

Literatuurstudie Early Warning Droogte

Versie: 1.0, 30 november 2020

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

Colofon

Instituut Fysieke Veiligheid (2020). *Literatuurstudie Early Warning Droogte*. Arnhem: IFV.

Oprichtgever: Brandweer Nederland
Contactpersoon: ir. Jelmer Dam
Titel: Literatuurstudie Early Warning Droogte
Datum: 30 november 2020
Status: Definitief
Versie: 1.0
Auteurs: ing. N. Brouwer en ing. J. Ebus
Projectleider: ing. N. Brouwer
Review: drs. C. Tonnaer, dr. ir. R. Weewer en ir. Jelmer Dam
Eindverantwoordelijk: dr. ir. R. Weewer

Abstract

The project Early Warning Droogte (EWD), part of the GBO-SO¹ of the Dutch fire service is an innovative project aimed at studying the moisture content of (dead) vegetation, based on satellite images. The purpose of this project is to determine the threshold of moisture content of fuels in relation with wildfire risk. This report shows the results of a literature review into the threshold values of moisture content that determine whether the (dead) vegetation can catch fire and keep burning. This study focuses on four different kinds of vegetation: common heather, purple moor grass, beach grass and pine trees. Although there are many factors contributing to the occurrence of wildfires in these types of vegetation, the moisture content is one that plays an important role. However, it is shown that determining threshold values is not straightforward.

¹ National program of the Netherlands Fire Service, translated as 'Working together on the large-scale and specialist performance'.

Samenvatting

Het project Early Warning Droogte (EWD), onderdeel van het programma GBO-SO van Brandweer Nederland, is een innovatieproject dat als doel heeft om op basis van satellietdata inzicht te krijgen in het vochtgehalte van de strooisellaag en de vegetatie, en daarmee in de droogte. Op basis daarvan kan het natuurbrandrisico (mede) bepaald worden. Als onderdeel van dit project is er een literatuuronderzoek uitgevoerd om te achterhalen vanaf welke drempelwaarde de vegetatie en strooisellaag brandbaar worden. Wat betreft de vegetatie wordt er onderscheid gemaakt tussen heide, pijpenstrootje (grasland), helm (kustgebied) en naaldbos.

Het vochtgehalte van de vegetatie is één van vele factoren die van invloed zijn op het ontstaan van een brand. Het is daarnaast één van de belangrijkste factoren die de mate van branduitbreiding beïnvloeden. De kans op het ontstaan van een brand is multifactorieel: factoren zoals de wind, het aandeel dood en levend organisch materiaal, de samenstelling van de vegetatie en de strooisellaag zijn allemaal van invloed op het vochtgehalte waarbij brand kan ontstaan. Uit dit literatuuronderzoek is gebleken dat er geen drempelwaarden vast te stellen zijn voor de kans op ontstaan van een natuurbrand in de vier bestudeerde vegetatietypen.

Als vervolgstap op dit project wordt geadviseerd om een analyse uit te voeren van de gebieden waar er natuurbranden hebben plaatsgevonden in Nederland met behulp van satellietdata en meteogegevens.

Inhoud

Abstract	3
Samenvatting	4
Inleiding	6
1 Achtergrondinformatie	9
1.1 Vegetatie / brandstof	9
1.2 De relatie tussen vocht, brandstof en natuurbrandrisico	9
1.3 Het vochtgehalte van de vegetatie en strooisellaag	10
2 Resultaten	12
2.1 De relatie tussen het vochtgehalte, de brandstof en brandgedrag	12
2.2 Vegetatie	13
2.3 Strooisellaag	19
3 Conclusie en aanbevelingen	21
3.1 Beantwoording van de deelvragen	21
3.2 Beantwoording van de hoofdvraag	23
3.3 Vervolgonderzoek	24
Literatuurlijst	25

Inleiding

Aanleiding

Het vochtgehalte van de vegetatie is een belangrijke factor die het natuurbrandgevaar mede bepaalt (Chuvienco, Aguado, & Dimitrakopoulos, 2004). Om het natuurbrandrisico² beter te kunnen voorspellen, hebben Brandweer Nederland en het Instituut Fysieke Veiligheid (IFV) een innovatiepartnerschap³ doorlopen, gericht op het dagelijks meten van droogte in de vegetatie met behulp van satellietdata⁴. Dit traject is uitgevoerd met ondersteuning van het ministerie van Justitie en Veiligheid, The Hague Security Delta en Netherlands Space Office. In januari 2019 is dit innovatiepartnerschap afgerond, met als resultaat een overeenkomst voor de oplevering van een product dat dagelijks op basis van satellietdata het vochtgehalte in de vegetatie en de strooisellaag weergeeft, evenals een prognose van deze waarden voor de komende 48 uur op basis van de meteorologische data van het KNMI.

Het project 'Early Warning Droogte' (EWD) maakt onderdeel uit van het programma 'GBO-SO specialisme Natuurbrandbeheersing' (GBO-SO/NBB) van Brandweer Nederland. Dit project heeft als doel om een online informatiesysteem te realiseren waarop onder andere zichtbaar is wat het vochtgehalte is van de strooisellaag en van de vegetatie van de natuurgebieden in Nederland, waarmee de veiligheidsregio's hun eigen natuurbrandrisico kunnen bepalen. De data worden twee keer per dag geüpdatet aan de hand van satellietmetingen. Op basis van deze metingen en van meteorologische data wordt er een prognose gemaakt van het vochtgehalte voor de volgende 48 uur. Wat betreft de vegetatie wordt er op basis van de vegetatiekaart uit het GBO-SO/NBB deelproject 'Satellietdata/vegetatiekaart' (Brandweer Nederland, 2020) onderscheid gemaakt tussen vier verschillende vegetatietypen (heide, grasland, duingrasland en naaldbos), omdat de meeste of meest grote branden in Nederland voorkomen in deze soorten vegetatie. Zo vond 72% van het aantal natuurbranden in Nederland in 2018 plaats in heide of grasland (San-Miguel-Ayanz, et al., 2019). Bij naaldbos kan kroonvuur ontstaan wat zorgt voor een heftige brand daarom wordt dit type vegetatie ook beschouwd. De vier genoemde typen zijn te duiden als hoofdtypen van de brandstofmodellen. Per hoofdtype zijn er meerdere brandstofmodellen; zo is er voor het hoofdtype heide een nadere onderverdeling gemaakt tussen jonge heide, vergraste heide, oude heide en veenheide.

Met deze literatuurstudie, die onderdeel is van het project 'Early Warning Droogte', wordt onderzocht vanaf welk vochtpercentage de vegetatie en de strooisellaag brandbaar zijn. Met deze kennis kan input geleverd worden voor de classificatie van het natuurbrandrisico. In het kader van dit onderzoek wordt onder een natuurbrand verstaan: een brand die ontstaat in

² Het natuurbrandrisico is de kans op het ontstaan van een natuurbrand, met als mogelijk gevolg een onbeheersbare natuurbrand.

³ Dit is een aanbestedingsprocedure waarbij de aanbestedende dienst met bedrijven een innovatief ontwikkeltraject start en daarna overgaat tot commerciële en (grootschalige) inkoop van de oplossing.

⁴ Naar het gebruik van satellietdata voor het bepalen van het natuurbrandrisico wordt in toenemende mate onderzoek gedaan en toegepast (Chuvienco, 2003)

een individuele plant (verder: vegetatie) of de strooisellaag en die zich via de aangrenzende vegetatie of strooisellaag uitbreidt.

Doel en doelgroep

Het doel van deze literatuurstudie is om het maximale vochtgehalte van de vegetatietypen en strooisellaag te bepalen, waarbij de betreffende typen en strooisellaag nog door een ontstekingsbron tot ontbranding kunnen worden gebracht, de brand zich kan uitbreiden en bovendien zelfonderhoudend is.

Hiermee kan input worden geleverd voor het opstellen van handvatten om de data uit het informatiesysteem 'Early Warning Droogte' te kunnen duiden, en zo het natuurbrandrisico te kunnen bepalen.

De beoogde doelgroep voor deze literatuurstudie heeft reeds kennis over natuurbranden en is een potentiële eindgebruiker van het informatiesysteem EWD met interesse in achtergrondinformatie.

Hoofd- en deelvragen

De hoofdvraag die in deze studie centraal staat, is de volgende:

Wat is het maximale vochtgehalte per vegetatietype en strooisellaag, waarbij de brandstof in de natuur tot ontbranding kan worden gebracht en de brand zichzelf in stand houdt?

Met het in stand houden van een brand wordt bedoeld dat, na ontsteking door bijvoorbeeld een vlam, de brandstof blijft branden en de brand zich via aangrenzende brandstof (vegetatie of strooisellaag) uitbreidt.

De deelvragen die nodig zijn om de hoofdvraag te kunnen beantwoorden, staan hieronder:

1. Op welke manier beïnvloedt het vochtgehalte van de brandstof het natuurbrandgedrag?
2. Wat is het maximale vochtgehalte waarbij een natuurbrand kan plaatsvinden in de vier hoofdtypen vegetatie:
 - heide
 - pijpenstrootje
 - helmgras
 - naaldbomen
3. Wat is het maximale vochtgehalte waarbij een natuurbrand kan plaatsvinden in de strooisellaag?

Afbakening

In de literatuur is gezocht naar het effect van het vochtgehalte van de brandstof (levend en dood materiaal) op het ontstaan van een zelfonderhoudende natuurbrand ('self-sustaining'). Er is specifiek gekeken naar literatuur over de drempelwaarde van het vochtgehalte van de strooisellaag en de vier genoemde vegetatietypen.

