

# Depositie bij branden met zonnepanelen



Instituut Fysieke Veiligheid  
Kennisonwikkeling en onderwijs  
Postbus 7010  
6801 HA Arnhem  
Kemperbergerweg 783, Arnhem  
www.ifv.nl  
info@ifv.nl  
026 355 24 00

## Colofon

Instituut Fysieke Veiligheid (2021). *Depositie bij branden met zonnepanelen*. Arnhem: IFV.

Titel:	Depositie bij branden met zonnepanelen
Datum:	15 juli 2021
Status:	Definitief
Auteurs:	Dr. ir. M.G. Duyvis, M. Leene BA en dr. M.B. Spoelstra
Met medewerking van:	Ing. R. van den Dikkenberg MCDM en mr. O. Koebrugge
Projectleider:	Dr. ir. M. Duyvis
Review en eindverantwoordelijk:	Dr. ir. N. Rosmuller
Foto voorkant:	CAMJO media

# Samenvatting

Bij grootschalige branden waarbij zonnepanelen zijn betrokken, kunnen verbrandingsproducten 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.

In 2020 heeft het Instituut Fysieke Veiligheid (IFV) de aard en omvang van depositie bij branden met zonnepanelen verkend (IFV, 2021a). Het IFV heeft het initiatief genomen om in vervolg op deze verkenning onderzoek te verrichten naar de risico's van depositie van zonnepaneeldeeltes. Daartoe heeft het een literatuuronderzoek uitgevoerd, gericht op beantwoording van de volgende onderzoeksvragen:

1. Welke verbrandingsproducten kunnen vrijkomen bij branden met zonnepanelen?
2. Zijn er qua depositie van verbrandingsproducten verschillen tussen typen zonnepanelen, en zo ja, welke?
3. Hoe ver reikt de depositie van deze verbrandingsproducten?
4. Welke mogelijke schadelijke effecten heeft de depositie van de verbrandingsproducten van zonnepanelen op mens, dier en milieu?

Daarnaast stelde het IFV zich de vraag:

5. Is er een procedure voorhanden om de mogelijke schadelijke effecten van depositie van verbrandingsproducten van zonnepanelen te beperken of te voorkomen?

In dit onderzoek is gekeken naar de typen zonnepanelen die in Nederland momenteel het meest worden toegepast: kristallijne zonnepanelen (95%) en dunne-film-zonnepanelen (5%), waaronder cadmium-telluride en koper-indium-(gallium-)diselenide zonnepanelen.

Zonnepanelen bestaan voornamelijk uit glas en polymere tussenlagen. Bij verbranding geeft glas geen verbrandingsproducten, maar de polymere tussenlagen wel: voornamelijk de gasen 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 zonnepaneeldeeltes zitten die in de omgeving terecht komen.

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 áls er verschillen in depositie zijn, deze te maken zullen hebben met de verschillen in metalen in de zonnepanelen. De literatuur laat zich hier echter niet over uit.

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- én 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 bijvoorbeeld spelende kinderen en grazende dieren.

Qua bestrijding - inclusief het vrijkomen van gevaarlijke stoffen - verschilt een brand met zonnepanelen niet van een 'gewone' grote brand. De brandweer en andere (hulp)diensten beschikken hiervoor over (reguliere) procedures hoe te handelen. Deze procedures gaan echter niet of nauwelijks in op het opruimen van depositie, met uitzondering van de procedure voor asbest (IFV, 2018). Het ontbreken van afspraken over het opruimen van de depositie leidt in de praktijk tot onduidelijkheid over taken, bevoegdheden en verantwoordelijkheden en daarmee tot ongerustheid bij gedupeerden. Het is daarom gewenst dat voor de nasfase van branden met depositie een landelijke aanpak wordt ontwikkeld.

# Inhoud

<b>Inleiding</b>	<b>6</b>	
<b>1</b>	<b>Depositie</b>	<b>9</b>
1.1	Ontstaan van depositie	9
1.2	Mogelijke schadelijke effecten van depositie	10
<b>2</b>	<b>Zonnepanelen</b>	<b>11</b>
2.1	Typen zonnepanelen	11
2.1.1	Opbouw zonnepaneel	11
2.1.2	Typen zonnepanelen	12
2.2	Stoffen in zonnepanelen	13
2.2.1	Kristallijne zonnepanelen	13
2.2.2	Dunne-film-zonnepanelen	14
2.2.3	Samenvatting stoffen in zonnepanelen	16
<b>3</b>	<b>Verbrandingsproducten van zonnepanelen</b>	<b>17</b>
3.1	Kristallijne zonnepanelen	17
3.2	CdTe-zonnepanelen	20
3.3	CIS- en CIGS-zonnepanelen	21
3.4	Schadelijke effecten van depositie	23
3.4.1	Kristallijne zonnepanelen	23
3.4.2	CdTe-zonnepanelen	23
3.4.3	CIS- en CIGS-zonnepanelen	24
3.5	Samenvatting	25
3.6	Beschouwing	26
<b>4</b>	<b>Verspreiding van depositie</b>	<b>27</b>
4.1	Verspreiding	27
4.2	Samenvatting	28
<b>5</b>	<b>Handelingsperspectieven voor opruimen van depositie</b>	<b>29</b>
5.1	Overzicht betrokken partijen	29
5.2	Aanbeveling	31
<b>6</b>	<b>Beantwoording van de onderzoeksvragen</b>	<b>32</b>
<b>Referenties</b>	<b>34</b>	
<b>Bijlage 1</b>	<b>Afkortingen</b>	<b>38</b>
<b>Bijlage 2</b>	<b>Zoektermen</b>	<b>39</b>

# Inleiding

## Aanleiding en doel

Bij grootschalige branden<sup>1</sup> waarbij zonnepanelen waren betrokken, bleek dat verbrandingsproducten en onverbrande resten van zonnepanelen zich tot (kilometers) ver in de omgeving kunnen verspreiden.<sup>2</sup> Boeren, omwonenden en andere betrokkenen uitten zorgen over de mogelijke risico's voor mensen, dieren en gewassen, er was aandacht in de media en er werden Kamervragen gesteld (EZK, 2020; EZK, 2021). Er werden verschillende problemen gesignaleerd:<sup>3</sup>

- > op dit moment is er onvoldoende inzicht in de aard en omvang van de depositie van de verbrandingsproducten van zonnepanelen en in de wijze en mate van verspreiding daarvan,
- > er is onvoldoende inzicht in de (gezondheids- en milieu)risico's van de depositie van deze verbrandingsproducten,
- > er is nog geen inzicht in de mogelijkheden om de eventuele gezondheids- en milieurisico's te beperken en de neergeslagen verbrandingsproducten op veilige en verantwoorde wijze op te ruimen dan wel te saneren,
- > er is onvoldoende inzicht in de verantwoordelijkheden van de verschillende betrokken partijen.

Al met al kan dit betekenen dat de partijen die betrokken zijn bij de bestrijding en afhandeling van dit type incidenten, hierdoor onvoldoende handelingsperspectief hebben.

Het IFV heeft in 2020 een verkennend onderzoek verricht om een beeld te verkrijgen van de aard en de omvang van de problematiek (IFV, 2021a). Dit onderzoek liet zien dat er in de periode januari 2018 tot en met juni 2021 volgens de (sociale) media in Nederland minimaal 112 branden met zonnepanelen plaatsvonden. Voor zover bekend was er bij elf van die branden sprake van zichtbare depositie. Die (zichtbare) depositie varieerde van flinterdunne en vederlichte stukjes van de bovenlaag van zonnepanelen tot kleine stukjes of resten zonnepaneel, stukjes isolatiemateriaal, grotere brokstukken en zelfs (vrijwel) intacte zonnepanelen (IFV, 2021a). In hetzelfde rapport heeft een globale scan van de Nederlands- en Engelse literatuur een eerste indruk gegeven van de bestaande kennis over de mogelijke verbrandingsproducten van zonnepanelen en eventuele schadelijke gevolgen voor mens, dier en milieu.

Het IFV heeft vervolgens een diepgaander (dan de hierboven genoemde globale scan) literatuurstudie uitgevoerd, om meer inzicht te verkrijgen in de depositie van verbrandingsproducten en onverbrande resten van zonnepanelen en de gevaren daarvan voor mens, dier en

---

<sup>1</sup> Dit zijn branden in gebouwen zoals stallen, schuren, loodsen e.d., waarbij de warmteontwikkeling zo groot was, dat pluimstijging optrad en waarbij tenminste 10 zonnepanelen in brand stonden. Bij kleinschalige branden (zoals woningbranden) waarbij een beperkt aantal zonnepanelen betrokken is, is geen depositie van verbrandingsproducten en onverbrande resten van zonnepanelen buiten de directe omgeving van de brand te verwachten (IFV, 2021a).

<sup>2</sup> Branden: bedrijfsgebouw te 't Veld, 30 juli 2020, schuur te Rutten, 28 juli 2020, loods te Hazerswoude, 21 februari 2021, houthandel te Noordbergum, 20 mei 2021.

<sup>3</sup> [NHNieuws \(4 augustus 2020\)](#) *Weilanden vol glas van zonnepanelen na hevige brand: nieuw probleem voor milieudiensten*; [Omroep Flevoland \(11 augustus 2020\)](#) *Stukjes zonnepaneel in oogst na brand: niemand controleert*; EZK, 2020.

milieu. Het doel van dit onderzoek was ook, om een basis te leggen voor een eventueel noodzakelijk handelingsperspectief voor de hulpdiensten en andere partijen die bij de bestrijding en afhandeling van dit type branden betrokken zijn. Het voorliggend rapport beschrijft de resultaten van de literatuurstudie.

## Vraagstelling

De hoofdvraag van het onderzoek luidt:

*Wat zijn de gevaren voor mens, dier en milieu bij de depositie van verbrandingsproducten van zonnepanelen en welke aanpak voor de bestrijding past daarbij?*

Hierbij zijn de volgende deelvragen gesteld:

1. *Welke verbrandingsproducten kunnen vrijkomen bij branden met zonnepanelen?*
2. *Zijn er qua depositie van verbrandingsproducten verschillen tussen typen zonnepanelen, en zo ja, welke?*
3. *Hoe ver reikt de depositie van deze verbrandingsproducten?*
4. *Welke mogelijke schadelijke effecten heeft de depositie van de verbrandingsproducten van zonnepanelen op mens, dier en milieu?*
5. *Is er een procedure voorhanden om de mogelijke schadelijke effecten van depositie van verbrandingsproducten van zonnepanelen te beperken of te voorkomen?*

## Afbakening

- > Dit onderzoek gaat over de (mogelijke risico's van) depositie van verbrandingsproducten van zonnepanelen.
- > Onder depositie wordt in dit onderzoek verstaan: het neerslaan van vaste stoffen op een ondergrond.
- > Het onderzoek richt zich niet op de kans op en oorzaken van branden met zonnepanelen.
- > Voor de beantwoording van deelvraag 1 wordt ingegaan op alle verbrandingsproducten die kunnen ontstaan, dus zowel gasvormige als vaste stoffen. De beantwoording van deelvragen 2 tot en met 5 is gericht op depositie van verbrandingsproducten (dus de vaste stoffen).
- > Het onderzoek richt zich op zonnepanelen in grootschalige toepassingen, zoals zonneparken en zonnepanelen op utiliteitsbouw. Uit het vooronderzoek is namelijk gebleken dat depositie in het effectgebied van de brand vooral optreedt bij grote branden waarbij een substantieel aantal zonnepanelen betrokken zijn. Bij kleinschalige branden met een beperkt aantal zonnepanelen (bijvoorbeeld woningbranden) is geen of nauwelijks depositie van verbrandingsproducten van zonnepanelen buiten de directe omgeving van de brand te verwachten (IFV, 2021a).
- > Dit onderzoek richt zich op de typen zonnepanelen die in Nederland momenteel het meest voorkomen. Er zijn verschillende nieuwe technologieën en materialen in ontwikkeling voor toepassing in zonnepanelen, maar die worden nog niet op grote schaal toegepast. Om die reden (en omdat hierover slechts in beperkte mate literatuur beschikbaar is) worden dergelijke nieuwe(re) typen zonnepanelen in dit onderzoek buiten beschouwing gelaten.

