

Een aanzet tot validatie van het rekenmodel voor (natte) stoplijnen

Een praktijkexperiment op het ASK



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), 2026

Auteurs	L. Kistemaker, I. Tanck, V. Jansen, B. Verhoeven, R. van Liempd
Contactpersoon	L. Kistemaker
Datum	16 februari 2026
Foto cover	NIPV

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.

Samenvatting

Een methode om een ontwikkelende natuurbrand te bestrijden is het maken van een strook (stoplijn) waar geen brandbare stoffen op aanwezig zijn. Hierdoor kan de brand zich niet verder uitbreiden. Vaak wordt het maken van een stoplijn gecombineerd met een strook waar water op wordt aangebracht, zodat brandbare stoffen niet kunnen ontbranden.

In eerder onderzoek heeft het NIPV een rekenmodel voor (natte) stoplijnen ontwikkeld waarmee de effecten van een stoplijn op de natuurbrand onder verschillende omstandigheden kunnen worden gesimuleerd. Dit rekenmodel is een afgeleide van modellen voor natuurbrandverspreiding en is aangepast om te kunnen rekenen aan stoplijnen. Het rekenmodel was echter nog niet gevalideerd. Het doel van het voorliggende onderzoek was het opstellen van een meetwijze waarmee het rekenmodel (natte) stoplijnen kon worden gevalideerd met behulp van een praktijkexperiment bij een beheerbrand.

Hiertoe is nagegaan hoe de in- en uitvoerparameters van het model bij een praktijkexperiment gemeten kunnen worden. Vervolgens zijn deze parameters bij een beheerbrand gemeten en zijn met het rekenmodel simulatieberekeningen uitgevoerd. De resultaten van de simulatieberekeningen zijn vergeleken met de resultaten van het praktijkexperiment.

De parameters die gemeten of vastgelegd moesten worden, waren de volgende: de kenmerken van de vegetatie, de windsnelheid en -richting, de ontvangen warmteflux en de breedte van de stoplijn. De resultaten van het rekenmodel zijn beoordeeld door de ontvangen warmteflux die gemeten is tijdens het praktijkexperiment te vergelijken met de door het model berekende ontvangen warmteflux. Voor een volledige validatie van het rekenmodel blijken echter meerdere meetmomenten onder verschillende omstandigheden nodig. Op basis van het voorliggende onderzoek kan nog niet aangegeven worden hoeveel en welke meetmomenten noodzakelijk zijn.

Door een mogelijk verkeerde waarde voor de Live Herbaceous Fuel Load van vegetatietype Oude Heide (H3) is een eerste vergelijking tussen de meetresultaten van het praktijkexperiment en de simulatieberekeningen van het rekenmodel nu niet mogelijk. Er wordt aangeraden om de waardes voor vegetatietype H3 van de Nederlandse brandstofmodellen opnieuw te analyseren en met de gecorrigeerde waardes nieuwe simulatieberekeningen uit te voeren en die te vergelijken met de resultaten van het praktijkexperiment.

Inhoud

	Samenvatting	3
	Inleiding	5
1	Rekenmodel (natte) stoplijnen	7
1.1	Werking	7
1.2	Onzekerheden en beperkingen	8
1.3	Validatie	10
2	Methode	11
2.1	Parameters rekenmodel (natte) stoplijnen	11
2.2	Meetwijze	11
2.3	Testlocatie	14
2.4	Simulatieberekening	14
2.5	Vergelijking resultaten	15
3	Resultaten	16
3.1	Praktijkexperiment	16
3.2	Simulaties	20
4	Conclusie	23
5	Discussie	24
	Literatuurlijst	26
	Bijlage 1 Beschrijving rekenmodel (natte) stoplijnen	27
	Bijlage 2 Methode omrekenen windsnelheid	37
	Bijlage 3 Brandvak	38
	Bijlage 4 Meetopstelling en specificaties meetapparatuur	39
	Bijlage 5 Correctieberekening hoek vlamfront	40

Inleiding

Het Artillerie Schietkamp (ASK) 't Harde is een militair oefen- en schietterrein van 55 vierkante kilometer. Door het gebruik van munitie bestaat er een verhoogd risico op natuurbranden. Om onbeheersbare natuurbranden te voorkomen, worden beheerbranden uitgevoerd, waarbij jaarlijks enkele delen van het terrein gecontroleerd worden afgebrand. In samenwerking met het ASK hebben onderzoekers van het NIPV in maart 2024 metingen kunnen verrichten tijdens zo'n gecontroleerde brand. Dit rapport beschrijft de resultaten van deze metingen.

Aanleiding

Een van de technieken om ontwikkelende natuurbranden te bestrijden of te beheersen, is het maken van een stoplijn. Een stoplijn is een strook waarmee brandoverslag door loopvuur kan worden voorkomen. Er wordt gesproken over droge stoplijnen en natte stoplijnen. Bij een droge stoplijn is er geen brandstof (zoals vegetatie) op de strook aanwezig. Bij een natte stoplijn wordt een strook nat gemaakt (inclusief de daarop aanwezige brandstof), zodanig dat eventueel aanwezige brandstoffen op de strook niet tot ontbranding kunnen komen. Een stoplijn kan ook een combinatie zijn van een droge stoplijn met een natte stoplijn. In de praktijk bestaat een stoplijn vaak uit een bestaand pad, waarnaast een strook vegetatie nat gemaakt wordt.

Bij een inzet kan met behulp van vuistregels op basis van een beperkt aantal relatief eenvoudig te vergaren gegevens snel bepaald worden of en zo ja, hoe de stoplijn moet worden opgezet. In een eerdere inventarisatie van de in gebruik zijnde vuistregels (Dam, 2019) is geconstateerd dat de vuistregels die de veiligheidsregio's toepassen bij een ontwikkelende natuurbrand van elkaar verschillen en dat een wetenschappelijke onderbouwing van de gebruikte vuistregels ontbreekt. Aanbevolen werd om verder onderzoek te doen naar de eisen aan stoplijnen, zodat onderbouwde vuistregels zouden kunnen worden opgesteld.

In 2021 heeft het NIPV op basis van formules van Efectis een rekenmodel voor stoplijnen bij natuurbranden geprogrammeerd, waarmee vuistregels voor stoplijnen kunnen worden opgesteld. Met het rekenmodel kan gesimuleerd worden wat de effecten zijn van een pad en/of opgebracht water op het stoppen van een natuurbrand. Het rekenmodel (natte) is echter nog niet gevalideerd.

Doel

Het doel van dit onderzoek is het opstellen van een meetwijze waarmee het rekenmodel (natte) stoplijnen kan worden gevalideerd. Met dit onderzoek wordt een aanzet gegeven voor de wijze waarop de resultaten van het rekenmodel kunnen worden getoetst aan de praktijk, maar er vindt in dit onderzoek geen validatie plaats.

Onderzoeksvraag

De hoofdvraag binnen dit onderzoek is:

Hoe kan het rekenmodel (natte) stoplijnen worden gevalideerd met praktijkexperimenten?

De deelvragen daarbij zijn:

1. Hoe kunnen tijdens een praktijkexperiment de parameters uit het rekenmodel worden gemeten?
2. Hoe bruikbaar zijn de resultaten van een eerste praktijkmeting om bij de validatie van het rekenmodel mee te kunnen nemen?

Leeswijzer

Hoofdstuk 1 bevat een beschrijving van het rekenmodel (natte) stoplijnen. In hoofdstuk 2 volgt een beschrijving van de meetwijze en meetopstelling bij de beheerbranden en de manier waarop de resultaten van het praktijkexperiment worden vergeleken met de resultaten van het rekenmodel. Hoofdstuk 3 bevat de resultaten van het praktijkexperiment en van de simulatieberekeningen met het rekenmodel. Hoofdstuk 4 bevat de conclusie en in hoofdstuk 5 volgt de discussie met aanbevelingen.

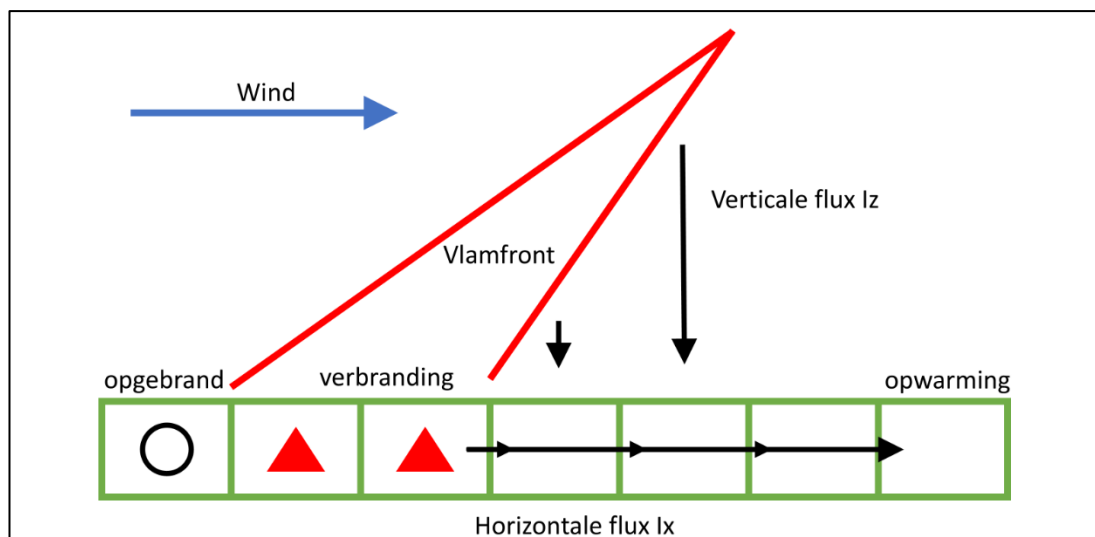
1 Rekenmodel (natte) stoplijnen

In 2014 heeft Efectis het model SurFire ontwikkeld waarmee gerekend kan worden aan brandoverslag bij een pad (Lemaire & Van Mierlo, 2014). Omdat er nog geen Nederlandse brandstofmodellen beschikbaar waren bij de ontwikkeling van SurFire, heeft het NIPV een nieuw rekenmodel gebouwd op basis van SurFire, en daarin de Nederlandse brandstofmodellen (Brouwer et al., 2018) verwerkt. Omdat bij natuurbranden in Nederland vaak gewerkt wordt met natte stoplijnen, is ook het effect van het opbrengen van water in het nieuwe model verwerkt.

1.1 Werking

Het rekenmodel (natte) stoplijnen voert berekeningen uit om de effecten van (natte) stoplijnen op brandoverslag te simuleren. Daarbij gaat het rekenmodel uit van twee stroken: een strook zonder brandstof en water (een kaal droog pad), en daarachter een strook vegetatie met een bepaalde hoeveelheid opgebracht water. Deze twee stroken samen vormen de stoplijn. Als resultaat geeft het rekenmodel aan of er door de vegetatie achter de stoplijn genoeg energie wordt opgenomen om te ontbranden.

Het rekenmodel gaat uit van een natuurbrand in de vorm van loopvuur dat zich in één richting voortplant, loodrecht op een breed vlamfront. In Figuur 1.1 is het rekenmodel schematisch weergegeven. Er wordt uitgegaan van een brandstofbed (vegetatie met lucht), dat verdeeld is in cellen met een bepaalde lengte en hoogte. Aan het begin van het brandstofbed bevindt zich het vlamfront. De overige cellen in het brandstofbed ontvangen straling van het vlamfront en nemen energie op, totdat ze voldoende opgewarmd zijn en 'ontbranden', waardoor het vlamfront zich uitbreidt. Als het vlamfront gepasseerd is, is de cel 'opgebrand'. Dit wil zeggen dat de cel geen energie meer produceert en ook geen energie meer opneemt. Het verloop van opwarming en verbranding kan voor elke cel anders zijn. Dit is afhankelijk van onder andere de vochtigheid, wind en afstand tot het vlamfront. In Bijlage 1 wordt de werking van het rekenmodel uitgebreider toegelicht.



Figuur 1.1 Schematische weergave van het rekenmodel

1.2 Onzekerheden en beperkingen

Het rekenmodel is nog in ontwikkeling en bevat enkele onzekerheden en beperkingen die van invloed zijn op de validatie. Deze worden hieronder beschreven.

De vangcapaciteit van het water

Dit is de hoeveelheid van het opgebrachte water die op de vegetatie blijft liggen en dus de brand kan vertragen. In diverse onderzoeken die wereldwijd zijn uitgevoerd naar de vangcapaciteit van planten is niet alleen gekeken naar plantenfamilies, zoals grassen (Poaceae), maar ook soortspecifiek. Er is echter geen onderzoek gevonden naar de soorten pijpenstrootje (*Molinia caerulea*) of struikheide (*Calluna vulgaris*), die in Nederlandse natuurgebieden (en ook het ASK) veel voorkomen. Grofweg lagen de resultaten tussen de 38 en 5 %, afhankelijk van de soort. De vangcapaciteit die in het rekenmodel wordt aangehouden, is vastgesteld op 30 % van het opgebrachte water. Hierbij geldt een maximum van 4 l/m².

Naast bovengenoemde experimenten, is er een onderzoek uitgevoerd met behulp van sprinklers. Dit onderzoek liet zien dat bij alfalfa de vangcapaciteit varieerde tussen de 5,27 en de 17,59 %. Het gewicht van de levende plant, de hoogte van de plant en de bladoppervlakte-index (relatieve grootte van het bladoppervlak) toonden een significante positieve correlatie met vangcapaciteit van de kroon van de plant (Wang et al., 2020). De vangcapaciteit neemt dus toe met het gewicht, de hoogte en de bladoppervlakte-index van de plant.