Wat niet is meegenomen in het onderzoek, zijn het effect van het vochtgehalte op de mate van verbranding, de hoeveelheid beschikbare brandstof, de intensiteit van de brand en de rookontwikkeling. Er is evenmin onderzoek gedaan naar bijzondere ontstekingsbronnen. Wél is gekeken naar onderzoeken waarin 'normale' ontstekingsbronnen centraal staan, zoals vliegvuur, open vlammen, vonken, hete voorwerpen, et cetera.

Wat betreft de open vlammen moet worden opgemerkt dat er hier wordt uitgegaan van een open vlam op zichzelf, waarbij geen gebruik wordt gemaakt van hulpmiddelen, zoals brandbare vloeistoffen, papier en dergelijke (mogelijk bij brandstichting), die van invloed kunnen zijn op de snelheid waarmee de vegetatie tot ontbranding kan worden gebracht.

Onderzoeksmethode

Dit literatuuronderzoek is uitgevoerd gedurende de periode augustus 2019 tot en met juni 2020. Er is gebruikgemaakt van informatie uit online beschikbare wetenschappelijke publicaties en artikelen.

Voor het verzamelen van de literatuur is gebruik gemaakt van Google, Google Scholar, ScienceDirect, CSIROpublishing en Fire Research Institute. Hierbij zijn diverse zoektermen gebruikt, zoals 'live fuel moisture content', 'wildfire fuel moisture', "wildfire risk" en 'fire spread'. Per onderzoeksvraag is er specifiek gezocht naar het desbetreffende vegetatietype in relatie met natuurbranden. Dit is ook voor de strooisellaag gedaan.

Het aantal onderzoeken waar de vier vegetatietypen zijn bekeken die hier centraal staan, en die bovendien zijn uitgevoerd in een soortgelijk klimaatzone als in Nederland, is beperkt. Daarom is er ook gekeken naar onderzoeken waar andere klimaatzones centraal staan.

Leeswijzer

In het eerste hoofdstuk wordt een aantal onderwerpen besproken dat noodzakelijk is om de resultaten van het onderzoek in de juiste context te kunnen plaatsen. In het tweede hoofdstuk komen de resultaten van de literatuurstudie aan bod, besproken per deelvraag. Dit rapport sluit af met een conclusie en enkele aanbevelingen.

1 Achtergrondinformatie

In dit hoofdstuk wordt enige basisinformatie gegeven over de relatie tussen het vochtgehalte en natuurbranden.

1.1 Vegetatie / brandstof

Bij een natuurbrand bestaat de brandstof hoofdzakelijk uit vegetatie (Instituut Fysieke Veiligheid, 2017). Deze vegetatie kan levend zijn of dood, bijvoorbeeld in de vorm van een strooisellaag. Verder in dit rapport wordt gesproken van brandstof.

Het IFV heeft sinds 2012 in samenwerking met de Stephen F. Austin State University uit de Verenigde Staten acht verschillende brandstofonderzoeken uitgevoerd in de Nederlandse vegetatietypen (Oswald, Brouwer, & Willemsen, 2017). De informatie uit deze onderzoeken is door het IFV vertaald naar twintig verschillende brandstofmodellen (Instituut Fysieke Veiligheid, 2018). Elk brandstofmodel is specifiek opgesteld voor een bepaald vegetatietype.

Brandweer Nederland en het IFV hebben op basis van satellietdata een vegetatiekaart laten ontwikkelen, waarop de twintig brandstofmodellen weergegeven worden. De satellietdata/vegetatiekaart wordt jaarlijks twee keer geüpdatet. De kaart wordt gebruikt voor de Risico Index Natuurbranden⁵ en zal tevens worden gebruikt in het Natuurbrandverspreidingsmodel⁶ (NBVM) (Brandweer Nederland, 2020). De satellietdata/vegetatiekaart is onderlegger in het online informatiesysteem EWD, zodat de vier vegetatietypen (heide, grasland, duingras en naaldbos) zichtbaar zijn op de kaart. De meest dominante individuele soort in het type heide is struikheide (*Calluna vulgaris*). In grasland is dit het pijpenstrootje (*Molinia caerulea*), in het type open duin is dit helmgras (*Ammophila arenaria*) en in naaldbos de grove den (*Pinus sylvestris*).

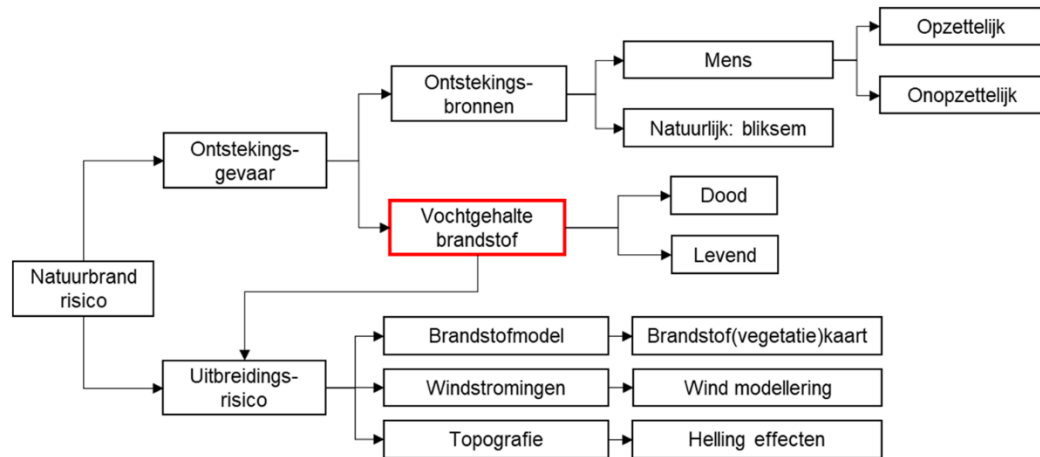
1.2 De relatie tussen vocht, brandstof en natuurbrandrisico

Figuur 1.1 op de volgende pagina geeft een stroomschema weer waarin de factoren staan die invloed hebben op het natuurbrandrisico in plaats en tijd, gebaseerd op Chuvieco, Aguado & Dimitrakoploulos (2004). Hieruit blijkt dat het vochtgehalte van een brandstof een belangrijke rol speelt bij zowel het ontstaan (het ontstekingsgevaar) als bij de uitbreiding van een natuurbrand. In het raamwerk zijn de vochtgehalten van de dode vegetatie en de levende vegetatie als aparte factoren weergegeven. De verschillende projecten uit het programma GBO-SO/NBB haken aan op deze variabelen. Zo wordt er onderzoek gedaan naar ontstekingsbronnen (natuurbrandonderzoek), die worden bijgehouden in de database natuurbranden. Er zijn brandstofmodellen vastgesteld middels de eerder genoemde

⁵ Applicatie van Brandweer Nederland waarmee op basis van 17 verschillende parameters het risico op en de impact van een onbeheersbare natuurbrand per km vak (Rijksdriehoekstelsel) in Nederland bepaald kunnen worden.

⁶ Model waarmee de verspreiding van een natuurbrand gemodelleerd kan worden voor de komende zes uur op basis van meteodata en brandstofmodellen.

brandstofonderzoeken. Deze brandstofmodellen worden aan een gebied toegekend op basis van de satellietdata/vegetatiekaart (brandstof(vegetatie)kaart). Windsnelheid (windstromingen) en brandstof komen terug in het huidige natuurbrandverspreidingsmodel, dat in de toekomst ook rekening zal gaan houden met hellingeffecten en met de brandstofmodellen uit de gedetailleerde satellietdata/vegetatiekaart.



Figuur 1.1 Stroomschema van het natuurbrandrisico, gebaseerd op Chuvieco, Aguado & Dimitrakoulouos (2004)

Dat het vochtgehalte van de brandstof een centrale rol speelt bij natuurbrandrisico komt ook naar voren uit de onderzoeken van Rossa & Fernandes (2017) naar bijdrage van het vochtgehalte van de levende vegetatie aan branduitbreiding en van Arganaraz, Landi, Scavuzzo, & Bellis (2018) naar het bepalen van de drempelwaarde vochtgehalte brandstof. Het vochtgehalte van de brandstof van een natuurbrand is één van de meest belangrijke factoren voor het bepalen van de branduitbreiding (Rossa & Fernandes, 2019) en van natuurbrandgedrag (Arganaraz, Landi, Scavuzzo, & Bellis, 2018).

1.3 Het vochtgehalte van de vegetatie en de strooisellaag

Het vochtgehalte van de brandstof is de verhouding tussen de watermassa en de droge massa van de brandstof (Pimont, Ruffault, Martin-StPaul, & Dupuy, 2019). Een vochtgehalte van 100 % betekent dat er precies evenveel water als vaste stof aanwezig is. Het vochtgehalte kan hoger zijn dan 100%, omdat er naar verhouding meer water aanwezig kan zijn dan droge massa. In de literatuur wordt het vochtgehalte van de levende en dode brandstof aangeduid als FMC, ofwel Fuel Moisture Content. Als het specifiek om het vochtgehalte van de (levende) vegetatie gaat, wordt de term LFMC (Live Fuel Moisture Content) gebruikt. Voor de strooisellaag en/of dode vegetatie wordt dit DFMC (Dead Fuel Moisture Content) genoemd. De dode vegetatie kan zowel op de bodem liggen en de strooisellaag vormen, als nog vastzitten aan de (levende) plant.

