

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra ochrany lesa a entomologie



**Česká  
zemědělská  
univerzita  
v Praze**

**Model šíření lesního požáru v podmínkách České  
republiky**

Disertační práce

Autor: Ing. Roman Berčák

Školitel: prof. Ing. Bc. Jaroslav Holuša, Ph.D.

Praha

2024

**Czech University of Life Sciences Prague**

Faculty of Forestry and Wood Sciences

Department of Forest Protection and Entomology



Czech  
University  
of Life Sciences  
Prague

**Model of forest fire spreading in the conditions of the  
Czech Republic**

Ph.D. Thesis

Author: Ing. Roman Berčák

Supervisor: prof. Ing. Bc. Jaroslav Holuša, Ph.D.

Prague

2024

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

## ZADÁNÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Roman Berčák

Protipožární ochrana lesa, dřevěných materiálů a materiálů na bázi dřeva

Název práce

Model šíření lesního požáru v podmínkách České republiky

Název anglicky

Model of forest fire spreading in the conditions of the Czech Republic

---

Cíle práce

- Kvantifikovat pozemní palivo v lesních porostech
- Vytvořit palivové modely pro české podmínky
- Stanovit míru spalného tepla jednotlivých segmentů pozemního paliva
- Verifikovat software pro modelování šíření požáru v podmínkách České republiky

Metodika

V závislosti na věku, dřevinné skladbě a ekologické řadě bude v lesních porostech kvantifikováno pozemní palivo. Kvantifikace bude zaměřena na popis struktury bylinného patra a budou váženy jednotlivé segmenty paliva (drobné dřevo, byliny, hrabanka, humus), následně bude laboratorně zjišťována jejich vlhkost a dopočítána hmotnost sušiny paliva.

Na základě výsledků z kvantifikace paliva, morfologických znaků a teoretických poznatků budou vhodnými statistickými metodami vytvořeny palivové modely. Palivové modely budou sjednocovat porosty s podobnou strukturou a množstvím paliva.

Jednotlivé segmenty pozemního paliva budou testovány na produkci spalného tepla v kalorimetru. Na základě zjištěných informací o produkci spalného tepla, množství paliva a dalších znaků bude dopočítáno množství tepelné energie, které jsou jednotlivé palivové modely schopny produkovat.

Data získaná z terénních a laboratorních měření budou zakomponována do vstupních dat pro testování softwaru pro modelování šíření lesního požáru. Software bude testován zpětným analyzováním reálných lesních požárů. Tyto požáry budou

předtím detekovány v terénu a budou zjištěny veškeré informace potřebné pro testování softwaru.

#### Doporučený rozsah práce

Předložit soubor publikovaných vědeckých prací s komentářem.

---

#### Doporučené zdroje informací

- ANDREWS, P. L. BEHAVE: fire behaviour prediction and fuel modeling system – BURN subsystem, Part 1. USDA Forest Service, Intermountain Research Station, Ogden, Utah. General Technical Report INT-194. 1986, 130 p.
- FINNEY, M. A. FARSITE: Fire Area Simulator – Model Development and Evaluation. Rocky Mountain Research Station, Forest Service, United States Department of Agriculture. 1998, 47 p.
- Forestry Canada Fire Danger Group. Development and structure of the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System. Forestry Canada Science and Sustainable Development Directorate, Information Report ST-X-3. Ottawa, Ontario, 1992.
- MELL, W.; JENKINS, M. A.; GOULD, J.; CHENEY, P. A physics based approach to modeling grassland fires. Int. J. Wildland Fire. 2007, 16: 1–22.
- ROTHERMEL, R. C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. USDA: Forest Service Research Paper INT-115. 1972.
- ROTHERMEL, R. C.; ANDERSON, H. E. Fire spread characteristics determined in the laboratory. 1966.
- SULLIVAN, A. L. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 1: Physical and quasi-physical models. International Journal of Wildland Fire. 2009b, 18: s. 349–368.
- SULLIVAN, A. L. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 2: Empirical and quasi-empirical models. International Journal of Wildland Fire, 2009b, 18: s. 369–386.
- SULLIVAN, A. L. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 3: Simulation and mathematical analogue models. International Journal of Wildland Fire. 2009c, 18: s. 387–403.
- THOMAS E. A., MCALPINE R. S. Fire in the forest. Cambridge, New York, Melbourne, Madrid, Cape Town, Singapore, Sao Paulo, Delhi, Dubai, Tokyo, Mexico City, Cambridge Univ. Press, 2010, 225 s.
- 

#### Předběžný termín

2022/23 LS – FLD – SDZ

#### Vedoucí práce

prof. Ing. Jaroslav Holuša, Ph.D.

#### Garantující pracoviště

Katedra ochrany lesa a entomologie

Elektronicky schváleno dne 20. 01. 2021

prof. Ing. Jaroslav Holuša, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 20. 01. 2021

prof. Ing. Jaroslav Holuša, Ph.D.

Předseda oborové rady

Elektronicky schváleno dne 20. 01. 2021

prof. Ing. Róbert Marušák, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 10. 05. 2024



„Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma Model šíření lesního požáru v podmínkách České republiky vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací a doporučení školitele.

Souhlasím se zveřejněním disertační práce dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.“

V Praze dne 10.5.2024

Podpis autora

## **Poděkování**

Touto cestou bych rád poděkoval všem kolegům, přátelům a odborníkům z oblasti protipožární ochrany lesa, za předání neuvěřitelného množství znalostí, zkušeností, nápadů a motivace, což mi pomáhalo a neustále pomáhá se rozvíjet v oblasti problematiky lesních požárů. Bez těchto ucelených teoretických i praktických znalostí bych nedokázal celou problematiku dostatečně pochopit a vznik této práce by tedy nebyl možný. Velké díky patří mému školiteli prof. Ing. Bc. Jaroslavu Holušovi, Ph.D. za jeho vedení v průběhu celého studia, za uvedení mne do světa vědy a nasměrování mne správným směrem, stejně tak za „otevření spousty dveří“ díky jeho profesionalitě a akademickému postavení. V neposlední řadě patří poděkování mojí rodině, za skrytou ale neúnavnou podporu.

## Abstrakt

K modelování velikosti lesních požárů a analýze základních požárních charakteristik je nezbytná znalost paliva, které se na povrchu lesní půdy nachází. Samotnému modelování tedy předcházela vývoj palivových modelů. Ve vytipovaných porostech probíhala kvantifikace pozemního paliva, tedy zjišťování množství a struktury pozemního paliva. Jednotlivá měření byla rozdělena do kategorií definovaných věkem porostu, převládající dřevinnou a lesním typem. Na základě zjištěných hodnot z terénního průzkumu byly Analýzou hlavních komponent a Clusterovou analýzou K-průměrů definované kategorie rozděleny do 4 palivových modelů. Pro účely zjištění základních požárních charakteristik byla dále zjišťována hodnota tepelné energie, která se při spalování uvolňuje z jednotlivých částí (segmentů) pozemního paliva. Všechny tyto předchozí výsledky byly následně využity pro dopočítání základních požárních charakteristik (rychlost šíření požáru, intenzita požáru a délka plamene) pomocí kalkulací Rothermelova matematického modelu šíření pozemního požáru (Rothermel 1972). Funkčnost a využitelnost palivových modelů byla následně testována zpětnou analýzou reálných požářišť, kdy na základě vstupních údajů o palivu, meteorologické situaci, topografii byla modelována velikost požáru pomocí kalkulací principu dvojité elipsy (Albini 1976a).

V rámci dizertační práce byly identifikovány následující palivové modely. Palivový model PM1 - Travniny s dominantním zastoupením travin na ploše a s vysokou náchylností zapalitelnosti. Model často se vyskytující na otevřených plochách (holinách), případně starých výrazně rozvolněných porostech. Druhým palivovým modelem byl PM2 – Byliny, mechy, který dominuje zejména v borových porostech, případně v dubových porostech na písčitých půdách. Model je identifikován jako středně zapalitelný, nicméně s potenciálem nejvyšší intenzity požáru. Třetím palivovým modelem byl model PM3 – Hrabanka s dominantním zastoupením opadu a hrabanky, vyskytující se převážně na stanovištích smrkových monokultur, případně doubravy středního a vyššího věku. Posledním palivovým modelem byl model PM4 – Neutrální, ve kterém nedominuje žádný ze segmentů pozemního paliva. Vyskytuje se především v mladých smrkových porostech, nebo listnatých porostech středního a vyššího věku. Model se vyskytuje obvykle v místech s vyšší vlhkostí paliva, což podporuje i celkovou nízkou zapalitelnost.

Zpětným testováním reálných požářišť byla ověřována použitelnost palivových modelů a využitelnost kalkulací Rothermelova matematického modelu pro účely definování základních požárních charakteristik. Při srovnání velikosti reálných požářišť s hodnotami predikovanými

modelem (Rothermel 1972; Albini 1976a) jsme dosáhli hodnoty Pearsonova korelačního koeficientu 0,78 s koeficientem determinace 0,61. Tyto výsledky poukazují na poměrně slušnou spolehlivost modelu, ale zároveň na nutnost další kalibrace palivových modelů zejména pak v oblasti vstupní vlhkosti paliva. Stejně tak závěry doporučují rozšíření palivových modelů pro účely využití na kalamitních plochách.

Práce v posledních částech seznamuje se způsobem praktické identifikace palivových modelů a navrhuje možné způsoby využití v rámci zdolávání lesních požárů v podmínkách České republiky, stejně tak využití palivových modelů v dalších prvcích protipožární ochrany lesa.

**Klíčová slova:** palivový model, šíření požáru, modelování

## **Abstract**

In order to model the size of forest fires and analyze the basic fire characteristics, knowledge of the fuel on the forest surface is essential. Therefore, the modeling itself was preceded by the development of fuel models. Surface fuel was quantified in the selected stands where the amount and structure of ground fuel were determined. The individual measurements were divided into categories defined by the age of the stand, predominant tree species, and forest "soil" type. Based on the values found from the field research, individual categories were divided into 4 fuel models defined by Principal Component Analysis and Cluster Analysis of K-means. To the possibility of determination the basic fire characteristics, the value of thermal energy, which is released from individual parts (segments) of forest surface fuel during combustion, was also determined in the laboratory. All these previous results were subsequently used to calculate the basic fire characteristics (rate of speed, fireline intensity, and flame length) using the calculations of Rothermel's mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels (Rothermel 1972). The functionality and usability of the fuel models were subsequently tested by back-analysis of real fire events. The size of the fires was modeled using calculations described as the double ellipse principle (Albini 1976a) based on input data on the fuel, meteorological situation, and topography.

The following fuel models were identified. Fuel model PM1 - Grasses with a dominant representation of grasses, and with high ignitibility potential. A model often found on open areas (clear-cuts) or old, significantly loosened forest stands. The second fuel model was PM2 – Herbs, and mosses, which dominate especially in Scots pine stands, or in oak stands on sandy soils. The model is identified as moderately ignitable, however, with the potential for the highest fireline intensity. The third fuel model was model PM3 – Litter with a dominant representation of litter, occurring mainly in forest stands of Norway spruce monocultures, or oak forests of middle and older age. The last fuel model was the PM4 - Neutral model, where no surface fuel segment dominates. It occurs mainly in young spruce stands, or deciduous stands of medium and older age. The model is usually found in places with a higher fuel moisture content which also supports the overall low ignitability.

By backtesting the reliability of fuel models and at the same time verifying the applicability of Rothermel's mathematical model, we achieved a Pearson correlation coefficient of 0.78 with a coefficient of determination of 0.61 by comparing real fire sizes with values predicted by the model (Rothermel 1972; Albini 1976a). These results point to relatively decent reliability but at the same time to the necessity of further calibration of fuel models, especially



in the area of fuel moisture. Likewise, the conclusions suggest the possibility of expanding fuel models for the purposes of use in forest disturbance areas.

The thesis in the last part introduces the methods of practical identification of fuel models and suggests possible ways of use in forest fire suppression operations in the conditions of the Czech Republic, as well as the use of fuel models in other elements and pillars of protection against forest fires.

**Keywords:** fuel model, fire spreading, modelling

# Obsah

1	Úvod .....	13
2	Cíle práce.....	16
3	Literární rešerše .....	17
3.1	Teorie hoření.....	17
3.2	Proces hoření .....	18
3.3	Přenos tepelné energie .....	22
3.4	Dynamika extrémních jevů lesních požárů .....	24
3.5	Co ovlivňuje šíření lesního požáru .....	29
3.6	Modely chování se lesních požárů.....	45
3.7	Rothermelův matematický model šíření pozemního lesního požáru .....	50
3.8	Palivové modely pro účely modelování šíření lesního požáru .....	61
3.9	Intenzita a závažnost požáru.....	65
4	Metodika.....	67
4.1	Kvantifikace pozemního paliva .....	67
4.2	Spalné teplo jednotlivých segmentů pozemního paliva .....	70
4.3	Přirazení výsledků spalného tepla do databáze kvantifikace paliva.....	72
4.4	Přepoččet spalného tepla na výhřevnost.....	72
4.5	Závažnost požáru aneb množství vyhořelé biomasy .....	72
4.6	Teplota žhnutí, vzplanutí a vznícení.....	73
4.7	Zařazení k palivovým modelům .....	73
4.8	Identifikované vlastnosti palivových modelů.....	75
4.9	Validace palivových modelů na reálných požářištích .....	82
4.10	Grafické znázornění struktury dizertační práce.....	87
5	Výsledky.....	88
5.1	Popisné statistiky kvantifikace pozemního paliva.....	88

5.2	Spalné teplo jednotlivých segmentů pozemního paliva .....	91
5.3	Teplota vzplanutí a vznícení jednotlivých segmentů pozemního paliva .....	92
5.4	Zařazení k palivovým modelům .....	93
5.5	Identifikované vlastnosti palivových modelů .....	99
5.6	Vzájemné srovnání palivových modelů .....	104
5.7	Validace palivových modelů na reálných požářištích .....	107
6	Způsoby implementace palivových modelů do praxe .....	124
6.1	Způsob identifikace palivových modelů .....	124
6.2	Kapesní průvodce pro potřeby velitelů zásahů při zdolávání lesního požáru .....	128
6.3	Aplikace v telefonech, tabletech velitelů zásahu .....	129
7	Diskuze .....	130
7.1	Základní metodické úvahy .....	130
7.2	Identifikované palivové modely .....	137
7.3	Způsoby identifikace palivových modelů .....	147
7.4	Validace na reálných požářištích .....	148
7.5	Úvahy využitelnosti palivových modelů .....	152
7.6	Aplikace zastřešující problematiku lesních požárů .....	157
8	Závěr .....	159
9	Literatura .....	160
10	Seznam obrázků, grafů a tabulek .....	177
10.1	Seznam obrázků .....	177
10.2	Seznam grafů .....	179
10.3	Seznam tabulek .....	179
11	Přílohy .....	183

# 1 Úvod

Lesní požáry nebo obecně požáry v přírodním prostředí označované jako „wildfires“ jsou ničivým faktorem, který po celém světě každoročně spolyká miliony hektarů lesa (San-Miguel-Ayanz et al. 2023). Ničivý charakter těchto požárů si uvědomují zejména v částech naší planety, ve kterých se dlouhodobě vyskytují podmínky velmi příhodné pro vznik a šíření požárů. Za nejznámější příklady lze uvádět například oblast Kalifornie ve Spojených státech amerických, Austrálii a na starém kontinentu státy jižní Evropy jako Portugalsko, Španělsko, Itálii nebo Řecko. Tyto „požáru přátelské“ země jsou označovány v terminologii problematiky požárů v přírodním prostředí jako tzv. „fire-prone countries“ (Meng et al. 2015). Právě zájem lidí a nutnost porozumět požárům v přírodním prostředí, zejména v těchto oblastech, po desítky let formoval a neustále formuje obor nazývaný protipožární ochrana lesa a přírodního prostředí (např. Riebold 1971; Van Wagendonk 2007).

S ohledem na měnící se klimatické podmínky však významnost problematiky lesních požárů narůstá (Možný 2021; Trnka 2021) i v zemích, kde v minulosti požáry v přírodním prostředí nepředstavovaly výraznější hrozbu. K těmto zemím se řadí i Česká republika. Z toho důvodu je vytváření podmínek pro budování a zlepšování pěti hlavních pilířů (vyhodnocování náchylnosti, prevence, připravenost, hašení a regenerace) protipožární ochrany lesa a přírodního prostředí základním předpokladem úspěchu, a to i v případě, že bude nadále růst význam tohoto ničivého činitele (Casartelli & Mysiak 2023).

Problematika lesních požárů na území České republiky zůstávala dlouho pouze okrajovou záležitostí vědců, pedagogů a dalších osob zabývajících se ochranou lesa (např. Pfeffer 1961; Kunt 1967; Stolina 1985; Kula 1985a; Kula & Jankovská 2013). Je pochopitelné, že se odborníci na ochranu lesa soustředili na jiné problémy, které naše lesní prostředí v minulosti výrazně trápily a nadále trápí jako jsou poškození porostů větrem, kůrovci (Scolytinae) nebo historicky bekyní mniškou (*Lymantria monacha*, L.), případně ploskohřbetkami (*Cephalcia* sp.). Z výše uvedeného je evidentní, že lesním požárům nebyla věnována velká pozornost a výzkum nebo vzájemná provázanost výzkumu s praxí byly pouze okrajovou záležitostí, stejně tak snaha o vybudování komplexního systému protipožární ochrany lesa. Tuto skutečnost změnil až požár v Národním parku České Švýcarsko v roce 2022 (Pronto et al. 2023), který poukázal nejen na to, že se v České republice nebo celé střední Evropě mohou vyskytovat podmínky prostředí, které mohou způsobit požáry s vysokou intenzitou, zasahovat rozsáhlé plochy, ovlivňovat život obyvatelstva a v neposlední řadě ohrožovat jejich majetek (Berčák et al. 2023), ale také odhalil potřebu výrazně zlepšit nebo dokonce od základu

vybudovat celý systém protipožární ochrany na území České republiky. K tomuto úkolu se velmi ochotně postavilo Generální ředitelství Hasičského záchranného sboru České republiky, které během zásahu vnímalo různá úskalí ať už v připravenosti krajiny pro boj s požáry (cestní síť, vodní zdroje, množství paliva), tak s vlastními zkušenostmi hasičských jednotek při boji s rozsáhlými a intenzivními lesními požáry, stejně tak v jistém ohledu limitující dostupností letecké techniky pro tento typ lesních požárů (Ošlejšek 2022). Odezvou na tuto skutečnost byla žádost Generálního ředitelství Hasičského záchranného sboru České republiky o podporu budování národní protipožární ochrany lesa s pomocí Evropské unie. Výsledkem této snahy jsou projektové příležitosti a poradní mise ze strany institucí Evropské unie mající za cíl položit základy funkční a kontinuálně se vyvíjející problematice ochrany lesa před požáry na našem území (Berčák pers.).

Jedním ze základních předpokladů správného nastavení a smysluplnosti fungování systému protipožární ochrany lesa vychází ze znalosti prostředí, pro které je tento systém budován (Casartelli & Mysiak 2023). V případě lesního prostředí České republiky nás zajímá především povrch lesní půdy a jeho charakteristiky. Studium struktury a množství pozemního paliva ve vztahu s potenciálem vzniku, šíření a intenzitou lesního požáru se však na území České republiky doposud nikdo nezabýval. Tato studie tak poskytuje první pohled na povrch lesní půdy ve vztahu s problematikou lesních požárů.

Při popisu povrchu lesní půdy lze množství informací najít v lesnické typologii (Plíva 1971, 1987; Dujka & Kusbach, 2022) a fytoecologii (Zlatník 1978). Tyto lesnické disciplíny dokážou velice citlivě popsat například vodní potenciál stanoviště, jeho úživnost a nejčastější květenu nacházející se na dané ploše. Alespoň částečnou znalostí těchto disciplín však disponují pouze lesnický vzdělaní lidé. Navíc lesnická typologie ani fytoecologie neposkytuje tu nejdůležitější informaci z hlediska předpokladu hoření a šíření požárů, a to informaci o tepelné energii uložené v daném palivu na daném prostoru. Proto se k analýze prostředí využívá jiného přístupu, který je propojením terénního výzkumu se znalostmi lesnické typologie, fytoecologie, doprovázené laboratorním výzkumem, a to vývojem komplexních palivových modelů (např. Rothermel 1972; Albini 1976a; Anderson 1982; Scott & Burgan 2005).

Palivové modely charakterizují a kategorizují prostředí do zjednodušeného systému s ohledem na předpoklad vzniku a šíření požáru (Anderson 1982; Santoni et al. 2011; Sá et al. 2023). Palivové modely jako takové jsou uplatitelné prakticky ve všech výše zmiňovaných pilířích problematiky. Nesou informaci, která dokáže v kombinaci s jinými faktory predikovat určitý potenciál vzniku požáru v daném prostředí tzv. náchylnost prostředí, která slouží primárně pro strategická rozhodnutí v oblasti budování protipožární ochrany (Casartelli &



Mysiak 2023). Výsledky hodnocení náchylnosti prostředí by měly dále vést k lepší optimalizaci prevence vzniku lesních požárů a také ke zvýšení připravenosti daného lesního prostředí na případný boj s lesními požáry. V případě vzniku požáru jsou palivové modely schopné poskytovat informaci o potenciálu šíření požáru nebo definovat základní požární charakteristiky (Casartelli & Mysiak 2023).

K získání informace o konkrétních požárních charakteristikách jako rychlost šíření požáru, intenzita fronty požáru, délka plamene, předpokládaná plocha požáru aj. je nutné implementovat palivové modely do některých z modelů (softwarů). Tyto modely dokážou na základě vstupní informace palivového modelu (množství paliva, struktura paliva, výška a množství tepla v něm uložené) s přispěním meteorologické a topografické informace parametrizovat tyto požární charakteristiky (Rothermel 1972; Vasconcelos & Guertin 1992; Finney 1998; Lopes et al. 2002 a další).

Tato práce je snahou o definování palivových modelů a jejich aplikaci v existujícím modelu šíření pozemního požáru (Rothermel 1972) s validováním výsledků. Dále o navržení dalších dílčích výzkumů pro účely zpřesnění a dalšího vývoje palivových modelů. V poslední řadě pak pro účely využitelnosti těchto informací v praxi při zdolávání lesních požárů.

## 2 Cíle práce

Prvním cílem práce bylo vytvořit vhodnou metodiku kvantifikace pozemního paliva tak, aby informace získaná tímto terénním výzkumem byla dále aplikovatelná pro účely vývoje palivových modelů a obsahovala tak všechny nezbytné proměnné. Následně pak s respektováním navržené metodiky bylo analyzováno dostatečné množství studijních ploch pro účely vývoje palivových modelů.

Druhým cílem práce bylo na základě terénního výzkumu definovat palivové modely pro podmínky České republiky. K tomuto účelu posloužilo použití vhodných statistických metod, které definovaly bližší vztahy testovaných studijních ploch a pomohly je zařadit do jednotlivých palivových modelů.

Třetím cílem práce bylo laboratorně stanovit množství tepelné energie, které se v jednotlivých typech paliva nachází, a to pomocí spalovací kalorimetrie. Právě informace o spalném teple jednotlivých segmentů, ze kterých je palivo složeno, byla zásadní pro možnosti dalšího využití v rámci čtvrtého cíle studie – stanovování požárních charakteristik palivových modelů.

Čtvrtým cílem bylo verifikovat informaci obsaženou v palivovém modelu v rámci existujícího modelu šíření požárů a ověřit tak jeho použitelnost zpětným analyzováním reálných požářišť. Pro účely stanovení požárních charakteristik byl vybrán Rothermelův matematický model šíření pozemního požáru (Rothermel 1972) s využitím prostorových charakteristik (plocha požářiště) od Franka Albinho (Albini 1976a), jejichž kalkulace jsou základem velkého množství všech běžně používaných software pro modelování šíření požárů jako Farsite (FlamMap), Behave, Firemap, Pyrocart, Firemaster a další. Právě rozhodnutí využít původní kalkulace Rothermelova modelu se ukázalo jako zásadní při snaze o pochopení fungování všech výpočtů a pro správné nastavení hodnot palivových modelů.