Een onderzoek naar vangcapaciteit van 116 verschillende boomsoorten in China had als resultaat dat boomsoorten met trichomes (haren) aan de bladeren het meeste water vasthouden. Vangcapaciteit van de regen door de bomen bleek af te hangen van de bladoppervlakte-index, het gemiddelde bladoppervlak en de vorm van het blad. Loofbomen hebben een betere vangcapaciteit dan naaldbomen (Yan et al., 2021).

Een Australisch onderzoek naar dennenplantages bestaand uit exoten en inheemse *Banksia* bossen kwam tot een verlies van vangcapaciteit van 16,4 tot 22,9 % (Fan et al., 2014). Een

onderzoek uit China naar *Hippophae rhamnoides* (duindoorn) en *Caragana korshinskii* (een erwtsoort) kwam tot een doorval van regen van 62,4 en 70,1 %; de waterstroom langs de stam was 2,4 en 6,7 % van de totale neerslag (Jian et al., 2018). Onderzoek uit Nigeria kwam tot de conclusie dat de opvangcapaciteit van naaldbomen 32,01 % en van loofbomen 26,54 % is (Ufoegbune et al., 2010).

Stationair versus dynamisch

Het rekenmodel gaat uit van een brand die zich stationair uitbreidt in een bepaalde richting en met een bepaalde snelheid. In de werkelijkheid zal een brand zich echter dynamischer gedragen. Het is verder onzeker of een brand met hoge brandvermogens zich nog steeds zo gedraagt zoals het rekenmodel: hoe hoger het brandvermogen, hoe groter de luchtstromen naar de brand toe. De brand gaat dan steeds meer zijn eigen luchtbewegingen (wind) bepalen. Dit zal van grote invloed zijn op de vlammen (vlamhoogte, vlamhoek, vlamintensiteit et cetera), en daarmee op de kans op brandoverslag (Linn et al., 2025). Het is dus nodig om de grenzen te bepalen waarbinnen het rekenmodel toepasbaar is.

Grote verzameling rekenregels

Er is een flinke hoeveelheid rekenregels nodig om de berekeningen te kunnen maken. Grondslagen voor de rekenregels zijn te vinden in de rekenregels van Farsite (Finney, 2004) en BehavePlus (*BehavePlus Fire Modeling System*, 2018).¹ Deze rekenregels zijn tot stand gekomen op basis van diverse praktijkexperimenten en laboratoriumproeven. Hierbij geldt altijd dat de omstandigheden bij de experimenten en in het laboratorium nooit voor 100 % overeenkomt met de werkelijke situatie.

Het rekenmodel is opgedeeld in cellen die opwarmen, branden of uitgebrand zijn

In het rekenmodel is de overgang van branden naar uitgebrand zijn hard: van 100 % energieafgifte in één tijdsstap terug naar 0 %. In werkelijkheid zal dit echter meer geleidelijk verlopen. De snelheid van het opbranden van de vegetatie wordt bepaald met het natuurbrandverspreidingsmodel. In werkelijkheid zal het uitdoven aan de achterzijde dynamischer plaatsvinden (niet in één rechte lijn en niet in één keer van 100 % energieafgifte naar 0 %).

Het rekenmodel kijkt alleen naar loopvuur

Het rekenmodel gaat uitsluitend uit van brandoverslag als gevolg van loopvuur. In de praktijk is brandoverslag ook mogelijk door vliegvuur, kroonvuur en grondvuur.

In het rekenmodel wordt de opwarming van de cellen niet gehinderd door de omgeving

Rook en andere objecten of obstakels beperken de doorgifte van de energie van de brandende vegetatie naar de niet-brandende vegetatie. Het rekenmodel houdt daar geen rekening mee: alleen de vegetatie zelf speelt een rol in het produceren van straling en de opname van energie. In werkelijkheid zal met name de rook de doorgifte van energie beperken.

¹ Dit laatste model is de grondlegger voor het natuurbrandverspreidingsmodel. Zie: <https://nipv.nl/informatievoorziening/voorzieningen/natuurbrandverspreidingsmodel/>.

1.3 Validatie

Om te beoordelen of de resultaten van het rekenmodel bruikbaar zijn, moet het model gevalideerd worden. Onderdeel daarvan is het toetsen van de resultaten van het rekenmodel aan de praktijk. Daarvoor zijn metingen onder realistische omstandigheden nodig waarbij verschillende factoren worden gemeten en vergeleken met berekeningen van het rekenmodel.

Er zijn meerdere factoren die invloed hebben op het brandgedrag van vegetatie en of de brand wel of niet overslaat, zoals vegetatietype, glooiing van het terrein, windsnelheid, hoeveelheid opgebracht water en stoplijnbreedte. Idealiter wordt de invloed per factor gemeten door meerdere vergelijkbare praktijkmetingen uit te voeren, waarbij bij elke volgende praktijkmeting slechts de betreffende factor een andere waarde heeft en de waarden van de andere factoren hetzelfde blijven. Bij metingen aan natuurbranden is dit echter een onmogelijke opgave.

De vele factoren die meespelen en de grote variatie daarin maken dat het ondoenlijk is om voor elke waarde van de afzonderlijke factoren de invloed op brandoverslag te meten. Er zouden vele praktijkmetingen nodig zijn bij gecontroleerde natuurbranden (beheerbranden) met diverse vegetatietypen en omstandigheden. Het aantal daarvan hangt ook af van de mate van verschillen tussen de resultaten bij praktijkexperiment en berekeningen van het rekenmodel. Hoewel er altijd verschillen zullen zijn tussen de resultaten van een praktijkexperiment en de simulaties, valt nog niet te zeggen welke verschillen acceptabel zijn om te kunnen aannemen dat de resultaten met elkaar overeenkomen.

2 Methode

Om te bepalen hoe het rekenmodel gevalideerd kan worden zijn verschillende stappen doorlopen. Allereerst is gekeken naar de parameters die het rekenmodel nodig heeft om een simulatie uit te voeren en de parameters die het rekenmodel na simulatie genereert. Daarna is gekeken of en op welke wijze de parameters kunnen worden gemeten tijdens een praktijkexperiment. Vervolgens zijn, met de voorgestelde meetmethoden, metingen verricht in de praktijk bij een beheerbrand op het ASK. De meetresultaten van dit praktijkexperiment zijn ten slotte vergeleken met de simulatieberekeningen van het rekenmodel om te bepalen of de resultaten bruikbaar zijn om mee te nemen bij een validatie van het rekenmodel.

2.1 Parameters rekenmodel (natte) stoplijnen

Het rekenmodel (natte) stoplijnen heeft verschillende invoerparameters nodig om een simulatieberekening uit te kunnen voeren. Bij het praktijkexperiment is daarom informatie vergaard van de volgende invoerparameters:

- > de kenmerken van de vegetatie
- > de weersomstandigheden
- > de breedte van de stoplijn
- > het water op de vegetatie (bij een natte stoplijn).

Na de simulatie genereert het rekenmodel een aantal parameters waarmee voorspeld kan worden of de brand wordt gestopt of dat de brand toch overslaat naar de vegetatie aan de andere zijde van de stoplijn. De uitvoerparameters die gegenereerd worden en bij een praktijkexperiment te meten zijn of waar informatie over te verkrijgen is, zijn:

- > de afbuigingshoek van het vlamfront
- > de vlamlengte van het vlamfront
- > de ontvangen warmteflux (straling, convectie en geleiding) direct achter de stoplijn
- > de brandoverslag.

Een uitgebreide toelichting op alle constanten, invoerparameters, uitvoerparameters, achtergrond en werking van het rekenmodel is in Bijlage 1 terug te vinden.

2.2 Meetwijze

De metingen van de bovengenoemde invoer- en uitvoerparameters tijdens het praktijkexperiment zijn uitgevoerd zoals hieronder staat beschreven.

Vegetatie

Ter voorbereiding op de beheerbrand op het ASK zijn de kenmerken van de vegetatie van het brandvak vastgelegd en is met de *Brandstofmodellengids* (Tanck & Brouwer, 2023) bepaald welk brandstofmodel het beste overeenkomt met de vegetatie van het brandvak. In Bijlage 3 is uitgebreidere informatie over de kenmerken van de vegetatie en het brandvak

terug te vinden. Vervolgens zijn de gegevens van het brandstofmodel in het natuurbrand-simulatieprogramma BehavePlus (BehavePlus Fire Modeling System, 2018) ingevoerd. De resultaten van de BehavePlus-simulaties zijn als input in het rekenmodel meegenomen. In Bijlage 1 staan in Tabel B1.3 de invoerparameters uit BehavePlus.

Weersomstandigheden

De meteorologische gegevens zijn bovenwinds met een mobiel weerstation (Davis GroWeather 6820²) gemeten in de directe omgeving (± 1 km) van het brandvak. Het betreft de temperatuur, luchtvochtigheid, windsnelheid en windrichting, waarvan de windsnelheid de belangrijkste parameter is voor het rekenmodel. De data van het weerstation zijn iedere minuut via een lokaal opgezet wifi-netwerk gemeten en opgeslagen op een lokale meteoserver (Meteobridge Pro2). In het rekenmodel wordt gerekend met de windsnelheid op 10 meter hoogte. Het mobiele weerstation heeft de windsnelheid echter op 2 meter hoogte gemeten. De windsnelheid voor 10 meter hoogte is bepaald met behulp van de omrekenformule die in Bijlage 2 staat toegelicht.

Breedte stoplijn (padbreedte)

Tijdens het praktijkexperiment is geen natte strook gecreëerd. Bij de simulaties met het rekenmodel is daarom uitgegaan van een kaal droog pad en is de parameter voor hoeveelheid opgebracht water op nul gezet. Op 0, 1, 2 en 3 meter afstand van het brandvak zijn meetpalen geplaatst met sensoren (thermokoppels) waarmee de temperaturen op die posities zijn gemeten.

Afbuigingshoek vlamfront (hoek van de vlam ten opzichte van de verticale as)

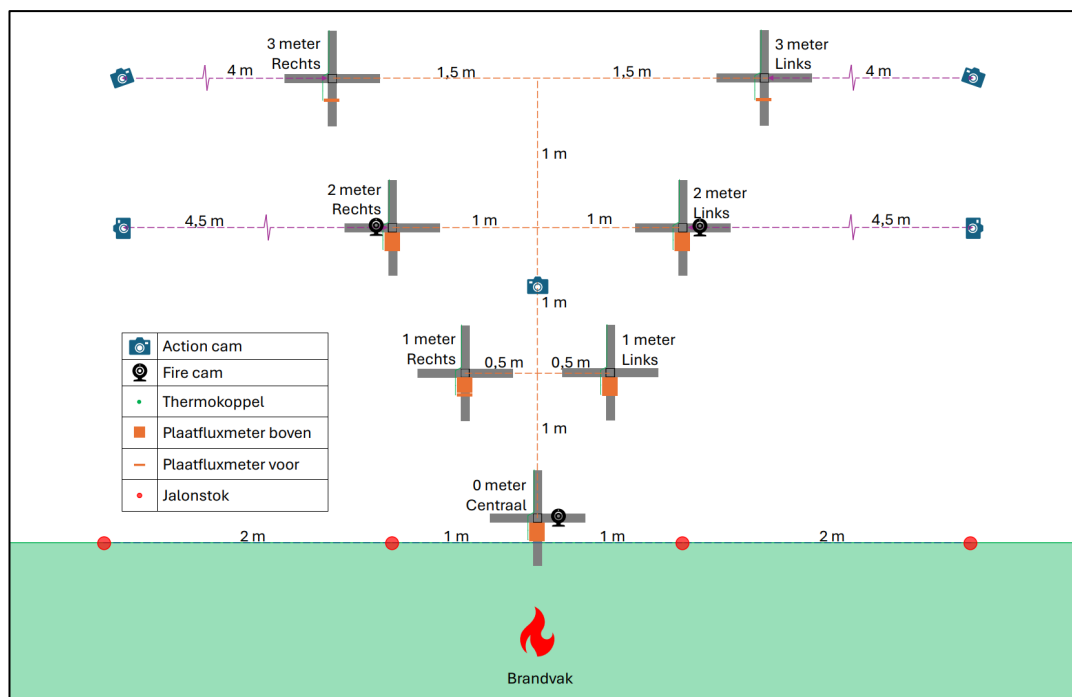
Het rekenmodel berekent de afbuigingshoek van het vlamfront op basis van de windsnelheid en windrichting. Ter verificatie van de berekeningen door het rekenmodel is het vlamfront van de vlammen vastgelegd met videocamera's (vijf Strex Actioncamera's 4K en drie Firecams). In het zicht van de camera's zijn jalonstokken geplaatst met hoogteaanwijzing (per 50 cm). De jalonstokken zaten 10 cm diep in de grond op de stoplijn. De videocamera's stonden opgesteld onder verschillende hoeken ten opzichte van het vlamfront (Figuur 2.1). De beelden van de afbuigingshoeken op het moment van de hoogste temperaturen zijn bekeken door drie onderzoekers; op basis van die beelden zijn de gemiddeldes ingeschat.

Vlamlengte

De vlamlengte is afhankelijk van de kenmerken van de vegetatie en wordt op basis van die kenmerken berekend door BehavePlus. Het rekenmodel gebruikt de berekende vlamlengte van BehavePlus. Ter verificatie van de berekeningen door het rekenmodel is op het moment dat de maximale temperatuur werd bereikt, de gemiddelde vlamhoogte geschat door drie onderzoekers met behulp van de videobeelden. Met de geschatte afbuigingshoek (θ) en vlamhoogte is vervolgens de vlamlengte berekend met:

$$Vlamlengte (cm) = \frac{Vlamhoogte (cm)}{\sin \theta}$$

² Temperatuurreolutie van 1 °C en resolutie van de windsnelheid van 0,4 m/s.



