid, bij voorkeur tevens in het bezit van een certificaat DIA.
Zonnepaneel incident	Een situatie waarin (mogelijk) restanten PV-installatie onderdelen vrijkomen in de omgeving en er mogelijk sprake is van een risico voor verspreiding.

1 Onderwerp en toepassingsgebied

1.1 Algemeen / toepassingsgebied

Het onderzoeksprotocol zonnepaneel incidenten is specifiek bedoeld om na een incident, waarbij restanten PV-installatie onderdelen zijn vrijgekomen, onderzoek te doen. Het onderzoek heeft als doel om de aard en omvang van de verspreiding van restanten PV-installaties te bepalen en na een reinigingsactie te kunnen vaststellen dat er een eindinspectie is uitgevoerd.

1.2 Onderwerp(en)

Dit protocol heeft betrekking op de volgende punten voor het onderzoek naar verspreiding van restanten zonnepanelen bij een incident:

- Het bepalen van het te onderzoeken gebied op basis van bron, type incident en overige bepalende locatie-specifieke omstandigheden
- Vastleggen inspectieresultaten
- Rapportage

In situaties waarbij er ook sprake is van asbest(verdachte) daken/dakbeschot is de 'Handreiking aanpak asbestincidenten (IFV)' leidend op dit protocol.

1.3 Achtergrond informatie

(Teksten en informatie uit de publicatie 'Depositie bij branden met zonnepanelen', Instituut Fysieke Veiligheid, 15 juli 2021).

Bij grootschalige branden waarbij zonnepanelen zijn betrokken, kunnen verbrandingsproduct en onverbrande resten van zonnepanelen in de omgeving verspreid worden, soms tot kilometers ver.

Dit leidt tot vragen bij boeren, omwonenden, hulpdiensten en andere betrokkenen over de mogelijke risico's van deze depositie en over de taken en verantwoordelijkheden van de verschillende betrokken partijen.

Zonnepanelen bestaan voornamelijk uit glas en polymere tussenlagen. Bij verbranding geeft glas geen verbrandingsproducten, maar de polymere tussenlagen wel: voornamelijk de gassen koolmonoxide en kooldioxide. Een brand met zonnepanelen verschilt in dat opzicht niet van een brand zonder zonnepanelen. Bij de verbranding van zonnepanelen kunnen verder metalen vrijkomen die zich in kleine hoeveelheden in de zonnecellen en andere onderdelen van de zonnepanelen bevinden. Voorbeelden zijn: koper, cadmium, lood, arseen en seleen. Deze metalen kunnen in (on)verbrande deeltjes zonnepaneel zitten die in de omgeving terechtkomen.

De verschillen in de samenstelling van kristallijne zonnepanelen en dunne-film-zonnepanelen zitten voornamelijk in de metalen die in de zonnecellen verwerkt zijn. De polymere tussenlagen kunnen ook verschillen, maar bij verbranding geven deze lagen voornamelijk koolmonoxide en kooldioxide. Het is daarom te verwachten dat als er verschillen in depositie zijn, deze te maken zullen hebben met de verschillen in metalen in de zonnepanelen.

Over de verspreiding van verbrandingsproducten van zonnepanelen zijn in de literatuur geen gegevens gevonden. Wel heeft het RIVM in het verleden onderzoek gedaan naar de verspreiding van stoffen die vrijkomen bij grote branden zonder zonnepanelen (RIVM 2007, 2009). Hieruit bleek dat de grootte van de brand, de daarbij ontwikkelde temperaturen en de grootte en zwaarte van de vaste deeltjes bepalend zijn tot op welke afstand depositie plaatsvindt. In het algemeen is depositie tot 500 m vanaf de brand mogelijk, maar uitzonderingen hierop zijn (zeer) grote branden waarbij depositie kilometers ver terecht kan komen.

Dit is in de praktijk waargenomen bij branden met zonnepanelen. In hoeverre de verbranding van zonnepanelen en de daaruit voortkomende depositie bijdragen aan mogelijke toxische effecten voor mens, dier en milieu, is niet te zeggen. Eén van de redenen hiervoor is dat de literatuur niet aangeeft in welke vorm metalen vrijkomen. Wel wordt in de literatuur voor cadmium-telluride dunne-film-zonnepanelen die zijn uitgevoerd met een glazen boven- en onderlaag, vermeld dat bij brand het gros van het aanwezig cadmium

niet vrijkomt, omdat de zonnecellen dan omhuld worden met gesmolten glas. De restanten van (on)verbrande zonnepanelen kunnen scherp zijn en daardoor schadelijk zijn voor mens en dier.

1.4 Typen zonnepanelen

Zie bijlage 1: Type zonnepanelen, voor gedetailleerde informatie.

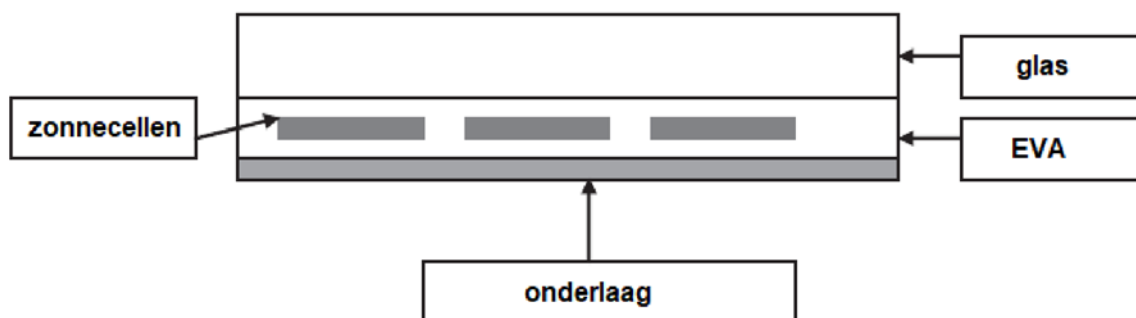
De kern van een zonnepaneel is de zonnecel, ook wel fotovoltaïsche cel genoemd (in het Engels photovoltaic, afgekort PV). Een zonnecel bevat een materiaal dat licht absorbeert en de energie van dat licht vervolgens omzet in een elektrische stroom. In de praktijk worden verschillende termen gebruikt, zoals zonnepaneel, PV-paneel, PV-module, et cetera. In dit rapport wordt de term 'zonnepaneel' gebruikt.

