

Zonneparken en natuurbranden



Nederlandse Academie voor
Crisisbeheersing en Brandweezorg
Postbus 7010
6801 HA Arnhem
Kemperbergerweg 783, Arnhem
www.nipv.nl
info@nipv.nl
026 355 24 00

Colofon

© Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV), 2024

Auteurs: M. Duyvis, M. Rovers, C. Stähler, I. Tanck, B. Verhoeven en J. Vos
Contactpersoon: M. Duyvis
Opdrachtgever: Omgevingsdienst NL
Datum: 19 december 2024
Foto cover: Shutterstock

Dit onderzoek is verricht met subsidie van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat / Omgevingsdienst NL uit het *Ontwikkelsbudget nieuwe prioriteiten versterking omgevingsveiligheid 2021-2024*, in het kader van de Meerjarenagenda Versterking Omgevingsveiligheid.

Wij hechten veel belang aan kennisdeling. Delen uit deze publicatie mogen dan ook worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding.

Het Nederlands Instituut Publieke Veiligheid is bij wet vastgelegd onder de naam Instituut Fysieke Veiligheid.

Inhoud

Samenvatting	5
Inleiding	9
1 Aanpak	12
1.1 Deskresearch	12
1.2 Interviews	12
1.3 Modelleren van brandgedrag	13
1.4 Expertbijeenkomst	13
1.5 Begeleidingscommissie	13
2 Resultaten	14
2.1 Verkenning zonneparken	14
2.2 PV-systemen (zonneparken)	18
2.3 Brandrisicobeheersing en brandbestrijding in zonneparken	25
2.4 Vegetatie in zonneparken	31
3 Branden in zonneparken: casuïstiek	37
3.1 Brand zonnepark Sas van Gent	37
3.2 Brand zonnepark Lungendonk	42
3.3 Brand(en) zonnepark Emmeloord	45
3.4 Beschouwing	47
4 Branden in zonneparken: modellering	49
4.1 Nieuwe brandstofmodellen	49
4.2 Resultaten modellering van brandverspreiding in zonneparken	50
4.3 Modellering brand zonnepark Sas van Gent (2022)	59
4.4 Discussie	61
5 Handelingsperspectief voor veiligheidsregio's	63
5.1 Risicobeheersing	63
5.2 Brandbestrijding	64
6 Conclusies	66
6.1 Deelvragen	66
6.2 Hoofdvraag	69
6.3 Aanbevelingen	70
Bijlage 1 Bronnen	71
Bijlage 2 Begeleidingscommissie	76
Bijlage 3 Interviews	77
Bijlage 4 Expertbijeenkomst	78

Bijlage 5 Onderbouwing brandstofmodellen	79
Bijlage 6 Invoerparameters brandstofmodellen	84
Bijlage 7 Resultaten modellering	86
Bijlage 8 Afkortingen	96

Samenvatting

Het aantal zonneparken op land in Nederland is de afgelopen jaren snel gegroeid. Er is daarbij een ontwikkeling gaande naar multifunctionele zonneparken, die ook van meerwaarde zijn voor de voedselproductie ('agri-PV') of voor de natuur.

Dit rapport beschrijft de resultaten van onderzoek naar de relatie tussen het brandgedrag van de zonnepanelen en het brandgedrag van de vegetatie in zonneparken. Het doel is om onderbouwing te bieden voor de advisering door de veiligheidsregio's over brandrisicobeheersing en brandbestrijding in zonneparken.

De hoofdvraag van dit onderzoek is: *Welke invloed kunnen het PV-systeem en de vegetatie hebben op het ontstaan en het verloop van brand in een zonnepark; en welke veiligheidsmaatregelen passen daarbij?* Het antwoord op deze vraag en de resultaten van het onderzoek worden hieronder aan de hand van een aantal deelvragen beschreven.

1. Op welke soorten locaties zijn zonneparken in Nederland gerealiseerd en welke ontwikkeling wordt hierin verwacht?

Medio 2023 was 60% van de zonneparken in Nederland op voormalige landbouwgrond gerealiseerd. Vanaf juli 2024 heeft de Rijksoverheid de voorkeursvolgorde voor het opwekken van zonne-energie aangescherpt en is realisatie van nieuwe zonneparken alleen mogelijk mits in combinatie met een andere benutting, zoals een (substantiële) agrarische functie. Ook zijn er diverse plannen voor zonneparken op onbenutte ruimte bij afslagen en knooppunten van snelwegen.

2. Welke karakteristieken hebben zonneparken in Nederland?

De afmetingen van zonneparken in Nederland variëren van minder dan een hectare tot (veel) meer dan 20 hectare; het aantal zonnepanelen varieert navenant. Zonnepanelen worden over het algemeen op een hoogte van 50 tot 100 centimeter vanaf de bodem geplaatst; de maximaal toegestane hoogte is gemiddeld 2 meter. De meest voorkomende opstelling van de rijen zonnepanelen is een zuid-zuid-opstelling, maar ook oost-west-opstellingen komen voor.

3. Welke typen zonnepanelen worden toegepast in zonneparken in Nederland en welke ontwikkeling wordt hierin verwacht?

In zonneparken worden vooral kristallijne zonnepanelen geplaatst met een grootte van circa 2,4 meter bij 1 à 1,3 meter. Tweezijdige, oftewel 'bifacial' (kristallijne) zonnepanelen zijn in opkomst: deze hebben een groter rendement dan gewone enkelzijdige zonnepanelen.

4. Wat zijn brandkenmerken van deze typen zonnepanelen?

Experimenteel onderzoek toont aan dat zonnepanelen bij hoge warmtestralingen kunnen gaan branden, zoals bij aanstraling door brand. In de praktijk is gebleken dat zonnepanelen ook door een 'hotspot' (bijvoorbeeld veroorzaakt door een installatiefout, defect of vervuiling) kunnen ontbranden. Bij een brand in een zonnepark is depositie van resten van

zonnepanelen niet te verwachten, omdat daarvoor de warmteontwikkeling en pluimstijging niet groot genoeg zijn.

5. Wat zijn (brand)risicovolle componenten van de zonnepaneleninstallatie en welke beheersmaatregelen zijn voor de betreffende risico's (mogelijk)?

De diverse onderdelen van het PV-systeem brengen een brandrisico met zich mee: de zonnepanelen, de bekabeling, de combinerbox, de omvormer en het transformatorhuis. De eigenaar van een zonnepark kan verschillende maatregelen treffen om deze risico's te beperken. Denk hierbij aan keuring, onderhoud en monitoring van het PV-systeem, een brandveilige ondergrond onder componenten met een brandrisico, voldoende afstand tussen de rijen zonnepanelen en beheer van de vegetatie. Brandweer Nederland doet hiervoor suggesties in de *Handreiking Risicobeheersing Advies Veilige PV-systemen* (2020b).

6. Welke vegetatietypen komen voor in zonneparken in Nederland?

Er zijn zonneparken waarvan de vegetatie uit kort gras bestaat, maar in steeds meer zonneparken wordt ernaar gestreefd om de biodiversiteit te verhogen. Dit gebeurt door inzaaien van bijvoorbeeld kruidenrijke mengsels. Agri-PV komt in Nederland nog weinig voor: dit betreft slechts enkele innovatieprojecten.

7. Hoe wordt de vegetatie onderhouden (brandstofbeheersing)?

De vegetatie in zonneparken wordt zowel door maaien als door begrazing (met schapen) onderhouden. Maaien gebeurt over het algemeen twee à drie maal per jaar, vooral om schaduwwerking tegen te gaan. De hoogte van de vegetatie wordt over het algemeen beperkt tot het laagste punt van de zonnepanelen. Vanuit het oogpunt van brandstofbeheersing is het van belang dat het maaisel direct wordt afgevoerd en niet blijft liggen en uitdroogt.

8. Wat zijn brandkenmerken van deze vegetatietypen? en

9. Welke temperatuur / hittestraaling en vlamlengte zijn te verwachten bij brand van deze vegetatietypen?

Om brand in de vegetatie van zonneparken te kunnen modelleren, heeft het NIPV vijf nieuwe, theoretische brandstofmodellen ontwikkeld. De bestaande brandstofmodellen uit de *Brandstofmodellengids* (Tanck & Brouwer, 2023) bleken niet van toepassing te zijn op de vegetatie van zonneparken. De nieuwe brandstofmodellen gaan uit van een gras- en kruidachtige vegetatie, waarbij onderscheid gemaakt wordt tussen twee verschillende vegetatiehoogtes (hoog of laag) en de situatie na maaien waarbij het (uitgedroogde) maaisel blijft liggen of is opgeruimd.

Voor de vijf nieuwe brandstofmodellen is brand gemodelleerd in BehavePlus, bij verschillende windsnelheid (0 – 10 m/s) en verschillende relatieve luchtvochtigheid (15% - 60%), waarbij gekeken is naar de branduitbreidingsnelheid, vlamlengte, intensiteit van het vuurfront, brandvermogensdichtheid en vlamverblijftijd. De resultaten van de modellering laten zien dat hoge vegetatie en de aanwezigheid van (uitgedroogd) maaisel voor hevigeren natuurbranden in het zonnepark kunnen zorgen dan wanneer de vegetatie kort wordt gehouden en het maaisel direct wordt opgeruimd.

Op basis van de brandkenmerken vallen de gemodelleerde branden in de categorie 'normal fires' volgens de 'wildfire events classification' (intensiteit van het vuurfront < 10.000 kW/m en vlamlengte < 10 m) (Tedim et al., 2018). De beheersbaarheid van een natuurbrand hangt

daarnaast echter ook af van factoren als de bereikbaarheid en de bluswatervoorziening. De omstandigheden kunnen zodanig zijn dat de bestrijding en beheersbaarheid van een brand in een zonnepark problematisch kunnen worden.

10. Wat is uit de praktijk bekend over branden in zonneparken?

Voor zover bekend, zijn er tot nu toe nog vrij weinig branden in zonneparken voorgekomen. De gevolgen van een brand in een zonnepark voor de omgeving kunnen echter groot zijn (denk aan rookontwikkeling of branduitbreiding naar aangrenzend gebied). Uit de casuïstiek blijkt dat branden in zonneparken in diverse onderdelen van het PV-systeem kunnen ontstaan: in de (ondergrondse) bekabeling, in de omvormers, in de transformator en in de zonnepanelen. Oorzaken kunnen bijvoorbeeld fouten bij de installatie zijn of beschadiging van een onderdeel van het PV-systeem. Er is één brand bekend waarbij een brand in het PV-systeem brand in de vegetatie van het zonnepark veroorzaakte (brand in een zonnepark in Sas van Gent in 2022, ontstaan door een hotspot in een zonnepaneel). Er is geen brand bekend die ontstaan is in de vegetatie van een zonnepark.

11. Welke invloed kan een brand in de vegetatie hebben op het PV-systeem van een zonnepark?

Op basis van de resultaten van modellering wordt geconcludeerd dat er omstandigheden denkbaar zijn dat een brand in de vegetatie van een zonnepark zoveel vermogen levert dat de zonnepanelen in brand kunnen raken. Hierbij moet gedacht worden aan een periode van extreme en/of langdurige droogte, een (zeer) lage relatieve luchtvochtigheid en hoge vegetatie die relatief weinig vocht bevat of gemaaide vegetatie waarbij uitgedroogd maaisel is blijven liggen.

Of ook andere onderdelen van het PV-systeem zoals de combinerbox, de bekabeling of de omvormer door een brand in de vegetatie kunnen worden aangetast, is op grond van de beschikbare data niet te zeggen.

12. Welke invloed kunnen de zonnepanelen hebben op de ontwikkeling van een brand in de vegetatie van een zonnepark?

Zonnepanelen beïnvloeden de groei van de vegetatie onder de zonnepanelen (via de invloed die panelen hebben op temperatuur, licht, luchtvochtigheid en bodemvochtigheid): er zijn verschillen in plantengroei onder en naast de zonnepanelen, zowel wat de hoogte als de soort planten betreft. De hoogte van de vegetatie zal invloed hebben op de brandvermogensdichtheid.

In de literatuur is geen informatie gevonden of en zo ja, welke invloed zonnepanelen kunnen hebben op de ontwikkeling van een brand in de vegetatie van zonneparken. Het is bekend dat de geometrie van een ruimte de ontwikkeling van een brand in een gebouw beïnvloedt (zie bijvoorbeeld Baaij et al., 2023), maar of en hoe dat een rol speelt onder de zonnepanelen in een zonnepark is op basis van dit onderzoek niet te zeggen. De aanwezigheid van objecten zoals zonnepanelen en de effecten die die objecten op het brandverloop kunnen hebben, kunnen niet gemodelleerd worden met BehavePlus.

13. Welke invloed kan een brand van het PV-systeem hebben op de vegetatie van een zonnepark?

Er zijn verschillende manieren waarop brand in het PV-systeem kan ontstaan en alle onderdelen van het PV-systeem brengen een brandrisico met zich mee. Dit betekent ook dat

een brand in het PV-systeem een brand in de vegetatie van het zonnepark kan veroorzaken (afhankelijk van de weersomstandigheden zoals de relatieve luchtvochtigheid, de hoogte van de vegetatie, de status van de vegetatie (vochtgehalte) en de aan- of afwezigheid van uitgedroogd maaisel in het zonnepark). In de praktijk is gebleken dat een brand in het PV-systeem een brand in de vegetatie van een zonnepark kan veroorzaken.

14. Welke specifieke veiligheidsmaatregelen dragen bij aan de brandveiligheid van zonneparken met vegetatie?

Brandveilig inrichten van een zonnepark is niet de verantwoordelijkheid van de brandweer, maar de verantwoordelijkheid van de eigenaar van het zonnepark. Dit betreft het beperken van eventuele (financiële) schade aan het zonnepark. Partijen als verzekeraars en financiers kunnen eisen stellen aan de eigenaar van het zonnepark met betrekking tot een brandveilige inrichting.

Voor de veiligheidsregio's is het van belang dat een brand in een zonnepark zich niet uitbreidt buiten het zonnepark en de omgeving bedreigt. Het is van belang dat de brandweer, als een brand in een zonnepark bestreden moet worden, daar dan de mogelijkheden voor heeft. De brandweer kan adviezen geven aan het bevoegd gezag over maatregelen in het zonnepark die het mogelijk maken een brand te bestrijden en/of branduitbreiding te voorkomen. In de *Handreiking Risicobeheersing Advies Veilige PV-systemen* (Brandweer Nederland, 2020b) worden maatregelen beschreven die de eigenaar van een zonnepark kan treffen om brand te voorkomen, branduitbreiding te beperken en brandbestrijding mogelijk te maken. Denk hierbij aan de toegankelijkheid van het zonnepark, de aanwezigheid van bereikbare paden en opstelplaatsen, een beperkte afstand tot elk onderdeel van het PV-systeem, voldoende bluswatervoorziening en 24/7 beschikbaarheid van een bedrijfsdeskundige van het zonnepark.

Een goede werkwijze bij de advisering over zonneparken is, in een vroeg stadium van de realisatie met de belanghebbende partijen en het bevoegd gezag in gesprek te gaan. Dan kunnen in gezamenlijkheid de brandrisico's en mogelijke effecten in beeld gebracht worden en taken, bevoegdheden en verantwoordelijkheden van de betrokken partijen duidelijk gemaakt worden. Deze benadering is vergelijkbaar met de ['gebiedsgerichte aanpak natuurbrandbeheersing'](#).

Aanbevelingen

Het verdient aanbeveling om

- > de nieuwe (theoretische) brandstofmodellen voor de vegetatie van zonneparken te valideren met behulp van veldonderzoek en branden in de praktijk
- > in de praktijk onderzoek te verrichten naar het verschil in branduitbreiding in de vegetatie onder de zonnepanelen en de vegetatie naast de panelen, in het open veld
- > branden en de brandbestrijding in zonneparken structureel te monitoren om meer kennis over brandverloop en brandbestrijding in zonneparken te vergaren en landelijk te kunnen delen.

Inleiding

Het aantal zonneparken¹ in Nederland groeit snel. De meeste daarvan bevinden zich op land, enkele op water.² Terwijl in 2016 nog vrijwel alle zonnepanelen op gebouwen werden geïnstalleerd, werd in 2021 al 20% van de zonnepanelen in zonneparken op land geplaatst (TNO, 2021c). Eind 2022 waren er 562 zonneparken in Nederland, met een totale oppervlakte van 3.640 hectare; daarvan lag 60% op voormalige landbouwgrond.³ Naar verwachting is er tot 2050 ten minste 30.000 hectare aan zonneparken op land nodig om aan de klimaatdoelstellingen en energiebehoefte in Nederland te kunnen voldoen (Schotman et al., 2021). Zonneparken worden op diverse locaties gerealiseerd. Niet alleen (voormalige) landbouwgronden, maar ook rijksgronden zijn in beeld voor het grootschalig opwekken van zonne-energie, bijvoorbeeld dijken en bermen langs snelwegen en spoorlijnen.⁴ Ook is een ontwikkeling gaande naar multifunctionele zonneparken, die naast energieproductie ook meerwaarde bieden voor de natuur (biodiversiteit) of de voedselproductie ('agri-PV').⁵

De snelle ontwikkeling van zonneparken heeft tot diverse vragen geleid over de effecten van zonneparken op de landbouw, het landschap, de bodem en de biodiversiteit, onder andere in de Tweede Kamer (TK 2018a, b). Daarnaast leveren zonneparken ook vraagstukken op over de brandveiligheid, het brandverloop, de brandbestrijding in zonneparken op land en de omgevingsveiligheid. Dit geldt niet alleen voor de veiligheidsregio's, maar ook voor partijen als natuurbeheerders, Rijkswaterstaat en ProRail, vanwege de gevolgen die zonneparkbranden grenzend aan wegen en spoorlijnen op het (trein)verkeer kunnen hebben. Zo moest bij een brand in een transformatorhuis van een zonnepark in Emmeloord (2019) vanwege de rookontwikkeling tijdelijk een weg worden afgesloten voor verkeer, en moest bij een brand in het gras onder de zonnepanelen van een zonnepark in Sas van Gent (2022) het aangrenzende treinverkeer enkele uren stilgelegd worden.⁶

Gezien de verandering van het klimaat (hogere temperaturen, langere periodes van droogte, uitdroging van de bodem en vegetatie) is het te verwachten dat de kans op natuurbranden verder zal toenemen (Verhoeven et al., 2023). Dit soort branden – die ook zonneparken kunnen treffen – kan de omgevingsveiligheid onder druk zetten: denk aan bedreiging van de volksgezondheid en het milieu, evacuaties, stilleggen van bedrijfs- en transportactiviteiten en dergelijke.

¹ Zonnepark: veld met zonnepanelen voor opwekken van energie. In dit rapport wordt daarbij de definitie van Kadaster (2023) aangehouden: we spreken van een zonnepark als het een oppervlakte van 1.000 m² of meer beslaat.

² Bijvoorbeeld: <https://www.rvo.nl/onderwerpen/glb/veen-landbouwgrond#zonneparken>; ASISEARCH & Bosch & van Rijn, 2021, *Participatiemonitor 2021: monitor participatie hernieuwbare energie op land*.

³ Gegevens van Kadaster, vermeld in radioprogramma Pointer 18 juni 2023.

⁴ <https://www.energieoprijksgrond.nl/projecten>.

⁵ Bijvoorbeeld: <https://www.wur.nl/en/news-wur/show-1/researchers-see-a-future-for-agricultural-solar-parks-but-also-challenges.htm>.

<https://solarmagazine.nl/nieuws-zonne-energie/i34650/einde-oefening-grote-zonneparken-in-nederland-bouwen-aan-een-nieuwe-generatie>.

⁶ Bijvoorbeeld: <https://www.ad.nl/binnenland/brand-in-schakelstation-zonnepanelen-bij-emmeoord~a386c526/?referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.nl%2F>.

<https://www.omroepzeeland.nl/nieuws/14823098/grote-brand-in-zonnepark-sas-van-gent>.

In een bijeenkomst van experts van de veiligheidsregio's die het NIPV op 15 november 2022 organiseerde, bleek dat de brandweer diverse vragen heeft met betrekking tot de advisering over brandrisicobeheersing en brandbestrijding in zonneparken. Denk aan vragen over de toegankelijkheid, bereikbaarheid, compartimentering, bluswatervoorziening, beplanting en veiligheidsvoorzieningen. Om goed te kunnen adviseren over brandrisicobeheersing en brandbestrijding in zonneparken is het nodig om inzicht te hebben in het (mogelijke) ontstaan en verloop van branden in een zonnepark. Er is echter nog onvoldoende bekend over het brandgedrag van zonnepanelen in een zonnepark, het brandgedrag van de vegetatie in een zonnepark en de relatie tussen beide.

Doel

Dit onderzoek heeft als doel inzicht te verkrijgen in het brandgedrag van zonnepanelen in een zonnepark, het brandgedrag van de vegetatie in een zonnepark en de relatie daartussen. Een doel van het onderzoek is ook het bieden van een onderbouwing kunnen dienen voor advisering door de veiligheidsregio's over brandrisicobeheersing en brandbestrijding in zonneparken op land, in Nederland.

Onderzoeksvragen

De hoofdvraag van het onderzoek luidt:

Welke invloed kunnen het PV-systeem en de vegetatie hebben op het ontstaan en het verloop van brand in een zonnepark; en welke veiligheidsmaatregelen passen daarbij?

Om deze hoofdvraag te kunnen beantwoorden is kennis over de volgende aspecten noodzakelijk:

- > zonneparken
- > zonnepanelen
- > vegetatie
- > brandverloop en -bestrijding.

Deelvragen van het onderzoek zijn:

1. Op welke soorten locaties (bijvoorbeeld landbouwgrond, natuurgebied, bermen) zijn zonneparken in Nederland gerealiseerd en welke ontwikkeling wordt hierin verwacht?
2. Welke karakteristieken hebben zonneparken in Nederland (bijvoorbeeld type zonnepark, aantal, hoogte en oriëntatie van zonnepanelen, compartimentering en overige inrichtingsaspecten)?
3. Welke typen zonnepanelen worden toegepast in zonneparken in Nederland en welke ontwikkeling wordt hierin verwacht?
4. Wat zijn brandkenmerken van deze typen zonnepanelen (waaronder depositie van resten)?
5. Wat zijn (brand)risicovolle componenten van de zonnepaneleninstallatie en welke beheersmaatregelen zijn voor de betreffende risico's (mogelijk)?
6. Welke vegetatietypen komen voor in zonneparken in Nederland (waaronder agri-PV)?
7. Hoe wordt de vegetatie onderhouden (brandstofbeheersing)?
8. Wat zijn brandkenmerken van deze vegetatietypen?
9. Welke temperatuur / hittestraaling en vlamlengte zijn te verwachten bij brand van deze vegetatietypen?
10. Wat is uit de praktijk bekend over branden in zonneparken (brandoorzaak, brandverloop, rookontwikkeling en dergelijke)?
11. Welke invloed kan een brand in de vegetatie hebben op het PV-systeem van een zonnepark?

12. Welke invloed kunnen de zonnepanelen hebben op de ontwikkeling van een brand in de vegetatie van een zonnepark?
13. Welke invloed kan een brand van het PV-systeem hebben op de vegetatie van een zonnepark?
14. Welke specifieke veiligheidsmaatregelen dragen bij aan de brandveiligheid van zonneparken met vegetatie?

Afbakening en uitgangspunten

- > Dit onderzoek heeft betrekking op zonneparken op land, in Nederland.
- > Deelvragen 1 en 2 zijn erop gericht een goed beeld te krijgen van locaties en karakteristieken van zonneparken in Nederland. Er wordt geen complete inventarisatie verricht.
- > Branden waarbij zonnepanelen betrokken zijn die op een rieten dak of 'groen dak' zijn geplaatst, vallen buiten de reikwijdte van dit onderzoek.
- > In dit onderzoek worden alleen typen zonnepanelen meegenomen die in zonneparken in Nederland veel worden toegepast.

Leeswijzer

In hoofdstuk 1 wordt toegelicht hoe het onderzoek is uitgevoerd. In hoofdstuk 2 worden de resultaten van het onderzoek beschreven die betrekking hebben op algemene aspecten van zonneparken, PV-aspecten⁷ van zonneparken en vegetatie in zonneparken. In hoofdstuk 3 worden enkele praktijkvoorbeelden van branden in zonneparken behandeld. In hoofdstuk 4 wordt de mogelijke verspreiding van brand in de vegetatie van zonneparken gemodelleerd. Hoofdstuk 5 gaat in op handelingsperspectieven voor de brandrisicobeheersing en de brandbestrijding. Tot slot worden in hoofdstuk 6 de onderzoeksvragen beantwoord.

⁷ In de praktijk worden verschillende termen gebruikt om het geheel van zonnepanelen, omvormer, connectoren en kabels aan te duiden, zoals: PV-installatie, PV-systeem, zonnepaneleninstallatie, zonnestroomsysteem. In dit rapport wordt de term 'PV-systeem' gebruikt. De afkorting 'PV' staat voor het Engelse 'photo voltaic'.

1 Aanpak

In dit hoofdstuk wordt toegelicht hoe dit onderzoek is uitgevoerd.

1.1 Deskresearch

Er is gestart met het zoeken van informatie in diverse openbare bronnen (waaronder wetenschappelijke literatuur, rapporten van kennisinstututen, websites van kennisinstututen en beheerders van zonneparken, enzovoort) over:

- > zonneparken (onder andere: locaties, algemene kenmerken)
- > PV-systemen (zonneparken) (onder andere: typen zonnepanelen, risicovolle componenten)
- > vegetatie in zonneparken (onder andere: soorten vegetatie, onderhoud).

Een lijst van bronnen is opgenomen in bijlage 1. De gevonden informatie is verwerkt in hoofdstuk 2.

Casuïstiek

Daarnaast is informatie gezocht en waar nodig aanvullend opgevraagd bij de betreffende veiligheidsregio's over enkele branden die in zonneparken hebben plaatsgevonden.

De gevonden informatie is verwerkt in hoofdstuk 3.

1.2 Interviews

Om de informatie uit het hierboven beschreven deskresearch aan te vullen en te verdiepen, zijn interviews gehouden met vertegenwoordigers van de volgende organisaties:

- > Holland Solar (brancheorganisatie van de zonne-energiesector)
- > Novar (ontwikkelaar van zonneparken)
- > TPSolar (ontwikkelaar van zonneparken)
- > Rijkswaterstaat (RWS; zonneparken op gronden van Rijkswaterstaat)
- > Nationaal Consortium Zon in Landschap / TNO
- > Wageningen Universiteit en Research (WUR), onderzoeksinstituut Wageningen Environmental Research (WENR; expertise biodiversiteit in zonneparken)

Zie bijlage 3 voor de respondentenlijst.

Ter voorbereiding op de interviews ontvingen de respondenten een samenvatting van het projectplan, waarin alle onderzoeksvragen waren opgenomen. De interviews werden open gevoerd en het zwaartepunt van de gesprekken verschilde uiteraard per organisatie. De opgehaalde informatie is verwerkt in hoofdstuk 2.

1.3 Modelleren van brandgedrag

In de loop van het onderzoek bleek dat het noodzakelijk was om nieuwe brandstofmodellen op te stellen voor de vegetatie in zonneparken. Dit wordt toegelicht in hoofdstuk 4. In bijlage 5 worden de keuzes voor de invoerparameters van de brandstofmodellen onderbouwd en in bijlage 6 is een overzicht opgenomen van de invoerparameters.

Deze nieuwe brandstofmodellen zijn vervolgens gebruikt om de mogelijke brandverspreiding in de vegetatie van zonneparken te modelleren, met behulp van het programma BehavePlus. De resultaten worden beschreven in hoofdstuk 4.

1.4 Expertbijeenkomst

Na analyse van de uitkomsten van het onderzoek is een bijeenkomst georganiseerd met experts uit de veiligheidsregio's op het gebied van natuurbrandbeheersing en/of PV-systemen. In deze bijeenkomst is gekeken naar de betekenis van de resultaten van het onderzoek voor de advisering over brandrisicobeheersing en brandbestrijding in een zonnepark en over mogelijke specifieke veiligheidsmaatregelen. De uitkomsten zijn verwerkt in hoofdstuk 5. Zie bijlage 4 voor de deelnemers aan de expertbijeenkomst.

1.5 Begeleidingscommissie

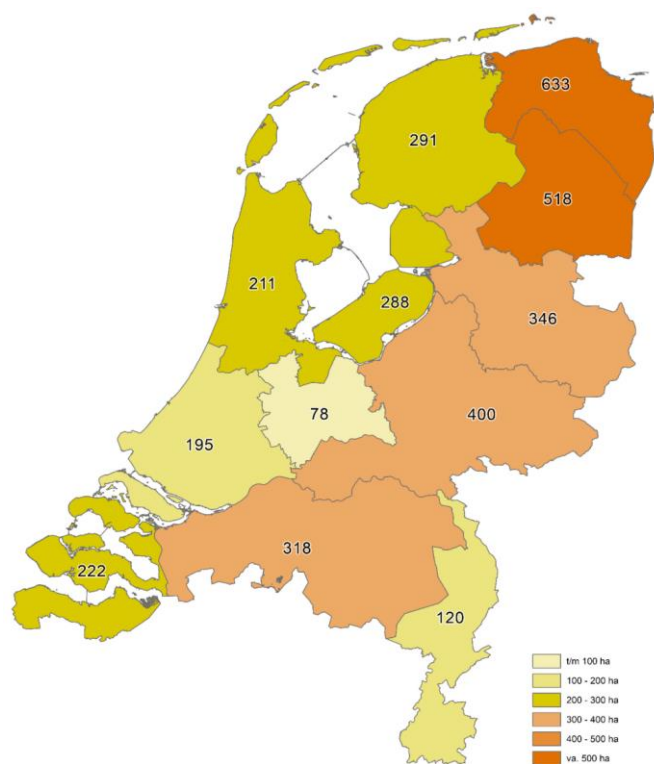
Voor het onderzoek is een begeleidingscommissie ingesteld, die gedurende het onderzoek drie maal bijeen is geweest, suggesties heeft gedaan en kritisch heeft gereflecteerd op de inhoud en tussentijdse resultaten. Zie bijlage 2 voor de leden van de begeleidingscommissie.

2 Resultaten

In dit hoofdstuk worden allereerst algemene aspecten van zonneparken in Nederland verkend (deelvragen 1 en 2; paragraaf 2.1). Vervolgens worden PV-aspecten van zonneparken beschreven (deelvragen 3 t/m 5; paragraaf 2.2). Paragraaf 2.3 gaat in op brandveiligheid en brandbestrijding in zonneparken. De laatste paragraaf van dit hoofdstuk (2.4) behandelt de vegetatie in zonneparken en factoren die hierop van invloed zijn (deelvragen 6 en 7).

De informatie in dit hoofdstuk is afgeleid uit deskresearch en uit interviews met deskundigen van diverse organisaties (dit is in de tekst aangegeven als 'interview'; zie bijlage 3 voor de respondenten).

2.1 Verkenning zonneparken

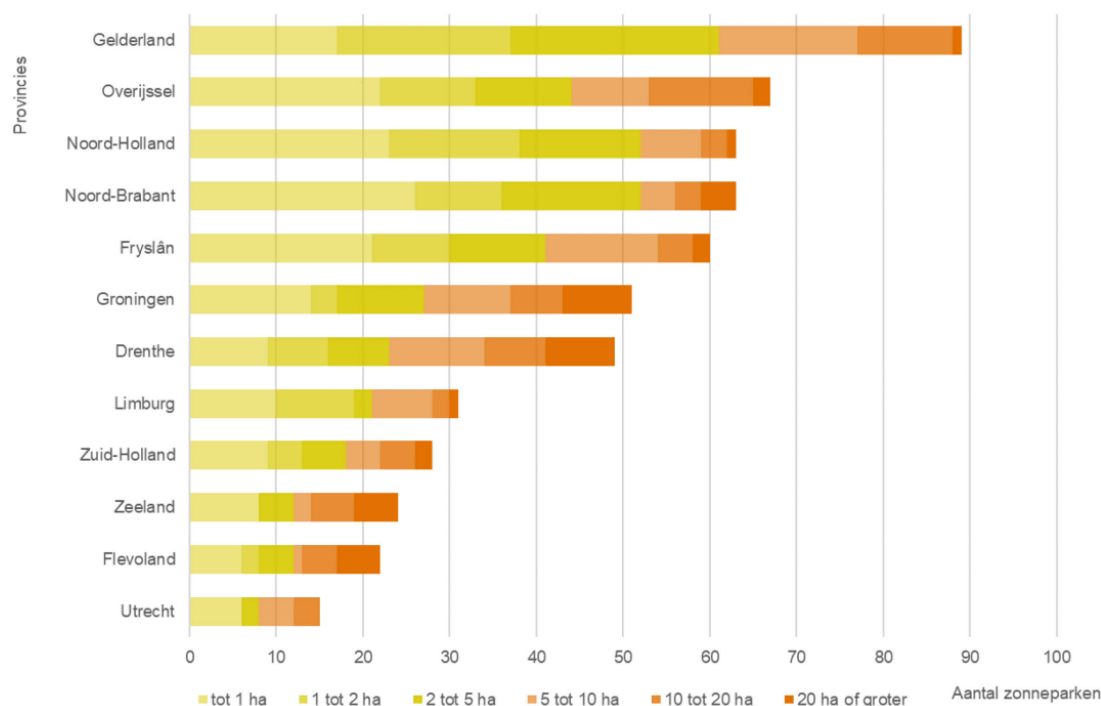


Figuur 2.1 Oppervlakte van zonneparken (hectare) per provincie in Nederland (Kadaster, 2023)

Voor dit onderzoek is het van belang om in kaart te brengen hoeveel zonneparken er in Nederland zijn. Verder wordt er gekeken waar deze gerealiseerd zijn en wat voor soort locatie dit betreft. Deze analyse is gebaseerd op de laatste informatie van Kadaster. Voor de definitie van een zonnepark wordt dan ook de definitie van Kadaster aangehouden: we

spreken van een zonnepark als het een oppervlakte van 1.000 m² of meer beslaat (Kadaster, 2023).

In Nederland waren eind 2022 562 zonneparken gerealiseerd, die een totale oppervlakte van 3.621 hectare beslaan. In figuur 2.1 is te zien hoe deze zonneparken verdeeld zijn over Nederland (situatie op 3 augustus 2023). Figuur 2.2 geeft een overzicht van het aantal zonneparken per provincie (situatie op 3 augustus 2023).

