

KWR 2018.120 | November 2018

Water en Vuur: hydrologische voorspellingen voor de beheersing van natuurbranden

Een vochtmodule voor het simuleren van de
droogtegraad van de vegetatie

Water en Vuur: hydrologische voorspellingen voor de beheersing van natuurbranden

Een vochtmodule voor het simuleren van de droogtegraad van de vegetatie

KWR 2018.120 | November 2018

Opdrachtnummer

401371/001

Projectmanager

Jan Willem Kooiman

Samenwerkingspartners

Instituut Fysieke Veiligheid (IFV), Efectis, Geodan, Vitens, Waterschap Vallei en Veluwe, Provincie Gelderland en Het Nationale Park De Hoge Veluwe

Kwaliteitsborger

Jan-Philip M. Witte

Auteurs

Bernard R. Voortman, Yuki Fujita, Jan-Philip M. Witte, Nienke Brouwer, Tom van Tilburg en Tony Lemaire

Verzonden aan

IFV, Geodan, Efectis, Waterschap Vallei en Veluwe, Vitens & Provincie Gelderland

Deze activiteit is mede gefinancierd met PPS-financiering uit de Toeslag voor Topconsortia voor Kennis en Innovatie (TKI's) van het ministerie van Economische Zaken en Klimaat en de resultaten zijn openbaar.

Jaar van publicatie

2018

Meer informatie

Jan Willem Kooiman

T 0306069683

E jan.willem.kooiman@KWRwater.nl

Postbus 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511

F +31 (0)30 60 61 165

E info@kwrwater.nl

I www.kwrwater.nl



KWR

KWR 2018.120 | November 2018 © KWR

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Samenvatting

Het risico op en de verspreiding van natuurbranden zijn sterk afhankelijk van de waterhuishouding. De brandbaarheid van planten wordt namelijk mede bepaald door de beschikbaarheid van water. Hoe droger de bodem, hoe droger de plant, en dus des te sneller vuur zich verspreidt en de kans op een onbeheersbare brand. Door een veranderend klimaat nemen de frequentie en intensiteit van droge periodes toe. Eén van de gevolgen hiervan is een toename van de kans op natuurbranden. Tijdige signalering van brandgevaar kan mensenlevens redden en schade aan de natuur, gebouwen en de infrastructuur voorkomen.

De brandweer gebruikt een systeem (het zogenaamde natuurbrandverspreidingsmodel, NBVM) om tijdens een brand en voor risicobeheersing te voorspellen hoe snel het vuur zich verspreidt. Door recente wetenschappelijke inzichten in het verdampingsgedrag van natuurlijke vegetaties kan dit systeem aanzienlijk worden verbeterd. Met de huidige stand van kennis is het mogelijk om de beschikbaarheid van water van brandgevaarlijke locaties te voorspellen en daarmee een inschatting te maken van de droogtegraad van de vegetatie, die bepalend is voor de brandbaarheid. Door het NBVM te voeden met deze hydrologische informatie kan de betrouwbaarheid ervan worden verhoogd.

In dit rapport beschrijven we de module om vochtgehalten in de vegetatie te voorspellen. Door het NBVM met deze informatie te verbeteren, wordt het handelingsperspectief van de brandweer verfijnd en kan de brandweer beter optreden tijdens een natuurbrand. Tevens kan de module voor het simuleren van de droogtegraad worden gebruikt om te indexeren hoe droog en dus hoe brandgevaarlijk een bepaald gebied is.

Op basis van veldmetingen van vochtgehalten in heide en pijpenstrootje is de module opgebouwd. De metingen kunnen we goed nabootsen met eenvoudige curves die het jaarlijkse verloop in vochtgehalte beschrijven. Zodra een droge periode zich voordoet, en vochttekort optreedt, gaat het vochtgehalte afwijken van deze curves. Deze benadering is adequaat om de droogtegraad te voorspellen. Eventueel kan de methode worden verbeterd door de dynamiek in droge stof van bovengrondse planten toe te voegen.

Samen met het Instituut Fysieke Veiligheid (IFV), Geodan en Efectis is de technische opbouw van het systeem afgestemd en zijn berekeningen uitgevoerd om te laten zien wat het effect is van droogte op brandverspreiding. Het waterschap Vallei en Veluwe, Vitens en de provincie Gelderland vormden een klankbord om de hydrologische simulaties aan te toetsen in voornamelijk het aanpalende H2020 project BINGO. Als terrein- en waterbeheerders spelen zij mede een belangrijke rol in het beheersen van natuurbranden. Door kennis te delen met de brandweer, kunnen terreinbeheerders rekening houden met brandgevaar in ruimtelijk planningsvraagstukken.

Inhoud

1	Inleiding	4
1.1	Achtergrond	4
1.2	Doelstelling	4
1.3	Leeswijzer	4
2	Methoden	5
2.1	General concepts	5
2.2	Beschrijving van de vochtmodule: hydrologische berekeningen en invoergegevens	7
2.3	Formulation of soil moisture effects on vegetation moisture	9
2.4	Veldmetingen: vochtgehalten in de vegetatie	13
2.5	Modellsimulaties: effecten van vocht op de uitkomsten van het NBVM	16
3	Resultaten en discussie	17
3.1	Gemeten vochtgehalten in vegetatie	17
3.2	Annual curves of potential moisture and potential living biomass	19
3.3	Validatie van de vochtmodule	21
3.4	Effecten van vocht op de uitkomsten van het NBVM	22
4	Conclusies en aanbevelingen	28
5	Bibliografie	34

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Door veranderingen in het klimaat neemt de kans op natuurbranden toe. De verwachting is dat niet alleen de frequentie, maar ook de intensiteit van droge periodes zal toenemen (KNMI, 2014). Vocht in de vegetatie kan je beschouwen als een buffer die energie verbruikt voordat de brand zich verder verspreidt. Dit mechanisme zorgt ervoor dat de droogtegraad van de begroeiing een bepalende factor is voor de uitbreidingsnelheid van een brand en van een moeilijk beheersbare situatie.

De brandweer onderzoekt in hoeverre remote sensing en hydrologische berekeningen kunnen helpen bij het inschatten van de droogtegraad van de vegetatie. Dergelijke informatie kan inzicht geven in de ernst van de situatie. Het doel van dit project is om naast ruimtelijke patronen ook harde cijfers te genereren van het vochtgehalte in de vegetatie. Deze cijfers kunnen vervolgens worden gebruikt in het natuurbrandverspreidingsmodel (NBVM) dat daarmee indirect het effect van droogte op de verspreiding van een brand berekent. Om dit doel te bereiken is in 2017 een veldexperiment opgezet waarin voor twee vegetatietypen (heide en pijpenstrootje) maandelijks monsters zijn genomen om het vochtgehalte te bepalen. Met deze gegevens zijn vertaalfuncties gemaakt om hydrologische uitkomsten te vertalen naar de vochttoestand in de vegetatie.

Deze studie is uitgevoerd in het kader van het project “Verdamping op de Veluwe: Water en Vuur” dat verband heeft met het Europees Horizon 2020 project genaamd BINGO (Bridging INnovation to onGOing water management). In deze projecten worden gecombineerde effecten van veranderend landgebruik, watergebruik en klimaat gekwantificeerd voor het grondwatersysteem van de Veluwe met het grondwatermodel AZURE. Tevens is een lysimeterstation in een heidevegetatie in bedrijf gehouden en zijn verdampingscijfers uit de literatuur voor droge natuur geëvalueerd. Deze cijfers vormen de basis van de hydrologische berekeningen die ten grondslag liggen aan de vochtmodule (Voortman and Witte, in voorbereiding).

1.2 Doelstelling

Het doel van dit project is een vochtmodule die inzicht geeft in de vochttoestand van de vegetatie en gebruikt kan worden in het NBVM.

1.3 Leeswijzer

De resultaten die worden beschreven in dit rapport zijn:

- Een conceptueel model voor het simuleren van vochtgehalten in de vegetatie.
- Resultaten van een veldwerkcampagne die als basis dienen voor de parametrisatie van de vochtmodule.
- Een programma in de vorm van een python script voor het simuleren van de droogtegraad van de vegetatie en het signaleren van extreem droge situaties.

Door de internationale samenstelling van het onderzoeksteam zijn enkele paragrafen in dit rapport in het Engels geschreven.

2 Methodes

2.1 Algemeen concepten

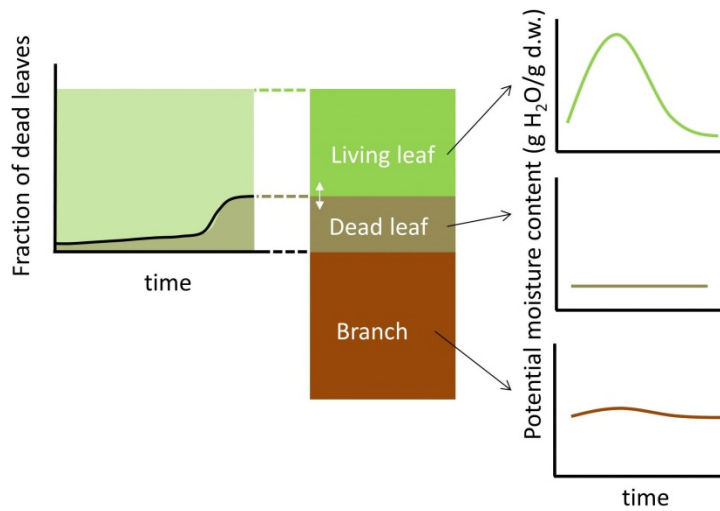
The moisture content in plants is regulated by multiple factors, e.g. physiological, phenological, and environmental factors. The moisture content varies between different plant organs, development stages, and species. For example, for natural vegetation leaves have a higher moisture content per dry weight than branches, and species which are categorized in the post-fire strategy 'resprouters' have in general a higher moisture content than 'seeders' (Saura-Mas and Lloret, 2007). The moisture content in plants exhibit clear seasonal patterns in temperate regions. It increases during the growing season and remains lower in colder months (Beedlow et al., 2017; Ortmann et al., 1994). Environmental factors, such as the water availability in soils, influence the moisture content in plants. Fovell et al. (2015) showed that the temporal patterns of live fuel moisture of greasewood in California could be predicted primarily by their annual cycle, and the deviation from the annual cycle could be related to soil moisture (Bijlage II Figuur 28). Similar positive correlations between soil moisture or cumulative water balance index (i.e. cumulative difference between precipitation and reference evapotranspiration) vs. moisture content in plants exist in several regions (Dennison et al., 2003; Qi et al., 2012; Bijlage II Figuur 29 and Figuur 30).

Note that the above-mentioned relationships of soil moisture and vegetation moisture content were established in ecosystems where drought events are severe and prolonged. In Netherlands, where climate is much milder and drought stress occurs only occasionally, we do not expect such direct relationships between soil moisture and the moisture content of plants. In the Netherlands, we have a wealth of freely available information, such as a detail soil map, vegetation map and meteorological data, which enables us to use a more precise proxy, i.e. the transpiration deficit (i.e. potential minus actual transpiration). Therefore, in this study, we choose to use the transpiration deficit to describe the environmental driver of the moisture content in plants.