1.4.1 Opbouw zonnepaneel

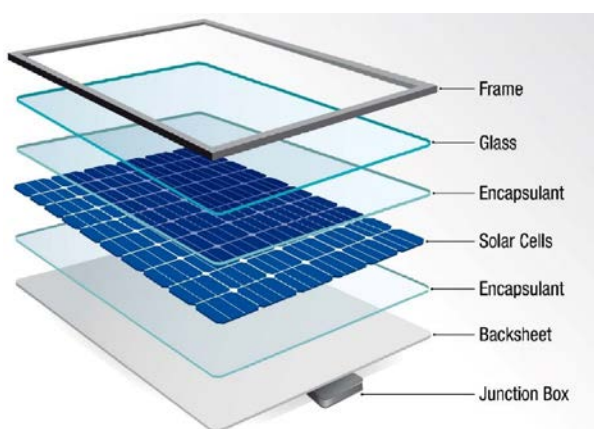
In een zonnepaneel zijn meerdere zonnecellen elektrisch in serie geschakeld. In figuur 1.1 en figuur 1.2 is de opbouw van een gangbaar (kristallijn silicium) zonnepaneel weergegeven.

Het bestaat uit de volgende onderdelen:

- > zonnecellen die elektrisch met elkaar geschakeld zijn door middel van koper;
- > een bovenlaag van gehard glas;
- > een tussenlaag ('encapsulant' in figuur 1.2) van (co)polymeer waarin de zonnecellen zijn ingebed (van bijvoorbeeld EVA, ethyleenvinylacetaat, PVB, polyvinylbutyral of TPU, thermoplastisch polyurethaan);
- > een onderlaag ('backsheet'; van glas of kunststof polymeer);
- > sommige typen zonnepanelen zijn omlijst met een aluminium frame (niet weergegeven in figuur 1.1, zie figuur 1.2).



Figuur 1.1 Opbouw van een kristallijn silicium zonnepaneel (zijaanzicht)

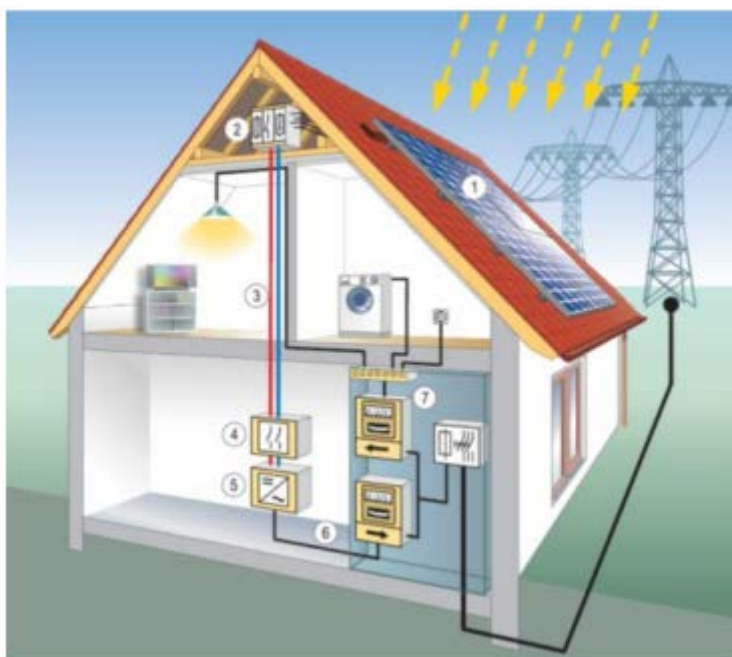


Figuur 1.2 Onderdelen van een zonnepaneel

Zonnepanelen maken deel uit van een systeem (de PV-installatie) dat behalve de zonnepanelen ook kabels, een omvormer en connectoren bevat (TNO, 2019; Liciotti et al., 2014).

Niet alleen de zonnepanelen zelf, maar ook de bekabeling en overige onderdelen kunnen betrokken raken bij een brand (of er de oorzaak van zijn).

Naast het vrijkomen van restanten uit de zonnepanelen is het ook mogelijk dat er restanten materialen vrijkomen uit de PV-installatie. Zie onderstaand overzicht van alle onderdelen van een PV-installatie (Bron; PV Fire Safety Guideline 2018).



Figuur 1.3: Netgekoppeld PV-systeem met directe voeding

Figuur 1.3 geeft de schematische lay-out weer van een op het net aangesloten fotovoltaïsch systeem, dat in wezen bestaat uit de volgende hoofdcomponenten:

1. PV-generator (meerdere PV-modules in serie en parallel geschakeld met montageframe)
2. Generatorsluitdoos (met beveiligingstechniek)
3. Gelijkstroombedrading
4. DC-hoofdschakelaar
5. Omvormer:
6. Wisselstroombedrading
7. Meterkast met deelstroomverdeling, verbruiks- en voermeters en stalaansluiting

1.5 Brand



Figuur 1: Ontstaan van depositie bij brand met zonnepanelen (Bron: IFV rapport)

In figuur 1 wordt geïllustreerd hoe bij een brand depositie van verbrandingsproducten en onverbrande resten van zonnepanelen kan ontstaan:

1. Wanneer zonnepanelen betrokken raken bij een brand, ontstaan verbrandingsproducten en onverbrande resten van de zonnepanelen (en van het gebouw waar ze op bevestigd zijn).
2. Bij een grote uitslaande brand wordt veel warmte ontwikkeld. Hierbij stijgt de hitte op en neemt de rook in de hittewervelingen allerlei stoffen met zich mee. Dit wordt pluimstijging genoemd. Op deze manier kunnen (on)verbrande stoffen in de atmosfeer komen.
3. Door de wind kunnen de stoffen zich verspreiden in de omgeving. Het gaat hierbij om gasvormige en vaste verbrandingsproducten en om roetdeeltjes en onverbrande resten. Deze vaste stoffen en resten kunnen na verspreiding door de lucht in de omgeving neerslaan: dit wordt depositie genoemd. Zware deeltjes slaan doorgaans dichterbij de brandhaard neer, terwijl lichte deeltjes zich ook verder weg van de brandhaard verspreiden.
4. Bij zeer grote branden kan de afstand waarover (onverbrande) deeltjes zich verspreiden kilometers ver zijn, zoals gebleken is uit de praktijk.