## Aanpak

Dit onderzoek bouwt voort op de literatuurscan uit het verkennende onderzoek dat het IFV in 2020 heeft uitgevoerd (IFV, 2021a). Het startpunt voor die literatuurscan waren de volgende publicaties:

- > TNO (2019). Brandincidenten met fotovoltaïsche (PV) systemen in Nederland. Een inventarisatie. TNO 2019 P10287. Petten: TNO.
- > TÜV Rheinland Energie und Umwelt GmbH. (2018). *Assessing Fire Risks in Photovoltaic Systems and Developing Safety Concepts for Risk Minimization*.

In beide onderzoeken werd in de gevonden publicaties door het IFV verder gezocht naar relevante referenties en auteurs door middel van de 'sneeuwbalmethode'.<sup>4</sup> Daarnaast is met diverse zoektermen gericht gezocht in de kennisdatabanken van ScienceDirect en Wiley (zie bijlage 2 voor de gebruikte zoektermen). Ook werd met behulp van zoekmachines Google en Google Scholar gezocht naar andere relevante kennisbronnen. Ten slotte werd ook contact gelegd met twee Duitse organisaties, te weten de *Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung* (BAM) en de *Technischer Überwachungsverein* (TÜV) Rheinland. Via deze organisaties werd een onderzoeksrapport verkregen over brandexperimenten met zonnepanelen waarbij verbrandingsproducten zijn geanalyseerd (Krüger et al., 2014).

## Leeswijzer

In hoofdstuk 1 wordt kort uiteengezet wat depositie is en tot welke schadelijke effecten depositie kan leiden. Hoofdstuk 2 behandelt hoe zonnepanelen zijn opgebouwd, welke soorten zonnepanelen er zijn en welke stoffen in zonnepanelen aanwezig zijn. Hoofdstuk 3 beschrijft de verbrandingsproducten die kunnen ontstaan (deelvraag 1) en daarmee de verschillen tussen de verbrandingsproducten van de diverse typen zonnepanelen (deelvraag 2). Ook worden in dit hoofdstuk de mogelijke schadelijke effecten van neergeslagen deeltjes (depositie) afkomstig van zonnepaneelbranden, besproken (deelvraag 4). In hoofdstuk 4 wordt ingegaan op de verspreiding van depositie (deelvraag 3). In hoofdstuk 5 wordt bekeken welke aanpak voorhanden is om de mogelijke schadelijke effecten van depositie bij branden met zonnepanelen te beperken of te voorkomen (deelvraag 5). Ten slotte wordt de hoofdvraag van dit onderzoek in hoofdstuk 6 beantwoord.

---

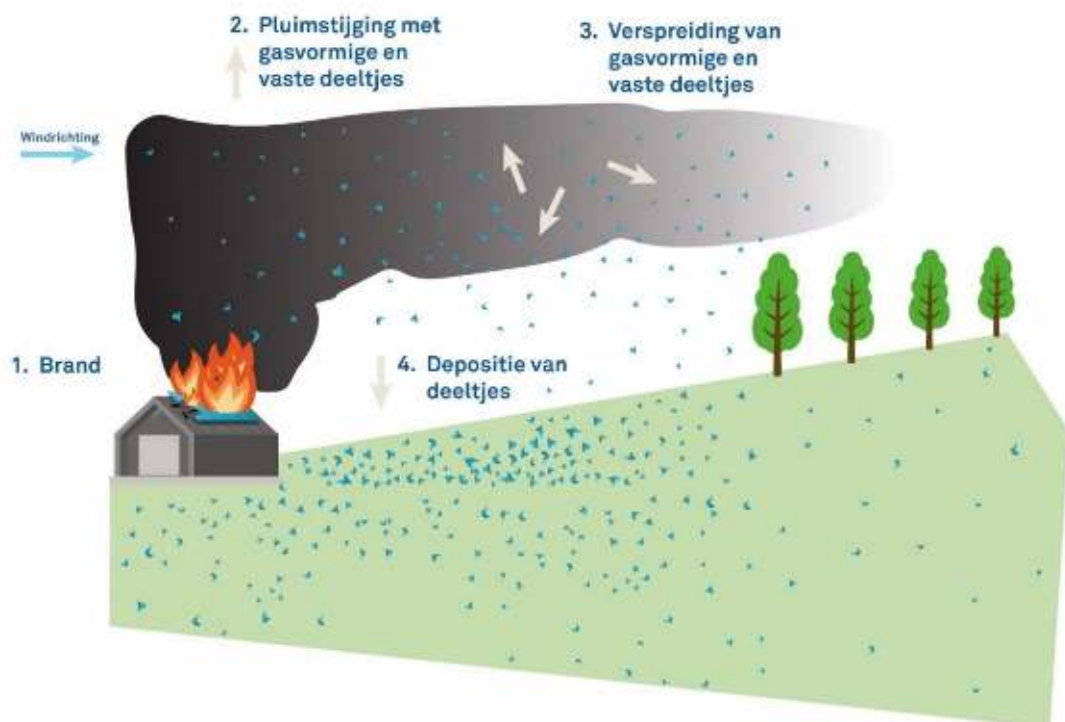
<sup>4</sup> Het raadplegen van referenties in de literatuur om meer relevante literatuur (en auteurs) te vinden en vervolgens in die literatuur ook weer verder te zoeken aan de hand van de referenties.



# 1 Depositie

In dit hoofdstuk wordt beschreven wat depositie is en hoe het ontstaat, en wordt ingegaan op mogelijke schadelijke effecten van depositie.

## 1.1 Ontstaan van depositie



**Figuur 1.1** Ontstaan van depositie bij brand met zonnepanelen

In figuur 1.1 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.
4. 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. Bij

zeer grote branden kan de afstand waarover (on)verbrande deeltjes zich verspreiden kilometers ver zijn, zoals gebleken is uit de praktijk.

## 1.2 Mogelijke schadelijke effecten van depositie

Depositie kan op verschillende manieren schadelijke gevolgen hebben:

- > *Scherfwerking*: Bij verschillende grootschalige branden waarbij zonnepanelen<sup>1</sup> 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 bijvoorbeeld spelende kinderen of grazend vee.
- > *Depositie kan toxisch zijn*: Bij elke brand, dus ook bij een brand met zonnepanelen, komen stoffen vrij die schadelijk kunnen zijn voor de gezondheid van mens en dier en voor het milieu. 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 Zonnepanelen

In dit hoofdstuk wordt achtergrondinformatie gegeven over zonnepanelen. Er wordt globaal toegelicht hoe zonnepanelen zijn opgebouwd, een overzicht gegeven van de verschillende typen zonnepanelen op basis van een veelvoorkomende onderverdeling, en er wordt besproken welke stoffen in zonnepanelen aanwezig kunnen zijn.

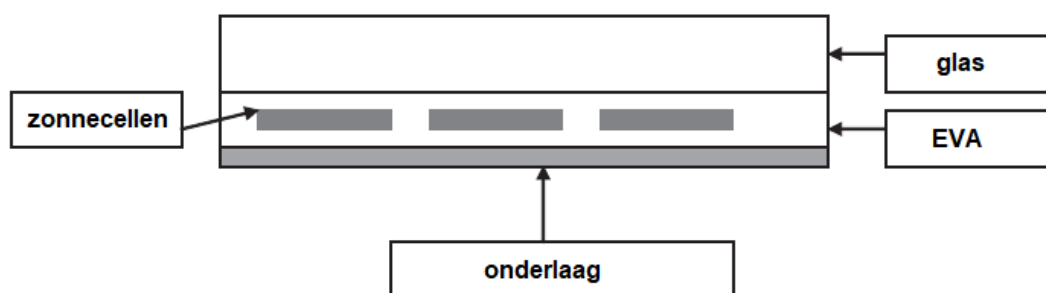
## 2.1 Typen zonnepanelen

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.

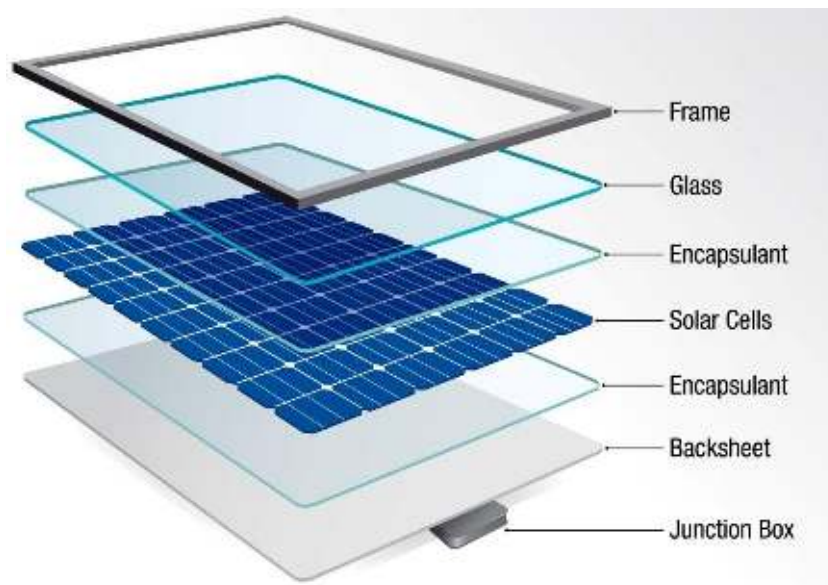
### 2.1.1 Opbouw zonnepaneel

In een zonnepaneel zijn meerdere zonnecellen elektrisch in serie geschakeld. In figuur 2.1 en figuur 2.2 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 2.2) 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 2.1, zie figuur 2.2).



Figuur 2.1 Opbouw van een kristallijn silicium zonnepaneel (zijaanzicht)  
(bron: Wohlgemuth, 2017, p.14)



**Figuur 2.2** 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). Voor dit onderzoek is het daarom relevant te weten uit welke materialen PV-installaties zijn opgebouwd.

### 2.1.2 Typen zonnepanelen

Tabel 2.1 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.