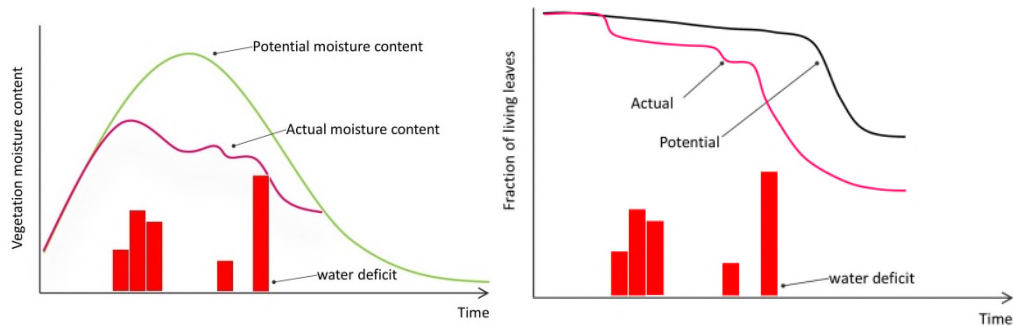
To model the vegetation moisture content of the entire above-ground vegetation, we define a potential and actual moisture content of the vegetation. The potential moisture content of vegetation is regulated by annual fluctuations of the moisture content in each plant compartment (stems and leaves) as well as annual fluctuations of the ratio between dead and living leaves (Figuur 1). The actual moisture content of vegetation deviates from the potential moisture content due to drought stress, i.e. a soil moisture deficit leading to a difference between potential and actual transpiration. We assume that soil moisture influences vegetation in two ways: 1) transpiration deficit reduces moisture content of living leaves, and 2) transpiration deficit increases the fraction of dead leaves as some leaves starts to die off (Figuur 2). The first response is regarded as a plastic response, since the moisture content of a leaf can recover within a couple of days or weeks to the potential level when water becomes available again. The second response is regarded as plastic response on a much longer timescale (i.e. only reversible after considerable transpiration, i.e. growth of the plant and generation of new leaves). For the first response, we used summed transpiration deficit of the last 10 days, which is found to be a good measure of drought stress (Bartholomeus et al., 2011). For the second response, we used the balance between transpiration and the transpiration deficit. For simplicity, we assume that the ratio between thick branches,

thin branches and leaves (dead and living together) remain constant throughout the year. We also assume that the moisture content in branches can be prescribed by an annual curve that does not respond to drought, since the annual fluctuation in branches are much smaller than those in leaves (Saura-Mas and Lloret, 2007; and this study).

Figuur 1. Conceptual diagram of potential moisture content in vegetation



Figuur 2. Conceptual representation of influence of soil water deficit on annual cycle of vegetation moisture content (left) and fraction of living leaves (right).

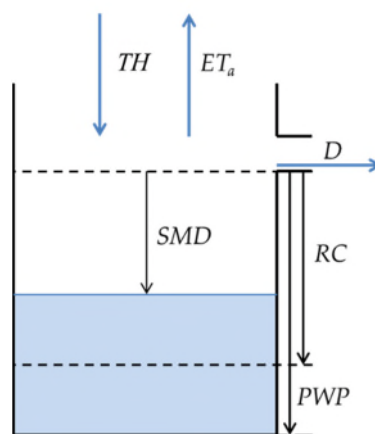


2.2 Beschrijving van de vochtmodule: hydrologische berekeningen en invoergegevens

Om de transpiratie en het transpiratietekort te berekenen is een hydrologische model ontwikkeld dat bestaat uit een zogenaamd bakjesconcept (Figuur 3). De diepte van het bakje staat gelijk aan de hoeveelheid vocht die beschikbaar is in de wortelzone tussen veldcapaciteit en het verwelkingpunt (lengte *PWP*). Veldcapaciteit is het vochtgehalte in de bodem nadat het drainageproces verwaarloosbaar klein wordt. Deze term valt vaak tussen $pF1.8$ en $pF2.2$. In deze studie is gekozen om aan de onderrand van de definitie te zitten, i.e. $pF1.8$, omdat uit veldmetingen van drukhoogtes op 50 cm diepte blijkt dat de bodem vaak rond deze drukhoogte uitkomt. Door doorval (*TH*; neerslag die het vegetatiedek passeert en de bodem bereikt) wordt het bakje gevuld en door de werkelijke evapotranspiratie (ET_a ; hier gedefinieerd als de som van werkelijke bodemverdamping en transpiratie) wordt het bakje geleegd. Als het bakje boven *PWP* gevuld wordt, vindt drainage plaats (*D*). Als de bodem uitdroogt, gaan planten hun huidmondjes sluiten om uitdroging te voorkomen. Dit moment wordt in het bakjesmodel gedefinieerd door lengte *RC* (vanaf de bovenkant van het bakje gemeten). Als het niveau in het bakje hoger ligt dan *RC* verloopt de transpiratie potentieel. Als het niveau lager wordt dan *RC* wordt de transpiratie lineair gereduceerd totdat het niveau *PWP* is bereikt en de transpiratie stopt. Het hydrologische model houdt geen rekening met bijvoorbeeld capillaire nalevering en kan daarom alleen gebruikt worden voor gebieden met een diepte grondwaterstand.

De parameters *PWP* en *RC* van het bakje worden bepaald door: bodemfysische eigenschappen (genomen uit BOFEK2012; Wösten et al., 2012), de diepte van de wortelzone (genomen uit het LHM 3.1.0) en zogenaamde Feddes parameters van de vegetatie, i.e. het verwekingspunt en het eerste moment waarop planten huidmondjes sluiten (genomen uit het LHM 3.1.0).

Figuur 3. Schematische weergave van het bakjesmodel, gebaseerd op Ireson and Butler, (2013)



Het hydrologische model rekent op dagbasis op een ruimtelijke resolutie van 250 x 250 meter. De neerslag komt van het KNMI. Deze wordt geïnterpoleerd vanuit geautomatiseerde weerstations of bestaat uit gekalibreerde regenradardata. De keuze voor deze verschillende bronnen voor neerslag kan worden gemaakt in het invoerbestand van de module (Bijlage I).

Berekeningen van verdamping volgen voor een groot deel de beschrijvingen van MetaSWAP. Belangrijkste aanpassingen zitten in de interceptieberekeningen en

expliciete parametrisatie van heide in het model (in Azure viel heide onder ‘droge natuur’). De verdamping in het model wordt in drie verschillende posten verdeeld en berekend. Eerst wordt de interceptieverdamping bepaald (de verdamping van water dat na een neerslagbui blijft liggen op het bladoppervlak). Anders dan in MetaSWAP wordt interceptieverdamping altijd gelimiteerd door de maximale interceptiecapaciteit. De snelheid waarmee water uit het interceptie reservoir verdwijnt wordt bepaald door de Makkink verdamping vermenigvuldigd met een constante factor. Anders dan in MetaSWAP is deze factor geen fitting parameter maar heeft deze een fysische betekenis. Deze factor is namelijk bepaald door een verhouding tussen de Penman openwaterverdamping, gecorrigeerd voor de aerodynamische weerstand van het gewas en de Makkink referentie-gewasverdamping. Deze afwijkingen van MetaSWAP zijn alleen doorgevoerd voor heide, waar specifieke gegevens voor beschikbaar zijn om op een fysische betere manier interceptie te berekenen. Voor andere gewassen verloopt de berekening nog zoals in de originele beschrijving (van Walsum et al., 2010).

Nadat de interceptieverdamping is berekend, wordt de doorval toegevoegd aan het bakjesmodel en wordt bodemverdamping en transpiratie berekend. Bodemverdamping reduceert vaak sneller door een vochttekort dan transpiratie. Doordat het bakjesmodel geen detailinformatie bevat van de bovenlaag van de bodem, wordt in een tussenstap een eerste schatting gemaakt van de werkelijke bodemverdamping (E_{-a}) met het model van Boesten and Stroosnijder (1986). In dit model wordt aangenomen dat bodems een fase hebben waarin ze potentieel verdampen, waarna de verdamping exponentieel afneemt doordat de bovenlaag van de bodem uitdroogt. Dit patroon wordt voorspeld op basis van de potentiële bodemverdamping, het neerslagpatroon en de bodemparameter β die beschrijft hoe snel een bodem dichtslaat en de verdamping wordt gereduceerd. Dus zonder enige koppeling met het hydrologisch model, kan een eerste schatting worden gemaakt van de bodemverdamping. Dit maakt het model aantrekkelijk voor ruimtelijk gedistribueerde modellen, omdat het geen detailinformatie behoeft van de toplaag van de bodem en snel rekent. Daarnaast leidt het model niet tot numerieke problemen, zoals deze geregeld voordoen bij het simuleren van bodemverdamping met modellen als SWAP of HYDRUS 1D. Numerieke problemen met SWAP of HYDRUS 1D ontstaan vaak in droge bodems, waarin een kleine afname van het vochtgehalte tot een grote veranderingen in de drukhoogte en doorlatendheid kan leiden en daarmee tot enorme hydraulische gradiënten. Voor detailstudies zijn deze problemen meestal eenvoudig op te lossen door aan verschillende iteratieparameters te sleutelen. Voor ruimtelijke modellen met vele gridcellen is dat ondoenlijk.

Na deze tussenstap wordt de eerste schatting van de werkelijke bodemverdamping (E_{-a}) opgeteld bij de potentiële transpiratie (simpelweg de Makkink referentie-gewasverdamping vermenigvuldigd met de transpiratie factor en gereduceerd als het blad oppervlak nat is). Deze term ($E_{-a} + T_p$) wordt gepoogd te onttrekken uit het bakjesmodel zoals in het begin van deze paragraaf is beschreven om te komen tot de werkelijke evapotranspiratie (ET_a). De werkelijke transpiratie wordt daarna teruggerekend door ET_a te vermenigvuldigen met de verhouding tussen potentiële transpiratie en de potentiële evapotranspiratie reeds gecorrigeerd door het Boesten and Stroosnijder (1986) model ($T_a = ET_a * T_p / (E_{-a} + T_p)$). Het transpiratie tekort ($T_p - T_a$) wordt als invoer gebruikt voor het model om het vochtgehalte in de vegetatie te schatten.

Bodemverdamping wordt dus net als transpiratie beperkt door de droogtegraad van het bakje (de wortelzone). Deze stap is noodzakelijk om de waterbalans sluitend te houden en te zorgen dat bodemverdamping niet kan plaatsvinden terwijl het bakjesmodel leeg is.

2.3 Formulation of soil moisture effects on vegetation moisture

The vegetation moisture content of entire above-ground biomass can be formulated as follows:

$$MC_{\text{total}} = F_{\text{branch}}MC_{\text{branch}}(\text{doy}) + F_{\text{leaf}}MC_{\text{leaf}}$$

where MC_{total} is the moisture content of total above-ground biomass (g H₂O/g dry weight), F_{branch} and F_{leaf} are the fractions of branches and leaves in the total above-ground biomass (g dry weight/g dry weight) and MC_{branch} and MC_{leaf} are the moisture contents of branches and leaves (g H₂O/g d.w.). F_{leaf} and F_{branch} is assumed to be constant throughout the year and MC_{branch} is prescribed by an annual curve dependent on the day of the year (*doy*; see section 2.3.1 and 3.2). The moisture content of leaves (living and dead together, MC_{leaf}) forms the dynamic component that is determined by the actual (subscript a) fraction of living (LLF_a) and dead leaves ($1 - LLF_a$) with respect to the total dry weight of leaves, as well as by the actual moisture content of living leaves ($MC_{a,\text{livleaf}}$; g H₂O/g dry weight):

$$MC_{\text{leaf}} = (1 - LLF_a)MC_{\text{deadleaf}} + LLF_a \cdot MC_{a,\text{livleaf}}$$

The moisture content of dead leaves (MC_{deadleaf} ; g H₂O/g d.w.) is regarded a constant. With above equations we are able to simulate the vegetation moisture content in case that water is available (i.e. drought stress doesn't occur). In that case the living leaf fraction is equal to the potential fraction ($LLF_a = LLF_p$) and the actual moisture content of living leaves will be equal to the potential content ($MC_{a,\text{livleaf}} = MC_{p,\text{livleaf}}$). LLF_p and $MC_{p,\text{livleaf}}$ are both prescribed annual functions depended on the day of the year (*doy*) and are approximated based on our measurements (see section 2.3.1 and 3.2). The actual moisture content of living leaves is defined by:

$$MC_{a,\text{livleaf}} = f(S_{10d}) \cdot MC_{p,\text{livleaf}}(\text{doy})$$

where f is the function to determine the actual moisture content of living leaves based on the cumulative transpiration deficit of the last 10 days (S_{10d} ; mm). S_{10d} is a measure of drought stress, which is defined by:

$$S_{10d,t} = \sum_{t-10}^t (T_{p,t} - T_{a,t})$$

Where T_p and T_a are potential and actual transpiration (mm/d) at day t , respectively. The actual living leaf fraction (LLF_a) is determined by:

$$LLF_a = f'(S_{\text{bal}}) \cdot LLF_p(\text{doy})$$

where LLF_p is the potential living leaf fraction at a certain day of the year (*doy*) and f' is a function that determines the actual living leaf fraction based on the drought stress balance (S_{bal} ; mm) which is defined by:

$$S_{\text{bal},t} = \begin{cases} S_{\text{bal},t-1} + (T_{p,t} - T_{a,t}) & T_{a,t} < T_{p,t} \\ \max\left(S_{\text{bal},t-1} - \frac{T_{a,t}}{F_{\text{recover}}}, 0\right) & T_{a,t} = T_{p,t} \end{cases}$$

where S_{bal} is the accumulated transpiration deficit (i.e. a positive number) when $T_a < T_p$. This accumulated deficit is brought back to zero after a period with considerable transpiration under potential conditions (i.e. if $T_a = T_p$). The speed at which the stress balance (S_{bal}) is brought back to zero is determined by $F_{recover}$, i.e. $F_{recover}$ determines the speed at which dead leaves are replaced by new leaves.