1.6 Mogelijke schadelijke effecten van depositie

Depositie kan op verschillende manieren schadelijke gevolgen hebben:

Scherfwerking: Bij verschillende grootschalige branden waarbij zonnepanelen betrokken waren, werden (on)verbrande resten van zonnepanelen tot ver in de omgeving aangetroffen (bijvoorbeeld: branden in 't Veld van 30 juli 2020, in Rutten van 28 juli 2020, in Hazerswoude van 21 februari 2021 en in Noordbergum van 20 mei 2021; de afstanden waarop de resten werden aangetroffen verschilden sterk, van enkele tientallen meters tot meer dan 10 km van de brandhaard).



Als dergelijke (on)verbrande resten scherpe randen of delen hebben, kunnen ze een gevaar vormen voor mens en dier (bv inname kleine deeltjes en snijwonden).

Niet alleen de gasvormige verbrandingsproducten, maar ook (on)verbrande resten die als depositie in de omgeving neerslaan, kunnen gevaarlijke stoffen bevatten. Afhankelijk van de aard en de hoeveelheid gevaarlijke stof kan dat leiden tot vervuiling van de grond, water en gewassen (RIVM, 2007, 2009; Van Asselt et al, 2019).

2 Aanpak zonnepaneel incidenten

2.1 Kenmerken van zonnepaneel incidenten

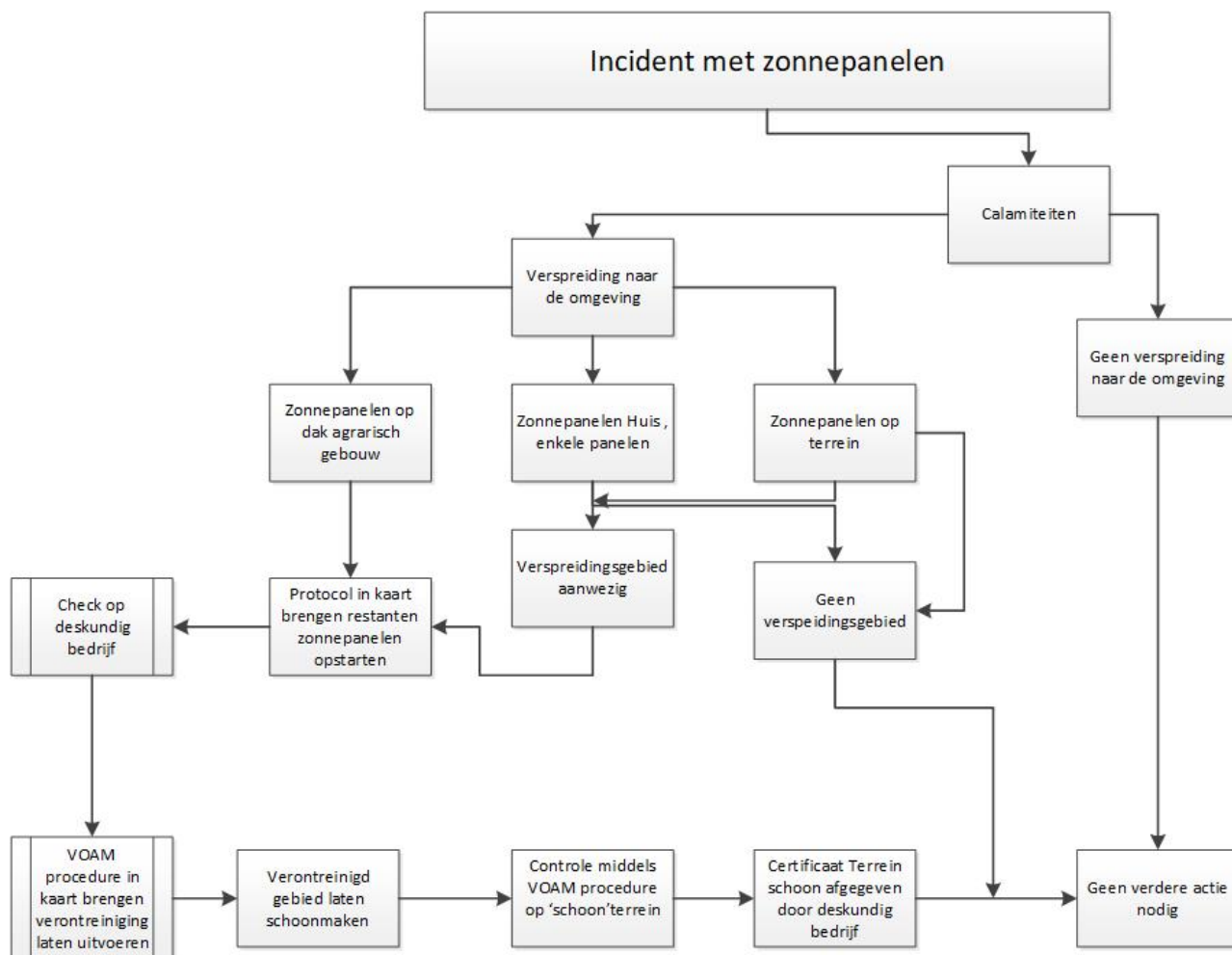
Het onderzoeksprotocol zonnepaneel incidenten heeft betrekking op alle typen incidenten waarbij er depositie van restanten zonnepanelen heeft plaatsgevonden.

- > Wetgeving.
Het wettelijk kader voor de aanpak van zonnepaneel incidenten is op dit moment niet aanwezig.
- > Specifieke deskundigheid.
Kennis van de verschillende type zonnepanelen
Kennis van bepalen verspreidingsgebied
- > Gezondheidsrisico en maatschappelijke onrust.