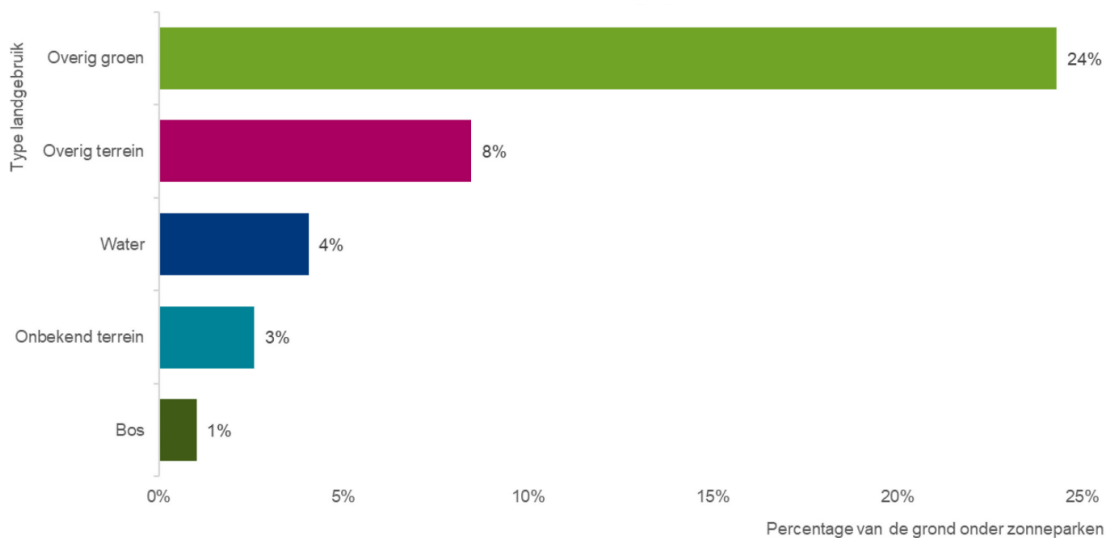


Figuur 2.2 Aantal zonneparken per provincie in Nederland (Kadaster, 2023)

2.1.1 Analyse typen locatie

Zonneparken kunnen op verschillende soorten locaties gebouwd worden. Hierbij kan onder andere gedacht worden aan (voormalige) landbouwgrond, grasvelden en zandvlaktes.

Anno 2023 was 60% van de zonneparken gerealiseerd op voormalige landbouwgrond. In totaal wordt 0,12% van de beschikbare landbouwgrond in Nederland gebruikt voor zonneparken. In figuur 2.3 is te zien op wat voor soort locaties de overige 40% van de zonneparken is gerealiseerd (Kadaster, 2023). Bijna 25% van de zonneparken blijkt aangelegd op locaties die onder 'overig groen' vallen: dit zijn bijvoorbeeld zonneparken op 'overige grasvelden', groenstroken langs snelwegen, fruitkwekerijen of zandvlaktes.



Figuur 2.3 Locaties van zonneparken die niet op landbouwgrond zijn gerealiseerd (Kadaster, 2023)

Bepaalde locaties worden duidelijk vaker ingezet voor zonneparken (Kadaster, 2023). 247 van de 562 (44%) zonneparken zijn langs wegen en/of het spoor gerealiseerd. 40% van alle zonneparken ligt dichtbij of binnen de bebouwde kom, waarvan er 107 (19%) volledig binnen de bebouwde kom liggen. Deze beslaan echter slechts 4% van de totale oppervlakte van alle zonneparken. Zonneparken binnen de bebouwde kom zijn dus een stuk kleiner dan gemiddeld (1,2 hectare versus 6,4 hectare voor het gemiddelde van alle zonneparken). Het grootste zonnepark binnen de bebouwde kom is 8,4 hectare.

Zonneparken bij snelwegen

Er is een aantal pilots gestart voor zonneparken bij snelwegen. Een hiervan is 'Zon langs de A7', een project waar in totaal 5,5 hectare aan zonnepanelen wordt geplaatst, verdeeld over vier knooppunten langs de A7 tussen Hoorn en den Oever (Rijkswaterstaat, z.d.-b). De zonneparken komen te liggen op polderlandschap en het is de verwachting dat ze in 2025 gerealiseerd worden (Ecorus, z.d.). Andere plannen voor zonneparken langs de snelweg zijn bijvoorbeeld de Energieroute Noord-Holland en zonneparken langs de A12 (Rijkswaterstaat, 2024), maar deze plannen zijn minder vergevorderd. Voor een verder overzicht: zie 'Energie op Rijksgrond' (Rijkswaterstaat, z.d.-a).

Er worden niet langs alle bermen van alle rijkswegen zonnepanelen geplaatst. Wegbermen (in het midden en aan de zijkant van de weg) zijn meestal tamelijk smal, waardoor ze niet geschikt zijn. Over het algemeen moet een berm ongeveer 10 tot 15 m breed zijn, zodat het economisch rendabel is om een zonnepark te plaatsen. Als er echter veel bomen langs een snelweg staan, zijn de bermen ongeschikt voor het plaatsen van zonnepanelen.

De gronden bij afslagen en knooppunten van snelwegen worden gezien als gebieden die geschikt zijn voor het plaatsen van zonnepanelen. Er is daar vaak veel onbenutte ruimte: op sommige locaties is 1 tot 4 hectare beschikbaar en op andere zelfs 20 hectare. In Nederland zijn er 500 afslagen en 100 snelwegknooppunten, wat betekent dat er 600 potentiële zonneparklocaties zijn met een totale oppervlakte van ongeveer 2.000 hectare (en een potentiële opbrengst van 2 GW) (interview RWS).

Zonneparken op water

Zoals in figuur 2.3 te zien is, worden zonnepanelen ook op water gerealiseerd. Dit kan op meerdere soorten water gebeuren. Bij Sellingen heeft GroenLeven in een voormalige zandwinningsplas het (momenteel) grootste drijvende zonnepark van Europa gerealiseerd.⁸ Er wordt echter ook gekeken naar de mogelijkheden voor zonneparken op grote binnenwateren en de Noordzee (Novar, z.d.; Rijksdienst voor Ondernemend Nederland, 2021; TNO, z.d.-a). Zonneparken op water vallen buiten de reikwijdte van dit onderzoek en worden daarom in dit rapport verder niet meegenomen.

2.1.2 Ontwikkelingen

Voorkeursvolgorde

Vanaf juli 2024 is de voorkeursvolgorde voor het opwekken van zonne-energie aangescherpt (Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties, 2023; Rijksoverheid, 2023; Solar Magazine, 2023). De volgorde die sindsdien geldt, is:

- > Trede 1: Zonnepanelen op daken en gevels
- > Trede 2: Onbenutte terreinen in bebouwd gebied
- > Trede 3: Onbenutte terreinen in landelijk gebied
- > Trede 4: Landbouw- en natuurgronden.

Dit betekent dat er in principe geen toestemming is om nieuwe zonneparken te realiseren op landbouw- en natuurgronden, afgezien van enkele uitzonderingen (Rijksoverheid, 2023). Voorbeelden hiervan zijn agri-PV, dat wil zeggen een combinatie van “een substantiële agrarische functie met een zonnepark”, of voormalige landbouwgrond die op basis van bestuurlijk bindende afspraken in transitie is (Solar Magazine, 2023). Projecten die al vergevorderd zijn in zogenaamde participatietrajecten (projecten waarbij bewoners en ondernemers betrokken worden (Gemeente Den Haag, z.d.)), kunnen wel doorgang vinden.

Looptijd van zonneparkprojecten

Een zonnepark heeft doorgaans een levensduur van 25-30 jaar, waarna het van overheidswege moet worden afgebouwd en de grond weer als landbouwgrond wordt gebruikt. De gedachte hierachter is dat er over 25 jaar wellicht efficiëntere vormen van energieopwekking beschikbaar zullen zijn, waardoor zonneparken overbodig worden. Of dit daadwerkelijk zal gebeuren, is nog onzeker. Sommige partijen pleiten ervoor om de parken langer te laten staan, zodat (een deel van) de installatie behouden kan blijven (interview TPSolar).

Energieopslagsystemen

EOS'en (energieopslagsystemen; ook wel BESS, battery energy storage system, genoemd) worden steeds vaker toegepast in zonneparken, zodat het vermogen flexibeler kan worden gebruikt. Vaak gebeurt dit in de vorm van batterijopslag (bijna altijd Li-ion batterijen), maar er wordt ook geëxperimenteerd met andere vormen van energieopslag, zoals opslag in de vorm van waterstof. Nu zonneparken alleen nog SDE++ subsidie⁹ ontvangen als de aansluiting maximaal 50% van hun piekvermogen bedraagt, ligt plaatsing van een EOS bij een zonnepark voor de hand. Met een EOS kan het energieoverschot van een zonnepark

⁸ [Drijvend zonnepark Sellingen | Op zandwinplas | GroenLeven](#)

⁹ SDE++: Stimulering Duurzame Energieproductie en Klimaattransitie, subsidie voor bedrijven en non-profitorganisaties die grootschalig hernieuwbare energie opwekken of de CO₂-uitstoot verminderen (<https://www.rvo.nl/subsidies-financiering/sde>)

worden opgeslagen in de batterij en op een later moment gebruikt worden. Het piekvermogen wordt het grootste deel van het jaar niet bereikt (interviews Holland Solar, Novar, RWS, TPSolar, Zon in Landschap; zie ook RVO, 2023).

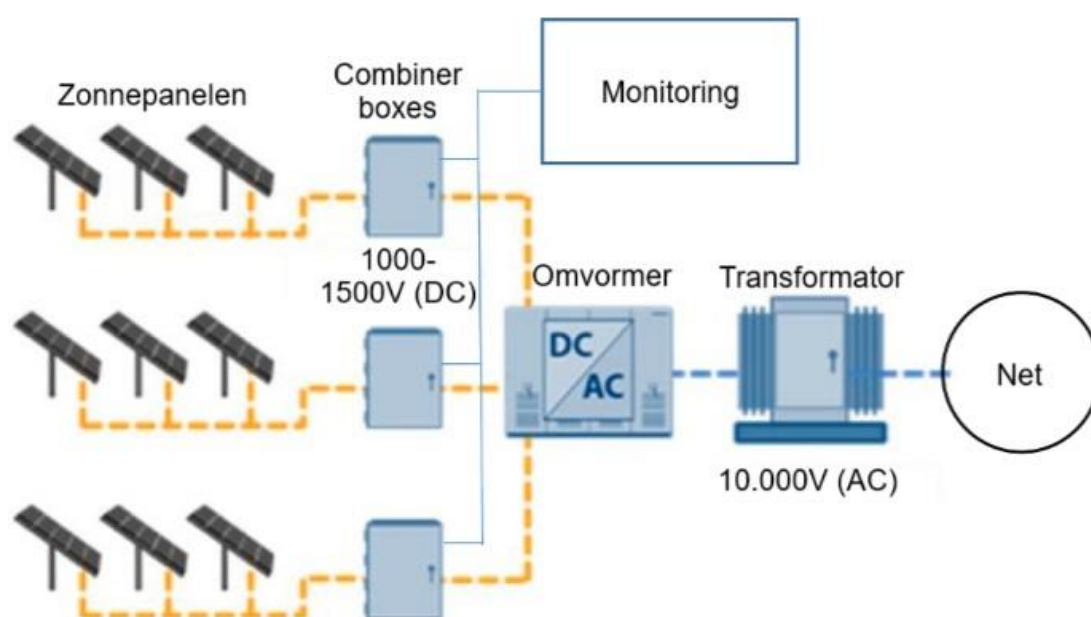
Zonnepanelen

Er zijn een aantal nieuwe typen zonnepanelen die voor zonneparken in de toekomst relevant kunnen zijn. Meer daarover is te vinden in paragraaf 2.2.2. De ontwikkeling van zonnepanelen met een hoger vermogen verloopt minder snel dan vroeger, waardoor het niet aantrekkelijk is om in een zonnepark de panelen te vervangen door nieuwe modellen. De energiewinst is dan beperkt (interview Holland Solar). Bovendien vergt dit ook overige aanpassingen van het PV-systeem om het op het hogere vermogen te dimensioneren (interview TPSolar).

2.2 PV-systemen (zonneparken)

2.2.1 De opbouw van PV-systemen

In de *Handreiking Risicobeheersing: Advies Veilige PV-systemen* (Brandweer Nederland, 2020b) wordt uitgelegd uit welke onderdelen een PV-systeem bestaat. Daarnaast worden hier algemene voorwaarden genoemd waaraan de onderdelen van een PV-systeem in Nederland moeten voldoen en hoe deze systemen worden toegepast. Figuur 2.4 is een schematische weergave van de componenten waaruit een zonnepark is opgebouwd.



Figuur 2.4 Schematische weergave van een PV-systeem (zonnepark), gebaseerd op Meribout et al., 2023

Zonnepanelen

Het *zonnepaneel* is het onderdeel waar daadwerkelijk stroom wordt opgewekt, ook wel PV-module genoemd (Solar Energy Technologies Office, z.d.). Deze modules zijn opgebouwd uit verschillende *zonnecellen*, die 1 à 2 watt kunnen opwekken en in serie met elkaar

verbonden worden. De voor zonneparken gebruikte zonnepaneeltypen zijn circa 2,4 meter lang en tussen 1,1 en 1,3 meter breed (interview TPSolar). De zonnepanelen worden in serie aan elkaar geschakeld tot een *string*. In zonneparken zijn de zonnepanelen in rijen op (meer of minder) verhoogde frames geplaatst; dit worden ook wel 'tafels' genoemd (VRU, 2023). De kabels van meerdere strings zonnepanelen in een zonnepark kunnen worden samengevoegd door middel van een *combinerbox*. Daarin kan ook (draadloze) monitoring voor het systeem tot op paneelniveau geplaatst worden (BENY, 2022).

Omvormers en combinerboxen

Zonnepanelen geven gelijkstroom, terwijl het stroomnet wisselstroom gebruikt. Om deze reden wordt een *omvormer* gebruikt om de gelijkstroom (DC) om te zetten in wisselstroom (AC) met een spanning van 400 V of 800 V (Installatiejournaal, 2019).

Er zijn twee typen omvormerinstallaties in zonneparken: centraal en decentraal. Bij decentrale omvormers heeft een aantal zonnepanelen zijn eigen (kleine) omvormer (stringomvormer). Bij centrale omvormers worden de kabels van panelen eerst in een combinerbox samengevoegd en gaat van elke combinerbox een ondergrondse kabel naar een grote omvormer. Grote omvormers hebben een langere levensduur en kunnen 25 jaar meegaan, terwijl kleine omvormers waarschijnlijk na 12-15 jaar vervangen moeten worden. De keuze tussen centrale of decentrale omvormers hangt af van lokale omstandigheden, het ontwerp van het zonnepark en van economische factoren (interview TPSolar).

Omvormers worden steeds groter en krachtiger. Waar het vermogen van stringomvormers vroeger tussen de 100-200 kW lag, bestaan er nu stringomvormers met een vermogen tot 350 kW. Voor grote centrale omvormers was dat aanvankelijk 2,5 MW terwijl er nu centrale omvormers tot 6,6 MW bestaan (interview TPSolar).

Transformatoren

Bij een zonnepark is het PV-systeem zo groot, dat het een eigen aansluiting op het hoogspanningsnet heeft: de stroom van het zonnepark wordt via kabels naar een of meerdere *transformatoren* geleid, waar het zonnepark wordt aangesloten op het hoogspanningsnetwerk. In deze transformatoren wordt de spanning van 400 V of 800 V omgezet naar 10.000 V, 13.000 V of 20.000 V (Voltens, 2022), de spanning van het hoogspanningsnetwerk. In Nederland is dit meestal 10.000 V. Deze transformator(en) bevindt zich ook in het zonnepark.

2.2.2 Typen zonnepanelen

Grofweg zijn drie verschillende typen zonnepanelen te onderscheiden: zonnepanelen gebaseerd op kristallijne silicium plakken, dunne-film-zonnecellen of een stapeling van afzonderlijke cellen, bijvoorbeeld een tandemconstructie (TNO, z.d.-c).

Mono- en polykristallijne silicium zonnepanelen

Mono- en polykristallijne zonnepanelen hebben in het algemeen dezelfde samenstelling en werkwijze. Monokristallijne zonnecellen bestaan alleen uit een kristal silicium en polykristallijne cellen uit meerdere kristallen. Deze typen zonnepanelen bestaan het langst en worden ook veruit het meest toegepast. Zij hebben een gezamenlijk marktaandeel van meer dan 95% (RIVM, 2022; TNO, z.d.-c). Siliciumpanelen hebben na 25-30 jaar nog 87 - 89% van hun oorspronkelijke efficiëntie; hierna gaat de veroudering sneller (interview Holland Solar).

Bifacial zonnepanelen

Er zijn varianten van bovenstaande typen in opkomst die onder andere als doel hebben om het rendement van de zonnepanelen te verhogen. Een manier waarop dit gedaan wordt is door middel van tweezijdige ('bifacial') zonnepanelen, die zowel aan de voorkant als aan de achterkant licht kunnen opvangen (TNO, z.d.-e). Hierdoor wordt meer opbrengst gegenereerd. Ongeveer 30% van de zonnepanelen die worden geproduceerd, zijn nu bifacial (interview Zon in Landschap). Novar en TPSolar passen bifacial zonnepanelen toe in hun zonneparken (interviews Novar, TPSolar).

Bifacial zonnepanelen kunnen aan twee zijden met glaspanelen afgedekt zijn (glas-glaspanelen), wat potentieel voordelig is voor de brandveiligheid van het zonnepaneel (meer informatie in paragraaf 2.2.3).

Tot enkele jaren geleden waren bifacial panelen deels transparant. Door de zonnecellen zelf komt geen licht (behalve een klein deel infraroodstraling), maar door de spleten tussen de zonnecellen wel. Dat kan de groei van planten in zonneparken bevorderen (meer informatie in paragrafen 2.2.4 en 2.4). Ook om die reden past Novar in zijn zonneparken bifacial panelen toe (interview Novar). Tegenwoordig voorzien veel producenten hun bifacial zonnepanelen echter van een witte folie rondom de zonnecellen die het zonlicht naar de zonnecellen reflecteert, om het vermogen van de panelen nog meer te verhogen. Dit betekent dat de zonnepanelen niet meer transparant zijn en dat er geen licht op de grond kan vallen waardoor de groei van planten beperkt wordt. Daarom biedt dit soort zonnepanelen geen voordeel ten opzichte van enkelzijdige zonnepanelen, voor toepassing in zonneparken die ook als doel hebben om de natuur te versterken (interview Zon in Landschap). Zonnepaneelfabrikanten richten zich echter op de opbrengst van zonnepanelen en produceren daarom nauwelijks nog bifacial panelen zonder de witte folie (interview TPSolar).

Dunne-film-zonnepanelen

Er bestaan verschillende typen dunne-film-zonnecellen: ze kunnen van silicium worden gemaakt of van andere halfgeleidermaterialen zoals cadmiumhoudende cellen (CdTe), koper indium-selenium (CIS) en koper-indium-gallium-selenium (CIGS). Deze materialen bevatten diverse schadelijke stoffen die bij een brand vrij zouden kunnen komen (zie bijvoorbeeld IFV 2021b, RIVM 2022).

Voor 2017 werden in zonneparken nog wel dunne-filmpanelen gebruikt, maar nu worden deze eigenlijk niet meer toegepast. Bij parken die voor 2017 zijn opgeleverd, moet er dus rekening gehouden worden met schadelijke stoffen die bij brand vrij kunnen komen. De reden dat dunne-film-zonnepanelen minder gebruikt worden is dat ze sneller degraderen (15-20 jaar) en dat monokristallijne panelen veel goedkoper zijn geworden (interview Holland Solar).

Zonnepanelen met tandemconstructies

Dit type zonnepanelen is in opkomst, omdat hiermee het rendement van zonnepanelen verhoogd kan worden door zonnecellen te stapelen (TNO, z.d.-d); zij worden echter nog niet op grote schaal toegepast. In een tandemconstructie wordt een silicium-zonnecel met een dunne-film-zonnecel of sporadisch (innovatie) perovskiet-zonnecel gecombineerd, om zodoende een breder lichtspectrum voor energieopwekking te kunnen gebruiken.

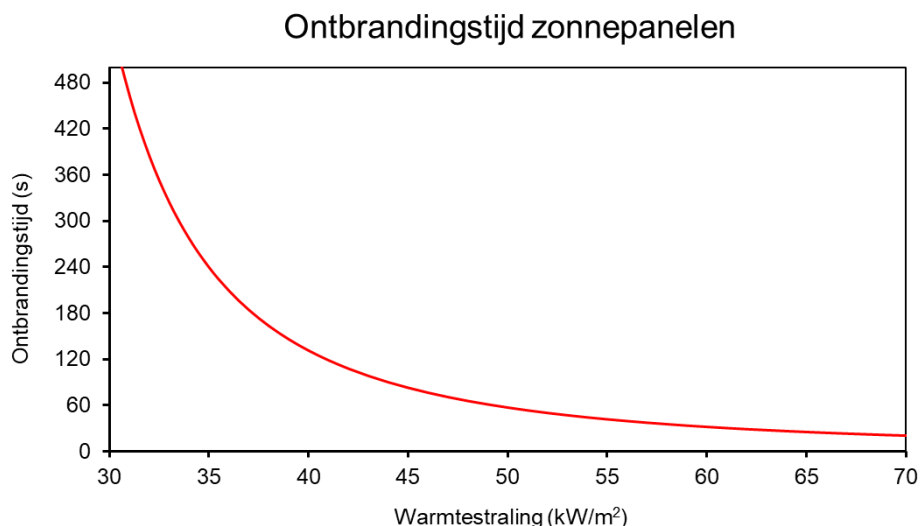
Perovskiet zonnecellen (TNO, z.d.-b) kunnen ook zonder silicium zonnecellen worden toegepast. Dit type zonnepaneel is vrij eenvoudig en goedkoop te produceren, omdat de grondstoffen niet schaars zijn. Een groot nadeel is echter dat ze een kleine hoeveelheid lood en andere metalen bevatten, die bij brand zouden kunnen vrijkomen (Ren et al. 2022). Verder hebben deze zonnecellen een korte levensduur en zijn ze minder stabiel dan op silicium gebaseerde zonnecellen, wat ertoe leidt dat het vermogen in korte tijd snel afneemt.¹⁰ Dit type is in opkomst omdat het rendement door stapeling van zonnecellen verhoogd kan worden ((TNO, z.d.-d), maar wordt nog niet grootschalig toegepast.

2.2.3 Brandmechanismen PV-systemen

Branden met PV-systemen kunnen op verschillende manieren ontstaan. In principe kan elk onderdeel van het systeem dat in paragraaf 2.2.1 is beschreven, oorzaak van een brand zijn.

Brandbaarheid van zonnepanelen: experimenten

Uit onderzoek blijkt dat zonnepanelen bij hoge warmtestralingen kunnen gaan branden, zoals bij aanstraling door brand. In onderzoek van Yang et al. (2015) bleken modules van polykristallijne zonnepanelen te gaan branden vanaf een warmtestraling van 26 kW/m². Hierbij waren de modules in een calorimeter geplaatst om een echte brand te kunnen simuleren. Met deze opstelling werden de modules blootgesteld aan warmtestralingen van 28 kW/m², 30 kW/m², 35 kW/m², 40 kW/m² en 45 kW/m². Vervolgens werd gekeken hoe snel de module in brand raakte en hoe snel deze verbrandde. Hieruit is een mathematisch verband afgeleid tussen de warmtestraling en de ontbrandingstijd, zie figuur 2.5. In deze figuur is te zien dat de ontbrandingstijd snel afneemt bij toenemende warmtestraling, van een halfuur bij 26 kW/m² tot iets minder dan een minuut bij 50 kW/m².



Figuur 2.5 Tijd tot ontbranding van polykristallijne zonnepanelen bij oplopende warmtestraling (gebaseerd op Yang et al., 2015).

¹⁰ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030438942102817X>

In een ander onderzoek zijn op eenzelfde manier experimenten uitgevoerd met modules van twee verschillende typen polykristallijne zonnepanelen bij warmtestralingen van 20 kW/m², 35 kW/m², 50 kW/m² en 70 kW/m² (Chow et al., 2016). Het ene type zonnepaneel (met brandvertrager) bleek bij 20 kW/m² niet te branden, maar wel vanaf 35 kW/m². Het andere type (zonder brandvertrager) brandde al bij een warmtestraling van 10 kW/m².

Het RIVM heeft recent ook een aantal brandexperimenten met verschillende typen zonnepanelen uitgevoerd (RIVM, 2022). Dit onderzoek wijst uit dat zowel poly- als monokristallijne panelen brandbaar zijn en dat er geen verschil bestaat in hun brandgedrag.

De constructie en overige materialen van het paneel kunnen wel invloed hebben op de brandbaarheid. In de experimenten met zonnepanelen met een plasticfolie aan de achterkant vormden zich binnen enkele seconden of minuten brandende druppels. Bij glas-glas panelen duurde de vorming van brandende druppels langer. Maar de onderzoekers stellen op grond van experimenten in de open lucht ook vast dat de brand in zonnepanelen vooral snel uitbreidt als de ondergrond brandbaar is en de zonnepanelen zich dicht daarboven bevinden. Grootschalige verspreiding van brand in een zonnepark is daarom onwaarschijnlijk als de ondergrond niet brandt; iets wat ook door Brandweer Nederland is geconcludeerd (2020).

Bovengenoemde experimenten geven inzicht in het brandgedrag van zonnepanelen en de invloed van de verschillende materialen die in zonnepanelen verwerkt kunnen zijn. Het is echter lastig de resultaten van deze experimenten te 'vertalen' naar de brandcondities waarbij zonnepanelen door een brand in de onderliggende vegetatie in brand kunnen raken.

Brandbaarheid van zonnepanelen: hotspot

Een andere manier waarop brand in een zonnepaneel kan ontstaan, is door een 'hotspot' (Deng et al., 2017; Dhimish et al., 2024; Wang & Xuan, 2021; Waqar Akram et al., 2022). Bij dit fenomeen wordt de stroom die door een zonnecel loopt zo hoog, dat deze effectief kortsluiting maakt (Deng et al., 2017) waardoor de cel oververhit kan raken. Dit kan leiden tot brand in het zonnepaneel (Tang et al., 2021), die zich vervolgens kan uitbreiden. Een hotspot kan onder andere veroorzaakt worden door installatiefouten waardoor er interne verschillen ontstaan binnen een zonnepaneel, defecten in het zonnepaneel, of schaduwvorming op het zonnepaneel. Bij dit laatste moet vooral gedacht worden aan schaduwvorming die langere tijd aanhoudt, wat bijvoorbeeld ook door vuil (zoals vogelpoep) veroorzaakt kan worden.

Uit navraag bij Holland Solar, Novar en TPSolar blijkt dat de zonnepanelen zelf niet zo snel voor brand zorgen (interviews Holland Solar, Novar en TPSolar). Novar geeft aan dat het wel kan voorkomen dat er brand ontstaat in de diodebox aan de achterkant van een zonnepaneel, en de hitte het paneel dan kan doen smelten. Zodra de kabel die deze diodebox verbindt, doorgebrand is, zal de brand echter vrij snel weer uitdoven doordat de spanning dan wegvalt (interview Novar).

Brandbaarheid van andere installatieonderdelen

Andere delen van het PV-systeem zorgen in de praktijk vaker voor branden dan het zonnepaneel¹¹ (zie hiervoor ook hoofdstuk 3: Casuïstiek). De bekabeling kan in brand raken,

¹¹ Zie bijvoorbeeld: [What Happens if a Solar Farm Catches Fire? \(firetrace.com\)](https://www.firetrace.com/)

bijvoorbeeld door beschadiging van de kabels door scherpe onderdelen, fouten bij de installatie (IFV, 2021; VRU, 2023) en/of in het geval van zonneparken, door weers- en andere natuurinvloeden zoals knagen door dieren (Vaverková et al., 2022). Door de hoge spanning die op de kabels staat, kan hierbij ook een vlamboog ontstaan als de lussen te kort zijn (NIPV, 2023; interview Novar). Fouten in de isolatie kunnen ook voor brand zorgen in ondergrondse kabels. Daarnaast kan er kortsluiting ontstaan door connectoren die onkundig gemonteerd zijn en/of niet goed op elkaar aansluiten (IFV, 2021; VRU, 2023).

Ook in de overige onderdelen (combinerboxen, omvormers, transformatoren) van het PV-systeem kan brand ontstaan. Dit kan bijvoorbeeld veroorzaakt worden door fouten in de installatie of door condensatievorming waarbij vonkoverslag plaatsvindt (interviews Holland Solar, Novar en TPSolar).

Een bijkomend probleem is dat in transformatoren brandbare olie aanwezig is om het systeem te koelen. Als deze olie in brand raakt, kan dit voor snelle verspreiding van de brand zorgen. Bij die branden komen ook giftige gassen vrij.

De combinatie van een zonnepark met andere functies kan een extra brandrisico introduceren, bijvoorbeeld:

- > bij de combinatie van een zonnepark met een parkeerplaats, waarbij de zonnepanelen boven de parkeerplaatsen zijn geplaatst. Hierbij moet gedacht worden aan brand in een auto die zich verspreidt en daarbij de zonnepanelen beschadigt. De omvormers zijn in een zonnepark echter relatief hoog geplaatst, wat de kans op beschadiging ervan (door bijvoorbeeld aanrijden) beperkt (interviews Holland Solar en Novar).
- > bij de aanwezigheid van een energieopslagsysteem (EOS) op het zonnepark. Naar de risico's van deze vormen van opslag heeft het NIPV aparte onderzoeken gedaan, zie [Elektrificatie](#) en [Waterstof](#).

2.2.4 Overige inrichtingsaspecten

In deze paragraaf worden enkele aspecten van de inrichting van zonneparken benoemd, die van belang kunnen zijn voor de (groei van de) vegetatie aldaar. In paragraaf 2.4 wordt dieper op de relatie met de vegetatie ingegaan.

Bedekkingsgraad zonnepanelen

De bedekkingsgraad van een zonnepark is de mate waarin het grondoppervlak van het zonnepark bedekt wordt, bijvoorbeeld door de vegetatie door de zonnepanelen.

De bedekkingsgraad door zonnepanelen kan worden weergegeven met de 'ground coverage factor'¹² van de zonnepanelen, die wordt bepaald door het aantal zonnepanelen, het oppervlak van de zonnepanelen, de hellingshoek van de panelen en de afstand waarop de (individuele en rijen) zonnepanelen ten opzichte van elkaar geplaatst zijn. Hoe groter de bedekkingsgraad, hoe minder licht er op de bodem valt. In vergelijking met andere landen hebben zonneparken in Nederland een hoge bedekkingsgraad, soms boven de 90%. Vaak zijn zonnepanelen op kleine afstand van elkaar en dicht op de grond geplaatst, zodat er veel schaduw op de bodem valt (interview Zon in Landschap). Bij zonnepanelen oost-west georiënteerd en als 'punttaken' opgesteld zijn, is dit effect nog sterker dan bij zuid-zuid

¹² Zie bijvoorbeeld: [Figure Ground Coverage Ratio \(Doubleday et al. 2016\)](#)

georiënteerde zonnepanelen (TNO, 2021c).¹³ In zonneparken met een hoge bedekkingsgraad groeien weinig planten door gebrek aan licht onder de zonnepanelen.

De zonnepanelen-bedekkingsgraad heeft ook effect op de hoeveelheid neerslag die op de bodem terechtkomt. Hoe meer ruimte tussen de afzonderlijke zonnepanelen, hoe meer neerslag de bodem kan bereiken (Schotman et al., 2021).

Terwijl zonnepanelen de hoeveelheid neerslag verminderen die op de bodem terechtkomt, wat een negatief effect kan hebben op de plantengroei eronder, zorgen zij tegelijkertijd voor minder verdamping van water uit de bodem, wat de plantengroei juist kan bevorderen. Meer hierover is te vinden in paragraaf 2.4.

Hoogte van zonnepanelen

Waar de hoeveelheid licht die op de bodem van een zonnepark valt, wordt bepaald door de zonnepanelen-bedekkingsgraad, bepaalt de hoogte van de zonnepanelen hoe gelijkmatig het licht over de bodem verdeeld wordt. Hoe hoger de zonnepanelen ten opzichte van de bodem geplaatst zijn, hoe kleiner het verschil is tussen de hoeveelheid licht op de bodem onder de zonnepanelen en de hoeveelheid licht op de bodem tussen de zonnepanelen. De totale hoeveelheid licht die (bij een bepaalde bedekkingsgraad) op de bodem valt, blijft gelijk (interview Zon in Landschap).

Over het algemeen worden zonnepanelen in zonneparken in Nederland op een beginhoogte van 50 tot 100 cm vanaf de bodem geplaatst (100 cm is veel). De hellingshoek van zonnepanelen in zonneparken in Nederland is typisch 10 à 12 graden (interview Zon in Landschap). De maximale hoogte varieert. Gemeenten kunnen bij de bouw van zonneparken aangeven hoe wat de maximale hoogte van de zonnepanelen mag zijn. Deze richtlijnen zijn per gemeente verschillend; gemiddeld is de maximaal toegestane hoogte circa 2 meter (interviews TPSolar, Zon in Landschap). Hoe lager de zonnepanelen ten opzichte van de bodem geplaatst zijn, hoe meer zonnepanelen boven elkaar geplaatst kunnen worden (interviews Holland Solar, TPSolar). Een hogere plaatsing van zonnepanelen vanaf de bodem is echter meer bevorderlijk voor de biodiversiteit (zie paragraaf 2.4). Dit is een aspect waar steeds meer ontwikkelaars van zonneparken rekening mee houden (Holland Solar). Ook voor maaien en begrazing moeten de panelen hoog genoeg staan (> 70 cm) (interview TPSolar).

Oriëntatie van zonnepanelen

Zonnepanelen in Nederland zijn opgesteld in een oriëntatie gericht op het zuiden of in een oost-west oriëntatie. Bij een zuidelijk georiënteerde opstelling is de opbrengst per zonnepaneel hoger dan bij een oost-west opstelling (TNO, 2021c), maar is de opbrengst per oppervlakte lager, omdat er meer ruimte tussen de rijen zonnepanelen gehouden moet worden om schaduw op de aangrenzende panelen te voorkomen. Bij een zuidelijke opstelling is rond het middaguur sprake van een piek in de opbrengst (wat minder gunstig is voor het elektriciteitsnet), terwijl de opbrengst bij een oost-west opstelling gelijkmatiger over de dag verdeeld is.

Op dit moment heeft 35% van de zonneparken in Nederland een oost-west opstelling. (Zon op Kaart, 2023). Voor de biodiversiteit in een zonnepark is een oost-west opstelling echter

¹³ De categorie 'natuurinclusief' van de SDE++ 2024 regeling vereist, van bovenaf gezien, minimaal 25% open ruimte tussen de zonnepaneelentafels (bron: https://www.rvo.nl/sites/default/files/2024-09/Brochure-SDE-2024_20240906.pdf)

het minst wenselijk, omdat de bodem onder de zonnepanelen wordt afgedekt (TNO, 2021c; interview Holland Solar). TPSolar past voor oost-west georiënteerde panelen een V-opstelling toe in plaats van een 'dakjes-opstelling', omdat er dan wat meer licht op de bodem onder de panelen kan vallen (interview TPSolar).

Daarnaast worden diverse andere mogelijkheden voor opstellingen getest, zoals verticaal geplaatste zonnepanelen en zonnepanelen met een zonvolgsysteem, waarbij de panelen op een as bevestigd zijn en meedraaien met de stand van de zon (interview Zon in Landschap).

2.3 Brandrisicobeheersing en brandbestrijding in zonneparken

Het is van belang dat zonneparken ook met oog voor brandveiligheid en brandbestrijding ontworpen worden. Het gaat hierbij om het voorkomen van brand, het beperken van de kans op branduitbreiding en om voldoende mogelijkheden voor de brandweer om op te treden. In deze paragraaf worden aandachtspunten voor het brandveilig inrichten van zonneparken beschreven.