We still need to define the functions $f(S_{10d})$ and $f'(S_{bal})$ which transfers $MC_{p,livleaf}(doy)$ and $LLF_p(doy)$ to the actual level. We have assumed that the moisture content of living leaves is linearly related to S_{10d} and leaves will dry out until they are shifted to the dead portion (Figuur 4). In fire models, vegetation is often regarded dead if the moisture content drops below 0.3 g H₂O/g d.w. (Andrews and Butler, 2006; Scott and Burgan, 2005). We used the same threshold to define the lower limit of the moisture content of living leaves, which is controlled by the parameter mf in the function $f(S_{10d})$. After a certain S_{bal} threshold is reached (i.e. S_{dying}), the shift from the living to the dead portion is assumed be linearly related to the stress balance S_{bal} . The moment when all leaves are dead is controlled by the parameter S_{dead} . These assumptions have been summarized in functions $f(S_{10d})$ and $f'(S_{bal})$ (Figuur 4), and are formulated as follows:

$$f(S_{10d}) = \begin{cases} 1 - \frac{1 - mf}{S_{dying}} S_{10d} & S_{10d} < S_{dying} \\ mf & S_{10d} \geq S_{dying} \end{cases}$$

$$f'(S_{bal}) = \begin{cases} 1 & S_{bal} < S_{dying} \\ \frac{S_{bal} - S_{dying}}{S_{dead} - S_{dying}} + 1 & S_{dying} \leq S_{bal} < S_{dead} \\ 0 & S_{dead} \leq S_{bal} \end{cases}$$

S_{dying} is assumed to be 40 mm, i.e. after 10 days with 4 mm/d of transpiration deficit all living leaves will have a moisture content close to 0.3 g/g. Leaves are shifted to the dead portion when S_{bal} reaches the same threshold S_{dying} , i.e. 40 mm. It should be noted that S_{bal} can reach 40 mm while S_{10d} is far below 40 mm, e.g. if the transpiration deficit is 2 mm/d during a period of 20 days, $S_{10d} = 20$ mm while $S_{bal} = 40$ mm. So parts of the vegetation can be dying off, while the leaf moisture content is above 0.3 g/g. This is done on purpose, because based on our observations, living and dead vegetation persist in the same stand. Therefore, brief fluctuations in moisture content in living leaves (controlled by S_{10d}) and dying off (controlled by $S_{bal,t}$) should be considered two different processes.

The parameter value for mf was determined to be 0.35 for *Calluna* and 0.22 for *Molinia* based on our measurements (see section 2.3.1 for the fitting procedure). The moisture content of dead leaves was on average 0.24 for *Calluna* and 0.15 for *Molinia*. The lower limit of 0.3 g/g to define wilting leaves seem therefore reasonable. It should be noted that the fraction of dead leaves has been assigned the measured average moisture content of dead leaves (0.24 for *Calluna* and 0.15 for *Molinia*) and the level 0.3 g/g is only used to define the moisture content at which leaves are considered living and could recover from drought events. Find a list of variables and their description in tabel 1.

Figuur 4. Reduction functions of the moisture content in living leaves (left) and the fraction of living leaves (right).

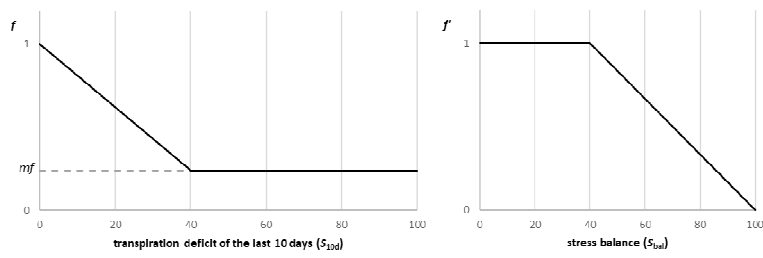


Table 1. List of variables and their description.

<u>Variable</u>	<u>Description</u>	<u>unit</u>	<u>type</u>	<u>source</u>
<i>doy</i>	Day of the year (0 to 365 or 366)	d	Independent variable	Independent variable
MC_{total}	Total aboveground biomass moisture content	g H ₂ O/g d.w.	dynamic	output
MC_{leaf}	Leaf moisture content	g H ₂ O/g d.w.	dynamic	output
$MC_{branch}(doy)$	Branch moisture content	g H ₂ O/g d.w.	annual curve	output
$MC_{deadleaf}$	Dead leaf moisture content	g H ₂ O/g d.w.	constant	field data
$MC_{p,livleaf}(doy)$	Potential moisture content living leaves	g H ₂ O/g d.w.	annual curve	field data
$MC_{a,livleaf}$	Actual moisture content living leaves	g H ₂ O/g d.w.	dynamic	output
F_{branch}	Fraction of branches in the total aboveground biomass	g d.w./ g d.w.	constant	field data
F_{leaf}	Fraction of leaves in the total aboveground biomass	g d.w./ g d.w.	constant	field data
$LLF_p(doy)$	Potential fraction of living leaves of the total leaves	g d.w./ g d.w.	annual curve	field data
LLF_a	Actual fraction of living leaves of the total leaves	g d.w./ g d.w.	dynamic	output
S_{bal}	Stress balance	mm	dynamic	hydrological model
S_{10d}	Drought stress proxy, i.e. transpiration deficit of the past 10 days	mm	dynamic	hydrological model
S_{dying}	Drought stress threshold at which leaves will start dying	mm	constant	physical assumption
S_{dead}	Drought stress threshold at which leaves are all dead	mm	constant	physical assumption
$F_{recover}$	Recovery factor, determining the speed at which the stress balance will recover to zero	1/d	constant	physical assumption
mf	Fitting parameter	-	constant	fitted
$f(S_{10d})$	Living leaf moisture reduction function	-	dynamic	physical assumptions
$f'(S_{bal})$	Living to dead reduction function	-	dynamic	physical assumptions
T_p	Potential transpiration	mm/d	dynamic	hydrological model
T_a	Actual transpiration	mm/d	dynamic	hydrological model

2.3.1 Estimation of annual cycles

The equations that we used to describe annual cycles in branch moisture content, potential living leaf moisture content and potential living leaf fraction are:

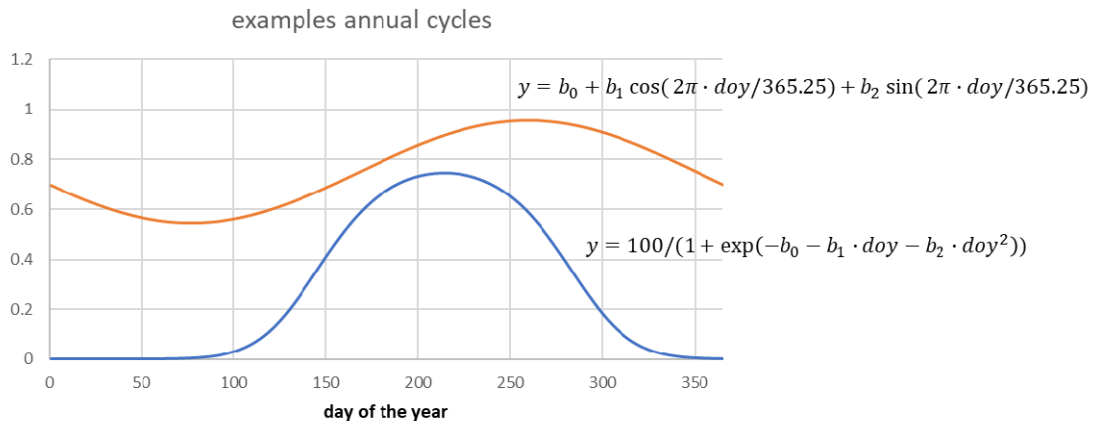
$$y = b_0 + b_1 \cos(2\pi \cdot \text{doy}/365.25) + b_2 \sin(2\pi \cdot \text{doy}/365.25)$$

Or

$$y = 100/(1 + \exp(-b_0 - b_1 \cdot \text{doy} - b_2 \cdot \text{doy}^2))$$

Both equations use three parameters b_0 , b_1 and b_2 to describe the distribution throughout the year based on the day of the year (*doy*; Figuur 5). Most variables were described with the first equation, only the potential living leaf fraction of *Molinia* was better described by the second equation.

Figuur 5. Examples of the two functions describing annual cycles (b_0 , b_1 and b_2 of the orange curve are: 0.75,-0.05,-0.2; b_0 , b_1 and b_2 of the blue curve are 15, 0.15, - 0.00035)



2.4 Veldmetingen: vochtgehalten in de vegetatie

Vochtgehalten in de vegetatie zijn voor twee vegetatietypen gemeten in nationaal park De Hoge Veluwe (Figuur 6):

- Heide: gedomineerd door struikhei (*Calluna vulgaris*), met een kleine bedekking van dophei (*Erica tetralix*), bijna geen grassen. Vergelijkbare omstandigheden als waar de lysimeters geïnstalleerd zijn (52° 3'5.86"N, 5°49'27.42"O).
- Gras: monocultuur van pijpestrootje (*Molinia caerulea*), ca. 300 m ten zuidoosten van de lysimeterlocatie.

Vochtgehalten (gram water per gram droge biomassa en gram water per een vierkante meter) in de bovengrondse plantbiomassa zijn één keer per maand gemeten voor heide vanaf februari t/m november 2017, voor pijpenstrootje vanaf mei t/m oktober 2017.

De volgende procedure is gevolgd bij het meten van het vochtgehalte. De gehele bovengrondse biomassa is telkens in een 50 cm x 50 cm kwadrant (3 replica's) gesneden en opgeslagen in een voorgewogen plastikzak. Het verse gewicht werd bepaald in het veld. Voor heide is deze biomassa gescheiden naar 'canopy' (bladeren en dunne takken, tot het punt waarop groene bladeren zijn bevestigd) en 'branches'

(Figuur 7). De monsters zijn in afgesloten plastic zakken in een koelbox getransporteerd naar het laboratorium. In het laboratorium is het drooggewicht na 48 uur drogen op 65 °C bepaald. Door verschillen in vers- en drooggewicht te delen door het drooggewicht werd het vochtgehalte bepaald. Het vochtgehalte per vierkante meter is bepaald door het verschil in vers- en drooggewicht simpelweg te vermenigvuldigen met vier (we werkten immers met kwadranten (0.25 m²)). Door subsamples te nemen van dode en levende bladeren is het vochtgehalte van deze onderdelen afzonderlijk gemeten (telkens in 3 replica's; Figuur 8). Voor heide is tevens op dezelfde manier nog een verschil gemaakt tussen dunne takken, dikke takken en de groene toppen van de begroeiing (Figuur 9).

Voor beide begroeiingstypen zijn door het jaar heen visuele schattingen gemaakt van het percentage dode begroeiing.

Figuur 6. heide (links) en pijpenstrootje (recht) in 50 x 50 cm kwadrant



Figuur 7. 'Canopy' (rood) en 'branches' (groen) van Calluna.