## 3 Literární rešerše

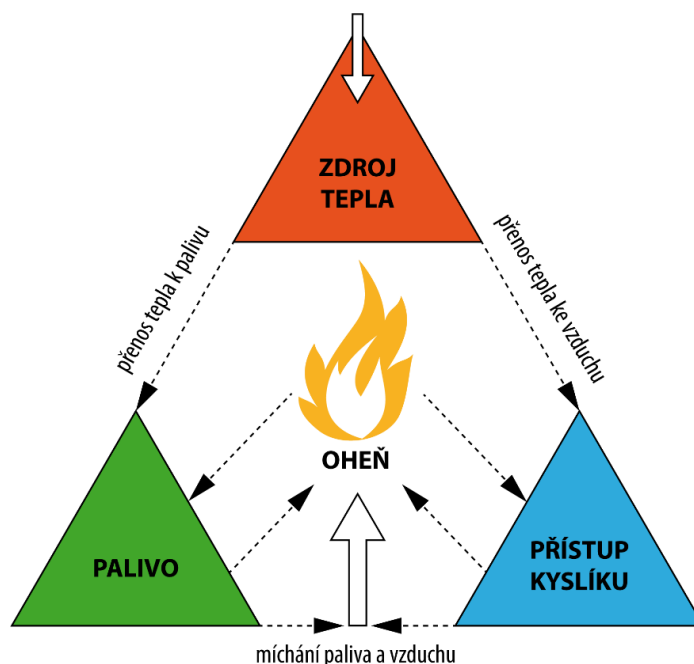
### 3.1 Teorie hoření

Hoření je reakce vedoucí k velmi rychlému uvolňování energie, která je uložena v palivu, konkrétně je definováno jako fyzikálně chemická reakce, kdy dochází za vysoké rychlosti k reakci hořlavé látky s oxidačním prostředkem (nejčastěji kyslíkem) a vzniká teplo a světlo. Jedná se o exotermickou reakci (Kvarčák 2005). Rostliny využívají energii slunce společně s oxidem uhličitým a vodou za účelem výroby uhlíkových sloučenin (cukrů, škrobu, celulózy atd.) a kyslíku. Naopak v případě, že rostlina odumře a rozkládá se, potřebuje kyslík k rozbití uhlíkových sloučenin k uvolnění oxidu uhličitého, vody a malého množství tepla. Hoření je tak formou rozkladu, která uvolňuje oxid uhličitý, vodu a teplo mnohonásobně rychleji (Thomas & McAlpine 2010).

Hoření přírodního porostu se charakterizuje jako hoření celého souboru organických materiálů, ze kterých je tento porost složený. Problematická u těchto požárů je především skutečnost, že předem nelze jednoznačně definovat hořící soubor, který se v čase a prostoru neustále mění (Hlaváč & Chromek 2016; Pecl et al. 2022). Zjednodušeně definovat tento hořící soubor stojí za vývojem tzv. palivových modelů (Anderson 1982; Scott & Burgan 2005).

K hoření je však vždy nezbytná interakce tří prvků tzv. trojúhelníku hoření (Emmons 1973), který jako první zmínil ve své práci Antoine Lavoisier (1743-1794), který tak vyvrátil do té doby akceptovanou teorii flogistonu (Chang 2010). Mezi prvky nezbytné pro vznik hoření řadíme zdroj tepla (iniciátora hoření), palivo (materiál, který bude hořet) a oxidační činidlo (v případě lesního požáru kyslík). Pokud jeden z těchto prvků z trojúhelníku hoření chybí, hoření nemůže vzniknout (Obr. 1) (Emmons 1973).

Na těchto jednoduchých základech trojúhelníku hoření jsou postaveny některé principy protipožární ochrany. Například omezení nebo zákaz některých činností v lese je snahou dostat nejčastějšího iniciátora hoření z prostoru lesa, tedy člověka (Thomas & McAlpine 2010). Kontrolované vypalování jako jeden z principů protipožární ochrany uplatňovaný zejména ve Spojených státech amerických nebo jižní Evropě je zase snahou o eliminaci hořlavého materiálu v prostoru, tedy paliva (Pecl et al. 2021).



Obr. 1: Trojúhelník hoření podle Emmons 1973 (Pecl et al. 2021).

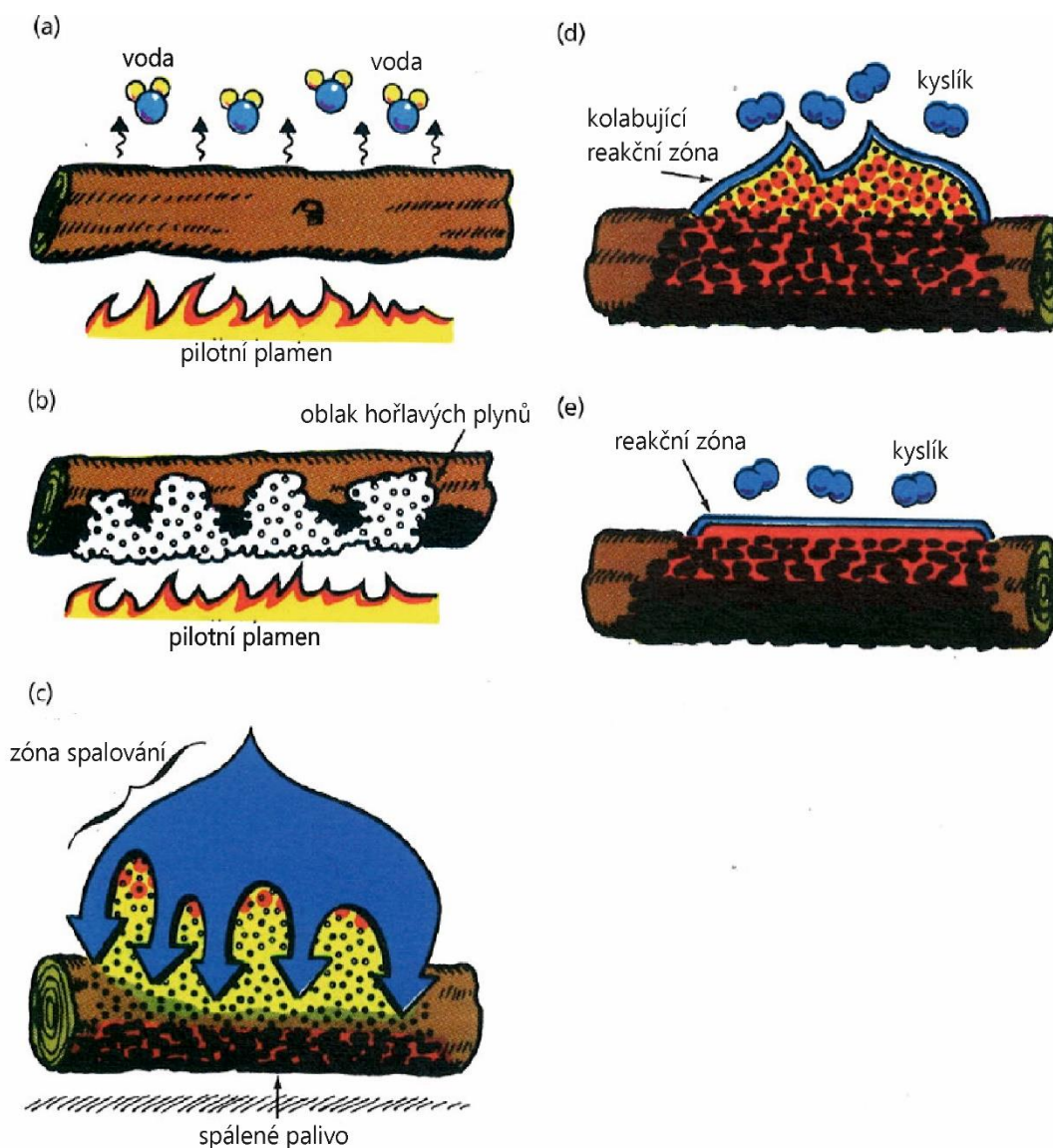
## 3.2 Proces hoření

V případě působení tepla na hořlavý materiál, např. dřevo, můžeme tento proces rozdělit do tří fází: fáze před vznícením, vznícení a spalování (Thomas & McAlpine 2010).

### 3.2.1 Před vznícením

V první fázi, kdy teplo působí na dřevo je energie zpočátku absorbována vodou nacházející se ve dřevě. Avšak s rostoucí teplotou dochází k odpařování vody na povrchu dřeva. V tomto okamžiku je díky odpařování se vody teplota povrchu dřeva přibližně 100 °C (Obr. 2a). Voda se z části dřeva, na které působí teplo odpařuje nejen do vzduchu, ale je tlačena i do hlubších vrstev dřeva, čímž dochází ke zvyšování vlhkosti v těchto vrstvách. V okamžiku, kdy je povrch dřeva suchý není již teplota udržována na 100 °C zapříčiněná odpařováním vody, a tak se teplota začíná zvyšovat. V důvodu zvyšující se teploty se začínají ze dřeva odpařovat další látky jako terpeny, tuky, oleje a pryskyřice. Tyto látky vytvářejí oblak hořlavých plynů nad palivem (Obr. 2b). Když dřevo dosáhne teploty kolem 130-190 °C, začne se chemicky rozkládat a při teplotě nad 260 °C se začíná spalovat celulóza ve dřevě a vzniká typický černý zuhelnatělý povrch spalovaného dřeva (téměř čistý uhlík) a šedý kouř dřevěného alkoholu a dehtových plynů. Lignin se začíná spalovat až při vyšší teplotě (280-500 °C), na rozdíl od celulózy produkuje spalování ligninu méně plynů, avšak více uhlíku (zuhelnatělý povrch). Dehet v plynném stavu a kondenzované kapičky významně přispívají k vytváření hořlavých

plynů kolem dřeva. Toto rozložení paliva na hořlavé plyny se nazývá pyrolýza (Babrauskas 2002; Cottrell 2004).



Obr. 2: Proces hoření (Cottrell 2004; Thomas & McAlpine 2010).

### 3.2.2 Vznícení

Pokud se tzv. pilotní plamen (plamen, který tepelně působil na dřevo) dotkne mraku hořlavých plynů, který se vytvořil okolo nezapáleného dřeva, zapálí jej a vytvoří samonosný plamen (to znamená, že již není zapotřebí pilotního plamene). Ke vznícení plynů unikajících ze dřeva za pomoci pilotního plamene dochází při teplotě 320-350 °C (Obr. 2c). V případě, že teplota unikajících plynů dosáhne teploty přibližně 600 °C, vznítí se bez pomoci pilotního plamene (samovznítí se) (Babrauskas 2002; Cottrell 2004).



### 3.2.3 Spalování

Sálavé teplo z tzv. plamenné spalování („flaming combustion“) pokračuje v procesu pyrolýzy. Sálavé teplo taktéž přehřívá a zapaluje okolní nespálené dřevo, které je vzápětí pohlceno požárem a způsobuje tak šíření požáru. Není to samotné dřevo, které hoří, jsou to plyny uvolněné pyrolýzou, které hoří nad povrchem dřeva (Thomas & McAlpine 2010).

Samotný plamen se skládá ze středového jádra nehořlavých plynů obklopených tenkou spalovací „vrstvou“ (tzv. reakční zónou), kde se dostatečné množství kyslíku mísí s plyny, což umožňuje spalování. Čím je teplota ohně vyšší, tím dochází k většímu uvolňování hořlavých plynů, které se dostávají do větší vzdálenosti od spalovaného povrchu předtím, než dojde ke smíšení s dostatečným množstvím kyslíku a vzplanutí (větší plamen). To je také důvod, proč poryv větru nad táborovým ohněm způsobuje náhle menší plameny, neboť jsou hořlavé plyny míseny s větším množstvím kyslíku, dole v blízkosti paliva a dochází ke vzplanutí (menší plamen) (Cottrell 2004; Thomas & McAlpine 2010).

Vedlejší produkty hoření jsou především oxid uhličitý a voda. Může se zdát překvapující, že hoření produkuje vodu, ale hoření je jednoduchý opak fotosyntézy. Ve skutečnosti 1 kg hořícího suchého rostlinného materiálu vyprodukuje asi 0,56 kg vody plus jakoukoliv vlhkost, která byla v palivu v době hoření. Při lesních požárech může být vodní pára, která se okolo požáru nachází, důležitá pro hoření jakožto „ředidlo“ hořlavých plynů (Cottrell 2004; Thomas & McAlpine 2010).

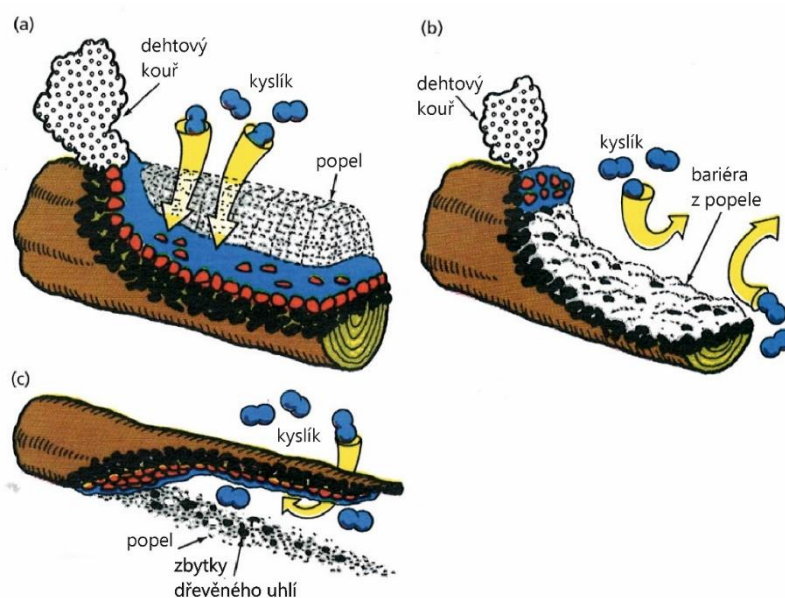
Běžně 50-95 % uhlíku, který se uvolní z paliva má formu oxidu uhličitého, zbytek tvoří složky dýmu, což je složitá směs plynů a částic sdružených s vodními parami. Saze se vytváří z úlomků uhlíku, dehtu a dalších chemikálií, které se společně shlukují nebo se shlukují okolo drobných fragmentů v okolí reakční zóny a září, čímž vzniká oranžová až červená barva centrální části plamene. Částice sazí, které uniknou nad plamen a neshoří se rychle ochlazují a zbarvují kouř nad ohněm do černé barvy. Obecně platí, že intenzivnější požáry vytvářejí více kouře, protože se zdá, že s větším plamenem vzniká více turbulentního proudění vzduchu a více plynových kapes, a tak saze unikají nespálené nad plamen. Částice sazí musí být vystaveny teplotě nad 800 °C za přítomnosti velkého množství kyslíku, aby byly účinně spáleny (Cottrell 2004; Thomas & McAlpine 2010).

Jak dřevo hoří, spálený uhlík a popel vytváří vrstvu pokrývající dřevěnou plochu, a ačkoliv stále probíhá pyrolýza, uvolňované plyny již nestačí podporovat plameny (Obr. 2d). V tomto okamžiku plameny zhasnou a plamenné spalování končí. Pokud je však teplota povrchu dřeva nad 500-600 °C a kyslík se dokáže dostat na jeho povrch, samotný uhlík na

povrchu začíná hořet doutnavým nebo žhnoucím spalováním. Žhnoucí spalování je to, co spaluje uhlí při grilování – horká záře bez kouře nebo plamene (Obr. 2e) (Cottrell 2004; Thomas & McAlpine 2010).

Při žhoucím (žhavém) spalování je spalován spíše uhlík na povrchu dřeva než plyny, které ze dřeva unikají. Teplo nadále rozkládá uhlíkové řetězce zuhelnatělého dřeva, které se mísí s kyslíkem na povrchu dřeva a hoří, avšak spíše než plameny tak oranžovou září (Obr. 3a). Pokud je omezené množství kyslíku uvnitř paliva se vytváří oxid uhelnatý spíše než oxid uhličitý. Když oxid uhelnatý uniká a mísí se s kyslíkem – spaluje se a produkuje oxid uhličitý za přítomnosti velmi malého modrého plamene (Cottrell 2004; Thomas & McAlpine 2010).

Jak dřevo hoří je uhlík z povrchu dřeva spotřebováván, tak rychle jak se tento zuhelnatělý povrch na povrchu dřeva tvoří a hoření by mělo pokračovat do té doby, než je veškeré dřevo spotřebováno. Žhnoucí spalování zastaví dvě hlavní věci. V prvním případě, že je část dřeva vlhčí a je zapotřebí více tepla k odpaření vody, než je produkováno oblastí spalování. Za druhé, vrstva šedého popelu, což je nehořlavá minerální složka dřeva, která obecně činí méně než 1-2 % hmotnosti dřeva, může zůstat po spálení na svém místě. Popel nemá žádnou strukturální pevnost, bortí se a tvoří popelovou bariéru, která s rostoucí tloušťkou způsobuje neproniknutelnost kyslíku do zóny spalování (Obr. 3b). V tomto okamžiku, bez kyslíku, žhnoucí spalování zhasíná a zanechává částečně spálený kus dřeva. To je důvod, proč promísení ohně (např. táboráku) napomáhá lepšímu spalování z důvodu odstranění popelové vrstvy a lepšímu přístupu kyslíku ke žhnoucímu spalování (Obr. 3c) (Cottrell 2004; Thomas & McAlpine 2010).



Obr. 3: Proces žhnoucího spalování (Cottrell 2004; Thomas & McAlpine 2010).

### 3.3 Přenos tepelné energie

K šíření požáru dochází v tzv. pásmu přípravy hoření, a to sdílením (předáváním) tepelné energie. Rychlost šíření závisí jednak na množství a rozmístění hořlavého materiálu, ale také na fyzikálních a chemických vlastnostech hořlavých látek (Krakovský 2004; Hlaváč & Chromek 2016; Pecl et al. 2021).

K pochopení základů šíření plamene, ohně z jednoho kusu hořícího materiálu na mnoho dalších kusů paliva, je nezbytné znát proces přenosu tepla (Rohsenow et al. 1998). Aby mohlo hoření pokračovat musí se z hořlavého materiálu, který je aktuálně spalován převést teplo na další kusy hořlavého materiálu. Teplo může být z hořícího materiálu (ze zóny spalování) na druhý nehořící materiál přeneseno nebo převedeno třemi různými způsoby – kondukcí (vedením), konvekcí a radiací (sáláním) (Obr. 4). Každý z těchto procesů má své vlastní speciální místo v šíření ohně (Rohsenow et al. 1998; Pecl et al. 2021).

#### 3.3.1 Kondukce

Pokud se jednotlivé části paliva (hořícího a nehořícího paliva) vzájemně dotýkají, může se teplo přenášet z kusu na kus. Obecně je však dřevo a jiné rostlinné materiály velmi špatnými vodiči tepla a kondukce je proto důležitá zejména při pronikání tepla do velkého kusu paliva (vedení v rámci již hořícího velkého kusu paliva) a při požárech podzemních (Thomas & McAlpine 2010; Pecl et al. 2021).

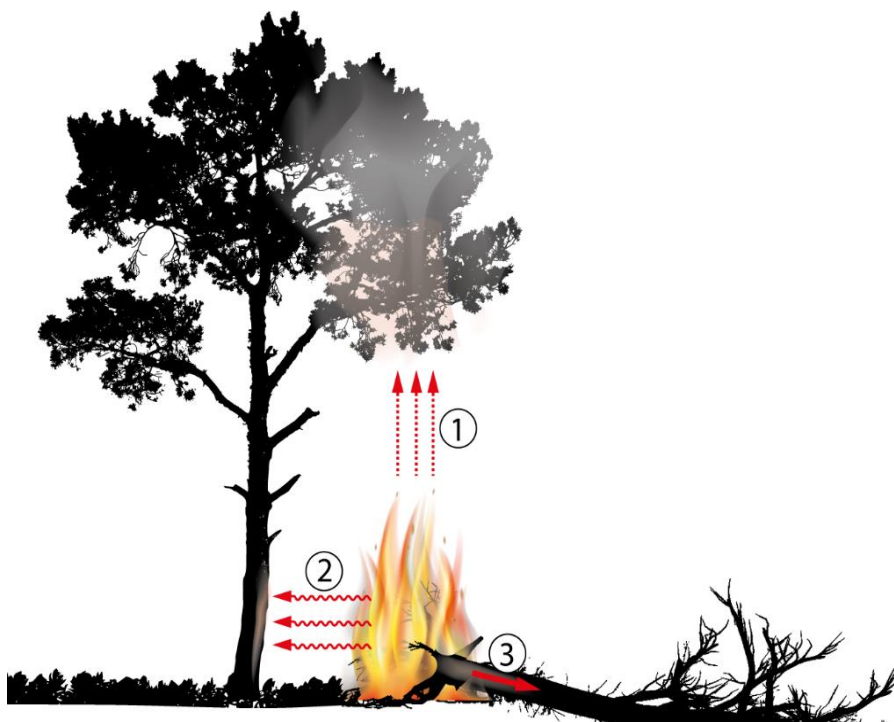
Velmi shnilé dřevo má nízkou hustotu a vede teplo ještě méně než dřevo zdravé. V případě, že hoří shnilé dřevo, teplo produkované hořením zůstává na jednom místě, produkuje malé množství hořlavého plynu v okolí dřeva, plameny rychle zhasínají a shnilé dřevo hoří žhnoucím spalováním. Tento fakt podporuje vznik bodových požárů, neboť uhlíky dopadající v okolí požáru na hrabanku či zdravé dřevo nemají velkou šanci tento materiál zapálit – teplo se příliš rychle rozptýlí. Avšak v případě shnilého dřeva se teplo delší dobu koncentruje na jednom místě a dochází ke snadnějšímu zapálení (Thomas & McAlpine 2010).

#### 3.3.2 Konvekce

Pohyb horkého vzduchu, který se zvedá a je přenášen větrem – konvekce je důležitějším způsobem přenosu tepla ohřívajícím nové části paliva nad plamenem, případně v korunách stromů nebo na strmém podkladu. Vanutím větru dochází k intenzivnějšímu přenášení tepla ve směru vanutí větru, což zrychluje přípravu hořlavého materiálu na hoření (za bezvětří je teplo z konvekce přenášeno zejména směrem vzhůru) (Thomas & McAlpine 2010).

### 3.3.3 Radiace

Sálání je posledním a hlavním způsobem přenosu tepla. Jednoduše lze sálání rozpoznat jako pocit tepla na tváři, když se nacházíte v blízkosti plamene. Sálání je nejdůležitějším typem přenosu tepla při předehřívání paliva při šíření požáru. Radiace se pohybuje ve všech směrech od zóny spalování a jak se požár vyvíjí z malého ohně v jednom bodě do linie při rozhoření lesního požáru, mění se i účinnost přenosu tepla sáláním. Množství přijaté energie (přeneseného tepla) závisí na vzdálenosti od zdroje (zóny spalování). Vztah mezi vzdáleností od zdroje hoření a přijatou energií je rozdílný s velikostí požáru. Pokud hoří v jednom bodě (ohniště) a zvětšíte dvojnásobně svoji vzdálenost od zdroje tepla, množství přijaté energie je čtvrtinové. V případě liniového požáru (fronta lesního požáru) se množství přijaté energie sáláním snižuje lineárně, tedy s dvojnásobnou vzdáleností sálá poloviční energie (Emmons 1963; Thomas 1963; Anderson 1969; Thomas & McAlpine 2010).



Obr. 4: Přenos tepla, 1 - konvekce, 2 - radiace, 3 – kondukce (Pecl et al. 2021).

Teplo může být také přenášeno přímo pohybem hořícího paliva, například hořícím kusem dřeva valícím se z kopce dolů (Obr. 14) nebo kousky hořících nečistot, které mohou unést horní proudy vzduchu, někdy i na velké vzdálenosti. Tento přenos tepla a způsob šíření požáru se nazývá bodovým požárem.

### 3.4 Dynamika extrémních jevů lesních požárů

Zatímco základní typy lesních požárů – pozemní, podzemní a korunový (Holuša et al. 2018) jsou dnes již obecně známé a panuje obecné povědomí o charakteristice těchto požárů, způsobu jejich šíření nebo nebezpečnosti (Holuša et al. 2018). V případě extrémních projevů lesních požárů, se kterými jsme se v České republice dosud prakticky neselekávali, však panuje nízké povědomí, což může způsobit velké nebezpečí, pokud se takový jev při lesních požáru objeví (Pecl et al. 2021). Mezi nejběžnější extrémní projevy lesního požáru považujeme konvekční sloupec a bodový požár, které jsou v následující kapitole detailně popsány (Thomas & McAlpine 2010). Po větrné kalamitě v roce 2004 ve Vysokých Tatrách na Slovensku se k těmto problematickým jevům přidala ještě jedna velmi nebezpečná situace, která se vymyká všem běžným lesním požárům, a to požár kalamitní plochy (Hlaváč et al. 2005). Právě labilita lesních porostů střední Evropy s dominancí smrku ztepilého (*Picea abies*, L.) vůči rozsáhlým poškozením způsobených větrem nebo kůrovcem vedla k definování tohoto jevu lesního požáru. Naplno se nebezpečnost požáru kalamitní plochy ukázal při požáru v Národním parku České Švýcarsko v roce 2022 (Berčák pers.).

#### 3.4.1 Konvekční sloupec

Konvekční sloupce mohou vzniknout u velkých požárů, které produkují obrovské množství horkých plynů, které díky proudění (konvekci) stoupají vzhůru a formují se do úzkého proudu, stejně jako další horké plyny neustále unikající z procesu hoření. Tento úzký proud horkého vzduchu tak neustále sílí, což může vést k vytvoření konvekčního sloupce (Thomas & McAlpine 2010, Pecl et al. 2021).