2.3.1 Vergunningverlening

Voor het een zonnepark is een omgevingsvergunning nodig (IFV, 2021; Infomil). De veiligheidsregio wordt door het bevoegd gezag niet vanzelfsprekend om advies gevraagd bij de vergunningverlening voor aanleg (of uitbreiding) van een zonnepark. Bij aanleg van een zonnepark is het echter dringend aanbevolen de lokale brandweer en veiligheidsregio al in een vroeg stadium te betrekken. Novar en Rijkswaterstaat geven aan dat dit voor hun zonneparken altijd wordt gedaan (interviews Novar, RWS).

2.3.2 Voorkomen van brand

Zoals beschreven in de *Handreiking Risicobeheersing Advies Veilige PV-systemen* (Brandweer Nederland 2020b), is er een aantal maatregelen die kunnen helpen om brand in een zonnepark te voorkomen, zoals:

- > periodieke controle en goed onderhoud van de PV-installatie door de exploitant
- > een fysieke scheiding (zoals een hekwerk) tussen het zonnepark en de omgeving, zodat het zonnepark niet algemeen toegankelijk is.

Controle en onderhoud; veroudering en beschadiging

Aandachtspunten voor het onderhoud en de controle van de PV-installatie zijn veroudering en beschadiging van de installatie. Het is van belang voor duurzame materialen te kiezen, aangezien zonneparken een levensduur van 25 à 30 jaar hebben (interview TPSolar). Door weer, wind, UV-straling, warmte-koude-afwisseling en/of aantasting door knaagdieren kunnen zonnepanelen en andere onderdelen van de PV-installatie beschadigd raken. PV-systemen moeten verwijderd worden als ze niet meer functioneel zijn of niet meer worden onderhouden (Brandweer Nederland, 2020).

Scope 12-keuring

Zonneparken op de gronden van Rijkswaterstaat moeten aan de [Scope 12-keuring](#) van de stichting SCIOS voldoen. Een van de grootste aandachtspunten voor de brandveiligheid van zonnepanelen is hierbij het voorkomen van een vlamboog. Rijkswaterstaat heeft naast het implementeren van de Scope 12 eisen extra eisen gesteld, zoals een goede bereikbaarheid

van de zonneparken en het transformatorhuis. Rijkswaterstaat is ook voornemens overige maatregelen met betrekking tot brandveiligheid te treffen, die TNO voorstelt in het rapport *Veiligheid van zonneparken in berm en knooppunten van rijkswegen. Brandpreventie en brandbestrijding* (TNO 2021a). Het is wel mogelijk dat er eisen zijn die voor een specifieke locatie vanuit het oogpunt van brandbestrijding wenselijk zijn, maar vanuit het oogpunt van Rijkswaterstaat en de veiligheid van de weggebruikers juist minder wenselijk (denk aan de locatie van bepaalde zonnepark-componenten in relatie tot de snelweg, zoals een transformatorhuis (interview RWS)).

Fysieke scheiding

Een fysieke scheiding (hekwerken) rondom zonneparken om diefstal te voorkomen is vaak een vereiste van verzekeraars. De brandweer beveelt een hekwerk aan vanuit het oogpunt van brandveiligheid, maar er moeten wel voldoende toegangsmogelijkheden zijn voor de brandweer en haar voertuigen (Brandweer Nederland, 2020; interview Holland Solar).

Vaak wordt een beplanting van 3 à 4 meter hoog en een aantal meter breed rondom een zonnepark geplaatst, zodat het niet zichtbaar is voor omwonenden. Afhankelijk van het type beplanting kan die ook een brandveiligheidsrisico vormen (interview TPSolar).

2.3.3 Beperken van de kans op branduitbreiding

In de *Handreiking Risicobeheersing Advies Veilige PV-systemen* (Brandweer Nederland 2020b) wordt een aantal mogelijke maatregelen beschreven die er voor kunnen zorgen dat de kans op branduitbreiding zo klein mogelijk wordt gehouden, zoals:

- > uitvoering van onderdelen van de PV-installatie: zonnepanelen met zo weinig mogelijk brandbaar materiaal, een vlamdovende uitvoering van de bekabeling, een draagconstructie en ondergrond die zo weinig mogelijk bijdragen aan branduitbreiding
- > kort houden van de vegetatie onder en tussen de zonnepanelen
- > gangen waar de begroeiing minimaal is om brandoverslag en -uitbreiding te voorkomen
- > detectie en automatische doormelding van brand (aan PAC, Particuliere Alarmcentrale) voldoende afstand tussen de zonnepanelen en de andere componenten van de PV-installatie, voldoende afstand tussen de rijen zonnepanelen en een beperkt aantal zonnepanelen per rij.

Detectie

Monitoring van zonneparken is met name gericht op bedrijfscontinuïteit en op voorkomen van (koper)diefstal. Holland Solar geeft aan dat er wel ontwikkelingen zijn in de monitoring van zonneparken, maar dat die vooral gedreven worden door de toename van het aantal koperdiefstallen en niet gericht is op het detecteren van een eventuele brand. Het aantal camerasystemen in zonneparken neemt toe, en deze zouden in principe ook gebruikt kunnen worden voor de monitoring van brand (interviews Holland Solar, TPSolar). In sommige zonneparken worden IR-camera's toegepast, zoals in zonneparken van Novar. Deze zijn echter op de randen van de parken gericht en niet op de zonnepanelen (door de hitte die er bij brand ontstaat zou er niets te zien zijn); met deze camera's zou alleen een brand waargenomen kunnen worden aan de rand van de parken.

Brand kan ook worden opgemerkt doordat een deel van het zonnepark uitvalt, maar dan is de brand al ver gevorderd. Novar geeft aan dat een camerasysteem specifiek voor de detectie van brand te prijzig zou zijn. Detectie van een eventuele brand is in de praktijk

vooral afhankelijk van toevallige menselijke waarneming en melding; ook komt het voor dat een brand pas achteraf opgemerkt wordt (interview Novar).

Vegetatie en PV-onderdelen

In zonneparken van Novar wordt rekening gehouden met vonkoverslag tussen het PV-systeem en de vegetatie van het zonnepark. Om deze reden wordt in parken van Novar vrijwel altijd minstens 40 cm ruimte tussen het laagste punt van de zonnepanelen en de vegetatie gehouden, tenzij er een reden is om dit niet te doen (bijvoorbeeld voor het aanzicht, omdat de zonnepanelen dan te hoog zouden uitkomen) (interview Novar). Meer informatie hierover in hoofdstuk 2.4.

Locatie van omvormers en transformatoren

Volgens TPSolar staan centrale omvormers meestal in het midden van een zonnepark met een (halfverharde) vrije ruimte zonder begroeiing van circa 2,5 m rondom. Onder de kleine decentrale omvormers die (op minimaal 1 meter hoogte) dichtbij de panelen staan, wordt de begroeiing kort gehouden of staat geen begroeiing (interview TPSolar). In zonneparken van Novar zijn omvormers minstens 40 centimeter boven de grond geplaatst en wordt er tegenwoordig beton onder de omvormers geplaatst om te voorkomen dat begroeiing in de omvormers komt (interview Novar).

Transformatoren

Transformatoren staan op een betonnen fundering, met daaromheen geen begroeiing tot minstens 1 meter van de transformator. Ze worden zowel midden in als aan de rand van het zonnepark geplaatst (interviews Holland Solar, TPSolar).

EOS'en in zonneparken

Holland Solar geeft aan dat bij de installatie van EOS'en PGS 37-1 van toepassing is (interviews Holland Solar en Novar; Begeleidingscommissie, persoonlijke communicatie 15 juli 2024). In zonneparken van Novar is rondom EOS'en een semi-verhard pad aangelegd, zodat de brandweer de batterijen van alle kanten kan benaderen. Ook wordt voor de plaatsing van EOS'en specifiek contact opgenomen met de brandweer (interview Novar). Rijkswaterstaat geeft aan dat nog niet geregeld is waar in het zonnepark de batterij precies moet worden geplaatst en welke typen batterijen zullen worden gebruikt. Rijkswaterstaat schat het risico van de toepassing van batterijen in auto's, die ook over de snelwegen rijden waar zonneparken langs geplaatst zijn, als groter in dan het risico van een stationaire EOS in een zonnepark (interview RWS).

2.3.4 Mogelijkheden voor brandbestrijding

In de *Handreiking Risicobeheersing Advies Veilige PV-systemen* (Brandweer Nederland 2020b) wordt voor de inrichting van een zonnepark, een aantal wenselijke maatregelen genoemd ten behoeve van het brandweeroptreden – waarbij wordt opgemerkt dat deze in de praktijk niet altijd haalbaar zullen zijn. Deze maatregelen zijn onder andere:

- > twee toegangen voor (onder andere) de brandweer, zodanig geplaatst dat altijd hooguit een van beide benedenwinds ligt.
- > elk onderdeel van de PV-installatie is tot op 20 meter afstand te benaderen met lagedruk straal, via een hindernisvrije looproute.
- > de afstand tussen opstelplaats voor de tankautospuiter tot elk onderdeel van de PV-installatie bedraagt maximaal 100 meter.

- > de opstelplaats is bereikbaar via een verharde weg; en beide voldoen aan de eisen in de [Handreiking Bluswatervoorziening en Bereikbaarheid 2019](#) ¹⁴).
- > er zijn voldoende bluswatervoorzieningen, die minimaal 60 m³/uur kunnen leveren.

Bereikbaarheid en toegankelijkheid van het zonnepark

Zoals beschreven is het wenselijk dat zonneparken goed bereikbaar en van twee kanten toegankelijk zijn voor de brandweer. Die toegangen moeten 24/7 beschikbaar zijn. Welke toegang gebruikt wordt tijdens een incident is afhankelijk van de richting van de rookverspreiding. Holland Solar meldt dat er echter steeds meer zonneparken komen die uit meerdere kleine parkjes bestaan en/of op afgelegen plekken gerealiseerd worden, zodat het lastiger is om voor twee aanrijroutes en goede toegangsmogelijkheden te zorgen (interviews Holland Solar, TPSolar).

Bereikbaarheid: verharde wegen, opstelplaatsen en inzetdiepte

Voor de bereikbaarheid heeft de brandweer berijdbare paden en opstelplaatsen nodig, vanwaar alle onderdelen van het zonnepark op blusafstand te bereiken zijn, en die voldoen aan de eisen beschreven in de *Handreiking Bluswatervoorziening en Bereikbaarheid 2019* (Brandweer Nederland, 2020a). Deze eisen betreffen niet alleen de breedte, maar ook de belastbaarheid (gezien het gewicht van de brandweervoertuigen). Een voor hand liggende verharding is asphalt, maar vanuit het oogpunt van de biodiversiteit is dat niet wenselijk. Zandpaden, grindpaden of half-verharde paden met openingen naar de bodem zijn in dit verband wenselijker, omdat deze allerlei insectensoorten aantrekken (interview WUR).

In de praktijk kan het lastig zijn om de gewenste inzetdiepte en benodigde paden te realiseren, vanwege de grote oppervlaktes (tientallen hectaren) van zonneparken (interview TPSolar).

Bluswatervoorziening

Naast de *Handreiking Bluswatervoorziening en Bereikbaarheid 2019* (Brandweer Nederland, 2020a) stelt ook de *Handreiking Risicobeheersing Advies Veilige PV-systemen* (Brandweer Nederland 2020b) eisen aan de bluswatervoorziening. De bluswatervoorziening moet voldoende zijn, dat wil zeggen een dekkend geheel vormen met opstelplaatsen en looproutes, en moet minimaal 60 m³ bluswater per uur kunnen leveren.

In zonneparken van Novar worden sinds een paar jaar waterputten geslagen, die door de brandweer gebruikt kunnen worden (interview Novar). Het is echter niet altijd mogelijk om (voldoende) waterputten te slaan, bijvoorbeeld omdat de ondergrond in zonneparken daar niet altijd geschikt voor is of het Waterschap beperkingen oplegt (interview TPSolar).

In de praktijk blijkt de bluswatervoorziening niet altijd voldoende bereikbaar te zijn, zoals bij de brand in een zonnepark bij Sas van Gent in 2022 (zie paragraaf 3.1).

Beschikbaarheid van een bedrijfsdeskundige

De brandweer moet bij een brand in een zonnepark veilig kunnen optreden. Het is dus van belang dat het PV-systeem snel kan worden uitgeschakeld. Daarom is het essentieel dat de beheerder van het zonnepark 24/7 telefonisch bereikbaar is voor de brandweer, en dat binnen een (vooraf vastgestelde) tijd een deskundige van het bedrijf ter plaatse kan zijn.

¹⁴ In dat kader wordt de weg op een zonnepark gelijkgesteld aan een erftoegangsweg, zie [Handreiking Bluswatervoorziening en Bereikbaarheid 2019](#), hoofdstuk 4 (Brandweer Nederland, 2020a).

(TNO 2021b). Bij zonneparken moet een (wettelijk verplichte) installatieverantwoordelijke worden aangewezen, die verplicht is te komen als hij/zij opgeroepen wordt. Deze zorgt er onder andere voor dat het zonnepark spanningsloos kan worden gemaakt (interview Novar). Bij de zonneparken van TPSolar hangt een bord met telefoonnummers die gebeld kunnen worden bij incidenten. Het kan in de praktijk echter enkele uren duren (afhankelijk van de afstand) voor een installatieverantwoordelijke ter plaatse kan komen om de installatie gedeeltelijk of volledig uit te schakelen. In sommige gevallen kan de netbeheerder worden benaderd om de hoofdaansluiting uit te schakelen (interview TPSolar).

2.3.5 Risico's bij brandbestrijding in zonneparken

Bij de bestrijding van een brand in zonneparken (en PV-systemen in het algemeen) is er een aantal aandachtspunten. Een aantal daarvan wordt hieronder benoemd. Zie voor veiligheidsmaatregelen de *Handreiking Incidentbestrijding zonnepanelen* (Brandweer Nederland, 2021).

Kans op elektrocutie

Een aandachtspunt is dat een zonnepaneel altijd 'aan' staat, dat wil zeggen dat er altijd spanning op staat, zolang er licht op valt (Brandweer Nederland, 2021; Ramali et al., 2023). De enige manier om ervoor te zorgen dat er dan geen spanning op de panelen meer staat zou zijn door deze volledig lichtdicht af te dekken, maar dit is in de praktijk niet haalbaar. Dit betekent dat er bij het blussen van zonnepanelen een kans op elektrocutie bestaat. PV-systemen kunnen worden voorzien van een veiligheidssysteem dat ervoor zorgt dat in het geval dat een zonnepaneel beschadigd is of betrokken is bij brand, de PV-installatie automatisch terugschakelt naar een veilige spanning van maximaal 1 Volt per zonnepaneel.

Bij grootschalige installaties zoals een zonnepark moet altijd een deskundige van het bedrijf geraadpleegd worden om duidelijk te krijgen of en hoe het PV-systeem veilig kan worden afgeschakeld. Installatieonderdelen van het zonnepark moeten worden afgeschakeld door deze bedrijfsdeskundige; alleen als er speciale noodknoppen voor de hulpdiensten zijn aangebracht, mogen deze worden geactiveerd.

Blussen van zonnepanelen die in brand staan, is mogelijk met een sproeistraal vanaf een afstand van 0,5 m. Zie tabel 2.1 (volgende pagina). Let op: bij een brand in een transformatorhuis moet er geen water op of in het transformatorhuis gespoten worden en ook een brand in de ondergrondse kabels moet niet bestreden worden, in verband met de mogelijk hoge spanning.

Draag altijd droge PBM's en desgewenst aanvullend klasse 0 geïsoleerde handschoenen. Let ook op of de grond van het zonnepark droog is, met het oog op mogelijke stroomgeleiding. Draag bij brand in kabels adembescherming in verband met mogelijk vrijkomende gevaarlijke stoffen afkomstig van een brandende PVC-isolatie.

Tabel 2.1 Veilige blusafstanden met sproeistraal en gebonden straal (Brandweer Nederland, 2020a, 2021)

Blussen met water	Tot 1000V AC, 1500V DC (alles in het domein gebruik)
Sproeistraal	> 0,5 meter
Gebonden straal	Mits straal uiteen is gevallen in druppels

Vrijkomen van gevaarlijke stoffen en depositie van resten

Bij een brand van PV-systemen kunnen gevaarlijke stoffen vrijkomen (zie bijvoorbeeld IFV, 2021 en RIVM, 2022). Welke stoffen in welke hoeveelheid is afhankelijk van het onderdeel van het PV-systeem dat in brand staat. Bij brand in een transformatorhuis verbrandt voornamelijk het koelmiddel (olie), wat voor veel rookontwikkeling zorgt. Verder kan daarbij het giftige waterstoffluoride (HF) vrijkomen door de verbranding van zwavelhexafluoride (zie ook paragraaf 3.3). Ook als een energieopslagsysteem (EOS) in brand staat komen er gevaarlijke stoffen vrij.¹⁵

Bij zeer grote branden van gebouwen met een hoge vuurlast en een groot aantal zonnepanelen kan het voorkomen dat er resten van panelen (zonnecellen) tot ver in de omgeving verspreid worden. Dit is bij een brand in een zonnepark niet te verwachten, omdat de warmteontwikkeling veel minder zal zijn dan bij een grootschalige gebouwbrand (IFV, 2021; RIVM, 2022).

2.3.6 Uitdagingen bij het inrichten van zonneparken

Het inrichten van een zonnepark met brandrisicobeheersing in gedachten kan een grote uitdaging zijn voor ontwikkelaars van zonneparken (interviews Novar, TPSolar). Het kan moeilijk zijn om de adviezen van de brandweer op te volgen, bijvoorbeeld wat betreft de aanleg van paden die geschikt zijn voor grote voertuigen, keerpunten en opstelplaatsen, wenselijke inzetdieptes en aanrijdroutes en de aanwezigheid van bluswatervoorzieningen. Deze maatregelen zijn niet altijd haalbaar, bijvoorbeeld om technische redenen, of economisch niet rendabel. Daarom wordt er in overleg met de veiligheidsregio en het bevoegd gezag naar maatwerkoplossingen gezocht.

Een lastig punt voor ontwikkelaars van zonneparken is dat verschillende veiligheidsregio's soms verschillend adviseren. Een landelijk overkoepelend dossier zou volgens TPSolar wenselijk zijn (interview TP Solar). De veiligheidsregio's streven naar uniformiteit (Begeleidingscommissie, persoonlijke communicatie 15 juli 2024)

Daarnaast verschilt het per zonnepark welke partij het bevoegd gezag is: in de meeste gevallen is dit de gemeente, maar als een perceel over gemeentegrenzen heen gaat of langs rijkswegen ligt, is de provincie vaak het bevoegd gezag (interview TPSolar).

¹⁵ Zie bijvoorbeeld het *Scenarioboek Energietransitie* (NIPV): <https://scenarioboeken.nipv.nl/energietransitie/>

2.4 Vegetatie in zonneparken

2.4.1 Soorten vegetatie in zonneparken

Het brandbaarheid van de vegetatie in zonneparken kan sterk verschillen per soort. Welke soorten vegetatie voorkomen in zonneparken, is afhankelijk van de soorten die zijn aangeplant en ingezaaid. Daarnaast kan de soortensamenstelling zich in de loop van de tijd aanpassen aan de condities in het zonnepark (Armstrong et al., 2016; Hernandez et al., 2014).

Om te bepalen welke soorten het meest voorkomen in Nederlandse zonneparken, is gebruikgemaakt van het onderzoek van Schotman et al. (2021). In dat onderzoek is in 2019 en 2020 (onder andere) de vegetatie van 25 zonneparken verspreid over Nederland onderzocht. Alle zonneparken waren ten tijde van dat onderzoek minstens één jaar oud, de meeste dateerden uit 2017 en 2018. De aangetroffen vegetatiesoorten zijn opgenomen in een tabel, met daarbij de bedekkingsgraad en frequentie op verschillende posities: onder en tussen de zonnepanelen (bijlage 10 'synoptische tabel' in Schotman et al., 2021).

Voor het voorliggende onderzoek zijn de soorten meegenomen die in meer dan 40% van de door Schotman et al. (2021) onderzochte parken voorkwamen en de soorten met een bedekkingsgraad boven de 10%. Vervolgens is (in voorliggend onderzoek) voor die soorten een 'score' berekend door de bedekkingsgraad en frequentie te vermenigvuldigen. Hierdoor ontstaat een rangschikking van de meest voorkomende plantensoorten. Dit is weergegeven in tabel 2.2 (volgende pagina).

Uit de scores blijkt dat het per positie verschilt welke soort het meest voorkomt (onder of tussen de zonnepanelen). Dit komt onder andere door de schaduwwerking van de zonnepanelen (meer hierover is te vinden in paragraaf 2.4.2). Onder de panelen komen het Engels raaigras (*Lolium perenne*), Grote brandnetel (*Urtica dioica*) en Gestreepte witbol (*Holcus lanatus*) het meest voor. Tussen de panelen zijn Engels raaigras (*Lolium perenne*), Gewoon struisgras (*Agrostis capillaris*) en Kweek (*Elytrigia repens*) de meest voorkomende soorten (zie tabel 2.2).

De plantensoorten in tabel 2.2 zijn vergeleken met de plantensoorten uit de nulmeting van de plantensoorten die Novar in drie van zijn zonneparken heeft laten uitvoeren. Het doel van die nulmetingen was een beeld te krijgen van de (kansen voor de) biodiversiteit in die zonneparken (VanDerHelm Milieubeheer B.V., 2023a, 2023b, 2023c; verkregen van Novar). Deze zonneparken waren ten tijde van de nulmeting twee tot vier jaar oud. In deze zonneparken kwamen Gestreepte witbol (*Holcus lanatus*), Glanshaver (*Arrhenatherum elatius*) en Kropaar (*Dactylis glomerata*) het meest voor, maar het is onduidelijk op welke positie (ten opzichte van de zonnepanelen) in het zonnepark deze meting is uitgevoerd. Engels raaigras (*Lolium perenne*) kwam in deze nulmeting wel naar voren als veelvoorkomend, maar met een lage bedekkingsgraad.

Tabel 2.2 De meest voorkomende vegetatietypen onder en tussen de zonnepanelen

Nederlandse naam	Score	Nederlandse naam	Score
Onder de panelen		Tussen de panelen	
Engels raaigras	68,8	Engels raaigras	120,4
Grote brandnetel	45	Gewoon struisgras	44,4
Gestreepte witbol	37,5	Kweek	39
Kweek	31,2	Kropaar	33,3
Gewoon struisgras	24,6	Rood zwenkgas	27,4
Gewone braam	22	Gestreepte witbol	23,6
Rood zwenkgas	19,3	Fioringras	21,8
Akkerdistel	18,6	Gewoon duizendblad	18,6
Kropaar	11,4	Grote brandnetel	15,4
Fioringras	9,3	Kruipende boterbloem	14,1
Witte klaver	7	Witte klaver	8,8
Kruipende boterbloem	4,8	Akkerdistel	7,6
Gewoon duizendblad	2,3	Gewone braam	2

In de interviews met Zon in Landschap en Rijkswaterstaat werden ‘grassen’ als de meest dominante soort in zonneparken genoemd. In het interview met Holland Solar werd opgemerkt dat door de hoge stikstofwaarden op de voormalige landbouwgronden waarop veel zonneparken gebouwd zijn, distels en brandnetels goed groeien (interviews Zon in Landschap, RWS, Holland Solar).

In veel zonneparken wordt gestreefd naar meer biodiversiteit door het inzaaien van kruidenrijke mengsels (interviews Holland Solar, Novar); TPSolar kiest voor laagblijvende bodembedekkers tussen en onder de panelen (gras/klaver- of gras/kruidenmengsels) (interview TPSolar). Er zijn op dit moment geen richtlijnen voor welke kruidenmengsels worden ingezaaid, maar de verwachte hoogte (30-40 cm) zou kleiner zijn dan de hoogte van bijvoorbeeld brandnetels en distels (interview Holland Solar). In de loop der jaren kunnen er ook zaden van grotere soorten op de percelen terecht komen, zoals de eerder genoemde brandnetels en distels. Deze worden daarom af en toe weggemaaid (interview TPSolar). Veranderingen in de vegetatie kunnen leiden tot verandering van het brandvermogen van de vegetatie.

Wetenschappers van Wageningen Universiteit & Research geven aan dat de soortensamenstelling van zonneparken op voormalige landbouwgronden in de loop van de tijd kan veranderen, afhankelijk van het maaibeheer. Zij bevestigen het beeld dat in de

meeste zonneparken Engels raaigras voorkomt met gemiddeld 90% bedekking, wanneer de zonneparken net zijn gerealiseerd. Deze grassoort is dominant op veel voedselrijke landbouwgronden. Daarnaast komt ook brandnetel veel voor door de hoge voedingswaarden in de bodem. Bij een goed maai-beheer met afvoer van het maaisel, verandert de soortensamenstelling geleidelijk naar kruidenrijk grasland met soorten als bijvoorbeeld Duizendblad (*Achillea millefolium*) en Reukgras (*Anthoxanthum odoratum*) en neemt ook de soortenrijkdom van de vegetatie toe (interview WUR).

Agri-PV

Er zijn op in Nederland nog weinig zonneparken waarin het opwekken van energie gecombineerd wordt met een agrarische toepassing (agri-PV), zoals tuinbouw: het gaat om slechts enkele innovatieprojecten en pilots. Het is ook nog de vraag of agri-PV wel geschikt is voor Nederland. In het onderzoek van Van der Zee et al. (2019) en de interviews met Holland Solar en Zon in Landschap werd benoemd dat bij agri-PV concurrentie ontstaat om zonlicht, tussen energieproductie en gewasopbrengst. Ook is het nog onduidelijk hoeveel licht nodig is om voldoende kwaliteit en kwantiteit van de gewassen te waarborgen. De positieve invloed van verminderde verdamping en zonnestraling zou in Nederland ook minder groot zijn dan in agri-PV installaties in de mediterrane gebieden (waar de zonnepanelen door schaduwwerking mogelijk juist een positief op de plantengroei hebben).

In huidige innovatieprojecten met agri-PV in Nederland wordt de juiste verhouding tussen het licht voor opwekken van energie en voor gewasopbrengst onderzocht. Er zijn verschillende projecten gaande, zoals Symbizon (strokenteelt, akkerbouw), Sunbiose (voornamelijk fruitteelt) en Solarmilk (combinatie met melkveehouderij) (interviews Holland Solar, Zon in Landschap).

2.4.2 Factoren die van invloed zijn op vegetatie in zonneparken

Doordat de zonnepanelenconstructie fungeert als beschutting tegen regen (en andere neerslag), zonlicht en wind, wordt het microklimaat onder de zonnepanelen in zonneparken beïnvloed. Er vinden daardoor lokaal veranderingen plaats in de temperatuur, windsnelheid, luchtvochtigheid en verdamping ten opzichte van de situatie in het open veld. Deze klimaatfactoren hebben ook invloed op de vegetatie.

Temperatuur

Zonnepanelen verminderen de zonnestraling die op de bodem terechtkomt, wat resulteert in een lagere dagtemperatuur onder de panelen in de zomer. In een onderzoek van Knecht et al. (2021) in Nederland werd gevonden dat de gemiddelde temperatuur onder de panelen 5,3 °C lager is dan tussen de panelen. Internationaal is er veel variatie in het gevonden temperatuurverschil onder en tussen zonnepanelen: zo werd in een Brits onderzoek door Armstrong et al. (2016) een verschil van 2,4 °C gevonden. Het verschil zal afhangen van de opstelling van de zonnepanelen, en mogelijk ook van de mate waarin de windsnelheid door de zonnepanelen wordt geremd (Armstrong et al., 2016; Noor & Reeza, 2022).

Luchtvochtigheid

De temperatuur heeft een sterke koppeling met de luchtvochtigheid en de verdamping. Bij een lagere temperatuur neemt de verdamping af en de relatieve luchtvochtigheid toe (Armstrong et al., 2016; Hassanpour Adeg et al., 2018; Noor & Reeza, 2022; Yavari et al., 2022). Zo werd door Knecht et al. (2021) een 9,6% hogere relatieve luchtvochtigheid onder de zonnepanelen gemeten dan in het open veld. In meerdere studies is ook geconstateerd

dat het bodemvochtgehalte hoger was onder de zonnepanelen, door het geringere verlies van water uit de bodem naar de lucht. Dit effect treedt op hoewel er ook minder neerslag op de bodem terecht komt door de aanwezigheid van zonnepanelen (Hassanpour Adeg et al., 2018; Lambert et al., 2021; Uldrijan et al., 2021; Yavari et al., 2022).

Bodemvochtgehalte

In de interviews met Zon in Landschap, Rijkswaterstaat en Holland Solar werd de positieve invloed die zonnepanelen op het bodemvochtgehalte kunnen hebben ook benoemd. Rijkswaterstaat heeft onderzoek laten uitvoeren naar de invloed van zonneparken op het grondwater. Hieruit bleek eveneens dat de verdamping onder de zonnepanelen in de zomer lager is dan naast de zonnepanelen. Volgens Holland Solar wordt tegenwoordig in nieuwe zonneparken meer ruimte tussen de zonnepanelen gelaten, zodat neerslag gelijkmatiger over de bodem wordt verdeeld (interviews Zon in Landschap, RWS, Holland Solar).

Doordat het bodemvochtgehalte onder de zonnepanelen hoger is, is het effect van (een periode van) droogte op de vegetatie onder de panelen mogelijk minder groot. Tegelijkertijd is de groei van de vegetatie onder de zonnepanelen ook afhankelijk van voldoende licht. Uit het onderzoek van Schotman et al. (2021) in 25 zonneparken in Nederland bleek dat de vegetatiebedekking een sterk positief verband had met de hoeveelheid licht en neerslag die de bodem konden bereiken: hoe meer licht en neerslag de bodem konden bereiken, hoe meer planten gaan groeien. Zoals beschreven in paragraaf 2.2.4, hebben zonneparken in Nederland een relatief hoge bedekkingsgraad. In zonneparken met oost-west opstellingen van de zonnepanelen bereikte slechts 7,5% van het licht de bodem, waardoor de vegetatiebedekkingsgraad slechts 17,5% bedroeg (Schotman et al. 2021). Daarentegen is het onder de dicht op elkaar en oost-west opgestelde zonnepanelen in het groeiseizoen vaak wel natter door verminderde verdamping en inklinking van de bodem (interview WUR).

Beschikbaarheid van licht

In de interviews (Zon in Landschap, Novar) werd eveneens benoemd dat in zonneparken met een (aaneengesloten) oost-west opstelling door het gebrek aan licht nauwelijks nog vegetatie groeit. Daarbij werd opgemerkt dat er gemiddeld 10-40% licht nodig is om plantengroei in stand te houden. Er zijn echter zonneparken waar dit niet is gewaarborgd en slechts 3% van het zonlicht de bodem bereikt. Dat is slecht voor de bodemkwaliteit en zorgt voor een verminderde groei van planten (interview Zon in Landschap).

Schotman et al. (2021) vonden dat er onder hoger geplaatste en smalle zonnepanelen de meeste lichtinval was (40,2%). Zoals in paragraaf 2.2.4 beschreven, zorgt een hogere plaatsing van zonnepanelen ook voor een meer gelijkmatige verdeling van licht (interview Zon in Landschap). Hierdoor zijn hoger geplaatste zonnepanelen beter voor de biodiversiteit dan laag geplaatste zonnepanelen.

Er lopen momenteel verschillende onderzoeken naar de effecten van de opstelling van zonnepanelen en typen zonnepanelen (bijvoorbeeld bifacial zonnepanelen) op de lichtinval op de bodem (interviews Holland Solar, RWS, Zon in Landschap). Zo wordt bijvoorbeeld gekeken naar mogelijkheden van (deels) doorzichtige panelen, zoals bepaalde typen bifacial zonnepanelen (zie paragraaf 2.2.2). Een mogelijkheid is ook om de paneelrijen verder uit elkaar te zetten. Hoe ver wenselijk is, verschilt per soort opstelling (een bodembelichtingstoets kan inzicht geven). Als grove richtlijn kan gedacht worden aan minimaal 2 à 2,5 meter tussen de rijen. Tussen de 'dakpunten' van oost-west opgestelde

zonnepanelen zou een ruimte van minimaal 30 centimeter moeten worden gehanteerd om vegetatiegroei mogelijk te maken. Bij een ruimte van 25 centimeter werd in een zonnepark in Vlissingen maar een (vegetatie-)bedekkingsgraad van 3% gevonden (interview WUR).

2.4.3 Onderhoud van vegetatie in zonneparken

Beheer van de vegetatie in zonneparken is van belang voor de opbrengst van de PV-installatie, voor de biodiversiteit en voor de brandveiligheid.

Wetenschappers van de WUR geven aan dat de vegetatie in zonneparken vaak kort wordt gehouden om schaduwwerking tegen te gaan en het beheer te vergemakkelijken. Er zijn verschillen tussen zonneparken. Zo zorgt TPSolar er bijvoorbeeld voor dat planten niet hoger dan 60 cm worden en wordt in zonneparken van Novar vrijwel altijd minstens 40 cm ruimte tussen het laagste punt van de zonnepanelen en de vegetatie gehouden (interviews Novar, TPSolar). In enkele zeldzame gevallen is waargenomen dat, bij achterstallig beheer, de vegetatie over de zonnepanelen heen groeit (interview WUR).

In een aantal zonneparken wordt het beheer van de vegetatie ook uitgevoerd met oog voor de biodiversiteit. Aangezien zonneparken vaak op voormalige landbouwgronden worden gerealiseerd, wordt aangeraden om de in het begin rijke bodem te laten verschrallen door te maaien en het maaisel af te voeren, zodat de biodiversiteit kan toenemen (van der Zee et al., 2019). Als maaisel niet wordt afgevoerd wordt de bodem gevoed, waardoor planten die van voedselrijke grond houden snel kunnen blijven groeien. In de praktijk wordt het maaisel echter vaak niet afgevoerd en is er op dit vlak nog veel verbetering mogelijk (interview WUR).

Maaien of begrazen

Zonneparken kunnen machinaal worden gemaaid of door schapen worden begraaasd. Vanuit het oogpunt van biodiversiteit wordt permanente begrazing door schapen afgeraden, omdat de mest verschraling van de bodem tegengaat waardoor kruiden geen kans krijgen om te groeien en de biodiversiteit niet verbetert (interview WUR). Daarnaast zijn schapen selectief in wat zij eten, waardoor distels en brandnetels blijven staan (Schotman et al., 2021; van der Zee et al., 2019).

Onder dicht opeenstaande oost-west georiënteerde zonnepanelen groeit de vegetatie niet snel: onder de panelen hoeft dus minder gemaaid te worden. In deze gesloten opstellingen is het überhaupt lastig om te maaien. Soms wordt het maaisel onder de zonnepanelen geschoven in plaats van het te verwijderen. Het maaisel kan onder de zonnepanelen slecht afgebroken worden door een tekort aan licht en bodemorganismen (interview WUR).

Vanuit het oogpunt van brandveiligheid wordt het wenselijk geacht om de vegetatie in een zonnepark kort te houden (Brandweer Nederland, 2020). Daarentegen zal hoge vegetatie mogelijk beter vocht vasthouden en minder snel uitdrogen dan lage, fijne vegetatie (interview WUR). De frequentie waarmee en het moment waarop gemaaid wordt zijn belangrijk voor het brandgevaar. Vlak voor maaien zal het brandgevaar verschillen van het brandgevaar na maaien - mits het maaisel wordt afgevoerd, want maaisel dat blijft liggen (en uitdroogt) vormt ook een brandgevaar (interview WUR).