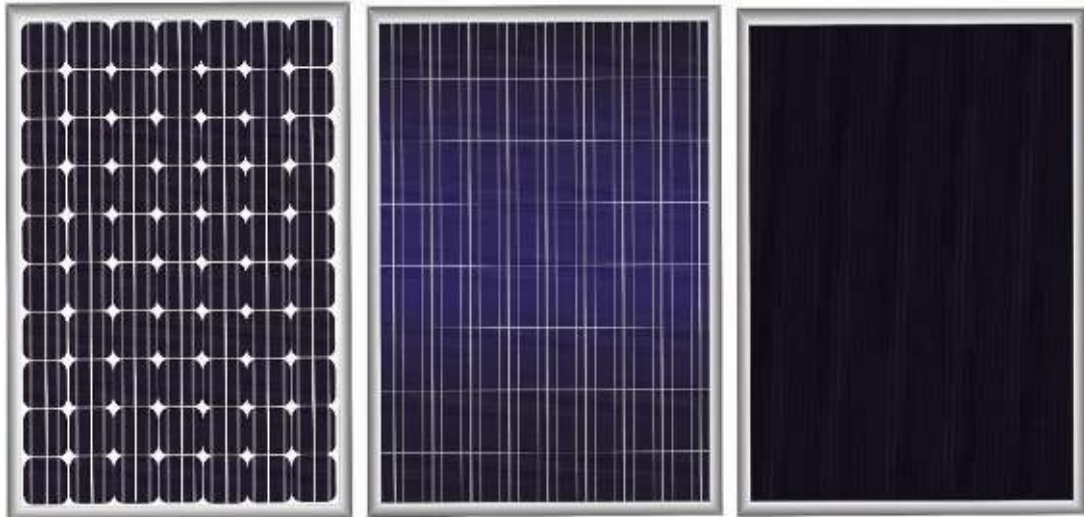
**Tabel 2.1** Typen zonnepanelen

Type zonnepanelen	Subtypen
Kristallijne zonnepanelen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- monokristallijn silicium (sc-Si/c-Si)</li> <li>- polykristallijn silicium (poly-Si) of multikristallijn silicium (mc-Si)</li> </ul>
Dunne-film-zonnepanelen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- amorf silicium (a-Si)</li> <li>- cadmiumtelluride (CdTe)</li> <li>- cadmiumsulfide (CdS)</li> <li>- koper-indiumdiselenide (CIS) en koper-indium-galliumdiselenide/sulfide (CIGS)</li> </ul>
Nieuwe typen zonnepanelen ('derde generatie')	<ul style="list-style-type: none"> <li>onder andere</li> <li>- Perovskiet</li> </ul>

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. Dit type zonnepanelen wordt niet alleen toegepast in de gebouwde omgeving maar ook in zonneparken (Wohlgemuth, 2017; TNO, 2019; Liao et al., 2020). Het marktaandeel van monokristallijne zonnepanelen is 33% en het marktaandeel polykristallijne zonnepanelen 62%.

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 Sark, 2019; Milieucentraal, n.d.). Van de dunne-film-zonnepanelen worden panelen van amorf silicium (a-Si), cadmiumtelluride (CdTe), koper-indium-gallium-diselenide en koper-indium-diselenide (CIGS resp. CIS) op commerciële schaal het meest toegepast (Yin et al., 2018; Wohlgemuth, 2017).



**Figuur 2.3** Verschillende typen zonnepanelen. Van links naar rechts: monokristallijn zonnepaneel, polykristallijn zonnepaneel en dunne-film-zonnepaneel (alle met frame)

Het verschil tussen monokristallijne en polykristallijne zonnepanelen is de manier waarop tijdens het productieproces gesmolten silicium wordt afgekoeld. Bij monokristallijne zonnepanelen vindt de afkoeling langzaam plaats waardoor de siliciumkristallen dezelfde oriëntatie hebben. Bij polykristallijne zonnepanelen vindt de afkoeling sneller plaats waardoor de siliciumkristallen niet geordend zijn (Singh et al., 2021). Monokristallijne zonnepanelen hebben een iets hoger rendement dan polykristallijne zonnepanelen. Monokristallijne zonnepanelen zijn meestal zwart, polykristallijne zonnepanelen meestal blauw. (Zonne-energiegids, Milieucentraal)

De nieuwe typen zonnepanelen die in tabel 2.1 worden genoemd, worden in dit literatuuronderzoek buiten beschouwing gelaten omdat deze veelal nog in ontwikkeling zijn en niet op grote schaal worden toegepast (zie de afbakening in de Inleiding).

## 2.2 Stoffen in zonnepanelen

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

### 2.2.1 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 2.2 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 (%) <sup>5</sup>	g/m <sup>2</sup> zonnepaneel	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 acrylonitrilbutadieenstyreen copolymeer, EVA ethyleenvinylacetaat, PA polyamide, PET polyethyleentereftalaat, PV polyvinylfluoride

## 2.2.2 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 (tabel 2.1), 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-film-zonnepanelen 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

<sup>5</sup> De gewichtspercentages in de literatuur zijn gebaseerd op verschillende bronnen. In de literatuur wordt er in sommige gevallen een range beschreven op basis van meerdere bronnen. In de tabellen 2.1 tot en met 2.3 is het gemiddelde weergegeven. Daarom is het totaal van de gewichtspercentages niet gelijk aan 100%.

(Sn) in deze zonnepanelen voor (LfU, 2011; Fthenakis, 2005), zie hiervoor tabel 2.3. 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).

**Tabel 2.3 Stoffen in CdTe-zonnepanelen**

Type	Bestanddeel	Stof	Gewichts-aandeel (%) <sup>4</sup>	g/m <sup>2</sup> zonnepaneel	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 <sub>2</sub>	< 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/m<sup>2</sup> bedraagt (LfU 2011), maar dat het gehalte kan variëren van 6,6 tot 66,5 g/m<sup>2</sup> (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 m<sup>2</sup> zonnepaneel.

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

Cd cadmium, Cu koper, Te tellurium, Cu koper, CuSn, Sn tin, SnO<sub>2</sub> tinoxide, EVA ethyleenvinylacetaat

### CIS- en CIGS-zonnepanelen

CIS- en CIGS-zonnepanelen bevatten koper, indium, (gallium) en seleen (CuInSe<sub>2</sub> 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 2.4 is weergegeven welke materialen in welke mate voorkomen in Cl(G)S zonnepanelen.

**Tabel 2.4 Stoffen in CI(G)S-zonnepanelen**

Type	Bestanddeel	Stoffen	gewichts-aandeel (%) <sup>4</sup>	g/m <sup>2</sup> 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	-	3,6 – 6,7	Krüger, 2014
CIGS	(Cu: ook in kabels)	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 m<sup>2</sup> 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.

### 2.2.3 Samenvatting stoffen in zonnepanelen

Hieronder staan de belangrijkste stoffen samengevat die in zonnepanelen voorkomen<sup>6</sup>:

- > Zonnepanelen bestaan voornamelijk uit glas. Het aandeel glas varieert van circa 75% als alleen de bovenlaag van glas is, tot circa 96% als ook de onderlaag van glas is.
- > Zonnepanelen bevatten kunststoffen, bijvoorbeeld de tussenlaag waarin de zonnecellen ingebed zijn en, afhankelijk van de uitvoering, de onderlaag van het zonnepaneel.
- > Zonnepanelen bevatten kleine hoeveelheden metalen, onder andere in de zonnecellen. Welke metalen dat zijn, is afhankelijk van het type zonnepaneel. De zonnecellen van kristallijne zonnepanelen bestaan uit silicium; zonnecellen van CdTe-zonnepanelen bevatten cadmium en tellurium en de zonnecellen van CI(G)S-zonnepanelen bevatten koper, indium, (gallium) en seleen.

<sup>6</sup> Er zijn in de literatuur geen aanwijzingen gevonden dat er verschillen zijn tussen de samenstelling van zonnepanelen die op een dak geplaatst worden en zonnepanelen die 'in dak' geplaatst worden.



# 3 Verbrandingsproducten van zonnepanelen

Er is op beperkte schaal onderzoek gedaan naar branden met zonnepanelen. De enkele artikelen die er zijn, gaan over brandexperimenten onder laboratoriumcondities en een modelleringstudie (zie paragrafen 3.1 tot en met 3.3). De in de literatuur beschreven brandexperimenten richtten zich op de brandbaarheid van zonnepanelen, op de rookontwikkeling, op (de samenstelling van) rookgassen en in mindere mate op het vrijkomen van vaste stoffen of het brandresidu. Er zijn brandexperimenten uitgevoerd met intacte panelen (al dan niet met appendages) en met kleine stukjes zonnepaneel.

In paragrafen 3.1 tot en met 3.3 wordt ingegaan op de verbrandingsproducten van de diverse typen zonnepanelen (deelvragen 1 en 2). In paragraaf 3.4 worden mogelijke schadelijke effecten besproken van de vaste verbrandingsproducten die in de omgeving van de brand zijn neergekomen (deelvraag 4).

Brandexperimenten worden op verschillende manieren en volgens (inter)nationale normen uitgevoerd. Zo kunnen stukjes zonnepaneel of delen van een zonnepaneel worden verbrand in een calorimeter of worden praktijksituaties nagebootst door stukken zonnepaneel op een gecontroleerde manier te laten verbranden op een gesimuleerd dak.

Het doel van de meeste brandexperimenten is om het brandgedrag van zonnepanelen te bepalen en niet zozeer om de verbrandingsproducten te analyseren. Wanneer dit wel het geval is, ligt de nadruk meer op de analyse van de gassen die bij verbranding ontstaan dan op de verbrandingsresten. De gasvormige verbrandingsproducten worden opgevangen en op verschillende manieren geanalyseerd, afhankelijk van het doel van het onderzoek. Het kan bijvoorbeeld gaan om het aantonen van metalen of om het bepalen van hoeveelheden vrijgekomen CO en CO<sub>2</sub>.

De meeste analysetechnieken zijn niet geschikt om vaste stoffen te analyseren. Om die reden moeten verbrandingsresten worden voorbehandeld door ze te verpulveren en fijn te malen, waarna met behulp van een geschikt extractiemiddel de te analyseren stoffen worden opgelost. Deze vloeistof wordt vervolgens opgewerkt en gebruikt voor de analyse.

## 3.1 Kristallijne zonnepanelen

Deze paragraaf beschrijft de verbrandingsproducten van kristallijne zonnepanelen, op basis van brandexperimenten die met verschillende kristallijne zonnepanelen zijn uitgevoerd. De resultaten van die experimenten worden hieronder puntsgewijs toegelicht en staan samengevat in tabel 3.1.

- > Van kristallijne zonnepanelen zijn geen brandexperimenten bekend waarbij specifiek gekeken is naar depositie of naar de stoffen die achterbleven in de brandrestanten.
- > Bij brandexperimenten met alleen de tussenlaag en diverse 'backsheets' van kristallijne zonnepanelen, werd onderzocht welke gasvormige verbrandingsproducten uit deze lagen kunnen ontstaan bij temperaturen tot 1.000 °C. In alle experimenten werden CO en

- CO<sub>2</sub> en in sommige gevallen vluchtige organische stoffen (VOS) gemeten (Liciotti et al., 2014).
- > Bij brandexperimenten van de TÜV werden naast CO en CO<sub>2</sub> ook formaldehyde, lood, cadmium, arseen en seleen in de rookgassen gedetecteerd. In welke vorm<sup>7</sup> de metalen in de rookgassen aanwezig zijn, is niet bekend, omdat de gebruikte analysetechnieken alleen de aanwezigheid van metalen kunnen detecteren en niet de hoeveelheden of concentraties (TÜV, 2018).
  - > Andere onderzoekers geven aan complexe koolwaterstoffen<sup>8</sup> te hebben aangetroffen en dat bij hogere temperaturen mogelijk meer en andere gasvormige verbrandingsproducten kunnen ontstaan, afhankelijk van de samenstelling van de polymeerlagen (Chow et al., 2017).
  - > Bij brandexperimenten met PET-gelamineerde polysilicium zonnepanelen kwamen naast CO en CO<sub>2</sub> ook kleine hoeveelheden SO<sub>2</sub>, HF, HCN en VOS vrij. De bron voor de HF was de onderlaag, terwijl de bron voor HCN de polyurethaanlaag was (Liao et al., 2020).
  - > Bij brandexperimenten van flexibele zonnepanelen met toplagen van PET of van glas, is alleen op CO en CO<sub>2</sub> gemeten. Bij een bovenlaag van glas komen er minder CO en CO<sub>2</sub> vrij dan bij een bovenlaag van PET. Dit komt doordat de glazen bovenlaag minder warmte doorgeeft naar de polymere tussenlagen (Ju et al., 2017).