Figuur 8. Levende bladeren (links) en dode bladeren (recht) van Molinia



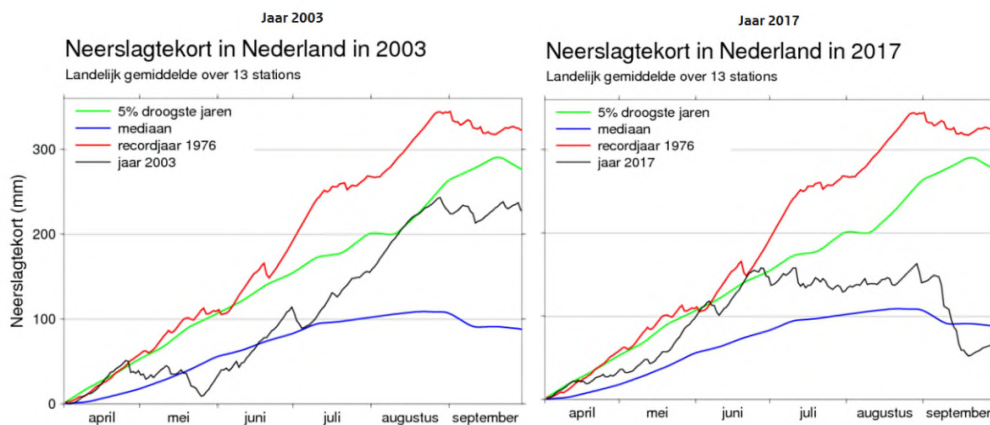
Figuur 9. Jonge bladeren cohort van calluna (rode cirkel). Rechtsboven: jonge bladeren, linksonder: dikke takken, rechtsonder: dunne takken



2.5 Modellsimulaties: effecten van vocht op de uitkomsten van het NBVM

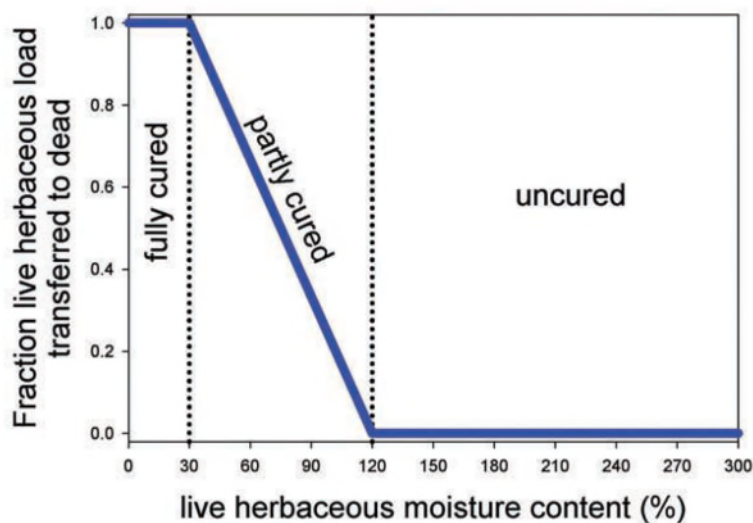
Voor het meetjaar 2017 zijn de metingen van het vochtgehalte vergeleken met de modellsimulaties. Tevens is de module gebruikt om het effect van vocht in de vegetatie op de brandverspreidingsnelheid te simuleren. Hiervoor is een droge periode in 2003 geselecteerd vanaf 10 juli tot 15 augustus. Voor en na de droge periode zijn berekeningen gedaan van brandverspreiding. Voor dezelfde momenten is in 2017 de droogtegraad en brandverspreidingsnelheid geëvalueerd. Het verloop van het neerslagtekort in beide jaren is weergegeven in Figuur 10.

Figuur 10. Neerslagtekort volgens het KNMI in 2003 en 2017. Het neerslagtekort eind september is 228 mm in 2003 en 56 mm in 2017.



Normaalgesproken berekent het NBVM het vochtgehalte in de levende vegetatie aan de hand van standaard meteorologische gegevens en bepaald hiermee hoeveel materiaal wordt meegenomen in de berekening als dood materiaal (Figuur 11). In plaats van deze standaard berekening worden de uitkomsten van de vochtmodule gebruikt. In de berekeningen van brandverspreiding gebruiken we het brandstofmodel voor jonge heide (code FM221).

Figuur 11. Het dynamische brandstofmodel volgens het NBVM.(figuur 1 uit (Scott and Burgan, 2005))



3 Resultaten en discussie

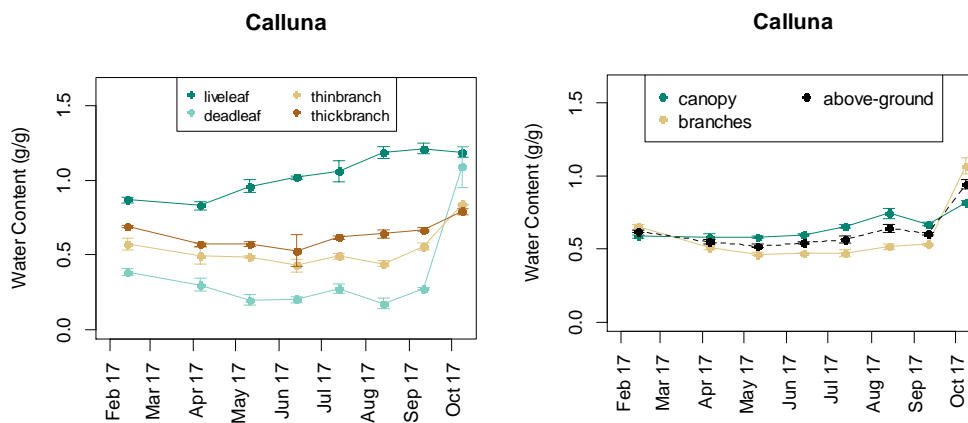
3.1 Gemeten vochtgehalten in vegetatie

3.1.1 moisture content in different plant compartments

The vegetation moisture content of *Calluna* in each compartment (living leaves / dead leaves / thin branches / thick branches) are summarized in Figuur 12, left. Although the measurements were conducted monthly from February to November 2017, we excluded the measurements of March and November from the fitting procedure, because in these months measurements were affected by external moisture due to drizzle, even after blotting them with paper to remove the external water. The annual fluctuation of the moisture content in living leaves was apparent, increasing from early spring and peaking during the flowering phase (ca. August - September). The seasonal difference was less apparent for the branches and dead leaves.

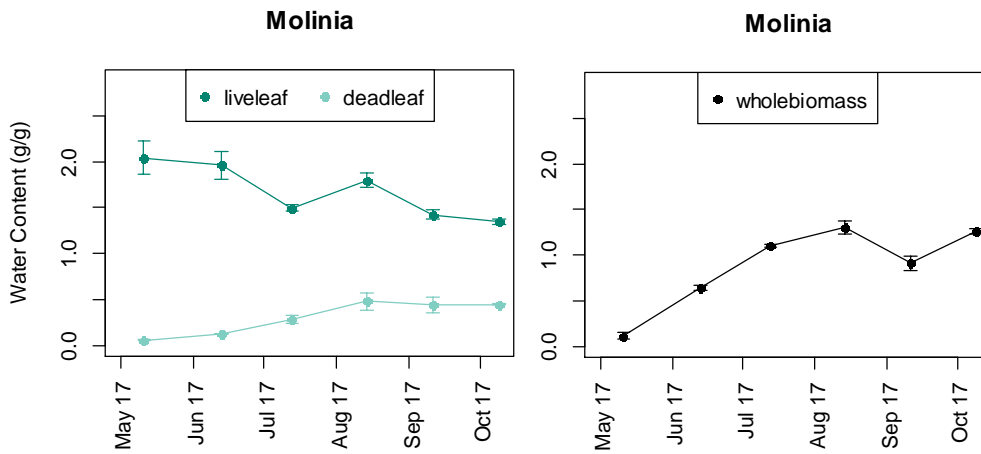
The vegetation moisture content in *Calluna* was also measured for canopy (i.e. the top part of the vegetation, including both leaves and thin branches), branches, and whole above-ground biomass (Figuur 12, right).

Figuur 12. Left: moisture content (g water /g dry biomass) of *Calluna* for each compartment. Right: moisture content (g/g) of *calluna* for canopy, branches, and whole above-ground biomass. Average and standard errors of 3 replicas are shown.

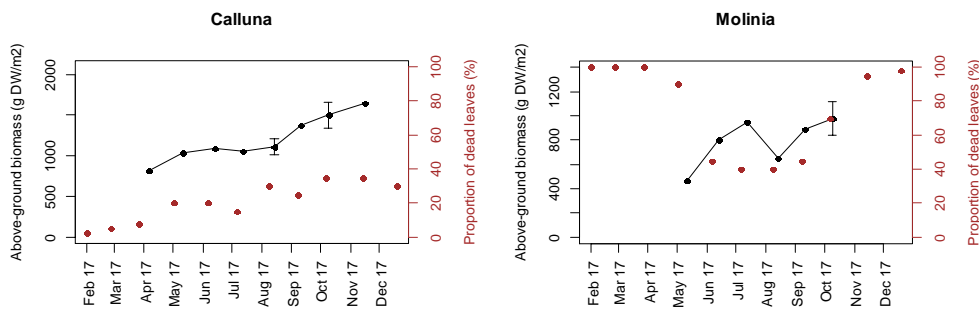


Voor *Molinia* is het vochtgehalte voor levende bladeren hoog in het begin van het seizoen en lager naderhand. Dit heeft te maken met het verouderingsproces van de bladeren. Het jonge blad heeft een hoger vochtgehalte per gram droge stof. Naarmate het seizoen vordert, neemt echter wel het totale vochtgehalte van de totale biomassa toe (Figuur 13, rechts) doordat het aandeel levende bladeren toeneemt (Figuur 14). *Molinia* heeft een groot deel van het jaar (winterperiode) nauwelijks levende bladeren (Figuur 14).

Figuur 13. Left: moisture content (g water /g dry biomass) of *Molinia* for living and dead leaves. Right: moisture content (g/g) of *Molinia* for whole above-ground biomass. Average and standard errors of 3 replicas are shown.

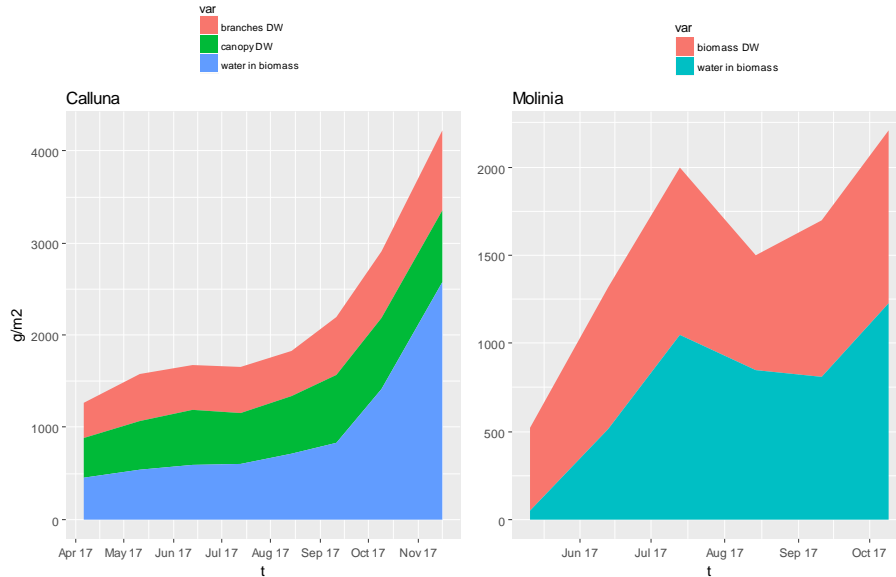


Figuur 14. Het verloop van het drooggewicht van *Calluna* en *Molinia* en het percentage dood materiaal.



Uit de fracties water en droge stof per vierkante meter (Figuur 15) komt naar voren dat vooral in het voorjaar de hoeveelheid biomassa en vocht laag zijn. Planten bevatten dan weinig water zodat brandverspreiding dan snel kan verlopen. *Calluna* heeft door het seizoen ongeveer twee keer zo veel droge stof en water als *Molinia* (Figuur 15).

Figuur 15. De hoeveelheid (g/m²) droge stof en water voor *Calluna* en *Molinia*. Figuur moet je interpreteren als een gestapelde diagram. Dat betekent dus bijvoorbeeld dat het drooggewicht takken (branches DW) in de linker figuur ongeveer gelijk blijft gedurende het jaar.



3.2 Annual curves of potential moisture and potential living biomass

The annual cycles of the moisture content in living leaves in *Calluna* and *Molinia* (Figuur 16) and the living leaf fraction (were estimated by non-linear fitting of annual curves (paragraph 2.3.1) on field measurements from February to October 2017. The parameters of the annual curves are listed in Tabel 2.

Figuur 16. Annual fluctuations of moisture content in living leaves in *Calluna* (a) and *Molinia* (b). Dots represents measured values (N=3 for each month). Solid black lines are the pattern of annual cycle obtained with non-linear fitting. Dotted black lines are 90th and 10th percentiles of the prediction interval. Red dotted lines depict the possible lowest ACTUAL moisture content of living leaves which is forced to approach 0.3 by adjusting the parameter *mf* in the living leaf moisture reduction function ($f(S_{10d})$, paragraph 0).