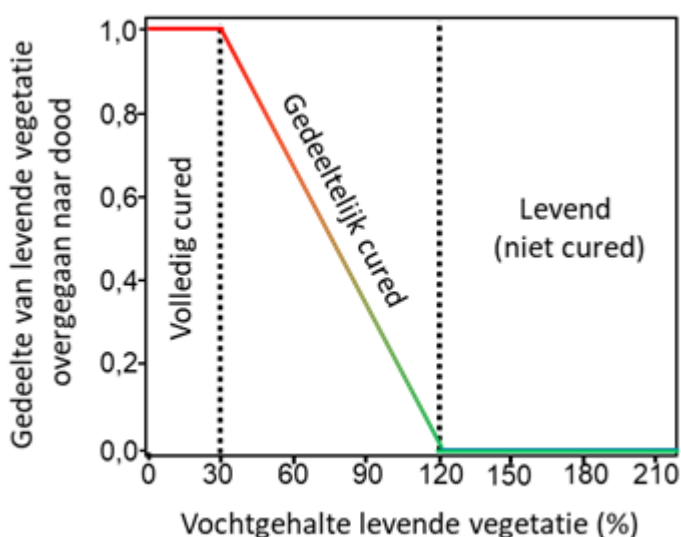
Er wordt bij dode brandstof uitgegaan van vier verschillende (tijds-)klassen: 1-hour, 10-hour, 100- hour en 1000-hour (Oklahoma State University, 2020). Een deeltje in de klasse van 1-hour zal zich binnen één uur aan de luchtvochtigheid aanpassen en een deeltje in de 10-hour klasse binnen tien uur, enzovoort. De indeling is gebaseerd op de grootte van het materiaal. Zo vallen binnen de klasse 1-hour dode deeltjes van grassen en andere

kruidachtigen en naalden van naaldbomen, bladeren van loofbomen en twijgen tot 6 mm dikte in doorsnede. Onder de 10-hour klasse vallen dode takken en twijgen tussen de 6 en 25 mm. Tot de klasse 100-hour horen dode takken en kleine dode bomen van 25-76 mm; alles daarboven tot 203 mm valt in de hoogste klasse van 1000-hour.

Voor het project EWD wordt onder de strooisellaag de bovenste bodemlaag verstaan, bestaande uit nog herkenbare takken, twijgen, bladeren en naalden van planten. Als de vegetatie te ver uit elkaar staat om voor brandoverslag te zorgen, kan de strooisellaag leiden tot branduitbreiding naar andere planten. Bij een te hoog vochtgehalte zal er echter geen branduitbreiding plaatsvinden via de strooisellaag.

Het vochtgehalte van de strooisellaag kan ten opzichte van levende vegetatie relatief snel veranderen, tussen de 1 en 100 uur. De snelheid van die verandering is afhankelijk van de dikte van het materiaal: hoe dunner, hoe sneller de verandering optreedt. Vaak bestaat de strooisellaag uit dun materiaal. Levende vegetatie in bossen reageert langzamer op omgevingsverandering zoals droogte. In theorie kan de levende vegetatie in een maand tijd veranderen van niet brandbaar naar brandbaar (Nolan, Boer, Dios de, Caccamo, & Bradstock, 2016).

Op de kruidachtige vegetatie zoals grassen, is het zogenaamde 'curing'-proces van toepassing. Met dit proces wordt het drogen en uiteindelijk het afsterven van delen van de plant bedoeld. Des te droger de plant, des te verder deze in het curing proces zit. Door het drogen en afsterven van delen van de plant verandert ook de structuur van die delen. In figuur 1.2, gebaseerd op Scott & Burgan (2005), wordt de relatie weergegeven tussen het vochtgehalte en de mate van 'curing'. Als het vochtgehalte 120% of hoger is, is er sprake van een levende plant. Wanneer het vochtgehalte zakt onder de 120%, is er sprake van 'curing'. Hoe verder het vochtgehalte onder de 120% zakt, hoe groter het aandeel dood materiaal in de plant. Als het vochtpercentage onder de 30% daalt, wordt de plant als volledig dood beschouwd.



Figuur 1.2 Weergave van het curing-proces in kruidachtige vegetatie, gebaseerd op Scott & Burgan (2005)

2 Resultaten

In dit hoofdstuk zijn per deelvraag de resultaten van het literatuuronderzoek opgenomen. Paragraaf 2.1 biedt de informatie op basis waarvan het antwoord op de eerste deelvraag kan worden gegeven en paragraaf 2.2 gaat in op de relatie tussen het vochtgehalte van de vier hoofdtypen vegetatie en natuurbrandgedrag, waarbij pijpenstrootje en helmgras samen besproken zullen worden. In paragraaf 2.3 ten slotte komt de relatie tussen het vochtgehalte van de strooisellaag en natuurbrandgedrag aan bod.

2.1 De relatie tussen het vochtgehalte, de brandstof en brandgedrag

In deze paragraaf komt, zoals de titel al aangeeft, de relatie tussen het vochtgehalte, de brandstof en brandgedrag aan de orde. Daarbij zal worden ingegaan op het fenomeen verbranding, op de factoren die het al dan niet ontsteken van een brandstof bepalen en als laatste op het vochtgehalte – de factor die centraal staat in dit onderzoek.

Verbranding en ontsteking

Voor verbranding moeten drie componenten aanwezig zijn: brandstof, zuurstof en warmte. Brandstof en zuurstof reageren met elkaar bij voldoende hoge temperaturen. Bij deze reactie komt warmte vrij; als die voldoende is, blijft de temperatuur hoog genoeg en houdt de reactie zichzelf in stand. Voor een vlammende verbranding moet een brandstof gasvormig zijn. Een vaste brandstof zal daarvoor dus eerst omgezet moeten worden in een gas. Dit gebeurt door het uiteenvallen van de moleculen onder invloed van warmte, de zogenaamde ontleding of pyrolyse (Tromp & Mierlo van, 2013).

Het is van veel factoren afhankelijk of een brandstof door een ontstekingsbron kan worden ontstoken (Sun, et al., 2018):

- > de brandgrootte en -staat:
 - vlammend
 - gloeiend
- > omgevingscondities:
 - temperatuur
 - relatieve luchtvochtigheid
 - windsnelheid
- > kenmerken van het brandstofbed:
 - vochtgehalte
 - pakkingverhouding
 - brandstofrangschikking
 - temperatuur
 - poreusheid.

De invloed van het vochtgehalte op verbranding en branduitbreiding

Voor de ontleding van de brandstof is energie (warmte) nodig. Het vochtgehalte heeft veel invloed op de opwarmingsnelheid van de brandstof. Een deel van de energie gaat namelijk verloren aan het opwarmen en verdampen van het vocht. Hoe hoger het vochtgehalte is, hoe langzamer de opwarming gaat, en hoe groter de hoeveelheid energie is die door de ontstekingsbron naar de brandstof wordt overgedragen, hoe sneller de verdamping van het vocht en de opwarming van de brandstof gaan. (Tromp & Mierlo van, 2013)

Het vochtgehalte van de brandstof van een natuurbrand is één van de meest belangrijke factoren voor het bepalen van de branduitbreiding (Rossa & Fernandes, 2017). Grote branden komen namelijk voor bij een lage FMC; dergelijke branden hebben vaak een hoge intensiteit en zijn moeilijk te blussen (Arganaraz, Landi, Scavuzzo, & Bellis, 2018). Brandstof met een hoog vochtgehalte fungeert daarentegen als een zogenaamde 'heat sink' (Terrah, et al., 2020). Dit wil zeggen, dat er voor het verdampen van het vocht zoveel warmte (energie) wordt gebruikt, dat het langer duurt voordat de brandstof deel gaat nemen aan de verbranding. Hierdoor wordt de intensiteit van de brand beperkt, zodat de branduitbreiding stopt of vertraagt. Het vochtgehalte van de vegetatie bepaalt dus ook in belangrijke mate het gedrag en de intensiteit van een natuurbrand (Ruffault, Martin-StPaul, Pimont, & Dupuy, 2018).

2.2 Vegetatie

Het vochtgehalte van de vegetatie

Er is een duidelijk verschil tussen de condities die bepalen wanneer een brand in een plant-individueel kan ontstaan, maar er geen verspreiding naar andere planten plaatsvindt en de condities waarbij de brand zich verspreidt naar andere planten (Anderson & Anderson, 2010). Bij experimenten bleek dat de LFMC een grotere invloed heeft op het brandgedrag dan eerder gerapporteerd (Pimont, Ruffault, Martin-StPaul, & Dupuy, 2019; Dennison, Roberts, Peterson & Rechels, 2005). Als er veel vocht aanwezig is, dan verlaagt dit de kans op een succesvolle ontsteking en vertraagt de brand. In levende en afstervende vegetatie is over het algemeen meer vocht aanwezig en in grotere variaties dan in dode vegetatie. De bandbreedte van het vochtgehalte van de brandstof (i.c. het vegetatietype, zowel DFMC als LFMC) verschilt aanzienlijk tussen ecosystemen en dient voor elk ecosysteem apart te worden beschouwd (Arganaraz, Landi, Scavuzzo, & Bellis, 2018). Het vochtgehalte van de vegetatie hangt samen met onder andere de worteldiepte van de plant, het type blad, de leeftijd van de plant en al dan niet optredende bladval (Ruffault, Martin-StPaul, Pimont, & Dupuy, 2018). Daarnaast onderscheidt brandstof van levende vegetatie zich van die van dode vegetatie doordat de samenstelling anders kan zijn door plantchemie en uitdrogingsprocessen (Terrah, et al., 2020). Bij het dode materiaal is de samenstelling zodanig, dat het materiaal sneller tot ontbranding komt. In figuur 2.1 is deze verandering voor helmgras in beeld gebracht, dat wordt afgebeeld van helemaal levend (uiterst links) tot volledig dood (uiterst rechts).