**Tabel 3.1 Verbrandingsproducten van kristallijne zonnepanelen<sup>9</sup>**

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

<sup>7</sup> 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.

<sup>8</sup> 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.

<sup>9</sup> 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	Verbrandingsproducten	Hoeveelheid	Opmerkingen	Bron
c-Si zonnepaneel glas-film	CO	6 – 30 mg/m <sup>3</sup>	meting rookgas, *	TÜV 2018
	CO <sub>2</sub>	842 – 3.786 mg/m <sup>3</sup>		
	formaldehyde	0,9 – 1,8 mg/m <sup>3</sup>		
	As	0,1 – 1,1 µg/m <sup>3</sup>		
	Pb	50 – 1.010 µg/m <sup>3</sup>		
	Cd	6,5 – 77 µg/m <sup>3</sup>		
	Se	9,8 – 24 µg/m <sup>3</sup>		
<b>Verbrandingsproducten van materialen van de tussenlaag en de onderlaag</b>				
EVA (tussenlaag)	CO en CO <sub>2</sub> , azijnzuur	-	NB, experimenten met <i>alleen</i> tussen- en onderlaag, zonder zonnecellen	Liciotti e.a. 2014
polyolefine (TPO) (tussenlaag)	CO en CO <sub>2</sub>	-		
EVA (tussenlaag) + PVF/PET/PVF (onderlaag)	CO en CO <sub>2</sub> , koolstof-fluor-verbinding	-	Koolstof-fluor-verbinding 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, CO<sub>2</sub> kooldioxide, HCN waterstofcyanide, HF waterstoffluoride, Pb lood, Se selenium, SO<sub>2</sub> zwaveldioxide, TPO thermoplastisch polyolefine, VOS vluchtige organische stoffen, EVA ethyleenvinylacetaat, PET polyethyleentereftalaat, PVF polyvinylfluoride.

Om de resultaten uit de experimenten naderhand te kunnen duiden, worden in tabel 3.2 gezondheidsnormen gegeven voor de diverse stoffen die in de rook werden aangetroffen. Opgemerkt wordt dat de concentraties gegeven worden in gewicht per *kubieke meter lucht*. Deze waarden zijn geen maatstaf voor depositie, aangezien hoeveelheden daar aangegeven moeten worden in gewicht per *vierkante meter oppervlak*.

**Tabel 3.2 Gezondheidsnormen voor de gasvormige verbrandingsproducten**

Stof	Norm		
<b>Interventiewaarden 60 min (RIVM, 2020)</b>			
	VRW (mg/m <sup>3</sup> )	AGW (mg/m <sup>3</sup> )	LBW (mg/m <sup>3</sup> )
CO	Niet aanbevolen	79	390
CO <sub>2</sub>	Niet van toepassing	50.000	100.000
Formaldehyde	1,3	17	69
HF	0,83	20	36
SO <sub>2</sub>	2	20	240
HCN	5,2	6,7	31

Stof	Norm		
<i>Protective Action Criteria (US Department of Energy, z.d.)</i>			
	<i>PAC-1 (mg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>PAC-2 (mg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>PAC-3 (mg/m<sup>3</sup>)</i>
As	0,049	0,54	1,6
Pb	0,15	120	700
Cd	0,1	0,76	4,7
Se	0,6	6,6	40

Toelichting op de normen:

Interventiewaarden worden in Nederland gebruikt om een inschatting te kunnen geven van risico's van gasvormige stoffen. De gegeven waarden gelden voor een blootstellingsduur van 60 minuten:

- VRW = voorlichtingsrichtwaarde = de luchtconcentratie die met grote waarschijnlijkheid door de blootgestelde bevolking als hinderlijk wordt waargenomen, of waarboven lichte gezondheidseffecten mogelijk zijn.
- AGW = alarmeringsgrenswaarde = de luchtconcentratie waarboven onherstelbare of andere ernstige gezondheidseffecten kunnen optreden, of waarbij door blootstelling aan de stof personen minder goed in staat zijn zichzelf in veiligheid te brengen.
- LBW = levensbedreigende waarde = de luchtconcentratie waarboven mogelijk sterfte of levensbedreigende aandoeningen kunnen ontstaan.

In tabel 3.2 zijn de interventiewaarden voor een blootstellingsduur van 60 minuten vermeld. Voor een kortere blootstellingsduur (10 of 30 minuten) zijn de interventiewaarden meestal hoger (afhankelijk van de stof).

Voor vaste stoffen is gebruik gemaakt van PAC-waarden (Protective Action Criteria). Deze waarden gelden voor een blootstellingsduur van 60 minuten (Alberta Health, 2017):

- PAC-1 = milde gezondheidseffecten van tijdelijke aard.
- PAC-2 = onomkeerbare of andere ernstige gezondheidseffecten die het vermogen om beschermende maatregelen te nemen, kunnen aantasten.
- PAC-3 = levensbedreigende gezondheidseffecten.

## 3.2 CdTe-zonnepanelen

Deze paragraaf beschrijft de verbrandingsproducten van CdTe-zonnepanelen (glas-glas) op basis van brandexperimenten die met verschillende CdTe-zonnepanelen zijn uitgevoerd. Het gaat hierbij zowel om gasvormige verbrandingsproducten als om vaste verbrandingsproducten in de brandresten. De resultaten van die experimenten worden hieronder puntsgewijs toegelicht en staan samengevat in tabel 3.3.

- > Bij de in de literatuur beschreven brandexperimenten met fragmenten van CdTe-zonnepanelen wordt vooral gekeken of en hoeveel cadmium vrij komt. Hierbij wordt de samenstelling van de brandresten vergeleken met de samenstelling van een niet-verbrand CdTe-zonnepaneel. Gebleken is dat bij brand meer dan 99% van het aanwezige cadmium achterblijft in de CdTe-zonnepanelen en dus niet vrijkomt (Fthenakis, 2005; Krüger et al., 2014). Hierbij spelen twee aspecten een rol:

- cadmium zit ingekapseld in het door hitte gesmolten glas en kan daardoor niet vrijkomen (Baumann, 1995),
  - de temperatuur van de brand is vaak lager dan het smeltpunt van cadmiumtelluride (1.041 °C) (Moskowitz et al., 1990).
- > Voor tellurium zijn tot 760 °C de resultaten vergelijkbaar met cadmium, maar bij temperaturen vanaf 900 °C komt er meer tellurium vrij dan cadmium (Fthenakis, 2005).
- > De emissie van cadmium en tellurium vindt vooral aan de randen van zonnepanelen plaats. Daarom wordt geschat dat slechts 0,05% van de totale hoeveelheid cadmium vrij kan komen als CdTe-zonnepanelen (glas-glas) betrokken zijn bij een brand (Fthenakis, 2020).
- > Bij brandexperimenten met CdTe-zonnepanelen (glas-glas) werden in de rookgassen naast CO, CO<sub>2</sub> en formaldehyde ook lood, cadmium, arseen en seleen gedetecteerd. Deze stoffen kwamen in dezelfde ordegrootte vrij als bij vergelijkbare brandexperimenten met kristallijne en CIS-zonnepanelen (TÜV, 2018).

**Tabel 3.3 Verbrandingsproducten van CdTe-zonnepanelen<sup>9</sup>**

Type zonnepaneel	Verbrandingsproducten	Hoeveelheid	Opmerkingen	Bron
CdTe (glas-glas)	Cd	0,5 %	meting rookgas	Fthenakis, 2005
	Te	-		
CdTe (glas-glas)	CO	1 – 90 mg/m <sup>3</sup>	meting rookgas, *	TÜV, 2018
	CO <sub>2</sub>	42 – 1.495 mg/m <sup>3</sup>		
	formaldehyde	0,4 – 2,6 mg/m <sup>3</sup>		
	As	0,2 – 0,3 µg/m <sup>3</sup>		
	Pb	34 – 1.330 µg/m <sup>3</sup>		
	Cd	9,9 – 48 µg/m <sup>3</sup>		
	Se	2,2 – 4,7 µg/m <sup>3</sup>		
CdTe	CO	46 mg/m <sup>3</sup>	meting rookgas	Krüger e.a. 2014
	CO <sub>2</sub>	8.280 mg/m <sup>3</sup>		
	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, CO<sub>2</sub> kooldioxide, HCN waterstofcyanide, HF waterstoffluoride, Pb lood, Se seleen, SO<sub>2</sub> zwaveldioxide, VOS vluchtige organische stoffen, EVA ethyleenvinylacetaat, PET polyethyleentereftalaat, PVF polyvinylfluoride.

### 3.3 CIS- en CIGS-zonnepanelen

Deze paragraaf beschrijft de verbrandingsproducten van CI(G)S-zonnepanelen op basis van brandexperimenten die met verschillende CI(G)S-zonnepanelen zijn uitgevoerd. Het gaat hierbij zowel om gasvormige verbrandingsproducten als om vaste verbrandingsproducten in

de brandresten. De resultaten van de experimenten worden hieronder puntsgewijs toegelicht en staan samengevat in tabel 3.4.

- > Bij brandexperimenten met CIS-zonnepanelen werden naast CO, CO<sub>2</sub> en formaldehyde ook lood, cadmium, arseen en seleen aangetroffen in de rookgassen. Het is echter niet bekend in welke vorm lood, cadmium, arseen en seleen in de rookgassen aanwezig waren, omdat de analysetechnieken alleen de aanwezigheid van metalen detecteren (TÜV 2018).
- > Bij andere experimenten werd aangegeven dat bij verbranding van CIS-zonnepanelen seleenoxide kan ontstaan, en dat bij 1.000 °C 20% gewichtsverlies werd gemeten (Photovoltaik.org, 2013).
- > Bij analyse van brandresiduen van CIGS-zonnepanelen bleken deze in vergelijking met niet verbrande CIGS-zonnepanelen 18% minder koper, 12% minder gallium, 17% minder indium, 14% minder seleen en 18% minder cadmium te bevatten. Gemiddeld bevatten de brandresiduen nog circa 94% van de zware metalen ten opzichte van de intacte monsters. Net als bij CdTe-zonnepanelen is het vermoeden dat dit komt omdat het grootste deel van de metalen bij verhitting ingekapseld wordt in het door de hitte gesmolten glas (Krüger et al., 2014).
- > Wanneer een CIGS-zonnepaneel een bovenlaag heeft van ETFE (ethyleentetrafluor-ethyleen), kan bij brand HF vrijkomen (Yin et al., 2018).