In zonneparken in Nederland worden zowel maaien als begrazen toegepast om de vegetatie te beheren (interviews Holland Solar, Novar, TPSolar). Uit het onderzoek van Schotman et al. (2021) bleek dat in 65% van de onderzochte zonneparken werd gemaaid. In de overige zonneparken werd de vegetatie beheerd door middel van begrazing door schapen.

Zo past TPSolar in alle zonneparken begrazing door schapen toe. Hierbij wordt steeds een grote kudde schapen op een wisselend klein, afgebakend stuk van het perceel gezet ('drukbegrazing'), waardoor alle planten opgegeten worden (ook jonge distels en brandnetels) en niet alleen de lekkerste. Na een aantal weken worden de schapen naar een nieuw perceel verplaatst ('sinusbeheer'). Schapen grazen de begroeiing tot ongeveer 5 cm hoog af (interview TPSolar).

Uit de interviews komt het beeld naar voren dat er in zonneparken twee tot drie maal per jaar gemaaid wordt. Het maaisel wordt meestal niet afgevoerd vanwege de hoge kosten en/of omdat het praktisch gezien lastig is (interviews Holland Solar, TPSolar).

In de zonneparken van Novar wordt twee tot drie maal per jaar gemaaid; het maaischema wordt meestal bepaald door observaties tijdens een bezoek aan het park of door schaapherders. Met name onder en naast de zonnepanelen wordt geprobeerd om de vegetatie korter te houden, en in periodes van droogte wordt door Novar extra gemaaid. Het maaisel blijft doorgaans een aantal dagen liggen voordat het wordt afgevoerd. Daarnaast wordt er bij Novar naar gestreefd om niet alle delen tegelijkertijd te maaien, zodat insecten tijd hebben om zich naar andere delen te verplaatsen (interview Novar).

TPSolar maait de eerste twee tot drie jaar regelmatig machinaal als de bodem van een zonnepark vanuit biodiversiteits oogpunt verschaald moet worden. Het maaisel wordt niet direct (maar meestal wel binnen een week) afgevoerd, omdat er geen machines bestaan die zowel tussen de paneelrijen passen, als tegelijk kunnen maaien en het maaisel opvangen. Machines die dit wel tegelijk kunnen, passen niet tussen de paneelrijen. Elk jaar worden delen van het zonnepark in de bloei – en zaadperiode buiten de begrazingscyclus gehouden, zodat zaad gevormd en verspreid wordt en de vegetatie in stand blijft (interview TPSolar).

Bij Rijkswaterstaat wordt in de zonneparken hetzelfde maaieregime gehanteerd als gehanteerd wordt voor de wegbermen, waar omwille van de brandveiligheid en het zicht (verkeersveiligheid) twee keer per jaar gemaaid; na drie dagen wordt het maaisel afgevoerd. In de zonneparken wordt een maaihoogte van 12 centimeter gehanteerd, wat 2 centimeter hoger is dan in de (andere) wegbermen. Rijkswaterstaat houdt wat betreft het maai-beheer geen rekening met droge periodes. Mogelijk zal in de toekomst minder vaak worden gemaaid, als blijkt dat dit niet nodig is omdat door de aanwezigheid van zonnepanelen de vegetatie minder snel groeit (interview RWS; Rijkswaterstaat & Eelerwoude. (z.d.)).

3 Branden in zonneparken: casuïstiek

In dit hoofdstuk worden enkele praktijkvoorbeelden van branden in zonneparken beschreven, om een beeld te krijgen van mogelijke brandoorzaken en brandverloop, gevolgen voor de omgeving, uitdagingen voor de brandbestrijding, en dergelijke (deelvraag 10).

Er is de afgelopen jaren een aantal branden in zonneparken voorgekomen. De drie onderstaande incidenten zijn uitgekozen om verschillende brandoorzaken te illustreren: brand die begint bij de kabels, in een transformator en in het zonnepaneel zelf.¹⁶ Voor zover bekend, zijn er geen branden in zonneparken in Nederland geweest die in de vegetatie van het zonnepark zijn begonnen.

3.1 Brand zonnepark Sas van Gent

De uitwerking van deze casus is, tenzij anders vermeld, gebaseerd op informatie van TBO Zeeland (2022).



Figuur 3.1 Rookontwikkeling tijdens de brand op zonnepark Sas van Gent (TBO Zeeland, 2022)

Korte beschrijving

Dinsdag 19 juli 2022 wordt om 14:46 uur door de machinist van een goederentrein een melding gemaakt bij de meldkamer van een brand in het gras van een zonnepark in Sas van Gent. Binnen 10 minuten is de brandweer ter plaatse. Desondanks kan de brand zich over een afstand van ruim 350 meter en een oppervlakte van ongeveer 5.000 m² verspreiden en

¹⁶ Andere bij het NIPV bekende incidenten zijn een ondergrondse kabelbrand in een zonnepark Dongen in 2021 en een brand in Sneek in 2023 die begon in een omvormer. Zie bijvoorbeeld <https://www.omroepbrabant.nl/nieuws/3967595/grote-brand-zonnepanelenveld-in-dongen-ontstaan-door-overspanning>, <https://112fryslan.nl/brand-in-omvormer-zonnepanelenpark-sneek/>

duurt het bijna twee uur voordat de brand onder controle is. Er ontstaat weinig schade aan de PV-installatie; vooral de vegetatie staat in brand.

Beschrijving van de situatie

Het zonnepark in Sas van Gent, eigendom van Shell, is op voormalige vloeivelden¹⁷ aangelegd. Het park beslaat 24 hectare waarop ruim 55.000 zonnepanelen zijn geplaatst. Deze wekken ongeveer 30 MW energie per jaar op. Voor de stroom van deze panelen zijn er 85 omvormers en 8 transformatoren verspreid aanwezig op het park. Aan de rand van het park staat een hekwerk, waarnaast een calamiteitenweg en een sloot liggen. Aan de andere kant van de sloot ligt de spoorlijn tussen Gent en Terneuzen. Voor een overzicht van het zonnepark, zie figuur 3.2. Er is een kleine vijver op het terrein, die is aangelegd als bron van bluswater. De toegang tot het terrein bevindt zich in aan de noordkant (rechtsboven in figuur 3.2). De brandweer heeft toegang tot het terrein via een deurcode. Op het park groeit voornamelijk gras, dat regelmatig gemaaid wordt. In de sloot buiten het zonnepark staat riet.

Op de dag van de brand is het bijzonder warme: om 15:00 uur was de temperatuur 38,4 °C, bij een relatieve luchtvochtigheid van 14%. Op dit moment komt de wind uit het zuidoosten (130°) met een snelheid van 4 m/s. Tijdens de brand (16:00 uur) draaide de wind naar 120°. De dag daarvoor was ook warme en droog, met temperaturen tot 34,5 °C en overdag een relatieve luchtvochtigheid rond de 20%. De dagen daarvoor waren minder warm met overdag een luchtvochtigheid rond de 45% (KNMI, z.d.).



Figuur 3.2 Luchtfoto van het zonnepark, met in rood het zonnepaneel in rij 37 dat de brand heeft veroorzaakt, in blauw het deel van het terrein dat gebrand heeft en in groen het deel van de sloot dat gebrand heeft. De gele pijl geeft de windrichting aan (TBO Zeeland, 2022).

¹⁷ Een vloeiveld is een groot waterbassin dat gebruikt wordt om sediment dat in riool- of proceswater is opgelost, te laten bezinken. Het zonnepark in Sas van Gent is gerealiseerd op voormalige vloeivelden van suikerfabriek CSM. Bronnen: [Solar Magazine 16 augustus 2021](#); <https://www.shell.nl/over-ons/nieuws/nieuwsberichten-2021/bouw-shell-zonnepark-sas-van-gent-nadert-voltooiing.html>

Wat er heeft gebrand

Op een zonnepaneel in rij 37 was een hotspot aanwezig, zie figuur 3.3 (links). Hier is een onderdeel van het zonnepaneel geëxplodeerd en is een kabel doorgebrand. Als gevolg hiervan valt brandend materiaal naar beneden, dat in het gras onder de zonnepanelen terecht komt en het doet ontbranden, zie figuur 3.3 (rechts). Dit wordt door de op het terrein aanwezige warmtebeeldcamera's bevestigd. De PV-installatie brandt verder niet. Het aanwezige riet aan beide kanten van de sloot brandt wel, zie figuur 3.4 (rechts).



Figuur 3.3 Hotspot onder zonnepaneel in rij 37 (links) en druppels gesmolten materiaal dat van het paneel op de grond is gevallen (rechts) (TBO Zeeland, 2022)

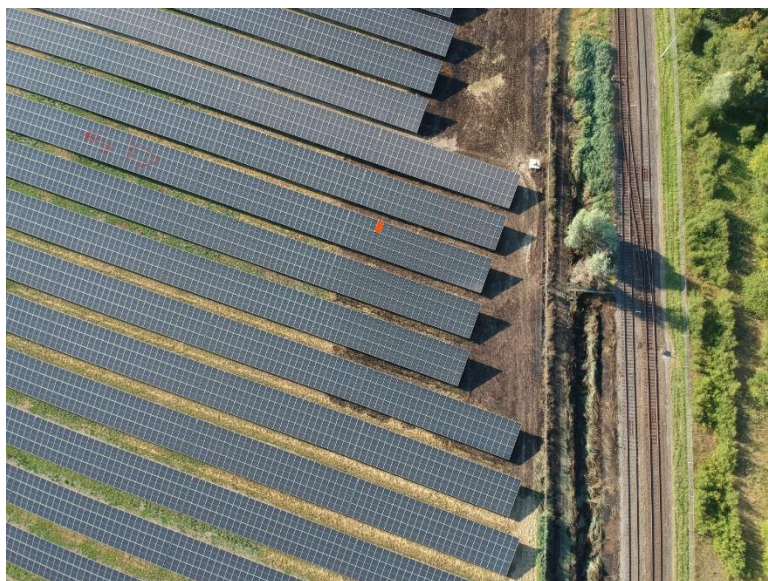


Figuur 3.4 Verbrand gras onder de zonnepanelen (links), verbrand riet in de sloot naast het zonnepark en langs de spoorlijn (rechts) (TBO Zeeland, 2022)

Het brandverloop

Nader onderzoek met behulp van beelden van CCTV-camera's toont aan dat er om 14:07 uur een defect is ontstaan aan het zonnepaneel in rij 37 (er was een rookpluim te zien), waarna een brand zich verspreidt over het gras op de grond. Door de zuidoostenwind en de droogte verspreidt de brand zich snel over een afstand van ongeveer 350 meter. Het gras brandt zowel onder als naast de zonnepanelen. Behalve met de wind mee, verspreidt de brand zich ook enigszins in zuidelijke richting, tegen de wind in. Daarbij beginnen ook planten in de sloot naast het terrein te branden, waar de begroeiing niet regelmatig wordt beheerd. Via de sloot verspreidt de brand zich verder in zuidelijke richting. Uiteindelijk komt de brand weer op het terrein van het zonnepark terecht, waar een klein stukje gras

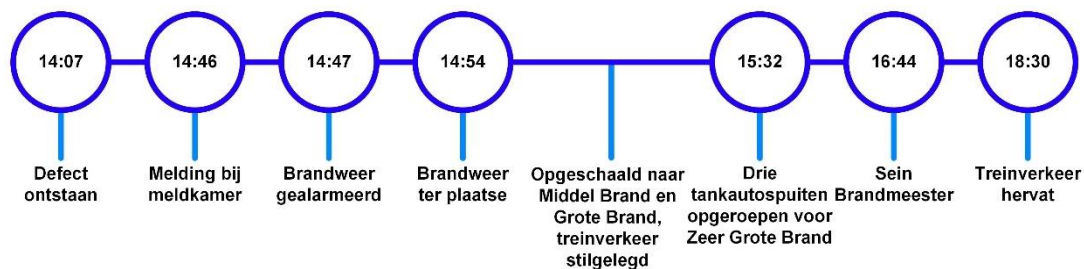
verbrandt. De blauwe en groene markeringen in figuur 3.2 laten zien waar de brand heeft gewoed. Uiteindelijk is zo'n 5.000 m² gras verbrand (zie figuur 3.5).



Figuur 3.5 Dronebeeld van het zonnepark na de brand. Het dronebeeld laat de uitbreiding van de brand zien, zowel op het terrein als in de sloot. Het zonnepaneel waar de brand is ontstaan, is rood gemarkeerd (TBO Zeeland, 2022).

De brandbestrijding

In figuur 3.6 is de tijdlijn van de brand te zien. De brandweer is om 14:47 uur gealarmeerd en is om 14:54 uur ter plaatse. Een treinmachinist die op de spoorweg langs de zonnepark reed, heeft een melding gedaan van een buitenbrand. Het zonnepark wordt op aanvraag uitgeschakeld door de zonneparkexploitant. Er lijken meerdere kleine brandhaardjes te zijn en er wordt geprobeerd deze met vuurzwepen te bestrijden. Dit werkt echter niet. Daarbij draait de wind (van 130° naar 120° om 16:00 uur). De waterwinning is lastig te bereiken vanwege de grote afstand tussen de brandlocatie en de vijver, maar er wel gebruik van gemaakt. De inzetdiepte is bijna 200 meter vanaf de toegangsweg in de midden van het terrein, omdat het niet mogelijk is met de tankautospuiter tussen de rijen zonnepanelen te rijden. Hierom en vanwege de warmte wordt er opgeschaald naar middel brand en later naar grote brand. Vervolgens wordt door ProRail het treinverkeer langs het zonnepark stilgelegd. Om 15:32 uur wordt opgeschaald naar voor zeer grote brand en worden nog drie tankautosputters gealarmeerd. Deze benaderen de brand via de spoorlijn en blussen de brand vanaf de buitenkant van het terrein. Tussen het spoor en het terrein bevindt zich een calamiteitenweg. Deze is echter moeilijk berijdbaar vanwege de sterke plantengroei, zodat de tankautosputters via het spoor moeten rijden. Om 16:44 uur wordt het sein brandmeester gegeven. Rond 18:30 uur kan het treinverkeer hervat worden (Omroep Zeeland, 2022).



Figuur 3.6 Tijdlijn van de brand in het zonnepark Sas van Gent



Figuur 3.7 Bereikbaarheid van de brand. De brand wordt vanaf de buitenzijde van het terrein benaderd. De tankautospuitten rijden over de calamiteitenweg en via het spoor (rechts boven). De calamiteitenweg langs het spoor is sterk begroeid (beneden) (TBO Zeeland, 2022).

Wat er van de casus is geleerd

Hoewel het gras onder de zonnepanelen heeft gebrand, zijn de overige panelen en de bekabeling niet beschadigd. Doordat het gras op het terrein gemaaid was, was het brandvermogen van de vegetatie laag. Er was ruim een halve meter afstand tussen de begroeiing en het laagste punt van de panelen. Daardoor zijn de panelen waarschijnlijk niet in contact met de vlammen gekomen en was de warmtestraling relatief laag. Het maaibeleid op het terrein heeft hoogstwaarschijnlijk dus geholpen om ergere gevolgen van de brand te voorkomen.

Hoewel het dankzij de warmtebeeldcamera's duidelijk was welk zonnepaneel de brand veroorzaakt had, bleek het lastig de juiste locatie te vinden op het grote terrein. Daar kwam bij dat de brand via de toegangswegen op het terrein slecht te bereiken was. De calamiteitenweg aan de buitenzijde van het terrein was slecht beheerd. Dit maakte het noodzakelijk het treinverkeer stil te leggen en de tankautosputten via het spoor dichtbij de brand te rijden.

3.2 Brand zonnepark Lungendonk

Deze uitwerking is, tenzij anders vermeld, gebaseerd op Brandweer Brabant-Zuidoost, 2023.

Korte beschrijving

Op zondag 15 januari 2023 breekt er door onbekende oorzaak brand uit in zonnepark Lungendonk in Lierop. Om 11:34 uur komt een melding bij de brandweer binnen voor een gebouwbrand. Als de brandweer om 11:43 uur ter plaatse komt, blijkt het om een zonnepark te gaan. Er wordt in eerste instantie behoudend opgetreden, omdat er nauwelijks vlammen aanwezig zijn. Later zijn er wel vlammen zichtbaar en wordt er geblust, maar doordat er vlambogen ontstaan, laaien de vlammen telkens weer op. Na het afsluiten van de stroom kunnen de laatste brandjes geblust worden (Algemeen Dagblad, 2023).



Figuur 3.8 Rookontwikkeling tijdens de brand op zonnepark Lungendonk (Incidentonderzoek VRBZO)

Beschrijving van de situatie

Zonnepark Lungendonk in Lierop is een zonnepark met circa 26.000 zonnepanelen, verspreid over 11 hectare (TPSolar, z.d.). Het is gebouwd op grond die tot eind 2020 werd gebruikt als akkerbouwland.

Tussen en onder de zonnepanelen staan grassen en kruiden, die beheerd worden door middel van schapenbeweiding. Wanneer de brand uitbreekt, is het echter winter, zodat de vegetatie onder en naast de zonnepanelen beperkt is. In een deel van het zonnepark is ingezet op het versterken van de biodiversiteit: aan de straatzijde is een 'groenbuffer' geplant tussen de woningen en het zonnepark en aan de westzijde een bosje dat uitloopt in struikgewas rondom het zonnepark (TPSolar, z.d.).

De dag van de brand is fris en vochtig: om 13:00 uur is de temperatuur 6,7 °C bij een relatieve luchtvochtigheid van 75 %. De wind komt uit het zuidwesten (220°) met een snelheid van 11 m/s. De dagen ervoor waren de weersomstandigheden vergelijkbaar (KNMI, z.d.).

Wat er heeft gebrand

De brandweereenheid die het terrein betreedt, ziet op twee plaatsen rook uit de grond komen en vuurverschijnselen bij een aantal kabels. Na enige tijd breiden de vlammen zich uit onder een combinerbox. Ook zijn er kleine brandjes in de vegetatie.



Figuur 3.9 Rookontwikkeling aan de onderkant van een zonnepaneel als gevolg van de ondergrondse kabelbrand (Incidentonderzoek VRBZO)



Figuur 3.10 Inzet van blusschuim na uitbreiding van de brand naar de combinerbox (Incidentonderzoek VRBZO)

Het brandverloop

Door onbekende oorzaak is brand ontstaan in de ondergrondse bekabeling van het zonnepark. Door de hitte treedt in de ondergrondse bekabeling steeds opnieuw aard- of kortsluiting op en ontstaan er vlambogen (zie figuur 3.11), die de brand gaande houden én ervoor zorgen dat de koperen kern van de kabels zo heet wordt dat de kabelisolatie wegsmelt. Hierdoor ontstaan er meerdere sluitingen tussen de ondergrondse kabels, wat zichtbaar is doordat er op meerdere plekken rook uit de grond lijkt te komen (zie figuur 3.8 t/m 3.10). Dit blijkt later vooral stoom te zijn, afkomstig van vocht in de grond dat opgewarmd wordt. De temperatuur van de grond op die locaties was meer dan 80 °C. Uit het incidentonderzoek na afloop van de brand blijkt dat ongeveer 8 meter van de ondergrondse

kabels door de brand verdwenen is (zie figuur 3.12). Dit betekent, dat niet te achterhalen is waar de brand begonnen is.



Figuur 3.11 Vlamboog dichtbij de combinerbox, ingezoomd (Incidentonderzoek VRBZO)

De brandbestrijding

In eerste instantie wordt besloten te wachten op de komst van een deskundige van het bedrijf. Als de brand zich uitbreidt onder een combinerbox (zie figuur 3.9) en de rook de omgeving bedreigt, wordt besloten om toch te blussen met een straal water. Omdat de brand echter steeds blijft opvlammen door ondergrondse sluiting en vlambogen, wordt overgegaan op blussen met een schuimstraal. Hierdoor worden brandjes in de vegetatie geblust. Het blijkt echter dat de (door sluiting in de kabels) telkens weer opvlammende brand niet te blussen is. Daarom wordt de blussing gestaakt. Er wordt via een beeldverbinding contact gezocht met de deskundige, die in het buitenland op vakantie blijkt te zijn. Daarnaast wordt de Officier van Dienst ter plaatse gevraagd.

Op aangeven van de deskundige worden alle combinerboxen een voor een uitgeschakeld door de brandweer. Ook wordt het zonnepark door de netbeheerder losgekoppeld van het centrale elektriciteitsnet. Nu er geen stroom meer door de bekabeling loopt kan er dus geen sluiting meer plaatsvinden. Dit zorgt ervoor dat de bovengrondse brand nu effectief bestreden kan worden, waarbij er wel rekening mee gehouden moet worden dat de zonnepanelen nog steeds spanning leveren.

Een ander risico is dat de omvormers zich op slechts 10 meter afstand van de locatie bevinden waar de brand is ontstaan. Om te voorkomen dat de hitte van de ondergrondse koperen kabels de omvormers zal bedreigen, worden de kabels met behulp van een graafmachine opgegraven. Daarbij wordt de grondtemperatuur met een warmtebeeldcamera gemeten: deze ligt regelmatig boven de 100 °C. Daarom wordt zolang doorgedaan met graven totdat er geen temperatuursverhoging meer meetbaar is. Bij het graafwerk valt op dat hele stukken kabel weggesmolten zijn en dat de grond hier meer op lavasteen lijkt, of op verglaasde grond met daarin restanten van koper.

Om 17:07 uur sluit de brandweer het incident af.



Figuur 3.12 De ondergrondse kabels worden opgegraven. De kabelisolatie is weg gesmolten en de grond is verbrand (Incidentonderzoek VRBZO)

Wat er van de casus is geleerd

Dit incident laat duidelijk zien dat er verschillen zijn tussen het brandweeroptreden bij branden in zonneparken en bij branden met PV-installaties van gebouwen. Naar aanleiding van dit incident heeft Brandweer Brabant-Zuidoost een incidentkaart opgesteld met aanbevelingen voor effectief en veilig optreden bij brand in zonneparken.

3.3 Brand(en) zonnepark Emmeloord

Er hebben twee vergelijkbare branden in transformatorhuizen op een zonnepark bij Emmeloord plaats gevonden. De eerste brand vond plaats op 24 maart 2019.¹⁸ Dit incident wordt in dit rapport niet verder uitgewerkt. De tweede brand vond plaats op 8 april 2020.¹⁹ De onderstaande beschrijving van dit incident is gebaseerd op een ervaringsbericht van Brandweer Flevoland en Brandweer Gooi en Vechtstreek, tenzij anders vermeld.

Korte beschrijving

Op 8 april 2020 staat een transformatorhuis op een zonnepark bij Emmeloord in brand. Het belangrijkste brandbare materiaal aldaar zijn enkele honderden liters olie. De brand gaat gepaard met sterke rookontwikkeling (zie figuur 3.13), maar vanwege de grote afstand tot bewoond gebied is de invloed op de omgeving beperkt. De brandweer laat het transformatorhuis gecontroleerd uitbranden. De brandweerinzet heeft ongeveer drie uur geduurd.

¹⁸ Bron, bijv.: [Brand in schakelstation zonnepanelen bij Emmeloord | Binnenland | gelderlander.nl](#); [Solar Magazine - Productie zonnepark Emmeloord stilgelegd door brand in transformatorhuisje](#).

¹⁹ Bron, bijv.: [Solar Magazine - Opnieuw brand in transformatorhuisje zonnepark Emmeloord](#).



Figuur 3.13 Brand transformatorhuis van zonnepark in Emmeloord in 2020 (Regio 25)

Beschrijving van de situatie

Op het zonnepark bij het industrieterrein De Munt bij Emmeloord zijn 43.500 zonnepanelen geplaatst die gezamenlijk een vermogen hebben van 12,5 MW.²⁰ Langs de oostelijke rand van het park loopt de N331 en op wat grotere afstand ten westen van het park de A6. Op het park groeit voornamelijk gras.

Op de dag van de brand is het relatief warm: van 6 °C in de nacht is het opgewarmd naar 22,6 °C. Als de brand bij de meldkamer wordt gemeld is de temperatuur 20 °C. Van 8 tot 17 uur is het voortdurend zonnig met weinig wolken. Het is relatief windstil met windsnelheden tussen 1 en 2 m/s en de windrichting is noordoost. Op de dag van de brand en de dag daarvoor is geen regen gevallen. De relatieve luchtvochtigheid is 40 tot 50% tijdens de brand (KNMI, z.d.).

Wat er heeft gebrand

Een van de transformatorhuizen op het zonnepark staat in brand. Elk transformatorhuis bevat enkele honderden liters olie die als koelmiddel wordt gebruikt. De olie is de belangrijkste bron van brandbaar materiaal en is tijdens het incident verbrand. Er is geen brand in de vegetatie van het zonnepark geweest.

Het brandverloop

Door onbekende oorzaak is brand ontstaan in het transformatorhuis. Door de verbranding van de olie vindt er sterke rookontwikkeling plaats. De brand heeft zich door de inzet van de brandweer niet verder uit kunnen breiden dan de zonnepanelen in de omgeving dicht bij het transformatorhuis.

De brandbestrijding

Op 8 april 2020 wordt rond 12:00 uur brandweer Emmeloord gealarmeerd voor een brand in een container; later blijkt het te gaan om brand in een transformator op een zonnepark. Aanrijdend wordt al een waterwagen aangevraagd voor voldoende bluswater en wordt de

²⁰ <https://groenleven.nl/projecten/zonnepark-emmeloord/#:~:text=Op%20bedrijventerrein%20De%20Munt%20in.voor%20zo'n%204.000%20huishoudens.>

terreinbeheerder verzocht ter plaatse te komen. Er wordt voor gezorgd dat het transformatorhuis niet langer van stroom wordt voorzien door de zonnepanelen.

Ter plaatse wordt duidelijk dat het transformatorhuis midden op het zonnepark ligt en lastig te bereiken is. Het toegangshek is afgesloten en het terrein langs het zonnepark is drassig. Uiteindelijk wordt het incident bereikt via een fietspad (langs de Kuinderweg) en een loopbrug die door de brandweer over een sloot is gelegd.

In overleg met de terreinbeheerder wordt ervoor gekozen defensief op te treden en de transformator gecontroleerd te laten uitbranden, omdat het risico voor de omgeving door de afstand tot de bebouwing beperkt is én omdat het blussen van een dergelijke brand risico's met zich meebrengt door de grote hoeveelheid olie, de hoge spanning en de aanwezigheid van SF₆-gas (zwavelhexafluoride) in de transformator. Daarnaast zou blussen het nadeel hebben dat de grote hoeveelheid olie uit het transformatorhuis zich in de omgeving zou verspreiden, wat slecht is voor het milieu. De brandweer houdt voldoende afstand tot het transformatorhuis vanwege de hoge spanning en het explosiegevaar.

Er is geprobeerd de zonnepanelen preventief af te dekken met blusschuim om ze tegen de warmtestraling te beschermen, maar het effect is beperkt, omdat het blusschuim van de panelen af glijdt.

Rond 15.00 uur is het vuur gedoofd en kan de brandweer vertrekken.

Wat er van de casus is geleerd

Bij brand in een transformatorhuis moet met verschillende risico's rekening gehouden worden. Een transformator bevat zwavelhexafluoride (SF₆), dat als isolatiegas in hoogspanningsinstallaties wordt gebruikt. Het gas werkt verstikkend. Als het bij brand betrokken raakt, kan het tot vorming van de zeer giftige stof waterstoffluoride (HF) leiden. Bij een brand in een transformatorhuis bestaat er verder explosiegevaar door de brandende olie. Daarom is het cruciaal altijd voldoende afstand te houden. In het algemeen moet daarnaast bij een brand van in een zonnepark altijd met hoge spanning rekening gehouden worden.

Het preventieve afdekken van zonnepanelen met blusschuim om brandschade te voorkomen had niet de gewenste beschermende werking, omdat het schuim van de panelen af glijdt. Daarnaast kunnen grote hoeveelheden blusschuim en water ook grote negatieve effecten op de installatie hebben. Het is belangrijk de aanpak van de incidentbestrijding met de netbeheerder af te stemmen.

3.4 Beschouwing

Op basis van de beschikbare gegevens valt op dat er tot nu toe vrij weinig branden in zonneparken lijken te hebben plaatsgevonden waarbij de brandweer is ingezet. Dit kan te maken hebben met het kleine aantal zonneparken, de toenemende professionalisering van de sector, de grotere aandacht voor veiligheid bij het plaatsen van zonneparken in vergelijking met PV-systemen op daken van woonhuizen en de strenge eisen die verzekeraars stellen aan de eigenaars van zonneparken (interview Zon in Landschap).

Zoals in paragraaf 2.3 beschreven, wordt er in zonneparken niet gemonitord voor branddetectie en kan een brand soms ook onontdekt blijven als er geen rookontwikkeling of branduitbreiding plaatsvindt. Het aantal branden dat daadwerkelijk heeft plaatsgevonden kan daarom verschillen van het aantal bij het NIPV bekende branden. Bij kleine branden in zonneparken wordt de brandweer niet altijd betrokken (Begeleidingscommissie, persoonlijke communicatie 15 juli 2024).

De gevolgen van een brand in een zonnepark kunnen wel groot zijn. Bij een aantal incidenten vond er sterke rookontwikkeling plaats die zich verspreidde richting de bebouwde omgeving of snelwegen. Ook moesten een spoorlijn als gevolg van een brand in een zonnepark tijdelijk worden afgesloten.

4 Branden in zonneparken: modellering

Dit hoofdstuk behandelt de mogelijke verspreiding van brand in de vegetatie van zonneparken, op basis van modelleringen in BehavePlus (2018) (deelvragen 8 en 9). Als eerste worden de gebruikte brandstofmodellen besproken, vervolgens de resultaten van de modelleringen met de verschillende brandstofmodellen en daarna de modellering van de brandverspreiding in de casus van Sas van Gent (19 juli 2022; zie ook paragraaf 3.1). Tot slot worden de resultaten bediscussieerd.

4.1 Nieuwe brandstofmodellen

De verspreiding van brand in de vegetatie van een zonnepark is gemodelleerd met behulp van het programma BehavePlus. Om dat te kunnen doen heeft BehavePlus een aantal invoerparameters nodig die de vegetatie als brandstof karakteriseren (zie bijlagen 5 en 6). Een brandstofmodel is een representatie van de vegetatie en het brandgedrag daarvan: in feite een set invoerparameters die samen de vegetatie als brandstof beschrijven (Andrews, 2018). Uit besprekingen met experts van de WUR bleek dat de brandstofmodellen in de *Brandstofmodellengids* (Tanck & Brouwer, 2023), niet voldoende overeenkomen met de vegetatie die groeit in zonneparken. Zonneparken komen voornamelijk voor op voedselrijke voormalige landbouwgronden. De diverse graslanden die opgenomen zijn in de *Brandstofmodellengids*, zijn vegetaties die in natuurgebieden op arme gronden voorkomen. Ook wanneer in de toekomst in zonneparken de bodem is verschaald en er meer kruidenrijke graslanden voorkomen, zullen die nog steeds een heel andere type zijn dan de graslandmodellen in de *Brandstofmodellengids*. Dit betekent dat geen van de brandstofmodellen die in de *Brandstofmodellengids* staan, representatief is voor de vegetatie in zonneparken in Nederland (interview WUR).

Om de mogelijke verspreiding van brand in de vegetatie van zonneparken toch te kunnen modelleren, is besloten om nieuwe brandstofmodellen te maken die zo representatief mogelijk zijn voor de vegetatie in zonneparken. Hiervoor heeft het NIPV gebruikgemaakt van de bestaande brandstofmodellen uit de *Brandstofmodellengids* (Tanck & Brouwer, 2023), brandstofmodellen uit de Verenigde Staten (Scott & Burgan, 2005) en informatie verkregen van experts van de WUR (persoonlijke communicatie K. Krijgsveld, F. van der Zee en L. Scholten, in juli t/m oktober 2024) en van N. Brouwer van Veiligheids- en Gezondheidsregio Gelderland-Midden (persoonlijke communicatie, juli t/m december 2024).

4.1.1 Brandstofmodellen

Voor dit onderzoek zijn vijf brandstofmodellen gemaakt met verschillende kenmerken; zie tabel 4.1.

- > Deze modellen zijn ten eerste ingedeeld naar de hoogte van de vegetatie: *hoog (H)* en *laag (L)*. Hiervoor is gekozen, omdat een hogere vegetatie meer biomassa bevat dan

een lagere, en omdat er bij een maaibeurt van hogere vegetatie dus ook meer biomassa afgemaaid wordt dan van lagere vegetatie. Het NIPV heeft deze keuze gemaakt op basis van gegevens van experts van de WUR over de biomassa in enkele zonneparken in de zomer en in het najaar (persoonlijke communicatie K. Krijgsveld, F. van der Zee en L. Scholten, juli t/m oktober 2024). Zie bijlage 5 voor een nadere toelichting.

- > Ten tweede is er voor gekozen om de brandstofmodellen in te delen in *voor de maaibeurt (VM)* en *na de maaibeurt (NM)*.
 - *Voor de maaibeurt* houdt in dat op dat moment de vegetatie de maximale hoogte heeft: *hoog (60 centimeter)* of *laag (30 centimeter)*.
 - *Na de maaibeurt* houdt in dat de vegetatie van het zonnepark is gemaaid, maar dat het maaisel niet is opgeruimd. Voor dit uitgangspunt is gekozen omdat, zoals beschreven in paragraaf 2.4.3, het maaisel na de maaibeurt vaak enkele dagen blijft liggen. Het volgende uitgangspunt daarbij is dat het maaisel (dat dan is blijven liggen), volledig uitgedroogd en afgestorven is. Verder is voor een vaste maaihoogte gekozen (12 cm), ongeacht de hoogte van de vegetatie vóór het maaien. Dit betekent, dat als de vegetatie voor het maaien hoog was, de hoeveelheid maaisel groter is en er dus meer uitgedroogde biomassa aanwezig is, dan wanneer de vegetatie voor het maaien laag was.
 - Als laatste is er een brandstofmodel gemaakt waarbij het maaisel wel direct is opgeruimd (MO). Dit brandstofmodel is niet hoogte-afhankelijk, aangezien er op een vaste hoogte wordt gemaaid (12 cm) en het maaisel direct wordt opgeruimd (en dus niet bijdraagt aan de hoeveelheid brandbare biomassa).

In bijlage 5 is de onderbouwing van de waardes die per brandstofmodel worden ingevoerd te vinden, en in bijlage 6 een overzicht van de invoerparameters voor elk brandstofmodel.

Tabel 4.1 Nieuwe brandstofmodellen

	Hoge vegetatie (H)	Lage vegetatie (L)
Voor het maaien (VM)	HVM	LVM
Na het maaien, maaisel blijft liggen (NM)	HNM	LNМ
Na het maaien, maaisel is opgeruimd (MO)		MO

4.2 Resultaten modellering van brandverspreiding in zonneparken

In deze paragraaf worden de resultaten van de modellering in BehavePlus met de nieuwe brandstofmodellen weergegeven. Daarbij zijn de waardes voor de windsnelheid en de ‘dead fuel moisture’ (een maat voor het vochtgehalte van de dode brandstof, dat mede bepaald wordt door de relatieve luchtvochtigheid; zie tabel 4.2 en bijlage 5) gevarieerd. Er is gekozen voor windsnelheden variërend van 1 tot en met 10 m/s en voor dead fuel moisture-waardes van 5% (droge lucht, overeenkomstig met een relatieve luchtvochtigheid van 15% tot 20%) tot en met 20% (overeenkomstig met een relatieve luchtvochtigheid van 60%). Zie tabel 4.2 en bijlage 5 voor verdere toelichting.