Figuur 2.1 Effect van het uitdrogingsproces (curing) op helmgras, van levend (links) naar dood (rechts) (bron: IFV)

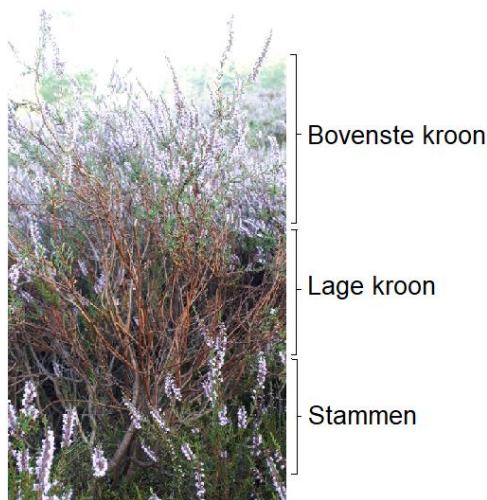
Het vochtgehalte in relatie tot ontbranding

Diverse experimenten uit de Verenigde Staten zijn uitgevoerd om te bepalen bij welk vochtgehalte een specifieke vegetatietype met een open vlam (lucifer) tot ontbranding kan worden gebracht. Deze experimenten tonen aan dat het (uit)drogen van vegetatie niet uniform is. Als het gemiddelde vochtgehalte van een veld daalt, zullen er in toenemende mate individuele planten zijn (en clusters van deze planten) die droog zijn en tot ontbranding kunnen worden gebracht. De brandende vegetatie kan daarna de rest van het veld aansteken (Babrauskas, 2005).

Een onderzoek uit Australië heeft aangetoond dat er een duidelijke drempelwaarde van het vochtgehalte van de vegetatie te vinden is in relatie tot het ontstaan van branden in bossen (i.c. eucalyptus bos) (Nolan, Boer, Dios de, Caccamo, & Bradstock, 2016). Ook is er een onderzoek uit Californië dat laat zien dat wanneer het vochtgehalte van de levende vegetatie onder de 90% zakt, de grootte van de branden toeneemt (Dennison, Moritz, & Taylor, 2008). Kleine branden die zijn onderzocht (gedefinieerd als branden met een oppervlakte van minder dan 10 vierkante kilometer of 1000 hectare), kwamen voor binnen een range van 59-139% en grote branden alleen bij een waarde lager dan 77% (Dennison, Moritz, & Taylor, 2008). Het in de Californische studie gehanteerde begrip 'kleine brand' is echter niet te vergelijken met de situatie in Nederland, waar een brand van 8 vierkante kilometer (800 ha) de grootste natuurbrand was in de afgelopen decennia (de brand in de Deurnsche peel, april 2020).

2.2.1 Heide

Voor dit literatuuronderzoek is er specifiek gekeken naar de soort struikheide (*Calluna vulgaris*), verder heide genoemd. Deze in Nederland meest algemene heidesoort komt voornamelijk voor op droge zandgronden, maar ook op vochtige bodems zoals veengebieden (Meijden van der, 2005). De kroon van struikheide (de kleinere takken vanaf de stammen) bestaat uit zowel levend als dood materiaal. Het dode materiaal bestaat uit afgestorven takken die aan de struik vast blijven zitten. Figuur 2.2 op de volgende pagina laat een heidestruik zien met daarnaast aangegeven de te onderscheiden delen van de plant: de bovenste kroon, de lage kroon en de stammen (Grau-Andrés, Davies, Gray, Scott, & Waldron, 2018). Bij een brand in heidevelden brandt vaak de kroon, onafhankelijk van het vochtgehalte van de strooisel- en moslaag (Davies & Legg, 2011).



Figuur 2.2 Struikheide (bron: IFV)

Circa 10-30% van de kroon bestaat uit dood materiaal (Davies G. M., Legg, Smith, & MacDonald, 2006), met een gemiddelde van 14,2% (Davies G. M., Legg, O'Hara, MacDonald, & Smith, 2010). Hoe ouder de heideplant is, des te groter het percentage dood materiaal in de plant (Davies G. M., Legg, Smith, & MacDonald, 2006). Het vochtgehalte van zowel de dode als van de levende vegetatie is bepalend voor het ontstaan en de verspreiding van een natuurbrand in struikheide (Davies G. M., Legg, Smith, & MacDonald, 2006).

Een variërend vochtgehalte

Tijdens een onderzoek uitgevoerd in het Verenigd Koninkrijk is vastgesteld dat het gemiddelde vochtgehalte (FMC) van heide in veengebied varieert tussen de 65-100% (Davies G. M., Legg, Smith, & MacDonald, 2006). Volledig gehydrateerde levende takken van struikheide hebben een vochtgehalte van 100% (Davies, 2005). Het vochtgehalte kan zeer laag zijn aan het eind van de winter en het begin van de lente, met uitschieters van <45% (Davies, Legg, Smith, & MacDonald, 2006; Log, Thuestad, Velle, Khattri, & Kleppe, 2017; Davies, Legg, O'Hara, MacDonald, & Smith, 2019). Dit heeft te maken met de sapstromen, die dan (nog) niet op gang zijn. Daarnaast speelt met name het weer een rol: het vochtpercentage in het levende deel van heide neemt bij vorst sterk af. Zo was in het voorjaar van 2003 en 2007 het vochtgehalte van de levende vegetatie gezakt onder de 45%. Deze lage waarde was te linken aan perioden met koude of bevroren bodem (Davies & Legg, 2008). Uit een studie uitgevoerd in Lousã Portugal, waarvoor gedurende 10 jaar aan het einde van de winter het vochtgehalte is gemeten van het fijne levende materiaal aan de heideplant, dat wil zeggen: bladeren en kleine twijgen, blijkt dat het vochtgehalte sterk verschilt tussen de jaren. De waardes variëren tussen de <50 en >150% (Viegas, Piñol, Viegas, & Ogaya, 2001). De waarde <50 kan verklaard worden door vorst.

Vochtgehalte en brandbaarheid

Verschillende experimenten tonen aan dat het vochtgehalte vooral een rol speelt als een soort aan- en uitknop die bepaalt of een heidestruik wel of niet brandbaar is. Dit geldt voor zowel het levende als dode deel van de heide plant (G. M. Davies & Legg, 2008). Een hoog vochtgehalte in het levende deel van de heide leidt tot een afname van de kans op ontbranding en een lagere uitbreidingssnelheid (Al-Moustafa, Armitage, & Danson, 2012). Uit de eerdergenoemde experimenten uit in het Verenigd Koninkrijk bleek dat bij een vochtgehalte van 60-70% in de lage kroon een brand in struikheide zelfonderhoudend was (Davies G. M., Legg, O'Hara, MacDonald, & Smith, 2010), en dat bij heide met een

vochtpercentage van de lage kroon boven de 75% een brand *niet* zelfonderhoudend was. Bij heide met een vochtpercentage onder de 60% ontwikkelt een brand zich snel (Davies & Legg, 2011).

2.2.2 Grasland

Er is veel geschreven over het brandgedrag in relatie tot het vochtgehalte van gras. In de meeste gevallen betreft dit echter grassoorten die niet of in zeer beperkt in Nederland voorkomen. Vandaar dat deze paragraaf begint met een gedeelte over het brandgedrag van grassen (*Poaceae*) in het algemeen. Daarna zal worden ingegaan op de twee grassoorten specifiek voor het project EWD: het pijpenstrootje en helmgras.

Algemeen

Grasland reageert snel op regen of veranderingen in de luchtvochtigheid en komt meestal sneller tot ontbranding dan andere typen vegetatie (Walekin, 2010). Gras bevat meestal veel dood materiaal dat snel reageert op droge omgevingscondities (de Groot & Wardati, 2005). Zo is in het voorjaar het gras uitgedroogd door de vorst in de winter (Robertson & Woolhouse, 1984). Het vochtgehalte van dood gras wordt zo sterk beïnvloed door het weer, omdat het gras uit dunne sprieten bestaat met een relatief groot oppervlak ten opzichte van het volume, waardoor het zeer snel uitdroogt. Deze snelle reactie van dood gras op veranderingen in de omgevingscondities vergroot het brandgevaar bij droogte (Pyne, Andrews, & Laven, 1996). Uit Australisch onderzoek blijkt dat de toestand van gras in te delen is in vier stadia, met elk een verschillend vochtgehalte en eigen brandstofstructuur, die het potentiële brandgedrag beïnvloeden: levend, afstervend, nieuw dood en oud dood (Kidnie, et al., 2015). Het percentage dood gras varieert gedurende de seizoenen (Davies & Legg, 2008).