Nicméně za normálních okolností dochází v atmosféře obvykle v důsledku vysokých rychlostí větru k rychlému ochlazení horkých plynů stoupajících ve sloupci, a tedy k jeho rozbití (rozptýlení) a šíření požáru se jako obvykle odvíjí od vanutí větru. Avšak v okamžiku, kdy je uvolňováno velké množství energie a zároveň je nestabilní atmosféra (neobvyklé vanutí větru, nestabilní teplota a tlak) může docházet ke zformování silného konvekčního sloupce, někdy dosahující výšky přes patnáct kilometrů (Obr. 5a). Ve chvíli, kdy je vertikální rychlost větru v konvekčním sloupci dostatečně vysoká a je dostatečně široký si sloupec vytváří vlastní proudění, které nasává vzduch ze všech stran a táhne ho směrem do (požáru) konvekčního sloupce, kde nahrazuje obrovskou masu stoupajících horkých plynů a podporuje hoření. Tohle nasávání vzduchu konvekčním sloupcem je citelné až půl kilometru od požářiště a je

doprovázeno hlasitými zvuky, které jsou popisovány jako zvuky lokomotivy (Thomas & McAlpine 2010, Pecl et al. 2021).

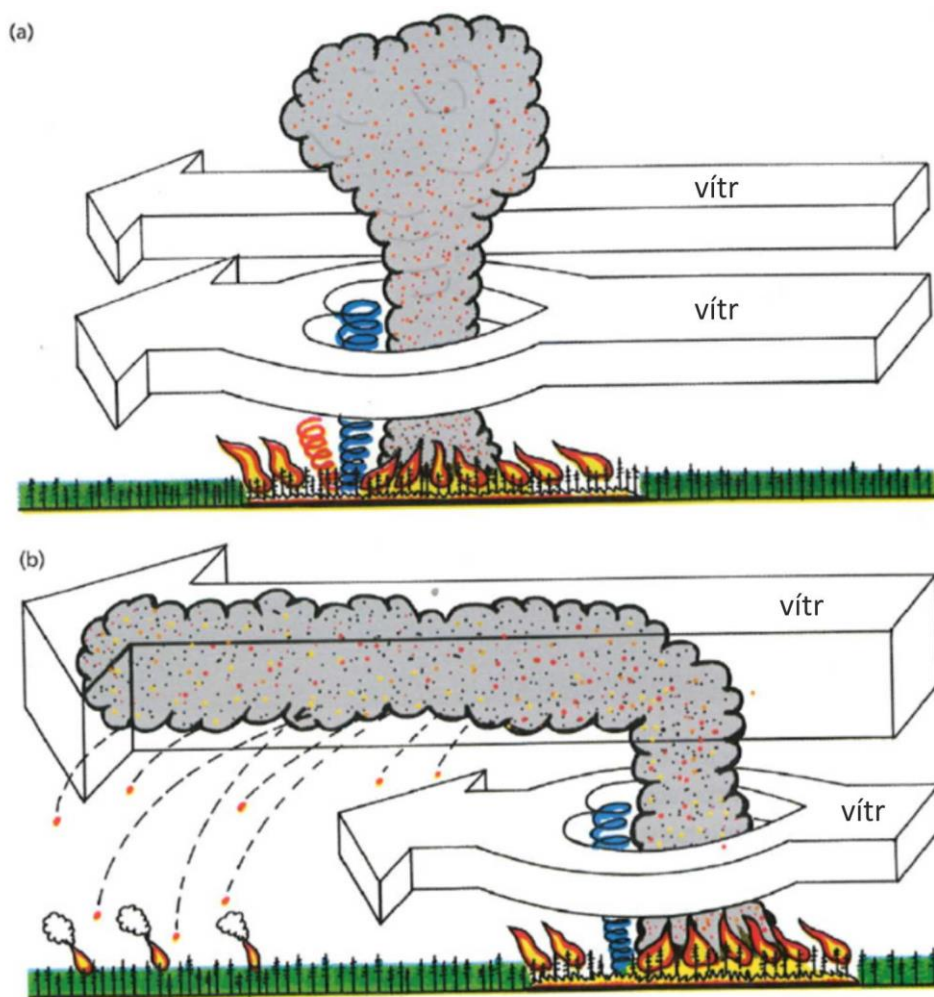
Nasávající vzduch podporuje hoření požáru, který produkuje větší množství tepla a dále podporuje proudění horkých plynů a dokáže se zformovat do extrémních požárů. Požáry poháněné konvenčním sloupcem jsou nepředvídatelné a nekontrolovatelné. Mimo to ještě konvekční sloupce napomáhají vzniku bodových požárů (Obr. 5b) a ohňových vírů (Obr. 5a). Konvekční sloupec slábne v okamžiku, kdy dochází k vyhoření paliva nebo ke změně meteorologických podmínek. V případě, že je slábnutí příliš náhlé dochází k dramatickému kolapsu celého sloupce, které je doprovázeno velmi silným zpětným vanutím větru (směrem dolů k zemi), což může způsobit rozptýlení žhavého materiálu z požářiště až do vzdálenosti několika kilometrů (Thomas & McAlpine 2010, Pecl et al. 2021).

### **3.4.2 Bodový požár**

Bodový požár je způsobem žhavými, hořícími částicemi, které jsou přeneseny do větší vzdálenosti od fronty požáru, kde zapálí povrch lesa a vytvoří tak nový požár – bodový požár (spotting, spot fire). K tomu, aby vzniknul bodový požár je třeba tří základních elementů. Prvním předpokladem vzniku bodového požáru je existence paliva v prostoru hoření, které je unášeno vzhůru a dále pryč od hlavního požáru. Tento kousek paliva musí být zároveň tak velký a žhavý, aby při dopadu na nevyhořelou plochu mimo požářiště dokázal produkovat takové množství tepla, že dokáže zapálit povrch půdy. Z toho důvodu je evidentní, že vlhkost paliva je naprosto zásadní pro vznik bodových požárů. Pokud je vlhkost unášeného kousku příliš vysoká, není schopen zapálit prostor, do kterého dopadl. V případě velmi nízké vlhkosti paliva zase dojde k vyhoření žhavého kousku mnohem rychleji a ani na nevyhořelou plochu nedopadne. Pro eukalyptové lesy je optimální vlhkost paliva pro vznik bodových požárů 4 %. Palivo se také musí nacházet v prostoru, ze kterého je možné ho „zvednout“. Palivo ležící na povrchu půdy potřebuje velmi silný vítr pro zvednutí. Nicméně hořící kousky, které se v okamžiku požáru již nacházejí nad povrchem půdy jako listy, šišky, větvičky, kousky kůry mohou být mnohem snadněji vyneseny horkým vzduchem vzhůru a jsou tak nejčastějším zdrojem bodových požárů (USDA Forest Service 1956; Albin 1979; Thomas & McAlpine 2010; Potter 2011).

Druhým elementem vyžadovaným ke vzniku bodových požárů je přítomnost dostatečné silné konvekční energie (konvekčního přenosu tepla) ke zvednutí hořícího/žhavého materiálu vzhůru. Obvykle čím výše je žhavý materiál konvekčním proudem energie vynesena, tím dopadne do vzdálenějšího místa od původní plochy požářiště. Silný vítr je schopný způsobovat

vznik bodových požárů, ty však vznikají v poměrné blízkosti fronty požáru, protože žhavé kousky dopadají na povrch půdy velmi rychle. Konvekční sloupec však vzhledem ke schopnosti vynášet žhavé kousky vzhůru mohou vytvářet bodové požáry v mnohem větších vzdálenostech. To se děje hlavně v případě, že dochází k dostatečnému vanutí větru, který je schopen unášet žhavé kousky v okamžiku, kdy se uvolní z konvekčního sloupce nebo je vítr dostatečně silný na to, aby ohnul nebo rozfoukal konvekční sloupec (Obr. 5b). Třetím a posledním elementem je přítomnost suchého jemného paliva v prostoru, kde dopadne uvolněný žhavý kousek. Při výskytu všech těchto elementů v prostoru vzniká bodový požár (USDA Forest Service 1956; Albini 1979; Thomas & McAlpine 2010; Potter 2011).



Obr. 5: a) Konvekční sloupec podporující vznik ohňových vírů; b) konvekční sloupec ohnutý vanutím větru způsobující vznik bodových požárů (Thomas & McAlpine 2010).



### 3.4.3 Požár kalamitní plochy

#### 3.4.3.1 Větrná kalamitní plocha

Výskyt větrné kalamity v porostech labilních k vývratům a zlomům se úplně mění charakter lesního porostu, který se stává okamžitě náchylným k nekontrolovatelnému šíření požáru v případě jeho vzniku (Obr. 6, 8a). Kalamitní plocha po větrné kalamitě na rozdíl od stojícího lesního porostu není výškově diferencovaná a je tvořena zlomy, vývraty, stojícími stromy a zbytky rozkládajících se stromů, bylinným krytem a hrabanky. Rozložení dřevní hmoty je nerovnoměrné, dřevo bývá nahromaděné v několikametrových vrstvách, části korun s asimilačním aparátem se nacházejí i v přízemních vrstvách. Vše doprovází zničená lesní cestní síť, a tedy nemožnost se na případné požářiště dostat pozemní technikou, nebo neexistující přístup ke zdroj požární vody. Pohyb hasičů v tomto terénu je velmi omezený, nebezpečný a v mnoha případech prakticky nemožný. Případné hoření této plochy může být po zapálení celoplošné, z časového hlediska dlouhodobé (i několik dní). V celém prostoru, nejen v jeho čele vzniká princip hoření hranice. (Hlaváč et al. 2005; Pecl et al. 2021; Berčák et al. 2023).



Obr. 6: Oblast postihnutá větrnou kalamitou (foto Ján Slivinský).

#### 3.4.3.2 Kůrovcová kalamitní plocha

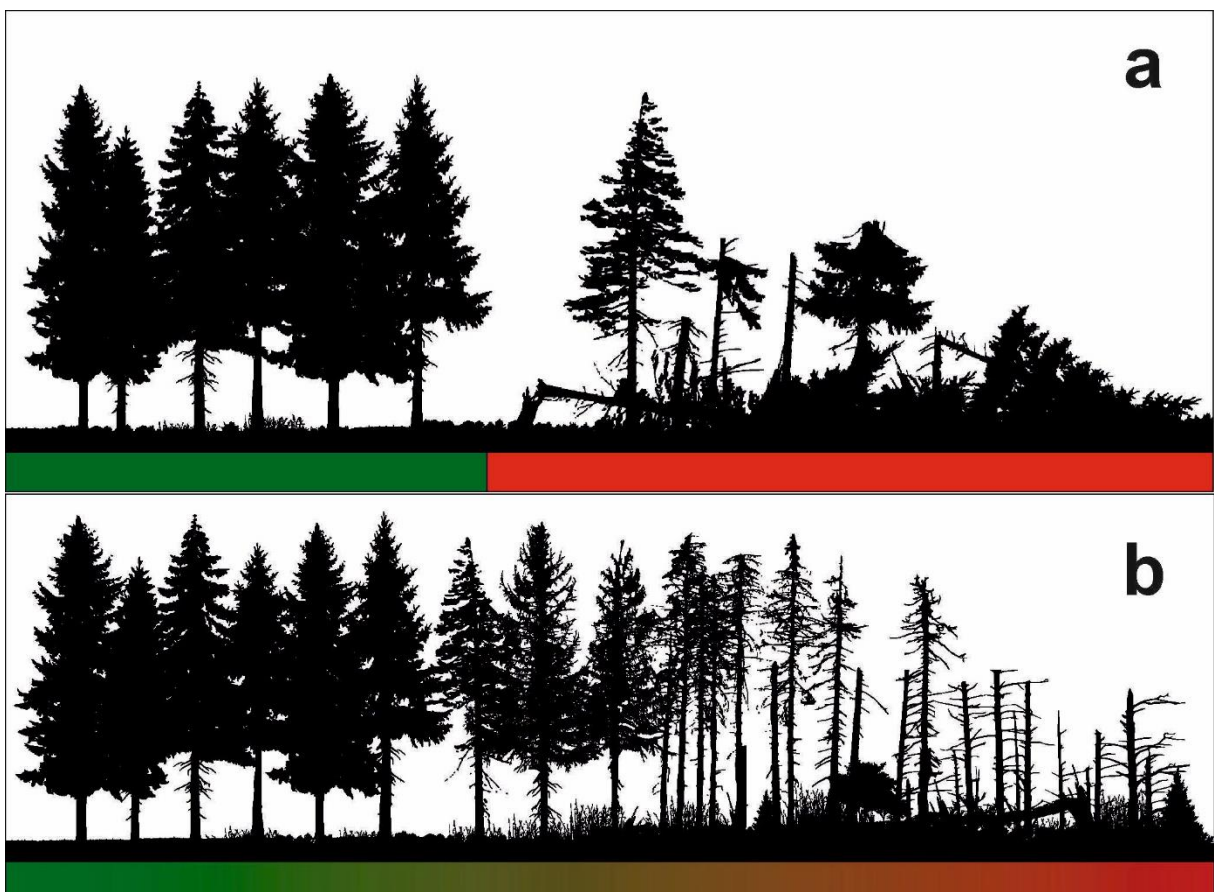
Stejně jako větrná kalamita i kalamita kůrovcová výrazně mění charakter lesního prostředí, nikoliv však okamžitě, ale postupně (Obr. 7, 8b). Během kůrovcové kalamity v první fázi dochází u napadených stromů, porostů k rychlému zaschnutí a opadnutí jehličí a částečně kůry stromů. Povrch lesní půdy je tedy velmi rychle pokrytý výrazně větším množstvím hořlavého materiálu než v případě zdravého porostu. V druhé fázi z důvodu opadu jehličí dochází k prosvětlení porostů, kde v závislosti na stanovišti dříve nebo později začínají dominovat traviny a byliny, které v podzimních měsících zasychají a vytvoří velmi snadno



zpalitelné prostředí. K velkému množství hořlavého materiálu se později přidávají i odlamující se větve a větvičky suchých stromů, vyvrácení jedinci, případně těžební zbytky po odtěžení mrtvých stromů (Pecl et al. 2021; Berčák et al. 2023).



*Obr. 7: Postupný rozpad porostů postihnutých kůrovcovou kalamitou (foto Ján Slivinský).*



*Obr. 8: Kalamitní plochy ve vztahu k lesnímu požáru; a) okamžitá změna způsobená větrnou kalamitou; b) pozvolná změna prostředí způsobená kůrovcovou kalamitou (Berčák et al. 2023).*

Tyto nebezpečné jevy se částečně objevily při požáru v Národním parku České Švýcarsko, kde docházelo k zahoření kalamitní plochy, docházelo k výskytu bodových požárů a pravděpodobně i menších konvekčních sloupců. Bodové požáry vzhledem k členitosti terénu byly v tomto případě poháněny spíše větrem (Berčák pers.).

### **3.5 Co ovlivňuje šíření lesního požáru**

Lesní požáry nebo obecně požáry v přírodním prostředí jsou v mnoha ohledech komplikovanější než jiné druhy požárů. Faktory ovlivňující proces hoření se téměř nepřetržitě mění v závislosti na neustálé změně podmínek v samotném prostoru požáru. Každá z těchto změn může být buď přínosem, nebo i nevýhodou pro získání kontroly nad požárem a samotné zdolávání požáru (Coleman 1978; Hlaváč & Chromek 2016). Chandler et al. (1983) definují nebezpečí požáru jako výsledek několika faktorů, které ovlivňují vznik, šíření a obtížnost získání kontroly nad lesním požárem a jím způsobených škod. Mezi tyto faktory patří topografické vlastnosti, vlastnosti paliva a proměnné týkající se počasí.

#### **3.5.1 Palivo**

V průběhu požáru je nezbytné neustále sledovat několik základních parametrů paliva. Tyto faktory mají vliv na samotnou zapalitelnost prostředí. Při hoření pak palivo ovlivňuje intenzitu požáru, šíření nebo dobu trvání (hoření) pozemního požáru, stejně tak ovlivňují předpoklady vzniku korunových, případně výše popsaných jevů jako bodový požár nebo konvekční sloupec. Těmito parametry jsou struktura paliva, množství paliva, vlhkost a rozmístění paliva v prostoru (Sneeuwjagt & Peet 1985; Viegas 1998; Carlson & Burgan 2003; Majlingová 2014).

##### *3.5.1.1 Struktura paliva*

Každý hořlavý materiál má jinou náchylnost k zapálení a po zapálení hoří jinou intenzitou (Pfeffer, 1961). Klasifikace paliva podle jeho predispozice zapálení nebo hořlavosti je nezbytným prvkem pro posouzení rizik spojených s možností vzniku lesního požáru a jeho šíření (Chandler et al. 1983) nebo při rozvoji prvků protipožární ochrany daného stanoviště.

Skladba paliva má významný vliv na rychlost a směr šíření lesního požáru (Carlson & Burgan, 2003; Sneeuwjagt & Peet, 1985; Viegas, 1998). Nejčastěji vzniká požár na travnatých plochách, z důvodu snadného zapálení lehkého jemného paliva a potřeby malého množství tepla ke vznícení. Avšak po zapálení vytváří dostatek tepla, který je potřebný k zapálení jiného

paliva (Majlingová, 2014). Zabuřená holina s četnými zbytky klestu po těžbě je tedy ideálním místem pro snadný vznik a rychlé šíření lesního požáru (Pfeffer 1961).

Drtivá většina lesních požárů začíná a končí na povrchu lesní půdy, jedná se tedy o pozemní lesní požár. Tyto pozemní požáry v závislosti na meteorologických podmínkách, stanovištních podmínkách, rychlosti zásahu atp. mohou přecházet v požáry korunové, případně způsobovat skrytá ohniska požárů podzemních (Pfeffer 1961; Thomas & McAlpine 2010). V případě, že uvažujeme palivo v lesním prostředí, mluvíme o hořlavém materiálu nacházejícím se na povrchu lesní půdy, tzv. pozemní lesní palivo. V České republice je naprosto drtivá většina lesních požárů pozemních (Holuša et al. 2018), proto znalost pozemního paliva a jeho požárních charakteristik je pro naše území zásadní (Berčák pers.). Pozemní palivo se skládá z velkého množství různě hořlavých materiálů. Pro účely přehlednosti a popisu charakteristik paliva bylo vytvořeno jednoduché rozdělení na tzv. segmenty. Palivo dle tohoto rozdělení řadíme do 4 segmentů – vegetace, drobný dřevěný materiál, opad/hrabanka a humus (se zbytky organického materiálu a kořeny rostliny) (Pecl et al. 2021).

### ***Vegetace***

Vegetace lesních porostů je tvořena velkým množstvím travin, bylin a mečů, které jsou velmi často zdrojem zahoření, a to z důvodu snadného zapálení lehkého jemného paliva a potřeby malého množství tepla ke vznícení, zejména u travin a bylin (McArthur 1966; Anderson 1982; Scott & Burgan 2005; Berčák et al. 2023). Vegetace po zapálení vytváří zpravidla dostatek tepla, který je potřebný k zapálení jiného paliva. Hoření tohoto materiálu je zejména po zaschnutí rychlé, což vede k rychlému šíření požáru (Pecl et al. 2021).

### ***Drobné dřevo***

Drobný dřevěný materiál tvoří především drobné větvičky, které při růstu stromů (zejména jehličnatých) zasychají a následně se odlamují působením větru nebo pohybem zvěře v porostu a padají na povrch lesní půdy. Dále za drobné dřevo jsou považovány silnější větve odlamující se ze stromů a semenný materiál stromů. Nedílnou součástí tohoto segmentu jsou samozřejmě i těžební zbytky z předchozích zásahů, které zůstávají v lesním porostu (Pecl et al. 2021). V procesu hoření je tento materiál poměrně složité zapálit, neboť na rozdíl od jehličí, listů nebo vegetace má poměrně velké rozměry, obvykle dokáže držet větší množství vlhkosti a je tedy potřeba větší množství tepelné energie k jeho zapálení. Avšak v případě již vzniklého hoření slouží právě tento drobný dřevěný materiál k produkování většího množství tepla, které

uvolňuje poměrně rovnoměrně a delší dobu, to zvyšuje intenzitu a vytrvalost požáru (Albini & Reinhardt 1995).

### ***Hrabanka/opad***

Opadem označujeme suché asimilační aparáty stromů (jehličí, listí) nacházející se na povrchu lesní půdy (Pecl et al. 2021). Opad je snadnější zapálit než například drobný dřevěný materiál, naopak složitější než například traviny. Hoření je velice pozvolné, málo intenzivní (Anderson 1982). Je to způsobeno hlavně množstvím tohoto materiálu nacházející se v prostoru a také kontaktem s povrchem půdy. Vegetace často dosahuje výšky několika desítek centimetrů (McArthur 1966), na rozdíl od opadu, který v závislosti na rychlosti rozkladu tvoří vrstvu zpravidla jen několik centimetrů, navíc díky kontaktu s půdou nevyhoří zpravidla kompletně. Plocha pokrytá pouze opadem má mnohem méně hořlavé biomasy než plocha pokrytá pouze vegetací (Pecl et al. 2021).

Při porovnání hořlavosti jehličí a opadu listnatých stromů by se mohlo zdát, že bude hořlavější opad, vzhledem k obvykle větší vrstvě nahromaděného listí. Nicméně jehličí obsahuje látky, které hoření tohoto materiálu výrazně podporují. Vše podporuje i množství vody a vlhkosti, které se drží v nerovnostech listového opadu, na rozdíl od „urovnaného“ jehličnatého opadu, kde dochází i k efektivnějšímu vysychání (Pecl et al. 2021).

### ***Humus***

Ačkoliv se to na první pohled nezdá i humusová vrstva může prohořívát, i když velmi ojediněle. V humusové vrstvě jsou zbytky ještě nerozloženého organického materiálu a kořeny rostlin. V případě dlouhodobějšího hoření plochy dochází k prohoření i humusové vrstvy půdy (Thomas & McAlpine 2010). Humusová vrstva produkuje nejméně tepelné energie z jednotlivých segmentů pozemního paliva. V případě lesních požárů je však nezbytné s tímto segmentem počítat, neboť často tvoří zdroj paliva pro hoření skrytých ohnisek a podzemních lesních požárů (Pecl et al. 2021).

#### ***3.5.1.2 Množství a distribuce paliva***

S růstem lesního porostu se mění nejen světelné podmínky v porostu, dochází k opadu starého jehličí, listů, odlamování větví, ve světlinách se objevují byliny, traviny, mechy, dochází ke změně průchodnosti jednotlivých porostů a mění se hustota stromů na ploše (Evans 1966; Anderson 1966; Canham 1988). Všechny tyto skutečnosti vedou ke kontinuální v průběhu života porostu plynule se vyvíjející zastoupení zmiňovaných segmentů pozemního

paliva. Je tedy evidentní, že s růstem porostu se mění množství paliva (jednotlivých segmentů paliva) a s tím také související náchylnost k zapálení, rychlost šíření, hořlavost nebo riziko přechodu do korunových požárů. Pro účely problematiky lesních požárů byly proto definovány následující stádia lesních porostů (Pecl et al. 2021):

*a) Založený porost (do cca 5 let)*

Za založený porost považujeme období od vytěžení lesního porostu a vzniku tzv. paseky, přes zalesnění plochy až do doby, kdy stromy vysázené na ploše svojí korunou zakryjí (zapojí) celý povrch půdy. V závislosti na přírodních podmínkách na ploše a tlaku zvěře dochází k zapojení v různém věku, nejčastěji okolo 5 let věku vysázených sazenic, může to však být i mnohem později (Pecl et al. 2021).

Tento porost je z hlediska potenciálu vzniku lesního požáru nejvíce nebezpečný. Typicky je plocha porostlá velkým množstvím travin, bylin, které v podzimních měsících usychají a stávají se tak snadno zapalitelným zdrojem paliva. K vyšší rizikovosti přispívá i fakt, že tyto porosty jsou snadno průchodné lidmi nacházející se v lese (houbaři, lesní turistika), tedy nejčastějším iniciátorem hoření. Při hoření těchto ploch dochází k rychlému šíření lesního požáru, hoření však není příliš intenzivní, neboť dochází k rychlému vyhoření dostupného paliva (Pecl et al. 2021). Nebezpečí spočívá především ve schopnosti zapálení korun okolních mladších porostů (Bracmort 2013).

*b) Zapojený porost (cca 6-20 let)*

V okamžiku zapojení (zakrytí povrchu půdy) dochází ke změně charakteru porostu a především paliva nacházející se na povrchu půdy. Vzhledem k změně světelných podmínek v zapojeném porostu zcela zmizí vegetace z povrchu půdy (Evans 1966; Anderson 1966; Canham 1988). Povrch půdy se začíná pokrývat především opadem rostoucích stromů (jehličí, listí) a u jehličnatých porostů drobným dřevním materiálem postupně se odlamujících ze stromů, z důvodu pohybu zvěře, odumírání spodních větví atd. (Pecl et al. 2021). V tomto období života porostu probíhají první výchovné zásahy, vyřezání nevhodných jedinců z porostu. Tyto vyřezané stromy zůstávají po vyřezání v porostu, což lokálně zvyšuje množství hořlavého materiálu v porostu (Kolaks et al. 2004).