In het resultaat van de modelleringen in BehavePlus wordt gekeken naar de

- > branduitbreidingsnelheid (Surface Fire Rate of Spread, ROS),
- > vlamlengte (Surface Fire Flame Length),
- > intensiteit van het vuurfront (Surface Fireline Intensity),
- > brandvermogensdichtheid (Surface Reaction Intensity)
- > vlamverblijftijd (Flame Residence Time).

De term 'surface (fire)' geeft aan dat het om 'loopvuur' gaat: een brand in lage vegetatie, zoals grassen, heide of lage struiken (IFV, 2017).

In dit hoofdstuk worden alleen de resultaten voor de modelleringen met de twee uiterste brandstofmodellen getoond: dit zijn de brandstofmodellen HNM en MO. De resultaten voor alle brandstofmodellen zijn opgenomen in bijlage 7. Let bij het lezen van de grafieken op de schaalverdeling van de Y-as, aangezien deze verschilt per grafiek vanwege de verschillende ordegrrootte in resultaten.

Tabel 4.2 Omzetting van relatieve luchtvochtigheid naar Dead Fuel Moisture.
Bron: NWCG, 2021.

R.H., relatieve luchtvochtigheid; 1-HR F.M, (1 hr) dead fuel moisture.

R.H. %	1-HR F.M. %	10-HR F.M. %	Relative ease of chance ignition and spotting; general burning conditions
>60	>20	>15	Very little ignition; some spotting may occur with winds above 9 mi./h.
45-60	15-19	12-15	Low ignition hazard--campfires become dangerous; glowing brands cause ignition when relative humidity is <50 percent.
30-45	11-14	10-12	Medium ignitability--matches become dangerous; "easy" burning conditions.
26-40	8-10	8-9	High ignition hazard--matches always dangerous; occasional crowning, spotting caused by gusty winds; "moderate" burning conditions.
15-30	5-7	5-7	Quick ignition, rapid buildup, extensive crowning; any increase in wind causes increased spotting, crowning, loss of control; fire moves up bark of trees igniting aerial fuels; long distance spotting in pine stands; dangerous burning conditions.
<15	< 5	< 5	All sources of ignition dangerous; aggressive burning, spot fires occur often and spread rapidly, extreme fire behavior probable; critical burning conditions.

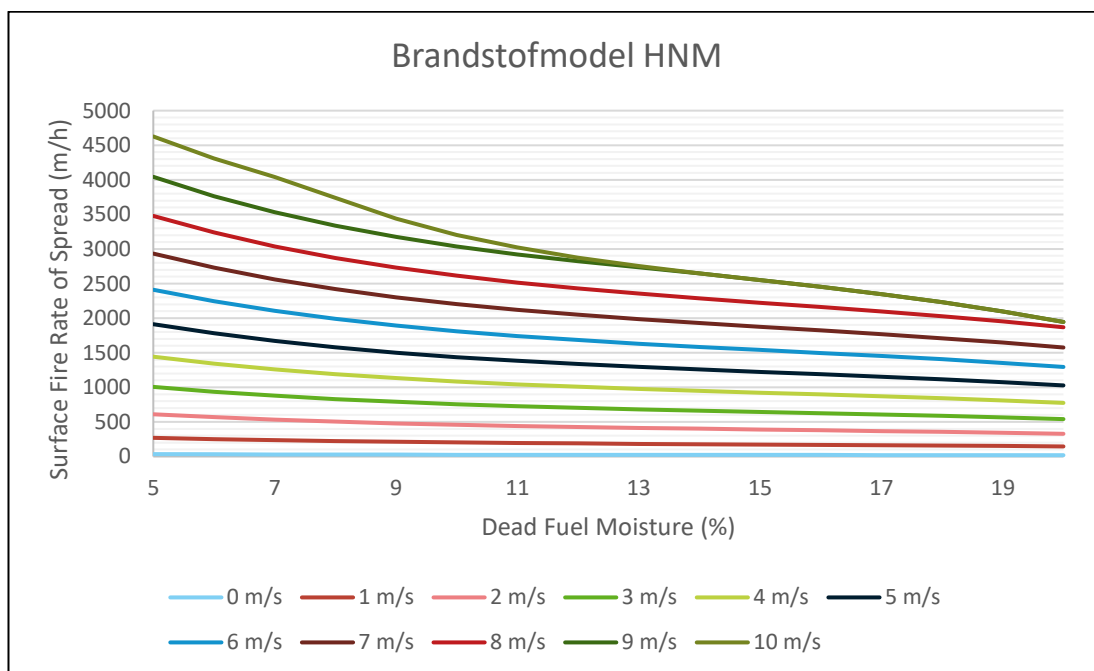
4.2.1 Branduitbreidingssnelheid

In figuur 4.1 zijn de resultaten voor de branduitbreidingssnelheid in meter per uur (m/h) voor brandstofmodel HNM weergegeven en in figuur 4.2 de resultaten voor brandstofmodel MO. In bijlage 7 staan de grafieken voor de branduitbreidingssnelheid voor alle brandstofmodellen.

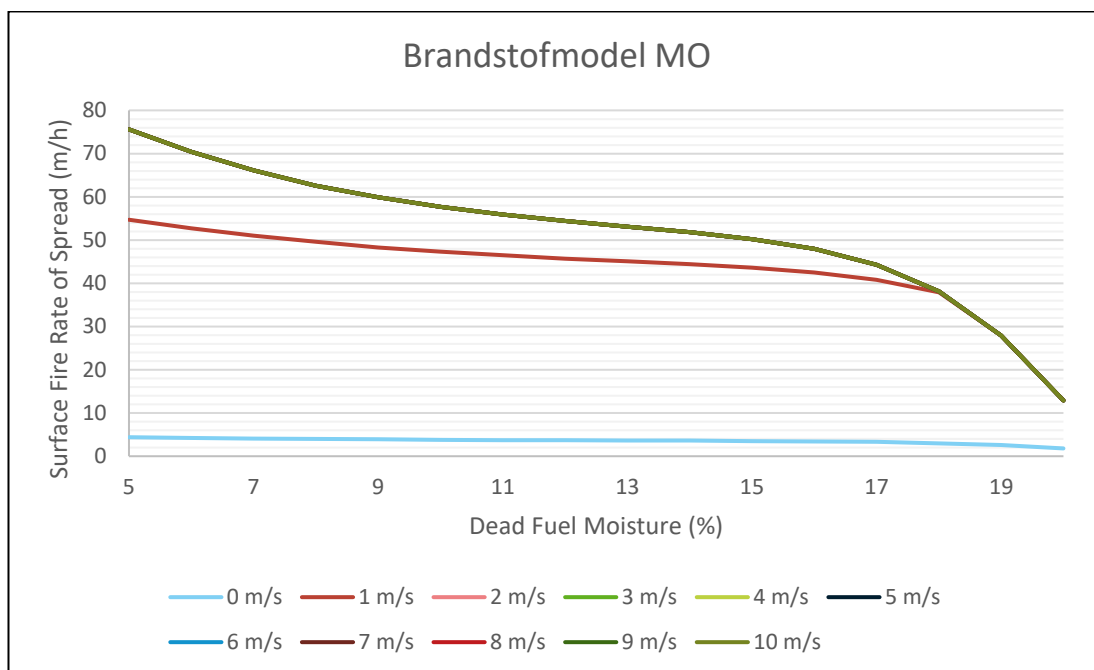
De hoogte van de vegetatie is voor beide brandstofmodellen gelijk, want beide geven de situatie na de maaibeurt weer. Het belangrijkste verschil is dat het maaisel wel (MO) of niet (HNM) is opgeruimd. Dit resulteert in een groot verschil in de branduitbreidingssnelheid: zodra het maaisel wordt opgeruimd, gaat de branduitbreidingssnelheid drastisch omlaag. Het verschil bedraagt een factor 61, onder de meest extreme weersomstandigheden (met een dead fuel moisture van 5% en een windsnelheid van 10 m/s).

Een toename van de wind heeft weinig invloed op de ROS wanneer het maaisel is opgeruimd (MO): bij een snelheid hoger dan 2 m/s blijft de branduitbreidingssnelheid namelijk gelijk (zie figuur 4.2: de grafieken voor windsnelheden 3 m/s tot en met 10 m/s overlappen met die van 2 m/s). Bij het brandstofmodel HNM blijft de branduitbreidingssnelheid toenemen met toenemende windsnelheid. Voor de brandstofmodellen HVM, LVM en LNM verschilt het vanaf welke waarde een toename van de wind geen invloed meer heeft (zie figuur B7.1 t/m B7.4)

De brandstofmodellen 'voor het maaien' (-VM) hebben naar verhouding een lagere ROS dan de brandstofmodellen 'na het maaien' (-NM) (zie bijlage 7, figuur B7.1 t/m B7.5). Het model na het maaien gaat er namelijk vanuit dat het niet opgeruimde maaisel volledig is uitgedroogd en is afgestorven, wat zorgt voor een hogere mate van brandgevoeligheid dan voor het maaien.



Figuur 4.1 Branduitbreidingssnelheid voor brandstofmodel HNM bij verschillende dead fuel moisture-waarden en verschillende windsnelheden (lijnen).

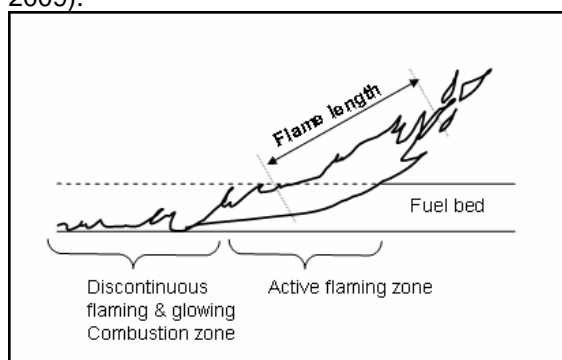


Figuur 4.2 Branduitbreidingsnelheid voor brandstofmodel MO bij verschillende dead fuel moisture-waarden en verschillende windsnelheden (lijnen) (de grafieken voor windsnelheden 3 m/s tot en met 10 m/s overlappen met die van 2 m/s).

Wanneer de vegetatie hoog is - dus in de brandstofmodellen HVM en HNM - ligt de branduitbreidingsnelheid in beide gevallen hoger dan wanneer de vegetatie laag is (LVM en LNM) (zie bijlage 7, figuur B7.1 t/m B7.5).

4.2.2 Vlamlengte

De vlamlengte is de lengte van de vlam, gemeten vanaf halverwege de actieve brandzone ('active flaming zone') tot aan de gemiddelde top van de vlammen, zie figuur 4.3 (Andrews, 2009).

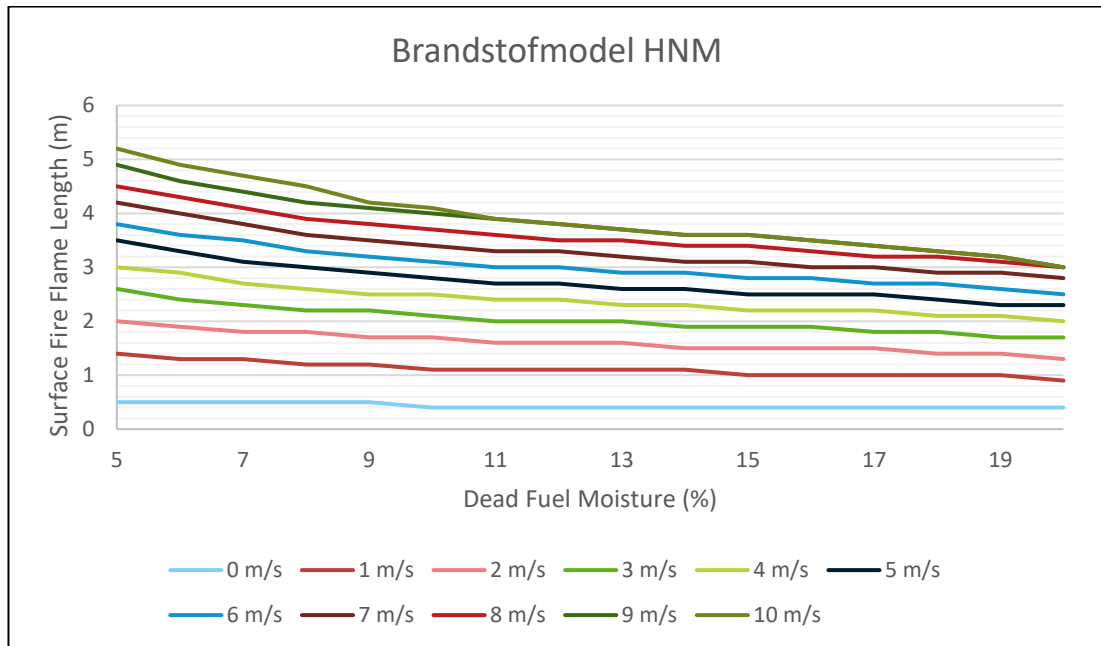


Figuur 4.3 Vlamlengte (Andrews, 2009)

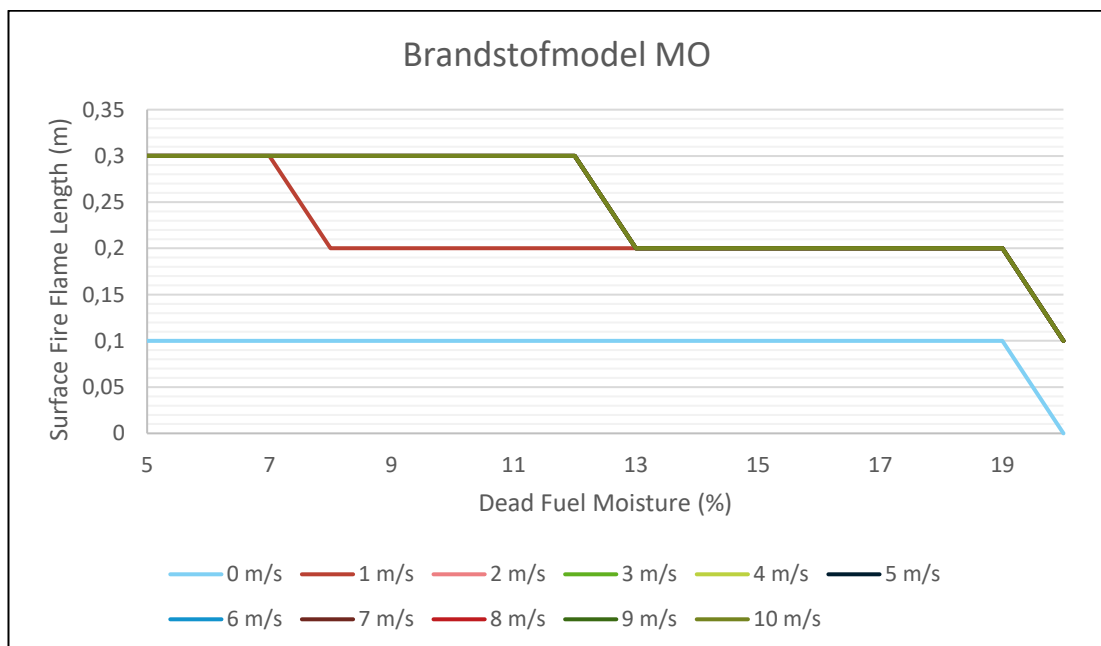
Onder extreme weersomstandigheden (dead fuel moisture van 5% en windsnelheid van 10 m/s) is de maximale vlamlengte 5,2 m bij het brandstofmodel HNM, zie figuur 4.4. Onder dezelfde omstandigheden is de vlamlengte bij brandstofmodel MO 0,3 meter, zie figuur 4.5. Dit verschil bedraagt een factor 17. Dit laat zien dat er ook voor de vlamlengte een aanzienlijk verschil is tussen de situatie wanneer het maaisel is opgeruimd (MO) en wanneer het maaisel blijft liggen (HNM).

De vlamlengte is wat hoger wanneer de vegetatie hoog is (brandstofmodellen HVM en HNM) dan wanneer de vegetatie laag is (brandstofmodellen LVM en LNM), (zie bijlage 7, figuur B7.6 t/m B7.9).

De wind krijgt invloed op de vlamlengte wanneer er meer brandstof beschikbaar is, en hoe hoger de windsnelheid, des te hoger de vlamlengte: de meeste invloed heeft de wind op brandstofmodel HNM, vervolgens op HVM, LNM, LVM en de minste invloed op MO. Zie bijlage 7, figuur B7.6 t/m B7.10.



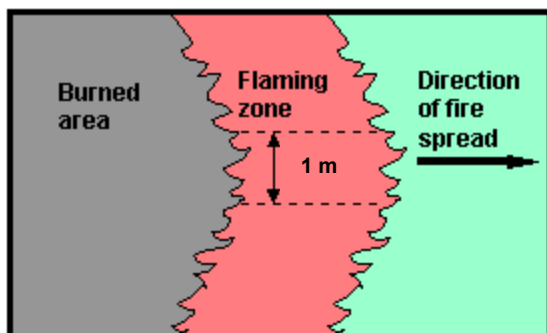
Figuur 4.4 De vlamlengte voor het brandstofmodel HNM bij verschillende dead fuel moisture-waarden en verschillende windsnelheden (lijnen).



Figuur 4.5 De vlamlengte voor het brandstofmodel MO bij verschillende dead fuel moisture-waarden en verschillende windsnelheden (lijnen).

4.2.3 Intensiteit van het vuurfront

De intensiteit van het vuurfront (in kW/m) is de warmte-energie die vrijkomt per tijdseenheid uit het gehele brandstofbed van de brandzone ('flaming zone') over een breedte van 1 meter; zie figuur 4.6 (Andrews, 2009).



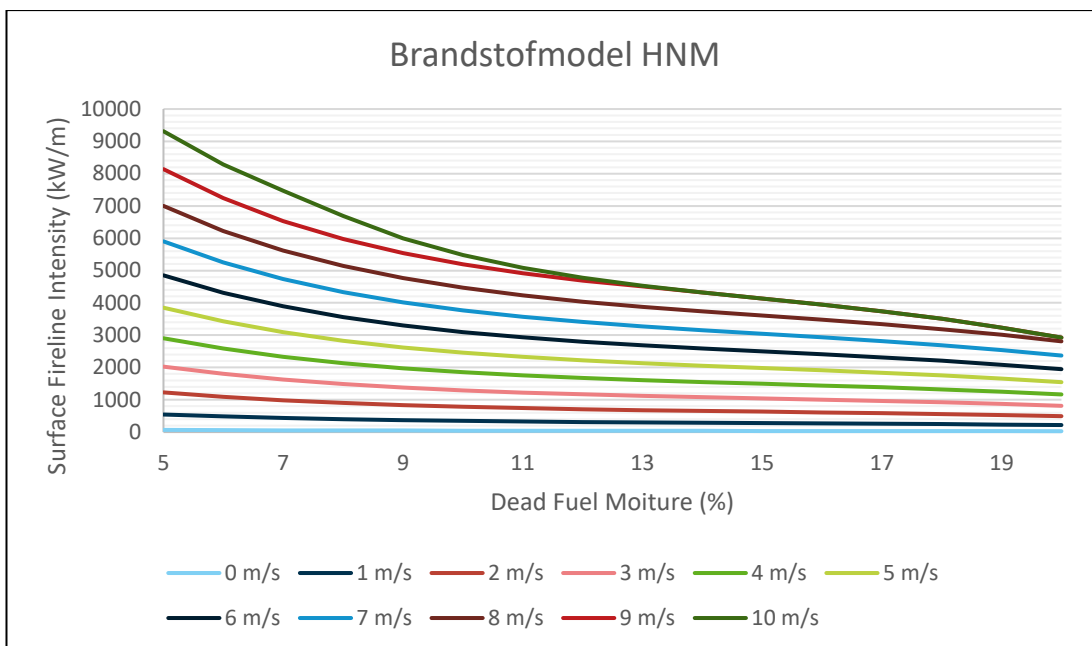
Figuur 4.6 Intensiteit van het vuurfront (Andrews, 2009)

Voor de intensiteit van het vuurfront is er een groot verschil te zien tussen het laten liggen van het maaisel (HNM) en direct opruimen van het maaisel (MO). De maximale intensiteit van het vuurfront is 9.313 kW/m bij het brandstofmodel HNM (figuur 4.7): dit is onder de meest extreme weersomstandigheden. Bij het brandstofmodel MO is de intensiteit van het vuurfront dan 21 kW/m, zie figuur 4.8. Het verschil bedraagt een factor 444.

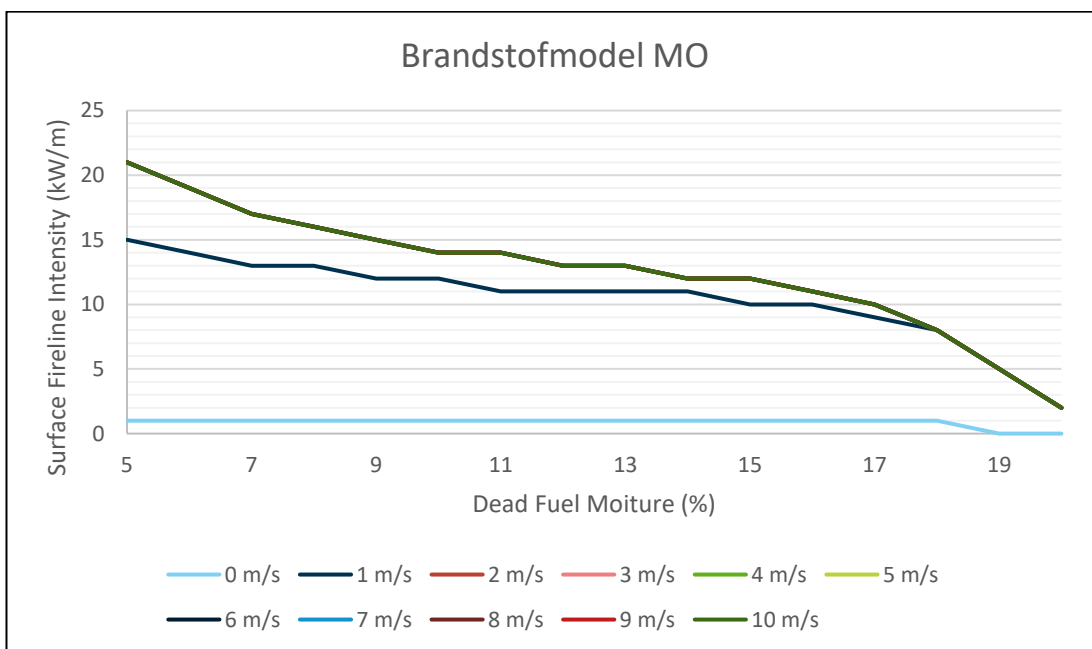
Wanneer de vegetatie nog niet is gemaaid (VM), ligt de intensiteit van het vuurfront lager dan wanneer de vegetatie wel is gemaaid (NM); zie bijlage 7. Onder de meest extreme omstandigheden is de intensiteit van het vuurfront voor brandstofmodel HVM 3.268 kW/m (figuur B7.11), voor brandstofmodel LVM 462 kW/m (figuur B7.14) en voor brandstofmodel LNM 1.114 kW/m (figuur B7.14).

Wanneer de vegetatie hoog is (brandstofmodellen HVM en HNM) is de intensiteit van het vuurfront hoger dan wanneer de vegetatie laag is (LVM en LNM); zie bijlage 7, figuur B7.11 t/m B7.14).

Een hogere windsnelheid leidt tot een hogere intensiteit van het vuurfront voor brandstofmodel HNM (zie figuur 4.7). Wanneer het maaisel is opgeruimd (MO), neemt de intensiteit van het vuurfront niet meer toe als de windsnelheid hoger wordt dan 2 m/s (zie figuur 4.8). Voor de overige brandstofmodellen ligt de afhankelijkheid van de windsnelheid hier tussen in, zie bijlage 7, figuur B7.11 t/m B7.13. Wanneer er minder uitgedroogde brandstof aanwezig is, heeft een toename van de windsnelheid minder effect.



Figuur 4.7 De intensiteit van het vuurfront voor het brandstofmodel HNM bij verschillende dead fuel moisture-waardes en verschillende windsnelheden (lijnen).



Figuur 4.8 De intensiteit van het vuurfront voor het brandstofmodel MO bij verschillende dead fuel moisture-waardes en verschillende windsnelheden (lijnen).

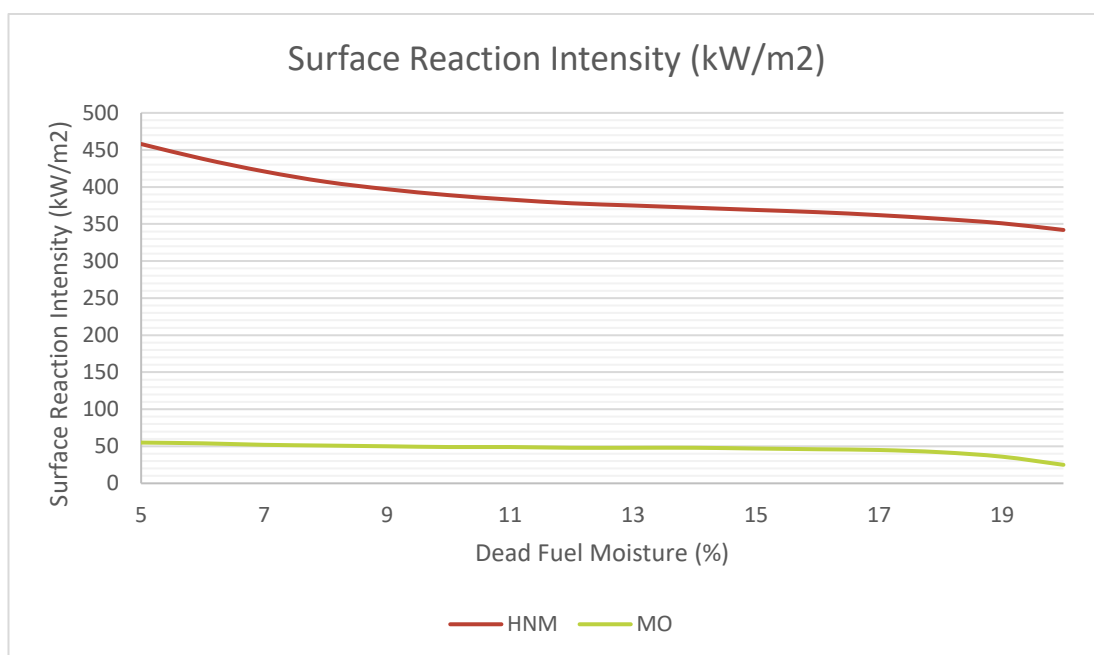
4.2.4 Brandvermogensdichtheid

De brandvermogensdichtheid, oftewel het brandvermogen per oppervlakte-eenheid, staat voor de totale warmte-energie die per tijdseenheid en per oppervlakte-eenheid vrijkomt uit het vuurfront. Deze wordt uitgedrukt in kW/m². De brandvermogensdichtheid is onafhankelijk van de windsnelheid (Andrews, 2009; Andrews, 2018).

De brandvermogensdichtheid omvat convectie, geleiding en straling (in alle richtingen). De warmtestraling neemt af met toenemende afstand tot de bron; dit gebeurt volgens de kwadratenwet (zie bijvoorbeeld Baaij et al., 2023). Het aandeel straling bedraagt circa 30% (Brandweeracademie, 2018).

In figuur 4.9 is de brandvermogensdichtheid voor brandstofmodel HNM en brandstofmodel MO weergegeven. De brandvermogensdichtheid neemt af met een toenemende dead fuel moisture (en dus relatieve luchtvochtigheid) zoals ook beschreven door Andrews (2018). Voor brandstofmodel HNM is de brandvermogensdichtheid beduidend hoger dan voor brandstofmodel MO. Bij een dead fuel moisture van 5% bedraagt het verschil een factor 5. De waarden voor de brandvermogensdichtheid voor de brandstofmodellen HVM, LVM en LNM liggen tussen deze uiterste brandstofmodellen in (zie bijlage 7: B7.16)

Ter vergelijking enkele voorbeelden voor de (referentie-)brandvermogensdichtheid voor gebouwfuncties (uit: *Handboek gebouwbrandbestrijding*, Baaij et al., 2023). Voor een gebouw met woonfunctie, kantoorfunctie, gezondheidszorg (slaapkamer) en onderwijsfunctie (klaslokaal) bedraagt de brandvermogensdichtheid 250 kW/m²; voor een gebouw met industriefunctie (opslag, per meter opslaghoogte) en winkelfunctie (bouwmarkt, per meter opslaghoogte) 500 kW/m².



Figuur 4.9 De brandvermogensdichtheid voor brandstofmodellen HNM en MO bij verschillende dead fuel moisture-waarden.

4.2.5 Vlamverblijftijd

De vlamverblijftijd is de verblijftijd van het vuurfront (deze heeft alleen betrekking op de fijne brandstoffen die de brandverspreiding 'dragen', niet op het vuur achter het vuurfront (Andrews, 2009; Andrews, 2018). In tabel 4.3 zijn de resultaten van de berekeningen te lezen. Per brandstofmodel is er een en dezelfde vlamverblijftijd: deze is dus onafhankelijk van windsnelheid en dead fuel moisture (weersomstandigheden) en hangt alleen af van de eigenschappen van de brandstof. De brandstofmodellen HVM, LVM en MO hebben dezelfde

verblijftijd (18 s). Voor deze brandstofmodellen trekt het vuurfront 2 seconden minder snel over de vegetatie dan voor de brandstofmodellen HNM en LNM. Het verschil wordt dus bepaald door de aan- of afwezigheid van maaisel op de grond: wanneer er maaisel op de grond ligt, is de Flame Residence Time korter.

Tabel 4.3 De vlamverblijftijd per brandstofmodel

Brandstofmodel	Vlamverblijftijd (s)
Brandstofmodel HVM	18
Brandstofmodel HNM	16
Brandstofmodel LVM	18
Brandstofmodel LNM	16
Brandstofmodel MO	18

4.2.6 Classificering van natuurbranden

Natuurbranden kunnen worden onderverdeeld in klassen: internationaal wordt hiervoor gebruikgemaakt van de 'wildfire events classification', die vanuit internationaal perspectief voor natuurbranden is opgesteld (Tedim et al., 2018). Aan de hand van de intensiteit van het vuurfront, de vlamlengte en de branduitbreidingsnelheid (meter/minuut) kan bepaald worden onder welke klasse natuurbrand (*fire category*, brandcategorie) de brand wordt geschaald, volgens figuur 4.10. Daarbij wordt nadrukkelijk opgemerkt dat deze factoren niet de enige zijn die de beheersbaarheid van een natuurbrand bepalen: dat hangt ook sterk af van factoren als de bereikbaarheid, beschikbaarheid van bluswater, niveau van organisatie en training van de brandweer et cetera. Het doel van deze 'wildfire events classification' is om inzicht te krijgen in de dynamiek en de beheersbaarheid van de natuurbrand (Tedim et al., 2018, Brandweer Nederland, 2023).

Op basis van de gemodelleerde intensiteit van het vuurfront (figuur 4.8), branduitbreidingsnelheid (figuur 4.2) en vlamlengte (figuur 4.5) vallen alle gemodelleerde branden voor het brandstofmodel MO onder brandcategorie 1. Dit geldt ook voor brandstofmodel LVM (figuur B7.13, B7.3 en B7.8). De uitkomsten van alle berekeningen voor brandstofmodel LNM (figuur B7.14, B7.4 en B7.9) vallen in brandcategorie 1 en in brandcategorie 2, afhankelijk van de windsnelheid en de dead fuel moisture. Voor brandstofmodel HVM (figuur B7.11, B7.1 en B7.6) vallen de uitkomsten van de meeste berekeningen binnen brandcategorie 2 en enkele in brandcategorie 1 en 3. Voor brandstofmodel HNM (figuur 4.7, 4.1 en 4.4) valt een groot deel van de uitkomsten in brandcategorie 4.

De categorieën waartoe de berekende resultaten behoren, vallen onder de *normal fires* (zie figuur 4.10). De branden die in brandcategorieën 1 en 2 vallen, zijn relatief makkelijk te bestrijden, en die in brandcategorieën 3 en 4 moeilijker te bestrijden. *Hierbij moet nadrukkelijk wel het volgende opgemerkt worden:*

- > De branden in de vegetatie van zonneparken worden in dit onderzoek beschouwd als een natuurbrand. Bij een natuurbrand is er continuïteit in de brandstof. Bij zonneparken

is de continuïteit in brandstof beperkt, aangezien er minder planten onder de zonnepanelen groeien (zie paragrafen 2.4.1 en 2.4.2). Daardoor kan de intensiteit van de branden naar verwachting lager uitvallen dan de hierboven bepaalde natuurbrandcategorieën.

- > De beheersbaarheid van een brand wordt niet alleen bepaald door de factoren die de wildfire events classification bepalen (intensiteit van het vuurfront, vlamlengte en branduitbreidingsnelheid); maar ook door factoren als de bereikbaarheid van de brand en de mogelijkheden voor de brandbestrijding. Hier houdt de wildfire events classification (tabel 4.10) geen rekening mee. De natuurbranden die in Nederland tot nu toe zijn voorgekomen, behoren alle tot de categorie 'normal fires'. Daaronder waren diverse natuurbranden die de brandweer voor forse uitdagingen heeft gesteld (zoals de brand in de Peel in 2020): branden in de categorie 'normal fires' moeten dus niet onderschat worden (Begeleidingscommissie, persoonlijke communicatie 12 december 2024).

Fire Category	Real Time Measurable Behavior Parameters			Real Time Observable Manifestations of EFB				Type of Fire and Capacity of Control *	
	FLP* (kWm ⁻¹)	ROS (m/min)	FL (m)	PyroCb	Downdrafts	Spotting Activity	Spotting Distance (m)		
Normal Fires	1	<500	<5 ^a <15 ^b	<1.5	Absent	Absent	Absent	0	Surface fire Fairly easy
	2	500–2000	<15 ^a <30 ^b	<2.5	Absent	Absent	Low	<100	Surface fire Moderately difficult
	3	2000–4000	<20 ^c <50 ^d	2.5–3.5	Absent	Absent	High	≥100	Surface fire, torching possible Very difficult
	4	4000–10,000	<50 ^c <100 ^d	3.5–10	Unlikely	In some localized cases	Prolific	500–1000	Surface fire, crowning likely depending on vegetation type and stand structure Extremely difficult
Extreme Wildfire Events	5	10,000–30,000	<150 ^c <250 ^d	10–50	Possible	Present	Prolific	>1000	Crown fire, either wind- or plume-driven Spotting plays a relevant role in fire growth Possible fire breaching across an extended obstacle to local spread Chaotic and unpredictable fire spread Virtually impossible
	6	30,000–100,000	>300	50–100	Probable	Present	Massive Spotting	>2000	Plume-driven, highly turbulent fire Chaotic and unpredictable fire spread Spotting, including long distance, plays a relevant role in fire growth Possible fire breaching across an extended obstacle to local spread Impossible
	7	>100,000 (possible)	>300 (possible)	>100 (possible)	Present	Present	Massive Spotting	>5000	Plume-driven, highly turbulent fire Area-wide ignition and firestorm development non-organized flame fronts because of extreme turbulence/vorticity and massive spotting Impossible

Note: ^a Forest and shrubland; ^b grassland; ^c forest; ^d shrubland and grassland; *FLI classes 1–4 follow the classification by Alexander and Lanoville [125].