**Tabel 3.4 Verbrandingsproducten van CIS- en CIGS-zonnepanelen<sup>9</sup>**

Type zonnepaneel	Verbrandingsproducten	Hoeveelheid	Opmerkingen	Bron
CIGS	CO	11 – 382 mg/m <sup>3</sup>	meting rookgas	TÜV, 2018
	CO <sub>2</sub>	615 – 5.870 mg/m <sup>3</sup>	*	
	formaldehyde	1,2 – 4,9 mg/m <sup>3</sup>		
	As	1,0 – 1,6 µg/m <sup>3</sup>		
	Pb	250 – 480 µg/m <sup>3</sup>		
	Cd	12 – 34 µg/m <sup>3</sup>		
	Se	4,8 – 40 µg/m <sup>3</sup>		
CIGS met ETFE-bovenlaag	HF	-	afkomstig uit ETFE-laag, niet uit zonnecel	Yin et al., 2018
CIGS	CO	104 mg/m <sup>3</sup>	meting rookgas	Krüger e.a. (2014)
	CO <sub>2</sub>	14.580 mg/m <sup>3</sup>		
	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, CO<sub>2</sub> kooldioxide, Cu koper, ETFE ethyleentetrafluorethyleen, Ga gallium, HCN waterstofcyanide, HF waterstoffluoride, In indium, Pb lood, Se seleen.

### Siliciumdioxide

Silicose is een ernstige longziekte die veroorzaakt wordt door het inademen van siliciumdioxide deeltjes (silica, kwartsstof, SiO<sub>2</sub>). Silicose is wereldwijd een van de meest voorkomende beroepsziekten en komt vooral veel voor in lage lonenlanden waar weinig aandacht wordt besteed aan preventie. Beroepsmatige blootstelling aan inhaleerbaar siliciumdioxide gebeurt in diverse beroepsgroepen en bedrijfstakken: bijvoorbeeld in de bouw, bij boor-, schuur-, snij- of breekwerkzaamheden aan stenen (Leung et al., 2012). Ook bij de fabricage en bij het recyclen van zonnepanelen die silicium bevatten, kan blootstelling aan siliciumdioxide-stof een gezondheidsrisico zijn (Dubey et al., 2013; Bakhiyi et al. 2014).

Bij verbranding van silicium ontstaat siliciumdioxide. Siliciumoxide wordt in de gevonden literatuur echter niet als verbrandingsproduct van zonnepanelen benoemd. Op grond van de gevonden literatuur is er geen indicatie dat vrijkomen van siliciumdioxide een gezondheidsrisico is bij een brand waarbij zonnepanelen zijn betrokken.

## 3.4 Schadelijke effecten van depositie

Zoals beschreven in paragraaf 1.2, kan depositie van toxische stoffen leiden tot vervuiling van de grond, water en gewassen. Als mensen of dieren daar vervolgens mee in aanraking komen, bijvoorbeeld door het eten van vervuilde gewassen of het drinken van vervuild water, worden zij blootgesteld aan die schadelijke stoffen (RIVM, 2007, 2009; Van Asselt et al., 2019).

### 3.4.1 Kristallijne zonnepanelen

- > Er zijn in de literatuur géén artikelen gevonden waarin onderzoek naar depositie van verbrandingsproducten van kristallijne zonnepanelen is beschreven.
- > In de literatuur wordt voornamelijk gekeken naar vluchtige stoffen in rookgassen. Een uitzondering zijn brandexperimenten van TÜV (2018), waarin ook onderzocht is hoeveel lood, cadmium, arseen en seleen in de rookgassen aanwezig waren. In welke vorm deze stoffen in de rookgassen aanwezig waren, is niet bekend.
- > De TÜV concludeert dat er geen risico voor de volksgezondheid bestaat als gevolg van de aanwezigheid van deze stoffen in de rook, maar dat in het ergste geval in de directe nabijheid van de brand drempelwaarden voor cadmium en seleen overschreden kunnen worden (TÜV, 2018). De TÜV doet geen uitspraak over de risico's van depositie.
- > Andere geven aan dat de hoeveelheid CO en CO<sub>2</sub> dat vrijkomt bij een brand met zonnepanelen, gering is en verwaarloosbaar (Yang et al, 2015). Alhoewel bij iedere brand CO en CO<sub>2</sub> vrijkomen en zonnepaneelbranden hier niet anders in zijn, zijn de hoeveelheden CO en CO<sub>2</sub> die tijdens experimenten in rookgassen gemeten zijn, niet gering te noemen. Ze zullen echter niet neerslaan en meedoen in depositie.

### 3.4.2 CdTe-zonnepanelen

- > Er zijn in de literatuur geen artikelen gevonden waarin onderzoek naar depositie van verbrandingsproducten van CdTe-zonnepanelen is beschreven.
- > Er zijn meerdere onderzoeken gedaan naar het vrijkomen van cadmiumverbindingen bij een brand met CdTe-zonnepanelen, omdat cadmium, tellurium en cadmiumtellurium giftige stoffen zijn (Fthenakis et al. 2020; Reynolds 2019; Baumann et al. 1995).
- > De hoeveelheden cadmium die bij een brand van CdTe-zonnepanelen vrij kunnen komen, vormen over het algemeen geen bedreiging voor de gezondheid en het milieu (Fthenakis et al., 2020; LfU, 2011; Baumann et al. 1995; Moskowitz et al. 1990). Het

overgrote deel van het cadmium kan namelijk niet vrijkomen omdat het gefixeerd wordt door het smelten van de glaslagen (uitgaand van glas-glas zonnepanelen) (TÜV, 2018; Fthenakis et al., 2020, 2005, 2004; Baumann et al. 1995).

- > In het theoretische geval dat alle cadmium *wel* vrij zou komen bij brand (1.000 m<sup>2</sup> zonnepanelen), laten modelberekeningen zien dat de drempelwaarde voor cadmium (PAC-2) niet wordt overschreden. Ook de hoeveelheden CdO en TeO<sub>2</sub> die bij brand kunnen vrijkomen, zullen geen risico voor de volksgezondheid opleveren (LfU, 2011).

#### **Cadmium**

Cadmium is een toxische stof en cadmiumtellurium (CdTe) is dat ook, maar in mindere mate (Fthenakis et al., 2020; Reynolds 2019; Baumann et al. 1995). Cadmium kan in het lichaam worden opgenomen door inhalatie (inademen) of door ingestie (eten en drinken). Cadmium wordt opgenomen door planten, waardoor het gevolgen kan hebben voor de voedselveiligheid (RIVM, 2010; van Asselt et al, 2019; Curtin et al., 2020; LfU et al. 2011). De kans dat cadmium na een brand met zonnepanelen via de melk van de koe naar de mens wordt doorgegeven, lijkt zeer gering te zijn (Van Asselt et al, 2019).

### **3.4.3 CIS- en CIGS-zonnepanelen**

- > Er is geen literatuur gevonden waarin onderzoek naar depositie van verbrandingsproducten van CI(G)S-zonnepanelen is beschreven.
- > In brandexperimenten van TÜV is onderzocht hoeveel lood, cadmium, arseen en seleen in rookgassen van branden met CIS-zonnepanelen aanwezig waren. Geconcludeerd wordt dat er geen gevaar voor de volksgezondheid bestaat als gevolg van de aanwezigheid van deze stoffen in de rook, maar dat in het ergste geval in de directe nabijheid van de brand drempelwaarden voor cadmium en seleen overschreden kunnen worden (TÜV, 2018).
- > Brandexperimenten met CIGS-zonnepanelen laten zien dat koper, gallium, indium, seleen en cadmium vrij kunnen komen (Krüger et al., 2014). Omdat de vorm waarin deze stoffen vrijkomen, niet bekend is, is het niet mogelijk te bepalen of deze stoffen neer kunnen slaan en of zij schadelijk zijn voor de gezondheid en/of het milieu.

#### **Uitloging uit zonnepanelen**

Uitloging is een proces waarbij stoffen die in een vast materiaal zitten, oplossen in een vloeistof en zo uit dat vaste materiaal verdwijnen. Er zijn verschillende onderzoeken gedaan om te bekijken of er uitloging van toxische stoffen uit zonnepanelen kan plaatsvinden, en of dat schadelijke gevolgen kan hebben voor het milieu. Het gaat daarbij om zonnepanelen die nog wel in gebruik maar beschadigd zijn, of om zonnepanelen die aan het eind van hun levensduur op stortplaatsen terecht komen.

De resultaten van verschillende uitlogingsexperimenten met kristallijne zonnepanelen laten zien dat uitloging van stoffen als lood en nikkel uit kristallijne zonnepanelen mogelijk is. De studies zijn echter niet eenduidig over de vraag hoe schadelijk dat kan zijn voor het milieu (Ebert & Müller, 2011; Motta et al., 2016; Kwak et al., 2020).

Uit verschillende experimenten en een modelberekening blijkt dat er door uitloging uit beschadigde CdTe-zonnepanelen cadmium (en andere zware metalen) in het milieu terecht kan komen, maar dat dit waarschijnlijk geen ernstig risico voor gezondheid of milieu oplevert. (Krüger et al., 2014; Curtin et al., 2020; Baumann et al., 1995; Shinha et al., 2012; Reynolds et al., 2019; Fthenakis et al., 2020) .



Als resten van zonnepanelen die toxische stoffen bevatten, als gevolg van een brand in de omgeving terechtkomen en niet worden verwijderd, is het denkbaar dat uitloging van toxische stoffen uit die resten plaatsvindt. Het is echter de vraag of daarbij niveaus bereikt worden die die schadelijk kunnen zijn voor de gezondheid van mens en dier en voor het milieu.

### 3.5 Samenvatting

- > Onderzoek naar schadelijke effecten van verbranding van zonnepanelen richt zich voornamelijk op emissie van stoffen in rookgassen en op de toxiciteit van rookgassen, maar niet of nauwelijks op schadelijke effecten van depositie van verbrandingsproducten en (on)verbrande resten van zonnepanelen.
- > In de literatuur worden alleen verbrandingsproducten genoemd die hun oorsprong kennen in de polymere (tussen)lagen en in de metalen die in de halfgeleiders en de appendages aanwezig zijn.<sup>10</sup> Dit zijn verbrandingsproducten die bij alle branden met onder andere kunststoffen / polymeren te verwachten zijn.
- > Uit alle typen zonnepanelen komen bij verbranding CO en CO<sub>2</sub> vrij, afkomstig van de polymere (tussen)lagen in zonnepanelen.
- > Afhankelijk van de polymere (tussen)laag kunnen bij verbranding ook vluchtige organische stoffen (VOS), formaldehyde, waterstoffluoride en waterstofcyanide ontstaan.
- > De halfgeleiders in kristallijne zonnepanelen bevatten metalen die bij verbranding vrij kunnen komen. Omdat de analysetechnieken die bij de experimenten in de literatuur toegepast werden, alleen de aanwezigheid van de metalen kunnen aantonen, is niet bekend in welke vorm de metalen aanwezig zijn.
- > De halfgeleiders in CdTe-zonnepanelen bevatten cadmium en tellurium. Bij brand smelt het aanwezige glas waardoor cadmium en tellurium ingekapseld worden en niet vrij kunnen komen. De enige plek waar dat in beperkte mate wel kan gebeuren, zijn de randen van zonnepanelen.
- > De halfgeleiders in Cl(G)S-zonnepanelen bevatten koper, indium, (gallium) en seleen: stoffen die bij verbranding vrij kunnen komen. Vanwege de toegepaste analysetechniek in de experimenten is niet bekend in welke vorm deze stoffen vrijkomen.
- > Daarnaast kunnen, afhankelijk van de uitvoering van het zonnepaneel, ook andere gevaarlijke stoffen vrijkomen. In de literatuur worden onder andere cadmium, seleen, arseen en lood genoemd. De concentraties van deze stoffen in brandtesten liggen voor kristallijne, CdTe- en CIGS-zonnepanelen in dezelfde orde van grootte. Afhankelijk van de materialen van de bovenlaag, tussenlaag en onderlaag, kunnen verder onder meer zwaveldioxide, waterstoffluoride en waterstofcyanide vrijkomen bij brand.
- > Op grond van brandexperimenten concluderen verschillende onderzoeksgroepen dat het weliswaar mogelijk is dat bij brand gevaarlijke stoffen vrijkomen uit zonnepanelen en dat in de directe omgeving van de brand grenswaarden overschreden worden (bijvoorbeeld voor Cd en Se), maar dat er geen risico's zijn voor de gezondheid van mens en dier en voor het milieu.