Figuur 2.1 Bovenaanzicht meetopstelling

Ontvangen warmteflux

Het rekenmodel berekent de ontvangen warmteflux achter de stoplijn. Op basis van het brandgedrag van de vegetatie in het brandvak (BehavePlus) werd verwacht dat op 3 meter afstand achter de stoplijn de warmteflux zo laag zou zijn dat er geen brandoverslag zou plaatsvinden.

Om de warmteflux bij het praktijkexperiment te bepalen, zijn veertien temperaturen gemeten met K-thermokoppels op 0, 1, 2 en 3 meter afstand van het brandvak (zie Figuur 2.1) ter hoogte van de vegetatie (50 cm). De temperaturen zijn 10 keer per seconde met een data-acquisitiesysteem (DAQ-systeem NI 9212) verkregen en opgeslagen op een laptop met behulp van data-acquisitiesoftware (LabVIEW, 2018). Met de gemeten temperaturen is vervolgens de warmteflux (in W/m^2) berekend met de formule van Stefan-Boltzmann:

$$\phi = 5.67037e^{-8} \cdot T^4$$

Hierin is T de temperatuur van het thermokoppel in Kelvin. In deze berekening wordt vanwege het kleine oppervlak van het thermokoppel de straling die het thermokoppel zelf afgeeft, verwaarloosd.

Oorspronkelijk waren in de meetopstelling ook plaatfluxmeters meegenomen. Bij het uitwerken van de resultaten bleek echter dat de reactiesnelheid van de plaatfluxmeters veel lager was dan de voortplantingssnelheid van de brand, waardoor deze gegevens niet konden worden gebruikt. Daarom is uitgegaan van de metingen van de thermokoppels voor het berekenen van de warmteflux.

Brandoverslag

Op 1, 2 en 3 meter van de stoplijn zijn enkele takjes van de vegetatie uit het brandvak op een stokje geplaatst om een eventuele ontbranding door brandoverslag op die afstanden te kunnen vaststellen.

Het rekenmodel gaat ervan uit dat het vlamfront loodrecht op de stoplijn afkomt. In de praktijk zal dit echter weinig voorkomen. Daarom is een meetopstelling (bestaande uit zeven meetpalen met elk twee thermokoppels) in een V-vorm (Figuur 2.1) opgezet, zodat de hoek van het vlamfront ten opzichte van de meetopstelling kan worden berekend. De details van de meetopstelling en de specificaties van de gebruikte meetapparatuur staan beschreven in Bijlage 4. De correctieberekening voor de hoek van het vlamfront ten opzichte van de meetopstelling staat uitgewerkt in Bijlage 5.

2.3 Testlocatie

Voorafgaand aan het praktijkexperiment zijn op het ASK de voor dat seizoen geselecteerde brandvakken beoordeeld op geschiktheid voor het uitvoeren van de metingen. Het rekenmodel gaat in de berekeningen uit van een gelijkmatige vegetatie en rekent met één brandverspreidingssnelheid. De glooiing van een terrein en naburige bosranden of bebouwing hebben invloed op het brandgedrag, waaronder de snelheid van de brandverspreiding. Daarom is een brandvak geselecteerd met zoveel mogelijk gelijkmatige vegetatie op een open vlakte en met weinig glooiing. In Bijlage 3 staan de kenmerken van het brandvak beschreven. Voorafgaand aan het experiment is op een klein deel van het brandvak (ongeveer 10 bij 10 meter) de vegetatie weggebrand om de meetopstelling veilig te kunnen opstellen.

Beheerbranden moeten tussen half november en half maart worden uitgevoerd (onder andere vanwege het broedseizoen). Ook moeten de omstandigheden geschikt zijn. Zo mag er geen sprake zijn van neerslag en aanhangend vocht op de vegetatie en moet de windsnelheid matig zijn. Op 14 maart 2024 waren de omstandigheden voldoende geschikt en is het praktijkexperiment uitgevoerd. Tussen 13:40 en 13:50 uur passeerde het vlamfront van de beheerbrand de meetopstelling.

2.4 Simulatieberekening

Voorafgaan aan de simulatieberekeningen is het rekenmodel gekalibreerd voor het vegetatietype van het brandvak. Bij de kalibratieberekening is gebruikgemaakt van de berekende brandvoortplantingssnelheid van het natuurbrandsimulatieprogramma BehavePlus. Er zijn simulatieberekeningen uitgevoerd met het rekenmodel, waarbij voor enkele parameters altijd dezelfde vaste waarde is ingevoerd en voor enkele parameters de ingevoerde waarde per simulatie varieerde. De simulatieberekeningen zijn gedaan met waarden die gemeten werden op het tijdstip dat het vlamfront de centrale meetpaal (0 m) bereikte.

Invoerparameters met voor elke simulatie dezelfde vaste waarde waren:

- > **Vegetatie**
Bij de vegetatie zijn altijd de vegetatiekenmerken van het brandvak ingevoerd.
- > **Omgevingstemperatuur**
Bij de omgevingstemperatuur is altijd de gemiddelde omgevingstemperatuur van het weerstation ingevoerd (vanaf het moment dat het vlamfront de meetopstelling bereikte totdat het die had gepasseerd).

Invoerparameters waarvan de waarde varieerde per simulatie waren:

> **Padbreedte**

Bij elke simulatie met het rekenmodel wordt gerekend met één padbreedte. Om te bepalen bij welke padbreedte brandoverslag plaatsvindt, zijn er daarom meerdere simulaties nodig geweest met verschillende padbreedtes. In de simulaties zijn padbreedtes geselecteerd die overeenkomen met de afstanden van de individuele meetpalen tot het vlamfront. Het gaat om de afstanden op het moment dat het vlamfront de centrale meetpaal (0 m) bereikte. Wanneer het vlamfront niet loodrecht op de meetopstelling afkwam, zijn de afstanden tot de meetpalen berekend zoals in Bijlage 5 is toegelicht.

> **Windsnelheid**

Het rekenmodel gaat tijdens een simulatieberekening uit van één windsnelheid, maar omdat de windsnelheid in de praktijk veranderlijk is, zijn er simulaties uitgevoerd met verschillende windsnelheden. Deze windsnelheden lagen rondom de gemiddelde windsnelheid van het weerstation (vanaf het moment dat het vlamfront de meetopstelling bereikte totdat het de meetopstelling had gepasseerd). Er is gerekend met de gecorrigeerde windsnelheid voor 10 m hoogte.

2.5 Vergelijking resultaten

De meetresultaten van het praktijkexperiment en het rekenmodel zijn beoordeeld door de verschillen in uitkomsten van de vlamlengte, afbuigingshoek, verbranding van de vegetatie aan de stokjes en de ontvangen warmteflux met elkaar te vergelijken. Dit is gedaan door de resultaten te vergelijken van het tijdstip dat het vlamfront de centrale meetpaal (0 m) bereikte. De verbranding van de vegetatie is vergeleken met het berekende brandoverslag. De gemeten straling is vergeleken met de totaal ontvangen warmteflux die is berekend door het model.

3 Resultaten

3.1 Praktijkexperiment

3.1.1 Kenmerken van de vegetatie

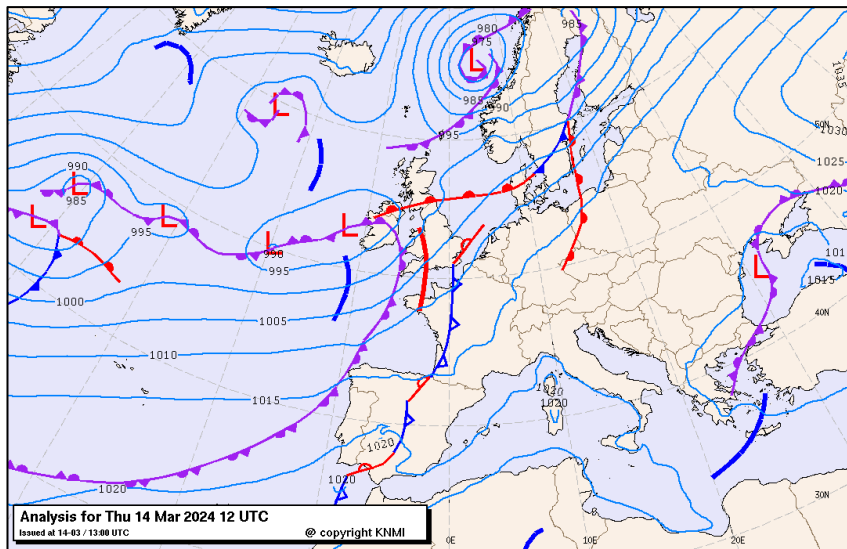
De vegetatie van het brandvak is volgens de *Brandstofmodellengids* (Tanck & Brouwer, 2023) Oude Heide (H3). Ze bestond voornamelijk uit struikheide (*Calluna vulgaris*). Zie Figuur 3.1 voor een impressie van de vegetatie. In het brandvak stonden enkele kleine naaldbomen, maar niet in de vegetatie voor de meetopstelling. De vegetatie was ongeveer 8 jaar oud. Het brandvak is namelijk 8 jaar geleden ook beheerd afgebrand; sindsdien is er nieuwe heide gegroeid. De hoogte van de vegetatie was ongeveer 40 centimeter.



Figuur 3.1 Impressie van de vegetatie tijdens het experiment

3.1.2 Omgevingstemperatuur, luchtvochtigheid, windsnelheid en -richting

Op 14 maart 2024 bevond zich ten noorden van Nederland een lagedrukgebied en ten zuiden een hogedrukgebied (Figuur 3.2). De aangevoerde lucht had maritieme eigenschappen, wat betekent dat de lucht vochtig was en een gematigde temperatuur had.



Figuur 3.2 Weerkaart van Europa op 14 maart 2024 om 13:00 uur (Bron: KNMI)

Op het moment dat het vlamfront de meetopstelling bereikte, mat het mobiele weerstation een temperatuur van 17,5 °C. De minimale luchtvochtigheid was rond de 50 %. De gemeten windsnelheid (op 2 meter hoogte) lag tussen de 4,0 en 5,9 m/s en was niet erg veranderlijk gedurende de ochtend en middag. Omgerekend naar een hoogte van 10 m (volgens de formules in Bijlage 2) was de windsnelheid tussen 5,6 en 8,2 m/s, en tijdens het passeren van het vlamfront gemiddeld 6,8 m/s. De windrichting was rond de 200 graden (zuidzuidwesten wind), maar vanaf ongeveer 12:00 uur begon de wind te draaien naar zo'n 300 graden (westnoordwest) of nog iets verder.

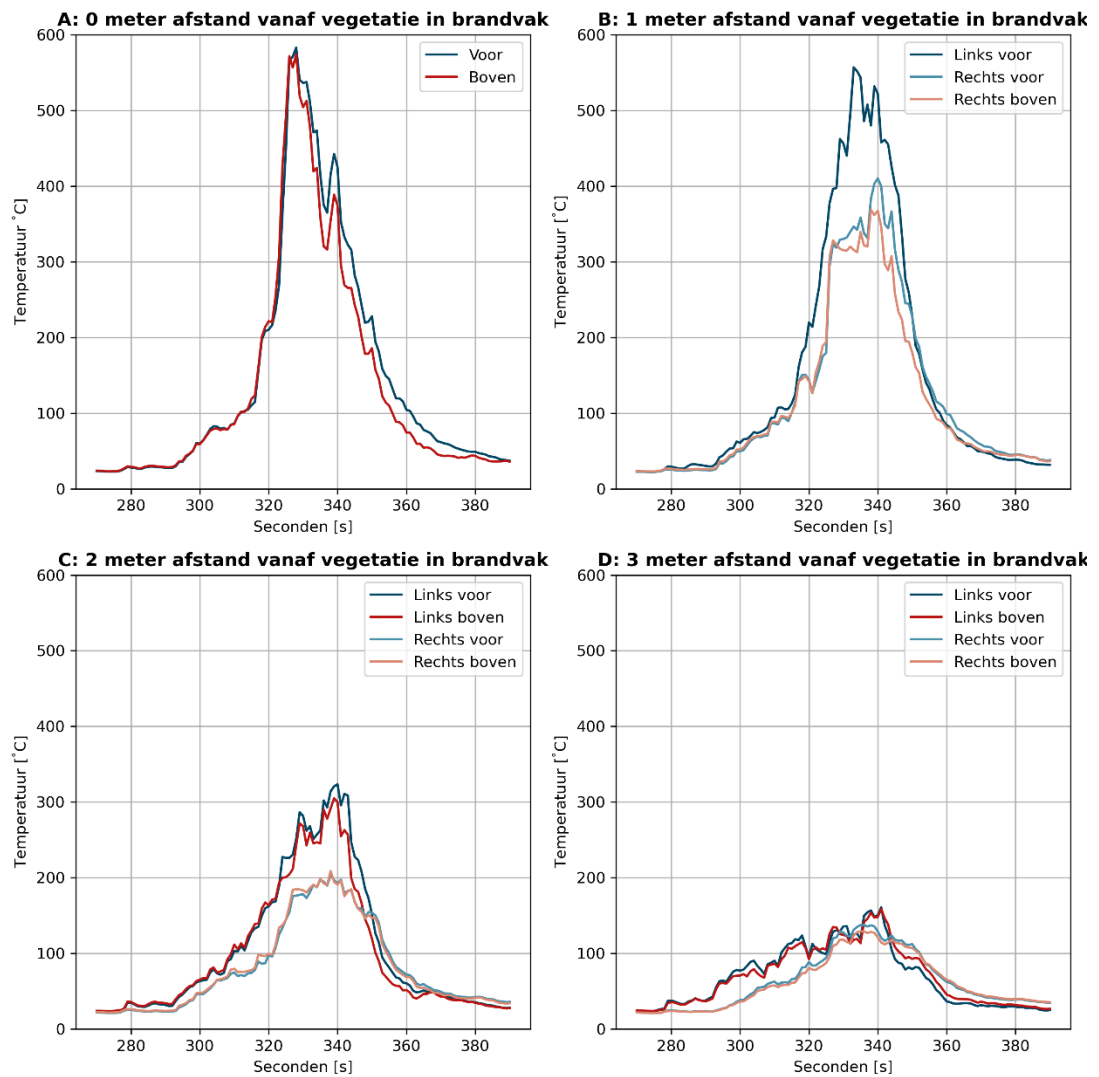
3.1.3 Afbuigingshoek, vlamhoogte en vlamlengte

Op basis van de videobeelden is geschat dat de afbuigingshoek tijdens de maximale temperaturen tussen de 30 en 45 graden lag en dat de vlamhoogte varieerde tussen de 100 en 150 cm. Daarmee komt de vlamlengte op 141 tot 300 cm.