Figuur 4.10 Internationale natuurbrandclassificaties op basis van brandgedrag en beheersbaarheid ('type of fire' and 'capacity of control'). Bron: Tedim et al. 2018 (zie ook Brandweer Nederland, 2023).

4.3 Modelling brand zonnepark Sas van Gent (2022)

Als validatie is er gekeken of de resultaten van de modellering met de nieuwe brandstofmodellen overeenkomen met de brand in het zonnepark in Sas van Gent in de zomer van 2022 (zie ook paragraaf 3.1). Tijdens deze brand was de windsnelheid 4 m/s en de relatieve luchtvochtigheid 14%, overeenkomstig met een waarde van 5% voor de dead fuel moisture (bepaald met behulp van tabel 4.2). De status van de vegetatie, dat wil zeggen in welke mate de vegetatie vocht bevatte dan wel afgestorven en uitgedroogd was door een voorafgaande periode van droogte, is onbekend. In de brandstofmodellen waarbij geen uitgedroogd maaisel aanwezig is (HVM, LVM en MO) is hiervoor de aanname gedaan dat er geen door of liggend afgestorven plantenmateriaal aanwezig is (zie bijlage 5 en 6) maar afhankelijk van de weeromstandigheden in de voorafgaande periode kan deze meer of minder goed passen bij de daadwerkelijke status van de vegetatie.

Met deze waarden voor de windsnelheid en dead fuel moisture zijn voor elk brandstofmodel de branduitbreidingsnelheid, de intensiteit van het vuurfront, de vlamlengte, de

brandvermogensdichtheid en de vlamverblijftijd gemodelleerd. Verder is voor elke brand bepaald tot welke klasse volgens de *wildfire events classification* de brand behoort (Tedim et al., 2018). De resultaten staan in tabel 4.4.

Tabel 4.4 Resultaten modellering brand in zonnepark Sas van Gent (2022)

	HVM	HNM	LVM	LNМ	MO
Branduitbreidingssnelheid (m/h)	1.341	1.443	629	847	76
Intensiteit van het vuurfront (kW/m)	1.819	2.904	462	871	21
Vlamlengte (m)	2,4	3,0	1,3	1,7	0,3
Brandvermogensdichtheid (kW/m²)	271	458	147	228	55
Vlamverblijftijd (s)	18	16	18	16	18
Wildfire Events Classification (volgens Tedim et al. (2018))	2	3	1	2	1

De brand in het zonnepark in Sas van Gent is in bijna 2 uur tijd ruim 350 meter uitgebreid. Dit komt overeen met een gemiddelde branduitbreidingssnelheid van 175 m/h, wat tussen het resultaat voor brandstofmodellen LVM en MO in ligt. Bij vergelijking met de uitkomsten van de modellering (tabel 4.3) moet met het volgende rekening gehouden worden:

- > De vegetatie die voornamelijk heeft gebrand, is gras. De brand heeft zich echter ook uitgebreid in de sloot waar riet groeide. Dit riet was een stuk hoger dan de gras in het zonnepark.
- > Daarnaast heeft de brandweer ingegrepen, waardoor de brand zich minder zal hebben uitgebreid dan zonder brandweerinzet. De brandbestrijding kan niet gemodelleerd met BehavePlus.
- > Ook het mogelijke effect van de aanwezigheid van zonnepanelen op de ontwikkeling van de brand in de vegetatie onder de zonnepanelen (denk aan het ophopen van warmte onder de panelen), kan niet worden meegenomen in de modellering met BehavePlus.

Hoe groot de effecten van het bovenstaande zijn, en wat het netto resultaat daarvan is, is niet te zeggen.

In hoofdstuk 3.1 is aangegeven dat de vegetatie in het zonnepark kort was. Welke lengte de vegetatie exact had, is niet bekend. Daarnaast is op de foto's in figuur 3.4 te zien dat er geen maaisel ligt.

Het brandstofmodel dat het meest overeenkomt met deze beschrijving is brandstofmodel MO (maaisel opgeruimd). De vegetatie heeft volgens het brandstofmodel dan een hoogte van 12 cm; als deze in de werkelijkheid hoger was, zouden de waardes voor de branduitbreidingssnelheid en de overige parameters hoger liggen dan de waardes voor brandstofmodel MO in tabel 4.3.

Bij brandstofmodel LVM heeft de vegetatie een hoogte van 32 cm en liggen de waardes beduidend hoger (tabel 4.3). De branduitbreidingssnelheid van brandstofmodel MO is

76 meter per uur. Wanneer deze brand twee uur zou duren, zou de brand volgens dit brandstofmodel in 2 uur tijd 152 meter zijn uitgebreid. Deze waarde ligt een stuk lager dan de waargenomen branduitbreiding, maar in de werkelijkheid heeft de brand zich ook een groot gedeelte in de vegetatie in de sloot uitgebreid, waar de vegetatie (riet) zoals hierboven beschreven, hoger was.

De categorieën volgens de wildfire events classification waartoe de berekende resultaten behoren, vallen onder de 'normal fires' (zie figuur 4.10). In de expertbijeenkomst op 26 november 2024 (zie hoofdstuk 5) werd opgemerkt dat branden zoals gepresenteerd in tabel 4.3 in principe goed te bestrijden zijn; maar zoals hierboven beschreven, zijn er meer factoren die de beheersbaarheid van de brand bepalen (zoals, onder andere, de bereikbaarheid en de bluswatervoorziening) en die de bestrijding van een 'normal fire' wel degelijk moeilijk of problematisch kunnen maken.

4.4 Discussie

Een model is een benadering van de werkelijkheid. Dat de uitkomst van de modellering niet exact overeenkomt met de praktijk, is te verwachten: er zijn factoren die de brandontwikkeling in de vegetatie kunnen beïnvloeden, maar die niet meegenomen kunnen worden in de modellering. Het is van belang te beseffen dat de gepresenteerde modellering van brand in de vegetatie van zonneparken beperkingen heeft. Denk hierbij aan het volgende:

- > De nieuwe brandstofmodellen voor de vegetatie van zonneparken zijn puur theoretische modellen en niet gebaseerd op uitgebreide metingen en brandstofonderzoek in het veld zoals de brandstofmodellen in de *Brandstofmodellengids* (Tanck & Brouwer, 2023).
- > De brandstofmodellen gaan ervan uit dat alle vegetatie in het zonnepark precies hetzelfde is en precies even hoog is; in werkelijkheid is de vegetatie in zonneparken waarschijnlijk niet zo homogeen en zal er een verschil bestaan tussen de vegetatie onder de zonnepanelen en elders in het zonnepark.
- > Voor de status van de vegetatie wordt in de brandstofmodellen een vaste aanname gedaan: er wordt dus geen rekening gehouden met het effect op het vochtgehalte van een eventuele periode van droogte voorafgaand aan de brand.
- > Het effect van de zonnepanelen op licht en lucht- en bodemvochtigheid onder de panelen, en daardoor op de vegetatie onder de panelen, is onbekend, en is dus niet meegenomen in de modellering. De nieuwe brandstofmodellen omvatten alleen grasachtige en kruidachtige planten en geen andere soorten die wellicht ander brandgedrag vertonen.
- > Er is als uitgangspunt gekozen dat de weersomstandigheden gedurende de hele brand hetzelfde blijven (windsnelheid, luchtvochtigheid).
- > Het effect van de aanwezigheid, afmetingen, oriëntatie en helling van de zonnepanelen op de windsnelheid is onbekend, en is dus niet meegenomen in de modellering.
- > De aanwezigheid van objecten zoals zonnepanelen en de effecten die die objecten op het brandverloop kunnen hebben, kunnen niet gemodelleerd worden met BehavePlus.
- > De brandbestrijding kan niet gemodelleerd worden met BehavePlus.
- > Daarnaast heeft het NIPV extra brandrisico's, zoals de aanwezigheid van een EOS in een zonnepark, buiten beschouwing gelaten.

Ondanks deze beperkingen kan gesteld worden dat de branduitbreidingsnelheid voor brandstofmodel MO redelijk in de buurt komt van de waargenomen snelheid van branduitbreiding bij de brand in het zonnepark van Sas van Gent.

Bij de brand in Sas van Gent zijn de zonnepanelen niet aangetast door de brand. Was het brandvermogen van deze brand in theorie hoog genoeg om zonnepanelen te laten ontbranden? De modellering met brandstofmodel MO resulteert bij de weersomstandigheden tijdens de bewuste brand in een brandvermogensdichtheid van 55 kW/m² en een vlamverblijftijd van 18 seconden (zie tabel 4.4). In figuur 2.5 is te zien dat de tijd voor het ontbranden van zonnepanelen bij 55 kW/m² iets minder dan een minuut bedraagt. Op basis van deze vergelijking zou geconcludeerd kunnen worden dat de brandvermogensdichtheid voor brandstofmodel MO onvoldoende was om de zonnepanelen te doen ontbranden. Het is echter bekend wat de brandvermogensdichtheid *ter hoogte van de zonnepanelen* was, omdat niet bekend is wat de afstand tussen de zonnepanelen en de brand was. De warmtestraling (en dus ook de brandvermogensdichtheid) neemt kwadratisch af met de afstand tot de bron (zie bijvoorbeeld Baaij et al., 2023). In theorie zou dus berekend kunnen worden hoeveel de warmtestraling op een bepaald punt op de zonnepanelen bedraagt, en zou vervolgens een schatting gemaakt kunnen worden van de brandvermogensdichtheid op dat punt (ervan uitgaand dat het aandeel warmtestraling in de brandvermogensdichtheid circa 30% bedraagt (Brandweeracademie, 2018)). Daarbij zouden echter zoveel aannames gedaan moeten worden (onder andere over de vlamlengte, de afstand tot de zonnepanelen, het aandeel warmtestraling), dat de uitkomst van een dergelijke berekening onvoldoende onderbouwd en daarmee zeer discutabel zou zijn; daarom is besloten deze berekening achterwege te laten.

De veel hogere waarde voor de brandvermogensdichtheid voor het brandstofmodel voor hoge vegetatie waarbij het (uitgedroogde) maaisel blijft liggen – HNM - suggereert dat het onder bepaalde condities wel denkbaar kan zijn dat een brand in de vegetatie zoveel vermogen levert dat de zonnepanelen in brand kunnen raken. Hierbij moet gedacht worden aan een periode van extreme en/of langdurige droogte, een (zeer) lage relatieve luchtvochtigheid is, en hoge vegetatie die relatief weinig vocht bevat of gemaaide vegetatie waarbij uitgedroogd maaisel is blijven liggen.

5 Handelingsperspectief voor veiligheidsregio's

De resultaten van het onderzoek, beschreven in de voorgaande hoofdstukken van dit rapport, zijn besproken met een groep van experts op het gebied van natuurbrandbestrijding en/of PV-systemen (zie bijlage 8 voor een lijst van de experts). Tijdens deze expertbijeenkomst werden de resultaten bediscussieerd aan de hand van enkele stellingen. Het ging daarbij om de betekenis van de resultaten van het onderzoek voor brandrisicobeheersing en brandbestrijding in zonneparken, en voor de advisering door de veiligheidsregio's daarover (deelvraag 14). In dit hoofdstuk worden de uitkomsten van de expertbijeenkomst beschreven; waar aangegeven aangevuld met input van de begeleidingscommissie (persoonlijke communicatie, 12 december 2024).

5.1 Risicobeheersing

In paragraaf 2.3 van dit rapport is een en ander beschreven over de mogelijke effecten van een brand in een zonnepark en over de maatregelen die de eigenaar van een zonnepark *kan* treffen om brand te voorkomen, branduitbreiding te beperken en brandbestrijding mogelijk te maken. Deze maatregelen zijn afkomstig uit de *Handreiking Risicobeheersing Advies Veilige PV-systemen* van Brandweer Nederland (2020b).

Door de experts wordt opgemerkt dat de genoemde maatregelen, adviezen zijn en geen voorschriften of eisen. Een zonnepark is een 'bouwwerk geen gebouw zijnde' ([Besluit bouwwerken leefomgeving](#)), er hoeven geen mensen te kunnen vluchten en er is geen wettelijke basis om eisen te kunnen stellen aan de inrichting van een zonnepark.

Verantwoordelijkheden

Brandveilig inrichten van een zonnepark is niet de verantwoordelijkheid van de brandweer, maar nadrukkelijk de verantwoordelijkheid van de eigenaar van het zonnepark. Het gaat om het beperken van eventuele (economische) schade aan het zonnepark als er een brand plaatsvindt. Het zijn vooral partijen als verzekeraars en financiers die eisen kunnen stellen aan de eigenaar van het zonnepark met betrekking tot een brandveilige inrichting.

Voor de veiligheidsregio's is het wel van belang dat een brand in een zonnepark zich niet uitbreidt naar de omgeving (bijvoorbeeld overslaat naar een aangrenzend natuurgebied of bebouwde omgeving bedreigt). Ook grote rookontwikkeling en eventuele verspreiding van resten van zonnepanelen in de (bebouwde) omgeving buiten het zonnepark zijn niet wenselijk. Of er voorkomen moet worden dat zoiets kan gebeuren, is een bestuurlijke afweging. Het is dus belangrijk dat het bevoegd gezag de risico's van een brand in een zonnepark in beeld heeft en vervolgens een weloverwogen keuze kan maken om die risico's te accepteren of niet. Het bevoegd gezag is niet verplicht om adviezen van de veiligheidsregio over te nemen.

Als de brandweer een brand in een zonnepark moet bestrijden (bijvoorbeeld omdat er een dreiging voor de omgeving bestaat), dan moet de brandweer daar wel de mogelijkheden voor hebben. De brandweer kan adviezen geven aan het bevoegd gezag over maatregelen in het zonnepark die het voor de brandweer mogelijk maken een brand te bestrijden of branduitbreiding te voorkomen (denk aan de bereikbaarheid van het zonnepark, toegangswegen, berijdbare paden, en het indelen in compartimenten zodat inzetdieptes beperkt blijven tot een bepaald maximum). Deze adviezen van de brandweer zouden als maatwerkvoorschriften kunnen worden opgenomen in de Omgevingsvergunning. Daarnaast kan in het Omgevingsplan van een gemeente worden vastgelegd dat de veiligheidsregio bij een aanvraag omgevingsvergunning voor een zonnepark, altijd in de gelegenheid wordt gesteld om maatwerkvoorschriften voor te stellen (Begeleidingscommissie, persoonlijke communicatie 12 december 2024).

De beste benadering is om in een vroeg stadium van de realisatie van een zonnepark een goed gesprek met de belanghebbende partijen en het bevoegd gezag te voeren, en in gezamenlijkheid de risico's en mogelijke effecten in beeld te brengen. Het is daarbij van belang om duidelijk te zijn over taken, bevoegdheden en verantwoordelijkheden van de betrokken partijen. Dit is de benadering die met de '[gebiedsgerichte aanpak natuurbrandbeheersing](#)' voor de inrichting van natuurgebieden wordt gevolgd met als doel de kans op een onbeheersbare natuurbrand te verkleinen. Deze aanpak zou ook voor zonneparken goed kunnen werken.

Er wordt geconstateerd dat het goed zou zijn als branden in zonneparken en de bestrijding daarvan, structureel gemonitord gaan worden.

5.2 Brandbestrijding

In de expertbijeenkomst is geconstateerd dat in een brand in een zonnepark drie facetten onderscheiden kunnen worden:

- > natuurbrand, dat wil zeggen brand van de vegetatie van het zonnepark
- > brand waarbij zonnepanelen betrokken zijn
- > brand in de overige elektrische componenten van de PV-installatie (bijvoorbeeld combinerbox, omvormer of transformator).

Voor de bestrijding van elk van deze soorten branden beschikt de brandweer over een handelingsperspectief. De combinatie van deze drie soorten branden levert geen extra probleem op wat betreft de brandontwikkeling en de brandbestrijding.

In het algemeen wordt, op basis van de in hoofdstuk 4 gepresenteerde resultaten, aangenomen dat een brand in de vegetatie van een zonnepark niet zo groot zal worden dat deze onbestrijdbaar wordt. De omstandigheden kunnen echter zodanig zijn dat de bestrijding van een brand in een zonnepark problematisch wordt, bijvoorbeeld afhankelijk van de bereikbaarheid, bluswatervoorziening en dergelijke (Begeleidingscommissie, persoonlijke communicatie 12 december 2024).

Kennis bij de brandweer

Niet alle brandweermensen hebben voldoende kennis van brandbestrijding in zonneparken. Men heeft niet altijd goed in beeld welke risico's er bij de brandbestrijding bestaan en tot hoever de verantwoordelijkheid van de brandweer reikt. De brandweer is handelingsgericht en verricht soms werkzaamheden die zij eigenlijk niet zou moeten uitvoeren. De beste

werkwijze bij een brand in een onderdeel van het PV-systeem kan immers zijn: *niet* inzetten maar een stap terugzetten en wachten tot de stroom is afgeschakeld door de installatieverantwoordelijke. Behalve die handelingsgerichtheid kan ook bestuurlijke druk (bijvoorbeeld als de omgeving bedreigd wordt) ervoor zorgen dat de brandweer gaat optreden, ook als dat weinig kans van slagen heeft, het gevaarlijk is om dat te doen en/of er van tevoren is afgesproken om niet op te treden bij bepaalde situaties.

Er zijn verschillen tussen de bestrijding van een brand met zonnepanelen op een gebouw en een brand in een zonnepark: het zijn verschillende situaties en er kan niet precies hetzelfde gehandeld worden. In zonneparken bestaan zulke hoge spanningen dat de brandweer er niet moet optreden, maar het systeem moet laten afschakelen door de installatieverantwoordelijke. Het is bijvoorbeeld niet de taak van de brandweer om de verschillende componenten van een zonnepark af te schakelen. Ook optreden bij een transformatorbrand of een EOS is vanwege de aanwezige hoge spanning niet verstandig. In deze gevallen moet de situatie eerst door de installatieverantwoordelijke gestabiliseerd worden.

Overigens is de theoretische kennis niet volledig altijd toepasbaar in de praktijk. Omstandigheden kunnen het noodzakelijk maken om toch op te treden. Zo is bij de brand in Lierop (januari 2023, zie paragraaf 3.2) toch ingezet, omdat wolken chloorgas afkomstig van de brandende ondergrondse bekabeling een bedreiging voor de omgeving vormden omdat zij richting de bebouwing in de buurt dreigden te waaien.

Al met al is het nodig dat de brandweer meer investeert in opleiden, trainen en bijscholen van het brandweerpersoneel over de risico's en het optreden in zonneparken. Daarbij zouden de eigenaren van zonneparken betrokken moeten worden.

Verder is in de expertbijeenkomst opgemerkt dat het goed zou zijn om branden in zonneparken structureel te monitoren om meer zicht te krijgen op het ontstaan en verloop van deze branden. Dit is ook van belang omdat nog niet duidelijk is welke invloed veroudering van het PV-systeem op het ontstaan van branden in zonneparken heeft.²¹

²¹ Ook opgemerkt door de begeleidingscommissie (persoonlijke communicatie, 15 juli 2024).

6 Conclusies

In dit hoofdstuk wordt eerst antwoord gegeven op de deelvragen van het onderzoek. Vervolgens wordt antwoord gegeven op de hoofdvraag.

6.1 Deelvragen

1. Op welke soorten locaties (bijvoorbeeld landbouwgrond, natuurgebied, bermen) zijn zonneparken in Nederland gerealiseerd en welke ontwikkeling wordt hierin verwacht?

Medio 2023 was 60% van de zonneparken in Nederland op voormalige landbouwgrond gerealiseerd. Vanaf juli 2024 heeft de Rijksoverheid de voorkeursvolgorde voor het opwekken van zonne-energie aangescherpt en is realisatie van nieuwe zonneparken alleen mogelijk mits in combinatie met een andere benutting, zoals een (substantiële) agrarische functie. Ook zijn er diverse plannen voor zonneparken op onbenutte ruimte bij afslagen en knooppunten van snelwegen.

2. Welke karakteristieken hebben zonneparken in Nederland (bijvoorbeeld type zonnepark, aantal, hoogte en oriëntatie van zonnepanelen, compartimentering en overige inrichtingsaspecten van zonneparken)?

De afmetingen van zonneparken in Nederland variëren van minder dan een hectare tot (veel) meer dan 20 hectare; het aantal zonnepanelen varieert navenant. Zonnepanelen worden over het algemeen op een hoogte van 50 tot 100 centimeter vanaf de bodem geplaatst; de maximaal toegestane hoogte is gemiddeld 2 meter. De meest voorkomende opstelling van de rijen zonnepanelen is een zuid-zuid-opstelling, maar ook oost-west-opstellingen komen voor.

3. Welke typen zonnepanelen worden toegepast in zonneparken in Nederland en welke ontwikkeling wordt hierin verwacht?

In zonneparken worden vooral kristallijne zonnepanelen geplaatst met een grootte van circa 2,4 meter bij 1 à 1,3 meter. Tweezijdige, oftewel 'bifacial' (kristallijne) zonnepanelen zijn in opkomst: deze hebben een groter rendement dan gewone enkelzijdige zonnepanelen.

4. Wat zijn brandkenmerken van deze typen zonnepanelen (waaronder depositie van resten)?

Experimenteel onderzoek toont aan dat zonnepanelen bij hoge warmtestralingen kunnen gaan branden, zoals bij aanstraling door brand. In de praktijk is gebleken dat zonnepanelen ook door een 'hotspot' (bijvoorbeeld veroorzaakt door een installatiefout, defect of vervuiling) kunnen ontbranden. Bij een brand in een zonnepark is depositie van resten van zonnepanelen niet te verwachten, omdat daarvoor de warmteontwikkeling en pluimstijging niet groot genoeg zijn.

5. Wat zijn (brand)risicovolle componenten van de zonnepaneleninstallatie en welke beheersmaatregelen zijn voor de betreffende risico's (mogelijk) ?

De diverse onderdelen van het PV-systeem brengen een brandrisico met zich mee: de zonnepanelen, de bekabeling, de combinerbox, de omvormer en het transformatorhuis. De eigenaar van een zonnepark kan verschillende maatregelen treffen om deze risico's te beperken. Denk hierbij aan keuring, onderhoud en monitoring van het PV-systeem, een brandveilige ondergrond onder componenten met een brandrisico, voldoende afstand tussen de rijen zonnepanelen en beheer van de vegetatie. Brandweer Nederland doet hiervoor suggesties in de *Handreiking Risicobeheersing Advies Veilige PV-systemen (2020b)*.

6. Welke vegetatietypen komen voor in zonneparken in Nederland (waaronder agri-PV)?

Er zijn zonneparken waarvan de vegetatie uit kort gras bestaat, maar in steeds meer zonneparken wordt ernaar gestreefd om de biodiversiteit te verhogen. Dit gebeurt door inzaaien van bijvoorbeeld kruidenrijke mengsels. Agri-PV komt in Nederland nog weinig voor: dit betreft slechts enkele innovatieprojecten.

7. Hoe wordt de vegetatie onderhouden (brandstofbeheersing)?

De vegetatie in zonneparken wordt zowel door maaien als door begrazing (met schapen) onderhouden. Maaien gebeurt over het algemeen twee à drie maal per jaar, vooral om schaduwwerking tegen te gaan. De hoogte van de vegetatie wordt over het algemeen beperkt tot het laagste punt van de zonnepanelen. Vanuit het oogpunt van brandstofbeheersing is het van belang dat het maaisel direct wordt afgevoerd en niet blijft liggen en uitdroogt.

8. Wat zijn brandkenmerken van deze vegetatietypen? en

9. Welke temperatuur / hittestraling en vlamlengte zijn te verwachten bij brand van deze vegetatietypen?

Om brand in de vegetatie van zonneparken te kunnen modelleren, heeft het NIPV vijf nieuwe, theoretische brandstofmodellen ontwikkeld. De bestaande brandstofmodellen uit de *Brandstofmodellengids* (Tanck & Brouwer, 2023) bleken niet van toepassing te zijn op de vegetatie van zonneparken. De nieuwe brandstofmodellen gaan uit van een gras- en kruidachtige vegetatie, waarbij onderscheid gemaakt wordt tussen twee verschillende vegetatiehoogtes (hoog of laag) en de situatie na maaien waarbij het (uitgedroogde) maaisel blijft liggen of is opgeruimd.

Voor de vijf nieuwe brandstofmodellen is brand gemodelleerd in BehavePlus, bij verschillende windsnelheid (0 – 10 m/s) en verschillende relatieve luchtvochtigheid (15% - 60%), waarbij gekeken is naar de branduitbreidingssnelheid, vlamlengte, intensiteit van het vuurfront, brandvermogensdichtheid en vlamverblijftijd. De resultaten van de modellering laten zien dat hoge vegetatie en de aanwezigheid van (uitgedroogd) maaisel voor hevigeren natuurbranden in het zonnepark kunnen zorgen dan wanneer de vegetatie kort wordt gehouden en het maaisel direct wordt opgeruimd.

Op basis van de brandkenmerken vallen de gemodelleerde branden in de categorie 'normal fires' volgens de 'wildfire events classification' (intensiteit van het vuurfront < 10.000 kW/m en vlamlengte < 10 m) (Tedim et al., 2018). De beheersbaarheid van een natuurbrand hangt daarnaast echter ook af van factoren als de bereikbaarheid en de bluswatervoorziening. De

omstandigheden kunnen zodanig zijn dat de bestrijding en beheersbaarheid van een brand in een zonnepark problematisch kunnen worden.

10. Wat is uit de praktijk bekend over branden in zonneparken? (brandoorzaak, brandverloop, rookontwikkeling en dergelijke)

Voor zover bekend, zijn er tot nu toe nog vrij weinig branden in zonneparken voorgekomen. De gevolgen van een brand in een zonnepark voor de omgeving kunnen echter groot zijn (denk aan rookontwikkeling of branduitbreiding naar aangrenzend gebied). Uit de casuïstiek blijkt dat branden in zonneparken in diverse onderdelen van het PV-systeem kunnen ontstaan: in de (ondergrondse) bekabeling, in de omvormers, in de transformator en in de zonnepanelen. Oorzaken kunnen bijvoorbeeld fouten bij de installatie zijn of beschadiging van een onderdeel van het PV-systeem. Er is één brand bekend waarbij een brand in het PV-systeem brand in de vegetatie van het zonnepark veroorzaakte (brand in een zonnepark in Sas van Gent in 2022, ontstaan door een hotspot in een zonnepaneel). Er is geen brand bekend die ontstaan is in de vegetatie van een zonnepark.

11. Welke invloed kan een brand in de vegetatie hebben op het PV-systeem van een zonnepark?

Op basis van de resultaten van modellering wordt geconcludeerd dat er omstandigheden denkbaar zijn dat een brand in de vegetatie van een zonnepark zoveel vermogen levert dat de zonnepanelen in brand kunnen raken. Hierbij moet gedacht worden aan een periode van extreme en/of langdurige droogte, een (zeer) lage relatieve luchtvochtigheid en hoge vegetatie die relatief weinig vocht bevat of gemaaide vegetatie waarbij uitgedroogd maaisel is blijven liggen.

Of ook andere onderdelen van het PV-systeem zoals de combinerbox, de bekabeling of de omvormer door een brand in de vegetatie kunnen worden aangetast, is op grond van de beschikbare data niet te zeggen.

12. Welke invloed kunnen de zonnepanelen hebben op de ontwikkeling van een brand in de vegetatie van een zonnepark?

Zonnepanelen beïnvloeden de groei van de vegetatie onder de zonnepanelen (via de invloed die panelen hebben op temperatuur, licht, luchtvochtigheid en bodemvochtigheid): er zijn verschillen in plantengroei onder en naast de zonnepanelen, zowel wat de hoogte als de soort planten betreft. De hoogte van de vegetatie zal invloed hebben op de brandvermogensdichtheid.

In de literatuur is geen informatie gevonden of en zo ja, welke invloed zonnepanelen kunnen hebben op de ontwikkeling van een brand in de vegetatie van zonneparken. Het is bekend dat de geometrie van een ruimte de ontwikkeling van een brand in een gebouw beïnvloedt (zie bijvoorbeeld Baaij et al., 2023), maar of en hoe dat een rol speelt onder de zonnepanelen in een zonnepark is op basis van dit onderzoek niet te zeggen. De aanwezigheid van objecten zoals zonnepanelen en de effecten die die objecten op het brandverloop kunnen hebben, kunnen niet gemodelleerd worden met BehavePlus.

13. Welke invloed kan een brand van het PV-systeem hebben op de vegetatie van een zonnepark?

Er zijn verschillende manieren waarop brand in het PV-systeem kan ontstaan en alle onderdelen van het PV-systeem brengen een brandrisico met zich mee. Dit betekent ook dat

een brand in het PV-systeem een brand in de vegetatie van het zonnepark kan veroorzaken (afhankelijk van de weersomstandigheden zoals de relatieve luchtvochtigheid, de hoogte van de vegetatie, de status van de vegetatie (vochtgehalte) en de aan- of afwezigheid van uitgedroogd maaisel in het zonnepark). In de praktijk is gebleken dat een brand in het PV-systeem een brand in de vegetatie van een zonnepark kan veroorzaken.

14. Welke specifieke veiligheidsmaatregelen dragen bij aan de brandveiligheid van zonneparken met vegetatie?

Brandveilig inrichten van een zonnepark is niet de verantwoordelijkheid van de brandweer, maar de verantwoordelijkheid van de eigenaar van het zonnepark. Dit betreft het beperken van eventuele (financiële) schade aan het zonnepark. Partijen als verzekeraars en financiers kunnen eisen stellen aan de eigenaar van het zonnepark met betrekking tot een brandveilige inrichting.

Voor de veiligheidsregio's is het van belang dat een brand in een zonnepark zich niet uitbreidt buiten het zonnepark en de omgeving bedreigt. Het is van belang dat de brandweer, *als* een brand in een zonnepark bestreden moet worden, daar dan de mogelijkheden voor heeft. De brandweer kan adviezen geven aan het bevoegd gezag over maatregelen in het zonnepark die het mogelijk maken een brand te bestrijden en/of branduitbreiding te voorkomen. In de *Handreiking Risicobeheersing Advies Veilige PV-systemen* (Brandweer Nederland, 2020b) worden maatregelen beschreven die de eigenaar van een zonnepark *kan* treffen om brand te voorkomen, branduitbreiding te beperken en brandbestrijding mogelijk te maken. Denk hierbij aan de toegankelijkheid van het zonnepark, de aanwezigheid van berijdbare paden en opstelplaatsen, een beperkte afstand tot elk onderdeel van het PV-systeem, voldoende bluswatervoorziening en 24/7 beschikbaarheid van een bedrijfsdeskundige van het zonnepark.

Een goede werkwijze bij de advisering over zonneparken is, om in een vroeg stadium van de realisatie met de belanghebbende partijen en het bevoegd gezag in gesprek te gaan. Dan kunnen in gezamenlijkheid de brandrisico's en mogelijke effecten in beeld gebracht worden en taken, bevoegdheden en verantwoordelijkheden van de betrokken partijen duidelijk gemaakt worden. Deze benadering is vergelijkbaar met de '[gebiedsgerichte aanpak natuurbrandbeheersing](#)'.

6.2 Hoofdvraag

De hoofdvraag van dit onderzoek luidt: *Welke invloed kunnen het PV-systeem en de vegetatie hebben op het ontstaan en het verloop van brand in een zonnepark; en welke veiligheidsmaatregelen passen daarbij?*

Een brand in een zonnepark kan in de verschillende onderdelen van het PV-systeem (zoals de zonnepanelen, combinerbox, omvormer, transformator) ontstaan, door diverse oorzaken (bijvoorbeeld installatiefouten, beschadiging, kortsluiting). Een brand in het PV-systeem kan overslaan op de vegetatie en brand in de vegetatie van het zonnepark veroorzaken.

Er zijn omstandigheden denkbaar dat een brand in de vegetatie van een zonnepark zoveel vermogen levert dat deze het PV-systeem kan aantasten. Hierbij moet gedacht worden aan een periode van extreme en/of langdurige droogte, een (zeer) lage relatieve luchtvochtigheid is, en hoge vegetatie die relatief weinig vocht bevat of gemaaide vegetatie waarbij uitgedroogd maaisel is blijven liggen.

In de *Handreiking Risicobeheersing Advies Veilige PV-systemen* worden maatregelen beschreven die de eigenaar van een zonnepark *kan* treffen om brand te voorkomen, branduitbreiding te beperken en brandbestrijding mogelijk te maken. Hierbij valt te denken aan de toegankelijkheid van het zonnepark, de aanwezigheid van berijdbare paden en opstelplaatsen in het zonnepark, een beperkte afstand tot elk onderdeel van het PV-systeem, voldoende bluswatervoorziening en 24/7 beschikbaarheid van een bedrijfsdeskundige van het zonnepark.

Bij de advisering over brandrisicobeheersing in zonneparken kan de benadering van de [‘gebiedsgerichte aanpak natuurbrandbeheersing’](#) toegepast worden, waarbij belanghebbende partijen en het bevoegd gezag in gezamenlijkheid de risico’s en mogelijke effecten in beeld brengen, en waarbij taken, bevoegdheden en verantwoordelijkheden van de betrokken partijen duidelijk gemaakt worden.

6.3 Aanbevelingen

De nieuwe brandstofmodellen voor de vegetatie van zonneparken zijn puur gebaseerd op theorie. Het verdient aanbeveling om

- > deze brandstofmodellen te valideren met behulp van veldonderzoek (zoals gedaan voor de brandstofmodellen in de *Brandstofmodellengids* (Tanck & Brouwer, 2023)) en branden in de praktijk
- > in de praktijk onderzoek te verrichten naar het verschil in branduitbreiding in de vegetatie onder de zonnepanelen en de vegetatie naast de panelen, in het open veld
- > branden en de brandbestrijding in zonneparken structureel te monitoren om meer kennis over brandverloop en brandbestrijding in zonneparken te vergaren en landelijk te kunnen delen.

Bijlage 1 Bronnen

Algemeen Dagblad. (2023). [Brand bij zonnepark Lungendonk in Lierop geblust](#).

Andrews, P. L. (2009). [BehavePlus fire modeling system, version 5.0: Variables](#). Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

Andrews, P. L. (2018). *The Rothermel Surface Fire Spread Model and Associated Developments: A Comprehensive Explanation*. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-371. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. <https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-371>.

Armstrong, A., Ostle, N. J., & Whitaker, J. (2016). Solar park microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling. *Environmental Research Letters*, 11(7), 074016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074016>.

ASISEARCH & Bosch & van Rijn. (2021). [Participatiemonitor 2021: monitor participatie hernieuwbare energie op land](#).

Baaij, S., Witte de, L., Hofman, R., Huizer, E., Molenaar J. & Weewer, R. (2023). [Handboek gebouwbrandbestrijding](#). Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV).