Z hlediska problematiky lesních požárů s poměrně nízkým rizikem samostatného zapálení, vzhledem k téměř nulové průchodnosti člověkem, i přesto, že se již diferencuje korunová a kmenová část. Nicméně tyto porosty mohou být velmi snadno zapalitelné okolními povrchovými lesním požáry. Vzhledem k lokálním místům s vyřezanými stromy může

docházet k intenzivnějšímu hoření a přes drobné větve, především jehličnatých stromů se může oheň velmi snadno rozšířit do korun a vytvořit korunový požár (Pecl et al. 2021). Korunový požár zapojených porostů má zpravidla rychlý průběh, ale jeho šíření je poměrně obtížné kontrolovat. (Krakovský 2004). V případě, že jsou pro šíření požáru vhodné podmínky a v korunách se nachází dostatek paliva, může korunový požár zapojených porostů přeskočit do sousedních starších porostů a vytvořit tak korunový požár dospívajících nebo dospělých porostů (Pecl et al. 2021), což už je z hlediska hašení obrovský problém (Alexander de Groot 1988; Alexander & Lanoville 1989; Krakovský 2004).

*c) Dospívající porost (21-60 let)*

Dospívající porost se vyznačuje poměrně intenzivním růstem stromů do výšky, koruny stromů jsou nasazeny již výše (Pecl et al. 2021). Méně vitální jedinci nedokážou konkurovat okolním silnějším stromům a částečně umírají, mimo to dochází k dalším výchovným zásahům (Vacek et al. 2020). To způsobuje částečný průnik světla na povrch půdy, objevují se světliny typicky porostlé mechy a bylinami. Na povrchu půdy se začíná kromě opadu, dřevěného materiálu objevovat také semenný materiál (šišky, plody stromů) (Pecl et al. 2021).

Tyto porosty jsou již dobře přístupné pro člověka, ve světlinách často rostou houby, což zvyšuje pohyb v těchto porostech, a tím se zvyšuje riziko zapálení těchto porostů. V těchto porostech se již pohybuje i lesnická technika, která může být dalším iniciátorem hoření. V případě zahoření plochy hoří povrch půdy poměrně pomalu a šíření je závislé především na povětrnostních podmínkách. V místech světlin může docházet k intenzivnějšímu hoření, které však obvykle velmi rychle přechází opět do pozvolného, letmého prohořívání. Hašení požáru v těchto porostech bývá zpravidla méně náročné. V případě, že oheň neunikne do sousedních mladších porostů, neexistuje prakticky reálná šance na rozšíření požáru do korun stromů (Pecl et al. 2021).

*d) Dospělý porost (61+ let)*

V dospělém porostu dochází vlivem růstu stromů, výchovných zásahů, odumírání slabších jedinců ještě k většímu prosvětlení povrchu půdy, objevuje se více světlin, povrch půdy je pokryt větším množstvím dřevěného a semenného materiálu, objevují se trsy travin, byliny a mechy (Pecl et al. 2021). Ve světlinách se objevuje přirozené zmlazení (mladé stromky) (Vacek et al. 2020). Množství vegetace na povrchu půdy je také závislé na bohatosti stanoviště. Tento stav trvá až do doby vytěžení porostu, kdy se plocha opětovně stává založeným porostem a koloběh „vývoje“ lesa začíná zase od začátku (Pecl et al. 2021).

Množství a distribuce paliva představuje jednoznačný faktor pro udržení tepla, které je vyžadováno pro zapálení jiného paliva. Povrchové palivo může být v prostoru rozmístěno nepravidelně, nebo uniformně (hromada klestu). Prostorový vztah mezi jednotlivým palivem není pouze horizontální – od trávy přes keře až ke stromům, ale také vertikální – od nízkého podrostu k vysokým stromům. Keře mohou snadno posloužit jako prostředek pro přeskočení pozemního požáru k požáru korunovému, tzv. žebříkové palivo (ladder fuels), stejně jako velké množství těžebních zbytků k zvýšení intenzity požárů což může znamenat výraznější rozšíření malého pozemního požáru (Majlingová, 2014).

### 3.5.1.3 Vlhkost paliva

Vlhkost paliva je naprosto zásadní a pravděpodobně nejdůležitějším parametrem, který ovlivňuje schopnost vzplanutí hořlavého materiálu a má výrazný vliv na šíření lesního požáru, protože při nižších vlhkostech paliva dochází obecně k jeho rychlejšímu přehřívání tohoto paliva, a tedy rychlejší přípravě na hoření (Gisborne, 1928). Vlhkostí paliva se rozumí obsah vody v palivě, který je vyjádřený jako procento váhy paliva po vysušení. Na změny hodnot vlhkosti paliva je nejnáchylnější jemné palivo označováno jako „fine fuels“ (trávy, byliny, listy, mechy, jehlice a větvičky). U travin a bylin hraje ve prospěch rychlejšímu vysušení také skutečnost, že kolem nich proudí velké množství vzduchu. Mrtvé palivo ležící na zemi (jehlice, větvičky, listy) vyschne rychleji než živé palivo (traviny, byliny), nicméně při dlouhotrvajícím suchu nebo vysokých teplotách živé palivo zasychá již velmi brzy ve vegetační sezóně stává se hlavním problémem pro vznik požáru. Vlhkost nevysušeného živého paliva má okrajovou roli v zápalnosti prostředí (zelené palivo ve vegetační sezóně), avšak tato vlhkost je rozhodující pro šíření vzniklého požáru, jelikož množství vody v palivu přímo souvisí s rychlostí šíření lesního požáru (Carlson & Burgan 2003; Sneeuwjagt & Peet 1985; Viegas 1998). Čím je nižší vlhkost paliva, tím se zrychluje jeho vstup do procesu hoření a je tedy nebezpečnější v rámci lesního požáru, naopak čím větší vlhkost paliva je, tím odebere z požáru větší množství tepelné energie pro jeho vysušení a přípravu na hoření (Anderson, 1982).

## 3.5.2 Meteorologická situace

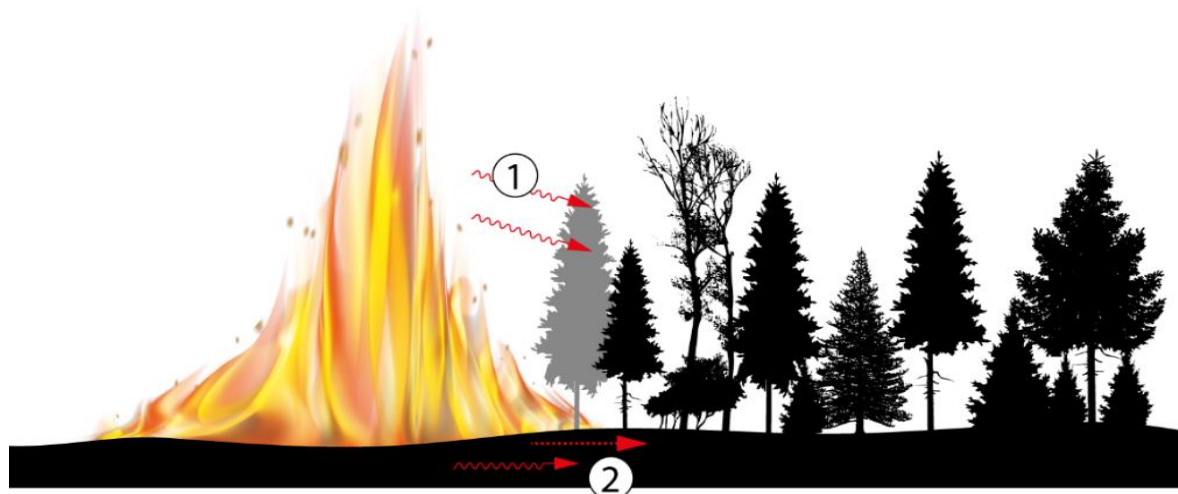
Příznivé klimatické podmínky pro vznik lesního požáru se v přírodě objevují již třetí den po posledním dešti a s následujícími bezdeštnými dny dochází neustále k nárůstu nebezpečí vzniku lesního požáru (Pfeffer 1961). Kritické období nastává v jedenáctém dni (Wangenheim 1940). Liu et al. (2010) zjistili, že proměnlivost klimatu a počasí nemá vliv pouze na vznik a šíření lesního požáru, ale také na závažnost tohoto požárů, a to v různých časových měřítcích.



Sucho a rostoucí teploty se podílejí nejen na prodlužování požární sezóny, ale i na samotném vznícení a šíření lesního požáru. Několik výzkumníků tvrdí, že dlouhodobé atmosférické anomálie a lesní požáry jsou v blízkém vztahu (Swetman & Betancourt 1990; Chu et al. 2002; Skinner et al. 2002; Hoinka et al. 2009).

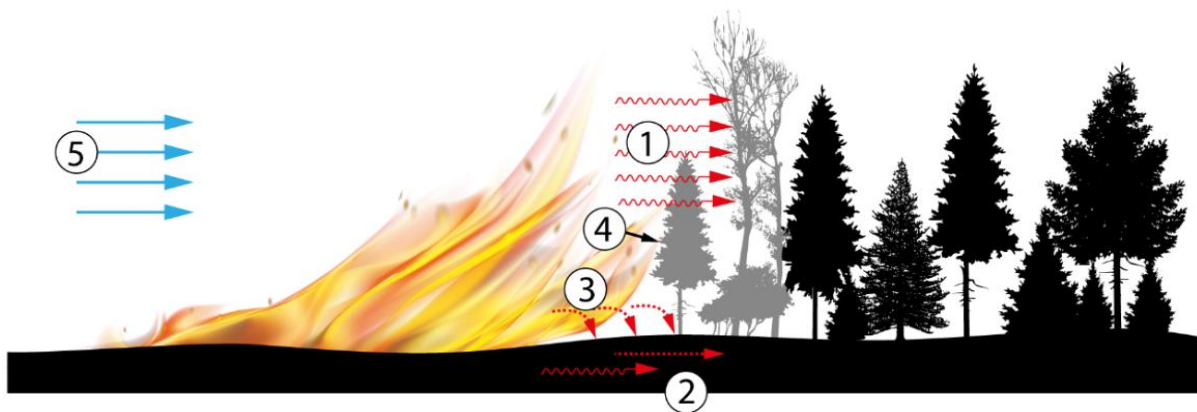
### 3.5.2.1 Směr a rychlost větru

Nejdůležitějším parametrem z hlediska požáru je vítr. Vítr zřídka pozitivní účinky, zpravidla negativní účinky, a to v závislosti na tom, či jeho působením zpomaluje postup požáru nebo jeho postup naopak podněcuje. Mezi základní vlivy působení větru na lesní požár je změna rychlosti šíření požáru nebo změna směru šíření tohoto požáru (např. Viegas 2004; Thomas & McAlpine 2010; Majlingová 2014). V případě větrného počasí dochází k ohnutí plamenů ve směru vanutí větrů, a tedy v pásmu přípravy hoření dochází k rychlejší přípravě paliva (odpařování vody), což urychluje šíření lesního požáru (Obr. 10), na rozdíl od bezvětří, kde je intenzita přenosu tepla mnohem méně intenzivní (Obr. 9). (Rothermel 1972).



Obr. 9: Přenos tepla fronty požáru při bezvětří (Pecl et al. 2021 podle Rothermel 1972); 1 – radiace působící na palivo a porost, 2 – vnitřní přenos tepla radiací a konvekcí.



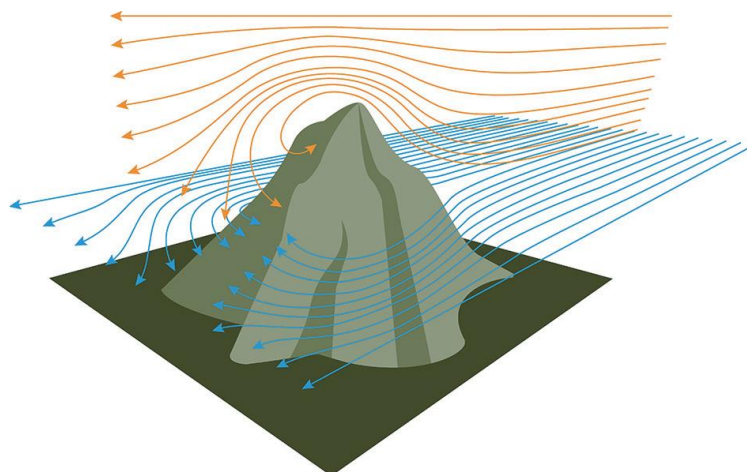


Obr. 10: Přenos tepla fronty požáru při větrném počasí (Pecl et al. 2021 podle Rothermel 1972); 1 –intenzivní radiace působící na palivo a porost, 2 – vnitřní přenos tepla radiací a konvekcí, 3 – konvekce, 4 – dotyk plamene, 5 – směr větru.

Vítr hraje zásadní roli nejen ve směru a rychlosti šíření lesního požáru, ale také nepochybně v druhu lesního požáru, kterým lesní porost hoří. Síla větru je nejvyšší okolo poledne, a to zejména v jarním období. V noci je síla větru nižší (Archer & Jacobson 2005). Van Wagner (1977) na základě mnoha experimentů a pozorování lesních požárů uvádí, že při bezvětří pozemní požár hoří velmi málo a riziko přeskočení tohoto požáru do korun stromů je velmi malé. Pokud pozemní požár přeskočí do korun stromů, je zapotřebí větru k tomu, aby se korunový požár udržel a dál se rozvíjel. Při ustání větru nastává kolaps korunového požáru.

Molčanov (1940) udává, že při rychlosti větru 8-9 m/s a při relativní vlhkosti vzduchu 39 % se v tajze pohybují pozemní požáry rychlostí 0-1080 m/h. S rychlostí větru roste rychlost šíření lesního požáru (Anderson & Rothermel 1966; Anderson 1968). Při dvojnásobném zvýšení rychlosti větru dojde ke čtyřnásobně rychlejšímu šíření lesního požáru (Molčanov 1940). Síla větru je nejvyšší okolo poledne, a to zejména v jarním období. V noci síla větru ustupuje nebo úplně zaniká (Krakovský 2004).

Dalším důležitým parametrem pro šíření požáru jsou větrné turbulence (Obr. 11), které se vytvářejí na hřebenech, v kaňonech, údolích a jiných terénních zlomech. Tyto jevy mají významný vliv na směr a rychlost šíření lesního požáru a při odhadu šíření požáru pro například účely hašení je nutné na ně pamatovat (Anderson 1968).



Obr. 11. Schéma turbulentního proudění (Pecl et al. 2021).

Majlingová (2014) dále uvádí i vliv inverze, tedy meteorologického jevu, při kterém teplota vzduchu v určité vrstvě dolní atmosféry s narůstající nadmořskou výškou neklesá, ale stoupá. Tato vrstva vytváří na požářišti neproniknutelnou vrstvu, která může zapříčinit abnormální pohyb dýmu, tepla nebo i žhavých uhlíků, a tedy zapalovat části lesa (bodový požár), kde se to bez inverze jen velmi těžko předpokládalo. Pod vrstvou inverze hoří požár velmi pomalu, kvůli snížení rychlosti větru.

### 3.5.2.2 Teplota a vlhkost vzduchu

Meteorologické parametry jako teplota vzduchu nebo relativní vlhkost vzduchu mohou výrazně ovlivňovat pravděpodobnost vzniku požáru i jeho šíření (Thomas 1963; Emmons 1963; Anderson & Rothermel 1966; Anderson 1969; Liu et al. 2010). Vyšší relativní vlhkost vzduchu brání proudění vzduchu a působí jako částečný inhibitor hoření. Nejnižší relativní vlhkost vzduchu je mezi 13. a 14. hodinou, naopak nejvyšší je okolo půlnoci. Výrazný pokles relativní vlhkosti zvyšuje rychlost požáru 5 až 6krát (Molčanov 1940; Pfeffer 1961; Krakovský 2004).

Z výše uvedených důvodů vyplývá, že je nevyhnutelné a vhodné sledovat v nebezpečném období nebo při požáru zejména rychlost a směr větru a dále také teplotu a relativní vlhkost. Jsou to naprosto nezbytné údaje, které mohou pomoci předpovídat vznik lesního požáru nebo předvídat šíření požáru a zvolením správné taktiky tak napomoci úspěšnému uhašení (Kunt 1967).

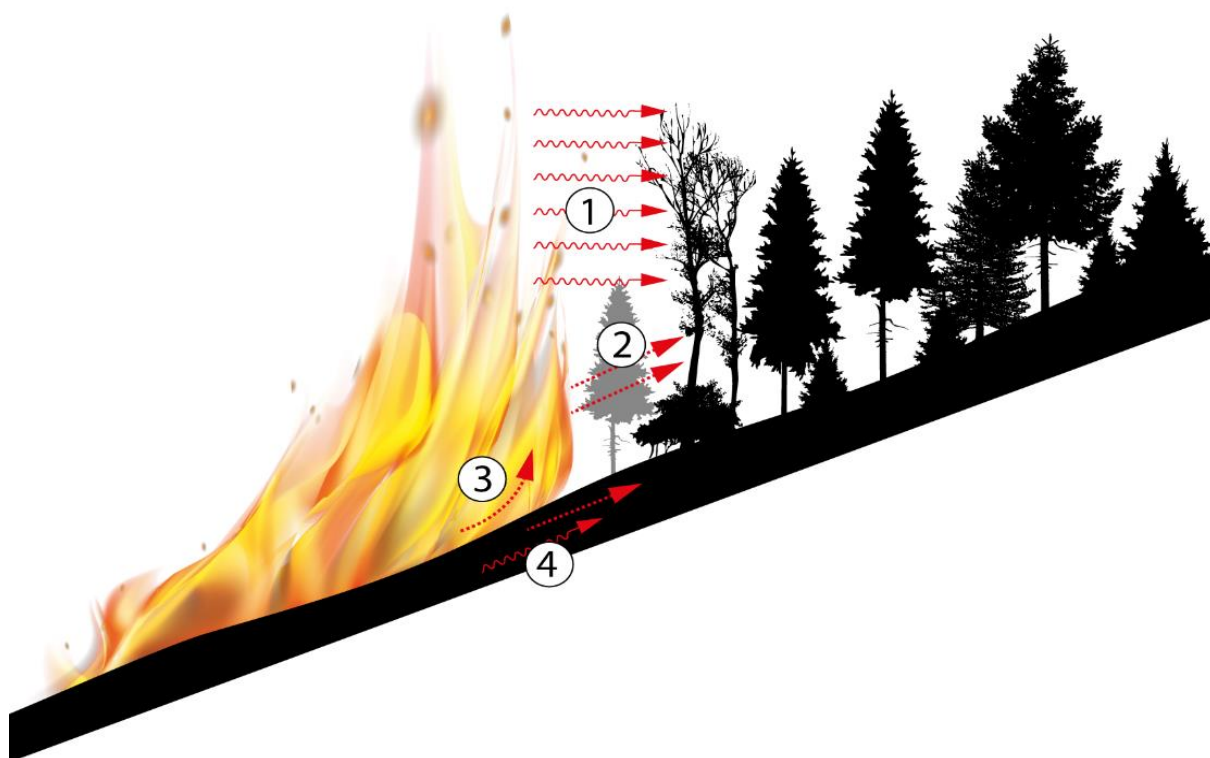
### 3.5.3 Topografie a stanovištní podmínky

Topografie je konfigurace zemského povrchu včetně jeho reliéfu a postavení jeho přirozených a umělých vlastností (Introduction to the Wildland Fire Behaviour 2006). Terénní

prvky jsou dalším faktorem výrazně ovlivňujícím směr a rychlost šíření lesního požáru (Anderson a Rothermel, 1966; Viegas 1998; Viegas 2004).

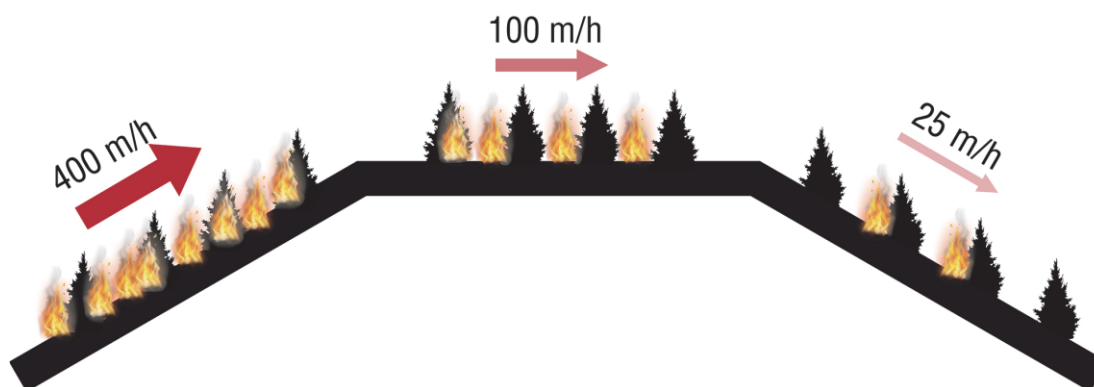
### 3.5.3.1 Sklon

Nejdůležitějším topografickým faktorem ovlivňující šíření lesního požáru je sklon svahu. Fronta plamenů pohybujících se napříč rovinatým terénem před sebou vytváří zónu vyzařujícího tepla. Pokud se požár pohybuje po rovinatém terénu, vyzařované teplo předežhřívá palivo nacházející se před frontou požáru, a to až do momentu, kdy je dosažena teplota, která způsobí vzplanutí zahřívajícího paliva a následné šíření požáru. Pokud panuje bezvětří a palivo je rovnoměrně rozložené, dochází k rovnoměrnému šíření lesního požáru. Avšak v případě, že se stejné palivo nachází na svahu je teplo intenzivněji přenášeno konvekcí a radiací, což zapříčiní rychlejší předežhřívání prostoru před frontou požáru a dochází tedy k rychlejšímu šíření lesního požáru (Obr. 12) (Thomas & McAlpine 2010).



Obr. 12: Přenos tepla fronty požáru ve svahovitém terénu (Pecl et al. 2021 podle *Wildfires on slopes* 2018); 1 – intenzivní radiace působící na palivo a porost, 2, 3 – konvekce, 4 – vnitřní přenos tepla radiací a konvekcí.

K šíření se požáru směrem vzhůru po svahu přispívá ještě další jev. V blízkosti povrchu zahřátého svahu se vytváří vrstva teplého méně hustého vzduchu. Ohřátý vzduch s menší hustotou je lehčí, a proto stoupá podél svahu nahoru, čímž dochází ke vzniku průvanu (proudění vzduchu). Lehčí vzduch se pohybuje nahoru po svahu a je v nižších polohách nahrazován vzduchem chladnějším. Právě tyto podmínky dále podporují rychlejší šíření požáru směrem vzhůru (Wildfires on slopes 2018). Čím je sklon svahu větší, tím dochází k rychlejšímu šíření požáru. (Anderson 1968; Introduction to the Wildland Fire Behaviour 2006). Je prokázáno, že zvýšením sklonu o  $10^\circ$  se rychlost šíření požáru přibližně zdvojnásobí a při zvýšení sklonu o  $20^\circ$  je tato rychlost až 4x vyšší (Obr. 13) (Coleman 1978).



Obr. 13: Příklad změny rychlosti šíření lesního požáru ve svahovitém terénu (Pecl et al. 2021).

Požár se může rozšířit i směrem dolů ze svahu. Dochází k tomu často pomocí valících se částí žhavého dříví dolů svahem (Obr. 14) (Introduction to Wildland Fire Behaviour 2006). Avšak požár se směrem dolů ze svahu může šířit i bez pomoci žhavého materiálu valícího se z požářiště. Toto šíření je však mnohem pomalejší než v případě šíření se směrem vzhůru. Při šíření požáru ze svahu dolů se rozšiřuje mezera mezi dostupným palivem a ohněm, rychlost postupu ohně se zpomalí a jeho intenzita se sníží (Wildfires on slopes 2018). Anderson (1968) uvádí, že rychlost šíření lesního požáru po  $30^\circ$  svahu dolů je přibližně pětikrát pomalejší než šíření lesního požáru vzhůru po stejném svahu. Požár postupující z kopce může občas dosáhnout bodu, kde se začne otáčet a hořet směrem nahoru do svahu. Tato změna může vést k náhlému zvýšení intenzity a rychlosti šíření požáru (Wildfires on slopes 2018; Pecl et al. 2021).