2.2 Incident met zonnepanelen

2.2.1 Schema zonnepaneel incidenten (zie figuur 2.1)

- Verspreidingsgebied vaststellen: wel of niet aanwezig.
- Geen verontreiniging naar de omgeving
 - o Zonnepanelen zijn geheel of grotendeels intact gebleven. Gedeelten van de zonnepanelen (glassplinters, scherven, folie of isolatiemateriaal) hebben zich niet verspreid naar de omgeving. Er hoeft geen verontreiniging in kaart te worden gebracht.
- Verontreiniging naar de omgeving
 - o Zonnepanelen zijn door de brand of explosie kapot gegaan en restanten hebben zich verspreid over een (groot) gebied in de omgeving van de calamiteit. Er is een onderscheid gemaakt tussen de verschillende typen locaties waar zonnepanelen kunnen voorkomen en het risico voor de omgeving. Vooral bij de agrarische locaties is het risico groot op verspreiding en verontreiniging van landbouwgronden / gewassen en restanten die door dieren kunnen worden opgegeten.
 - o Bij woningen speelt deze problematiek minder maar is dit in uitzonderlijke situaties wel mogelijk, evenals bij de weilanden met zonnepanelen.
Uit meest recente onderzoeken (TNO) blijkt dat er alleen een verspreidingsrisico is met secundaire effecten zoals boven benoemd. Er is zover bekend geen risico op directe emissie van hoge concentratie gevaarlijke stoffen waaraan mensen kunnen worden blootgesteld.
- In kaart brengen verontreinigd gebied
 - o Het in kaart brengen van de verontreiniging dient conform deze VOAM procedure te worden uitgevoerd. Deskundige bedrijven die hiervoor zijn opgeleid zijn terug te vinden in het VOAM register: Inkaderingsbedrijf met DIZI.
- Schoonmaken verontreinigd gebied
 - o Het schoonmaken van het verontreinigd gebied kan worden uitgevoerd door geïnstrueerde mensen en/of bedrijven die hiervoor de geschikte mensen en apparatuur/machines hebben.
- Eindcontrole gebied naar schoonmaakwerkzaamheden
 - o De controle nadat de schoonmaakwerkzaamheden hebben plaatsgevonden zal ook middels het VOAM protocol worden uitgevoerd. Als er visueel geen restanten meer worden aangetroffen wordt het gebied vrijgegeven en zal het, bij voorkeur hetzelfde, betreffende VOAM geregistreerde bedrijf een vrijgave verklaring afgeven.



Figuur 2.1: schema Incident met zonnepanelen

3 Bepalen verspreidings-/ saneringsgebied bij zonnepaneel incidenten

3.1 Apparatuur en benodigdheden

Benodigdheden voor de visuele inspectie:

- Gereedschap geschikt voor de visuele inspectie, zoals fotocamera en liniaal;
- Gereedschap voor het in kaart brengen van de locatie en het opdelen van de locatie, bijvoorbeeld meetlint, meetwiel, markeerlint, GPS en plattegrond van de locatie of object;
- Persoonlijke beschermingsmiddelen (PBM) voor de bemonstering, zoals P3 adembescherming, tyvek, latex handschoenen (incident specifiek).

3.2 Inkadering van het verspreidingsgebied

Bron: IFV: Handreiking aanpak asbestincidenten, 2018.

In het gebied wordt middels visuele inspectie bij goede verlichting, bij voorkeur daglicht, vastgesteld in hoeverre het feitelijke verspreidingsgebied overeenkomt met het (eerder) ingeschatte gebied.

Door hoge gebouwen, rijen van (hoge) bomen en wisselende weerscondities, etc. kan het daadwerkelijke verspreidingsgebied afwijken van een ingeschatte contour (zie ook figuur 3.1). Bij de inkadering moeten ook de hoger gelegen plaatsen zoals dakgoten, kozijnen, dakpannen en bomenrijen worden meegenomen.

Dit geldt met name voor het gebied dat direct onder de rook heeft gelegen. Het is daarbij van belang verdere verspreiding van restanten te voorkomen.

De visuele inspectie van het maaiveld wordt per verdachte (deel) locatie separaat uitgevoerd. Deel het maaiveld van de (deel) locatie op in 'inspectiestroken' van maximaal 1,5 m en inspecteer de volledige onderzoekslocatie strook voor strook in twee richtingen haaks op elkaar.

Voor grootschalige (deel) locaties met een oppervlakte groter dan 1 ha mag worden afgeweken van de bovengenoemde systematiek, hetzij door in één richting te inspecteren hetzij door een steekproefsgewijze inspectie van het maaiveld. Bij steekproefsgewijze inspectie moet minimaal 1 ha (in twee richtingen) worden geïnspecteerd.

De visuele inspectie kan niet worden uitgevoerd

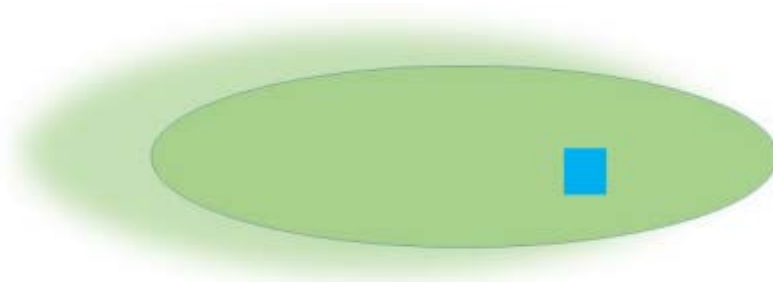
- bij regenval meer dan 10 mm/uur, of als op het maaiveld plassen aanwezig zijn;
- bij hagel of sneeuw(val);
- tussen zonsondergang en zonsopkomst, tenzij een lichtbron wordt ingezet die een zicht van tenminste 50 meter levert;
- bij een zicht van minder dan 5 meter;
- op terreindelen waar een effectieve inspectie onmogelijk is doordat objecten (zoals opgeslagen goederen) of vegetatie (gras, struiken, bladeren) aanwezig zijn.

Uitzondering: bij calamiteiten moet het maaiveld meteen worden geïnspecteerd, ongeacht de omstandigheden. Beperkingen dienen in het rapport beschreven te worden.

Tabel 1 : Schattingen van de inspectie-efficiëntie bij verschillende type grond

Type grond	Conditie maaiveld	Inspectie-efficiëntie
Zand	Droog, los en geen vegetatie	90 % – 100 %
Zand	Vochtig, vastgereden en/of matige vegetatie	70 % – 90 %
Klei/leem en veen	Droog, los en geen vegetatie	70 % – 90 %
Klei/leem en veen	Vochtig, vastgereden en/of matige vegetatie	50 % – 70 %

De DIZI brengt het verontreinigde gebied nauwkeurig in kaart.