<sup>10</sup> Dat glas geen verbrandingsproducten geeft, is niet verwonderlijk omdat glas uit siliciumoxide bestaat (SiO<sub>2</sub>) wat niet verder kan oxideren.

## 3.6 Beschouwing

Twee aspecten verdienen aandacht in de beschouwing:

5. In de brandexperimenten gaat in de meeste gevallen de aandacht uit naar de stoffen die in de rookgassen worden aangetroffen. Dat kunnen gasvormige stoffen zijn (vooral CO en CO<sub>2</sub>), maar ook stofgebonden deeltjes, waar metalen in aangetroffen kunnen worden (met name lood, cadmium, arseen en seleen). De literatuur geeft over deze stoffen in de rookgassen aan dat zij geen gevaar voor de gezondheid en het milieu opleveren. De literatuur beschrijft niets over depositie, maar schrijft in een enkel geval wel over analyse van brandresten. Brandresten zijn deels te vergelijken met depositie, maar om echt goed te kunnen bepalen of en hoe depositie - afkomstig van branden met of zonder zonnepanelen - doorwerkt op gezondheid en milieu, is verder onderzoek nodig.
6. Uit het onderzoek blijkt dat de kennis over de emissie van gevaarlijke stoffen uit zonnepanelen als gevolg van brand, voornamelijk berust op brandexperimenten op kleine schaal en onder gecontroleerde omstandigheden. De resultaten van dergelijke kleine brandexperimenten kunnen niet zomaar geëxtrapoleerd worden naar brandproeven op meer realistische, grote schaal en naar 'echte' branden. Een groot deel van de in de gevonden literatuur beschreven brandexperimenten is uitgevoerd met fragmenten van zonnepanelen of met kleinere en/of dunnere uitvoeringen van zonnepanelen, wat een rol kan spelen bij de hoeveelheid stoffen die bij brand vrijkomen. Bij 'echte' branden op grote schaal en met hogere stralingswarmte kan het risico op vrijkomen van gevaarlijke stoffen en eventueel overschrijden van grenswaarden groter zijn. Daarnaast zijn de gecontroleerde omstandigheden van een testruimte niet te vergelijken met de omstandigheden in de open lucht.  
Het is dus belangrijk te beseffen dat de hoeveelheid gevaarlijke stoffen die bij een echte brand vrijkomt, anders kan zijn dan op grond van brandexperimenten wordt verwacht. Dat wil echter zeker niet zeggen dat brandexperimenten met (fragmenten van) zonnepanelen niet zinvol zijn: ze geven hoe dan ook een beeld van de stoffen die bij brand met zonnepanelen kunnen vrijkomen (Chow et al., 2017; Liao et al., 2020; RIVM, 2009).

# 4 Verspreiding van depositie

Dit hoofdstuk geeft antwoord op de vraag hoe ver de depositie van verbrandingsproducten van zonnepanelen reikt (deelvraag 3).

## 4.1 Verspreiding

Verspreiding en depositie van vaste verbrande deeltjes vindt bij veel branden plaats. De mate van verspreiding wordt bepaald door factoren als de grootte van de brand, de volledigheid van de verbranding, pluimstijging, weersomstandigheden en de grootte en het gewicht van de deeltjes. Hoe groter een brand, hoe groter de kans op pluimstijging. De hitte van de brand zorgt dan voor een groot stijgend vermogen waardoor vonken, rook en deeltjes door thermische werking de hoogte in worden geblazen en zich kunnen verspreiden. Hoe lichter de deeltjes zijn, hoe groter de afstand vanaf de brandhaard waarover depositie kan plaatsvinden. Het materiaal waaruit deze deeltjes bestaan, zal weinig invloed op de verspreiding hebben.

Voor het beantwoorden van de derde onderzoeksvraag is gebruik gemaakt van twee RIVM-onderzoeken naar het vrijkomen en de depositie van stoffen bij grote branden in het algemeen. Specifiek over depositie als gevolg van branden met zonnepanelen is er in de wetenschappelijke literatuur niets geschreven. In de RIVM-onderzoeken zijn gegevens geanalyseerd die door de Milieuongevallendienst (MOD) van het RIVM bij meer dan 50 branden verzameld zijn in de periode 1997 – 2007 (RIVM, 2009). Hier zaten geen branden bij met zonnepanelen. De MOD heeft gras- en veegmonsters genomen, omdat deze makkelijker te analyseren zijn dan verbrande deeltjes. De gras- en veegmonsters geven een indicatie van de mate van depositie van stofdeeltjes en de daarin aanwezige verontreinigingen.

Het RIVM concludeert in zijn rapporten dat de verspreiding van depositie nogal verschilt bij de onderzochte branden, maar dat gesteld kan worden dat depositie tot een afstand van 500 meter vanaf de brand mogelijk is - uitzonderingen met grotere afstanden daargelaten (RIVM 2007, 2009). De uitzonderingen betreffen dan vooral de zeer grote branden.

Wanneer een vergelijking wordt getrokken met branden waar zonnepanelen bij betrokken zijn, is onze verwachting (mede gebaseerd op de in de inleiding van dit rapport genoemde casuïstiek) dat de bevindingen van het RIVM ook van toepassing zijn op de branden met zonnepanelen. Bij branden met relatief weinig warmteontwikkeling zal depositie niet zo ver in de omgeving komen als bij grote branden met veel meer warmteontwikkeling. Bij een brand van een zonneweide<sup>11</sup> zal de warmteontwikkeling naar verwachting niet zo groot worden dat er pluimstijging optreedt (vanwege de beperkte vuurlast), terwijl dat bij een groot gebouw met veel zonnepanelen wel gebeurt (IFV, 2021a).

---

<sup>11</sup> Een zonneweide of zonnepark is een weide, (gras)veld of perceel waar (vaak grote hoeveelheden) zonnepanelen op de grond geplaatst zijn. Zie bijv. [Infomil](#) (n.d.) of de *Kennisbundel zonnepanelen* (IFV, 2021b).

## 4.2 Samenvatting

Er is geen literatuur gevonden over depositie van onverbrande zonnepaneeldeeltjes en de verspreiding van deze deeltjes in de omgeving, bij branden met zonnepanelen. Onderzoek naar depositie (in het algemeen) bij tientallen grote branden in Nederland laat zien dat depositie tot een afstand van zo'n 500 m vanaf de brand te verwachten is, uitzonderingen daargelaten (RIVM, 2007, 2009).

# 5 Handelingsperspectieven voor opruimen van depositie

In dit hoofdstuk wordt aangegeven of handelingsperspectieven beschikbaar zijn om de mogelijke schadelijke effecten van de depositie van verbrandingsproducten en (on)verbrande resten te beperken of te voorkomen. Hoewel deelvraag 5 zich richt op branden met zonnepanelen, is depositie niet uniek voor deze branden, maar komt depositie in meer of mindere mate bij veel branden voor. Om die reden wordt de beantwoording van deelvraag 5 breder getrokken.

## 5.1 Overzicht betrokken partijen

Bij iedere brand komen gevaarlijke stoffen vrij die in de omgeving verspreid worden en al dan niet neer kunnen slaan. De hoeveelheid en de verspreiding van de rookgassen alsook de gevaarlijke stoffen die aanwezig zijn in een brandende object bepalen of opschaling van de brandbestrijding nodig is. Naast de brandweer worden dan andere (hulpverlenings)organisaties betrokken bij de brand.

Het bestrijden van een grote brand met zonnepanelen kent veel overeenkomsten met een grote brand waarbij geen zonnepanelen betrokken zijn. In beide situaties komt schadelijke rook vrij, is er een effectgebied en kan er sprake zijn van depositie in het effectgebied (zie figuur 1.1). Voor de meeste situaties waarmee de brandweer en andere hulpverleners te maken krijgen, zijn voorschriften, procedures en protocollen beschikbaar waarin aangegeven wordt wie wanneer waarom wat moet doen. Voor de brandbestrijding en voor de bestrijding van (de gevolgen van) het vrijkomen van gevaarlijke stoffen bestaan reguliere procedures.

Gebleken is echter dat er geen procedure is voor het opruimen van depositie, met uitzondering van asbest.<sup>12</sup> Dit is niet specifiek voor branden met zonnepanelen: ook voor het opruimen van resten van isolatiemateriaal, dakbedekking of andere materialen die bij brand in de omgeving verspreid worden, bestaan geen procedures.

Het ontbreken van een procedure voor het opruimen (en de schadeafhandeling) van (on)verbrande resten van zonnepanelen roept echter veel vragen op bij gedupeerden, bij gemeenten en andere betrokken organisaties. De grote branden waarbij sprake was van depositie van zonnepaneeldeeltjes hebben de discussie over het ontbreken van een protocol aangewakkerd (Omroep Flevoland, 2020). De vragen en onzekerheden hebben betrekking op de risico's van depositie, over het al dan niet opruimen van depositie en over wie welke verantwoordelijkheid heeft (Omroep Frýslan, 2021); zo wezen verschillende organisaties naar elkaar bij de vraag waar de verantwoordelijkheid ligt voor controle van landbouwgewassen waar depositie is aangetroffen (Omroep Flevoland, 2020). De Omgevingsdienst Noord-Holland Noord pleit naar aanleiding van de brand in 't Veld op 30 juli 2020 voor een landelijk protocol

<sup>12</sup> Daarvoor bestaat de [Handreiking aanpak asbestincidenten](#) (IFV, 2018).

voor brand bij panden waarop zich zonnepanelen bevinden (OD NHN, 2020). Ook de gemeente Tytsjerksteradiel, veiligheidsregio Fryslân en LTO Noord uiten in een brief aan de minister hun zorgen over het ontbreken van een protocol (Tytsjerksteradiel, 2021a).

De vragen en onzekerheden omtrent depositie ontstaan al tijdens een grote brand, maar spitsen zich vooral toe in de nafase waar acties in gang moeten worden of zijn gezet om een veilige eindsituatie te creëren. Het is in die fase belangrijk te weten welke organisaties betrokken kunnen zijn als het gaat om depositie. Tabel 5.1 geeft een niet-limitatief overzicht van organisaties en benadeelde partijen die betrokken kunnen zijn bij de nafase van een brand met depositie.<sup>13</sup> In dit overzicht worden boeren gezien als 'voedselproducenten die verantwoordelijk zijn voor de veiligheid van de levensmiddelen die zij/hij produceert, verhandelt of verkoopt aan de consument' (NVWA, 2018). Om die verantwoordelijkheid te kunnen nemen, zijn handelingsperspectieven nodig voor enerzijds het opruimen van depositie en anderzijds voor het verhalen van de schade.