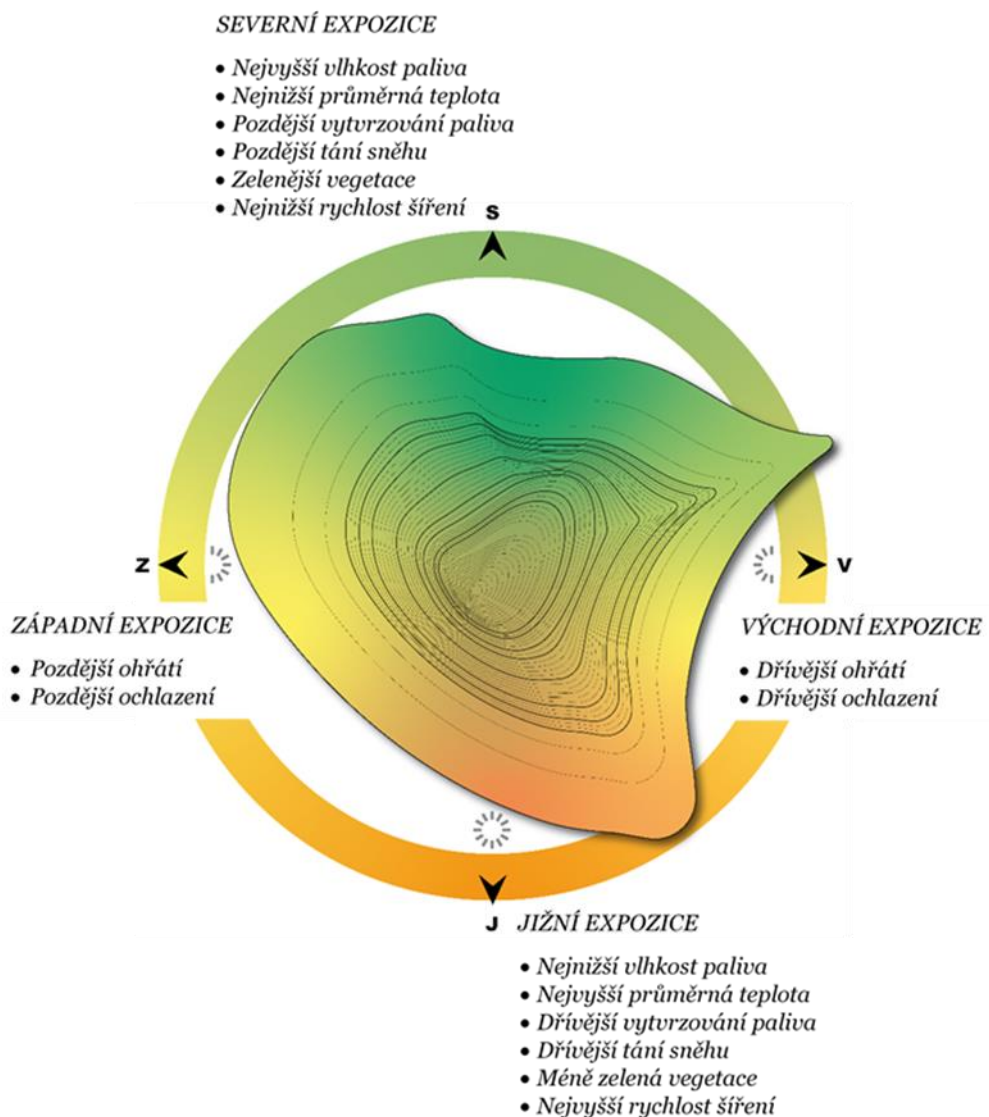


Obr. 14: Šíření lesního požáru směrem dolů ve svahovitém terénu (Ošřádal 2020; Pecl et al. 2021); 1 – proudění čerstvého vzduchu, 2 – směr předežívání, 3 – ze svahu dolů padající hořící palivo.

### 3.5.3.2 Expozice

Stráně s jihovýchodní, jihozápadní a jižní expozicí mají tak příznivou teplotu, že zde dochází k ovlivňování dřevní skladby i půdního krytu. Převládají zde dřeviny suchomilné a slunné. Vlivem kořenové konkurence dochází ke snižování zakmenění, a tím k růstu podílu bylinného a travního krytu, který velice brzy zasychá (Turesson 1914; Gail 1921; Shreve 1922, 1924, 1927a; Bates 1923; Platt 1951; Billings 1951; Pecl et al. 2021 a další). Svahy orientované na sever mají většinou vyšší vlhkost paliva, protože severní svahy jsou zpravidla méně osvětlené a dokáží zadržet více vlhkosti. Vegetace v těchto místech bývá zelenější, což ovlivňuje zapalitelnost (Turesson 1914; Gail 1921; Shreve 1922, 1924, 1927a; Bates 1923; Platt 1951; Billings 1951; a další) a šíření požáru, protože je třeba mnohem více tepelné energie pro přípravu materiálu na hoření (Obr. 15) (Majlingová, 2014).





Obr. 15: Charakteristika expozice terénu z hlediska potenciálu vzniku a šíření požáru (Ošťádal 2020).

### 3.5.3.3 Terénní prvky a jejich vliv na šíření se lesního požáru

Určité topografické prvky ovlivňují rychlost větru a směr v bezprostředním okolí těchto prvků, a to nezávisle na obecných povětrnostních podmínkách, které v dané oblasti panují. Tvar povrchu půdy také může ovlivňovat směr, stejně jako rychlost a intenzitu šíření lesního požáru (Introduction to Wildland Fire Behaviour 2006). Požáry vznikající poblíž spodní části ostrých zářezů v krajině mohou reagovat podobně hoření v kamnech. Dochází k nasávání vzduchu ze dna údolí a vyváří velmi silný proud vzduchu (průvan) směrem vzhůru, který se nerozptýluje, ale drží se v jedné linii v nejužším místě zářezu. Dochází tak k velmi intenzivnímu přehřívání prostoru, hoření a velmi rychlému šíření požáru směrem vzhůru. Tento jev je označován jako tzv. komínový efekt nebo ještě přesněji příkopový efekt (Obr. 16), který byl poprvé popsán

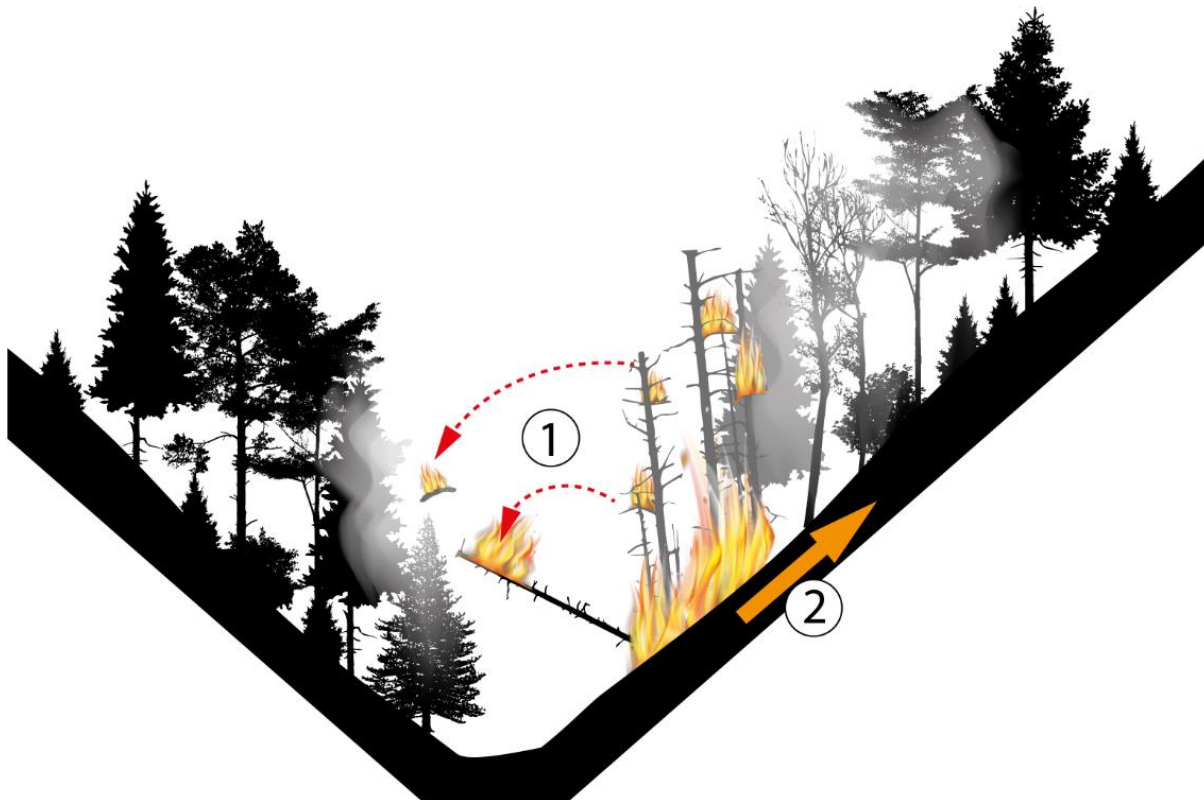
mimo oblast lesních požárů, a to při vyšetřování fatálního požáru dřevěných eskalátorů ve stanici metra Kings Cross v Londýně v roce 1987 (Sharples et al. 2010).



Obr. 16: Komínový/příkopový efekt v ostrém zářezu v krajině (Pecl et al. 2021 podle *Wildfires on slope* 2018); 1 – směr proudění čerstvého vzduchu, 2 – směr šíření požáru, 3 – odtah kouře, pásmo přípravy hoření.

Požár mění svoje chování i na hřebenech a vrcholech svahů. Při dosažení hřebene, pokud není silný vítr, požár většinou sníží svoji intenzitu a rychlost šíření. Zpravidla začíná šířit nepatrně do strany a přes hranu hřebene. Oheň hořící podél bočních hřebenů může změnit směr v okamžiku, kdy dosáhne bodu, kde hřeben padá do kaňonu (Introduction to Wildland Fire Behaviour 2006; Pecl et al. 2021). Sedla mohou způsobit, že procházející vítr sílí a kolísá nebo mění směr, čímž ovlivňují postup požáru (Wildfires on slopes 2018; Pecl et al. 2021). Pokud se

požár pohybuje po jedné straně úzkého údolí nebo rokle s velmi strmými stranami, může vyzařované teplo přehřívat palivo na protilehlém svahu a následně může odletujícími jiskrami nebo zřícením hořícího stromu dojít k přenosu požáru na protější stranu (Obr. 17) (Introduction to Wildland Fire Behaviour 2006; Pecl et al. 2021).



Obr. 17: Šíření lesního požáru v rokli, úzkém údolí (Pecl et al. 2021 podle *Wildfires on slopes* 2018); 1 – odletující části hořícího paliva přenáší požár na protilehlý svah údolí, 2 – směr šíření hlavního požáru po svahu nahoru.

V případě intenzivního vanutí větru na vrcholech svahů, sedlech, hřebenech může docházet k unášení nepatrných žhavých částic stoupajících společně s kouřem ve směru vanutí větru. Tyto žhavé částice unášené větrem dopadají na protilehlé svahy údolí, na opačné strany hřebene nebo vrcholu svahu, kde dochází k zahoření a vzniku nových, tzv. bodových požárů. Vznikají tak nová požářiště, které je nezbytné rychle eliminovat (Thomas & McAlpine 2010; Pecl et al. 2021). Při větších požárech mohou bodové požáry způsobit i uvěznění hasičích jednotek v místě požářiště (Weir 2009).

#### 3.5.3.4 Nadmořská výška

Nadmořská výška ovlivňuje výskyt podmínek pro vznik a šíření požáru. Kvůli obvykle vyšším teplotám dochází v nižších nadmořských výškách k rychlejšímu prosychání paliva. Ve vyšších nadmořských výškách je zpravidla vyšší sněhová pokrývka a její tání je v jarním období



pomalejší, stejně jako množství srážek je obvykle vyšší. Na druhou stranu vyšší nadmořské výšky jsou často podmíněny horským prostředím, kde může být nahromaděné větší množství hořlavého paliva, svahovité prostředí a topografie celkově může ovlivňovat vanutí větrů. Stejně tak pro horské polohy může být problematická hustota a sjízdnost lesních cest a dostupnost vodních zdrojů, což mohou rizikové faktory při zdolávání požáru (Introduction to Wildland Fire Behaviour 2006; Pecl et al. 2021).

### 3.5.3.5 Bariéry a protipožární pásy

Za bariéry v šíření lesního požáru obecně považujeme jakoukoliv překážku, oblast, kde chybí palivo, tedy jeden z prvků trojúhelníku hoření a nemůže zde tedy hoření vzniknout (Emmons 1973). Mezi takové přírodní bariéry můžeme zařadit řeky, jezera nebo skály. Za člověkem vytvořené protipožární bariéry lze považovat silnice, dálnice, vodní nádrže, rybníky, přehrady nebo protipožární pás vytvořený udržovaný v rámci pěstování lesa (Obr. 18) (např. Ascoli et al. 2020; Szczygiel et al. 2020), větší či menší technikou při hasební zásahu (např. pomocí malotraktoru a mulčovacího adaptéru) nebo zasahujícími hasičskými jednotkami pomocí ručních nástrojů jako Pulaskiho sekera, Gorgui nebo hrábě McLeod.



*Obr. 18: Protipožární pás ve stejnověkém porostu, který vznikl zalesněním předchozího požářiště. Pás je realizován dle metodiky Szczygiel et al. 2020. (foto Roman Berčák).*

### 3.5.3.6 Další stanovištní podmínky

Vliv geologického podloží je různý. Na vápencích, čedičích a trachytech se objevují vždy suchomilná společenstva pozemních rostlin, což zapříčiňuje zvýšení hořlavosti porostů. Avšak úrodnost těchto půd je podmíněna růstem kvalitních listnatých dřevin, které jsou naopak známy menší hořlavostí než stromy jehličnaté (Pfeffer 1961). Krakovský (2004) uvádí, že na skalnatém podkladě s menší vrstvou zeminy a humusu dochází k rychlejšímu prohřívání, neschopnosti udržet vláhu a mělkému uložení kořenových systémů stromů. Tyto faktory mohou být velice příznivé pro vznik a šíření lesního požáru. Stejně tak písčité půda se rychle přehřívá a neudrží vláhu, čímž dochází také k zasychání travin na povrchu a ke zvyšování rizika vzniku požáru. Proměnlivost půdních vlastností je ovlivněna environmentálními faktory jako klima, topografie, vegetace nebo disturbance zapříčiněné člověkem (Jenny 1941; Chen et al. 1997; McKenzie & Ryan 1999; Chaplot et al. 2001; Ollinger et al. 2002).

Dlouhodobý průměr spáleného území (velikostí lesních požárů) napříč krajinnou je dán komplexem proměnných zahrnujících rozlehlost krajiny, míru a délku pozorování, zkoumání danému území, lesnatosti území, topografií, fragmentací krajiny (řeky, jezera, cesty, pole), charakteristikami paliva, ročním obdobím, zeměpisnou šířkou, požárními hlídkami, politikou a prioritami v boji proti lesním požárům, schopností požárních sborů, výskytem rizik vznícení (lidé, blesky) a počasí (Skinner et al. 2002).

Schopnost vyhodnocovat a pochopit vlivy všech výše popsanych skutečností na reálné šíření požáru bylo a neustále je předmětem mnohých zkoumání, ze kterých se v průběhu času vyvinula významná činnost, kterou se zabývá velké množství výzkumníků na celém světě, a to modelování chování se požárů v přírodním prostředí (Sullivan 2009a).

## 3.6 Modely chování se lesních požárů

Po mnoho let vznikaly a vznikají v různých zemích světa modely šíření lesních požárů nebo požárů přírodního prostředí. První zmínky o snaze porozumění chování se požárů v přírodním prostředí byly práce Hawley (1926) a Gisborne (1927, 1929). Prezentovali myšlenku, že chápání lesních požárů a predikování nebezpečnosti požárů mohou být získány prostřednictvím měření, pozorování a teoretických úvah o faktorech, které mohou ovlivnit tyto požáry (Sullivan 2009a).

Na konci třicátých let a počátkem čtyřicátých let 20. století Curry & Fons (1938, 1940) a Fons (1946) přišli s přesným fyzickým přístupem k měření a modelování chování lesních požárů.

Počátkem padesátých let se objevují první pokusy o vybudování systémů pro vyhodnocování požárního nebezpečí, konkrétně se jednalo o snahu USA, Kanady a Austrálie (Sullivan 2009a). V letech 1950-1960 bylo vynaloženo velké úsilí ke zkoumání dopadů masového bombardování, např. Drážďany či Hamburk během druhé světové války. Tyto výzkumné práce byly úzce spjaty s lesními požáry, což vedlo k získání mnoha nových poznatků do problematiky šíření lesních požárů (Chandler et al. 1963).

V sedmdesátých letech postupně upadal výzkum, který podporovaly obranné organizace a v osmdesátých letech došlo k návratu výzkumu sloužící pro lesnický a hasičský management.

Rozvoj dálkového průzkumu země, geografických informačních systémů a výpočetní techniky vedl v devadesátých letech k nárůstu zájmu o modelování chování se lesních požárů, který trvá dodnes (Sullivan 2009a). Sullivan (2009a, 2009b, 2009c) dělí tyto modely do tří základních skupin:

- empirické a kvazi-empirické modely,
- fyzické modely a kvazi-fyzické modely,
- simulace šíření lesních požárů.

### **3.6.1 Empirické a kvazi-empirické modely**

Empirické modelování chování se požárů bylo postaveno na determinaci klíčových charakteristik používaných k popisu chování ohně. Těmito charakteristikami byla rychlost šíření fronty požáru nebo rychlost zvětšování se obvodu požáru. Při vývoji těchto modelů bylo využito pozorování přirozeně vzniklých požárů, dále požárů založených za jiným účelem, avšak nejvíce se využívalo tzv. experimentálních požárů, při kterých byly sledovány a posuzovány čtyři části (Sullivan 2009b):

- charakteristika a kvantifikace paliva a terén, ve kterém bude oheň zapálen,
- pozorování a měření atmosférických proměnných (rychlost větru, teplota vzduchu atd.),
- pozorování ohně (rychlost šíření, geometrie plamene, rychlost spalování atd.),
- statistické korelace mezi veškerými měřenými veličinami.

Empirické modely byly běžně jednorozměrné, a jejich závislou proměnnou, kterou predikovaly, byla rychlost šíření fronty požáru ve směru vanoucího větru (Sullivan 2009b). Primární využití pro tyto modely bylo odhadnout nejpravděpodobnější šíření požáru ve směru

větru pro účely hasičské taktiky na zdolání tohoto požáru (Chandler et al. 1983). Empirickými modely chování se lesních požárů je celá řada. V Austrálii byl vytvořen model CALM Jarrah II (Burrows 1999) nebo CSIRO Forest (Gould et al. 2007). V Portugalsku UdTM Pinaster (Fernandes et al. 2002). Ve Finsku Helsinki (Tanskanen et al. 2007) a Kanadě, kde vznikl empirický model CFBP (Forestry Canada Fire Danger Group 1992), který je součástí předpovědního systému CFFDRS (Stocks et al. 1991).

Kvazi-empirické modely jsou modely, které byly vyvíjeny v laboratorních podmínkách (větrné tunely apod.). Mezi takové patří například americký model TRW (Wolff et al. 1991), či Nelson (Nelson 2002). V Austrálii to byl Beer (1993) s modelem NBRU a ve Španělsku model Coimbra (Viegas 2002). Za nejznámější a pravděpodobně celosvětově nejvyužívanější kvazi-empirický model považujeme Rothermelův matematický model šíření pozemního lesního požáru (Rothermel 1972), který je s úspěchem implementován v desítkách dalších modelů predikujících šíření požárů v přírodním prostředí (Sullivan 2009c).

### **3.6.2 Fyzikální a kvazi-fyzikální modely**

Fyzikální modely využívají poznatky z chemie i fyziky spalování a přenosu tepla uvedené v pracích (Blackshear 1974; Incropera & DeWitt 1985; Williams 1985; Drysdale 1985; Pyne et al. 1996). Díky tomu jsou fyzické a kvazi-fyzické modely založeny na stejných procesech, bez ohledu na původ autora modelu nebo místa vývoje modelu. Odlišné jsou pouze systémy řídicích rovnic, které tyto procesy popisují, uskutečňují a řeší (Sullivan 2009a).

Nejvíce charakteristickým rozdílem mezi fyzikálním a kvazi-fyzikálním modelem je, že u fyzikálních modelů je do modelu zahrnuta chemická stránka spalování, která u kvazi-fyzikálních modelů chybí (Sullivan 2009a).

Fyzikální modely mají tuto chemii spalování odvozenou od základní chemické stránky paliva a jeho spalování, které určuje rychlost a množství energie uvolněné z paliva a tím i množství energie, které je následně přeneseno do okolního prostoru (Sullivan 2009a). Mezi fyzikální modely patří například australský model Weber (Weber, 1991) nebo model Forbes (Forbes, 1997). Ve Spojených státech amerických byl vyvinut FIRETEC (Linn 1997) nebo WFDS (Mell et al. 2007). Ve Francii to jsou modely IUSTI (Larini et al. 1998) nebo PIF97 (Dupuy et al. 1999). Existuje i fyzikální model z Ruska – Grishin (Grishin et al. 1997), Řecka – AIOLOS-F (Croba et al. 1994) nebo Španělska – UoS (Asensio & Ferragut 2002).

Naproti tomu kvazi-fyzikální modely spoléhají na empirické modelování, které předpovídá množství převedené energie na základě geometrie plamene nebo stanovují přenos

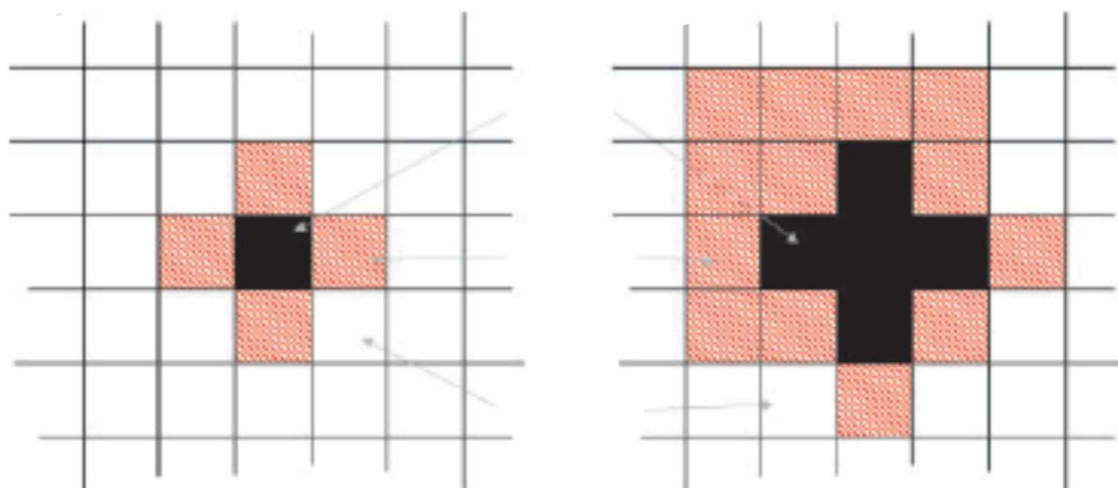
energie pomocí rovnice (Sullivan 2009a). Mezi tyto modely řadíme například americký TRW (Carrier et al. 1991) nebo australský ADFA I (de Mestre et al. 1989).

### 3.6.3 Simulace šíření požáru

Koncem 80. let a začátkem 90. let dvacátého století s příchodem levných osobních počítačů a s rozvojem využívání geografických informačních systémů docházelo k rozkvětu metod předpovídající šíření lesních požárů napříč celou krajinou (Beer 1990b; Green et al. 1990; Coleman & Sullivan 1996; Finney 1998). Šíření lesního požáru je v jednotlivých modelech uskutečněno pomocí dvou odlišných metod. První metodou je rozšiřování obvodu požáru na základě přímého kontaktu nebo na základě „přenosu na blízkého souseda“ tzv. raster based simulation. Druhá metoda využívá Huygensův princip šíření vln (Sullivan, 2009c).