Figuur 3.1: Schematische weergave van een verspreidingsgebied. Er is geen scherpe begrenzing aan de ondergrens in zone groen* van het verspreidingsgebied (blauw= bron)

Op basis van de waarnemingsresultaten wordt de definitieve grens van het verspreidingsgebied vastgesteld, gecontroleerd en zo nodig bijgesteld. Deze definitieve grens is in figuur 3.1 niet weergegeven.

NB: Het valt niet uit te sluiten dat ook buiten dit gebied (de zones groen en groen*) nog incidenteel een flintertje wordt aangetroffen (toevalstreffer).

3.3 Het brongebied / brandhaard

Ook het brongebied maakt uiteraard deel uit van de inkadering, waarbij ook wordt beoordeeld of er kans is op nieuwe of verdere verspreiding van losliggende restanten PV-installaties vanuit het brongebied, bijvoorbeeld bij draaiende windrichting en/of toename van de windsnelheid. Verder moet worden vastgesteld of er nog andere schadelijke materialen (restanten isolatiemateriaal) in het brongebied aanwezig zijn.

3.4 Schoonmaken en eindinspectie

Op basis van het in kaart gebrachte verspreidingsgebied wordt een opruimplan opgesteld. Tussen het opstellen van het opruimplan en de eindinspectie vindt de verwijdering van de restanten PV-installaties plaats. De restanten PV-installatie verwijdering moet overeenkomstig het inkaderingsrapport plaatsvinden (werkmethode en gebied) en overeenkomstig het werkplan. Het schoon te maken gebied dient te worden gemarkeerd (gebied afzetting afhankelijk van de situatie).

De eindinspectie wordt daarna uitgevoerd door de DIZI.

De gevolgde methodiek is (in principe) gelijk aan die van het inventariseren, namelijk voornamelijk visuele controle/inspectie. Evenals bij de inkadering is het van belang de inspectiegegevens goed vast te leggen en weer te geven op een kaart, zodat op basis hiervan een realistische grens van het verspreidingsgebied kan worden bepaald.

Op basis van deze gegevens kan de effectiviteit van een sanering worden vastgesteld. Objectieve vastlegging van de waarnemingsresultaten is ook van belang bij latere evaluaties en/of juridische gevolgen.

Aandachtspunten zijn onder andere:

- Door het 'sneeuwvlokgedrag' van het folie uit de zonnepanelen kunnen deze soms op onverwachte plaatsen ophopen, zoals in dakgoten en op of onder dakpannen.
- Op vrijwel alle locaties zullen alleen aan het oppervlak restanten zijn neergedaald en zijn deze dus niet dieper in de bodem terechtgekomen.

Het inspectiegebied voor de eindinspectie is gelijk aan het bij de inkadering vastgestelde verspreidingsgebied. De eindinspectie is formeel onafhankelijk van de voorgaande stappen. Bij de eindinspectie kan blijken dat het verspreidingsgebied niet (meer) volledig overeenkomt met het vooraf vastgestelde verspreidingsgebied. Dit kan het gevolg zijn van verontreiniging door saneringswerkzaamheden of een veranderde windrichting.

3.5 Explosie

In het geval van een explosie verloopt de verspreiding van restanten zonnepanelen via een drukgolf. De contouren van het verspreidingsgebied zijn daardoor niet met een model te berekenen. Een drukgolf volgt de weg van de minste weerstand. Een luchtfoto, gevolgd door een verificatie op de grond, is de beste manier om de verspreiding in kaart te brengen.

Figuur 3.2 geeft een voorbeeld van het verspreidingsgebied bij een explosie. Dit is slechts een voorbeeld; het verspreidingsgebied kan elke andere vorm hebben dan de in figuur 2 weergegeven vorm. De eindinspectie na sanering wordt uitgevoerd op basis van visuele inspectie. Ook hier geldt dat ook buiten het 'blauwe' gebied nog incidenteel een stukje restanten zonnepanelen kan worden aangetroffen.



Figuur 3.2: Voorbeeld van een verspreidingsgebied na een explosie (rood: bron, blauw: verspreidingsgebied)

4 Rapportage, advies en conclusies

De rapportage dient minimaal de volgende elementen te bevatten:

- Algemene informatie:
 - o Opdrachtgever
 - o Aanleiding & doelstelling van het onderzoek
 - o Plaats van de locatie(s) of object(en)
- Gegevens van het onderzoek;
- Gegevens van de visuele inspectie incl. plattegrond, betrokken medewerkers:
 - o Overzichtstekening / foto van het gebied
 - o Beschrijving van de situatie / vegetatie
 - o Oppervlak verontreinigd gebied
 - o Resultaten van de visuele inspectie (foto's + locatie)
 - o Schoonmaak / opruim advies
 - o Conclusie

Bijlage 1: Typen zonnepanelen (bron : IFV, Depositie bij branden met zonnepanelen, 2021)