**Tabel 5.1 Organisaties die betrokken kunnen zijn bij het opruimen van depositie in de nafase van een brand**

Organisatie	Taken en/of verantwoordelijkheden in relatie tot het opruimen van depositie
<b><i>Incident afhandeling</i></b>	
Brandweer	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bepalen van potentieel verspreidingsgebied van depositie.</li> <li>- Onderzoeken van mogelijke aanwezigheid van depositie .</li> <li>- Adviseren over beschermende maatregelen voor hulpdiensten en omgeving.</li> </ul>
GGD / GHOR	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Adviseren over gezondheidsrisico's en maatregelen.</li> </ul>
Gemeente	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Crisiscommunicatie (voorlichting aan bevolking).</li> <li>- Als nodig (opdracht geven tot) opruimen / schoonmaken van gebied waar depositie is aangetroffen.</li> </ul>
RIVM (Milieugevallen-dienst (MOD))	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hulpverleningsdiensten ondersteunen door het maken van risicoschattingen van de effecten op gezondheid en milieu op basis van metingen en verspreidingsberekeningen.</li> </ul>
Gedupeerden zoals boeren, afnemer van boeren en waterkwaliteitbeheerders	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Boeren en afnemers van boeren zijn ervoor verantwoordelijk dat voedsel geen risico voor de voedselketen vormt.</li> <li>- Boeren zijn verantwoordelijk voor de gezondheid van hun dieren.</li> <li>- Waterkwaliteitsbeheerders nemen maatregelen om (verdere) verontreiniging van oppervlaktewater te voorkomen.</li> </ul>
Nederlandse Voedsel- en Waren Autoriteit (NVWA)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Toezichthouder voor onder andere veilige voedselproductie en -verkoop, diergezondheid, dierenwelzijn, natuur en milieu.</li> </ul>
<b><i>Schade-afhandeling</i></b>	
Verzekeraars(s) en Salvage	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Registratie van gedupeerden.</li> <li>- Afstemming van verzekeraars met eigenaar/beheerder en gedupeerde(n). Salvage kan hierbij initiërende en verbindende rol spelen.</li> </ul>

<sup>13</sup> Omdat iedere brand anders is, zal per situatie bekeken moeten worden welke organisaties betrokken zijn of moeten worden.

Organisatie	Taken en/of verantwoordelijkheden in relatie tot het opruimen van depositie
Eigenaar / beheerder	<ul style="list-style-type: none"> <li>- (Opdracht geven tot) opruimen van depositie bij derden.</li> <li>- Vergoeden eventuele (in)directe schade bij derden.</li> <li>- Inseinen verzekeraar en/of Salvage.</li> </ul>

### Adviezen in de praktijk

Bij de brand in 't Veld adviseerden de omgevingsdienst Noord-Holland Noord en gemeente Hollands Kroon de eigenaren van veebedrijven om hun dieren binnen te houden, omdat dieren maagbloedingen kunnen krijgen als zij resten van zonnepanelen opeten (OD NHN, 2020).

Ook bij de brand in Noordbergum adviseerde gemeente Tytsjerksteradiel de eigenaren van vee hun dieren binnen te halen. Daarnaast werden eigenaren van agrarische bedrijven geadviseerd om de veroorzaker aansprakelijk te stellen, een schouw te regelen en het opruimen van de deeltjes in gang te zetten. Vervuilde percelen moesten worden afgemaaid en het vervuilde gras verwerkt door een erkende afvalverwerker. Inwoners van de gemeente Tytsjerksteradiel werd geadviseerd om deeltjes in hun tuin met handschoenen aan weg te gooien in de afvalcontainer. Hen werd afgeraden om op eigen initiatief vervuilde weilanden in te gaan en te gaan opruimen. Verder werd de inwoners gevraagd melding te doen van gevonden deeltjes, om de gemeente te helpen het getroffen gebied in kaart te brengen (Tytsjerksteradiel, 2021b).

## 5.2 Aanbeveling

Gezien de maatschappelijke onrust, de onduidelijkheden over het opruimen van depositie en gezien het ontbreken van mogelijke handelingsperspectieven daarin, is het IFV van mening dat een aanpak of procedure voor het opruimen van depositie gewenst is. De procedure moet inzicht en handelingsperspectief geven en zou tenminste de volgende onderwerpen moeten bevatten:

- > Overzicht verantwoordelijkheden betrokken organisaties of personen
- > Beslisschema wanneer opruimen depositie gewenst is
- > Inhoudelijke informatie over depositie:
  - Verspreiding van depositie (dichtbij, veraf)
  - Vormen van depositie (stof, kleine deeltjes, grote deeltjes, plastic, metaal, scherp etc.)
  - Typering besmettelijke gebieden (grasland, landbouwgewassen, (moes)tuinen, speelplaatsen voor kinderen)
  - Risico's van depositie (opname in lichaam, opname in voedselketen, verwonding)
- > Maatregelen (afgestemd op depositievorm, op typering besmettelijk gebied en op risico)
- > Crisiscommunicatie

# 6 Beantwoording van de onderzoeksvragen

In dit hoofdstuk worden de hoofdvraag en deelvragen op basis van het literatuuronderzoek beantwoord.

## **Deelvraag 1: Welke verbrandingsproducten kunnen vrijkomen bij branden met zonnepanelen?**

- > Bij de verbranding van de polymere lagen in zonnepanelen ontstaan vooral koolmonoxide en kooldioxide. Dit zijn gassen die in de rook aangetroffen worden. In sommige gevallen kunnen ook vluchtige organische stoffen, formaldehyde, waterstoffluoride en waterstofcyanide vrijkomen. Dit is afhankelijk van de polymeren die aanwezig zijn in het zonnepaneel.
- > Bij de verbranding van zonnepanelen kunnen metalen vrijkomen die zich in de halfgeleiders van de zonnecellen en in overige onderdelen van de zonnepanelen bevinden. Om welke metalen het gaat, is afhankelijk van het type zonnepaneel, maar voorbeelden zijn koper, cadmium, lood, arseen en seleen. Het is niet bekend in welke vorm deze metalen vrijkomen.
- > Over de verspreiding van grotere (on)verbrande resten van zonnepanelen in de omgeving (bijvoorbeeld stukjes glas) zoals in de praktijk bij grootschalige branden met zonnepanelen, is waargenomen<sup>1,2</sup>, is in de wetenschappelijke literatuur niets geschreven.

Bij branden in het algemeen en bij branden met veel polymeren in het bijzonder, komen CO en CO<sub>2</sub> als gasvormige verbrandingsproducten vrij. Wat deze stoffen betreft zal er naar verwachting weinig verschil zijn tussen branden met zonnepanelen en branden zonder zonnepanelen. Ook zullen de verschillen tussen een brand met kristallijne zonnepanelen en een brand met dunne-film-zonnepanelen klein zijn als het gaat om CO en CO<sub>2</sub>.

## **Deelvraag 2: Zijn er qua depositie van verbrandingsproducten verschillen tussen typen zonnepanelen, en zo ja, welke?**

Deze vraag is op basis van de geraadpleegde literatuur niet te beantwoorden, omdat hierover in de literatuur geen informatie beschikbaar is:

- > In de literatuur zijn geen artikelen gevonden die inzicht geven in de vraag of en hoe verbrandingsproducten en onverbrande resten van zonnepanelen bij een brand verspreid worden en waar zij in de omgeving neer kunnen slaan (fasen 2 tot en met 4, figuur 1.1).
- > De typen zonnepanelen die in dit onderzoek bekeken zijn, verschillen voornamelijk in de zonnecellen en de metalen die daarin verwerkt zijn. Het is daarom te verwachten dat eventuele verschillen in depositie van verbrandingsproducten te maken zullen hebben met de verschillen in metalen die in de diverse typen zonnecellen verwerkt zijn. In de literatuur wordt echter niet beschreven in welke vorm metalen uit zonnepanelen vrijkomen. Hierdoor is niet te zeggen of er qua depositie verschillen zijn tussen diverse typen zonnepanelen.



### **Deelvraag 3: Hoe ver reikt de depositie van deze verbrandingsproducten?**

Bij gebrek aan publicaties over branden met zonnepanelen, is voor de beantwoording van deze vraag gebruik gemaakt van publicaties over depositie bij branden zonder zonnepanelen. Hierbij is aangenomen dat de verspreiding en depositie van deeltjes bij deze branden op dezelfde manier plaatsvinden als wanneer er wel zonnepanelen bij de brand betrokken zijn.

- > Hoe ver de depositie reikt, is onder andere afhankelijk van de grootte van de brand, de ontwikkelde temperaturen en de grootte/zwaarte van de vaste deeltjes.
- > Depositie is tot 500 meter vanaf de brand mogelijk.
- > Uitzonderingen hierop zijn (zeer) grote branden waarbij depositie kilometers ver kan komen. Dit is in de praktijk waargenomen bij branden met zonnepanelen.

### **Deelvraag 4: Welke mogelijke schadelijke effecten heeft de depositie van de verbrandingsproducten van zonnepanelen op mens, dier en milieu?**

- > Bij iedere brand komen gevaarlijke stoffen vrij, al dan niet in de vorm van depositie.
- > In hoeverre de verbranding van zonnepanelen en de daaruit voortkomende depositie bijdragen aan mogelijke toxische effecten voor mens, dier en milieu, is op grond van de literatuur niet te zeggen. In de literatuur wordt hier niet over geschreven.
- > Wel kunnen (scherpe) restanten van (on)verbrande zonnepanelen vanwege scherfwerking schadelijk zijn, bijvoorbeeld voor spelende kinderen en grazende dieren.

### **Deelvraag 5: Welke aanpak is voorhanden om de mogelijke schadelijke effecten van de depositie van verbrandingsproducten van zonnepanelen te beperken / voorkomen?**

- > Qua bestrijding - inclusief het vrijkomen van gevaarlijke stoffen - verschilt een brand met zonnepanelen niet van een 'gewone' grote brand; hiervoor beschikken de brandweer, de Milieuongevallendienst e.d. over (reguliere) procedures en afspraken.
- > Voor het opruimen van de (on)verbrande resten van zonnepanelen die in de (verre) omgeving terechtgekomen zijn, bestaan geen procedures.

### **Hoofdvraag: Wat zijn de gevaren voor mens, dier en milieu bij de depositie van verbrandingsproducten van zonnepanelen en welke aanpak voor de bestrijding past daarbij?**

- > Scherpe resten van zonnepanelen die als depositie in de omgeving terechtkomen, kunnen schadelijk zijn, bijvoorbeeld voor spelende kinderen en voor dieren. Om dergelijke schadelijke effecten te voorkomen en te voorkomen dat (on)verbrande resten van zonnepanelen in de voedselketen terechtkomen, moeten deze opgeruimd worden.
- > Specifiek voor de nafase van dit type incidenten (het opruimen van (on)verbrande resten van zonnepanelen, de schadeafhandeling, de zorg voor dier- en voedselveiligheid et cetera) zijn er geen procedures. Dit leidt in de praktijk tot onduidelijkheid over taken en verantwoordelijkheden en ongerustheid bij verantwoordelijken en gedupeerden. Ook voor het opruimen van andere materialen die bij brand in de omgeving verspreid worden (met uitzondering van asbest<sup>12</sup>) bestaan geen specifieke procedures. Het is daarom gewenst dat voor de nafase van branden met depositie een landelijke aanpak of set van afspraken wordt ontwikkeld.
- > Verder verdient het aanbeveling om branden waarbij depositie van zonnepaneeldeeltjes optreedt, te blijven monitoren en hiervoor een database op te zetten, om het inzicht in de aard en de omvang van de depositie bij dit type incidenten te vergroten.