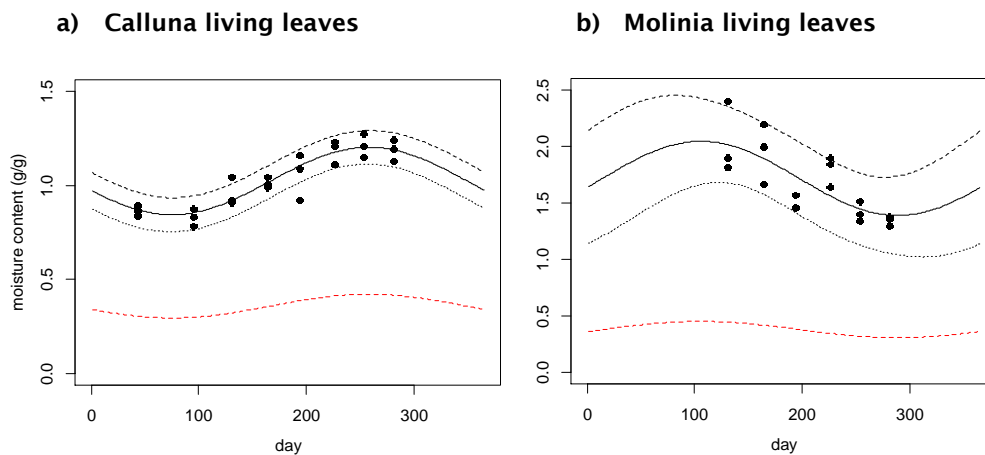
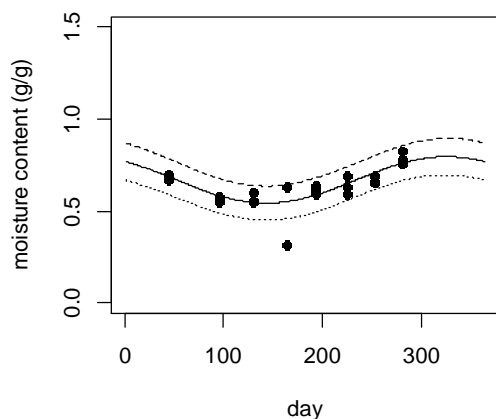


Table 2. Description of the fitting result of potential moisture content of living leaves ($MC_{p,livleaf}$), potential living leaf fraction (LLF_p) and the moisture content of branches (MC_{branch}).

	<i>Calluna</i>			<i>Molinia</i>	
	$MC_{p,livleaf}$	LLF_p	MC_{branch}	$MC_{p,livleaf}$	LLF_p
b_0	1.02365	79.52725	0.67061	1.71802	-14.40130
b_1	-0.04943	-0.40690	0.09875	-0.08068	0.14162
b_2	-0.17228	12.91717	-0.07879	0.31845	-0.00033

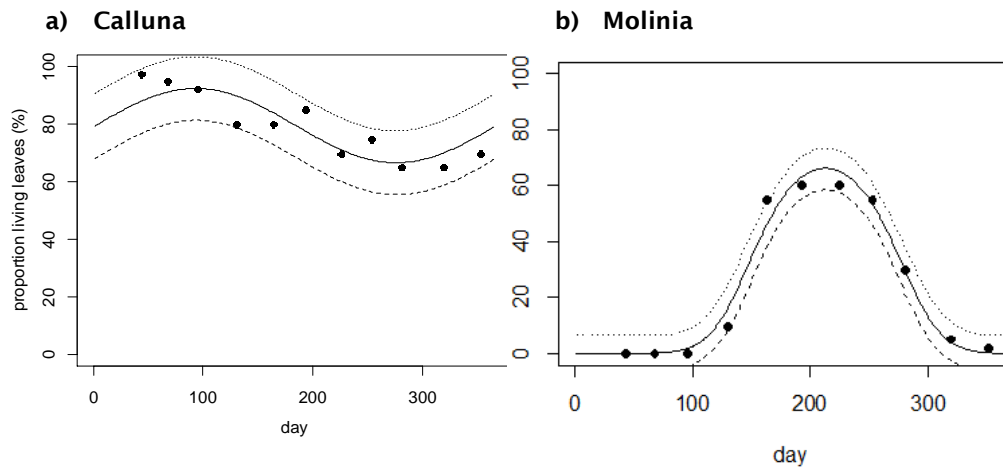
The annual cycle of the actual moisture content in thick branches of *Calluna* was described by an annual curve as well (Figuur 17; Tabel 2). For thin branches we used a constant value of moisture content because their annual cycle was less apparent. The average moisture content from the field observation of April to September was 0.48 for thin branches.

Figuur 17. Annual fluctuation of moisture content in thick branches in *Calluna*. Dots represents measured values (N=3 for each month). The dotted lines are the 90th and 10th percentiles of the prediction interval.



Fractions of thin branches, thick branches, and leaves (living plus dead) of *Calluna* were estimated for each month based on biomass ratios of canopy and branches. For the *Calluna* model, we used the average values of the main growing season (April - September): 0.19 for leaves, 0.31 for thin branches, and 0.5 for thick branches. Our values are in line with the existing study, in which the ratio of leaves and branches in dry biomass was 0.22:0.78 in *Erica*-dominate heath stand in the Netherlands (Aerts and Berendse, 1989).

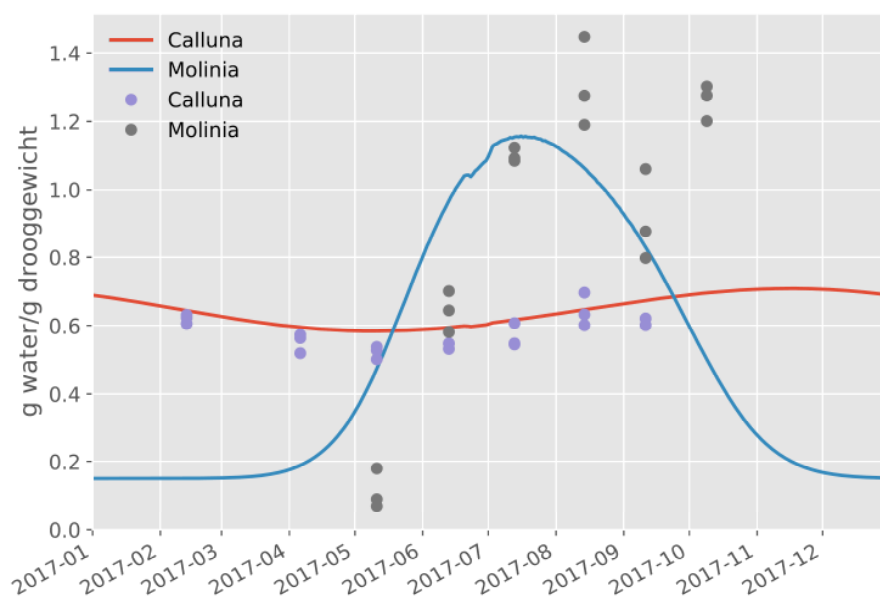
Figuur 18. Annual curves of the living leaf fraction for *Calluna* and *Molinia*. The dotted black lines are 90th and 10th percentiles of the prediction interval.



3.3 Validatie van de vochtmodule

Het jaar 2017 was een jaar met weinig tot geen droogtestress. Hierdoor hebben we uitstekende gegevens om het jaarlijkse verloop van het potentiële vochtgehalte te voorspellen (paragraaf hierboven), maar blijft het lastig om de daadwerkelijke respons op droogte te kunnen valideren. De gemeten vochtgehalten worden bij benadering beschreven door de vochtmodule (Figuur 19). De transpiratietekorten zijn berekend met gemeten bodemfysische eigenschappen. In de vochtmodule zitten andere eigenschappen (BOFEK 2012) en kunnen simulaties afwijken van deze lokale berekeningen. Grote afwijkingen in de herfstmaanden voor *Molinia* komen door extern water dat in lagere delen van de begroeiing op dood materiaal ligt. Dit is water dat niet in de module is opgenomen en lastig valt te voorspellen door de snelle verdamping en afhankelijkheid van dauw.

Figuur 19. Simulated (lines) and measured (dots) vegetation moisture content. Large measured moisture contents in *Molinia* are related to moments with external water on the vegetation.



3.4 Effecten van vocht op de uitkomsten van het NBVM

Voor het jaar 2003 en 2017 zijn berekeningen gedaan met de vochtmodule om het effect van de droogtegraad van de vegetatie op brandverspreiding te simuleren. Deze berekeningen hebben we gedaan voor een vierkant proefgebied van 10 km breed, gecentreerd rond de lysimeteropstelling in het nationaal park De Hoge Veluwe (52° 3'5.86"N, 5°49'27.42"O, Figuur 20). Het jaar 2003 viel in augustus onder de 5 % droogste jaren sinds de start van de metingen. Tussen 10 juli 2003 en 15 augustus 2003 ging het gesimuleerde vochtgehalte in de vegetatie van 0.6 naar 0.53 voor de heidebegroeiing en van 1.15 naar 0.43 voor de grasbegroeiing. Aan het einde van de droge periode was de bodem volledig uitgedroogd (Figuur 21), zelfs voor bosgebieden. Het verloop van het vochtgehalte in de vegetatie voor Pijpenstrootje verloopt een stuk grilliger dan voor heide (Figuur 21). Dit komt doordat de houtige structuren van heide beter in staat zijn vocht vast te houden.

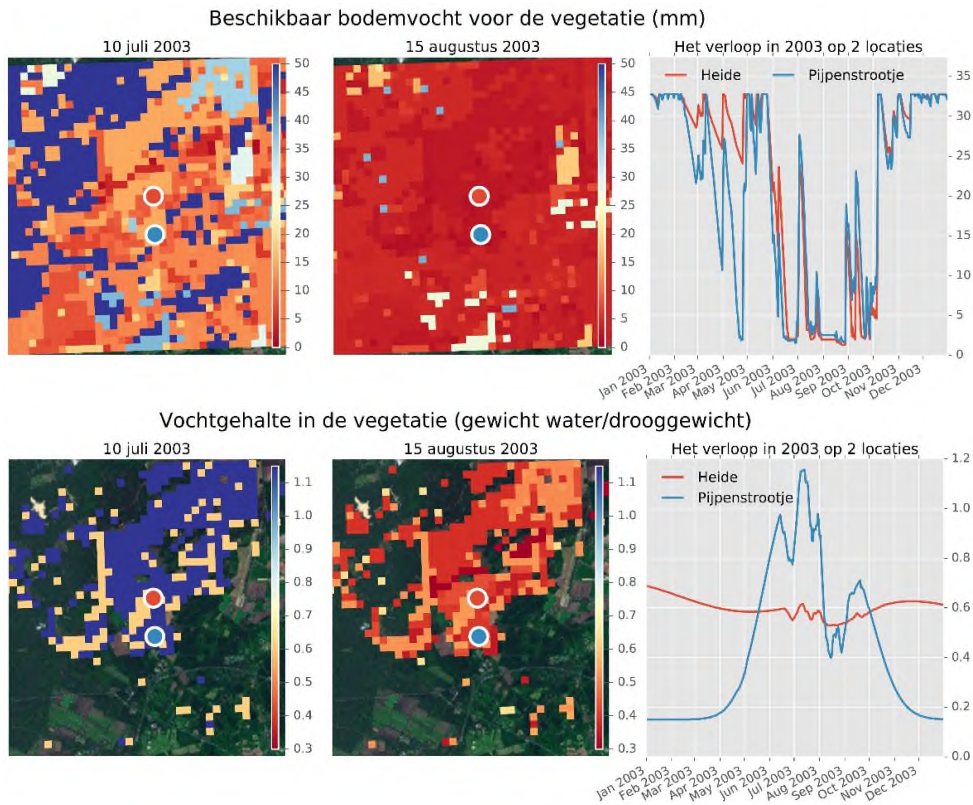
In het jaar 2017 was nauwelijks sprake van een vochttekort en verloopt het gesimuleerde vochtgehalte volgens de potentiële curves (Figuur 22).