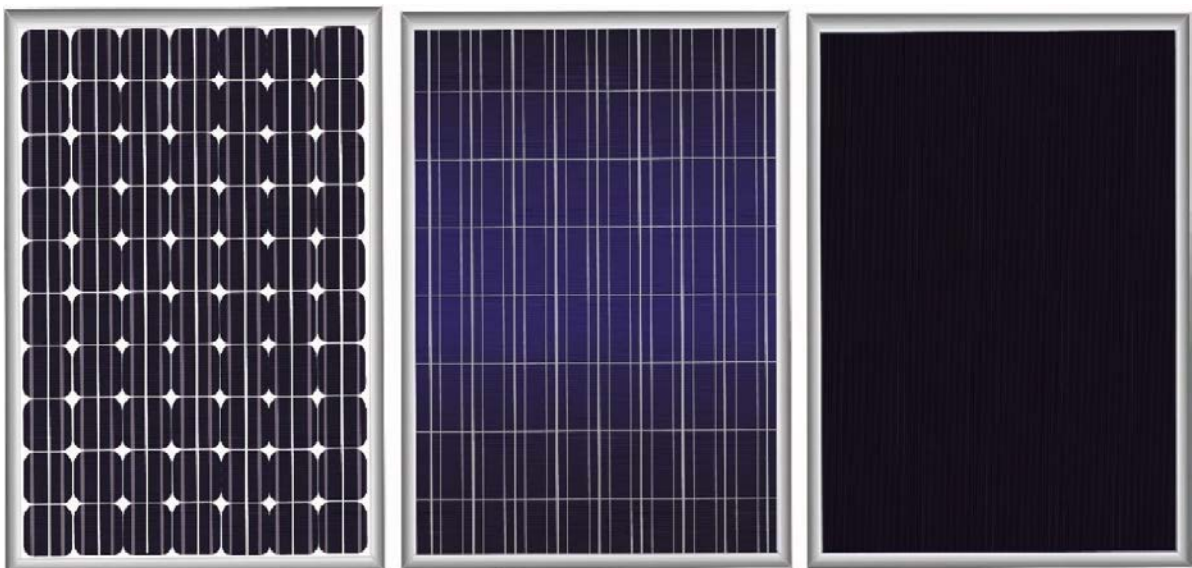
Onderstaande tabel geeft een overzicht van de typen zonnepanelen en hun subtypen zoals die in de literatuur beschreven worden. De onderverdeling is gebaseerd op de gebruikte technologieën en op de gebruikte materialen in zonnepanelen.

Type zonnepanelen	Subtypen
Kristallijne zonnepanelen	- monokristallijn silicium (sc-Si/c-Si) - polykristallijn silicium (poly-Si) of multikristallijn silicium (mc-Si)
Dunne-film-zonnepanelen	- amorf silicium (a-Si) - cadmiumtelluride (CdTe) - cadmiumsulfide (CdS) - koper-indiumdiselenide (CIS) en koper-indium-gallium-diselenide/sulfide (CIGS)
Nieuwe typen zonnepanelen ('derde generatie')	- onder andere - Perovskiet

Gebaseerd op: Berenschot (2011), National energy foundation (n.d.), Donev (2018), Zonne-energie gids (n.d.), TÜV (2018).

De meeste zonnepanelen in Nederland (95%) zijn kristallijne zonnepanelen, omdat het rendement van dit type zonnepaneel beduidend hoger is dan dat van dunne-film-zonnepanelen.

Minder dan 5% van de zonnepanelen in Nederland zijn dunne-film-zonnepanelen. Het aandeel dunne-film-zonnepanelen in de gebouwde omgeving neemt echter toe en zal naar verwachting blijven toenemen. Van de dunne-film-zonnepanelen worden panelen van amorf silicium (a-Si), cadmiumtelluride (CdTe), koper-indiumgallium-diselenide en koper-indium-diselenide (CIGS resp. CIS) op commerciële schaal het meest toegepast.



Figuur: Verschillende typen zonnepanelen. Van links naar rechts: monokristallijn zonnepaneel, polykristallijn zonnepaneel en dunne-film-zonnepaneel (alle met frame)

Stoffen in zonnepanelen

Deze paragraaf beschrijft welke stoffen aanwezig zijn in de diverse lagen van kristallijne zonnepanelen en dunne-film-zonnepanelen.

1 Kristallijne zonnepanelen

De zonnecellen in kristallijne zonnepanelen bestaan uit monokristallijn of polykristallijn silicium. Standaard kristallijne zonnepanelen zijn uitgevoerd als glas-folie panelen (dat wil zeggen met een glazen bovenlaag en een kunststof folie als onderlaag) en voorzien van een aluminium frame. Daarnaast zijn er ook glas-glas zonnepanelen zonder frame. Qua gewicht bestaat het overgrote deel van een kristallijn zonnepaneel uit glas en (indien aanwezig) het frame. Daarnaast bevatten deze zonnepanelen verschillende kunststoffen (5 tot 10% gewichtsprocent), met name in de tussenlaag en onderlaag, koper en kleine hoeveelheden andere metalen waaronder zilver en lood (Liciotti et al. et al., 2014; TÜV, 2018; Krüger et al., 2014). In tabel hieronder is weergegeven welke stoffen volgens de literatuur in kristallijne zonnepanelen aanwezig zijn en (indien in de literatuur vermeld) in welke mate deze stoffen in zonnepanelen aanwezig zijn.

Tabel 2.2 Stoffen in kristallijne zonnepanelen

Bestanddeel	Stof	Gewichts-aandeel (%) ⁵	g/m ² zonne-paneel	Bron
Bovenlaag (glas)	Si, Na, Ca, Mg	75	8.850	TÜV, 2018
Frame	Al, PET, PA	9	1.060	
Tussenlaag	EVA, acrylaat	6	708	
Onderlaag	PET, PVF, PA	5	590	
Zonnecellen	Si	3,6	424	
Junction boxes	ABS, PET, Al	1,5	177	
Afdichtings- en verlijmingsmaterialen	-	1,5	177	
Appendages (connectoren, bedrading/bekabeling)	Ag, Sn, Pb en Bi	0,8	94	
Soldering e.d.	Pb	-	6,5-13	Krüger et al., 2014

- niet vermeld in, of af te leiden uit de betreffende bron.

Ag zilver, Al aluminium, Bi bismuth, Ca calcium, Mg magnesium, Na natrium, Pb lood, Si silicium, Sn tin, ABS acrylonitrilbutadienstyreen copolymeer, EVA ethyleenvinylacetaat, PA polyamide, PET polyethyleentereftalaat, PV polyvinylfluoride

2 Dunne-film-zonnepanelen

Er zijn dunne-film-zonnepanelen op basis van silicium (waarvan de bekendste amorf silicium is) en zonnepanelen op basis van andere halfgeleidermaterialen. Dunne-film-zonnepanelen hebben meestal geen frame en kunnen voorkomen als enkel of dubbel glazen panelen, maar in plaats van glas kan ook plastic of metaalfolie worden gebruikt (TÜV, 2018). De stoffen die in amorf silicium dunne-film-zonnepanelen aanwezig zijn, zijn vergelijkbaar met de stoffen in kristallijne zonnepanelen (TÜV, 2018). Deze paragraaf beschrijft de stoffen in twee typen dunne-film-zonnepanelen: CdTe/CdS- en CIS/CIGS-zonnepanelen.