Uit Engelse laboratoriumexperimenten naar seizoenverschillen in de drempelwaarden voor ontsteking in veengebied tussen de vroege lente en de late zomer, blijkt dat na de winter het percentage dood materiaal het grootste is (Santana & Marss, 2016). Dit is van invloed op het potentiële brandgedrag. Het vochtpercentage verschilt per seizoen en per grassoort, zoals in de onderstaande tabel (tabel 2.1) is weergegeven. De grassoorten uit dit onderzoek komen alle drie voor in Nederland, maar veenpluis (*Eriophorum angustifolium*) en eenarig wollegras (*Eriophorum vaginatum*) zijn zeldzaam

Tabel 2.1 Vochtgehalte per seizoen, gebaseerd op Taylor et al (2001)

Soort	Seizoen	Dood FMC (%)	Levend FMC (%)
<i>E. angustifolium</i>	Zomer	55 +/- 17	64 +/- 6
	Lente	50 +/- 16	66 +/- 7
<i>E. vaginatum</i>	Zomer	38 +/- 17	59 +/- 4
	Lente	46 +/- 11	60 +/- 4
<i>M. caerulea</i>	Zomer	43 +/- 15	50 +/- 7
	Lente	51 +/- 12	80 +/- 11

Het percentage dood materiaal blijkt niet van invloed op de kans op een succesvolle ontsteking, in tegenstelling tot het vochtgehalte van het dode gras, dat de meest invloedrijke variabele is voor het bepalen van de kans op ontbranding. Het vochtgehalte van het dode materiaal daalt sneller tot het vochtgehalte waarbij het ontstoken kan worden, dan dat van levend gras (Santana & Marss, 2016). Als het gras begint te groeien, wordt de kans op het ontstaan van brand kleiner. Als er sprake is van meerdere weken droogte, neemt de kans op het ontstaan van een brand weer toe (Albertson, Ayles, Cavan, & McMorrow, 2009). Uit Engels onderzoek naar het voorspellen van de kans op de ontsteking van grasland met een open vlam komt naar voren dat natuurbranden in Engels grasland in de periode van het voorjaar tot aan het einde van de zomer plaatsvinden – in beide gevallen dus als er in verhouding meer dode vegetatie aanwezig is. De meeste van deze graslandbranden vinden plaats in april en mei (McMorrow, 2011).

Bij een vochtgehalte van circa 48% kon bij de helft van de ontstekingstesten van Santana & Marss (2016) het gras ontstoken worden met een vlammeende ontstekingsbron. Zij hebben geen verschil geconstateerd tussen de seizoenen. Het vochtgehalte van dood materiaal is de enige variabele die bepaalt of een ontsteking gevolgd door een zelfonderhoudend vuur mogelijk is (Santana & Marss, 2016). Als het gras wordt ontstoken bij een hoog vochtgehalte van het dode materiaal, leidt dit tot oppervlakkige branden met een laag brandstofverbruik. Het is daarom waarschijnlijk dat lagere vochtgehalten leiden tot zich sterker uitbreidende en intensievere natuurbranden (Santana & Marss, 2016).

Uit Australisch onderzoek naar het effect van curing (het drogen en uiteindelijk het afsterven van delen van de plant, zie pagina 11) met de daarbij behorende veranderende structuur van gras komt naar voren dat gras blijft branden bij een mate van curing tussen de 20% en 30%, waarbij het dode gras een vochtgehalte heeft van minder dan 10%. Deze waarden hangen echter ook af van andere variabelen die de warmteoverdracht en de beschikbare energie voor verbranding bepalen, zoals de windsnelheid, het vochtgehalte van dode en levende vegetatie en de hoeveelheid dode vegetatie. Hoe meer gras er afgestorven is, des te hoger de snelheid van branduitbreiding is (Cruz, Sullivan, Kidnie, Hurley, & Nichols, 2016).

Uit een Australisch experiment waarbij is getracht gras met een open vlam (lucifer) te ontsteken, blijkt dat ontbranding mogelijk is met een kans van 50% als het gemiddelde vochtgehalte van het veld 70-120% is (Parrott & Donald, 1970). Uit laboratorium- en veldexperimenten in Nieuw Zeeland komen andere waarden naar voren. Zo blijkt dat zwenkgras (*Festuca novae-zealandiae*) en struisgras (*Agrostis capillaris*) bij een vochtgehalte van 28% zonder invloed van wind ontstoken kunnen worden met de open vlam van een lucifer. Met een lichte wind (1 m/s) was dit mogelijk bij een vochtpercentage van 55% (Walekin, 2010). Onderzoek uit Argentinië laat zien dat daar voor grasland sprake is van respectievelijk een zeer hoog en een hoog natuurbrandrisico bij een vochtgehalte van 55% en 67% (Arganaraz, Landi, Scavuzzo, & Bellis, 2018). In de samenvatting van een literatuuronderzoek naar de drempelwaarden waarbij grasland kan worden ontstoken, wordt geconcludeerd dat er veel studies zijn uitgevoerd die lastig met elkaar zijn te vergelijken, mede omdat er verschillende onderzoeksmethodes zijn gebruikt. Wel kan op basis van deze verschillende studies worden vastgesteld, dat een open vlam een hoger ontstekingsrisico geeft dan andere onderzochte ontstekingsbronnen (Walekin, 2010).

Pijpenstrootje (*Molinia caerulea*)

Het pijpenstrootje komt in Nederland het meest voor op de binnenlandse graslanden. Het groeit onder andere op schraallanden en droge, vochtige gronden in heidevelden.

Pijpenstrootje heeft na de winter meer dode brandstof dan veel andere grassoorten, omdat

al het groene weefsel in de winter afsterft (Taylor, Rowland, & Jones, 2001). In het Verenigd Koninkrijk is onderzocht bij welke vochtgehaltes diverse soorten dode grassen tot ontbranding kunnen komen. Het vochtgehalte waarbij 50% van de pogingen tot ontbranding leidt, is bij pijpenstrootje hoger dan bij andere grassoorten die voorkomen in het Verenigd Koninkrijk. Dood materiaal van het pijpenstrootje komt al bij een vochtgehalte van 48,1–53,7% tot ontbranding (Santana & Marss, 2016).

Helmgras (*Ammophila arenaria*)

Aan de Nederlandse kuststrook is helm of helmgras de meest algemene grassoort. Het komt voornamelijk voor op de eerste duinen langs de zeereep, op zandverstuivingen en in het binnenduin (van der Meijden, 2005). In de literatuur is geen informatie gevonden over het vochtgehalte van helmgras, dus ook niet in relatie tot natuurbranden.

2.2.3 Naaldbomen

Naaldbomen vormen een risico bij natuurbranden vanwege de kans op het ontstaan van kroonvuur. Kroonvuur is een brand in de toppen van de bomen die samen het dak van het bos vormen, ook wel de kroonlaag genoemd (Instituut Fysieke Veiligheid, 2017). Er bestaan drie verschillende vormen van kroonvuur:

- > Passief kroonvuur is het verbranden van een enkele of kleine groep bomen, ontstaan uit loopvuur. Loopvuur is vuur dat zich op en over de grond in verschillende richtingen uitbreidt.
- > Bij actief kroonvuur verplaatst het vuur zich in de kronen van de bomen, waarbij de energie afkomstig van het loopvuur het kroonvuur onderhoudt.
- > Onafhankelijk kroonvuur vindt plaats in de kronen van de bomen zonder dat er onder deze kronen sprake is van loopvuur. Deze vorm van kroonvuur is zeer zeldzaam en is bovendien van korte duur (Alexander, Cruz, Vaillant, & Peterson, 2013).

Verschillende experimenten tonen aan dat het vochtgehalte van de naalden een significant effect heeft op de tijd die nodig is om tot ontbranding te komen en op het gedrag van de vlammen (Alexander & Cruz, 2013). De vochtigheid van de naalden van dennen en sparren kan variëren tussen de 73 en 480%, afhankelijk van de boomsoort en de leeftijd van de naald en het seizoen, zoals blijkt uit verschillende studies uit Noord-Amerika. Als algemene vuistregel wordt in meerdere onderzoeken aangenomen dat de kans op kroonvuur hoog is wanneer de vochtigheid van de naalden daalt beneden de 100% (Alexander & Cruz, 2013).

Uit onderzoek uit de Verenigde Staten is naar voren gekomen dat de naalden van de grove den (*Pinus sylvestris*) met een hoogte kleiner dan 1,5 meter met een lucifer tot ontbranding kunnen komen bij een vochtgehalte lager dan 65%. Naaldbomen met een vochtgehalte van boven de 100% waren niet met een open vlam (lucifer) tot ontbranding te krijgen (Alexander & Cruz, 2013). Een ander onderzoek naar de ontvlambaarheid van onder andere de grove den, maar dan als solitaire boom in een pot, heeft uitgewezen dat wanneer het vochtgehalte daalt onder de 50%, de boom aangestoken kan worden met een open vlam (lucifer). Bij een vochtgehalte van 100% ontbrandt de boom niet (van Wagner, 1963). Het verschil in vochtgehalte waarbij de naalden tot ontbranding kunnen worden gebracht tussen de bovenstaande onderzoeken kan mogelijk verklaard worden door het feit dat het experimenten met verschillende uitgangspunten zijn geweest, die bovendien zijn uitgevoerd onder verschillende omstandigheden.

Onderzoek uit Argentinië geeft aan dat voor bos het zeer hoge en hoge natuurbrandrisico⁷ liggen bij respectievelijk een vochtgehalte (FMC) van 72% en van 105%, gemeten op basis van MODIS⁸ (satellietdata). Dit is een gemiddelde van de meest voorkomende soorten in Sierras Chicas (Arganaraz, Landi, Scavuzzo, & Bellis, 2018). Het maximale vochtgehalte waarbij een natuurbrand kan ontstaan, wordt in dit onderzoek niet aangegeven.

2.3 Strooisellaag

Het vochtgehalte, de samenstelling van de strooisellaag (van welke plant(en) deze afkomstig is), de dichtheid van de strooisellaag, de ontstekingsbron en de wind hebben allemaal invloed op de drempelwaarde van het vochtgehalte waarbij de strooisellaag tot ontsteking kan komen. Van deze factoren is het vochtgehalte de belangrijkste (Plucinski & Anderson, 2008). De samenstelling van de strooisellaag wordt bepaald door de vegetatie die in het gebied aanwezig is. Een strooisellaag kan daarnaast samengesteld zijn uit brandstof met verschillende diktes. De dikte van de brandstof is van invloed op de snelheid waarmee het vochtgehalte daalt. Per ecosysteem kan de variabiliteit van het vochtgehalte in de strooisellaag verschillen (Arganaraz, Landi, Scavuzzo, & Bellis, 2018).