BENY. (2022). [Wat is een zonne-combiner?](#)

Brandweer Brabant-Zuidoost. (2023). Incidentkaart. <https://tinyurl.com/Optreden-brand-zonnepanelen>.

Brandweer Flevoland (2020) *Wat vertellen we onze collega's? Emmeloord 8 april 2020*. Ervaringsbericht Brandweer Flevoland en Brandweer Gooi en Vechtstreek.

Brandweer Nederland. (2020a) [Handreiking bluswatervoorziening en bereikbaarheid 2019](#).

Brandweer Nederland. (2020b). [Handreiking Risicobeheersing Advies Veilige PV-systemen](#).

Brandweer Nederland. (2021). [Handreiking Incidentbestrijding Zonnepanelen](#).

Brandweer Nederland. (2023). [Scenario's natuurbranden](#)

Brandweer Zeeland. (2022). *Buitenbrand op zonnepark Sas van Gent*.

Brandweeracademie. (2018). [Brandoverslag. Handelingsperspectief en literatuuronderzoek](#).

Chow, C. L., Han, S. S., & Ni, X. M. (2016). A study on fire behaviour of combustible components of two commonly used photovoltaic panels. *Fire and Materials*, 41(1), 65–83. <https://doi.org/10.1002/fam.2366>.

- Cruz, M.G., Hurley, R., Bessell, R.J. & Sullivan, A.L. (2019). [Fire behaviour in wheat crops](#). CSIRO Land and Water, Client Report No. EP195825, Canberra, Australia.
- Deng, S., Zhang, Z., Ju, C., Dong, J., Xia, Z., Yan, X., Xu, T., & Xing, G. (2017). Research on hot spot risk for high-efficiency solar module. *Energy Procedia*, 130, 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.399>
- Dhimish, M., Theristis, M., & d'Alessandro, V. (2024). Photovoltaic hotspots: A mitigation technique and its thermal cycle. *Optik*, 300. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2024.171627>.
- Ecorus. (z.d.). [Zon langs de A7](#). Geraadpleegd 25 april 2024.
- Gemeente Den Haag. (z.d.). [Stappenplan participatie](#).
- Hassanpour Adeg, E., Selker, J. S., & Higgins, C. W. (2018). Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. *PLoS ONE*, 13(11), e0203256. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203256>
- Hernandez, R. R., Easter, S. B., Murphy-Mariscal, M. L., Maestre, F. T., Tavassoli, M., Allen, E. B., Barrows, C. W., Belnap, J., Ochoa-Hueso, R., Ravi, S., & Allen, M. F. (2014). Environmental impacts of utility-scale solar energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 766–779. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2013.08.041>
- IFV. (2017). [Natuurbrandbeheersing in Nederland](#).
- IFV. (2021a). [Kennisbundel zonnepanelen](#).
- IFV. (2021b). [Depositie bij branden met zonnepanelen](#).
- Kadaster. (2023). [Zonneparken in Nederland](#).
- Knegt, C. G. M., van Wijngaarden, K., Verweij, P. A., & Soons, M. B. (2021). [De effecten van zonneparken op vegetatie: Onderzoek in dertien Nederlandse zonneparken naar vegetatie, bodem en microklimaat](#). *Landschap*, 38(2), 80–89.
- KNMI. (z.d.). [Uurwaarnemingen van weerstations](#). Geraadpleegd 12 april 2024.
- Lambert, Q., Bischoff, A., Cueff, S., Cluchier, A., & Gros, R. (2021). Effects of solar park construction and solar panels on soil quality, microclimate, CO2 effluxes, and vegetation under a Mediterranean climate. *Land Degradation & Development*, 32(18), 5190–5202. <https://doi.org/10.1002/ldr.4101>.
- Installatiejournaal. (2019). [Grote zonneparken steeds vaker uitgevoerd in 800 Vac](#).
- Meribout, M., Kumar Tiwari, V., Pablo Peña Herrera, J., & Najeeb Mahfoudh Awadh Baobaid, A. (2023). Solar panel inspection techniques and prospects. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 209, 112466. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112466>.

Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties. (2023, oktober 26). [Aangescherpte voorkeursvolgorde zon.](#)

NIPV. (2023). [Scenarioboek: Ondergrondse brand DC-bekabeling Zonnepark – Vlamboog.](#)

Noor, N. F. M., & Reeza, A. A. (2022). Effects of solar photovoltaic installation on microclimate and soil properties in UiTM 50MWac Solar Park, Malaysia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1059(1) 012031. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1059/1/012031>.

Novar. (z.d.). [Een natuurinclusief drijvend zonnepark.](#) Geraadpleegd 31 januari 2024.

NWCG. (2021). [Guide to Fireline Fire Assessment.](#) National Wildfire Coordinating Group, PMS 437-1, NFES 00XXX.

Omroep Zeeland. (2022). [Grote brand in zonnepark Sas van Gent.](#)

Ramali, M. R., Mohd Nizam Ong, N. A. F., Md Said, M. S., Mohamed Yusoff, H., Baharudin, M. R., Tharima, A. F., Akashah, F. W., & Mohd Tohir, M. Z. (2023). A Review on Safety Practices for Firefighters During Photovoltaic (PV) Fire. *Fire Technology*, 59(1), 247–270. <https://doi.org/10.1007/s10694-022-01269-4>.

Ren, M., Qian, X, Chen, Y., Wang, T. & Zhao, Y. (2022) [Potential lead toxicity and leakage issues on lead halide perovskite photovoltaics.](#) *Journal of hazardous materials*, 426, 127848.

Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. (2021). [Zonne-energie op water.](#)

Rijksoverheid. (2023, oktober 26). [Rijk en medeoverheden: 'Nee tenzij' voor zonnepanelen op landbouw- en natuurgronden.](#)

Rijkswaterstaat. (z.d.-a). [Opwek van energie op rijksvastgoed.](#) Geraadpleegd 31 januari 2024.

Rijkswaterstaat. (z.d.-b). [Zon langs de A7.](#) Geraadpleegd 31 januari 2024.

Rijkswaterstaat. (2024). [Volgende stap Energieroute Noord-Holland: voorkeursvariant voor zonne-energie langs snelwegen A9, A5.](#)

Rijkswaterstaat & Eelerwoude. (z.d.). *Handreiking maaien zonneparken.*

RIVM. (2022). [Schadelijke stoffen bij branden met zonnepanelen.](#)

RVO. (2023). [Routekaart Energieopslag.](#)

Schotman, A., van der Zee, F., Hazeu, G., Bloem, J., Sluijsmans, J., & Vittek, M. (2021). [Verkenning van bodem en vegetatie in 25 zonneparken in Nederland.](#) Wageningen, Wageningen Environmental Research. Rapport 3061. ISSN 1566-7197.

Scott, J. H., & Burgan, R. E. (2005). [*Standard Fire Behavior Fuel Models: A Comprehensive Set for Use with Rothermel's Surface Fire Spread Model*](#). Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-153. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

US Department of Energy. Solar Energy Technologies Office. (z.d.). [*Solar Photovoltaic Technology Basics*](#).

Solar Magazine. (2023, oktober 26). [*Provincies gaan zonneparken op landbouwgrond per 1 januari verder beperken*](#).

Tang, S., Xing, Y., Chen, L., Song, X., & Yao, F. (2021). Review and a novel strategy for mitigating hot spot of PV panels. *Solar Energy*, 214, 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.11.047>.

Tedim F., Leone V., Amraoui M., Bouillon Ch., Coughlan M.R., Delogu G.M., Fernandes P.M., Ferreira C., McCaffrey S., McGee T.K., Parente J. & Paton D., Pereira M.G., Ribeiro L.M., Viegas D.X. & Xanthopoulos G. (2018). [*Defining Extreme Wildfire Events: Difficulties, Challenges, and Impacts*](#), *Fire* 2018, 1, 9; doi:10.3390/fire1010009.

TK. (2018a). Tweede Kamer, vergaderjaar 2018–2019, [*32 813, nr. 204*](#).

TK. (2018b). Tweede Kamer, vergaderjaar 2018–2019, [*34 682, nr. 29*](#).

TNO. (2021a). *Veiligheid van zonneparken in berm en knooppunten van rijkswegen – Brandpreventie en brandbestrijding*, TNO-rapport TNO 2021 R12623.

TNO. (2021b). *Veiligheid van zonneparken in berm en knooppunten van rijkswegen – Elektrische veiligheid en EMC*, TNO-rapport TNO 2021 R12622.

TNO. (2021c). [*Towards nature inclusive east-west orientated solar parks*](#).

TNO. (z.d.-a). [*Drijvende zonnepanelen*](#).

TNO. (z.d.-b). [*Perovskietzonnecellen*](#). Geraadpleegd 22 april 2024.

TNO. (z.d.-c). [*Rendement zonnepanelen stijgt*](#). Geraadpleegd 22 april 2024.

TNO. (z.d.-d). [*Tandem technology for higher PV performance*](#). Geraadpleegd 22 april 2024.

TNO. (z.d.-e). [*Tweezijdige zonnepanelen: meer energie en meer toepassingen*](#). Geraadpleegd 22 april 2024.

TPSolar. (z.d.). [*Zonnepark Lungendonk*](#). Geraadpleegd 22 april 2024.

Uldrijan, D., Kováčiková, M., Jakimiuk, A., Vaverková, M. D., & Winkler, J. (2021). Ecological effects of preferential vegetation composition developed on sites with photovoltaic power plants. *Ecological Engineering*, 168, 106274. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106274>

- VanDerHelm Milieubeheer B.V. (2023a). *Nulmeting biodiversiteit De Watering te Coevorden*.
- VanDerHelm Milieubeheer B.V. (2023b). *Nulmeting biodiversiteit Eemshavendijk te Eemshaven*.
- VanDerHelm Milieubeheer B.V. (2023c). *Nulmeting biodiversiteit Waterlanden te Goor*.
- Vaverková, M. D., Winkler, J., Uldrijan, D., Ogrodnik, P., Vespalcová, T., Aleksiejuk-Gawron, J., Adamcová, D., & Koda, E. (2022). Fire hazard associated with different types of photovoltaic power plants: Effect of vegetation management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 162. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112491>.
- Verhoeven, B., Marle van M., Hazebroek H., Stoof, C., Siegmund P., Brouwer, N. Brouwer, Veraverbeke, S., Egberts, L. & Sluijter, R. (2023). *Natuurbrandsignaal '23*. Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV).
- Voltens. (2022). [*De rol van een transformatorstation bij teruglevering van zonnepanelen*](#).
- VRU. (2023). *Kennisdocument zonnepanelen*. Veiligheidsregio Utrecht.
- Wang, A., & Xuan, Y. (2021). Close examination of localized hot spots within photovoltaic modules. *Energy Conversion and Management*, 234. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.113959>
- Waqar Akram, M., Li, G., Jin, Y., & Chen, X. (2022). Failures of Photovoltaic modules and their Detection: A Review. *Applied Energy*, 313, 118822. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118822>
- 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(7), 4210–4225. <https://doi.org/10.3390/ma8074210>
- Yavari, R., Zaliwciw, D., Cibin, R., & McPhillips, L. (2022). Minimizing environmental impacts of solar farms: a review of current science on landscape hydrology and guidance on stormwater management. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, 2(3), 032002. <https://doi.org/10.1088/2634-4505/AC76DD>
- Zee, F.F. van der, Bloem, J., Galama, P., Gollenbeek, L., Os van, J., Schotman, A., & de Vries, S. (2019). *Zonneparken natuur en landbouw*. Wageningen. Wageningen Environmental Research rapport No.2945. <https://doi.org/10.18174/475349>.
- Zon op Kaart. (2024). [*Zon op Kaart Dashboard*](#).

Bijlage 2

Begeleidingscommissie

Naam	Organisatie
Nienke Brouwer	Veiligheids- en Gezondheidsregio Gelderland-Midden
Jeroen Keyser	Veiligheidsregio Utrecht
Ginette Mengers	Omgevingsdienst Regio Arnhem
Harrie van Woerkum	Veiligheidsregio Brabant-Zuidoost

Bijlage 3 Interviews

Organisatie	Respondenten
Holland Solar	Floor Maassen, Jasper Ensing
Novar	Bernd Nijen Twilhaar, Jade Sinkgraven
Rijkswaterstaat (RWS)	Matthijs Erbeveld, Koen van de Langenberg, Rik Jonker
Nationaal Consortium Zon in Landschap / TNO	Kay Cesar
Wageningen Universiteit en Research (WUR)	Karen Krijgsveld, Friso van der Zee
TPSolar	Stephan Roijers, Robert van der Horst, Barry Lamers

Bijlage 4 Expertbijeenkomst

Op 26 november 2024 zijn de resultaten van het onderzoek, beschreven in hoofdstukken 2 t/m 4 besproken met een expertgroep. Aan deze expertbijeenkomst namen de volgende personen deel, uitgenodigd vanwege hun kennis van en ervaring met (incidenten met) PV-installaties en/of natuurbrandbestrijding.

Naam	Organisatie
Earryt Boetes	Veiligheidsregio Fryslân
Bartjan Geerling	Veiligheidsregio Twente
Edwin Kok	Nederlands Instituut Publieke Veiligheid
Frank van Oorschot	Veiligheidsregio Brabant-Zuidoost
Harrie van Woerkum	Veiligheidsregio Brabant-Zuidoost

Bijlage 5 Onderbouwing brandstofmodellen

Elk brandstofmodel wordt gevuld aan de hand van verschillende invoerparameters. In deze bijlage wordt toegelicht hoe deze parameters voor de verschillende brandstofmodellen zijn bepaald. In bijlage 6 (tabel B6.1) is een overzicht opgenomen van de waarden van iedere parameter bij elk brandstofmodel.

Standaard invoerparameters

In totaal kunnen er 18 invoerparameters variëren. Voor de vijf brandstofmodellen die voor dit onderzoek zijn gemaakt, blijven 15 parameters voor elk brandstofmodel gelijk. De parameters zijn gebaseerd op de brandstofmodellen uit de *Brandstofmodellengids* (Tanck & Brouwer, 2023) en brandstofmodellen uit de VS (Scott & Burgan, 2005). Deze parameters worden hieronder verder toegelicht, op basis van de handleiding van BehavePlus (Andrews, 2009).

- > *Fuel Model Type*
Voor elk brandstofmodel is deze parameter gelijk, namelijk D van dynamisch. Dit houdt in dat van de levende kruidachtige brandstofcomponent (Live Herbaceous Fuel) een deel naar de dode kruidachtige brandstofcomponent (Dead Herbaceous Fuel) gaat, afhankelijk van het vochtgehalte. Hoe lager het vochtgehalte, hoe groter het deel is dat naar de dode kruidachtige brandstofcomponent gaat.
- > *10-h Fuel Load*
Deze is gebaseerd op de brandstofopbouw van dood en liggend afgestorven plantenmateriaal met een diameter tussen de 0,65 en 2,54 cm. In dit onderzoek is ervan uit gegaan dat er geen plantenmateriaal met deze diameter aanwezig is op zonneparken. Voor elk brandstofmodel staat deze parameter dus op 0 ton/ha.
- > *100-h Fuel Load*
Deze is gebaseerd op de brandstofopbouw van dood en liggend afgestorven planten met een diameter tussen de 2,55 en 7,62 cm. In dit onderzoek is ervan uit gegaan dat er geen plantenmateriaal met deze diameter in zonneparken aanwezig is. Voor elk brandstofmodel staat deze parameter dus op 0 ton/ha.
- > *Live Woody Fuel Load*
Deze parameter is gebaseerd op de hoeveelheid levend houtig materiaal. Hieronder vallen geen grassen en kruidachtige planten. In dit onderzoek wordt er daarom van uit gegaan dat dit plantenmateriaal niet aanwezig is en wordt de waarde op 0 ton/ha gezet.
- > *1-h Fuel SA/V, Live Herbaceous Fuel SA/V en Live Woody Fuel SA/V*
Deze parameters hebben alle betrekking op een oppervlakte-volume-verhouding. Voor alle brandstofmodellen in de *Brandstofmodellengids* zijn deze waarden gebaseerd op het Amerikaanse brandstofmodellenonderzoek (Scott & Burgan, 2005). In Nederland is er namelijk geen onderzoek gedaan naar de oppervlakte-volumeverhouding. De waarden voor de nieuwe brandstofmodellen worden daarom ook gebaseerd op het Amerikaanse brandstofmodellenonderzoek. De vegetatie van een zonnepark komt het meest overeen met het GR8-model. Daarom zijn de betreffende waarden overgenomen voor de nieuwe

brandstofmodellen. Voor de 1-h Fuel SA/V is dit 49 cm⁻¹, voor Live Herbaceous Fuel SA/V 42 cm⁻¹, voor Live Woody Fuel SA/V 42 cm⁻¹.

> *Dead Fuel Moisture Of Extinction*

Dead Fuel Moisture Of Extinction is het percentage van het vochtgehalte van de dode brandstof waarboven geen branduitbreiding meer plaatsvindt. Deze invoerwaarde is eveneens overgenomen van het brandstofmodel GR8 uit de VS: deze bedraagt 30%.

> *Dead Fuel Heat Content en Live Fuel Heat Content*

De dead fuel heat content geeft de hoeveelheid warmte-energie per kilogram dode brandstof (kJ/kg). De Live Fuel Heat Content geeft de hoeveelheid warmte-energie per kilogram levende brandstof. Beide parameters hebben dezelfde waarde. Voor een brandstofmodel met een standaard brandgedrag is deze 18.620 kJ/kg. Deze waarde is overgenomen voor de brandstofmodellen in dit onderzoek.

> *Live Herbaceous Fuel Moisture*

De Live Herbaceous Fuel Moisture is het deel van de levende grassen en struiken dat vocht is; dit is berekend op basis van drooggewicht. In Nederland is de landelijke afspraak momenteel dat deze voor elk brandstofmodel 80% bedraagt; deze waarde is daarom ook voor de nieuwe brandstofmodellen gekozen.

R.H. %	1-HR F.M. %	10-HR F.M. %	Relative ease of chance ignition and spotting; general burning conditions
>60	>20	>15	Very little ignition; some spotting may occur with winds above 9 mi./h.
45-60	15-19	12-15	Low ignition hazard--campfires become dangerous; glowing brands cause ignition when relative humidity is <50 percent.
30-45	11-14	10-12	Medium ignitability--matches become dangerous; "easy" burning conditions.
26-40	8-10	8-9	High ignition hazard--matches always dangerous; occasional crowning, spotting caused by gusty winds; "moderate" burning conditions.
15-30	5-7	5-7	Quick ignition, rapid buildup, extensive crowning; any increase in wind causes increased spotting, crowning, loss of control; fire moves up bark of trees igniting aerial fuels; long distance spotting in pine stands; dangerous burning conditions.
<15	< 5	< 5	All sources of ignition dangerous; aggressive burning, spot fires occur often and spread rapidly, extreme fire behavior probable; critical burning conditions.

Tabel B5.1 Omzetting van relatieve luchtvochtigheid naar Dead Fuel Moisture.

Bron: NWCG, 2021. (R.H., relatieve luchtvochtigheid; 1-HR F.M, (1 hr) dead fuel moisture)

> *Dead Fuel Moisture*

De Dead Fuel Moisture wordt mede bepaald door de relatieve luchtvochtigheid en kan worden afgeleid aan de hand van tabel B5.1. De Dead Fuel Moisture die tijdens dit onderzoek wordt gebruikt loopt van 5% tot en met 20% met stappen van 1. Deze

waardes representeren een spreiding waarin de minimale en maximale waarde staan voor respectievelijk droge lucht en vochtige lucht (waarbij er minimaal brandgedrag te verwachten is).

> *Midflame Wind Speed (upslope)*

De midflame Wind Speed is de gemiddelde windsnelheid vanaf de top van het brandstofbed tot de hoogte van de vlam boven de brandstof. Deze beïnvloedt de branduitbreiding aan de oppervlakte. In de brandstofmodellen van dit onderzoek wordt deze van 0 – 10 m/s, met stappen van 1, ingevoerd.

> *Slope Steepness*

De Slope Steepness is de maximale steilheid van de helling waarop het vuur brandt. Tijdens dit onderzoek wordt ervan uitgegaan dat er geen helling aanwezig is, dus staat deze parameter op 0%.

Invoerparameters die per brandstofmodel verschillen

Naast de 15 parameters die gelijk blijven, zijn er 3 parameters die verschillen per brandstofmodel. Dit zijn de parameters 1-h Fuel Load, Live Herbaceous Fuel Load en de Fuel Bed Depth. Deze parameters zijn aan elkaar gerelateerd.

- > De *1-h Fuel Load* is gebaseerd op brandstofopbouw van dood en liggend afgestorven plantenmateriaal met een diameter kleiner dan 0,64 centimeter. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat dit materiaal volledig uitgedroogd en afgestorven is. Deze parameter wordt weergegeven in ton/ha droge stof. De minimale waarde voor deze parameter is 0,01 ton/ha (dus ook als dit materiaal niet aanwezig is; dit is noodzakelijk voor de werking van BehavePlus). In de brandstofmodellen HVM, LVM en MO is deze waarde aangenomen voor de 1-h Fuel Load.
- > De *Live Herbaceous Fuel Load* is de levende kruidachtige vegetatie en wordt weergegeven in ton/ha droge stof.
- > De *Fuel Bed Depth* geeft de hoogte van het brandstofbed aan, vanaf de bodem tot en met de top van de vegetatie. Ze bevat ook het maaisel dat boven op de vegetatie ligt.

Uit een onderzoek van de WUR in zeventien zonneparken is gebleken dat de gemiddelde biomassa van het maaisel bij een maaibeurt in juli (wanneer de vegetatie hoog is) 3,3 ton/ha droge stof is en in oktober (wanneer de vegetatie laag is) 1,4 ton/ha droge stof (persoonlijke communicatie L. Scholten periode september oktober 2024). Daarnaast geeft de WUR aan dat de gemiddelde hoogte van de vegetatie in zonneparken tussen 30 en maximaal 60 cm bedraagt in de zomer, maar dat dit erg varieert per zonnepark (interview WUR). Dit is namelijk afhankelijk van hoe rijk en nat de grond is, hoe groeizaam het weer is geweest en welke vegetatie er exact groeit. TPSolar geeft aan de vegetatie niet hoger dan 60 cm te laten worden (interview TPSolar).

Voor de brandstofmodellen is het NIPV er daarom van uitgegaan dat de hoogte van de vegetatie maximaal 60 cm is. Als maaierhoogte is gekozen voor 12 cm (bij hoge en lage vegetatie gelijk), conform het maaibeleid van Rijkswaterstaat dat er gemaaid wordt op minimaal 12 cm hoogte (Rijkswaterstaat & Eelerwoude, z.d.).




Aan de hand van de bovenstaande informatie zijn de drie parameters berekend die per brandstofmodel verschillen. Voor iedere stap, voor het maaien, het maaisel en na het maaien, is de hoogte van de vegetatie bepaald (Fuel bed depth) en de hoeveelheid droge

stof (1-h Fuel Load of de Live Herbaceous Fuel Load). In tabel B5.1 staan de berekeningen voor de hoge vegetatie.

Als eerste is er berekend hoeveel maaisel er bij de hoge vegetatie af is gehaald. Voor het maaien is de Fuel bed depth 60 cm en het wordt gemaaid tot 12 cm: dus er is 48 cm maaisel afgehaald. Dit maaisel heeft een biomassa van 3,3 ton/ha droge stof, dit is de 1-h Fuel Load. Aan de hand van deze gegevens is de hoeveelheid biomassa droge stof voor het maaien berekend: $(60 * 3,3) / 48 = 4,125$ ton/ha. Dit valt onder de Live Herbaceous Fuel Load.

Na het maaien is de Fuel bed depth hoger dan 12 cm, aangezien het maaisel op en tussen de vegetatie gaat liggen. Er is hier (op basis van praktijkervaring) de aanname gedaan dat het maaisel van 48 cm hoog een extra hoogte geeft van 13 cm, boven op de 12 cm waarop de vegetatie is gemaaid (dus totale hoogte 25 cm). Dus de Fuel bed depth is na het maaien $12 + 13 = 25$ cm. Om de hoeveelheid biomassa droge stof te bepalen na het maaien van de Live Herbaceous Fuel Load, wordt er gerekend met 12 cm, aangezien dat de vegetatie is die nog staat en nog levend is. Dit wordt als volgt berekend: $(12 * 3,3) / 48 = 0,825$ ton/ha.

Tabel B5.2 Berekeningen brandstofmodellen voor de hoge vegetatie




	 Voor het maaien	 Maaisel	 Na het maaien
Fuel bed depth (cm)	60	$60 - 12 = 48$	$12 + 13 = 25$
Hoeveelheid biomassa droge stof (ton/ha)	Live Herbaceous Fuel Load: $(60 * 3,3) / 48 = 4,125$	1-h Fuel Load: 3,3	Live Herbaceous Fuel Load: $(12 * 3,3) / 48 = 0,825$

Voor de lage vegetatie is doorgerekend met de bovenstaande resultaten. Het enige wat bekend is voor lage vegetatie is dat de hoeveelheid biomassa van het maaisel 1,4 ton/ha droge stof bedraagt (en dat de hoogte van de vegetatie na maaien 12 cm is). Om te weten hoeveel cm maaisel hier bij hoort, is vanuit de gegevens van de hoge vegetatie bepaald hoeveel ton/ha iedere centimeter geeft. Daarnaast is berekend hoeveel centimeter Fuel Bed Depth elke centimeter maaisel geeft. Zie het onderstaande kader.

Hoeveelheid biomassa droge stof 3,3 ton/ha / 48 cm = 0,06875 1 cm = 0,06875 ton/ha
Hoeveelheid centimeter Fuel bed depth 13 cm / 48 cm = 0,2708 cm

Met behulp van de bovenstaande berekeningen zijn de waardes van de lage vegetatie berekend. Zie tabel B5.3 voor deze berekeningen. Deze zijn op dezelfde manier uitgevoerd als voor de hoge vegetatie.

Tabel B5.3 Berekeningen brandstofmodellen voor de lage vegetatie

	 Voor het maaien	 Maaisel	 Na het maaien
Fuel bed depth (cm)	$20,364 + 12 = 32,364$	$1,4 / 0,06875 = 20,364$	$12 + (20,364 * 0,2708) = 17,514$
Hoeveelheid biomassa droge stof (ton/ha)	$0,06875 * 32,364 = 2,225$	1,4	$0,06875 * 12 = 0,825$

Met behulp van de bovenstaande resultaten is het mogelijk om per brandstofmodel de corresponderende waarden in te vullen bij de drie parameters. Zie tabel B5.4 voor het overzicht van de waarden die worden ingevuld per parameter. Bij de brandstofmodellen voor het maaien (HVM en LVM) en wanneer het maaisel is opgeruimd (MO), wordt ervan uit gegaan dat er geen 1-h Fuel Load aanwezig is; dat wil zeggen geen brandstofopbouw van dood en liggend afgestorven plantenmateriaal met een diameter kleiner dan 0,64 cm. Daarnaast wordt er bij de brandstofmodellen na het maaien en wanneer het maaisel is opgeruimd van uit gegaan dat er 12 cm levende vegetatie staat; daarmee is ook de Live Herbaceous Fuel Load berekend.

Tabel B5.4 Gegevens drie parameters die verschillen per brandstofmodel

Parameters	HVM	HNM	LVM	LNM	MO
1-h Fuel Load (ton/ha)	0,01	3,3	0,01	1,4	0,01
Live Herbaceous Fuel Load (ton/ha)	4,125	0,825	2,225	0,825	0,825
Fuel Bed Depth (cm)	60	25	32,364	17,514	12

Hiermee is de basis gelegd voor de modellering van de brandverspreiding in de vegetatie van zonneparken (paragraaf 4.2 en 4.3).

Bijlage 6 Invoerparameters brandstofmodellen

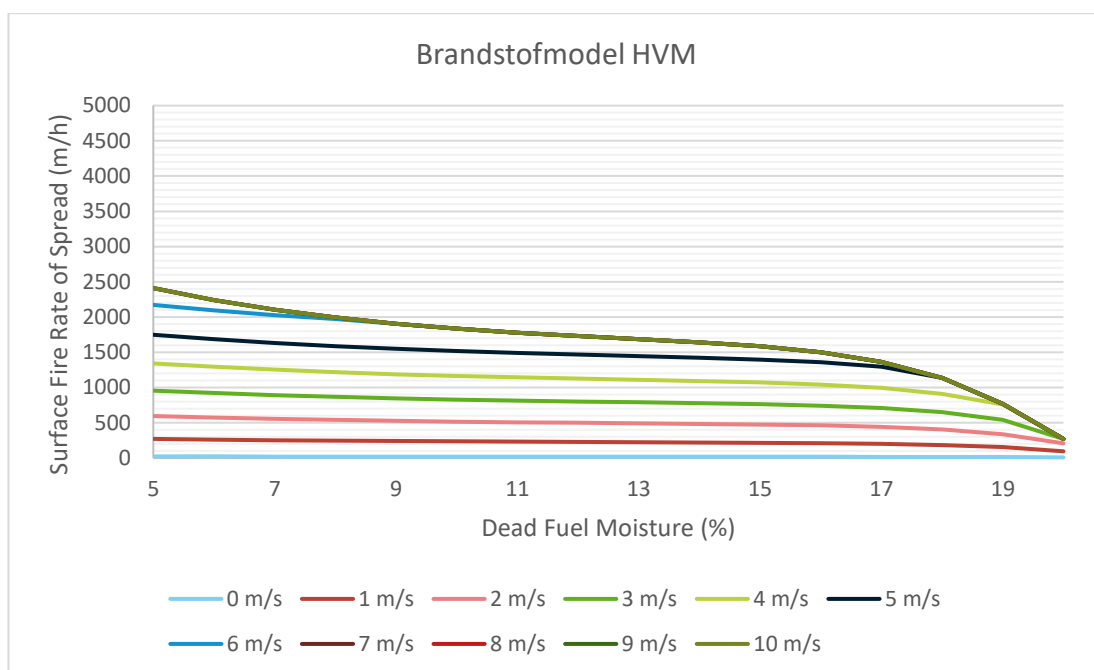
Tabel B6.1 Invoerparameters van de verschillende brandstofmodellen

Invoerparameter	Eenheid	HVM	HNM	LVM	LNМ	MO
Fuel Model Type	-	D	D	D	D	D
1-h Fuel Load	ton/ha	0,01	3,3	0,01	1,4	0,01
10-h Fuel Load	ton/ha	0	0	0	0	0
100-h Fuel Load	ton/ha	0	0	0	0	0
Live Herbaceous Fuel Load	ton/ha	4,125	0,825	2,225	0,825	0,825
Live Woody Fuel Load	ton/ha	0	0	0	0	0
1-h Fuel SA/V	1/cm	49	49	49	49	49
Live Herbaceous Fuel SA/V	1/cm	42	42	42	42	42
Live Woody Fuel SA/V	1/cm	-	-	-	-	-
Fuel Bed Depth	cm	60	25	32,364	17,514	12
Dead Fuel Moisture Of Extinction	%	30	30	30	30	30
Dead Fuel Heat Content	kJ/kg	18620	18620	18620	18620	18620
Live Fuel Heat Content	kJ/kg	18620	18620	18620	18620	18620
Dead Fuel Moisture	%	5 – 20 stappen van 1	5 – 20 stappen van 1	5 – 20 stappen van 1	5 – 20 stappen van 1	5 – 20 stappen van 1
Live Herbaceous Fuel Moisture	%	80	80	80	80	80
Live Woody Fuel Moisture	%					

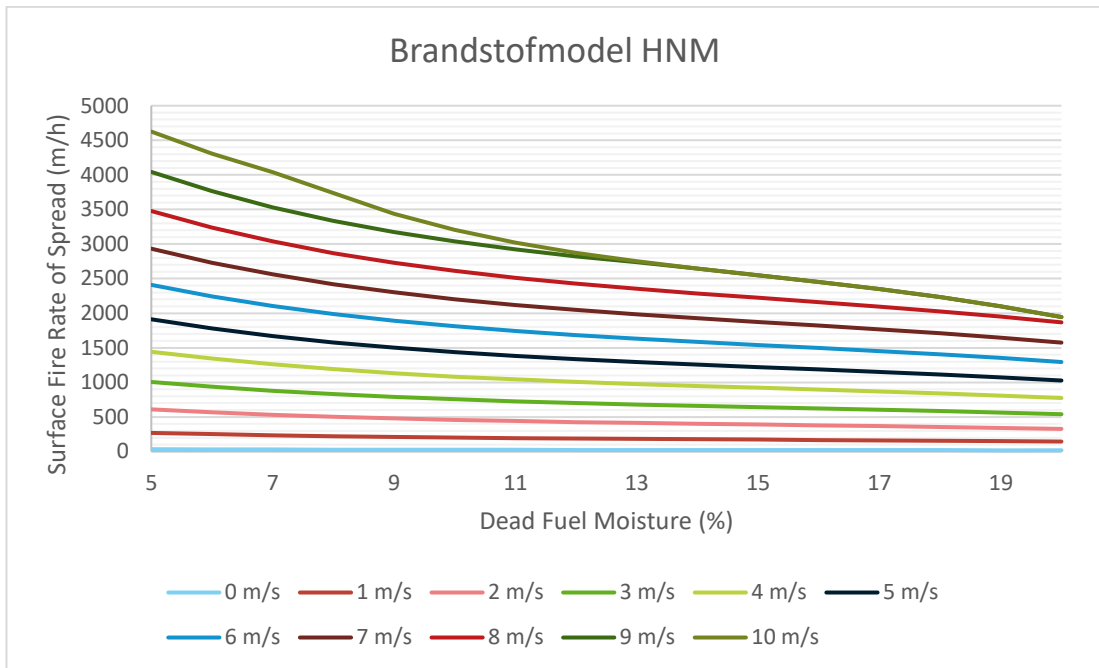
Midflame Wind Speed (upslope)	m/s	0 – 10 stappen van 1	0 – 10 stappen van 1	0 – 10 stappen van 1	0 – 10 stappen van 1	0 – 10 stappen van 1
Slope Steepness	%	0	0	0	0	0

Bijlage 7 Resultaten modellering

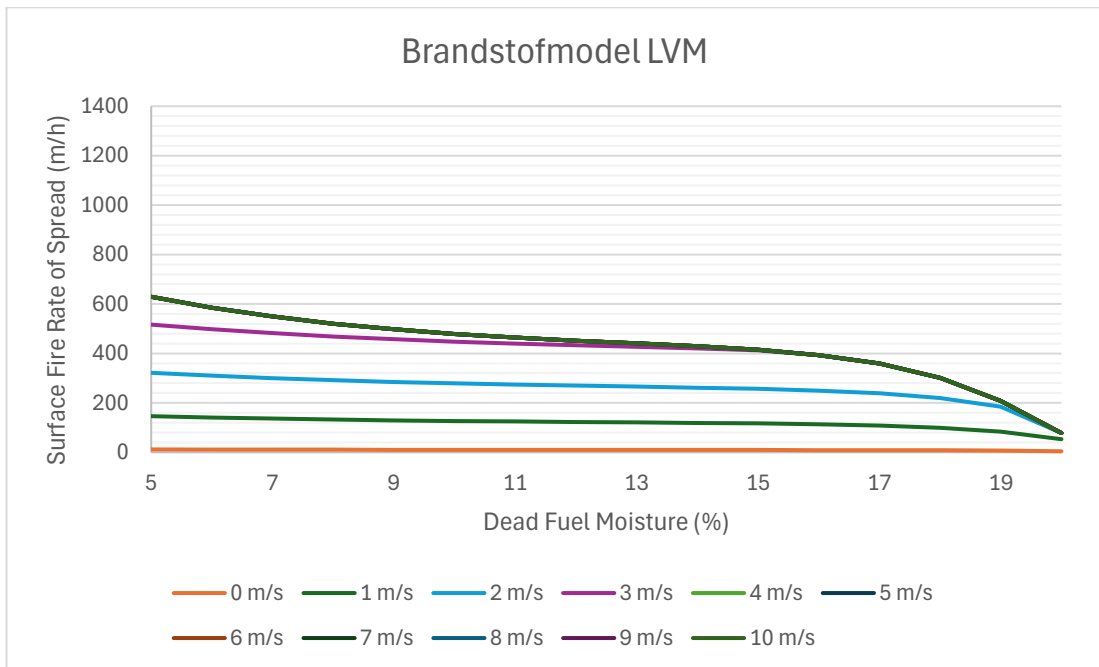
Branduitbreidingsnelheid



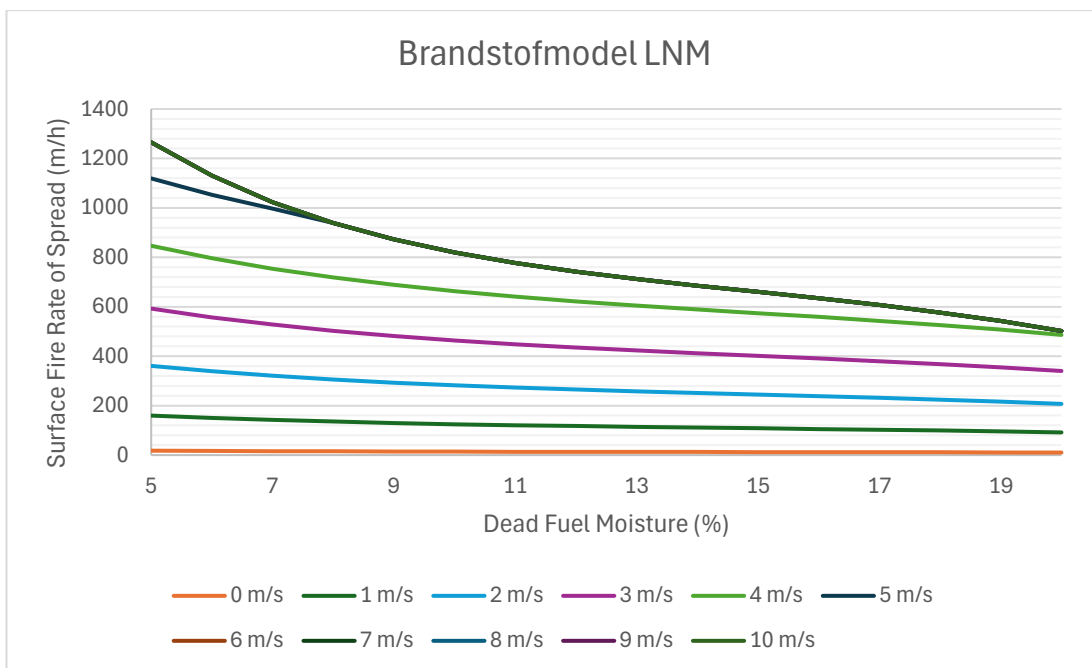
Figuur B7.1 De branduitbreidingsnelheid voor het brandstofmodel HVM bij verschillende dead fuel moisture-waardes en verschillende windsnelheden (lijnen).