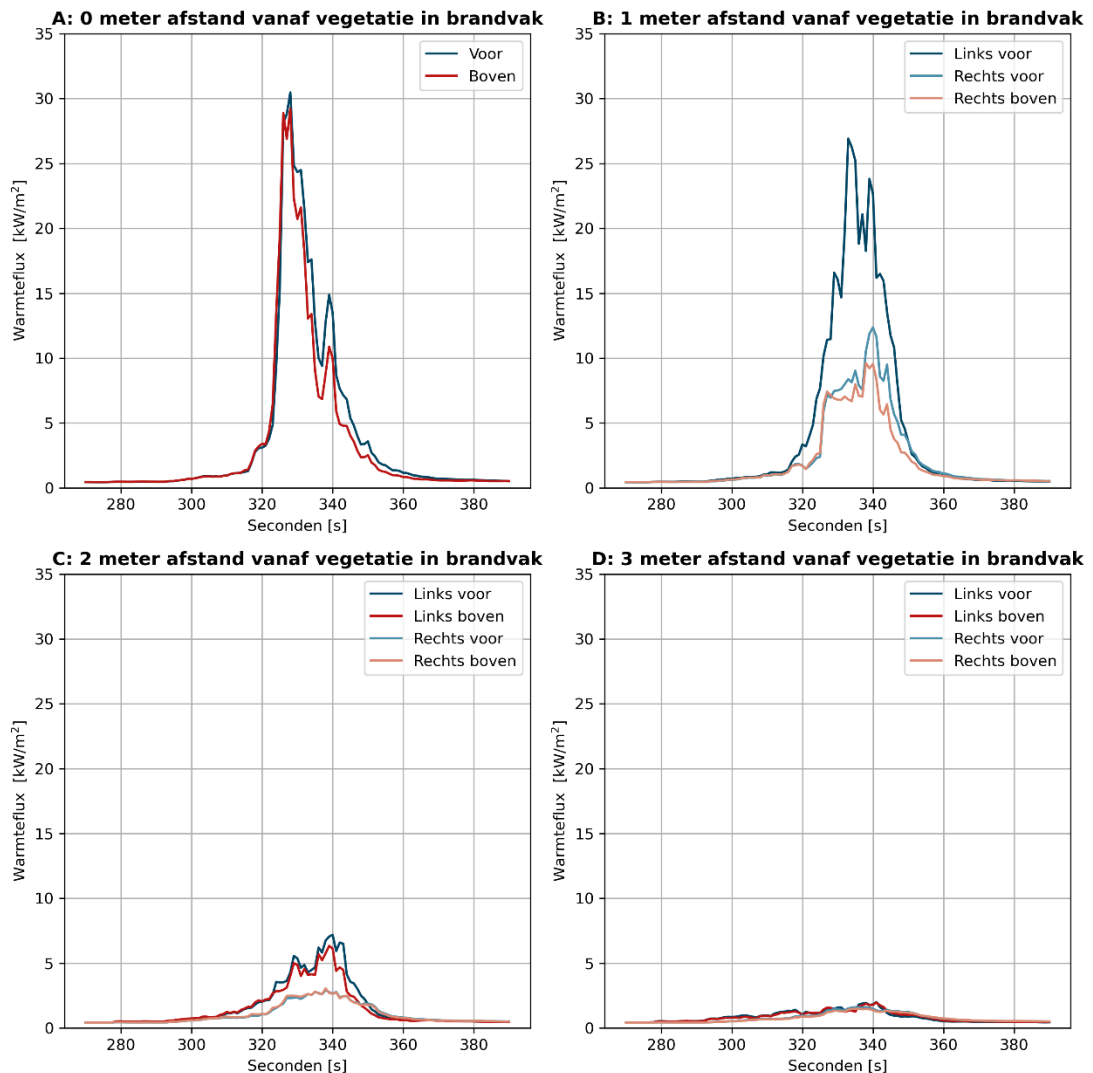
3.1.4 Temperatuur en ontvangen warmteflux na de stoplijn

In Figuur 3.3 en Figuur 3.4 staan per meetpaal de gemeten temperaturen en de daarbij berekende warmtefluxen grafisch weergegeven. Op het moment dat het vlamfront de meetopstelling bereikte, werd bij de centrale meetpaal (0 m) de hoogste piek gemeten. Omdat het vlamfront niet loodrecht op de meetopstelling afkwam, zijn de pieken links en rechts van de centrale meetpaal verschillend. Om het rekenmodel correct in te kunnen zetten, zijn de afstanden van de meetpalen tot het vlamfront gecorrigeerd voor de hoek waarop het vlamfront aankwam volgens de correctieberekening in Bijlage 5. In Figuur 3.3 en Figuur 3.4 zijn de afstanden tot aan de stoplijn (en niet tot aan het vlamfront) vermeld. In Tabel 3.1 staat een overzicht van de gemeten temperatuur en de berekende warmteflux per meetpaal op het moment dat het vlamfront de centrale meetpaal (0 m) bereikte.

Na de eerste analyse bleek dat één thermokoppel (linksboven, 1 m) gedurende de test was verschoven en achter de tape was terechtgekomen. Hierdoor werd het thermokoppel gedeeltelijk afgeschermd, zodat een lagere temperatuur werd gemeten. Dit thermokoppel is daarom in de verdere analyse niet meegenomen. Daarnaast is uit de eerste analyse gebleken dat twee thermokoppels (rechts- en linksboven, 3 m) zeer waarschijnlijk met elkaar zijn verwisseld bij het aansluiten van de thermokoppels in het DAQ-systeem. In de verdere analyses zijn deze resultaten daarom omgedraaid.



Figuur 3.3 De gemeten temperaturen op verschillende afstanden van de stoplijn



Figuur 3.4 De ontvangen warmteflux op verschillende afstanden van de stoplijn

Bij de centrale meetpaal (0 m, grafiek A) zijn de hoogste temperatuur en warmteflux gemeten, ongeveer 580 °C en 30 kW/m² respectievelijk. Op de meetpalen daarachter (1 m, grafiek B) zijn de temperatuur en de warmteflux die door de linker meetpaal zijn gemeten een stuk hoger dan de temperatuur en warmteflux die door de rechter meetpaal zijn gemeten. Dit komt overeen met de richting van het vlamfront dat, gezien vanaf de meetopstelling, vanaf de linkerkant aankwam. Ook bij de meetpalen die op de volgende rij stonden (2 m, grafiek C) is dit verschil tussen de linker- en de rechterkant nog te zien. Bij de meetpalen op de laatste rij (3 m, grafiek D) is dit verschil slechts minimaal. De maximale temperatuur is daar 160 °C en de maximale warmteflux 2 kW/m².

Tabel 3.1 Overzicht van de gemeten temperatuur met de berekende warmteflux per meetpaal op het moment dat het vlamfront de centrale meetpaal (0 m) bereikt

Meetpaal	Afstand tot vlamfront (m)	Temperatuur (°C)	Warmteflux (kW/m ²)
Midden (0 m)	0	583	30,5
Links (1 m)	0,7	557	26,9
Rechts (1 m)	1,1	410	12,4
Links (2 m)	1,4	324	7,2
Rechts (2 m)	2,2	203	2,9
Links (3 m)	2,1	161	2,0
Rechts (3 m)	3,4	137	1,6

3.1.5 Brandeffecten stokjes met vegetatie

Aan beide zijden van de opstelling is de vegetatie op het stokje op 1 meter van de stoplijn ontbrand. In Figuur 3.5 is dit te zien. De vegetatie op het stokje op 2 meter van de stoplijn is aan een zijde aangetast, maar niet verbrand. De toestand van de vegetatie op het stokje aan de andere zijde kon niet worden beoordeeld, omdat dat stokje was omgevallen. Aan de vegetatie op de stokjes op 3 meter was geen verandering te zien, nadat het vlamfront was gepasseerd.



Figuur 3.5 Vlamvattend takje op 1 meter van vlamfront

3.2 Simulaties

Bij het analyseren van de resultaten van de simulaties bleken de waarden voor de ontvangen warmteflux hoog uit te vallen; het gaat om waarden die richting 200 kW/m² gingen bij een padbreedte van 0 m. Voor vegetatietype H3 zijn dit erg hoge waarden.

Ook weken de waardes sterk af van de warmtefluxresultaten die berekend waren op basis van de bij het praktijkexperiment gemeten temperaturen. Omdat de gemeten temperaturen wel reële waardes laten zien, wordt ervan uitgegaan dat de warmtefluxresultaten, berekend op basis van het praktijkexperiment, correct zijn. Om te achterhalen waardoor er een groot verschil zit tussen de warmtefluxen in de praktijk en van de simulatie zijn de processen in het rekenmodel nader onderzocht.

Zoals vermeld in hoofdstuk 1, zijn in het rekenmodel resultaten uit BehavePlus ingevoerd. Daarbij kwam naar voren dat enkele waardes die door BehavePlus werden gegenereerd voor vegetatie H3, sterk afwijken van de waardes voor andere vegetaties. Uit een verdere analyse bleek dat er voor vegetatie H3 in de Nederlandse brandstofmodellen een relatief hoge waarde staat opgenomen voor Live Herbaceous Fuel Load (kruidachtige levende brandstoflading). Deze waarde is bij vegetatie H3 (42 ton per hectare) veel hoger dan bij de andere vegetaties (maximaal 14 ton per hectare). Deze hoge waarde kan verklaren waarom de resultaten van BehavePlus zo sterk afwijken. Er kon niet worden achterhaald wat de oorzaak is van de afwijkende waarde van Live Herbaceous Fuel Load voor H3.

Om toch een eerste beoordeling van de werking van het rekenmodel te kunnen geven, zijn de berekeningen voor de warmteflux met een ander type vegetatie uitgevoerd. Omdat de vegetatie in het brandvak niet alleen uit oude heide bestond (vegetatietype H3) maar ook uit grassen, is er gekozen voor het vegetatietype Vergraste Heide (H2). Er is gerekend met de bij het praktijkexperiment gemiddeld gemeten omgevingstemperatuur van 17,5 °C en met twee windsnelheden die rondom de gemiddeld gemeten windsnelheid lagen en vervolgens omgerekend zijn naar 10 m hoogte (6,5 en 7,0 m/s). De simulaties met H2 geven warmtefluxen die weliswaar minder extreem, maar nog steeds relatief hoog zijn. In Tabel 3.2 staat een overzicht van de warmtefluxen van het praktijkexperiment en de simulaties met vegetaties H3 en H2.

De meetopstelling was parallel aan de stoplijn gepositioneerd, maar het vlamfront kwam niet loodrecht op de meetopstelling af. De afstanden van de individuele meetpalen tot aan het vlamfront zijn berekend volgens de correctieberekeningen in Bijlage 5. Deze gecorrigeerde afstanden zijn als padbreedtes in het rekenmodel ingevoerd en staan in Tabel 3.2 vermeld bij de warmteflux.

De Life Herbaceous Fuel Load heeft invloed op de resultaten van de natuurbrandsimulaties met BehavePlus en daarmee ook op de simulatieberekeningen met het rekenmodel. De simulatieberekeningen naar afbuigingshoek, vlamlengte en brandoverslag voor H3 zijn daardoor ook niet correct.

Tabel 3.2 Overzicht van de ontvangen warmtefluxen van het praktijkexperiment en van de simulaties met vegetaties H3 en H2 voor windsnelheden van 6,5 en 7,0 m/s

Windsnelheid 10 m hoogte (m/s)		6,5	7,0
Warmteflux 0 m (links) (kW/m ²)	Praktijkexperiment	30,5	30,5
	Simulatie H3	184,8	194,5
	Simulatie H2	63,2	67,6
Warmteflux 0,7 m (links)	Praktijkexperiment	26,9	26,9
	Simulatie H3	37,9	38,6
	Simulatie H2	14,9	14,7
Warmteflux 1,1 m (rechts)	Praktijkexperiment	12,4	12,4
	Simulatie H3	31,6	31,8
	Simulatie H2	10,2	10,8
Warmteflux 1,4 m (links)	Praktijkexperiment	7,2	7,2
	Simulatie H3	25,9	26,8
	Simulatie H2	8,7	9,1
Warmteflux 2,2 m (rechts)	Praktijkexperiment	2,9	2,9
	Simulatie H3	17,2	17,8
	Simulatie H2	5,4	5,7
Warmteflux 2,1 m (links)	Praktijkexperiment	2,0	2,0
	Simulatie H3	18,3	19,0
	Simulatie H2	5,7	6,0
Warmteflux 3,4 m (rechts)	Praktijkexperiment	1,6	1,6
	Simulatie H3	11,2	11,7
	Simulatie H2	3,6	3,8

4 Conclusie

Het is gebleken dat de parameters uit het rekenmodel kunnen worden gemeten door voorafgaand aan beheerbranden de kenmerken van de vegetatie in het brandvak vast te leggen met behulp van de Nederlandse brandstofmodellengids en het natuurbrandsimulatieprogramma BehavePlus. De vegetatie in het brandvak moet daarbij zo gelijkmatig mogelijk zijn. Tijdens de beheerbranden moeten in ieder geval de windsnelheid en windrichting bovenwinds in de directe omgeving van de beheerbranden worden gemeten.