# Referenties

Alberta Health (2017). [Protective Action Criteria Review Summary](#)

Asselt E.D van. & Noordam M.Y. (2019). *Schadelijke stoffen bij branden in relatie tot zuivel*, [WFSR-rapport 2019.010](#). Wageningen: Wageningen Food Safety Research.

Bakhiyi B., Labrèche F. & Zayed J. (2014). The photovoltaic industry on the path to a sustainable future - Environmental and occupational health issues. *Environment International* 73, pp. 224–234.

Baumann A. E., Hynes K. M. & Hill R. (1995). An investigation of cadmium telluride thin-film PV modules by impact pathway analysis. *Renewable Energy*, 6(5-6), 593-599.

Berenschot (2011). [Zon op Nederland. Roadmap 2011-2015](#). Utrecht: Berenschot.

Chow C.L., Han S.S. & Ni X.M. (2017). A study on fire behaviour of combustible components of two commonly used photovoltaic panels. *Fire Materials* 41, 65–83.

Conings B., Babayigit A. & Boyen H.-G. (2019). Fire Safety of Lead Halide Perovskite Photovoltaics, *ACS Energy Lett.*, 4, 873–878.

Donev, J.M.K.C., Afework B., Hanania J., Stenhouse K. & Yelland B., et al. (2018). [Energy Education - Photovoltaic cell](#).

Dubey S., Nilesh Y. Jadhav N.Y. & Zakirova B. (2013). Socio-Economic and Environmental Impacts of Silicon Based Photovoltaic (PV) Technologies. *Energy Procedia* 33, 322 – 334.

EZK (2020). Brief Min. EZK aan TK, [Beantwoording vragen over het vrijkomen van glasherven en andere brokstukken uit zonnepanelen bij hevige brand](#), 25 sept. 2020, kenmerk DGKE / 20234751.

EZK (2021). Brief Min. EZK aan TK, [Beantwoording vragen over de schade na brand met zonnepanelen in Noardburgum](#), 2 juli 2021, kenmerk DGKE-E / 21152731.

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

Fthenakis V.M., Fuhrmann M., Heiser J., Lanzirotti A., Fitts J., & Wang W. (2005). Emissions and encapsulation of cadmium in CdTe PV modules during fires. *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 13, 713–723.

Fthenakis V., Athias C., Blumenthal A., Kulur A., Magliozzo J. & Ng D. (2020). Sustainability evaluation of CdTe PV: An update. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 123, 109776.

Instituut Fysieke Veiligheid (2021a). [Vooronderzoek depositie bij branden met zonnepanelen](#). Een verkennende studie naar de depositie van verbrandingsproducten als gevolg van brand met substantiële hoeveelheden zonnepanelen. Arnhem: IFV.

Instituut Fysieke Veiligheid (2021b). [Kenniscbundel zonnepanelen](#). Arnhem: IFV.

Ju X., Zhou X., Zhao K., Hu Y., Mu T., Ni Y. & Yang L. (2017). Experimental study on burning behaviors of photovoltaic panels with different covering using a cone calorimeter. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* DOI: 10.1063/1.4990830.

Krüger S., Teichmann B., Despinasse M. & Klaffke B. (2014). *Systematische Untersuchung des Brandverhaltens und des Feuerwiderstandes von PV-Modulen einschließlich der missionen im Brandfall und Entwicklung eines Prüfverfahrens zum Einfluss von PV-Modulen auf die harte Bedachung*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

Leung C.C., Yu I.T.S. & Chen W. (2012). Silicosis. *Lancet* 379, 2008-2018.

LfU (Bayerisches Landesamt für Umwelt) (2011). *Berechnung von Immissionen beim Brand einer Photovoltaik-Anlage aus Cadmiumtellurid-Modulen*. Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umwelt.

Liao B., Yang L., Ju X., Peng Y. & Gao Y. (2020). Experimental study on burning and toxicity hazards of a PET laminated photovoltaic panel. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 206, 110295.

Liciotti et al. C., Cancelliere P., Cardinali M. & Puccia V. (2014). *Analysis of the combustion fumes and gases released during the burning of some C-Si PV modules*, in: 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Copenhagen: European Environment Agency.

Moskowitz P, Fthenakis V. Toxic materials released from photovoltaic modules during fires: health risks. *Solar Cells*, 29 (1), 63–71.

Nederlandse Voedsel en Warenautoriteit (2018). [Basisinformatiebladen Voedselveiligheid](#)

Omgevingsdienst Noord-Holland Noord (OD NHN, 2020). [Landelijk protocol brand zonnepanelen snel nodig](#)

Omroep Flevoland (2020). [Stukjes zonnepaneel in oogst na brand: niemand controleert](#)

Omrop Frýslan (2021) [Burgemeester Gebben: "Brand is groot drama, maar eigenaren begrijpen dat er ook een zakelijke kant aan zit"](#)

Photovoltaik.org (2013). [Besondere Gefahren der Photovoltaik durch giftige Verbrennung und Ausbreitung](#).

- Reynolds Jr. W., Karmis M. & Barker S. (2019). *Assessment of the Risks Associated with Thin Film Solar Panel Technology*, rapport Virginia Center for Coal and Energy Research, Virginia Tech Blacksburg, USA.
- RIVM (2002). *Resultaten van metingen door de Milieugevallendienst bij branden*, [rapport 609100002/2002](#). Bilthoven: RIVM.
- RIVM (2007). *Emissies van schadelijke stoffen bij branden*, [rapport 609021051/2007](#). Bilthoven: RIVM.
- RIVM (2009). *Verspreiding van stoffen bij branden: een verkennende studie*, [rapport 609022031/2009](#). Bilthoven: RIVM.
- RIVM (2020). [Overzicht interventiewaarden 2020](#)
- Sark, W. van (2019). *Integratie door differentiatie. De rol van zonne-energie in de Samenleving*. [Oratie faculteit Geowetenschappen Universiteit Utrecht](#), 31 oktober 2019.
- Singh B.P., Goyal S.K. & Kumar P. (2021). Solar PV cell materials and technologies: analyzing the recent developments. *Materials Today: Proceedings*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.003>.
- Sinha P., Balas R., Krueger L. & Wade A. (2012). Fate and transport evaluation of potential leaching risks from cadmium telluride photovoltaics. *Environ. Toxicol. Chem.* 31, 1670–1675.
- Steinberger H. (1998). Health, safety and environmental risks from the operation of CdTe and CIS thin-film modules. *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* 6, 99–103.
- Tytsjerksteradiel (2021a). [Pleidooi voor 'panelenprotocol' bij zonnepanelenbranden](#).
- Tytsjerksteradiel (2021b). [Deeltjes vrijgekomen na brand in Noardburgum](#).
- TNO (2019). *Brandincidenten met fotonvoltaïsche (PV) systemen in Nederland. Een inventarisatie*, [rapport TNO 2019 P10287](#), Petten: TNO.
- TÜV Rheinland Energie und Umwelt GmbH. (2018). *Assessing Fire Risks in Photovoltaic Systems and Developing Safety Concepts for Risk Minimization*. Keulen: TÜV.
- US Department of Energy (z.d.). [Protective Action Criteria \(PAC\) with AEGs, ERPGs, & TEELs](#)
- Wohlgemuth, J. (2017). Photovoltaic cells. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, <https://doi.org/10.1002/0471238961.16081520070125.a01.pub3>.
- Yang H.-Y., Zhou X.-D., Yang L.-Z. & Zhang T.-L. (2015). Experimental Studies on the Flammability and Fire Hazards of Photovoltaic Modules. *Materials*, 8, 4210-4225.
- Yin L., Jiang Y. & Qiu R. (2018). Combustion Behaviors of CIGS Thin-Film Solar Modules from Cone Calorimeter Tests. *Materials* 11, 1353 – e.v..

## Websites

- > [National Energy Foundation](#)
- > [Energy education](#)
- > [Zonne-energie gids](#)
- > [Milieucentraal](#)
- > [Infomil](#)

# Bijlage 1 Afkortingen

ABS	acrylonitrilbutadiëenstyreen
AEGL	acute exposure guideline level
AGW	alarmeringsgrenswaarde
CdTe	cadmiumtelluride
Cl(G)S	cadmium-indium-(gallium)-diselenide
ETFE	ethyleentetrafluorethyleen
EVA	ethyleenvinylacetaat
IFV	Instituut Fysieke Veiligheid
LBW	levensbedreigende waarde
MOD	Milieuongevallendienst (RIVM)
PA	polyamide
PAC	protective action criteria
PET	polyethyleentereftalaat
PV	photovoltaic (NL: fotovoltaïsch)
PVB	polyvinylbutyral
PVF	polyvinylfluoride
PU	polyurethaan
RIVM	Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu
TPO	thermoplastisch polyolefine
TPU	thermoplastisch polyurethaan
VOS	vluchtige organische stoffen
VRW	voorlichtingsrichtwaarde

# Bijlage 2 Zoektermen

## Zoektermen vooronderzoek (IFV, 2021a)

brand zonnepaneel\* OR brand zonnepark OR brand zonneweide OR brand PV-systeem\* OR brand PV-paneel\* OR depositie OR depositie (brand) zonnepaneel OR risico's brand zonnepaneel OR schadelijke / gevaarlijke stoffen brand zonnepaneel

Fire photovoltaic (cells / panel / system) OR PV\* modules OR photovoltaic health, safety, environmental risks / impact OR emission / encapsulation PV fire OR PV (fire) hazard / risks OR PV / photovoltaic fire incidents OR toxicity (hazard) of PV fire / PV modules OR toxic materials photovoltaic (fires)

## Zoektermen voorliggend onderzoek

### *Nederlands*

- > Brand zonnepaneel\* / brand zonnepanelen
- > Verbranding zonnepaneel\* / verbranding zonnepanelen
- > Verbrandingsproducten zonnepaneel\* / Verbrandingsproducten zonnepanelen
- > Grote brand zonnepaneel\* / brand\* zonnepaneel\* / Grote brand zonnepanelen / brand\* zonnepanelen
- > Type zonnepaneel\* / Materiaal\* zonnepaneel\* / materialen zonnepaneel\* / Type\* zonnepanelen / Materiaal\* zonnepanelen / materialen zonnepanelen
- > Depositie verbrandingsproduct\* / Depositie verbrandingsprodukt\* / depositie bij brand / depositie zonnepaneel\* / depositie zonnepanelen
- > Toxiciteit zonnepaneel\* brand / gevaarlijke stoffen zonnepaneel\* / gevaren brand\* zonnepaneel\*

### *Engels*

- > Photovoltaic / PV system
- > Photovoltaic cells / materials (fire / burning)
- > Photovoltaic combustion OR PV combustible components
- > Photovoltaic dispersal OR fire OR burning
- > Toxic species and particulate PV OR emission from PV / Photovoltaic / particle
- > Components of PV / Photovoltaic system
- > Photovoltaic fire\*
- > Fire behaviour photovoltaic / fire behavior photovoltaic
- > Safety concerns PV systems / panel
- > (gas) emission photovoltaic fires
- > Toxicity (smoke) hazard\* photovoltaic panel\*, PV panel / system
- > Types photovoltaic panels
- > Large (scale) fires photovoltaic panels
- > Toxic gas PV OR toxic materials PV OR hazardous materials photovoltaic fires
- > Fire PV toxic particle