Met een windsnelheid van 5 m/s zou in 2003 een heidebrand vóór de droge periode zich verspreiden met 375 m/uur (Figuur 23) en na de droge periode met 500 m/uur (Figuur 24). Met het vochtgehalte van Pijpenstrootje zou de brandverspreiding na de droge periode met 600 m/uur nog een stuk sneller verlopen (Figuur 25). Door de droogte van 2003 verspreidt het vuur zich dus 1.3 tot 1.6 keer zo snel. In 2017 zou voor dezelfde locatie de verspreidingssnelheid ongeveer gelijk zijn aan de situatie vóór de droge periode in 2003, i.e. 375 m/uur. De verspreidingssnelheden worden vergeleken in Figuur 26.

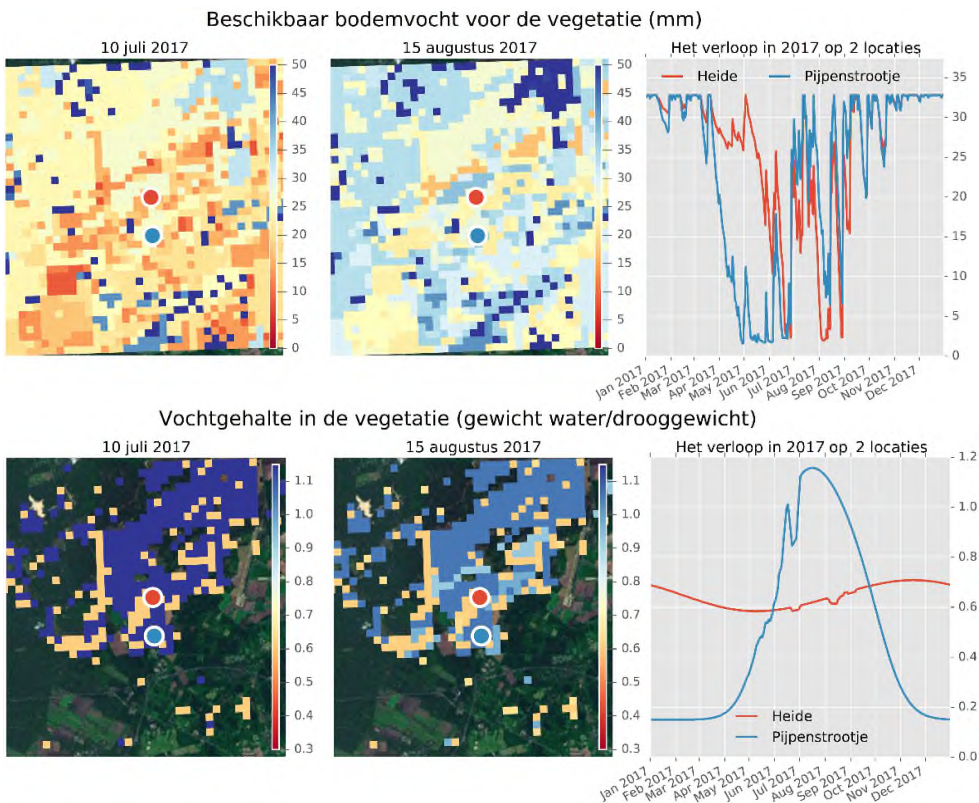
Figuur 20. Zwart omlijnt de locatie van het proefgebied.



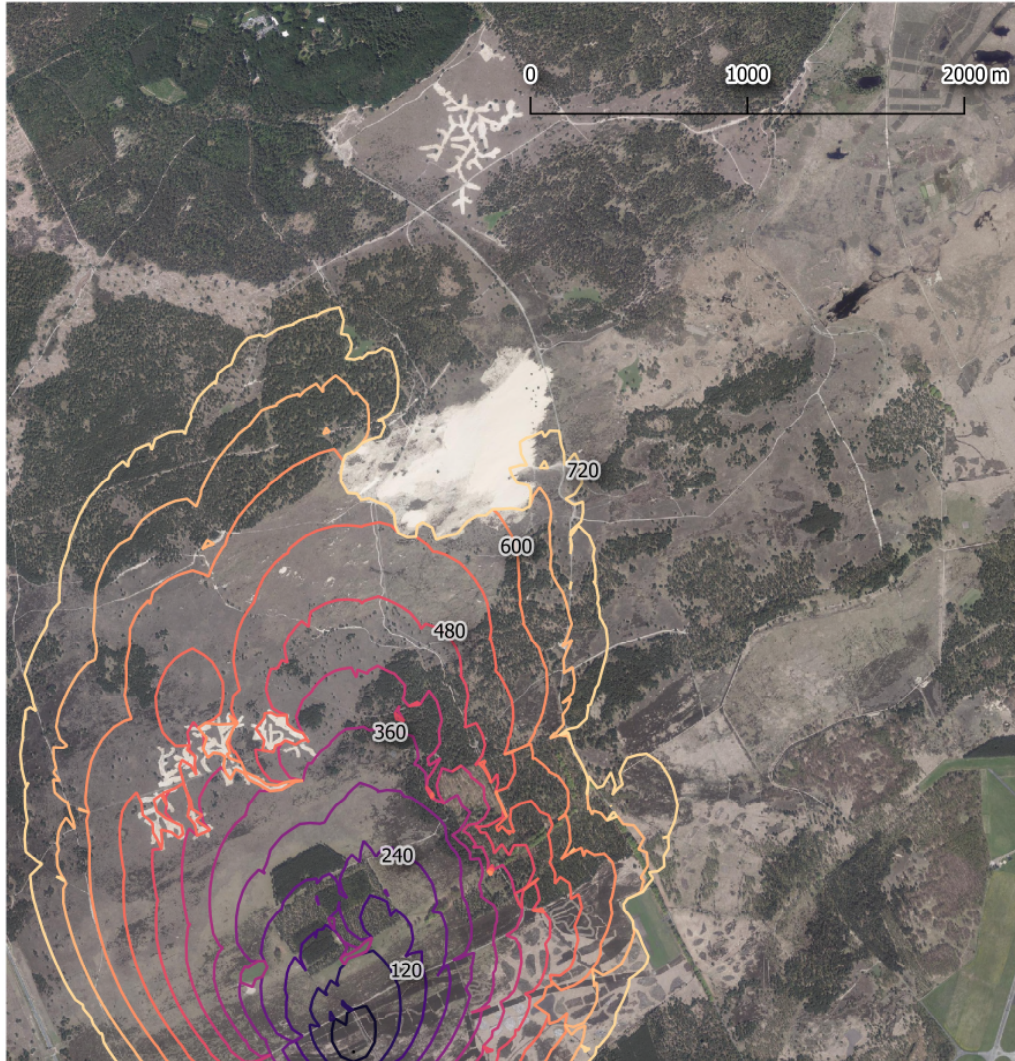
Figuur 21. Berekeningsresultaten van de vochtmodule voor de bodem en vegetatie in 2003.



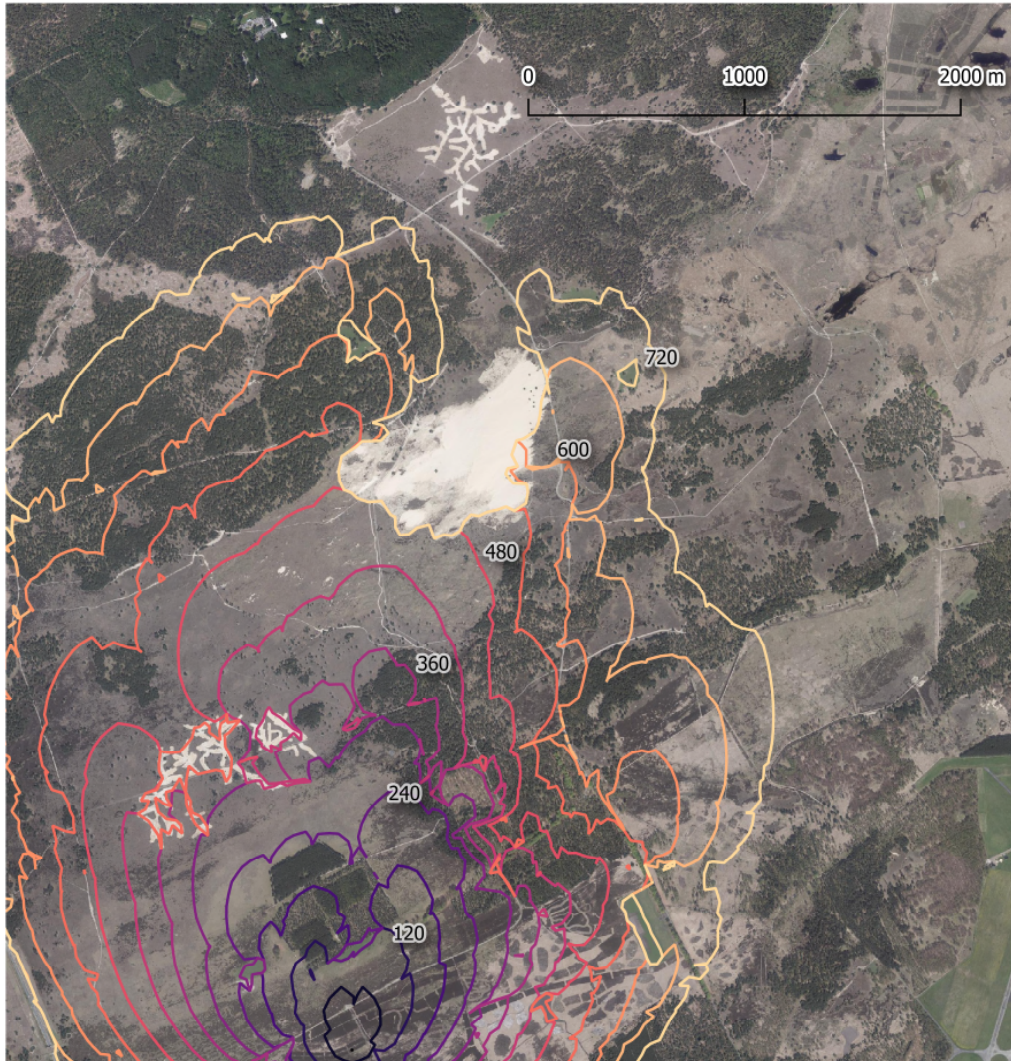
Figuur 22. Berekeningsresultaten van de vochtmodule voor de bodem en vegetatie in 2017.



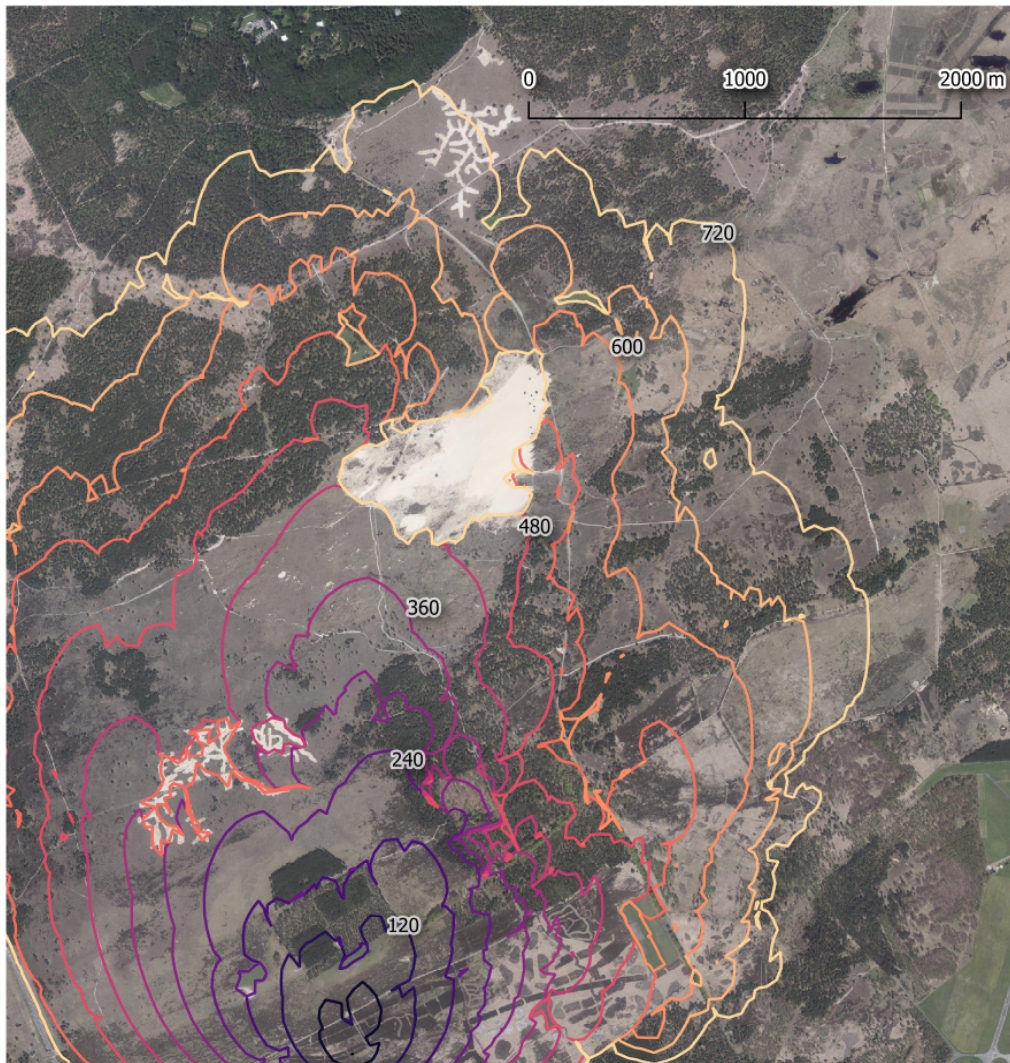
Figuur 23. De brandverspreiding in het proefgebied in minuten bij een vochtgehalte van 0.6 (gram H₂O/gram droge stof) in jonge heide (vegetatie is in de berekening aangepast en is niet in overeenstemming met de onderliggende satellietfoto) vóór de droge periode in 2003. Dit is tevens de situatie in de zomer van 2017.