In of direct tegen het brandvak aan moet een padbreedte (stoplijn) worden gecreëerd, waarop een meetopstelling in een V-vorm wordt geplaatst. Met de meetopstelling moeten temperaturen op verschillende afstanden van de stoplijn worden gemeten. De minimale breedte van het pad kan worden bepaald door een simulatie uit te voeren met het rekenmodel op basis van de kenmerken van de vegetatie in het brandvak en de te verwachten omstandigheden tijdens het praktijkexperiment.

Door een mogelijk incorrecte waarde voor Live Herbaceous Fuel Load van vegetatie H3 kunnen de resultaten van het rekenmodel niet worden vergeleken met de resultaten van het uitgevoerde experiment. Een eerste validatie van het rekenmodel is daardoor nog niet mogelijk.

Desondanks kan gesteld worden dat de eerste resultaten laten zien dat het mogelijk is het rekenmodel te valideren door praktijkmetingen uit te voeren bij beheerbranden. De gemeten ontvangen warmteflux (verkregen via thermokoppelmetingen) kan vergeleken worden met de berekende ontvangen warmteflux. Kritische parameters zijn onder andere de vegetatiespecifieke waarden, weersomstandigheden en hoeveelheid aanwezig vocht waarmee het rekenmodel de simulaties uitvoert.

Voor een correcte validatie van het rekenmodel zullen meerdere meetmomenten noodzakelijk zijn bij gecontroleerde natuurbranden (beheerbranden), en met diverse vegetatietypes en onder verschillende weersomstandigheden. Omdat er wat dit betreft zeer veel variaties zullen zijn, valt niet bij voorbaat aan te geven hoeveel meetmomenten en -omstandigheden er nodig zijn voor een validatie van het rekenmodel.

5 Discussie

Tijdens het praktijkexperiment zijn enkele in- en uitvoerparameters van het rekenmodel gemeten waarmee de resultaten van de simulaties van het rekenmodel kunnen worden getoetst. De warmtefluxresultaten van het praktijkexperiment en van de simulaties met het rekenmodel voor vegetatietype H3 bleken zo ver uit elkaar te liggen dat de invoergegevens en de berekeningen in het rekenmodel stap voor stap zijn doorlopen om te achterhalen waar die discrepantie door werd veroorzaakt. De waarde voor Live Herbaceous Fuel Load van vegetatie H3 bleek erg af te wijken van die van de andere vegetatietypes. Deze waarde is vastgesteld bij eerder onderzoek naar Nederlandse brandstofmodellen.

Om te achterhalen wat de oorzaak van de afwijkende waarde is en wat de correcte waarde zou moeten zijn, zullen de gegevens van vegetatie H3 in het Nederlandse brandstofmodel opnieuw geanalyseerd moeten worden. Als de correcte waarde voor Live Herbaceous Fuel Load van vegetatie H3 bekend is, kunnen de simulaties alsnog worden uitgevoerd en worden vergeleken met de resultaten van het huidige praktijkexperiment. Naast de hoge waarde voor Live Herbaceous Fuel Load voor H3 zouden er echter ook andere redenen kunnen zijn waardoor de resultaten van BehavePlus zo sterk afwijken. Het voerde te ver om daar in dit huidige onderzoek naar te kijken.

De warmtefluxresultaten van de simulatieberekeningen bleken voor vegetatietypen H3 en H2 bij een padbreedte van 0 m opvallend hoger dan bij de andere padbreedtes. Bij een padbreedte van 0 m worden in het rekenmodel afwijkende rekenregels toegepast, omdat er dan sprake is van direct vlamcontact met het vlamfront. Hoewel er in de praktijk nooit een padbreedte van 0 m geadviseerd zal worden, wordt het wel aangeraden om de rekenregels voor 0 m kritisch te bekijken en te achterhalen waar deze hogere waardes door worden veroorzaakt. Voor een goede validatie van het rekenmodel is ook een vergelijking van de resultaten bij 0 m van belang.

Bij het praktijkexperiment zijn plaatfluxmeters gebruikt om de warmteflux te meten. Dit zijn gangbare warmtefluxmeters bij brandtesten. De plaatfluxmeters waren bevestigd op de meetpalen, op gelijke hoogte met de thermokoppels voor de temperatuurmetingen. De reactiesnelheid van de plaatfluxmeters bleek echter te laag te zijn om de snelle voortplantingssnelheid van de brand in hetzelfde tempo te kunnen meten. Deze resultaten zijn daarom niet geanalyseerd. Er bestaan andere soorten warmtefluxmeters die wel voldoende reactiesnelheid zouden hebben, maar deze zijn minder geschikt voor inzet bij brandtesten met hoge temperaturen. Bij toekomstige praktijkexperimenten is het gebruik van plaatfluxmeters dan ook niet zinvol.

Het vlamfront was zeer grillig, niet eenduidig van vorm en veranderde voortdurend en in hoog tempo van vorm, richting en lengte. Daardoor was het niet eenvoudig om een lengte en afbuigingshoek in te schatten. Daarnaast was de afstands aanduiding op de jalonstokken onder andere door de rook slechts zeer beperkt zichtbaar, waardoor deze nauwelijks kon worden gebruikt voor een inschatting van de lengte van de vlam. Desondanks wordt

aangeraden het vlamfront met videobeelden vast te leggen om achteraf de hoek van het vlamfront en eventuele bijzonderheden bij de meetopstelling te kunnen controleren.

De stokjes met vegetatie uit het brandvak waren ter hoogte van de meetpalen geplaatst, maar de exacte afstanden waren niet goed genoeg vastgelegd om achteraf de werkelijke afstanden tot het vlamfront uit te kunnen rekenen. De stokjes met vegetatie waren vooral bedoeld om visueel een eventuele ontbranding van de vegetatie waar te kunnen nemen en daarmee de resultaten van het rekenmodel te kunnen controleren. Bij nieuwe experimenten kan overwogen worden om wederom stokjes met vegetatie uit het brandvak te plaatsen. Het is dan wel noodzakelijk om de afstanden vast te leggen ten opzichte van de meetpalen, zodat achteraf de werkelijke afstanden tot het vlamfront kunnen worden berekend.

Het doel van het rekenmodel is dat er onderbouwde vuistregels mee kunnen worden opgesteld voor het bestrijden van ontwikkelende natuurbranden. Daarvoor moet het rekenmodel eerst gevalideerd worden. Het is echter onduidelijk wanneer de validatie van het rekenmodel is afgerond en of het rekenmodel correcte voorspellingen doet over de kans op brandoverslag. Mogelijk komt hier meer duidelijkheid over als er meerdere praktijkexperimenten en simulaties bij beheerbranden zijn uitgevoerd. Dit onderzoek heeft een aanzet gegeven voor de wijze waarop invoerparameters en uitvoerparameters van het rekenmodel kunnen worden gemeten bij praktijkexperimenten.

Een andere mogelijkheid om het rekenmodel te valideren, is door te kijken naar verschillende factoren, die afzonderlijk kunnen worden gevalideerd door kleinschalige experimenten. Dit kan bijvoorbeeld door te meten hoelang het duurt voordat een smalle strook vegetatie is opgebrand, of door de vangcapaciteit van vocht door de vegetatie te bepalen door te meten hoeveel water er blijft liggen na het maken van een natte stoplijn en hoelang het duurt voordat dit verdampt is.

Op basis van het bovenstaande kunnen in de toekomst de volgende stappen worden genomen:

- > Herhaling van het praktijkexperiment bij beheerbranden met verschillende vegetatietypen en weersomstandigheden.
- > De waardes voor vegetatietype H3 (Oude Heide) in de *Brandstofmodellengids* (Tanck & Brouwer, 2023) opnieuw analyseren en vervolgens de simulatieberekeningen met het rekenmodel opnieuw uitvoeren met de gecorrigeerde waardes voor H3.
- > De rekenregels voor een padbreedte van 0 m analyseren om te achterhalen waar de hogere waardes voor een padbreedte van 0 m door worden veroorzaakt.

Literatuurlijst

- Abbas, M. R., Bin Rasib, A. W., Abbas, T. R., Ahmad, B. Bin, & Dutsenwai, H. S. (2021). Assessment of Aerodynamic Roughness Length Using Remotely Sensed Land Cover Features and MODIS. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 722(1), 012015. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/722/1/012015>
- Barthelmie, R., Badger, J., Pryor, S., Hasager, C., Christiansen, M., & Jørgensen, B. (2007). Offshore Coastal Wind Speed Gradients: Issues for the Design and Development of Large Offshore Windfarms. *Wind Engineering*, 31(6), 369–382. <https://doi.org/10.1260/030952407784079762>
- BehavePlus Fire Modeling System* (6.0.0). (2018). USFS, RMRS, Fires Sciences Laboratory.
- Brouwer, N., Kok, E., Slakhorst, J., & Vogel, T. (2018). *Informatiegids: brandstofmodellen/vegetatietypen*. Instituut Fysieke Veiligheid.
- Byram, G. M. (1959). Combustion of forest fuels. In K. P. Davis (Red.), *Forest fire: control and use* (pp. 61–89). McGraw-Hill.
- Dam, J. (2019). *GBO-SO NBB deelproject "Vuistregels" Deel 1*. Nederlands Instituut Publieke Veiligheid.
- Fan, J., Oestergaard, K. T., Guyot, A., & Lockington, D. A. (2014). Measuring and modeling rainfall interception losses by a native Banksia woodland and an exotic pine plantation in subtropical coastal Australia. *Journal of Hydrology*, 515, 156–165. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.066>
- Finney, M. A. (2004). *FARSITE: Fire Area Simulator - Model Development and Evaluation, Research Paper RMRS-RP-4 Revised*. Rocky Mountain Research Station.
- Jian, S., Zhang, X., Li, D., Wang, D., Wu, Z., & Hu, C. (2018). The effects of stemflow on redistributing precipitation and infiltration around shrubs. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 66(1), 79–86. <https://doi.org/10.1515/johh-2017-0043>
- LabVIEW* (LabVIEW Service Pack 1 (SP1)). (2018). National Instruments.
- Lemaire, A. D., & Van Mierlo, R. J. M. (2014). *Onderzoek benodigde hoeveelheid bluswater voor natuurbrandbestrijding: eindrapport*. Efectis Nederland.
- Linn, R. R., Hiers, J. K., O'Brien, J. J., Yedinak, K., Hoffman, C., Canfield, J., Robinson, D., & Goodrick, S. (2025). Wildland fire entrainment: The missing link between wildland fire and its environment. *PNAS Nexus*, 4(1), 1–10. <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgae576>
- Modest, M. F. (1991). *Radiative Heat Transfer*. McGraw-Hill.
- Rothermel, R. C. (1972). *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels, Research Paper INT-115*. USDA Forest Service.
- Silva, J., Ribeiro, C., Guedes, R., Rua, M. C., & Ulrich, F. (2007). Roughness length classification of Corine Land Cover classes. *Proceedings of the European wind energy conference*, 710, 110.
- Tanck, I., & Brouwer, N. (2023). *Brandstofmodellengids*. Nederlands Instituut Publieke Veiligheid.
- Ufoegbune, G. C., Ogunyemi, O., Eruola, A. O., & Awomeso, J. A. (2010). Variation of interception loss with different plant species at the University of Agriculture, Abeokuta, Nigeria. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 4(12), 831–844.
- Verkaik, J. W. (2006). *On wind and roughness over land*. Wageningen University and Research.
- Wang, Y., Li, M., Hui, X., Meng, Y., & Yan, H. (2020). Alfalfa canopy water interception under low-pressure sprinklers. *Agricultural Water Management*, 230. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105919>
- Yan, T., Wang, Z., Liao, C., Xu, W., & Wan, L. (2021). Effects of the morphological characteristics of plants on rainfall interception and kinetic energy. *Journal of Hydrology*, 592. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125807>

Bijlage 1 Beschrijving rekenmodel (natte) stoplijnen

Achtergrond

Efectis heeft het model SurFire ontwikkeld waarmee gerekend kan worden aan stoplijnen (Lemaire & Van Mierlo, 2014). De basis van SurFire is het model van Rothermel (1972), dat rekent met een brandverspreidingssnelheid. De rekenregels uit het model van Rothermel zijn aangepast, zodat gerekend kan worden aan de brandoverslag bij een pad.

Het rekenmodel (natte) stoplijnen is nagebouwd op basis van het model SurFire. Er zijn aanpassingen gedaan waar nodig. Zo zijn bijvoorbeeld de Nederlandse brandstofmodellen (Brouwer et al., 2018) gebruikt. Deze waren nog niet beschikbaar op het moment dat SurFire gemaakt werd door Efectis.