CdTe en CdS

CdTe en CdS zijn cadmiumbevattende dunne-film-zonnepanelen. CdTe-zonnepanelen bevatten zowel cadmiumtelluride (CdTe) als cadmiumsulfide (CdS), terwijl CdS-zonnepanelen alleen cadmiumsulfide bevatten. Qua gewicht bestaan de cadmium-bevattende dunne-filmzonnepanelen voor het grootste deel uit glas; daarna is het aandeel ethyleenvinylacetaat (EVA) in de panelen het grootst; en verder komen er kleine hoeveelheden koper (Cu) en tin (Sn) in deze zonnepanelen voor (LfU, 2011; Fthenakis, 2005), zie hiervoor onderstaande tabel. Het aandeel CdS in CdTe- en CdS-zonnepanelen is aanzienlijk lager dan het aandeel CdTe, omdat de CdS-laag dunner is dan de CdTe-laag (LfU, 2011).

Type	Bestanddeel	Stof	Gewichts-aandeel (%) ⁴	g/m ² zonne-paneel	Bron
CdTe	-	Cd	-	6,6 – 66,4 gem. 14 *	Krüger, 2014; LfU, 2011
CdTe (glas- glas)	boven- en onderlaag	glas	96,1	15.000	TÜV, 2018 **
	tussenlaag	EVA	3,2	500	
	kabel	-	0,4	57,8	
	zonnecel	CdTe	0,1	18	
		CdS	< 0,1	0,5	
		SnO ₂	< 0,1	6,9	
	connection box	-	0,1	21,7	
	CuSn-band	Cu, Sn	< 0,1	6,9	
	appendages	-	< 0,1	2,7	
CdTe (glas- glas)	boven- en onderlaag	glas	96,1	-	Fthenakis, 2005
	tussenlaag	EVA	2,1	-	
	-	Cd	0,1	-	
	-	Te	0,1	-	
	-	Cu	< 0,1	-	

* In de literatuur wordt vermeld dat de hoeveelheid Cd in een CdTe-zonnepaneel gemiddeld 14 g/m² bedraagt (LfU 2011), maar dat het gehalte kan variëren van 6,6 tot 66,5 g/m² (Krüger, 2014; LfU, 2011).

** Gewichts-aandeel (%) bij de gegevens van TÜV (2018) is berekend door IFV, op basis van de literatuurgegevens over hoeveelheden bestanddelen per m² zonnepaneel.

- niet vermeld in, of af te leiden uit de betreffende bron

Cd cadmium, Cu koper, Te tellurium, Cu koper, CuSn, Sn tin, SnO₂ tinoxide, EVA ethyleenvinylacetaat

CIS- en CIGS-zonnepanelen

CIS- en CIGS-zonnepanelen bevatten koper, indium, (gallium) en seleen (CuInSe₂ en CuInGaSe) of zwavel, in kleine hoeveelheden (TÜV, 2018; Yin et al. 2018). Net als andere typen zonnepanelen bevatten CIS- en CIGS-zonnepanelen glas, een aluminium frame en polymeren (onder andere in de tussenlaag, bijvoorbeeld EVA, PVB, PU e.d.) (Wohlgemuth, 2017; TÜV, 2018; Yin et al. 2018). Tot slot kunnen CIS en CIGS-zonnepanelen ook kleine hoeveelheden cadmiumsulfide (CdS) bevatten (Beckman 2011; TÜV, 2018). In tabel hieronder is weergegeven welke materialen in welke mate voorkomen in CI(G)S zonnepanelen.

Type	Bestanddeel	Stoffen	gewichts-aandeel (%) ⁴	g/m ² zonnepaneel	Bron
CIGS	bovenlaag	glas	76	7.500	TÜV, 2018*
	frame (indien aanwezig)	Al	18	1.800 – 3.000	
	tussenlaag	EVA, PE, PU, PVB	2	200 – 500	
	kabels	'polymeer' en Cu	2	200 – 400	
	junction box	-	1	100 – 400	
	onderlaag	PA (of glas)	0,4	35 (resp. 7.500)	
	zonnecel	CuInGaSe	0,1	9,5 – 12	
		Mo	< 0,1	4 – 5	
		Se	< 0,1	4,5 – 6	
		ZnO	< 0,1	0,7 – 7	
		CdS	< 0,01	0 – 0,24	
CIS /	zonnecel (Cu: ook in kabels)	Cu	-	3,6 – 6,7	Krüger, 2014
CIGS		In	-	3,6 – 6,7	
		Se	-	3,6 – 6,7	
		Ga	-	3,6 – 6,7	
CIS	-	CdS	< 0,1	0,2 – 0,5	LfU, 2011

* Gewichts-aandeel (%) bij de gegevens van TÜV (2018) is berekend door IFV, op basis van de literatuurgegevens over hoeveelheden bestanddelen per m² zonnepaneel. Om het aandeel metalen zo conservatief mogelijk te maken, zijn de laagste waarden in de gegeven ranges gebruikt, met uitzondering van de waarden voor de zonnecellen. Daar zijn de hoogste waarden meegenomen.

- niet vermeld in, of af te leiden uit de betreffende bron.

Al aluminium, As arseen, Cu koper, Ga gallium, In indium, Mo molybdeen, Se seleen, Zn zink, CdS cadmiumsulfide, ZnO zinkoxide, EVA ethyleenvinylacetaat, PA polyamide, PE polyetheen, PVB polyvinylbutyral, PU polyurethaan.

Tabel 3.1 Verbrandingsproducten van kristallijne zonnepanelen⁹

Type zonnepaneel	Verbrandings-producten	Hoeveelheid	Opmerkingen	Bron
PET-gelamineerde zonnepanelen	CO	252 mg/m ³	meting rookgas	Liao e.a. 2020
	CO ₂	-		
	SO ₂	66 mg/m ³		
	HF	1,1 mg/m ³		
	HCN	9,9 mg/m ³		
	VOS	-		
c-Si zonnepaneel met PU resp. epoxyhars	CO	1.170 resp. 2.610 mg/m ³	meting rookgas	Chow e.a. 2017
	CO ₂	-		
	complexe koolwaterstoffen	-		
c-Si zonnepaneel glas en PET- gela- mineerd	CO	100 – 1.100 mg/m ³	meting rookgas, *	Yang e.a.2015, Ju e.a.2017
	CO ₂	-		

⁷ Met de gebruikte analysetechnieken is niet te bepalen of deze metalen als metaaldeeltjes voorkomen, in een verbinding en/of aan een dragermateriaal gebonden zijn (bijvoorbeeld roetdeeltjes), en ook niet welke oxidatietoestand de metalen hebben.