Uit een Australisch onderzoek is gebleken dat branden kleiner dan 0,15km² voorkomen bij een vochtgehalte van de strooisellaag van 30,8%. Dit komt overeen met eerder gevonden waarden van ontbranding bij een vochtgehalte van de strooisellaag van 25-35% in Zuidoost Australië (Nolan, Boer, Dios de, Caccamo, & Bradstock, 2016). Deze waarden passen binnen de bandbreedte van geobserveerde vochtgehalten uit een studie naar natuurbranden in de Verenigde Staten, waarin is gevonden dat natuurbranden die voorkomen in de strooisellaag zich niet verspreiden boven een bepaald vochtgehalte, dat gemiddeld tussen de 10 en 40% ligt (Rothermel, 1972).

De Oklahoma State University (2020) geeft in een factsheet een aantal vuistregels die aangehouden kunnen worden voor het uitvoeren van beheerbranden (gecontroleerde branden). Deze vuistregels vormen een indicatie vanaf welk vochtpercentage er branduitbreiding kan plaatsvinden.

- > Beheerbranden kunnen uitgevoerd worden als het vochtgehalte van de '1 hour fuels' (afgestorven grassen, strooisellaag van bladeren en dunne twijgen⁹) tussen de 7 en 20 procent ligt.
- > Bij een vochtgehalte van de 1 hour fuels van kleiner dan 5% is het ontstaan van vliegvuur zeker.
- > Bij 1 hour fuels met een vochtgehalte groter dan 11% is vliegvuur zeldzaam.
- > Bij 1 hour fuels met een vochtgehalte groter dan 20% is er mogelijk geen verspreiding van het vuur.
- > 10 hour fuels branden het beste bij een vochtgehalte tussen de 6 en 15%.
- > Bij 10-hour fuels met een vochtgehalte van meer dan 15% is er mogelijk geen sprake van branduitbreiding bij bepaalde soorten brandstof.

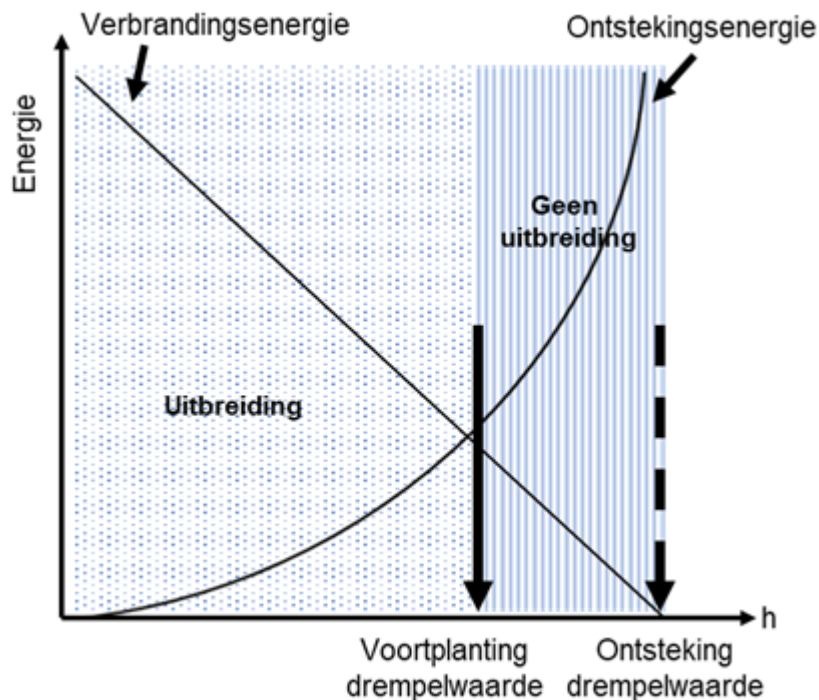
In figuur 2.3 op de volgende pagina is het verband weergegeven tussen het vochtgehalte van de strooisellaag, de ontsteking en vanaf welke waarde het vuur zich via de strooisellaag

⁷ Classificatie met vier categoriën opgesteld door de auteurs op basis van verbrand gebied (Arganaraz, Landi, Scavuzzo, & Bellis, 2018)

⁸ Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (NASA, 2020).

⁹ Zie ook de uitleg in paragraaf 1.3.

blijft uitbreiden. Daarbij is aangegeven hoeveel energie er nodig is om de strooisellaag tot ontbranding te brengen en hoeveel energie er bij deze verbranding vrij komt.



Figuur 2.3 schematische weergave invloed vochtgehalte brandstof (h), gebaseerd op Terrah, et al. (2020)

Sommige onderzoeken zijn gericht op een bepaald soort strooisellaag. Zo is uit het onderzoek van Terrah et al. gebleken dat de naalden van de Aleppo den¹⁰ (*Pinus halepensis*) niet tot ontbranding komen als het vochtgehalte van de naalden boven de 20% is (Terrah, et al., 2020). Daarnaast is uit een laboratoriumonderzoek gebleken dat een strooisellaag bestaande uit naalden en een strooisellaag bestaande uit dood gras met een vochtgehalte van 11% tot ontbranding kunnen komen door vliegvuur. Bij herhaling van dit experiment maar met gloeiende delen in plaats van brandende delen, kwamen beide strooisellagen echter niet tot ontbranding (Manzello, Cleary, Shields, & Yang, 2006). Dit toont aan dat de ontstekingsbron ook van invloed is op het al dan niet ontbranden van strooisel.

De interactie tussen de windsnelheid en FMC is van invloed op de kans op een succesvolle ontsteking. Uit experimenten met sigarettenpeuken en een strooisellaag van Mongoolse eiken (*Quercus mongolica*) bleek dat dat de kans op ontsteking bij het ontbreken van wind 0 was. Als er wel sprake was van wind, kon de strooisellaag tot een FMC van 15% tot ontbranding worden gebracht. Bij een te hoge windsnelheid nam de kans op een ontbranding echter weer af, doordat de brandstof door de wind werd gekoeld. Binnen het bereik 1 m/s tot 5 m/s windsnelheid waren er succesvolle ontbrandingen (Sun, P., Zhang, Y., et al. 2018). De relatieve luchtvochtigheid die er heerste tijdens de experimenten is niet nader gespecificeerd in dit onderzoek.

¹⁰ Komt voor in mediterraan gebied en komt niet of slechts zelden voor in Nederland (<5%) (Mauri, et al., 2016).

3 Conclusie en aanbevelingen

In dit hoofdstuk worden eerst de afzonderlijke deelvragen beantwoord, waarna een antwoord op de hoofdvraag zal worden geformuleerd. Ten slotte is een aanbeveling opgenomen voor een mogelijke vervolgstap op dit onderzoek ten behoeve van het project 'Early Warning Droogte'.

3.1 Beantwoording van de deelvragen

Hieronder worden de antwoorden op de afzonderlijke deelvragen besproken.

3.1.1 Op welke manier beïnvloedt het vochtgehalte van de brandstof het natuurbrandgedrag?

Uit verschillende studies komt naar voren dat het vochtgehalte van de brandstof in de natuur (vegetatie en strooisellaag) één van de vele factoren is die van invloed zijn op het *ontstaan* van een brand. Daarnaast is het één van de meest belangrijke factoren die de *branduitbreiding* bepalen: hoe hoger het vochtgehalte is, hoe langzamer de opwarming gaat, omdat een deel van de energie verloren gaat aan het opwarmen en verdampen van het in de brandstof aanwezige vocht. Bij een laag vochtgehalte komt de brandstof daarom sneller tot ontbranding. Als de vegetatie te ver uiteen staat voor de brand om zich uit te breiden via brandoverslag, kan de strooisellaag zorgen voor branduitbreiding. Bij een hoog vochtgehalte zal er echter geen branduitbreiding plaatsvinden via de strooisellaag.

3.1.2 Wat is het maximale vochtgehalte waarbij een natuurbrand kan plaatsvinden in de vier hoofdtypen vegetatie?

De vier vegetatietypen worden hieronder apart behandeld.

Heide

Heide wordt brandbaar bij een vochtgehalte rond de 65%. Door vorst kan het vochtpercentage van heide extreem dalen, tot wel minder dan 45%. Het percentage dood materiaal, dat sneller reageert op veranderende omgevingscondities, verschilt sterk per plant. De hoeveelheid dood materiaal is van directe invloed op het totale vochtgehalte en daarmee ook op de brandbaarheid van de plant. Uit de literatuur blijkt dat het vochtgehalte van heide maximaal rond de 100 tot 150% ligt. Zowel het vochtgehalte van dode als levende heide zijn bepalend voor het ontstaan en de verspreiding van een natuurbrand.

Pijpenstrootje

De kans op aanhoudende ontsteking is gerelateerd aan het vochtgehalte van de dode brandstof in de plant. Het vochtgehalte van dood pijpenstrootje blijkt de enige variabele te zijn die bepaalt of een ontsteking gevolgd door een zelfonderhoudend vuur mogelijk is. Het percentage dood materiaal van de plant varieert per seizoen. Door het afsterven van de bladeren in de winter bestaat het pijpenstrootje een deel van het jaar vrijwel volledig uit dood materiaal. Het vochtgehalte in het dode materiaal daalt sneller tot een vochtgehalte waarbij

het ontstoken kan worden dan in levende planten het geval is. Dood pijpenstrootje komt al bij een vochtgehalte van 48,1– 53,7% tot ontbranding. In de literatuur is gevonden dat pijpenstrootje bij een hoger vochtgehalte tot ontbranding kan komen dan andere grassoorten. Wat betreft de toestand van het pijpenstrootje kunnen vier stadia worden onderscheiden: levend, afstervend, nieuw dood, oud dood. Door de verschillende verhouding hiervan binnen de planten zijn er verschillen in gemiddelde vochtgehaltenes. Deze verschillen beïnvloeden samen met de brandstofstructuur het brandgedrag. Naast het vochtgehalte van de plant op zich, is ook de wind van invloed. Bij een lichte wind kan gras bij een bijna twee keer zo hoog vochtgehalte worden ontstoken dan wanneer er geen wind is.