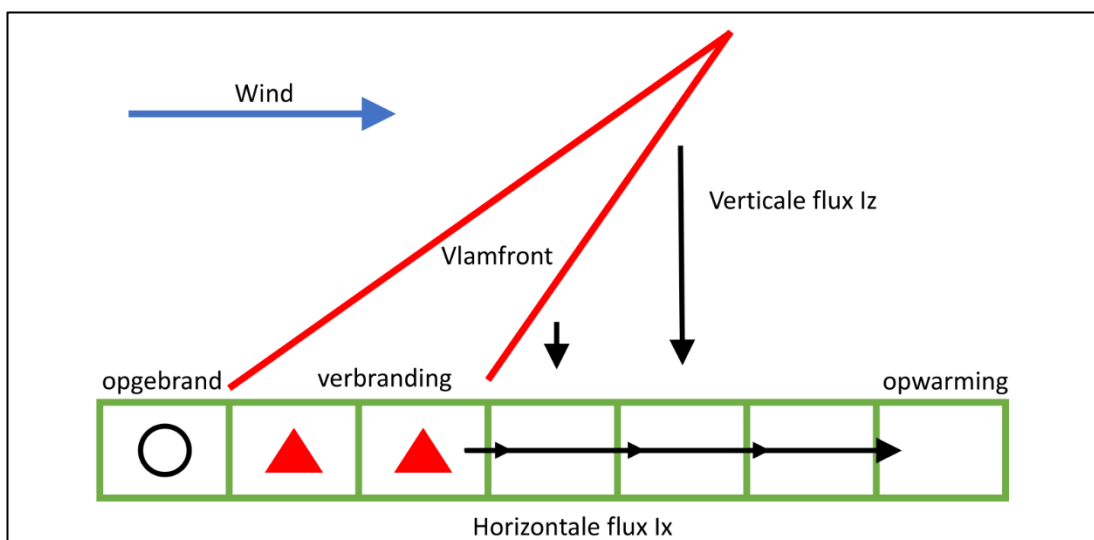
Werking

Het rekenmodel heeft voor elk vegetatietype en voor elke windsnelheid een kalibratie nodig voordat een simulatieberekening kan worden uitgevoerd. Bij de kalibratieberekening wordt gebruikgemaakt van de berekende brandvoortplantingssnelheid van het natuurbrand-simulatieprogramma BehavePlus.

Het rekenmodel rekent enkel aan loopvuur en houdt geen rekening met vliegvuur. Er wordt uitgegaan van loopvuur bij een natuurbrand dat zich in één richting voortplant, loodrecht op een oneindig breed vlamfront. Het rekenmodel bestaat uit een brandstofbed (vegetatie met lucht) en verdeelt dit in cellen met een gegeven lengte en hoogte. Het rekenmodel start met een vlamfront, dat horizontale warmteflux en, afhankelijk van de wind, verticale warmteflux produceert (zie Figuur B1.1). Alle overige cellen nemen (een deel van) de energie op die door het vlamfront geproduceerd wordt. Als een cel voldoende is opgewarmd, 'ontbrandt' deze en zal zelf ook energie gaan produceren. Het vlamfront verplaatst zich met een bepaalde voortplantingssnelheid (bepaald in BehavePlus). Deze snelheid bepaalt hoe snel het vlamfront aan de achterkant uitbrandt. De cellen doorlopen dus achtereenvolgens de volgende toestanden: opwarming → verbranding → uitbranding. Zonder maatregelen ontstaat er een stabiele branduitbreiding waarbij het vlamfront net zo snel uitbreidt als de achterkant opbrandt.

Het verloop van opwarming en verbranding kan voor elke cel anders zijn. Dit is onder andere afhankelijk van de vochtigheid, wind en afstand tot het vlamfront, en wordt per cel en per tijdstap bepaald. Om de voortplanting van de brand te stoppen, wordt een pad gesimuleerd dat zich parallel aan het vlamfront bevindt. In het rekenmodel wordt alleen de achterzijde van het pad nat gemaakt. In het rekenmodel wordt voor een aantal cellen gelijk aan de padbreedte de aanwezige brandstof op 0 gezet en wordt voor een aantal cellen achter het pad het watergehalte verhoogd. Dit water moet eerst in zijn geheel verdampen voordat de cel tot ontbranding kan komen. Een hoger watergehalte zorgt voor een hogere

ontstekingsenergie; de cel blijft dan langer opwarmen. Bij bepaalde padbreedtes en vochtigheid zal de cel direct achter het pad niet meer gaan branden en is de brand volgens het model tegengehouden.



Figuur B1.1 Schematische weergave van het rekenmodel

De simulatie doorloopt een aantal stappen in volgorde. Alle cellen worden doorgerekend binnen één tijdstap. Elke cel bevindt zich in een van de drie toestanden (opwarming, verbranding, uitbranding). Binnen één tijdstap kan een cel overgaan naar een andere toestand.

Opwarming

Van de cellen in de opwarming wordt berekend hoeveel energie er per tijdstap wordt opgenomen. Dit is onder andere afhankelijk van de energie die de brand afgeeft, de grootte van de cel, het type brandstof (vegetatie), het watergehalte, de huidige temperatuur van de cel, de afstand van het vlamfront en de wind.

Verbranding

Indien binnen een tijdstap de opgenomen energie van de cel (E_{abs}) voor een gegeven cel groter of gelijk is dan de ontstekingsenergie (E_{ign}), gaat de cel van opwarmen over naar verbranden. Tijdens de verbranding produceert een cel energie en draagt bij aan het vlamfront. De cel neemt dan verder geen energie meer op.

Opgebrand

Per tijdstap wordt de achterkant van het vlamfront bepaald met de voortplantingssnelheid R uit BehavePlus. Indien de achterkant van het vlamfront voorbij een cel gaat die aan het verbranden is, zal deze uitgebrand raken en niet meer bijdragen aan het vlamfront.

Constanten

In het rekenmodel worden de constanten uit Tabel B1.1 en Tabel B1.2 gebruikt.

Tabel B1.1 Simulatieconstanten

Symbol	Betekenis	Omschrijving	Waarde	Eenheid
C_{pF}	Specific heat capacity fuel	Soortelijke warmte droog hout	1.937	kJ/kg/K
ρ_p	Fuel particle density	Dichtheid brandstofdeeltjes	512.6	kg/m ³
H_c	Enthalpy of combustion	Verbrandingsenergie brandstof	18620 ³	kJ/kg
q_{crit}	Critical heat flux	Kritische warmteflux	15	kJ/m ²
τ	Time constant spread	Tijdconstante voortplantingssnelheid	75600 / σ / 100	s ⁻¹

Tabel B1.2 Brandstofconstanten

Symbol	Betekenis	Omschrijving	Waarde	Eenheid
T_{env}	Environmental temperature	Omgevingstemperatuur	20	°C
L_w	Spray length	Lengte brandstofbed dat besproeid wordt	5	m
M_{frac}	Moisture fraction	Waterfractie brandstof	0.5 ³	n.a.

Invoerparameters

Tabel B1.3, Tabel B1.4 en Tabel B1.5 geven de invoerparameters weer. Dit zijn de simulatiespecifieke waarden die in het rekenmodel per simulatie bepaald worden. In Tabel B1.3 staan de invoerparameters uit BehavePlus.

Tabel B1.3 Invoerparameters uit BehavePlus

Symbol	Betekenis	Omschrijving	Eenheid
σ	Surface area to volume ratio	Oppervlakte-volume-verhouding	cm ⁻¹
HRR	Heat release rate/Reaction Intensity	Warmteafgifte van verbranding	kW/m ²
β	Packing ratio	Pakverhouding	n.a.
Q_{ign}	Ignition energy	Ontstekingsenergie per massa	kJ/kg
R_{init}	Initial spread speed	Initiële voortplantingssnelheid	m/s
D_f	Fuel bed depth	Hoogte brandstofbed	m
U_{mid}	Wind speed	Windsnelheid midden van de vlam	m/s
D_c	Combustion depth	Verbrandingsdiepte	m

³ Uit BehavePlus.

Verder heeft het rekenmodel nog geijkte parameters (Tabel B1.4) nodig die de simulatie beschrijven. Op basis van de verbrandingsdiepte D_c wordt een minimale celgrootte bepaald, zodanig dat D_c uit 25 cellen bestaat. De tijdstappen van de simulaties worden zo bepaald dat het vlamfront met maximaal 1 cel per tijdstap opbrandt. De lengte van het brandstofbed is bepaald als 10 keer de verbrandingsdiepte D_c , plus de breedte van een eventueel pad, plus de lengte van het brandstofbed dat besproeid wordt. De simulatieduur is bepaald als 10 keer de verbrandingsdiepte D_c gedeeld door de voortplantingssnelheid R .

De horizontale en verticale warmtefluxcomponenten bevatten een coëfficiënt die als volgt bepaald wordt: voor elk vegetatietype wordt met het rekenmodel een simulatie uitgevoerd zonder pad en zonder opgebracht water, en met windsnelheid 0 m/s. De verticale coëfficiënt is hiermee ook 0. Vervolgens wordt de horizontale coëfficiënt zo aangepast, dat de voortplantingssnelheid in het rekenmodel zo dicht mogelijk in de buurt komt van de voortplantingssnelheid in BehavePlus. Deze horizontale coëfficiënt wordt constant genomen over alle windsnelheden en vervolgens wordt per windsnelheid de verticale coëfficiënt bepaald.

Tabel B1.4 Benodigde geijkte invoerparameters

Symbool	Betekenis	Omschrijving	Eenheid
Δx	Volume cell length	Lengte volume cel	m
Δt	Simulation time step	Tijdstap simulatie	s
T	Simulation duration	Duur simulatie	min
L_f	Fuel length	Lengte brandstofbed	m
g_x	Horizontale coëfficiënt	Horizontale fractiefactor	n.a.
g_z	Verticale coëfficiënt	Verticale fractiefactor	n.a.

Daarnaast heeft het rekenmodel de parameters uit Tabel B1.5 nodig.

Tabel B1.5 Op te geven invoerparameters

Symbool	Betekenis	Omschrijving	Eenheid
L_{path}	Path length	Breedte van het pad	m
spray	Sproeihoeveelheid	Hoeveelheid opgebracht water na het pad	l/m

Berekeningen

Berekeningen per cel in de toestand van opwarming:

- > De opgenomen energie per tijdseenheid van de cel op positie $x + \Delta x$:

$$E_{\text{abs}}(x, t + \Delta t) = E_{\text{abs}}(x, t) + \Delta t \cdot (I_x(x) \cdot D_f + I_z(x) \cdot \Delta x)$$

$$E_{\text{abs}}(x, t + \Delta t) = \text{Opgenomen energie van cel } x \text{ op tijdstip } t + \Delta t \text{ in kJ}$$

$E_{abs}(x,t)$	=	Opgenomen energie van cel x op tijdstip t in kJ
Δt	=	Tijdstap in s
$I_x(x)$	=	Totaal opgenomen horizontale warmteflux van cel x in kW/m ²
D_f	=	Hoogte brandstofbed in m
$I_z(x)$	=	Totaal opgenomen verticale warmteflux van cel x in kW/m ²
Δx	=	Lengte cel in m

- > De opgenomen horizontale warmteflux van de cel aan het vlamfront:

$$I_x(x + \Delta x) = (1 - A(\Delta x)) \cdot I_x(x) + A(\Delta x) \cdot I_{x,self}(x)$$

$I_x(x + \Delta x)$	=	Totaal opgenomen horizontale warmteflux van cel x + Δx in kW/m ²
$A(\Delta x)$	=	Horizontale absorptiefactor over een celgrootte Δx
$I_x(x)$	=	Opgenomen horizontale warmteflux van cel x in kW/m ²
$I_{x,self}(x)$	=	Eigen geproduceerde horizontale warmteflux van cel x in kW/m ²

- > De opgenomen horizontale warmteflux:

$$I_x(x) = F_x \cdot g_x \cdot q_{flame}$$

$I_x(x)$	=	Opgenomen horizontale warmteflux van cel x in kW/m ²
F_x	=	Horizontale zichtfactor
g_x	=	Horizontale fractiefactor
q_{flame}	=	Warmteflux van de vlam in kW/m ²

- > De eigen geproduceerde horizontale warmteflux:

$$I_{x,self}(x) = A(\Delta x) \cdot q_{fuel}(T_x)$$

$I_{x,self}(x)$	=	Eigen geproduceerde horizontale warmteflux van cel x in kW/m ²
$A(\Delta x)$	=	Horizontale absorptiefactor bij een celgrootte Δx
$q_{fuel}(T_x)$	=	Geproduceerde warmteflux van cel x met temperatuur T_x in kW/m ²

- > De opgenomen verticale warmteflux:

$$I_z(x) = A(D_f) \cdot F_z(x) \cdot g_z \cdot q_{flame} - I_{z,self}(x)$$

$I_z(x)$	=	Totaal opgenomen verticale warmteflux van cel x in kW/m ²
$A(D_f)$	=	Verticale absorptiefactor bij een cel hoogte D_f
$F_z(x)$	=	Verticale zichtfactor van cel x
g_z	=	Verticale fractiefactor
q_{flame}	=	Warmteflux van de vlam in kW/m ²
$I_{z,self}(x)$	=	Eigen geproduceerde verticale warmteflux van cel x in kW/m ²

- > De eigen geproduceerde verticale warmteflux:

$$I_{z,self}(x) = A(D_f) \cdot q_{fuel}(T_x)$$

$I_{z,self}(x)$	=	Eigen geproduceerde verticale warmteflux van cel x in kW/m ²
$A(D_f)$	=	Verticale absorptiefactor bij een cel hoogte D_f
$q_{fuel}(T_x)$	=	Geproduceerde warmteflux van cel x met temperatuur T_x in kW/m ²

- > De eigen geproduceerde warmteflux bij een temperatuur T:

$$q_f(T_f) = q_{crit} \cdot ((T_f + T_0)^4 - (T_{env} + T_0)^4) / ((T_{ign} + T_0)^4 - (T_{env} + T_0)^4)$$

$q_f(T_f)$	=	Warmteflux van een cel bij temperatuur T in °C
q_{crit}	=	Kritische warmteflux in kW/m ²
T_f	=	Temperatuur van de cel in °C
T_0	=	Nulpunt Celsius in °C
T_{env}	=	Omgevingstemperatuur in °C
T_{ign}	=	Ontbrandingstemperatuur in °C