⁸ Met complexe koolwaterstoffen worden in dit rapport koolwaterstoffen bedoeld waarvan de molecuulstructuur met analysetechnieken niet te achterhalen is. Wel kunnen bepaalde molecuulgroepen of -verbindingen worden aangetoond.

⁹ Niet alle stoffen in de kolom 'Verbrandingsproducten' zijn een verbrandingsproduct. Voor de metalen is bijvoorbeeld door middel van analysetechnieken aangetoond dat zij uit het zonnepaneel zijn vrijgekomen, maar in welke vorm de metalen zich dan bevinden, is niet bekend.

Type zonnepaneel	Verbrandings- producten	Hoeveelheid	Opmerkingen	Bron
c-Si zonnepaneel glas-film	CO	6 – 30 mg/m ³	meting rookgas, *	TÜV 2018
	CO ₂	842 – 3.786 mg/m ³		
	formaldehyde	0,9 – 1,8 mg/m ³		
	As	0,1 – 1,1 µg/m ³		
	Pb	50 – 1.010 µg/m ³		
	Cd	6,5 – 77 µg/m ³		
	Se	9,8 – 24 µg/m ³		
Verbrandingsproducten van materialen van de tussenlaag en de onderlaag				
EVA (tussenlaag)	CO en CO ₂ , azijnzuur	-	NB, experimenten met <i>alleen</i> tussen- en onderlaag, zon- der zonnecellen	Liciotti e.a. 2014
polyolefine (TPO) (tussenlaag)	CO en CO ₂	-		
EVA (tussenlaag) + PVF/PET/PVF (onderlaag)	CO en CO ₂ , koolstofluor- verbinding	-	Koolstofluorverbin- ding alleen bij PVF gevonden.	

* bandbreedte: experimenten bij verschillend brandvermogen, met/zonder blussen
- niet vermeld in, of af te leiden uit de betreffende bron.

As arseen, Cd cadmium, CO koolmonoxide, CO₂ kooldioxide, HCN waterstofcyanide, HF waterstoffluoride, Pb lood, Se selenium, SO₂ zwaveldioxide, TPO thermoplastisch polyolefine, VOS vluchtige organische stoffen, EVA ethyleenvinylacetaat, PET polyethyleentereftalaat, PVF polyvinylfluoride.

Tabel 3.3 Verbrandingsproducten van CdTe-zonnepanelen⁹

Type zonnepaneel	Verbrandings-producten	Hoeveelheid	Opmerkingen	Bron
CdTe (glas-glas)	Cd	0,5 %	meting rookgas	Fthenakis, 2005
	Te	-		
CdTe (glas-glas)	CO	1 – 90 mg/m ³	meting rookgas, *	TÜV, 2018
	CO ₂	42 – 1.495 mg/m ³		
	formaldehyde	0,4 – 2,6 mg/m ³		
	As	0,2 – 0,3 µg/m ³		
	Pb	34 – 1.330 µg/m ³		
	Cd	9,9 – 48 µg/m ³		
	Se	2,2 – 4,7 µg/m ³		
CdTe	CO	46 mg/m ³	meting rookgas	Krüger e.a. 2014
	CO ₂	8.280 mg/m ³		
	formaldehyde	n.d.		
	Cd	0% (0 mg/kg)	meting brandresidu	
	Te	4% (22 mg/kg)		

* bandbreedte: experimenten bij verschillend brandvermogen, met/zonder blussen

- niet vermeld in, of af te leiden uit de betreffende bron.

As arseen, Cd cadmium, CO koolmonoxide, CO₂ kooldioxide, HCN waterstofcyanide, HF waterstoffluoride, Pb lood, Se selenium, SO₂ zwaveldioxide, VOS vluchtige organische stoffen, EVA ethyleenvinylacetaat, PET polyethyleentereftalaat, PVF polyvinylfluoride.

Tabel 3.4 Verbrandingsproducten van CIS- en CIGS-zonnepanelen⁹

Type zonnepaneel	Verbrandings-producten	Hoeveelheid	Opmerkingen	Bron
CIGS	CO	11 – 382 mg/m ³	meting rookgas *	TÜV, 2018
	CO ₂	615 – 5.870 mg/m ³		
	formaldehyde	1,2 – 4,9 mg/m ³		
	As	1,0 – 1,6 µg/m ³		
	Pb	250 – 480 µg/m ³		
	Cd	12 – 34 µg/m ³		
	Se	4,8 – 40 µg/m ³		
CIGS met ETFE- bovenlaag	HF	-	afkomstig uit ETFE- laag, niet uit zonnecel	Yin et al., 2018
CIGS	CO	104 mg/m ³	meting rookgas	Krüger e.a. (2014)
	CO ₂	14.580 mg/m ³		
	formaldehyde	n.d.		
	Cu	18% (17 mg/kg)	meting brandresidu	
	Ga	12% (3 mg/kg)		
	In	17% (16 mg/kg)		
	Cd	18% (2 mg/kg)		
	Se	14% (25 mg/kg)		

* bandbreedte: experimenten bij verschillend brandvermogen, met/zonder blussen

- niet vermeld in, of af te leiden uit de betreffende bron.

n.d. niet gemeten

As arseen, Cd cadmium, CO koolmonoxide, CO₂ kooldioxide, Cu koper, ETFE ethyleentetrafluorethyleen, Ga gallium, HCN waterstofcyanide, HF waterstoffluoride, In indium, Pb lood, Se seleen.



Aangetroffen materialen	Zonnepaneel en isolatiemateriaal
Gradatie	--



Aangetroffen materialen	Isolatiemateriaal
Gradatie	--



Aangetroffen materialen	Isolatiemateriaal
Gradatie	--

210.



Aangetroffen materialen	Zonnecel
Gradatie	--





Aangetroffen materialen
Gradatie

Zonnecel
-+



Aangetroffen materialen

Isolatiemateriaal en zonnecel

Gradatie

-+



Aangetroffen materialen
Gradatie

Zonnecel
-+