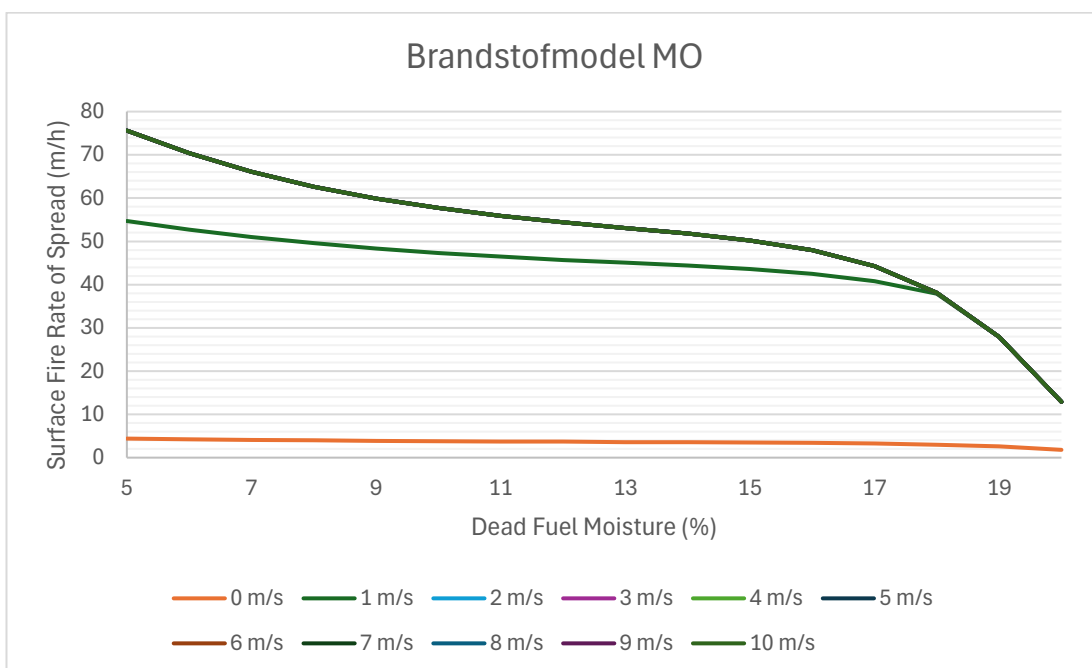
Figuur B77.2 De branduitbreidingsnelheid voor het brandstofmodel HNM bij verschillende dead fuel moisture-waardes en verschillende windsnelheden (lijnen).



Figuur B7.3 De branduitbreidingsnelheid voor het brandstofmodel LVM bij verschillende dead fuel moisture-waardes en verschillende windsnelheden (lijnen).

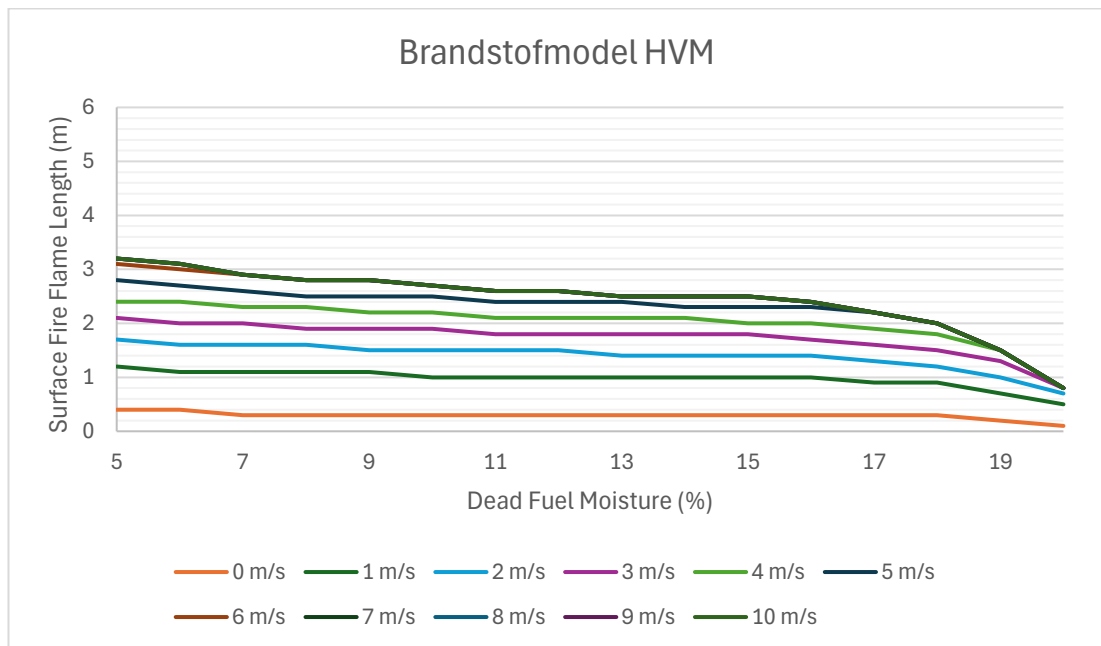


Figuur B77.4 De branduitbreidingsnelheid voor het brandstofmodel LNM bij verschillende dead fuel moisture-waardes en verschillende windsnelheden (lijnen).

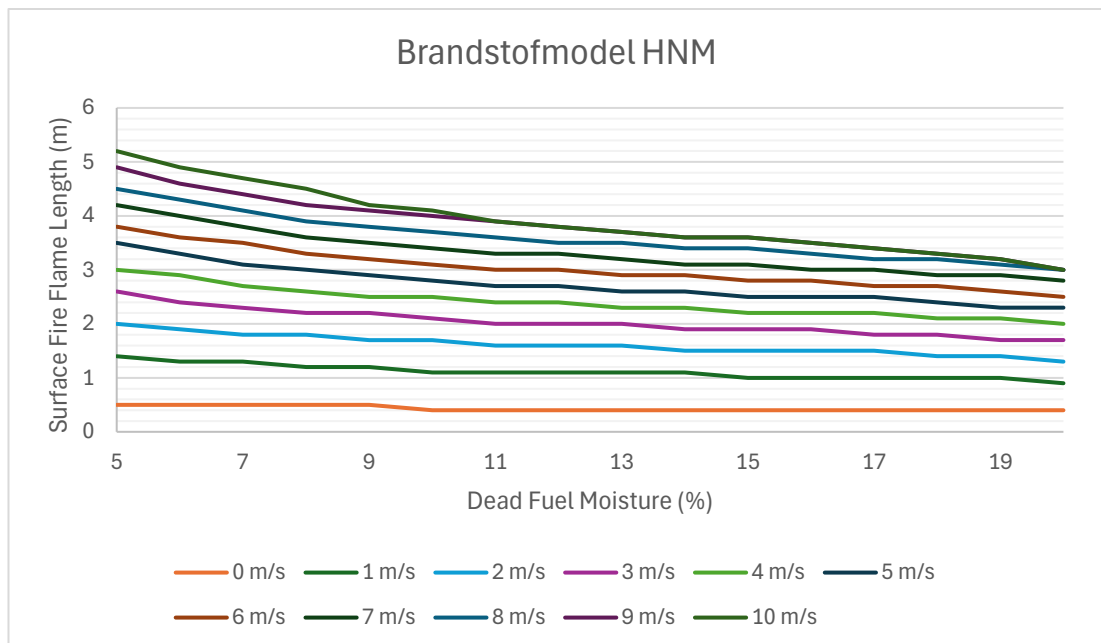


Figuur B7.5 De branduitbreidingsnelheid voor het brandstofmodel MO bij verschillende dead fuel moisture-waardes en verschillende windsnelheden (lijnen).

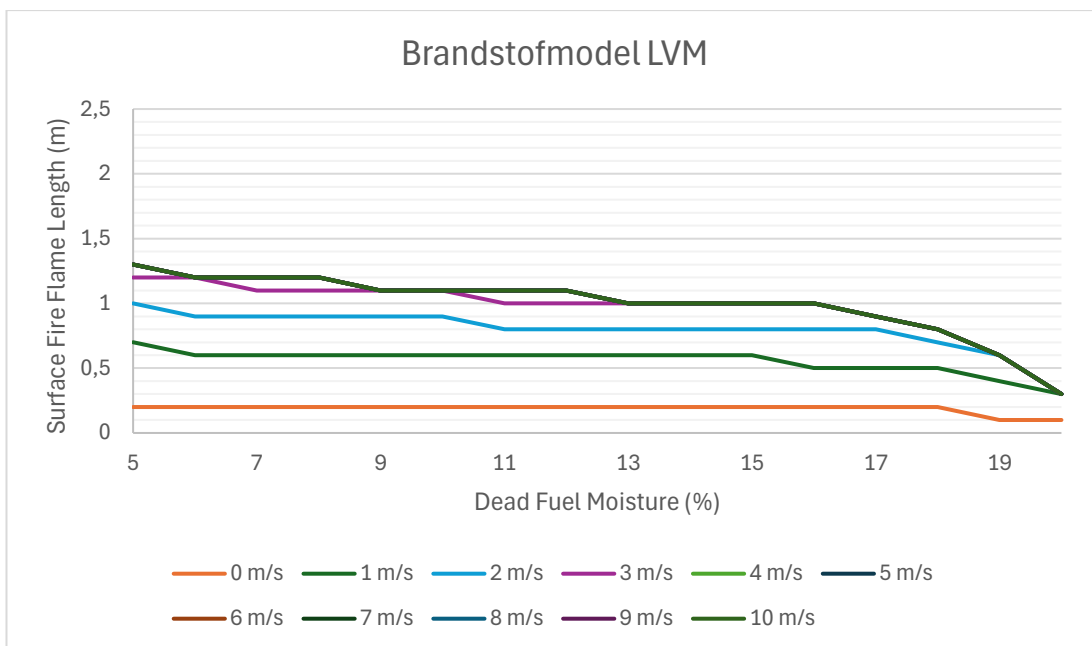
Vlamlengte



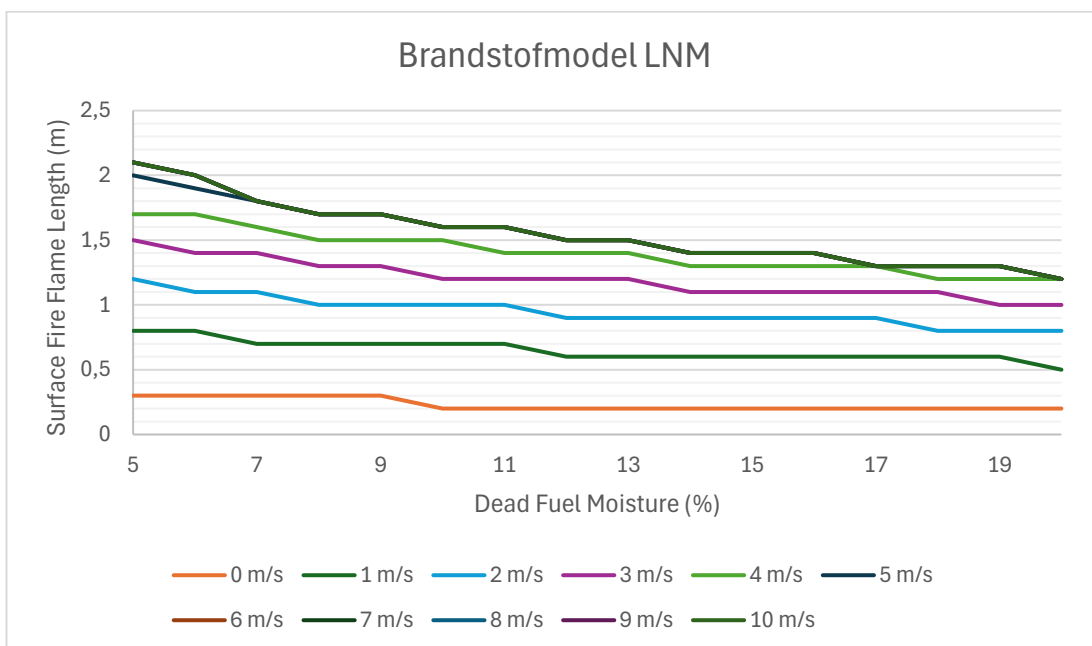
Figuur B77.6 De vlamlengte voor het brandstofmodel HVM bij verschillende dead fuel moisture-waarden en verschillende windsnelheden (lijnen).



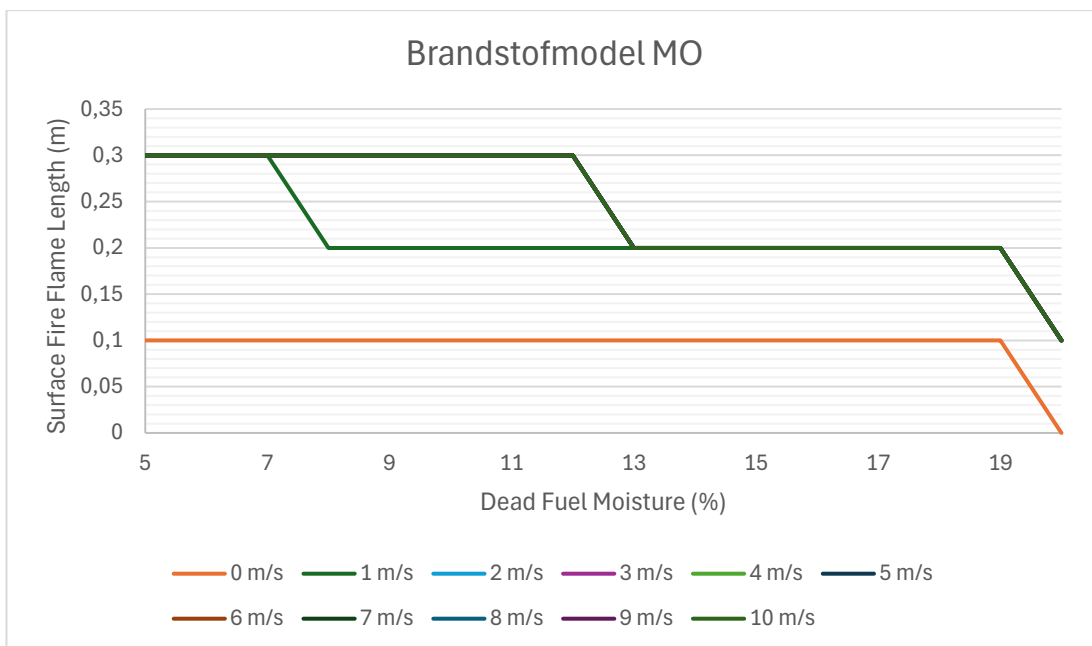
Figuur B77.7 De vlamlengte voor het brandstofmodel HNM bij verschillende dead fuel moisture-waarden en verschillende windsnelheden (lijnen).



Figuur B7.8 De vlamlengte voor het brandstofmodel LVM bij verschillende dead fuel moisture-waardes en verschillende windsnelheden (lijnen).

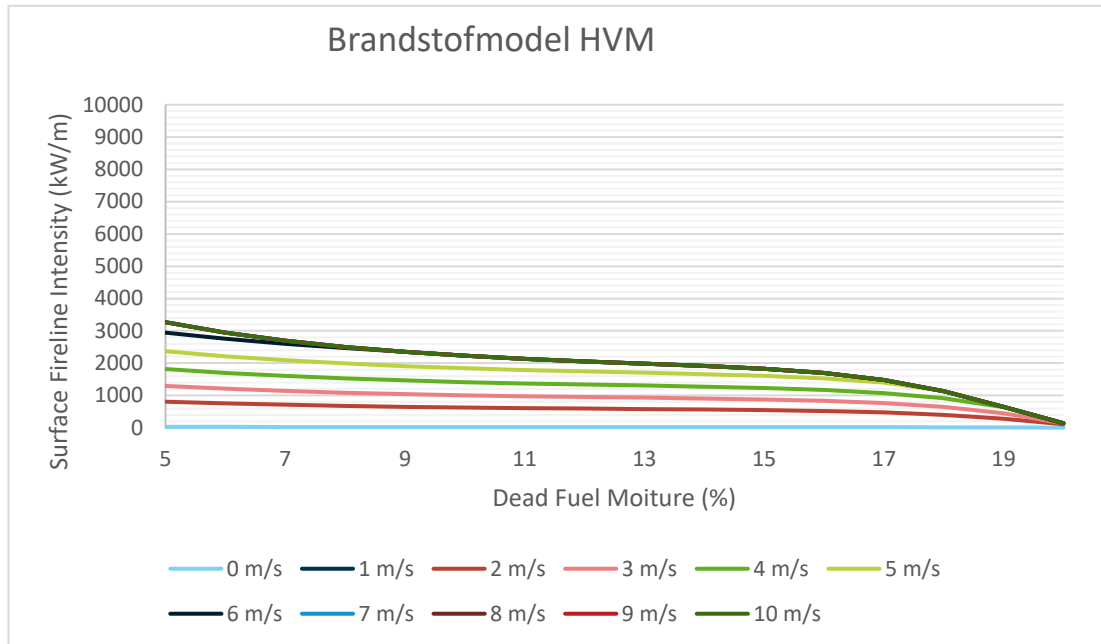


Figuur B7.9 De vlamlengte voor het brandstofmodel LNM bij verschillende dead fuel moisture-waardes en verschillende windsnelheden (lijnen).

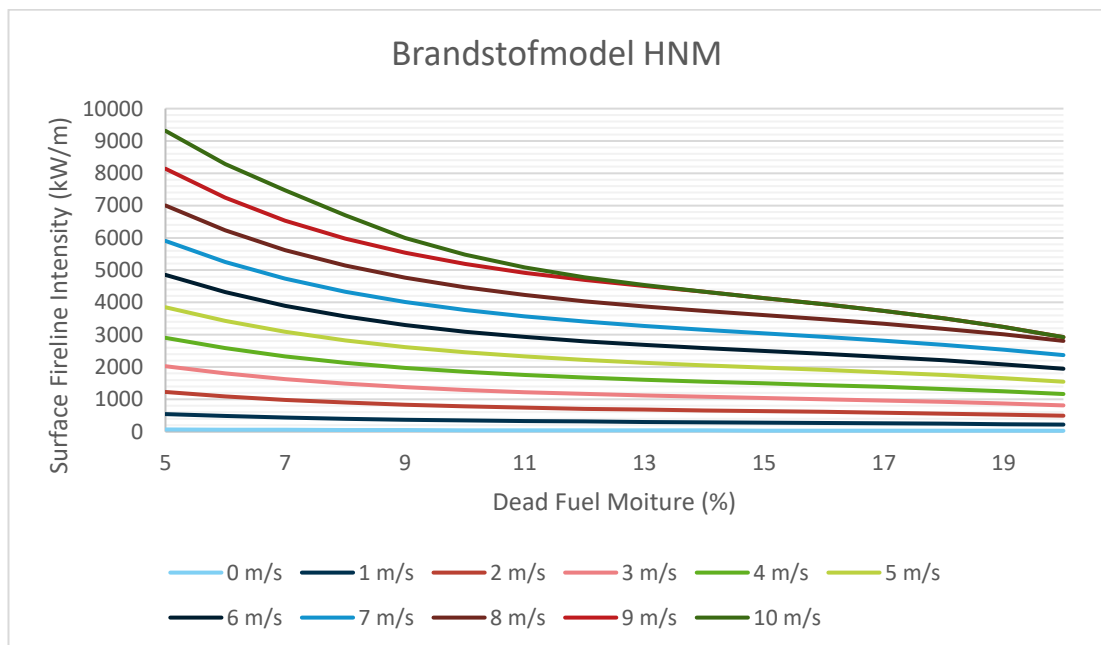


Figuur B7.10 De vlamlengte voor het brandstofmodel MO bij verschillende dead fuel moisture-waardes en verschillende windsnelheden (lijnen).

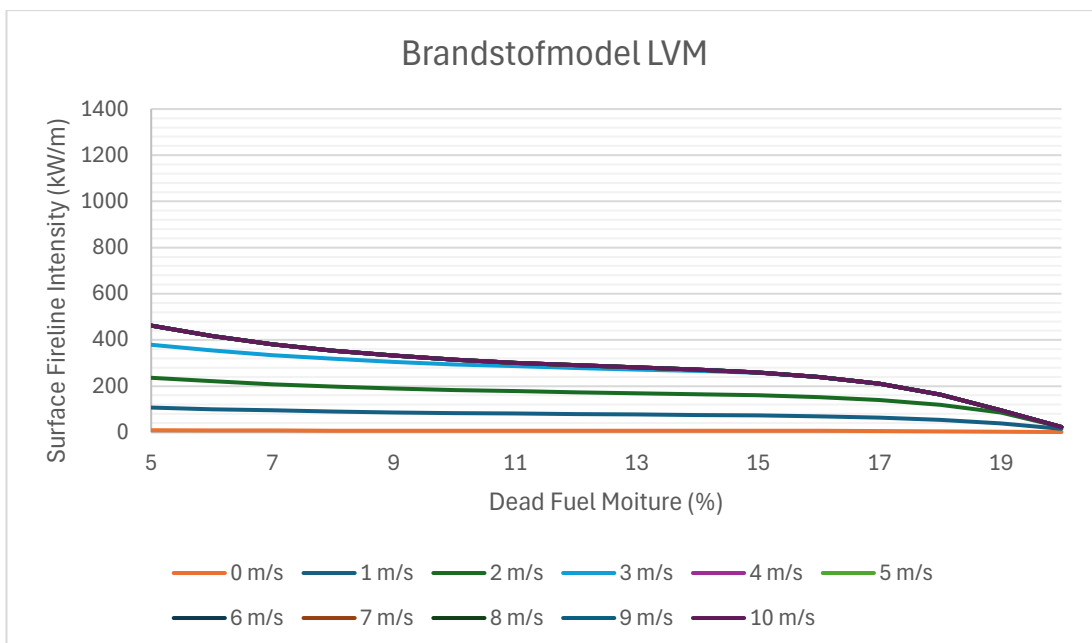
Intensiteit van het vuurfront



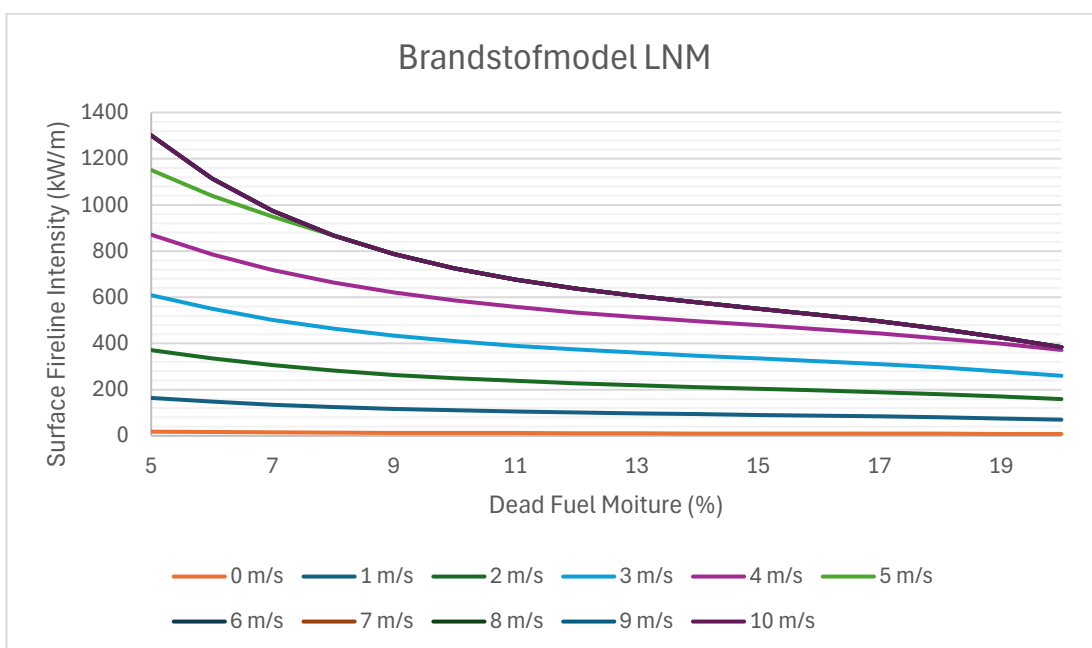
Figuur B7.11 De intensiteit van het vuurfront voor het brandstofmodel HVM bij verschillende dead fuel moisture-waardes en verschillende windsnelheden (lijnen).



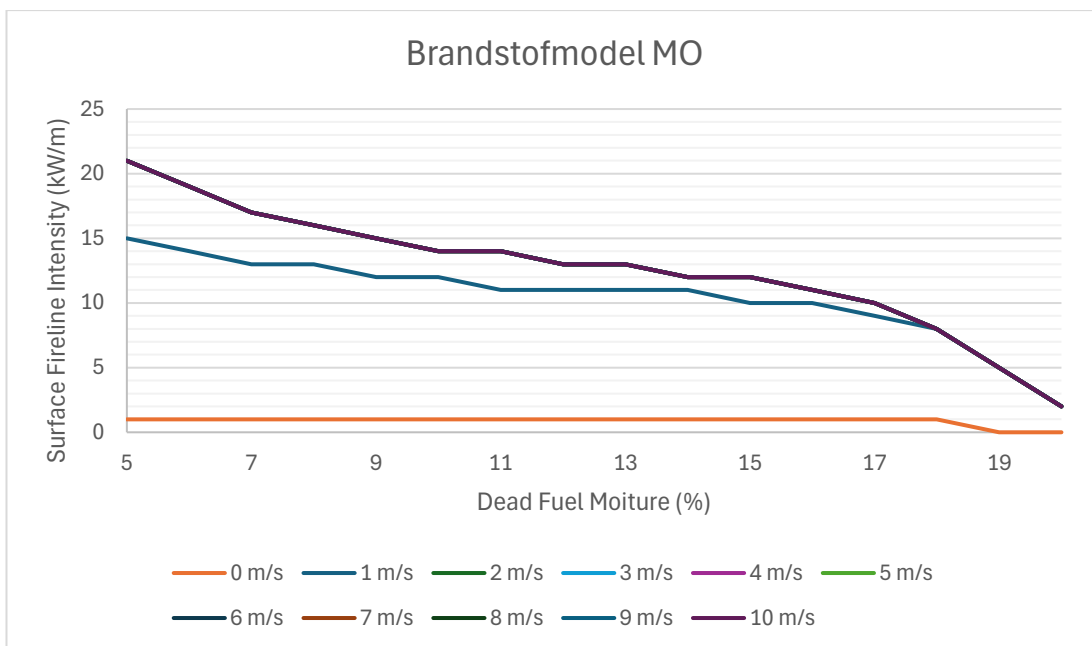
Figuur B7.12 De intensiteit van het vuurfront voor het brandstofmodel HNM bij verschillende dead fuel moisture-waardes en verschillende windsnelheden (lijnen).



Figuur B7.13 De intensiteit van het vuurfront voor het brandstofmodel LVM bij verschillende dead fuel moisture-waardes en verschillende windsnelheden (lijnen).

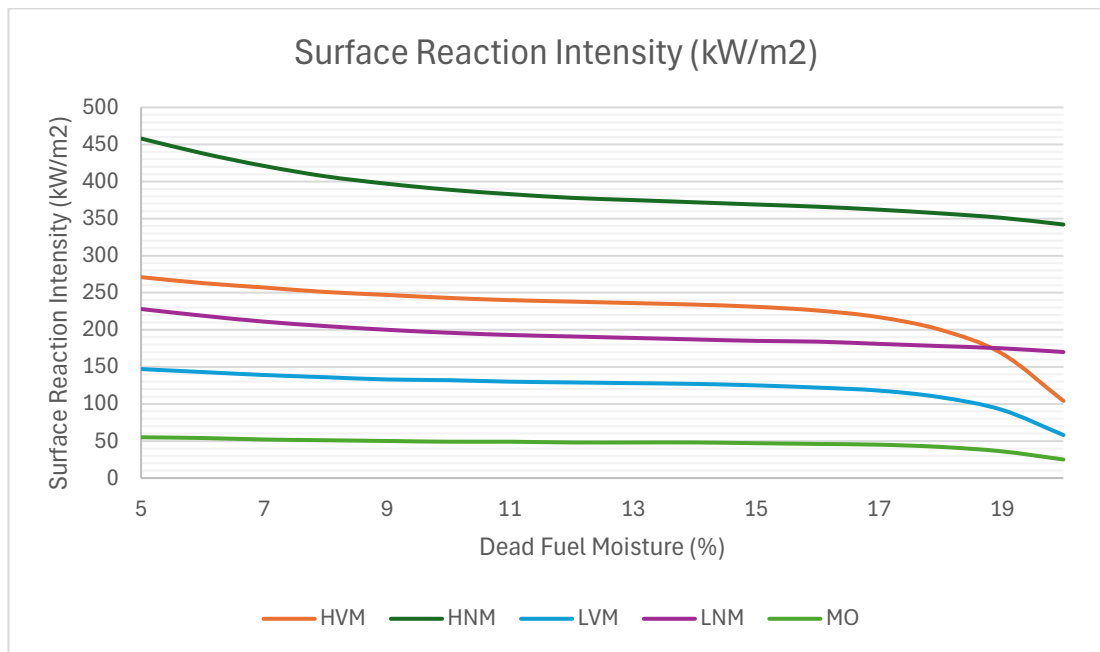


Figuur B7.14 De intensiteit van het vuurfront voor het brandstofmodel LNM bij verschillende dead fuel moisture-waardes en verschillende windsnelheden (lijnen).



Figuur B7.15 De intensiteit van het vuurfront voor het brandstofmodel MO bij verschillende dead fuel moisture-waardes en verschillende windsnelheden (lijnen).

Brandvermogensdichtheid



Figuur B7.16 De brandvermogensdichtheid voor alle brandstofmodellen: HVM, HNM, LVM, LNM en MO bij verschillende dead fuel moisture-waardes.

De brandvermogensdichtheid is opgebouwd uit dead fuel brandvermogensdichtheid en live fuel brandvermogensdichtheid (Andrews, 2009). Dead fuel brandvermogensdichtheid is het deel van de brandvermogensdichtheid dat door de dode brandstof wordt gegenereerd; live fuel brandvermogensdichtheid het deel van de brandvermogensdichtheid dat door de levende brandstof wordt gegenereerd.

In de brandstofmodellen voor maaien (HVM en LVM) en brandstof model MO is de verhouding de dead fuel brandvermogensdichtheid en live fuel brandvermogensdichtheid ongeveer gelijk aan 1, tot 20% dead fuel moisture (data niet getoond). In brandstofmodellen na maaien, waarin het (uitgedroogde) maaisel is blijven liggen, heeft de dead fuel brandvermogensdichtheid een groter aandeel dan de live fuel brandvermogensdichtheid (een factor 5 tot 6 voor HNM en factor 3 voor LNM).

In figuur B7.16 is te zien dat bij hoge relatieve luchtvochtigheid (dead fuel moisture > 18%) de brandvermogensdichtheid van met name de brandstofmodellen voor maaien (HVM, LVM) sterk afneemt en in minder sterke mate ook de brandvermogensdichtheid van brandstofmodel MO. Bij die hoge relatieve luchtvochtigheid neemt het aandeel van de live fuel brandvermogensdichtheid in de brandvermogensdichtheid sterk af (data niet getoond).

Bijlage 8 Afkortingen

BESS	battery energy storage system
EOS	energieopslagsysteem
IR	infrarood
NIPV	Nederlands Instituut Publieke Veiligheid
PAC	particuliere alarmcentrale
PGS	Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen
PV	photo voltaic
ROS	Rate of spread
RVO	Rijksdienst voor Ondernemend Nederland
SDE++	Stimulering Duurzame Energieproductie en Klimaattransitie (subsidieregeling)
WUR	Wageningen Universiteit en Research