> De ontbrandingstemperatuur:

$$T_{ign} = (Q_{ign} - (C_{pF} + M_f \cdot C_{pW}) \cdot (T_{boil} - T_{env}) - M_f \cdot H_w) / C_{pF} + T_{boil}$$

T_{ign}	=	Ontbrandingstemperatuur in °C
Q_{ign}	=	Ontstekingsenergie per massa in kJ/kg/(m)
C_{pF}	=	Soortelijke warmte droog hout in kJ/kg/°C
M_f	=	Vochtgehalte ten gevolge van vocht in brandstof
C_{pW}	=	Soortelijke warmte water in kJ/kg/°C
T_{boil}	=	Kookpunt water in °C
T_{env}	=	Omgevingstemperatuur in °C
H_w	=	Verdampingsenergie water in kJ/kg

Berekeningen per cel tijdens de verbranding:

> De warmteflux van de vlam:

$$q_{flame} = HRR \cdot D_c / (D_c + 2 \cdot L_{flame})$$

q_{flame}	=	Warmteflux van de vlam in kW/m ²
HRR	=	Warmteafgifte van verbranding in kW/m ²
D_c	=	Verbrandingsdiepte in m
L_{flame}	=	Lengte van de vlam in m

> De diepte van de verbrandingszone:

$$D_c = \sum_{i=0}^{burning} \Delta x$$

D_c	=	Diepte van verbranding in m
$\sum_{burning}$	=	Het aantal cellen in verbranding
Δx	=	Lengte cel in m

> De lengte van de vlam (Byram, 1959):

$$L_{flame} = 0.0775 \cdot (HRR \cdot D_c)^{0.46}$$

L_{flame}	=	Lengte van de vlam in m
HRR	=	Warmteafgifte van verbranding in kW/m ²
D_c	=	Verbrandingsdiepte in m

> De afbuigingshoek van de vlam (deze wordt gebruikt bij de verticale zichtfactor Fz):

$$\theta = \cos^{-1}((-b + (b^2 + 4)^{0.5}) / 2)$$

$$\text{Met } b = 0.15 \cdot U_{mid}^2 / L_{flame}$$

θ	=	Afbuigingshoek vlam in het midden van de cel in rad
U_{mid}	=	Windsnelheid ter hoogte van het midden van de vlam in m/s

L_{flame} = Vlamlengte in m

Overige berekeningen:

- > Opwarmingsfactor. Dit is de massafractie die opgewarmd moet worden om de brandstof in de volumecel te ontsteken:

$$\varepsilon = e^{-138/30.48\sigma}$$

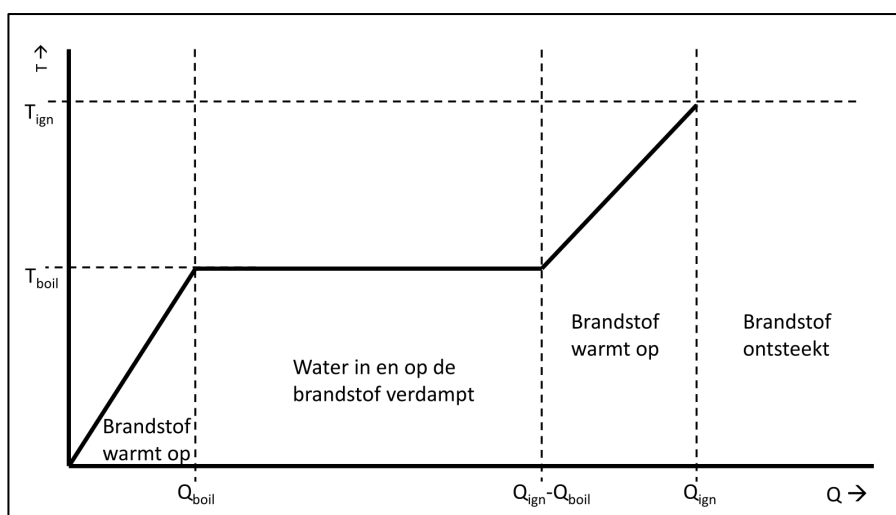
ε = Opwarmingsfactor
 σ = Oppervlaktevolume verhouding in cm^{-1}
 138 = Correctiefactor Rothermel in ft^{-1}

- > Absorptiefactor. Dit is de fractie energie die wordt opgenomen over een lengte x. Deze wordt gebruikt in horizontale richting (waarbij x de lengte van de cel is) en verticale richting (waarbij x de hoogte van het brandstofbed is):

$$A(x) = 1 - \exp(-\beta \cdot x \cdot \sigma / 4)$$

A = Absorptiefactor
 β = Pakverhouding
 σ = Oppervlakte/volume verhouding in m^{-1}
 x = Lengte in m

- > Temperatuuroptename. Dit is de toename in temperatuur die in een cel ontstaat als gevolg van opgenomen energie. De opgenomen energie wordt bepaald door drie formules. Zolang de temperatuur van de cel onder de 100 °C is, zal de brandstof inclusief water opwarmen. Als de temperatuur van de cel boven de 100 °C komt, zal het water gaan verdampen. De brandstof warmt dan niet meer op. Als al het water verdampt is, zal de brandstof verder opwarmen totdat hij ontsteekt. Er zijn dus drie formules voor de temperatuur van cel T, met drie toepassingsgebieden (Figuur B1.3).



Figuur B1.3 Opgenomen energie van de cel

Voor $Q < Q_{\text{boil}}$:

$$T_f = Q / (C_{pF} + (M_f + M_w) \cdot C_{pW}) + T_{\text{env}}$$

Voor $Q \geq Q_{\text{boil}}$ en $Q < Q_{\text{ign}} - Q_{\text{boil}}$:

$$T_f = Q_{\text{boil}} / (C_{pF} + (M_f + M_w) \cdot C_{pW})$$

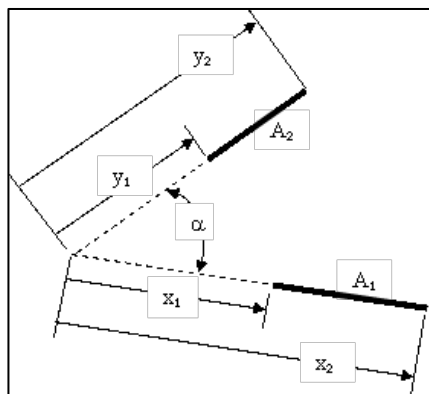
Voor $Q \geq Q_{\text{ign}} - Q_{\text{boil}}$ en $Q < Q_{\text{ign}}$:

$$T_f = (Q - Q_{\text{boil}} - (M_f + M_w) \cdot H_w) / C_{pF} + T_{\text{boil}}$$

T_f	=	Temperatuur van de cel in °C
Q	=	Opgenomen energie door de cel per massa in kJ/kg
C_{pF}	=	Soortelijke warmte droog hout in kJ/kg/°C
M_f	=	Vochtgehalte ten gevolge van vocht in brandstof
M_w	=	Vochtgehalte ten gevolge van vocht op brandstof
C_{pW}	=	Soortelijke warmte water in kJ/kg/°C
T_{env}	=	Omgevingstemperatuur in °C
T_{boil}	=	Kookpunt water in °C
H_w	=	Verdampingsenergie water in kJ/kg
T_{ign}	=	Ontstekingstemperatuur brandstof in °C
Q_{boil}	=	Opgenomen energie per massa bij T_{boil} in kJ/kg
Q_{ign}	=	Opgenomen energie per massa bij T_{ign} (ontstekingsenergie) in kJ/kg

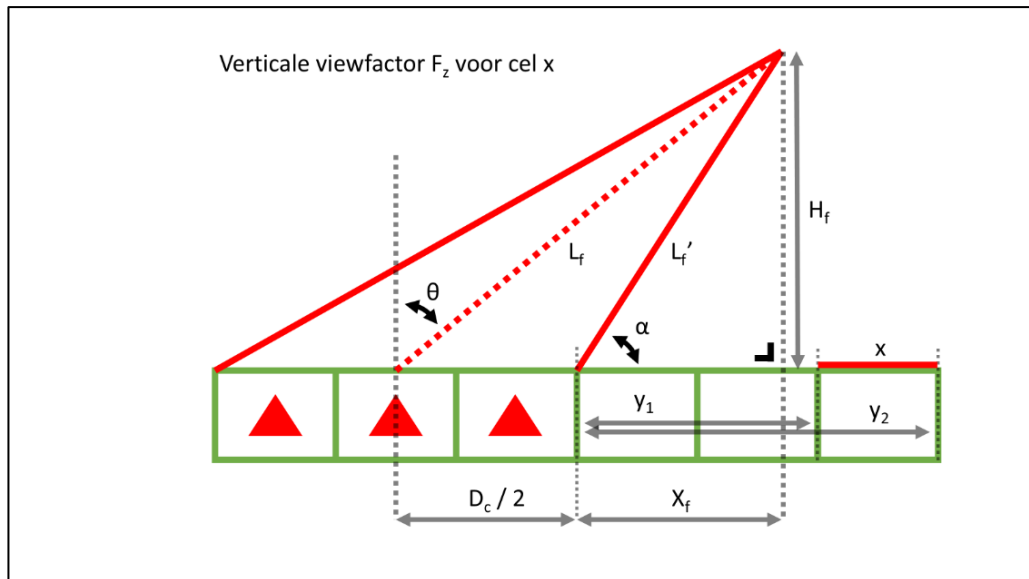
- > De zichtfactor. Dit is de fractie warmteflux die ontvangen wordt door elke cel. De horizontale zichtfactor is alleen van belang bij het pad. Anders is deze 1. De verticale zichtfactor is wel overal van belang volgens de formules van Modest (1991) (Figuur B1.4):

$$F_{\text{view}}(x_1, x_2, y_1, y_2, \alpha) = \frac{\sqrt{x_1^2 - 2x_1y_2 \cos(\alpha) + y_2^2} + \sqrt{x_2^2 - 2x_2y_1 \cos(\alpha) + y_1^2} - \sqrt{x_2^2 - 2x_2y_2 \cos(\alpha) + y_2^2} - \sqrt{x_1^2 - 2x_1y_1 \cos(\alpha) + y_1^2}}{2(x_2 - x_1)}$$



Figuur B1.4 Weergave verticale zichtfactor

In Figuur B1.5 staat de schematische weergave van de zichtfactorberekening in het rekenmodel.



Figuur B1.5 Schematische weergave van het rekenmodel en de berekening van de verticale zichtfactor voor cel x

Hierbij is x_1 (uit Figuur B1.4) altijd 0, x_2 (uit Figuur B1.4) is de vlamlengte ter plaatse van het vlamfront L_f' , y_1 is de afstand van het vlamfront tot de cel, y_2 is $y_1 + x$ en α is de hoek van de vlam ter plaatse van het vlamfront met de horizon.

De hoek α wordt als volgt bepaald:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{H_f}{X_f} \right)$$

Hierin is H_f de geprojecteerde hoogte van de vlam op de horizon en X_f de lengte van de projectie.

De geprojecteerde hoogte wordt bepaald via:

$$H_f = L_f \cdot \sin \left(\frac{1}{2} \pi - \theta \right) = L_f \cdot \cos(\theta)$$

Hierin is L_f de vlamlengte in het midden van het vlamfront en θ de hoek van de vlamlengte in het midden van het vlamfront met de normaal.

De geprojecteerde lengte wordt bepaald via:

$$X_f = L_f \cdot \cos \left(\frac{1}{2} \pi - \theta \right) - \frac{1}{2} D_c = L_f \cdot \sin(\theta) - \frac{1}{2} D_c$$

Hierin is L_f de vlamlengte in het midden van het vlamfront, θ de hoek van de vlamlengte in het midden van het vlamfront met de normaal en D_c de verbrandingsdiepte (lengte) van het vlamfront.

De vlamlengte ter plaatse van het vlamfront kan dan bepaald worden via:

$$L_f' = \sqrt{H_f^2 + X_f^2}$$

De afstand tot het vlamfront y_1 wordt bepaald als de index van de huidige cel min de index van de laatste cel in de verbrandingszone (het vlamfront) vermenigvuldigd met celgrootte x .

Uitvoerparameters

Uit het rekenmodel worden in ieder geval de parameters in Tabel B1.6 gegenereerd, waarmee een verdere analyse uitgevoerd kan worden.

Tabel B1.6 Uitvoerparameters

Parameter	Omschrijving
Maximale temperatuur na pad	De maximale temperatuur die de cel direct na het pad bereikt. Wanneer er geen pad is (padbreedte = 0 m), dan wordt de temperatuur genomen van $2,2 \times D_c$.
Maximaal percentage geabsorbeerde energie	Dit is de maximale energie die de cel direct na het pad geabsorbeerd heeft als percentage van de ontstekingsenergie (E_{ign}). Als de cel ontbrandt, is dit 100 %. Wanneer er geen pad is (padbreedte = 0 m), dan wordt de temperatuur genomen van $2,2 \times D_c$.
Percentage inbranden stoplijn	Dit is de lengte van alle cellen in verbranding die onderdeel zijn van de stoplijn als percentage van de totale lengte van de stoplijn (hier altijd 5 m). Als er geen water is opgebracht, is dit percentage altijd 0 %.
Vlamlengte L_{flame}	Dit is de vlamlengte van het vlamfront (constant over één simulatie).
Afbuigingshoek θ	Dit is de afbuigingshoek van het vlamfront, omgerekend naar een hoek met de horizon, zodat deze bij windstilte 90 graden is.
Totaal ontvangen warmteflux	Dit is de totale hoeveelheid warmte die door straling, convectie en geleiding naar de vegetatie direct achter de stoplijn stroomt. In het model is dit de som van de horizontaal en verticaal ontvangen warmteflux.