#### 3.6.3.1 Přenos na blízkého souseda

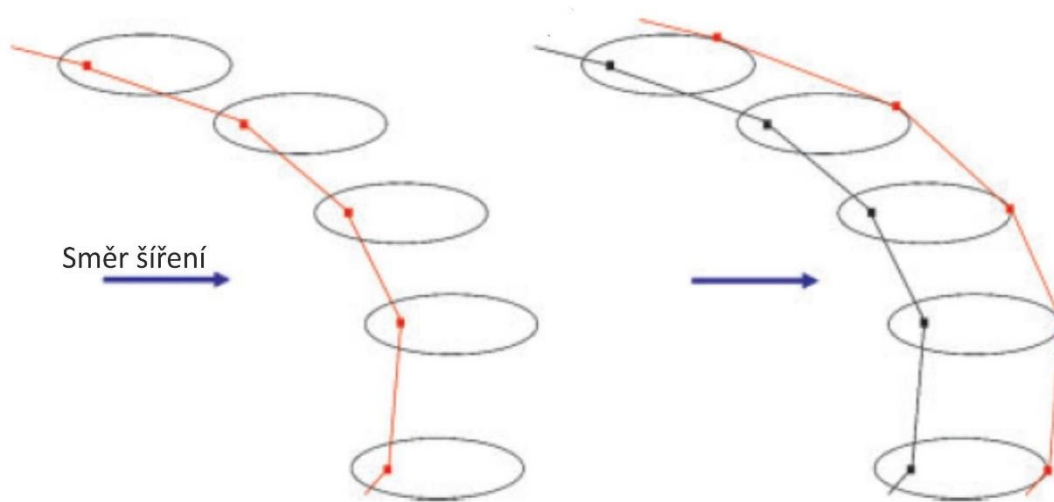
V případě tohoto přístupu je prostor reprezentován rasterovými buňkami, ve kterých je předdefinováno palivo. Právě nutnost definovat palivo v každé rasterové buňce, stejně tak vlivy na ně působící předurčuje tento způsob výpočtu šíření požáru pro prostory s homogenním palivem a konstantními meteorologickými podmínkami. Samotný přenos mezi buňkami je podobný principu celulárních automatů, kdy přenos probíhá na základě souboru jednoduchých pravidel definující interakci mezi jednotlivými buňkami (Obr.19) (Sullivan 2009c).



Obr. 19: Schéma šíření požáru pomocí přenosu na blízkého souseda; černý raster – spálená plocha, červený – hořící plocha; bílý – nehořící plocha (Sullivan 2009c).

### 3.6.3.2 Huygensův princip šíření vln

Huygensův princip šíření vln pracuje tím způsobem, že předpokládá individuální na sobě nezávislé zdroje požáru na frontě požáru a kalkuluje rychlost šíření každého individuálního zdroje požáru v závislosti na postavení vůči vanutí větru, palivu aj. Výsledkem je posun každého uvažovaného zdroje požáru směrem vpřed za jednotku času, propojením vrcholových bodů těchto individuálních zdrojů požáru vytváří nový perimetr požáru za jednotku času (Obr. 20).



Obr. 20: Ukázka způsobu výpočtu perimetru požáru pomocí Huygensova principu šíření vln (Sullinan 2009c).

Tento princip pro účely využívání odhadování šíření požárů v přírodním prostředí byl poprvé formálně představen v práci Anderson et al. (1982), ale první koncept byl aplikován již dříve v pracích Sanderlin & Sunderson (1975) a Sanderlin & Van Gelder (1977), a to pro účely vývoje systému FIREFIGHTER, který byl vyvíjen jako rozhodovací nástroj v oblasti požárního managementu. Na Huygensově principu šíření vln funguje i pravděpodobně jeden z nejnámějších software pro modelování šíření požáru, a to FARSITE (Finney 1994, 1998).

FARSITE (Finney, 1998) je matematický model pro časovou a prostorovou simulaci šíření a chování se požáru v podmínkách různorodého terénu, paliva a počasí. Je vytvořen na základě předpovědního systému chování se požáru BEHAVE (Andrews 1986). V modelování a simulaci růstu a rozšiřování čela požáru se využívá již zmiňovaný Huygensův princip šíření vln (Sullinan 2009c). Dále Farsite využívá existujících modelů – model šíření pozemního lesního požáru (Rothermel 1972), počátek vznícení koruny (Van Wagner 1977), šíření korunového požáru (Rothermel 1991), model tzv. post-frontálního spalování (F; Albin &

Reinhardt 1995) a vlhkost mrtvého paliva (Nelson 2000). Je založený na bázi GIS, vstupem do modelování i jeho výstupem jsou GIS vektorové a rastrové vrstvy. Postup modelování a simulace požáru v prostředí Farsite se skládá z postupných kroků, přípravy vstupních údajů a jejich samostatný vstup do prostředí, vybráním a nastavením modelů chování lesního požáru a kontrolou samotného procesu simulace (Majlingová & Smreček 2013).

Jak již bylo zmíněno, software Farsite funguje na principech vypracovaných při vývoji software Behave (Andrews 1986). Behave je počítačový program vytvořený pro operační systém Windows, sloužící k modelování požárů. Konkrétně může být využit pro modelování šíření požáru nebo dopadů požáru. Systém je založen na skupině matematických modelů popisujících chování ohně a dopady požáru. Do modelů jsou zadávány specifické informace jako vlastnosti půdy nebo paliva. Program simuluje rychlost šíření požáru, detekční vzdálenost požáru, výšku plamenů, úmrtnost stromů, vlhkost paliva a další různé proměnné používané k předpovědi požární odolnosti. Výsledkem kalkulací software Behave jsou číselné hodnoty nikoliv prostorové šíření požáru na podkladech GIS, jak je tomu v případě Farsite (Heinsch et al. 2016).

V roce 2024 bude k dispozici aktualizovaná verze softwaru Behave, konkrétně Behave<sup>7</sup>, která má přepracované rozhraní a je kompatibilní s kódy systému FlamMap, který v sobě nese software Farsite (FRAMES 2024).

Dalšími simulátory využívající dvou výše popsaných principů šíření požáru jsou například australské SiroFire (Coleman & Sullivan 1996), portugalský FireMap (Vasconcelos & Guertin 1992), italské PdM (Guariso & Baracani 2002) a další (Sullivan 2009c).

### **3.7 Rothermelův matematický model šíření pozemního lesního požáru**

Základní Rothermelův model je kategorizován jako kvazi-empirický a s mírnými modifikacemi Franka A. Albinho (Albini 1976a) je používám v nezměněné formě po celé desetiletí až do současnosti (Andrews 2018). Tento model je založen na studiích množství tepelné energie pozemního paliva (Frandsen 1971), data získaná experimenty z aerodynamických tunelů za používání různého typu paliva s různými charakteristikami (Rothermel & Anderson 1966) a výzkumu týkající se požáru na travnatých plochách Austrálie (McArthur 1969).

Model šíření požáru je založen na množství akumulované energie (paliva), který slouží jako zdroj tepla a prostředí v okolí tohoto paliva, které působí jako „chladič“ (Frandsen 1971). Model předpokládá lineární frontu plamenů a kalkuluje rychlost šíření fronty za přítomnosti nebo bez přítomnosti faktoru větru a sklonu terénu. Model je vyvinut pro kalkulaci šíření požáru

svahem vzhůru s působením větru za úvahy jednotného paliva. Palivo je mixem různých velikostních tříd živého a mrtvého paliva a definovanou jednotnou mocností palivového „celku“. Model pro svoji funkčnost vyžaduje přítomnost jemného mrtvého paliva, které považuje za nejvýznamnější komponent palivového celku. Model kalkuluje pouze pozemní lesní požár do výšky cca 6 stop (1,82 metru) nad povrch půdy, zahrnuje tedy keře a menší stromy. Tento model není využitelný pro účely modelování šíření korunových požárů, šíření podzemních lesních požárů nebo hoření/dohořívání paliva v prostoru, kterým již prošla fronta požáru (Andrews 2018).

Velkou výhodou modelu jsou poměrně jednoduché a snadno definovatelné vstupní parametry, které jsou součástí výpočtu. Tyto vstupní parametry je pak velice snadné měnit v závislosti na různých typech prostředí, proto je tak všestranně a celosvětově aplikovatelný (Andrews 2018).

Tento model je používán v USA ke kalkulování indexů požárního rizika (Deeming et al. 1972). Později začal být také využíván jako nástroj pro predikování šíření reálných lesních požárů v rámci oddělení „Fire Behavior“ (nyní FBAN, Fire Behavior Analyst) (Rothermel 1983). Zároveň je v současnosti implementován do mnoha systémů a softwarů jako například BehavePlus (Andrews et al. 2005) a FARSITE (Finney 1998). Rothermelův model šíření pozemního lesního požáru je nejčastěji používaný model v systémech protipožární ochrany Spojených států amerických a také se velmi významně využívá ve zbylých částech světa (Andrews 2018). Sullivan (2009c) poukazuje, že 9 ze 14 publikovaných simulátorů šíření požáru v období od 1990 do 2007 nese v sobě základní kalkulace postavené na Rothermelově matematickém modelu (Rothermel 1972).

V následujících kapitolách je detailně popsána struktura a posloupnost výpočtu tohoto modelu.

### **3.7.1 Vstupní parametry**

Vstupními parametry (Tab. 1) do výpočtu Rothermelova matematického modelu šíření pozemního lesního požáru jsou proměnné identifikující strukturu paliva jako množství spalného tepla (výchřevnost), obsah minerálních látek nebo hustota jednotlivých segmentů paliva. Dalším typem vstupních proměnných je množství paliva identifikující parametry jako poměr povrchu a objemu segmentu paliva, mocnost paliva, hmotnost sušiny nebo vlhkost mrtvého materiálu. Posledním typem vstupních proměnných jsou proměnné týkající se podmínek prostředí, kam řadíme vlhkost paliva, střední rychlost větru a sklon. Do výpočtu vstupují data v angloamerické



měrné soustavě. Vzhledem k tomu, že povrch lesa skládá z více segmentů paliva, které má odlišné vlastnosti, jsou pro snadnější orientaci v jednotlivých proměnných indexovány pomocí písmene  $i$ , kdy je hodnota pro mrtvé palivo  $i = 1$  a hodnota pro živé palivo  $i = 2$ , velikostní třída je pak udávána písmenem  $j$  (Andrews 2018).

*Tabulka 1: Vstupní proměnné pro účely výpočtu Rothermelova matematického modelu šíření pozemního požáru (Rothermel 1972; Andrews 2018).*

Typ	Symbol	Popis
<b>Struktura paliva</b>	$h_{ij}$	Výhřevnost (Btu/lb)
	$(S_T)_{ij}$	Obsah minerálních látek (%)
	$(S_e)_{ij}$	Efektivní obsah minerálních látek (%)
	$(\rho_p)_{ij}$	Hustota segmentů paliva (lb/ft <sup>3</sup> )
<b>Množství paliva</b>	$\sigma_{ij}$	Poměr povrchu a objemu paliva (ft <sup>2</sup> /ft <sup>3</sup> )
	$(w_o)_{ij}$	Hmotnost sušiny paliva (lb/ft <sup>2</sup> )
	$\delta$	Mocnost (výška) paliva (ft)
	$(M_x)_1$	vlhkost vyhasnutí mrtvého paliva
<b>Podmínky prostředí</b>	$(M_f)_{ij}$	Vlhkost paliva
	$U$	Střední rychlost větru (ft/min)
	$\tan \varphi$	Sklon

Jednotlivé parametry v rámci paliva jsou identifikovány pro jednotlivé segmenty paliva  $i = 1$  pro mrtvé a  $i = 2$  pro živé paliva, velikostní třída je indikována písmenem  $j$ .

### 3.7.2 Kalkulace vlhkosti vyhasnutí paliva „moisture of extinction“

Zatímco vlhkost vyhasnutí mrtvého paliva  $((M_x)_1)$  (požár není schopen se šířit při určité vlhkosti) je vstupní parametr, vlhkost vyhasnutí živého paliva  $((M_x)_2)$  je dopočítána na základě studie Forsberg a Schroeder (1971) a rozpracována pro účely matematického modelu v Rothermel (1972). Vlhkost vyhasnutí živého paliva je kalkulována na základě poměru mezi živým a mrtvým palivem, vlhkosti jemného mrtvého paliva a vlhkostí vyhasnutí mrtvého paliva. Albin (1976a) ve svojí práci upravil původní výpočet v Rothermelově modelu (Rothermel 1972), aby snížil citlivost výstupu modelu na libovolné definice „jemného“ pomocí

metody výpočtu příslušného poměru množství paliva a obsahu vlhkosti „jemného“ mrtvého paliva v rámci všech velikostních tříd.

Vlhkost vyhasnutí živého paliva  $((M_x)_2)$  je tedy kalkulována pomocí vzorce

$$(M_x)_2 = 2,9W[1 - M_{f,dead} / (M_x)_1] - 0,226; (min = (M_x)_1)$$

Poměr živého a mrtvého paliva ( $W$ ) je kalkulován jako

$$W = \frac{\sum_j (w_0)_{1j} \exp\left(-\frac{138}{\sigma_{1j}}\right)}{\sum_j (w_0)_{2j} \exp\left(-\frac{500}{\sigma_{2j}}\right)}$$

Vlhkost jemného mrtvého paliva  $(M_{f,dead})$  je

$$M_{f,dead} = \frac{\sum_j (M_f)_{1j} (w_0)_{1j} \exp\left(-\frac{138}{\sigma_{1j}}\right)}{\sum_j (w_0)_{1j} \exp\left(-\frac{138}{\sigma_{1j}}\right)}$$

Tyto výše uvedené vzorce ( $W$ ) a  $(M_{f,dead})$  jsou kalkulovány pouze pro účely výpočtu  $((M_x)_2)$  a nejsou nikde dále v modelu šíření pozemního požáru využity.

### 3.7.3 Váhové faktory

Model šíření pozemního požáru je založen na konceptu, že jednotlivý charakteristický parametr paliva je váženou hodnotou variace skupiny těchto parametrů v rámci heterogenní směsi paliva. Tento přístup zvyšuje významnost jemného paliva. Vývoj modelu byl založen na principu, jakým způsobem jednotlivé charakteristické parametry paliva ovlivňují tři základní rysy šířícího se požáru: zdroj tepla, pohlcovač tepla „chladič“ a proudění vzduchu nebo tepla v prostoru (Andrews 2018).

K porozumění struktury paliva byl vyvinut koncept „jednotkového palivového článku“. Jednotkový palivový článek je nejmenší objem paliva určité střední tloušťky paliva, který nese dostatek paliva proto, aby statisticky reprezentoval celý palivový komplex. Tento koncept pomáhá při matematickém vážení vstupních parametrů (Andrews 2018).

Model předpokládá, že palivo různých velikostí je rovnoměrně rozmístěno v palivovém poli. Větší palivo má na šíření požáru zanedbatelný vliv. Původní Rothermelův model kalkuloval s palivem všech velikostí (Andrews 2018). Albini (1976a) tento váhový faktor

upravil, kdy model po úpravě ignoruje palivo o velikosti  $\sigma < 16 \text{ ft}^2/\text{ft}^3$  ( $>$  průměr 3 palce (7,62 cm)). Váhový faktor je v tomto případě nastaven na hodnotu 0.

Model používá váhové faktory  $f_{ij}$ , stejně jako  $f_i$  uvedené v práci Rothermel (1972), tak používá i váhové faktory  $g_{ij}$ , které byly vyvinuty právě Albinim (Albini, 1976a).

Váhové faktory jsou přiřazeny na základě zastoupení (pokryvnosti) palivem v rámci velikostních tříd a kategorií. Průměrná celková hodnota paliva pro jednotkový palivový článek každé kategorie v rámci každé velikostní třídy ( $A_{ij}$ ) je dána průměrnou hmotností sušiny ( $w_0$ ) $_{ij}$ , poměrem povrchu a objemu paliva ( $(\sigma)_{ij}$ ) a hustotou segmentů paliva ( $(\rho_p)_{ij}$ ).

$$A_{ij} = (\sigma)_{ij}(w_0)_{ij}/(\rho_p)_{ij}$$

Průměrná celková hodnota paliva pro jednotkový palivový článek živého a mrtvého paliva ( $A_i$ ) je sumou hodnot ( $A_{ij}$ ).

$$A_i = \sum_j A_{ij}$$

Průměrná celková hodnota paliva pro jednotkový palivový článek ( $A_T$ ) je pak sumou průměrné celkové hodnoty paliva jednotkový palivový článek živého a mrtvého paliva ( $A_i$ ).

$$A_T = \sum_i A_i$$

Váhový faktor  $f_{ij}$  je kalkulován jako poměr hodnoty paliva jednotkového palivového článku v rámci každé kategorie v rámci  $j^{\text{th}}$  velikostní třídy ( $A_{ij}$ ) k hodnotě paliva jednotkového palivového článku živého či mrtvého paliva ( $A_i$ ).

$$f_{ij} = A_{ij}/A_i$$

Váhový faktor  $f_i$  je kalkulován jako poměr mezi celkovou hodnotou paliva jednotkového palivového článku živého či mrtvého paliva ( $A_i$ ) k celkové hodnotě paliva jednotkového palivového článku ( $A_T$ ).

$$f_i = A_i/A_T$$

Čistá hodnota paliva pro živé a mrtvé palivové kategorie byla kalkulována jako suma hodnoty paliva pro každou velikostní třídu v kategoriích s váhovým faktorem, kterým se na celkové hodnotě paliva daná velikostní třída podílí. Rothermel použil tento  $f$  faktor při prvním

představení modelu v roce 1972. Albin o několik let později (Albin 1976a) představil  $g$  váhový faktor pro čistou hodnotu paliva protože použití  $f$  faktoru vytvářelo logickou chybu v tom že, čistá hodnota paliva je citlivá na rozdělení palivového zatížení mezi téměř stejně velké třídy. Pokud je například hodnota paliva velikostní třídy rozdělena na dvě poloviny, čistá hodnota paliva se sníží na polovinu, a to i při stejném poměru plochy povrchu k objemu ( $\sigma$ ). Pro zmírnění tohoto problému jsou paliva rozdělena podle velikosti do šesti podtříd, přičemž všichni členové každé podtřídy mají stejný váhový faktor. Váhový faktor pro podtřídu ( $g_{ij}$ ) je část celkové hodnoty paliva, kterou tato podtřída přispívá (Andrews 2018).

Palivo je rozděleno podle velikosti do šesti podtříd:

$$\sigma > 1200$$

$$1200 > \sigma \geq 192$$

$$192 > \sigma \geq 96$$

$$96 > \sigma \geq 48$$

$$48 > \sigma \geq 16$$

$$16 > \sigma$$

Palivu náležícímu do jedné podtřídy je dána stejná váhová hodnota:

$$g_{ij} = \sum_{\substack{\text{podtřída} \\ \text{do které} \\ \text{patří } j}} f_{ij}$$

$$g_{ij} = 0 \text{ pro } \sigma < 16$$

Váhový faktor  $g_{ij}$  je používán pouze pro čistou hodnotu paliva. Váhový faktor  $f_{ij}$  je používán pro identifikování množství tepelné energie mrtvého a živého paliva, efektivní obsah minerálních látek, vlhkost paliva a poměr mezi povrchem a objemem paliva. Váhový faktor  $f_i$  je používán pro charakterizování poměru povrchu a objemu celkového paliva (Andrews 2018).

### 3.7.4 Charakteristické hodnoty živého a mrtvého paliva

Charakteristické hodnoty živých a mrtvých kategorií jsou zjišťovány na základě hodnot jednotlivých velikostních tříd a váhových faktorů dané třídy.

Čistá hodnota paliva pro každou velikostní třídu je redukována obsahem minerálních látek. Jedná se výpočtu v Rothermelově modelu (Rothermel 1972) provedenou již několikrát zmiňovanou úpravou Albinio (Albini 1976a).

$$(w_n)_{ij} = (w_0)_{ij}(1 - (S_T)_{ij})$$

Charakteristické hodnoty živých a mrtvých kategorií se počítají následovně:

Čistá hodnota paliva

$$(w_n)_i = \sum_j g_{ij}(w_n)_{ij}$$

Obsah potenciálu tepla

$$h_i = \sum_j f_{ij}h_{ij}$$

Efektivní obsah minerálních látek

$$(S_e)_i = \sum_j f_{ij}(S_e)_{ij}$$

Tlumicí koeficient minerálů, který může dosahovat maximální hodnoty jedna, opětovně se jedná o změnu rovnice původního výpočtu Rothermel 1972 provedenou Albinim (Albini 1976a).

$$(\eta_s)_i = 0,174(S_e)_i^{-0,19} \quad (max = 1)$$

Obsah vlhkosti

$$(M_f)_i = \sum_j f_{ij}(M_f)_{ij}$$

Tlumicí koeficient vlhkosti

$$(\eta_M)_i = 1 - 2,59(r_M)_i + 5,11(r_M)_i^2 - 3,52(r_M)_i^3$$

$$(r_M)_i = \frac{(M_f)_i}{(M_x)_i} \quad (max = 1)$$

Poměr povrchu a objemu

$$\sigma_i = \sum_j f_{ij} \sigma_{ij}$$

### 3.7.5 Kalkulace vlastností paliva

Jedna hodnota reakční rychlosti ( $\Gamma'$ ) je vypočítána pro komplex paliva, závisující na stísňenosti paliva („packing ratio“) a velikosti částí paliva. Hodnota stísňenosti paliva reguluje teplo a proudění vzduchu v rámci komplexu paliva, je definována jako průměrná hodnota všech velikostí paliva. Nicméně, poměr mezi povrchem a objemem je parametrem, který charakterizuje velikost částí palivového komplexu a reguluje proces spalování fronty požáru, musí být vážen plochou povrchu (Andrews 2018).

Charakteristický poměr povrchu a objemu ( $\sigma$ ) celku je:

$$\sigma = \sum_i f_i \sigma_i$$

Průměrná objemová hmotnost ( $\rho_b$ ) je dopočítána z výšky paliva ( $\delta$ ) a hmotnosti sušiny paliva ( $w_0$ )<sub>ij</sub>.

$$\rho_b = \frac{1}{\delta} \sum_i \sum_j (w_0)_{ij}$$

Průměrná stísňenost paliva ( $\beta$ ) je dána výškou paliva ( $\delta$ ), hmotností sušiny paliva ( $w_0$ )<sub>ij</sub> a hustotou segmentů paliva ( $\rho_p$ )<sub>ij</sub> každé velikostní třídy.

$$\beta = \frac{1}{\delta} \sum_i \sum_j (w_0)_{ij} / (\rho_p)_{ij}$$

### 3.7.6 Finální kalkulace

Hodnoty paliva jsou poté využity pro hledání optimální (potenciální) reakční rychlosti

$$(\Gamma') = \Gamma'_{max} \left( \frac{\beta}{\beta_{op}} \right)^A \exp \left[ A \left( 1 - \frac{\beta}{\beta_{op}} \right) \right]$$

kde

$$\Gamma'_{max} = \sigma^{1,5} (495 + 0,0594\sigma^{1,5})^{-1}$$

$$\beta_{op} = 3,348(\sigma)^{-0,8189}$$

$$A = 133\sigma^{-0,7913}$$

Rovnice pro hodnotu  $A$  je opětovně změnou provedenou Albinim (Albini 1976a).

Intenzita reakce

$$I_R = \Gamma' \sum_i (w_n)_i h_i (\eta_M)_i (\eta_S)_i$$

Zatímco váhový faktor  $f_i$  byl částí původní rovnice Rothermelova modelu (Rothermel 1972) pro intenzitu reakce ( $I_R$ ) na základě návrhu Albinioho (1976a) však toto bylo pozměněno a váhový faktor byl odstraněn.

Hodnota toku šíření bez vlivu větru a svahu ( $\xi$ ) je funkcí průměrné stísněnosti paliva ( $\beta$ ) a charakteristickým poměrem povrchu a objemu ( $\sigma$ ).

$$\xi = (192 + 0,2595 \sigma)^{-1} \exp[(0,792 + 0,681\sigma^{0,5})(\beta + 0,1)]$$

Z hlediska tepelného „chladiče“ je průměrná objemová hmotnost ( $\rho_b$ ) závislá na objemových vlastnostech paliva v palivovém komplexu. Číslo efektivního tepla ( $\varepsilon$ ) a teplo před vzplanutím ( $Q_{ig}$ ) jsou závislé na povrchu paliva. Proto jsou objemové vlastnosti paliva odděleny od velikostních vlastností při sčítání a vážení.