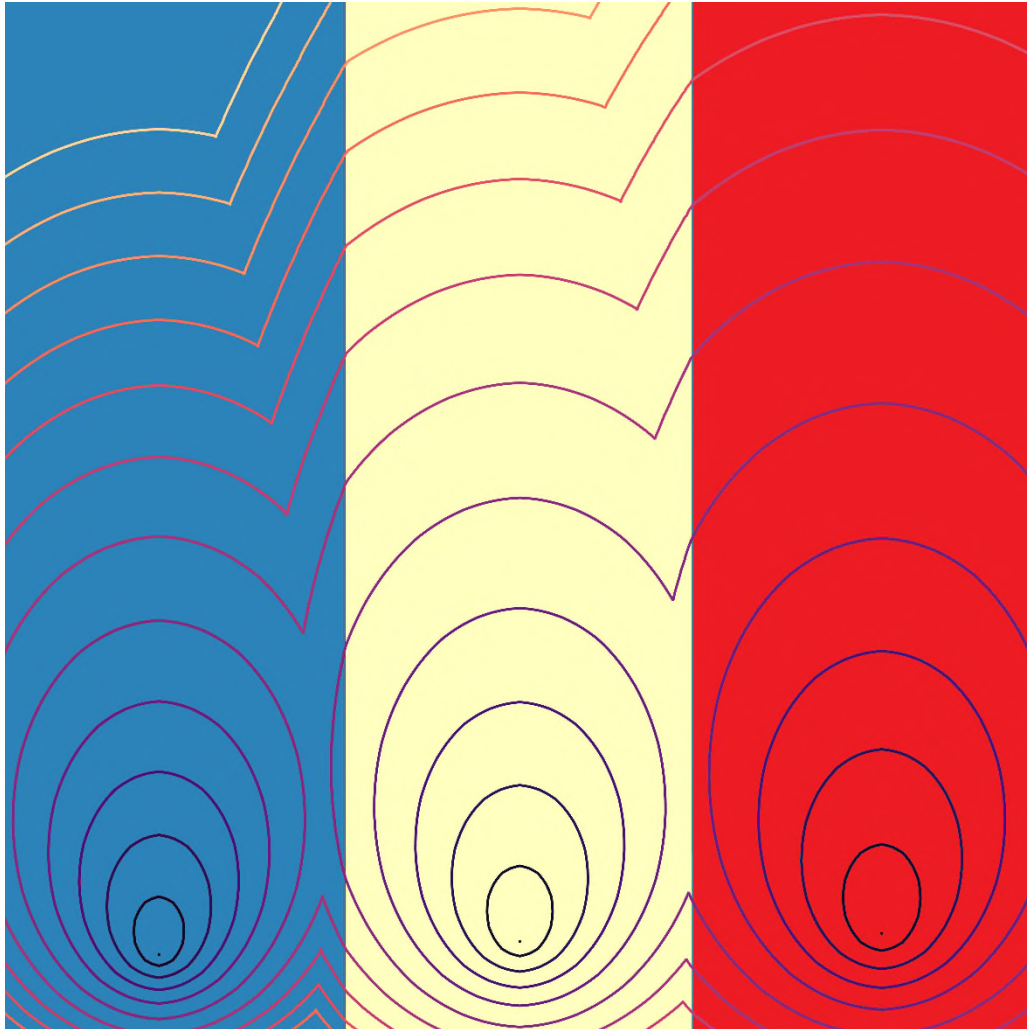
Figuur 24. De brandspreiding in het proefgebied in minuten bij een vochtgehalte van 0.53 (gram H_2O /gram droge stof) in jonge heide na de droge periode in 2003.



Figuur 25. De brandspreiding in het proefgebied in minuten bij een vochtgehalte van 0.43 (gram H₂O/gram droge stof) in jonge heide met een groot aandeel pijpenstrootje na de droge periode in 2003.



Figuur 26. Brandverspreiding in het blauwe vlak met een vochtgehalte van 0.6 (375 m/uur), in het gele vlak met een vochtgehalte van 0.53 (500 m/uur) en in het rode vlak met een vochtgehalte van 0.43 (600 m/uur) bij een windsnelheid van 5 m/s. Tussen elke lijn zit 2 uur verschil.



4 Conclusies en aanbevelingen

Dit rapport beschrijft een vochtmodule voor het simuleren van de droogtegraad van de vegetatie ten behoeve van het natuurbrandverspreidingsmodel (NBVM). De berekeningen zijn gedeeltelijk gestoeld op empirie. De kwaliteit van de achterliggende dataset van metingen is daarom zeer bepalend voor de uitkomsten van het model. Tot nu toe hebben we alleen het vochtgehalte in heide en pijpenstrootje in detail gemeten en gemodelleerd. De metingen zijn op één locatie uitgevoerd in een jaar met weinig droogte stres.

Uit onze metingen blijkt dat de hoeveelheid water per m² in heide vooral oploopt zodra deze in bloei staat. Dit komt niet zozeer doordat het vochtgehalte per gram droge stof toeneemt, maar doordat simpelweg de biomassa toeneemt. In het NBVM worden vochtgehalten gedefinieerd per gram droge stof. Dit betekent dat niet alleen de dynamiek in vochtgehalten maar ook de dynamiek van de droge stof accuraat moeten worden gemodelleerd. Dit is nog geen staande praktijk. Gezien de grote veranderingen in droge stof (Figuur 14), vooral in heide, bevelen wij aan deze dynamiek in beschouwing te nemen. Als deze dynamiek niet goed in het NBVM wordt opgenomen wordt de hoeveelheid water per vierkante meter in de begroeiing onderschat op momenten dat de biomassa toeneemt.

Naast dynamiek in droge stof, zien we ook grote verschillen in droge stof in de ruimte. Remote sensing beelden bieden hiervoor interessante mogelijkheden. Wel is het belangrijk te realiseren dat klassieke methoden gebruikmakend van NDVI (Dzieszko et al., 2012) moeite hebben om heide bijvoorbeeld te onderscheiden van een mosbegroeiing of van een naaldbos. Aanvullende gegevens van bijvoorbeeld vegetatiehoogte kunnen helpen bij een betere classificatie (Brede et al., 2013).

Gegevens van droge stof of biomassa kunnen ook helpen bij het nauwkeuriger schatten van de verdamping. Nu heeft de begroeiing in één landgebruiksklasse dezelfde verdampingseigenschappen. Op dit moment wordt in de vochtmodule LGN6 gebruikt waarin we heide als aparte klasse hebben opgenomen. Met meer gedetailleerde kaarten zouden we ruimtelijke variaties in begroeiing mee kunnen nemen in de berekeningen.

De meerwaarde van de vochtmodule wordt vooral getoond zodra een periode van langdurige droogte zich voordoet. Op dat moment geeft het module veel inzicht in de ruimtelijke verdeling van het vochtgehalte in de begroeiing. Het moment waarop een begroeiing uitdroogt is in grote mate afhankelijk van de worteldiepte en de bodemfysische eigenschappen. Deze zijn nu afgeleid uit de gegevens die worden gebruikt in het landelijk hydrologisch model (LHM). Als deze gegevens van goede kwaliteit zijn, zouden de ruimtelijke patronen die worden voorspeld met de vochtmodule moeten rijmen met bijvoorbeeld de ruimtelijke patronen in remote sensing beelden die zijn ingewonnen tijdens de droge perioden. Zo niet, dan hebben we goede aanleiding om te twijfelen aan de worteldiepte en bodemfysische eigenschappen in het model. Deze gegevens zijn van belang voor de hydrologische modellering en voor berekeningen van natuurbrandverspreiding. Een dergelijke vergelijking zou veel inzicht bieden in de betrouwbaarheid van onze modellen.

Naast dat de module getallen levert van vochtgehalten die gebruikt kunnen worden in het NBVM, kan de module worden gebruikt om de droogtegraad af te wegen tegen voorgaande jaren. Hiervoor zou een database met statistieken opgebouwd kunnen worden met de module om deze gegevens standaard te projecteren bij simulaties van vochtgehalten. Deze informatie kan bovendien worden gecorreleerd aan de frequentie van het uitrukken van de brandweer naar een bepaalde plek om aldus een voorspellingsmodel te bouwen voor brandgevaar, ongeacht of de brand door menselijk toedoen is ontstaan. Tevens zou het voorspellingsmodel uitgebreid kunnen worden om te adviseren over het benodigde materiaal en personeel bij het uitrukken naar een brand.

De brandweer heeft een eigen netwerk van meteorologische metingen waar het vochtgehalte in een stok wordt gemeten. Het is onze aanbeveling om ook het vochtgehalte in de bodem te gaan meten op dit soort locaties, omdat deze directer van invloed is op het vochtgehalte in de begroeiing. Tevens zouden deze metingen gebruikt kunnen worden om het hydrologische model, dat ten grondslag ligt aan de vochtmodule, te kalibreren. Daarnaast bevelen wij aan vaker het vochtgehalte in de begroeiing te meten. Zeker op momenten dat bijvoorbeeld heide wordt gemaaid in nationaal park de Hoge Veluwe, zou het lonen om het maaisel te wegen en een subsample te drogen om de droge stof te meten. Dit soort metingen geven over een groot gebied getallen die zeer welkom zijn bij de validatie en kalibratie van de module.

De vochtmodule levert op een unieke wijze inzicht in de droogtegraad van de begroeiing in natuurterrein met diepe grondwaterstanden. Deze gegevens zijn van groot belang nu het klimaat verandert en de kans op natuurbranden toeneemt. De module kan tevens worden gebruikt om klimaatprojecties te doen zodat we toekomstige brandgevaarlijke terreinen kunnen opsporen en deze veiliger vorm kunnen geven samen met terreinbeheerders.

Bijlage I

Handleiding voor installatie en gebruik van de vochtmodule

De vochtmodule is geprogrammeerd in Python. De gebruikte python installatie is python 2.7 die het makkelijkst te downloaden is via <https://www.anaconda.com/download/>. Hiermee wordt een groot deel van de noodzakelijke module gedownload. Daarnaast dienen de volgende pakketten nog via de anaconda prompt gedownload te worden. Anaconda prompt wordt mee geïnstalleerd bij de installatie van python via anaconda. Door in anaconda prompt het volgende in te vullen:

```
“conda install xray urllib2 basemap”
```

worden de packages xray, urllib2 en basemap geïnstalleerd.