Helmgras

In de literatuur zijn geen waardes gevonden voor helmgras. Helmgras is net als pijpenstrootje een grassoort en bestaat ook uit levend en dood materiaal, waardoor de bovenstaande conclusies vermoedelijk ook van toepassing zijn op helmgras.

Naaldbomen

De vochtigheid van de naalden van dennen en sparren kan variëren tussen de 73 en 480%, afhankelijk van de soort, de leeftijd van de naalden en het seizoen. De grove den kan bij een vochtgehalte van de naalden van minder dan 65% met een lucifer tot ontbranding worden gebracht. Naaldbomen met een vochtgehalte van boven de 100% zijn niet met een lucifer tot ontbranding te krijgen. Als algemene vuistregel kan worden aangenomen dat de kans op kroonvuur hoog is wanneer de vochtigheid van de naalden daalt beneden de 100%. Of er daadwerkelijk kroonvuur ontstaat, is onder andere afhankelijk van de brandvermogen van het vuur dat onder de kroon aanwezig is.

3.1.3 Wat is het maximale vochtgehalte waarbij een natuurbrand kan plaatsvinden in de strooisellaag?

Bij experimenten in Australië kon een strooisellaag bij een vochtgehalte van 25-35% tot ontbranding worden gebracht. Natuurbranden in de Verenigde Staten die voorkomen in de strooisellaag verspreiden zich niet boven een bepaald vochtgehalte, dat gemiddeld varieert tussen de 10 en 40% ligt.

De samenstelling van de strooisellaag wordt bepaald door de aanwezige vegetatie. Een strooisellaag kan samengesteld zijn uit brandstof met verschillende diktes. De dikte van de brandstof is van invloed op de snelheid waarmee het vochtgehalte reageert op de omgeving. Als er sprake is van wind, kan de strooisellaag bij een hoger vochtpercentage tot ontbranding worden gebracht dan wanneer er geen wind is.

Als richtlijnen bij beheerbranden (gecontroleerde brand) is er een stelregel dat deze uitgevoerd kunnen worden als de 1 hour fuels tussen de 7 en 20% ligt. Voor 10 hour fuels ligt het percentage tussen de 6 en 15%. De hoeveelheid wind kan van invloed zijn op de kans op een succesvolle ontsteking.

3.2 Beantwoording van de hoofdvraag

In deze paragraaf wordt een antwoord gegeven op de hoofdvraag die in deze literatuurstudie centraal heeft gestaan.

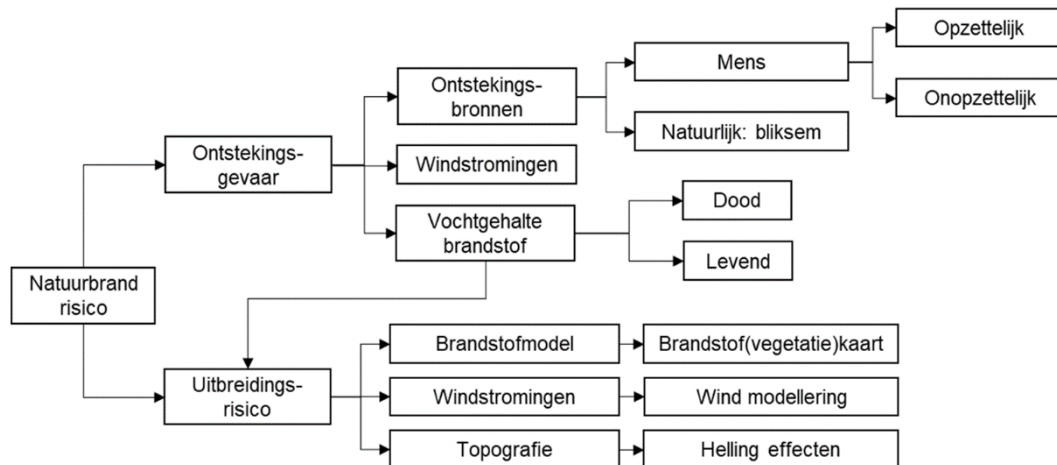
Wat is het maximale vochtgehalte per vegetatietype en strooisellaag, waarbij de brandstof in de natuur tot ontbranding kan worden gebracht en de brand zichzelf in stand houdt?

Uit verschillende studies komen verschillende waarden naar voren. Voor een deel is dat te verklaren doordat verschillende metingen zijn uitgevoerd: in de ene studie is gekeken naar het vochtgehalte van de gehele plant (FMC), terwijl een andere alleen de levende of dode delen meet (LFMC / DFMC), of alleen het bovenste deel van de kroon met alleen het fijne materiaal (LFFMC). Daarnaast heeft een deel van de onderzoeken plaatsgevonden in veengebieden en andere in gebieden met droge (zand) gronden. Weer andere zijn uitgevoerd in een laboratorium. Ook zijn bij de studies niet alle factoren geregistreerd die, naast het vochtgehalte, van invloed zijn op de brandbaarheid. Omdat ook nog eens is gebleken dat de bandbreedte van het vochtgehalte van de brandstof (vegetatie) aanzienlijk kan verschillen tussen ecosystemen en plantensoorten, kunnen de waarden die gegeven worden niet zomaar overgenomen worden.

Als het gemiddelde vochtgehalte daalt, zullen er in toenemende mate individuele planten (en clusters van deze planten) zijn die droog zijn en tot ontbranding kunnen worden gebracht.

De brandende vegetatie kan daarna de rest van de vegetatie aansteken.

Het vochtgehalte van de vegetatie en de strooisellaag speelt een belangrijke rol bij het ontstaan van een brand en de mate van branduitbreiding. Er is naar voren gekomen dat ook de wind een belangrijke rol heeft bij het ontstaan van een brand. In figuur C.1 hieronder is in het stroomschema van het natuurbrandgevaar daarom de windsnelheid (windstromingen) toegevoegd als factor die een rol speelt bij de kans op ontsteking.



Figuur C.1 Aangepast stroomschema van het natuurbrandrisico, gebaseerd op Chuvieco, Aguado & Dimitrakopoulos 2004

Hoewel er in de literatuur wel duidelijke waardes te vinden zijn van het vochtgehalte van de vegetatie en de strooisellaag in relatie tot het voorkomen van natuurbranden, kan een drempelwaarde van het vochtgehalte voor het ontstaan van een natuurbrand in een specifiek

vegetatietype of specifieke strooisellaag niet eenduidig bepaald worden. De kans op het ontstaan van een natuurbrand is multifactorieel, en de factoren die van invloed zijn, kunnen – als er een ontstekingsbron is – in verschillende mate en in verschillende samenstellingen tot een natuurbrand leiden. Daarmee kan het exacte vochtgehalte waarbij een bepaalde brandstof tot ontbranding kan komen ook verschillen.

3.3 Vervolgonderzoek

Het risico van een natuurbrand verschilt per type brand. De kans op een natuurbrand is multifactorieel. Naast de ontstekingsbron is het vochtgehalte één van de belangrijkste factoren bij het ontstaan en de uitbreiding van een natuurbrand. Uit de literatuur blijkt dat het mogelijk is om aan de hand van satellietdata het vochtgehalte van de vegetatie in relatie tot natuurbranden te analyseren van de gebieden waar natuurbranden hebben plaatsgevonden. Veel natuurbranden blijven klein en slechts enkele worden groot. Door de omstandigheden (vegetatie, vochtgehalte, weersomstandigheden, et cetera) voorafgaande aan en tijdens de natuurbranden te analyseren, kunnen mogelijk combinaties van factoren geïdentificeerd worden die samen de grootste bijdragen leveren aan het natuurbrandrisico.

De Nederlandse natuurbranden van de afgelopen jaren worden geanalyseerd in relatie met de satellietdata die de waarden van het vochtgehalte laten zien. In combinatie met de uitkomsten van deze literatuurstudie kunnen op basis van deze analyse bandbreedtes vastgesteld worden. In relatie met de weersomstandigheden (onder andere de windsnelheid) kan een eerste leidraad worden opgesteld voor de interpretatie van de data uit het online informatiesysteem EWD om zo het natuurbrandrisico te kunnen bepalen.