Bijlage 2 Methode omrekenen windsnelheid

De windsnelheid bij het lokale weerstation wordt gemeten op 2 meter hoogte. Het rekenmodel dat voor dit onderzoek wordt gebruikt, voert de berekeningen echter uit aan de hand van de windsnelheid op 10 meter hoogte. Daarom moet de gemeten windsnelheid worden omgezet naar een geschatte windsnelheid voor 10 meter hoogte. Het is niet waarschijnlijk dat deze snelheid dezelfde is als die op 2 meter hoogte, aangezien de remmende invloed van de ruwheid van het oppervlak tussen deze twee hoogtes verschilt. Er wordt daarom aangenomen dat er sprake is van een logaritmisch windprofiel, dat in de meteorologie met regelmaat wordt gebruikt om de verandering van de wind met de hoogte te omschrijven (Barthelmie et al., 2007). Vergelijking B2.1 toont de relatie tussen twee windsnelheden op verschillende hoogten volgens een logaritmisch windprofiel.

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{\ln(z_2/z_0)}{\ln(z_1/z_0)}$$

Vergelijking B2.1 Relatie tussen twee windsnelheden op verschillende hoogten

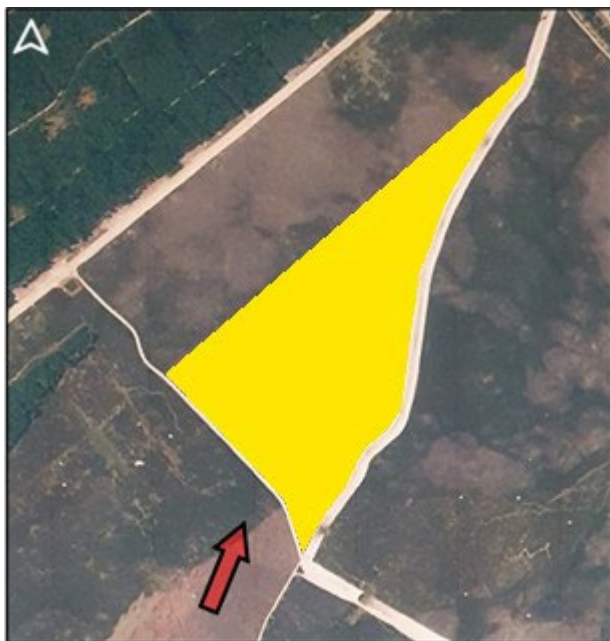
Om een windsnelheid voor een bepaalde hoogte te bepalen (U_2), is het nodig om de windsnelheid op een lagere hoogte (U_1) te weten. Daarnaast is er een waarde nodig voor z_0 , de 'roughness length'. Dit is een parameter die afhankelijk is van het type vegetatie waar de wind overheen waait en die rekening houdt met de ruwheid van het oppervlak en het effect daarvan op de wind. Voor het heidegebied op het ASK-terrein is een waarde gekozen van 0,03. Deze waarde wordt namelijk gebruikt voor heidegebieden in de wetenschappelijke literatuur van het KNMI en in andere onderzoeken (Abbas et al., 2021; Silva et al., 2007; Verkaik, 2006). Dit betekent, dat vergelijking B2.2 gebruikt wordt om de windsnelheid op 10 meter te berekenen:

$$U_{10m} = U_{2m} \times \frac{\ln(10/0,03)}{\ln(2/0,03)}$$

Vergelijking B2.2 Berekening voor de windsnelheid op 10 meter hoogte

Bijlage 3 Brandvak

In Figuur B3.1 is op een plattegrond met gele arcering het brandvak van het praktijk-experiment aangegeven. Het brandvak is rechts en linksonder omgeven door brede zandpaden. Met behulp van een gemaakte stoplijn is ervoor gezorgd dat de brand niet kon overslaan naar het naastgelegen brandvak (linksboven van de arcering). Het gehele brandvak had een oppervlakte van ongeveer 7 ha. De rode pijl in Figuur B3.1 geeft de meest voorkomende windrichting aan op het moment van de beheerbrand.

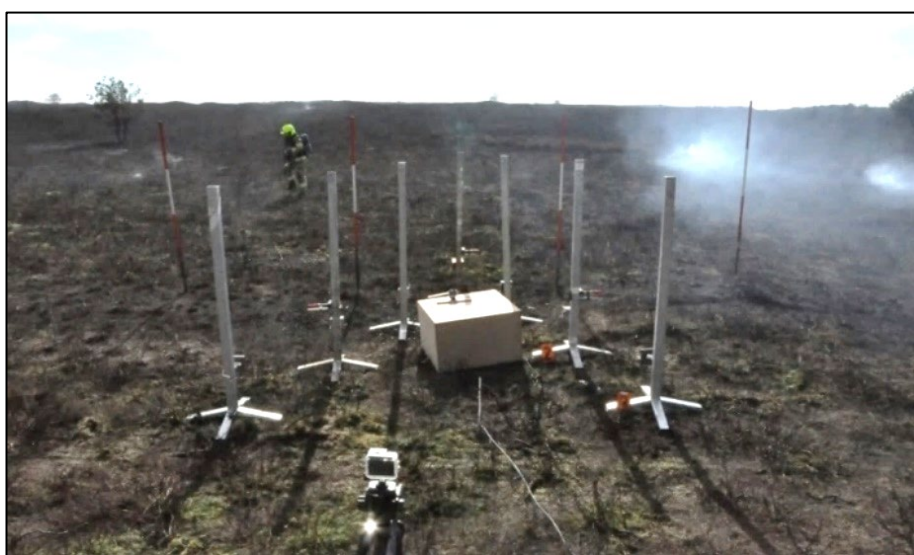


Figuur B3.1 Brandvak van het praktijkexperiment

Doordat de wind vanuit deze richting kwam, kon de meetopstelling enkel in het brandvak geplaatst worden, zodat de beheerbrand recht op de meetopstelling af kon komen. Daarom is een stuk van ongeveer 10 bij 10 meter weggebrand voor de meetopstelling, zodanig dat de kans het grootst was dat de vlamfront loodrecht op de meetopstelling af zou komen en dat het brandvak voor de meetopstelling zo min mogelijk hoogteverschillen had. Daarnaast is er gekeken naar de vegetatie die voor het weggebrande stuk stond. Van belang hierbij was dat de vegetatie overeenkwam met een vegetatietype uit de *Brandstofmodellengids* (Tanck & Brouwer, 2023). De dichtheid en de hoogte van de vegetatie die voor het weggebrande stuk stond, waren uniform en kwamen overeen met vegetatietype Oude Heide (H3). Er stonden geen vliegdennen voor het weggebrande stuk.

Bijlage 4 Meetopstelling en specificaties meetapparatuur

De meetopstelling bestond onder andere uit zeven meetpalen, waarop elk twee thermokoppels waren bevestigd op 50 cm hoogte. De thermokoppels hingen vrij in de lucht en staken 1,5 cm uit. Op deze manier werd de meting door de thermokoppels zo min mogelijk beïnvloed door temperaturen van objecten in de omgeving, zodat alleen de invloed van de brand werd gemeten. In Figuur B4.1 is het achteraanzicht van een deel van de meetopstelling te zien. De foto is genomen, nadat de beheerbrand de opstelling was gepasseerd. Om de signaalkabels en voedingskabels te beschermen tegen beschadigingen, zijn deze onder een kist gelegd.



Figuur B4.1 Achteraanzicht van een deel van de meetopstelling

Videocamera's

Om in kaart te brengen hoe het vlamfront zich verspreidde, is er beeldmateriaal verzameld. Op diverse locaties zijn hiervoor videocamera's geplaatst die gedurende de testen opnames maakten. Alle camera's hebben beelden opgeslagen op micro-SD-kaartjes. Er is gekozen voor twee soorten camera's:

- > FireCam (SpectraCam, 4k, 5 MP, beeldhoek 150 graden): deze camera is gebruikt dicht bij de vuurhaard, omdat ze (kortstondig) temperaturen tot ruim 400 °C kan weerstaan.
- > Actioncam (Strex, 4k, 16 MP, beeldhoek 170 graden): deze camera is stof- en waterbestendig en is gebruikt op alle overige locaties.

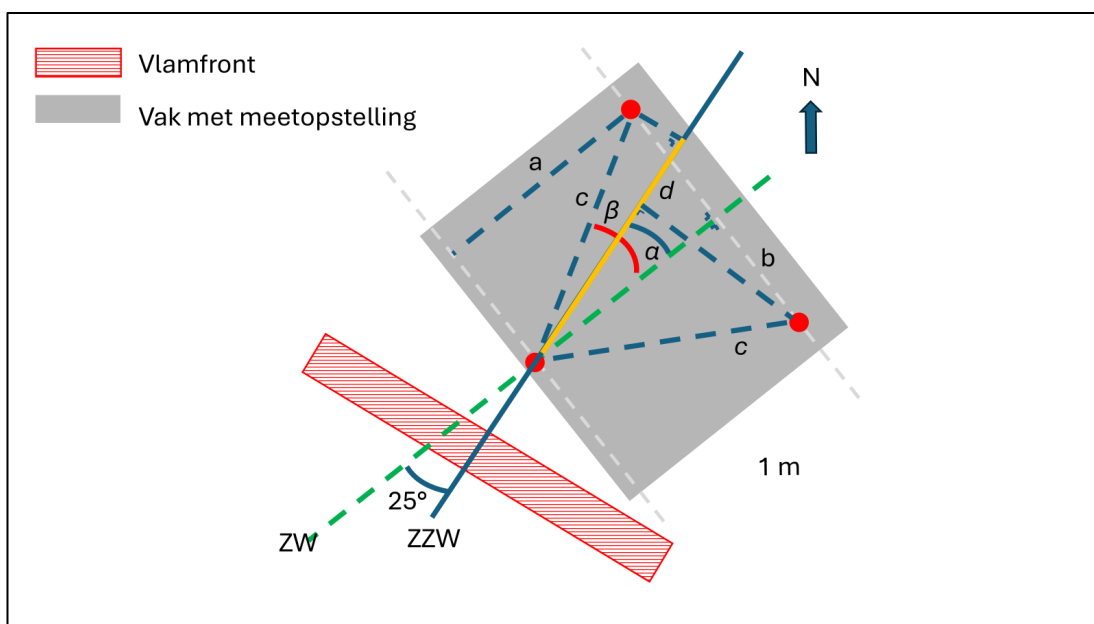
Thermokoppels

Voor het praktijkexperiment zijn type K thermokoppels gebruikt met een temperatuurbereik tot 1100 °C en een responstijd van 0,06 tot 1,8 s.

Bijlage 5 Correctieberekening hoek vlamfront

De meetopstelling is parallel aan de stoplijn georiënteerd. Het vlamfront kwam echter niet loodrecht op de meetopstelling af. Om de resultaten van de meetopstelling te kunnen vergelijken met de resultaten van de simulatieberekeningen, is er een correctie nodig voor de hoek die het vlamfront heeft gemaakt ten opzichte van de meetpalen. Met de correctie kan berekend worden wat de afstanden van de meetpalen tot het vlamfront zijn geweest op het moment dat het vlamfront de centrale meetpaal (0 m) bereikte.

Op basis van de gemeten maximum temperaturen en de videobeelden is bepaald dat het vlamfront als eerste de centrale meetpaal (0 m) bereikte en als tweede de linker paal op 1 m. Hieruit is geconcludeerd dat het vlamfront vanuit een zuidzuidwest-richting de opstelling heeft bereikt. Dit wordt ondersteund door de hogere temperaturen die aan de zuidkant van de opstelling zijn gemeten. De meetpalen vanaf 1 m staan onder een hoek van ongeveer 26 graden met de middenlijn van de opstelling. Het feit dat het vlamfront de centrale meetpaal het eerst bereikte, betekent dat de windrichting tussen de 225 en 199 graden lag. Op basis van de videobeelden en de meest voorkomende windrichting in het gebied is de windrichting voor de correctieberekening bepaald op 200 graden. Figuur B5.1 toont een globale schets van de richting van het vlamfront ten opzichte van de meetopstelling (de meetpalen op 2 en 3 m zijn niet weergegeven).



Figuur B5.1 Schets van de richting van het vlamfront ten opzichte van de meetopstelling

Op basis van de bekende afstanden tussen de palen en de hoeken kon met de volgende formule bepaald worden wat de werkelijke afstand (d) van de meetpalen tot het vlamfront was op het moment dat het vlamfront de centrale meetpaal op 0 m bereikte:

$$d = c \cdot \cos(\gamma)$$

$$d = \sqrt{a^2 + b^2} \cdot \cos(\gamma)$$

Met:

$$\gamma = \beta - \alpha \text{ (links)}$$

$$\gamma = \beta + \alpha \text{ (rechts)}$$

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right)$$

$$\alpha = 225 \text{ graden} - 200 \text{ graden} = 25 \text{ graden}$$

a = afstand tot stoplijn

b = afstand tot middellijn

Dit levert voor iedere meetpaal een afstand tot het vlamfront op. Deze waarden zijn vervolgens gebruikt als padbreedte in de simulaties.

Tabel B5.1 Toegepaste padbreedtes in de simulaties

Positie	Afstand tot stoplijn (m)	Afstand tot middellijn (m)	Werkelijke afstand tot vlamfront (m)
Links	1,0	0,5	0,7
Rechts	1,0	0,5	1,1
Links	2,0	1,0	1,4
Rechts	2,0	1,0	2,2
Links	3,0	1,5	2,1
Rechts	3,0	1,5	3,4