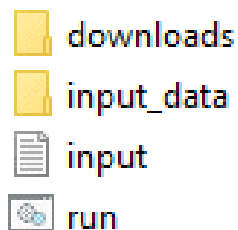
In Figuur 27 wordt de folderstructuur aangegeven waarmee de vochtmodule verwacht te werken. Onder downloads slaat de vochtmodule gegevens op die van het internet gedownload worden. Onder input_data staan de kaarten en tabellen van het landgebruik, de bodem, verdampingseigenschappen en vochteigenschappen van de begroeiing. Om invoergegevens van de module te kunnen aanpassen is een tekstbestand aangemaakt genaamd “input.txt” dat wordt ingelezen door de module (Tabel 3). Hierin worden bijvoorbeeld de datum en coördinaten aangegeven van de locatie waarvoor berekeningen uitgevoerd moeten worden. Tot 10 dagen in de toekomst kunnen voorspellingen gedaan worden. Door het woord “today” in te vullen worden deze komende 10 dagen automatisch toegevoegd. Een runfile is gemaakt om de vochtmodule op te roepen en de code te draaien. Door te dubbel klikken op het run.bat bestand wordt de vochtmodule gestart. De inhoud van de run.bat file moet verwijzen naar de python file die dus op een willekeurige plek op de computer opgeslagen kan worden. In de run.bat file staat bijvoorbeeld:

```
C:\Anaconda2\python.exe -i D:\TKI_Water_en_Vuur\vochtmodule_v01.py %*
```

i.e. de locatie met de python installatie en de locatie van het python script.

De uitvoer van de module is een kaart met vochtgehalten in de vegetatie. Hierin kan je met je muis klikken om grafieken te creëren van het vochtgehalte van de betreffende locatie (voorbeeld Figuur 21 en Figuur 22).

Figuur 27. Folderstructuur voor het gebruiken van de vochtmodule.



Tabel 3. Tekst bestand met invoergegens die worden ingelezen door de vochtmodule.

```
# coordinates of the point where analysis are made (in "decimal degrees" e.g. 5.82 or
# "degrees, minutes, seconds" e.g. 5, 49, 27.42)
lon_point = 5, 49, 27.42
lat_point = 52, 3, 5.86

# Window surrounding the point of interest that is included in the calculation in meters
# should be a multiple of the cell size, i.e. 250 m, and not larger than 100000
window = 10000

# set the day for estimating moisture
# should be between 10 March 2008 and today in format yyyymmdd or the word today
date_estimation = today

# ----- BELOW ARE RECOMMENDED SETTINGS
# prescribe the amount of days for initialization before "date_estimation" (total days),
and
# how many days with radar data is used.
total_days = 365
radar_days = 100

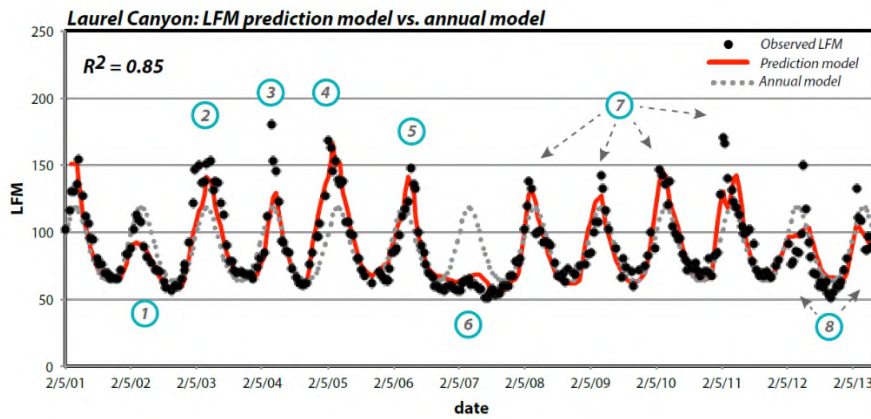
# names of input data
in_soil_par = soil_par_250_v4.nc
in_fact_svat= fact_svat_heide_Vuur.inp
luse_conv = luse_conv.inp
veg_moist = vegetaion_moisture_parameters.csv

# weather underground download key
key = be8a560b17cc78f1
location = Amersfoort
```

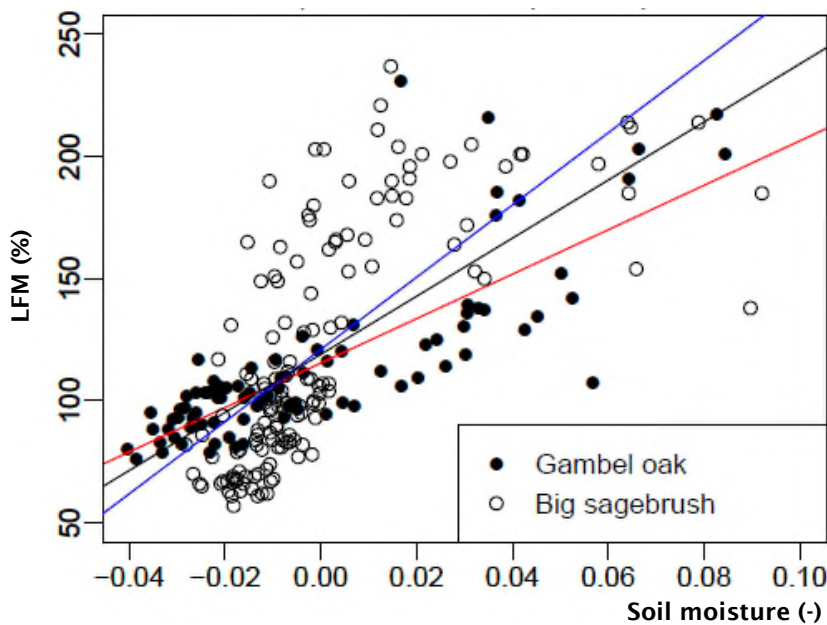
Bijlage II

Empirical relationship between soil moisture and vegetation moisture

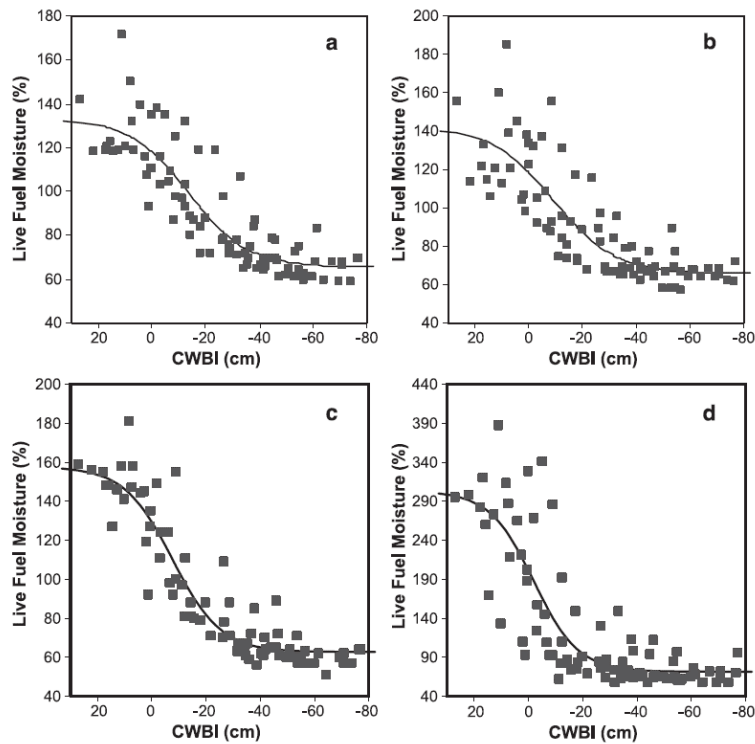
Figuur 28. The time series of live fuel moisture (LFM) prediction models of greasewood in California. Dotted line depict annual model (in which only annual cycles are included as explanatory variables). Red curve depict the LFM prediction model for which annual cycles and soil moisture (lagged by 29 days) were included as explanatory variables. Circled numbers are special episodes referred in the text of the original article. source: Figure 7 of (Fovell et al., 2015).



Figuur 29. Soil moisture at 20cm depth (m3/m3) versus live fuel moisture (%) for Gambel oak and big sagebrush in Utah. Source:Figure 5 of (Qi et al., 2012).



Figuur 30. Cumulative water balance index (CWBI) versus live fuel moisture, as a percent of dry weight, for LACFD measurements spanning 1994–1997 and 1999–2002. Model fits are shown for (a) *A. fasciculatum* at the Clark Motorway site, (b) *A. fasciculatum* at the Trippet Ranch site, (c) *C. megacarpus* at Clark Motorway, and (d) *S. mellifera* at Trippet Ranch. Source: Figure 4 of (Dennison et al., 2003)



5 Bibliografie

- Aerts, R., Berendse, F., 1989. Above-Ground Nutrient Turnover and Net Primary Production of an Evergreen and a Deciduous Species in a Heathland Ecosystem. *J. Ecol.* 77, 343–356. <https://doi.org/10.2307/2260754>
- Andrews, P.L., Butler, B.W., 2006. Fuels Management — How to Measure Success, in: *Fuels Management—How to Measure Success: Conference Proceedings*.
- Bartholomeus, R.P., Witte, J.P.M., Runhaar, J., 2011. Drought stress and vegetation characteristics on sites with different slopes and orientations. *Ecohydrology* 5, 808–818.
- Beedlow, P.A., Waschmann, R.S., Lee, E.H., Tingey, D.T., 2017. Seasonal patterns of bole water content in old growth Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). *Agric. For. Meteorol.* 242, 109–119. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.04.017>
- Boesten, J.J.T.I., Stroosnijder, L., 1986. Simple model for daily evaporation from fallow tilled soil under spring conditions in a temperate climate. *Netherlands J. Agric. Sci.* 34, 75–90.
- Brede, B., Jongerius, P., Lau, A., Schenkels, T., Vreugdenhil, C., 2013. High Resolution Mapping of Vegetation Characteristics in Sandy Ecosystems using an Unmanned Aerial Vehicle. GRS-60312 *Remote Sens. GIS Integr. Proj. WUR/KWR*.
- Dennison, P.E., Roberts, D.A., Thorgusen, S.R., Regelbrugge, J.C., Weise, D., Lee, C., 2003. Modeling seasonal changes in live fuel moisture and equivalent water thickness using a cumulative water balance index. *Remote Sens. Environ.* 88, 442–452. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2003.08.015>
- Dzieszko, M., Dzieszko, P., Krolewicz, S., Cierniewski, J., 2012. Digital aerial images land cover classification based on vegetation indices. *Quaest. Geogr.* 31, 5–23. <https://doi.org/10.2478/v10117-012-0026-4>
- Fovell, R.G., Rolinski, T., Cao, Y., 2015. A simple model for the live fuel moisture of chamise. 11th Symp. Fire For. Meteorol. 21.
- Ireson, A.M., Butler, A.P., 2013. A critical assessment of simple recharge models: application to the UK Chalk. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17, 2083–2096. <https://doi.org/10.5194/hess-17-2083-2013>
- KNMI, 2014. KNMI'14 climate scenarios for the Netherlands; A guide for professionals in climate adaptation. KNMI, De Bilt, The Netherlands.
- Ortmann, J., Stubbendieck, J., Parkhurst, A.M., 1994. Sources of Variation of Leaf Moisture Content of Eastern Red Cedar, in: *Proceedings of the 14th Annual American Prairie Conference*. pp. 31–34.
- Qi, Y., Dennison, P.E., Spencer, J., Riaño, D., 2012. Monitoring Live Fuel Moisture Using Soil Moisture and Remote Sensing Proxies. *Fire Ecol.* 8, 71–87. <https://doi.org/10.4996/fireecology.0803071>
- Saura-Mas, S., Lloret, F., 2007. Leaf and Shoot Water Content and Leaf Dry Matter Content of Mediterranean Woody Species with Different Post-fire Regenerative Strategies. *Ann. Bot.* 99, 545–554. <https://doi.org/10.1093/aob/mcl284>
- Scott, J.H., Burgan, R.E., 2005. Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model. <https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-153>
- van Walsum, P.E. V., Veldhuizen, A.A., Groenendijk, P., 2010. SIMGRO 7.1.0 Theory and model implementation. *Alterra-report* 913.1.
- Voortman, B.R., Witte, J.-P.M., n.d. Evaluatie van Verdampingssimulaties met AZURE, vergelijking met literatuurcijfers en expliciete parametrisatie van heide. *KWR Rapp.*
- Wösten, H., de Vries, F., Hoogland, T., Massop, H., Veldhuizen, A., Vroon, H., Wesseling, J., Heijkers, J., Bolman, A., 2012. BOFEK2012, de nieuwe, bodemfysische schematisatie van Nederland. *Alterra, Alterra-rapport* 2387 88.