Literatuurlijst

- Albertson, K., Ayles, J., Cavan, G., & McMorrow, J. (2009). Forecasting the outbreak of moorland wildfires in the English Peak District. *Journal of Environmental Management* 90:8, 2642-2651.
- Alexander, M. E., & Cruz, M. G. (2013). Assessing the effect of foliar moisture on the spread rate of crown fires. *International journal of wildland fire* 22 (4), 415-427.
- Alexander, M. E., Cruz, M. G., Vaillant, N. M., & Peterson, D. L. (2013). Crown fire behavior characteristics and prediction in conifer forests: a state-of-knowledge synthesis. *JFSP Research Project reports 09-S-03-1*, 1-40.
- Al-Moustafa, T., Armitage, R., & Danson, F. (2012). Mapping fuel moisture content in upland vegetation using airborne hyperspectral imagery. *Remote sensing of environment* 127, 74-83.
- Anderson, S. A., & Anderson, W. R. (2010). Ignition and fire spread thresholds in gorse (*Ulex europaeus*). *International Journal of Wildland Fire* 19(5), 589-598.
- Arganaraz, J. P., Landi, M. A., Scavuzzo, C. M., & Bellis, L. M. (2018). Determining fuel moisture thresholds to assess wildfire hazard: A contribution to an operational early warning system. *PLoS ONE* 13(10), 1-13.
- Babrauskas, V. (2005). *Risk of ignition of forest fires from black powder or muzzle-loading firearms*. Retrieved from Fire Science and Technology Inc.: www.doctorfire.com
- Brandweer Nederland. (2020, juni 18). *Specialisme natuurbrandbeheersing*. Retrieved from Brandweer Nederland: <https://www.brandweer.nl/ons-werk/specialisme-natuurbrandbeheersing>
- Chuvieco, E. (2003). *Wildland fire danger estimation and mapping; the role of remote sensing data*. Spanje: World scientific.
- Chuvieco, E., Aguado, I., & Dimitrakopoulos, A. P. (2004). Conversion of fuel moisture content values to ignition potential for integrated fire danger assessment. *Canadian journal of forest research* 34(11), 2284-2293.
- Cruz, M. G., Sullivan, A., Kidnie, S., Hurley, R., & Nichols, D. (2016). *The effect of grass curing and fuel structure on fire behaviour- Final report*. Canberra, Australia: CSIRO Land and Water.
- Davies, G. M. (2005). *Fire behaviour and impact on heather moorland*. Edinburgh: University of Edinburgh.
- Davies, G. M., & Legg, C. J. (2008). Developing a live fuel moisture model for moorland fire danger rating. *Transactions on the Environment vol 119*, 225-236.
- Davies, G. M., Legg, C. J., O'Hara, R., MacDonald, A. J., & Smith, A. A. (2010). Winter desiccation and rapid changes in the live fuel moisture content of *Calluna vulgaris*. *Plant Ecology and Diversity*, 289-299.
- Davies, G. M., Legg, C. J., Smith, A. A., & MacDonald, A. J. (2009). Rate of spread of fires in *Calluna vulgaris*- dominated moorlands. *Journal of applied ecology* 46(5), 1054-1063.
- Davies, G. M., Legg, C. J., Smith, A., & MacDonald, A. (2006). Developing shrub fire behaviour models in an oceanic climate: burning in the British uplands. *Forest ecology and management* 234, 27-30.

- Davies, G., & Legg, C. (2008). Developing a live fuel moisture model for moorland fire danger rating. *modelling, monitoring and management of forest fires volume: 119*, 225-236.
- Davies, M. G., & Legg, C. J. (2011). Fuel moisture thresholds in the flammability of *Calluna vulgaris*. *Fire technology 47*(2), 421-436.
- de Groot, W., & Wardati, W. (2005). Calibrating the Fine Fuel Moisture Code for grass ignition potential in Sumatra, Indonesia. *International Journal of Wildland Fire 14*, 151-168.
- Dennison, P. E., Roberts, D. A., Peterson, S. H., & Rechels, J. (2005). Use of normalized difference water index for monitoring live fuel moisture. *International journal of remote sensing 26*:5, 1035-1042.
- Dennison, P., Moritz, M., & Taylor, R. (2008). Evaluating predictive models of critical live fuel moisture in the Santa Monica Mountains, California. *International Journal of Wildland Fire 17*, 18-27.
- Grau-Andrés, R., Davies, M. G., Gray, A., Scott, M. E., & Waldron, S. (2018). Fire severity is more sensitive to low fuel moisture content on *Calluna* heathlands than on peat bogs. *Science of the total environment 616-617*, 1261-1269.
- Instituut Fysieke Veiligheid. (2017, 06). *Kennispublicatie natuurbranden*. Retrieved from Instituut Fysieke Veiligheid: <https://www.ifv.nl/kennisplein/Documents/20170621-IFV-KP-Natuurbranden.pdf>
- Instituut Fysieke Veiligheid. (2018). *Brandstofmodellen natuurbrandbeheersing*. Arnhem: Instituut Fysieke Veiligheid.
- Kidnie, S., Cruz, M., Gould, J., Nichols, D., Anderson, W., & Bess, R. (2015, 6). Effects of curing on grassfires: I. Fuel dynamics in a senescing grassland. *International journal of wildland fire 24*, 828-837.
- Log, T., Thuestad, G., Velle, L. G., Khattri, S. K., & Kleppe, G. (2017). Unmanaged heathland- A fire risk in subzero temperatures? *Fire safety journal Volume 90*, 62-71.
- Manzello, S. L., Cleary, T. G., Shields, J. R., & Yang, J. C. (2006). Ignition of mulch and grasses by firebrands in wildland-urban interface fires. *International journal of wildland fire 15*, 427-431.
- Mauri, A., Di Leo, M., de Rigo, D., Caudullo, G., Houston, D. T., & Mauri, T. (2016). *Pinus halepensis and Pinus brutia in Europe: distribution, habitat, usage and threats*. Retrieved from forest JRC Europa: https://forest.jrc.ec.europa.eu/media/atlas/Pinus_halepensis_brutia.pdf
- McMorrow. (2011). Wildfire in the United Kingdom: status and key issues. *Proceedings of the second conference on the human dimensions of wildland fire* (pp. 44-56). Manchester: GTR-NRS-P.
- Meijden van der, R. (2005). *Heukel's flora van Nederland 23ste druk*. Groningen/ Houten, the Netherlands: Wolters-Noordhoff bv.
- NASA. (2020, juli 15). *MODIS*. Retrieved from TERRA NASA: <https://terra.nasa.gov/about/terra-instruments/modis>
- NFPA. (2017). *NFPA 921 guide for Fire & explosion investigation*. Quincy: NFPA.
- Nolan, R., Boer, M., Dios de, V. R., Caccamo, G., & Bradstock, R. (2016). Large-scale dynamic transformations in fuel moisture drive wildfire activity across southeastern Australia. *Geophysical research letter 43*, 4229-4238.
- Oklahoma State University. (2020, mei 29). *Factsheets Oklahoma State University*. Retrieved from Prescribed fire handbook: <http://factsheets.okstate.edu/e1010/sections/fuel-moisture/>

- Oswald, B. P., Brouwer, N., & Willemsen, E. (2017). Initial development of surface fuel models for the Netherlands. *Forest Research* 6:2, 1-6.
- Parrott, R., & Donald, C. (1970). Growth and ignitability of annual pastures in a mediterranean environment. 2. Ignitability of Swards of Various Annual Species. *Australian Journal of experimental agriculture and animal husbandry* 10 (42), 76-83.
- Pimont, F., Ruffault, J., Martin-StPaul, N. K., & Dupuy, J. L. (2019). Why is the effect of live fuel moisture content on fire rate of spread underestimated in field experiments in shrublands. *International Journal of Wildland Fire* 28:2, 127-137.
- Plucinski, M., & Anderson, W. (2008). Laboratory determination of factors influencing successful point ignition in the litter layer of shrubland vegetation. *International journal of wildland fire* 17, 628-637.
- Pyne, S., Andrews, P., & Laven, R. (1996). *Introduction to wildland fire (2nd ed)*. New York: John Wiley & Sons.
- Robertson, K. P., & Woolhouse, H. W. (1984). Studies of the seasonal course of carbon uptake of *Eriophorum vaginatum* in a moorland habitat. *Journal of Ecology* 72, 423-435.
- Rossa, C., & Fernandes, P. (2017). On the effect of live fuel moisture content on fire rate of spread. *Forest Systems*, 26 (3).
- Rothermel, R. C. (1972). *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels*. Utah: USDA Forest Service.
- Ruffault, J., Martin-StPaul, N., Pimont, F., & Dupuy, J.-L. (2018). How well do meteorological drought indices predict live fuel moisture content (LFMC)? An assesment for wildfire research and operations in Mediterranean ecosystems. *Agricultural and forest meteorology* 262, 391-401.
- San-Miguel-Ayanz, J., Durrant, T., Boca, R., Libertá, G., Branco, A., de Rigo, D., . . . Leray, T. (2019). *Forest fires in Europe, Middle East and North Africa 2018*. Ispra, Italy: Joint Research Centre.
- Santana, V., & Marss, R. (2016). *Models for predicting fire ignition probability in graminoids from boreo-temperate moorland ecosystems*. Liverpool: University of Liverpool.
- Scott, J. H., & Burgan, R. E. (2005). *Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's sruface fire spread model*. Verenigde Staten: Rocky Mountain Research Station.
- Sun, P., Zhang, Y., Sun, L., Hu, H., Guo, F., Wang, G., & Zhang, H. (2018). *influence of fuel moisture content, packing ratio and wind velocity on the ignition probability of fuel beds composed of mongolian oak leaves via cigarette buds*. Zwitserland: forests.
- Taylor, K., Rowland, A., & Jones, H. (2001). *Molinia caerulea* (L.) Moench. *Journal of Ecology* 89, 126-144.
- Terrah, S. M., Sabi, F. Z., Mosbah, O., Dilem, A., Hamamousse, N., Sahila, A., . . . Viegas, D. X. (2020). Nonexistence of critical fuel moisture content for flammability. *fire safety journal* 111, 102928.
- Tromp, A. J., & Mierlo van, R. J. (2013). *Fire safety engineering handboek voor de bouw*. Bleiswijk: Eburon.
- van Wagner, C. (1963). *Flammability of christmas trees*. Ottawa: Department of Forestry.
- Viegas, D., Piñol, J., Viegas, M., & Ogaya, R. (2001). Estimating live fine fuels moisture content using meteorologically-based indices. *International journal of wildland fire* 10, 223-240.
- Walekin, H. M. (2010). *Ignition thresholds for grassland fuels and implication for activity controles onde public conservation and in Canterbury*. Canterbury: University of Canterbury.