Teplo před vzplanutím pro každou velikostní třídu a kategorii je

$$(Q_{ig})_{ij} = 250 + 1116(M_f)_{ij}$$

Tepelný „chladič“

$$\rho_b \varepsilon Q_{ig} = \rho_b \sum_i f_i \sum_j f_{ij} [\exp(-138/\sigma_{ij})] (Q_{ig})_{ij}$$

Faktor sklonu ( $\phi_s$ ) a faktor větru ( $\phi_w$ ) jsou kalkulovány z relativní stísněnosti paliva ( $\beta/\beta_{op}$ ) a charakteristického poměru mezi povrchem a objemem paliva ( $\sigma$ ).

$$\phi_s = 5,275\beta^{-0,3} (\tan \phi)^2$$



$$\phi_w = CU^B(\beta/\beta_{op})^{-E}$$

kde

$$C = 7,47 \exp(-0,133 \sigma^{0,55})$$

$$B = 0,02526 \sigma^{0,54}$$

$$E = 0,715 \exp(-3,59 \times 10^{-4} \sigma)$$

Finální hodnota rychlosti šíření požáru pro palivový komplex skládající se z mrtvého i živého paliva různých velikostních tříd je následující:

$$R = I_R \frac{\xi(1 + \phi_w + \phi_s)}{\rho_b \varepsilon Q_{ig}}$$

### 3.7.7 Rezidentní doba

Rezidentní doba ( $t_r$ ) je časový úsek, který potřebuje fronta požáru k dosažení určitého bodu. Anderson (1969) zjistil, že odhad rezidentní doby hoření paliva v jednotně rozloženém v prostoru může být kalkulován z velikosti částic paliva.

$$t_r = 8d$$

kde

$$t_r = \text{rezidentní doba (min)}$$

$$d = \text{průměr částic paliva (palce)}$$

Rothermel ve svém modelu šíření pozemního požáru použil poměr povrchu a objemu paliva ( $\sigma$ ) k dopočítání průměru části paliva. Vztah poměru povrchu a objemu paliva s velikostí paliva je

$$d = 48/\sigma$$

Rezidentní doba je tedy

$$t_r = 384/\sigma$$

### 3.7.8 Vyprodukované teplo na ploše

Vyprodukované teplo na ploše ( $H_A$ ) se počítá pomocí intenzity reakce ( $I_R$ ) a rezidentní doby ( $t_r$ ). Intenzita reakce je mírou energie, která se uvolní na jednotku plochy při hoření fronty požáru (Btu/ft<sup>2</sup>/min). Vyprodukované teplo na ploše je množství energie, které se uvolní na ploše za rezidentní dobu.

$$H_A = I_R t_r$$

### 3.7.9 Intenzita fronty požáru

Byram (1959) kalkuloval intenzitu fronty požáru  $I_B$  jako

$$I_B = HwR$$

kde

$I_B$  = Byramova intenzita fronty požáru (Btu/ft/s)

$H$  = výhřenost paliva (Btu/lb)

$w$  = váha dostupného paliva (lb/ft<sup>2</sup>)

$R$  = rychlost šíření požáru (ft/s)

Albini (1976a) definoval vztahy z Rothermelova matematického modelu šíření pozemního požáru k identifikování intenzity fronty požáru. Vyprodukované teplo na ploše ( $H_A$ ) je využito k odhadnutí  $Hw$  a změnou jednotek rychlosti šíření požáru  $R$  z ft/s na ft/min je pak intenzita dopočítána jako

$$I_B = H_A R$$

### 3.7.10 Délka plamene

Délka plamene ( $F_B$ ) je kalkulována z intenzity fronty požáru podle Byramovi rovnice (Brown & Davies 1973), a to

$$F_B = 0,45 I_B^{0,46}$$

kde

$F_B$  = Byramova délka plamene (ft)

$I_B$  = Byramova intenzita fronty požáru (Btu/ft/s)

### 3.8 Palivové modely pro účely modelování šíření lesního požáru

Parametry paliva pro vstup do výpočtů šíření pozemního požáru jsou výška paliva, vlhkost vyhasnutí mrtvého paliva a pro každou velikostní třídu mrtvého i živého paliva: poměr povrchu a objemu paliva, hmotnost sušiny, výhřevnost, hustota segmentů paliva, celkový obsah minerálních látek a efektivní obsah minerálních látek (Tab. 1). V kalkulacích Rothermelova matematického modelu nejsou žádná omezení, proto je možné použít neomezené množství tříd mrtvého a živého paliva (Andrews 2018).

Pro účely využívání Rothermelova matematického modelu bylo v průběhu času pro podmínky Spojených států amerických definováno 53 palivových modelů. Autoři uvádějí, že je možné vytvořit vlastní palivové modely, pokud hodnoty stávajících palivových modelů jsou odlišné a existuje potřeba vytvořit vlastní palivové modely pro dané podmínky (Andrews 2018).

#### 3.8.1 Standardní palivové modely

Jedenáct palivových modelů bylo publikováno Rothermelem (1972) v rámci představení Rothermelova matematického modelu šíření pozemního požáru. V následujících letech byly přidány dva další palivové modely a byly zakomponovány změny do původních palivových modelů, jako například definování vlhkosti vyhasnutí mrtvého paliva pro jednotlivé palivové modely. Původně byla hodnota vlhkosti vyhasnutí mrtvého paliva konstantní pro všechny palivové modely (30 %) (Albini 1976a). Anderson (1982) detailně pospal těchto definovaných palivových modelů a přidal reprezentativní fotografie. Ve snaze rozšiřovat palivové typy v rámci 13 definovaných palivových modelů, identifikovaly Scott & Burgan (2005) dalších 40 palivových modelů. Ve studii navrhovali nahrazení původních 13 palivových modelů rozšířeným počtem 40 palivových modelů. Původní palivové modely však měly odlišné hodnoty v porovnání s novými palivovými modely, proto začaly být využívány současně a je tedy používáno všech 53 palivových modelů. Základní parametry palivových modelů jsou uvedeny v příloze 1, mezi parametry jsou množství paliva rozdělené jednotlivých palivových skupiny, poměr povrchu a objemu paliva, výška paliva, vlhkost vyhasnutí paliva, objemová hmotnost nebo relativní stísněnost (Andrews 2018).

### 3.8.2 Dynamické palivové modely

Koncept dynamických palivových modelů byl vyvinutý pro účely stanovování požárního rizika reflektující sezónní změny (Burgan 1979a). Palivo na ploše je převáděno z živého na mrtvé, což reprezentuje sezónní dynamiku paliva. Množství přeneseného paliva z živého na mrtvé je definováno pomocí vlhkosti živého jemného paliva „life herbaceous“. Tyto dynamické modely byly vytvořeny pro účely práce v prostředí starého systému BEHAVE (Burgan 1984). Sedmnáct ze 40 palivových modelů od Scott & Burgan (2005) jsou dynamickými palivovými modely. Jedná se o palivové modely s vysokým zastoupením živého jemného paliva jako traviny, byliny (Andrews, 2018).

Software BEHAVE starší verze a NFDRS (National Fire Danger Rating System – národní systém pro hodnocení požárního rizika) převáděly jednoduše palivo z živého paliva „life herbaceous“ do 1-hodinového mrtvého paliva (Andrews 2018). Tento přístup byl změněn současně s vyvinutím nových palivových modelů od Scotta & Burgana (2005). Živé palivo není v tomto případě převedeno do mrtvého 1-hodinového paliva. Místo toho je vytvořena nová palivová skupina mrtvé byliny „dead herbaceous“, a to z důvodu toho, že nedojde ke změně hodnoty poměru povrchu a objemu paliva, tak jako to bylo v případě přiřazení k 1-hodinovému palivu. Palivová skupina mrtvé byliny je tedy převedena do mrtvého paliva při zachování stejného poměru povrchu a objemu paliva jak u 1-hodinového paliva, tak u nově vytvořené palivové skupiny mrtvé byliny (Scott & Burgan 2005).

Pro standardní palivové modely

$(w_0)_{11}$  = množství 1-hodinové paliva (zůstává konstantní pro palivový model)

$(w_0)_{12}$  = množství mrtvých bylin (zpočátku 0)

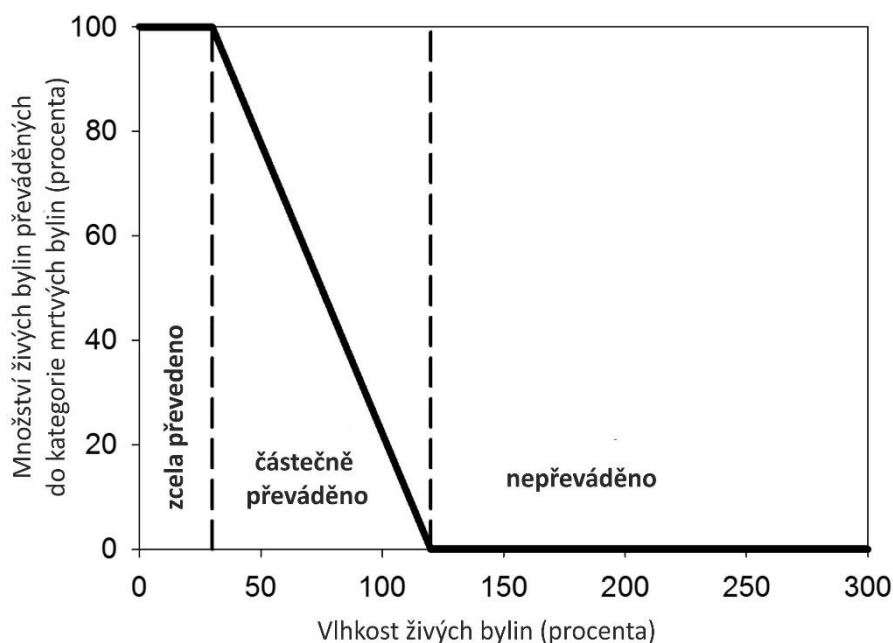
$(w_0)_{21}$  = množství živých bylin (hodnota před převedením na mrtvé byliny)

$(M_f)_{21}$  = vlhkost živých bylin

$T$  = množství paliva přeneseného z živých bylin na mrtvé byliny

Jednohodinové palivo zůstává konstantní. Množství paliva palivové skupiny živé byliny pro jednotlivé palivové modely (příloha 1) je hodnota množství paliva předtím, než je převedeno do třídy mrtvých bylin. Hodnota mrtvých bylin je před převedením s hodnotou nula, proto není uváděna v tabulce. Množství paliva živých bylin přenesených z živých bylin do mrtvých ( $T$ ) je uváděno hodnotou od 0 do 1. K transferu živých bylin do mrtvých nedochází,

pokud je vlhkost živého paliva větší než 1,2 (120 procent). Naopak veškeré živé palivo je převedeno do kategorie mrtvých bylin, když je hodnota vlhkosti živých bylin 0,3 (30 procent) a níže (Obr. 21) (Andrews 2018).



Obr. 21: Převod palivové skupiny živé byliny do kategorie mrtvé byliny v závislosti na vlhkosti živých bylin (Burgan 1979a; Andrews 2018).

$$T = -1,11(M_f)_{21} + 1,33; \quad 0 \leq T \leq 1,0$$

upravené množství paliva je tedy pak

$$(w_0)_{12} = T(w_0)_{21}$$

$$(w_0)_{21,nová} = (w_0)_{21} - T(w_0)_{21}$$

Převod množství paliva v rámci dynamických palivových modelů není součástí modelu šíření požáru, ale je to metoda, jak upravit parametry paliva předtím, než je model kalkulován. Software BehavePlus nabízí možnost uživatelům specifikovat hodnotu ( $T$ ) pokud uživatel nechce použít metodu převodu množství paliva z živých bylin na mrtvé podle vlhkosti živých bylin (Andrews 2018).

Scott & Burgan (2005) ve svojí práci varovali, že pokud nedojde k převodu živých bylin na mrtvé, všechny živé byliny zůstanou v kategorii paliva živých, což může vést k tomu, že

palivové modely s dominancí trávy budou vykazovat velmi nízkou rychlost šíření a intenzitu požáru bez ohledu na rychlost větru nebo vlhkost paliva.

### **3.8.3 Vlastní palivové modely**

Pokud uživateli nevyhovovalo standardních 13 palivových modelů, byl vyvinut nástroj v systému Behave starší verze k definování vlastních palivových modelů (Burgan 1987; Burgan 1984). Program NEWMDL („new model“ – nový model) umožňoval vytvořit nový palivový model a dále jej testovat až do doby, kdy vykazoval reálné výsledky šíření požáru (Andrews 2018). S rozšířením o dalších 40 palivových modelů však přestal být více využíván, protože nebylo třeba definovat další palivové modely (Scott & Burgan 2005).

Vývoj vlastních palivových modelů není jednoduchý a vyžaduje terénní měření. Dále je nezbytné pro správné nastavení palivového modelu znát celý proces kalkulací požárního chování a jakým způsobem jednotlivé hodnoty ovlivňují kalkulace, bez těchto znalostí je velice těžké palivové modely tvořit (Andrews 2018).

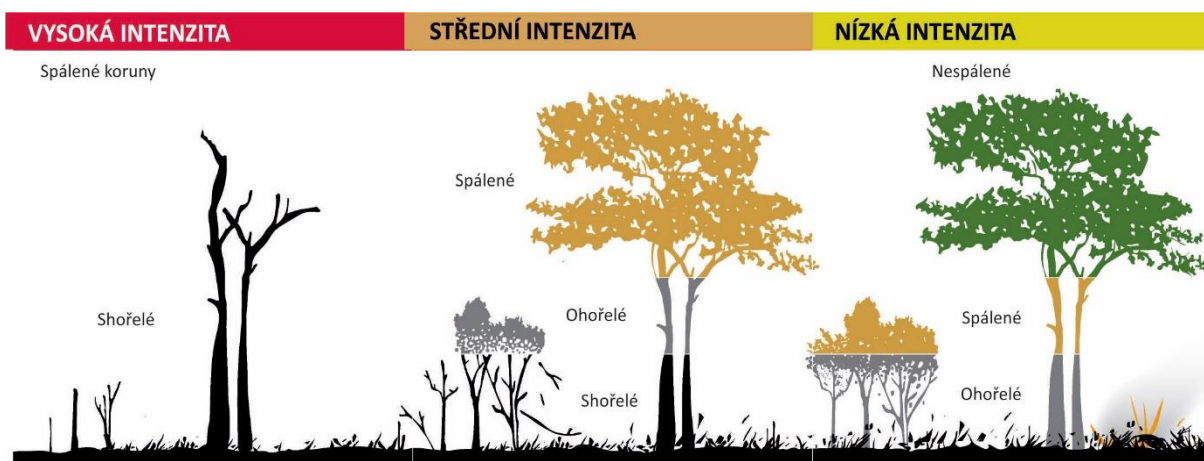
### **3.8.4 Palivové modely speciálních případů**

Jako přídavek ke standardním palivovým modelům a těm vlastním existuje ještě další skupina palivových modelů, a to palivové modely speciálních případů. Tyto modely nejsou nikterak limitovány v počtech velikostních tříd nebo konstant používaných u standardních nebo vlastních palivových modelů. Například Rothermel & Philpot (1973) vyvinuly speciální palivový model pro tzv. chaparral (suchomilné křovinná vegetace, která se vykytuje v centrální a jižní Kalifornii a severozápadním Mexiku). Množství paliva je v tomto případě kalkulováno v závislosti na věku těchto křovin a výhřevnost se mění během ročního období. Brown & Simmerman (1986) vyvinuly palivové modely pro pohoří Aspen ve státě Colorado. Procento převodu z živých na mrtvé byliny, tzv. curing level je v tomto případě použitý k výpočtu množství jednohodinového paliva, živých bylin a živého dřeva, stejně tak k nalezení poměru povchu a objemu pro hodinové palivo a živé dřevo. Nicméně procenta převodu jsou v tomto případě jiná, než je uváděno v původní práci identifikující dynamické modely (Burgan 1979a). Mimo to byly vyvinuty další speciální palivové modely jako Hough & Albin (1978) a další (Andrews 2018).

## 3.9 Intenzita a závažnost požáru

### 3.9.1 Intenzita požáru „fire intensity“

Intenzita požáru popisuje množství tepelné energie, která je uvolněna při hoření, nebo charakterizuje chování se požáru jako délka plamene nebo rychlost šíření požáru. Široce používanou hodnotou intenzity požáru je tzv. intenzita fronty požáru, což je míra tepla uvolněná a jednotku délky fronty požáru ( $\text{kWm}^{-1}$ ) a představuje hodnotu tepla uvolněného radiací na plamenné frontě požáru. Intenzita fronty požáru je dobrým ukazatelem toho, jak se požár bude šířit a jak bude složité jej uhasit, proto je velmi důležitým parametrem používaných v modelech šíření požáru pro účely definování optimální taktiky zdolávání požáru (Obr. 22) (Keeley et al. 2008; Keeley 2009).



Obr. 22: Základní rozdělení intenzity požáru (Sullivan et al. 2021).

### 3.9.2 Závažnost požáru „fire severity“

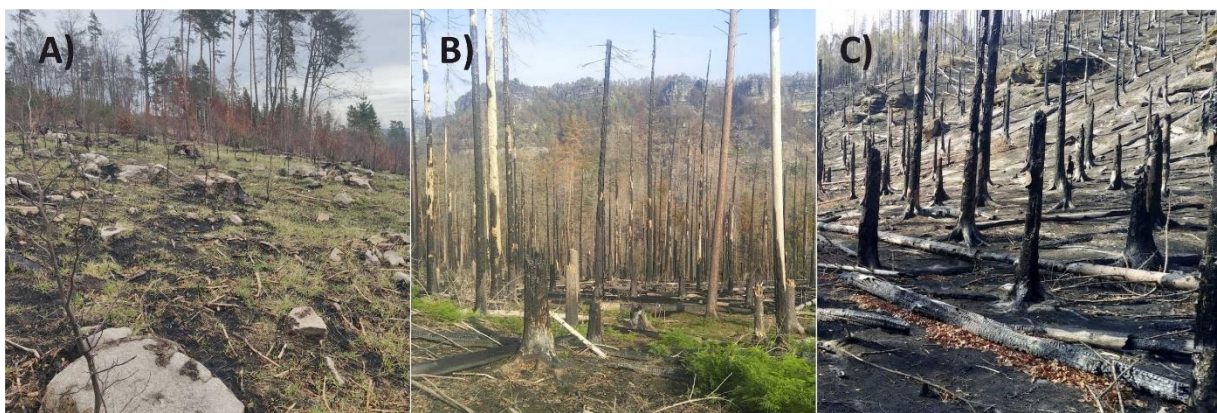
Závažnost požáru charakterizuje vliv požáru na prostředí, ve kterém požár vznikl, zejména vliv na vegetaci, půdu a mortalitu stromů. Existuje více přístupů, jak měřit závažnost požáru, například ekologové používají k definování závažnosti požáru proměnné jako míra ohoření kmenů stromů, množství spálené vegetace nebo procento usmrcené vegetace (Obr. 23) (Helms 1998; Agee 2007; Keeley 2009).

- Nízká závažnost = požár omezeně ovlivnil stromové patro (mortalita do 30 %), stejně tak pozemní vegetaci a půdu.
- Střední závažnost = střední efekt na stromové patro, mortalita 30-80 % u vegetace a střední poškození půdy.



- Vysoká závažnost = vysoký vliv na mortalitu stromů, vegetaci (mortalita nad 80 %) a půdu.

Závažnost požáru může mít pozitivní i negativní efekt na ekosystém v závislosti je míře závažnosti a na schopnosti daného ekosystému regenerovat. Reakce prostředí na požár může být například problémy s erozí, regenerace vegetace, kolonizace zvěří, změna fauny a flóry, případně pak socioekonomické dopady na obyvatelstvo a místní komunity. Čím vyšší je závažnost požáru, tím obvykle sebou nese výraznější negativní následky a pomalejší až nemožnost regenerace daného stanoviště (Helms 1998; Agee 2007; Keeley 2009).



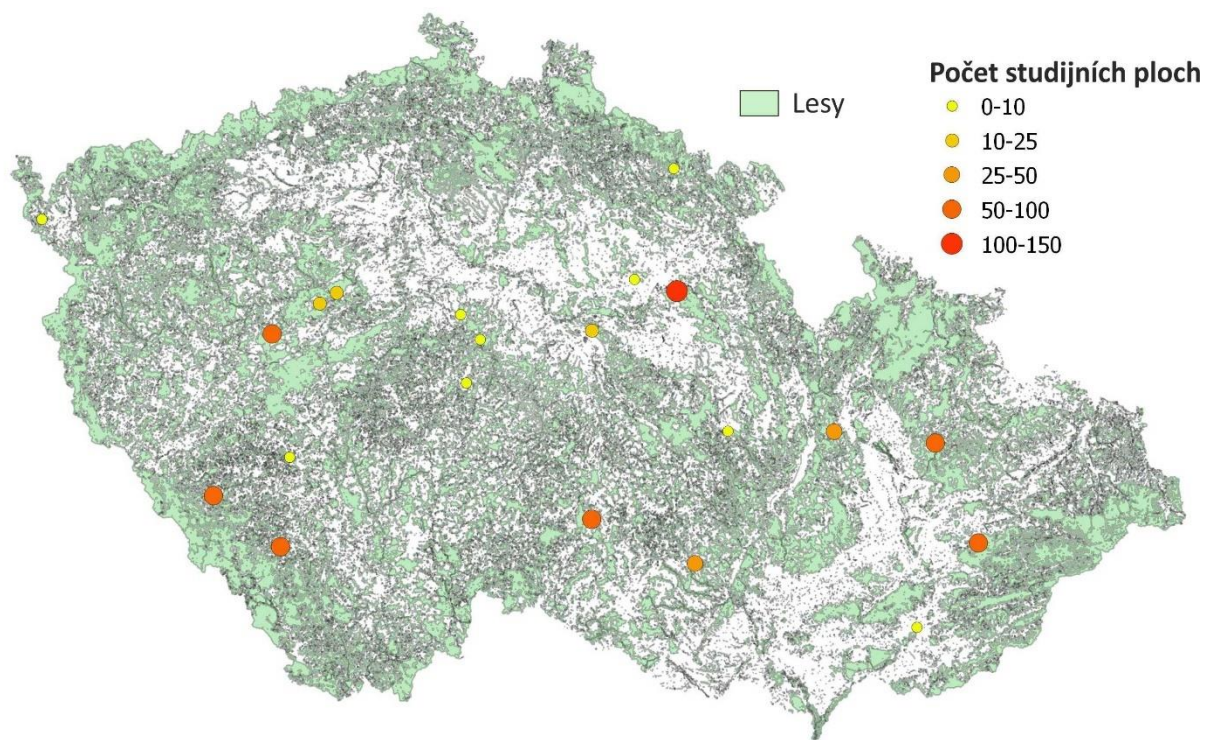
*Obr. 23: Základní rozdělení závažnosti požáru; A) – nízká závažnost; B) – střední závažnost; C) – vysoká závažnost (foto Roman Berčák).*

## 4 Metodika

### 4.1 Kvantifikace pozemního paliva

#### 4.1.1 Výběr studijních ploch

Z hospodářských knih, mapových GIS podkladů a dalších materiálů poskytujících informace o jednotlivých porostních skupinách byly vybrány porosty, ve kterých následně probíhalo terénní měření (Obr. 24). Tyto vybrané porostní skupiny byly rozdělovány na základě dřevinné skladby, lesního typu a věku. V případě dřeviny byly vyhledávány porosty s dominantním zastoupením (alespoň 60 %) studovaných dřevin (smrk, borovice, dub, buk). Dále byly dle lesního typu porosty kategorizovány do příslušných ekologických řad dle lesnické typologie (extrénní, kyselá, živná, obohacená vodou, obohacená humusem, oglejená, podmáčená, rašelištní) (Plíva 1987) a dle aktuálního věku byly řazeny mezi stádia z hlediska problematiky lesních požárů (založený porost, zapojený porost, dospívající porost, dospělý porost) (Pecl et al. 2021). V jedné porostní skupině byly založeny 1-3 studijní plochy v závislosti na dostupnosti porostů studovaných kategorií. Velikost vybraných porostních skupin zpravidla nebyla menší než 0,8 hektaru.



Obr. 24: Mapa lokalit, ve kterých probíhala kvantifikace pozemního paliva.

Zároveň při následném terénním měření bylo vždy ověřeno, že vybrané porosty z kategorie založený porost jsou nezapojené, tzn. že jedinci nové generace porostu ještě nezakryly zcela povrch půdy. V případě kategorie zapojený porost bylo ověřováno, že tyto vybrané porosty jsou opravdu zcela zapojené, tedy že povrch lesní půdy byl zcela zastíněn korunami stromů. Tuto skutečnost není možné přesně určit na základě věku a v závislosti na vysazované dřevině, typu stanoviště a dalších podmínkách může ke změně ze založeného na zapojený porost dojít dříve nebo později než obecně stanovených 5 let dle stádií z hlediska problematiky lesních požárů.

#### **4.1.2 Terénní měření**

V terénu byly dohledány vybrané porosty. V těchto porostech byla vybrána místa pro studijní plochy. Studijní plochy byly vzdálená minimálně patnáct metrů od okraje sousedního porostu a zároveň byly umístěny v místě, které nejvíce odpovídalo struktuře celého porostu. Při umisťování studijní plochy se dále dbalo na to, aby se nacházela mimo trasy zvěře, přibližovací linky, průseky apod. Na tomto místě byla založena studijní plocha o rozměrech 1m<sup>2</sup>.

Studijní plocha byla vytyčena pomocí dřevěných nebo plastových tyčí a následně byl z vnějšího okraje této vytyčené plochy odstraněn veškerý materiál až do hloubky humusové vrstvy. Byl pořízen fotografický záznam studijní plochy s číslem plochy pro případ nutné kontroly nebo identifikace. Do záznamového archu byl zaznamenáno číslo studijní plochy, porostní skupina, věk, lesní typ byly odečteny souřadnice studijní plochy. Dále byla popsána skladba vegetace (podrostu) studijní plochy s rozlišením 4 typů (mech, bylina, tráva, nálet), zaznamenána průměrná výška daného typu vegetace a procento pokryvu studijní plochy daným typem vegetace.

Následně bylo rozebráno a kvantifikováno pozemní palivo. Pozemní palivo bylo rozděleno do 4 segmentů (vegetace (podrost), drobný dřevěný materiál, hrabanka a humus). Segment „vegetace“ zahrnoval mechy, byliny, trávy a nálet na studijní ploše. Za segment „drobný dřevěný materiál“ byly považovány větve, větvičky, šišky a semenný materiál. Segmentem „hrabanka“ byla uvažována vrstva opadu listí nebo jehličí neboli O půdní horizont. Za segment „humus“ byl považován z pedologického hlediska A horizont.

Jednotlivé segmenty byly ze studijní plochy vybrány do nádoby a zváženy pomocí závěsné váhy. Váhy jednotlivých segmentů byly zaznamenány do záznamového archu. Humusový segment byl kvantifikován pouze na  $\frac{1}{4}$  studijní plochy a následně byla zvážená hodnota násobena 4x. Všechny hodnoty byly zaznamenány do terénního formuláře. Následně byly odebrány vzorky o váze cca 10 gramů pro laboratorní zjišťování vlhkosti jednotlivých segmentů pro dopočítání sušiny jednotlivých segmentů pozemního paliva (Obr. 25).



Obr. 25: Postup kvantifikace pozemního paliva.

#### 4.1.3 Laboratorní měření vlhkosti

Vzorky odebrané v rámci terénního měření byly uchovány v chladném prostředí, aby nedocházelo k vysychání vzorků a poté byla v nejkratším možném termínu zjišťována vlhkost jednotlivých odebraných vzorků. Vlhkost jednotlivých segmentů byla zjišťována pomocí analyzátoru vlhkosti (sušící váhy) Axis (Obr. 26). Analyzátor vlhkosti má v sobě zakomponovanou přesnou váhu, která je schopna vzorek zvážit na tisícinu gramu. Pomocí halogenových žárovek dochází k zahřívání vzorku a jeho kompletnímu vysušení. Výsledná vlhkost vzorku se dopočítá z rozdílu váhy vlhkého a vysušeného materiálu. Výsledné vlhkosti byly zaznamenány do terénního archu a byla dopočítána sušina jednotlivých segmentů pozemního paliva v rámci jednotlivých studijních ploch. Všechny výsledky byly zpracovány do rozsáhlé databáze v prostředí MS Excel.





*Obr. 26: Měření vlhkosti paliva pomocí sušící váhy.*

## **4.2 Spalné teplo jednotlivých segmentů pozemního paliva**

Odebrané vzorky z terénních měření byly i po analýze vlhkosti dále uchovávány již bez potřeby udržení vlhkosti v daných vzorcích. Tyto vzorky následně byly použity pro laboratorní testování množství uvolněného spalného tepla. Spalné teplo je takové množství tepla, které se vyvine dokonalým spálením jednotkového množství (např. kg) paliva, jestliže se spaliny ochladí na původní teplotu paliva a voda po spálení bude získána v kapalném stavu (ČSN EN 15170).

### **4.2.1 Příprava vzorků**

Připravované vzorky byly kategorizovány na základě převládající dřeviny pro segmenty drobné dřevo, hrabanka a humus. Segment vegetace byl dále rozdělen do tří typů vegetace (mechy, byliny a traviny). U segmentů vegetace a humus nebyla rozlišována převládající dřevina. Celkově tedy byly vzorky rozděleny do dvanácti kategorií (traviny, byliny, mechy, smrk – hrabanka, smrk – drobné dřevo, borovice – hrabanka, borovice – drobné dřevo, buk – opad, buk – drobné dřevo, dub – opad a dub drobné dřevo).

Vzorky byly následně vysušeny v sušárně a pomocí laboratorního mlýnku IKA rozemlety na jemné částice, které nepřesahovaly velikost 1 mm. Dále byl navážen cca 1 gram rozemletého materiálu a pomocí peletovacího lisu slisován do peletky, která byla určena pro spálení v kalorimetru.

#### 4.2.2 Spalování

Samotné testování spalného tepla probíhalo v isoperibolickém kalorimetru Parr 6400. Kalorimetr Parr 6400 je plně automatický isoperibolický kalorimetr, s pevnou bombou i pláštěm, automatickým plněním kyslíkem i vodou a automatickým proplachem. Připravené vzorky byly před samotným měřením ponechány „na vzduchu“, aby se docílilo přirozené vlhkosti cca 10 %, která je v lesním prostředí považována již za poměrně kritickou. Tyto vzorky byly následně pečlivě zváženy s přesností na tisícinu gramu a umístěny do kalíšku v kalorimetrické bombě. K vzorku byla od žhavicího drátku navázána zapalovací bavlnka a po uzavření kalorimetrické bomby a naplnění kyslíkem byl vzorek spálen (Obr. 27). Po spálení vzorku byla hodnota uvolněného spalného tepla zaznamenána do databáze v prostředí MS Excel.



*Obr. 27: Laboratorní měření spalného tepla v kalorimetru.*

#### 4.2.3 Vyhodnocení výsledků

Databáze zjištěných výsledků spalného tepla byla následně vyhodnocena základními statistikami (průměr, standardní odchylka, min, max) pro účely přiřazování k palivovým modelům (kapitola 5.2). Vyhodnocením jsme získali informace o spalném teple produkovaném jednotlivými segmenty pozemního paliva.

### 4.3 Přirazení výsledků spalného tepla do databáze kvantifikace paliva

Dalším krokem bylo přiřadit hodnoty naměřeného spalného tepla do původní databáze s jednotlivými měřeními studijních ploch. Databáze tedy nyní obsahovala pro jednotlivé studijní plochy nejen informace o váze sušiny jednotlivých segmentů pozemního paliva, ale také informaci o množství spalného tepla uložené v jednotlivých segmentech pozemního paliva, stejně tak i celkové množství spalného tepla potenciálně uloženého v pozemním palivu.

### 4.4 Přepočítání spalného tepla na výhřevnost

Vzhledem k tomu, že spalování v kalorimetru probíhá v tzv. kalorimetrické bombě, která je během spalování vzduchotěsně uzavřena výsledkem měření je hodnota tzv. spalného tepla. Pro účely hodnocení množství tepelné energie potenciálně uvolňované při lesním požáru bylo nutné pro přesnější výsledky přepočítat hodnotu spalného tepla na výhřevnost. Výhřevnost je takové množství tepla, které se vyvine dokonalým spálením jednotkového množství (např. kg) paliva, jestliže se spaliny ochladí na původní teplotu paliva a voda po spálení zůstane v plynném stavu (ČSN EN 15170). Jednoduše řečeno je hodnota výhřevnosti paliva nižší než spalné teplo o výparné teplo vody.

Přepočítání je definováno vzorcem:

$$Q_i = Q_s - 2,453 \times (W + 8,94 \times H) \quad [MJ.kg^{-1}]$$

$Q_i$  ( $MJ.kg^{-1}$ ) je výhřevnost

$Q_s$  ( $MJ.kg^{-1}$ ) je spalné teplo

$W$  ( $kg.kg^{-1}$ ) je obsah vody v palivu

$H$  ( $kg.kg^{-1}$ ) je obsah vodíku v palivu

Pro účely přepočtu spalného tepla na výhřevnost byl uvažován desetiprocentní obsah vody ve vzorky ( $W=0,1 \text{ kg.kg}^{-1}$ ) a šestiprocentní obsah vodíku ( $H=0,06 \text{ kg.kg}^{-1}$ ). Dle dostupné literatury má biologický materiál průměrný obsah vodíku 6-6,5 % (Ha et al. 2024).

### 4.5 Závažnost požáru aneb množství vyhořelé biomasy

Pro účely analýzy závažnosti požáru (fire severity) v našem případě uvažováno spíše jako množství vyhořelé biomasy při našich běžných lesních požárech bylo využita pilotní studie (Mišek 2024). Z výsledků studie vyplývá, že během požáru dochází k průměrně 90% redukci segmentu vegetace, 44% redukci segmentu drobné dřeviny a 23% redukci segmentu hrabanka



(Mišek 2024). Proto mimo celkové množství spalného tepla, výhřevnosti nebo výkonu požáru jsou ve výsledcích uváděny i hodnoty redukované na základě této pilotní studie.

#### **4.6 Teplota žhnutí, vzplanutí a vznícení**

Další laboratorní zkouškou byla stanovena teplota žhnutí, vzplanutí a vznícení segmentů pozemního paliva. Pro účely stanovení byly využita Sečkinova odporová pec a postupy doporučené v ČSN 64 0149. Testované vzorky byly kategorizovány obdobně jako v kapitole 4.2.1. Z testování byl vynechán segment humus. Do misky, která je vkládána do rozehřáté Sečkinovi pece bylo naváženo cca 2-3 g nehomogenizovaných vzorků o vlhkosti cca 10 %. Vzorky byly tlakem prstů do misky namačkány tak, aby tvořily celistvý vzorek a maximalizovala se pravděpodobnost kladného výsledku zkoušky. Dále byla na přístroji nastavena teplota Sečkinovy pece, míra průtoku vzduchu a vzorek byl do pece vložen a zahájila se zkouška. Délka trvání zkoušky při nastavené teplotě byla 15 minut. Teplota a průběh zkoušky byl kontrolován pomocí dvou termočlánků (ve spodní části pece, v blízkosti vzorků) propojených s počítačem. V závislosti na typu zkoušky (žhnutí, vzplanutí, vznícení) bylo dále postupováno se souladem s ČSN 64 0149. Výsledky uvedenými v kapitole 5.3 jsou vždy minimálně dvě kladné zkoušky, jejichž průměr byl zaokrouhlen na nejbližších 10 °C.

#### **4.7 Zařazení k palivovým modelům**

##### **4.7.1 Stanovení počtu palivových modelů**

Stanovený počet modelů vychází ze snahy uplatnění principu maximální jednoduchosti a použitelnosti celého systému palivových modelů. Vyhodnocením terénních měření kvantifikace pozemního paliva a navazujících laboratorních měření bylo rozhodnuto, že dostačující pro popis povrchu lesní půdy z hlediska problematiky lesních požárů je identifikovat pouze čtyři palivové modely, a to zejména na základě dominantního segmentu pozemního paliva, respektive dominantního typu segmentu vegetace, který sám o sobě definuje mnohé vlastnosti daného stanoviště ve vztahu s lesními požáry:

- Palivový model PM1 – Travniny,
- palivový model PM2 – Byliny, mechy,
- palivový model PM3 – Hrabanka,
- palivový model PM4 – Neutrální.

## 4.7.2 Úprava databáze

Vytvořená databáze v prostředí MS Excel byla dále upravena pro potřeby statistického vyhodnocení a přiřazení jedinců k jednotlivým palivovým modelům. Z jednotlivých studijních ploch byly vytvořeny skupiny identifikované na základě převládající dřeviny, stádia z hlediska problematiky lesních požárů a ekologické řady. Například skupina BO-1-K je identifikována jako skupina s převládajícím zastoupením borovice, patřící do stádia založeného porostu (1) v kyselé ekologické řadě (K). Pro tyto jednotlivé skupiny byly vypočítány v programu Statistika základní statistiky (průměr, směrodatná odchylka, min, max).

Pro účely přiřazení k jednotlivým palivovým modelům byly vybrány proměnné, které charakterizovaly vizuální vzhled daného lesního porostu. Jednalo se o váhu sušiny hrabanky, procentuální zastoupení mechů, procentuální zastoupení bylin a procentuální zastoupení travin. Právě tyto proměnné získané během terénních měření nejlépe charakterizovaly vzhled a důležité požární vlastnosti porostní skupiny.

Vzhledem k tomu, že jednotlivé proměnné byly uváděny ve více jednotkách (kg a procenta), byl datový soubor pro účely statistického vyhodnocení standardizován.

## 4.7.3 Analýza hlavních komponent a clusterová analýza

### 4.7.3.1 Analýza hlavních komponent

Upravený datový soubor byl následně vyhodnocen v programu Statistica pomocí Analýzy hlavních komponent. Analýza hlavních komponent (PCA – Principal component analysis) je metoda redukce vícerozměrného prostoru pro účely analýzy dat, vizualizace dat nebo předpřípravu dat. Toho je dosaženo lineární transformací dat na nový souřadnicový systém (hlavní komponenty). Tímto způsobem mohou být snadno identifikovány směry zachycující největší odchylky v datech. Spoustu studií používá první dvě hlavní komponenty pro účely grafického vykreslení dat na těchto komponentách a vizuální identifikaci shluků těchto dat (Jolliffe & Cadima 2016).

Při statistickém zpracování byla mj. ověřována i použitelnost samotné analýzy, zejména tzv. vlastní číslo „eigenvalues“ a „screeplot, které definují doporučený počet komponent a také variabilitu vázanou na první dvě komponenty. Pro vhodnost použití se doporučuje, aby byla variabilita na prvních dvou komponentách alespoň 70 %, dále jsou považovány za použitelné komponenty, které mají hodnotu vlastního čísla větší než 1,00. Tyto podmínky byly splněny a výsledky analýzy hlavních komponent mohly být dále využity pro statistické analýzy.

#### 4.7.3.2 Clusterová analýza

Následně byly do původního standardizovaného datového souboru implementovány výsledky z analýzy hlavních komponent, konkrétně byla ke každé kategorii identifikované dle dřeviny, stádia z hlediska problematiky lesních požárů a ekologické řady přiřazena výsledná hodnota souřadnic prvních dvou komponent. Původní datový soubor rozšířený o výsledky analýzy hlavních komponent byl dále statisticky vyhodnocen pomocí clusterové analýzy k přiřazení jednotlivých skupin k palivovým modelům (clusterům). Použita byla clusterová analýza tzv. K-průměrů.

Clusterová analýza K průměrů (K-means clustering) je metoda vektorová kvantizace, původně pro účely zpracování signálu, jejíž cílem je rozdělit  $n$  pozorování do  $k$  shluků. Počet  $k$  shluků je předem definovaný. Algoritmus nejprve vybere centra  $k$  shluků, dále přiřadí objekty (pozorování) do shluku, k jehož centru je nejbližší. Po přiřazení všech objektů do shluků vypočítá nová centra shluků, což algoritmus dále opakuje. Cílem tohoto výpočtu je maximalizovat variabilitu mezi skupinami a minimalizovat variabilitu uvnitř skupin (Hartigan & Wong, 1979).

#### 4.7.4 Grafické znázornění výsledků

Standardizovaný datový soubor původních čtyř proměnných a identifikované přiřazení k jednotlivým clusterům (palivovým modelům) byly následně v programu Rstudio zpracovány do podoby grafické vizualizace tzv. biplotu. Tento způsob byl zvolen zejména pro lepší interpretaci a čitelnost dosažených výsledků. Grafické znázornění výsledků i s vyznačením identifikovaných clusterů je v programu Rstudio dostupný v balíčku „ggbiplot“. Výsledky byly pochopitelně totožné jako v případě programu Statistica, jednalo se pouze o lepší vizualizaci výsledků.

### 4.8 Identifikované vlastnosti palivových modelů

Pro finální identifikaci vlastností jednotlivých palivových modelů bylo nutné vyhodnotit základní statistické proměnné všech skupin, které náleželi do jednoho clusteru (palivového modelu). Na základě těchto informací z původní databáze společně s identifikací clusteru jsme byli schopni vyhodnotit všechny vlastnosti palivového modelu jako množství potenciální tepelné energie nacházející se na ploše daného palivového modelu, očekávanou strukturu (pokryv vegetací) tohoto palivového modelu, množství materiálu na ploše apod.

#### **4.8.1 Množství biomasy, výška paliva, výhřevnost, výkon požáru**

Jednotlivé výsledky množství biomasy, výšky paliva, výhřevnosti nebo výkonu požáru jsou výsledkem terénních a laboratorních měření, které byly součástí této studia. Sběr těchto dat byl důležitý pro získání a parametrizování základních vstupních proměnných vstupující do výpočtu Rothermelova matematického modelu. Pro jednotlivé palivové modely jsou tyto výsledky souhrnně prezentovány v kapitole 5.5. Způsoby zjištění těchto výsledků jsou popisovány v předchozích částech metodiky.

#### **4.8.2 Rothermelův matematický model šíření pozemního lesního požáru**

Pro identifikované palivové modely byly dále dopočítávány další charakteristické vlastnosti. K výpočtu předpokládané rychlosti šíření požáru v závislosti na daném palivovém modelu bylo využito Rothermelova matematického modelu pro šíření pozemního požáru (Rothermel, 1972). Přesný postup výpočtu v jednotlivých krocích je popsán v rešeršní části práce v kapitole 3.7. Vstupními daty do modelu byly výsledky získané v rámci terénních a laboratorních měření při vývoji palivových modelů. Pro účely výpočtu rychlosti šíření pozemního požáru a dalších parametrů souvisejících s Rothermelovým matematickým modelem a zároveň pro účely definování vlastních vstupních proměnných do procesu výpočtu byl vytvořen výpočtový formulář v prostředí MS Excel.

##### *4.8.2.1 Vstupní parametry použité pro palivové modely*

Pro účely výpočtu předpokládané rychlosti šíření pozemního požáru v jednotlivých palivových modelech bylo pozemní palivo rozděleno, tak aby co nejvěrněji odpovídalo skutečnému stavu v lesním porostu během „vrcholu“ požární sezóny (červenec, srpen) a zároveň reprezentovalo podmínky s již poměrně výrazným požárním rizikem. Tyto podmínky, při kterých vzniká v našich podmínkách lesní požár velice často byly stanoveny na základě empirického pozorování. Jak již bylo řečeno, vývoj matematického modelu, všechny odvozené vztahy a výpočty byly realizovány v angloamerické měrných jednotkách. Z toho důvodu jsou v této části metodiky již uváděny vstupní proměnné v těchto jednotkách.

##### *Typy paliva*

Pro účely výpočtu byly jednotlivé segmenty pozemního paliva rozděleny na celkově 7 skupin – traviny-živé, traviny-mrtvé, mechy-živé, byliny-živé, semenáčky, hrabanka, drobné dřevo. Traviny živé a mrtvé byly rozděleny v poměru 90:10. Rothermelův matematický model

však pracuje s pěti hlavními palivovými typy, a to třemi mrtvými (1-, 10-, 100-hodinové palivo) a dvěma živými (živá vegetace, živé dřeviny) (Tab. 2).

*Tabulka. 2: Popis palivových typů vstupujících do výpočtů Rothermelova matematického modelu šíření pozemního lesního požáru (Andrews 2018).*

Typ paliva	Časová odezva paliva	Velikost paliva	Popis
1-hodinové	0,04 dne	do 0,64 cm (průměr paliva)	reprezentuje trávu, listy, jehlice. Materiál, který velice rychle reaguje na změnu meteorologických podmínek (0,04 dne)
10-hodinové	0,4 dne	0,64 - 2,54 cm (průměr paliva)	reprezentuje větvičky, malé větve, semenný materiál, kůru stromů.
100-hodinové	4 dny	2,54 cm - 7,62 cm (průměr paliva)	reprezentuje větší větve
Živá vegetace		do výšky 182 cm	reprezentuje živou organickou hmotu bylin, travin, mechů
Živé dřeviny		do výšky 182 cm	reprezentuje živou organickou hmotu semenáčků a křovin a stromů

Výše zmiňovaných sedm skupin bylo rozděleno do těchto pěti palivových typů (Tab. 3).

*Tabulka 3: Přiřazení jednotlivých skupin dle kvantifikace pozemního paliva do palivových typů Rothermelova matematického modelu šíření pozemního požáru.*

Typ paliva	Skupina paliva dle kvantifikace
1-hodinové	mrtvé traviny, hrabanka
10-hodinové	drobné dřevo
100-hodinové	drobné dřevo
Živá vegetace	živé traviny, byliny, mechy
Živé dřeviny	semenáčky

Segment drobné dřevo je zastoupen ve dvou palivových typech. Zastoupení drobného dřeva v 10- a 100-hodinovém palivu bylo uvažováno v poměru 90:10.

### *Tepelná energie paliva*

Pro účely stanovení množství tepelné energie paliva byly využity výsledky laboratorního měření množství spalného tepla pro jednotlivé segmenty pozemního paliva (Tab. 10,11). Tyto výsledky byly následně přepočítány na výhřevnost (kapitola 4.4). Pro jednotlivé palivové typy v Rothermelově matematického modelu byla následně vypočtena vážená průměrná hodnota na základě výhřevnosti a množství paliva jednotlivých zástupců v daném palivovém typu. Tato hodnota byla poté převedena z MJ/kg na jednotky využívané v modelu Btu/lb.

### *Obsah minerálních látek a efektivní obsah minerálů*

Vzhledem k tomu, že se nejedná o proměnné, které výrazněji ovlivňují konečný výsledek, bylo pro účely výpočtu využito základní nastavení v Rothermelově matematickém modelu, které počítá s hodnotou 5,55 % (0,0555) obsahu minerálních látek ve všech palivových typech a efektivním obsahem minerálů 1 % (0,01) ve všech palivových typech (Andrews 2018).

### *Hustota segmentů paliva*

Pro tyto účely byla využita studie Hough & Albin (1978), která používá pro účely hustoty segmentů paliva hodnotu 30 lb/ft<sup>2</sup> pro mrtvé palivo a 46 lb/ft<sup>2</sup>. Hodnoty této proměnné jsou zároveň dodnes využívány ve všech kalkulacích tohoto matematického modelu.

### *Poměr povrchu a objemu paliva*

Poměr povrchu a objemu paliva je jedna z významnějších vstupních proměnných modelu. Pro účely výpočtu se postupovalo následujícím způsobem. Pro jednotlivé palivové modely byla stanovena na základě terénního měření kvantifikace paliva průměrná výška, dohledatelná v kapitole 5.5. Na základě stavby těla (stéblo trávy, stavba těla byliny aj.) jednotlivých segmentů pozemního paliva byl vypočítán objem a povrch těla jednotlivých segmentů. Tímto výpočtem se postupovalo v případě segmentů traviny, mechy, byliny, hrabanka a drobné dřevo. Vzhledem ke složitosti až nemožnosti výpočtu pro segment semenáčky byla využita hodnota 96 f<sup>2</sup>/f<sup>3</sup> uvedena v Rothermelově matematickém modelu odpovídající palivu, jehož průměr je 0,5 palce (1,27 cm) (Andrews 2018).

Pro účely převedení poměru povrchu a objemu paliva pro jednotlivé segmenty do palivových typů Rothermelova matematického modelu bylo využito váženého průměru tohoto poměru a hmotnosti paliva jednotlivých segmentů, které náležely do jednotlivých palivových typů. Pouze pro 100-hodinové palivo byla využita průměrná hodnota uvedena v Rothermelově

matematickém modelu ( $30 f^2/f^3$ ) (Andrews 2018). Tím došlo k odlišení poměru povchu a objemu paliva u 10- a 100-hodinového paliva, které jsou tvořeny segmentem drobné dřevu.

#### *Hmotnost sušiny paliva*

Hmotnost sušiny vychází z terénní kvantifikace pozemního paliva, která byla realizována v začátcích tohoto výzkumu. Výsledky této kvantifikace pro jednotlivé palivové modely jsou uvedeny v kapitole 5.5. Tyto hodnoty byly následně redukovány na základě výsledků, které jsou popisovány v kapitole 4.5. Jedná se tedy o předpokládané množství sušiny paliva, která bude vstupovat do procesu hoření (palivo v prostoru v našich podmínkách zpravidla nevyhoří kompletně). Výsledné hodnoty pro jednotlivé segmenty pozemního paliva byly následně převedeny do jednotlivých palivových typů Rothermelova matematického modelu jsou suma hmotnosti redukované sušiny paliva všech zástupců segmentů v jednom palivovém typu.

#### *Výška paliva*

Pro daný palivový typ je zvolena nejvyšší hodnota ze skupiny segmentů, které náleží do palivového typu.

*Příklad: Z kvantifikace pozemního paliva vyplývá, že průměrná výška segmentu traviny v palivovém modelu PM1 byla 1,3576 stop, průměrná výška bylin byla 0,8028 stop a průměrná výška mechů 0,0820 stop. Pro daný palivový typ živá vegetace tedy byla zvolena výška 1,3576 stop.*

#### *Vlhkost paliva*

Vlhkost paliva je v zásadě nejdůležitějších a nejcitlivější proměnnou, která vstupuje do matematického výpočtu rychlosti šíření pozemního požáru. Samotný výpočet a výsledná hodnota rychlosti šíření pozemního požáru velice citlivě reaguje právě na změny vlhkosti.

Pro účely výpočtu byly uvažovány letní podmínky s poměrně vysokým rizikem vzniku lesního požáru. Tato úvaha se odráží i ve výběru parametrů vlhkosti. U mrtvého paliva palivových typů byly zvoleny hodnoty odpovídající střednímu nebezpečí vzniku požáru (Tab. 4), s hodnotami vlhkosti 1-h=12,5 % a 10-h= 11%. Hodnota 100-hodinového paliva byla stanovena jako hodnota rovna vlhkosti 10-h paliva, tedy také 11 %.

*Tabulka 4: Vlhkost jemného paliva v souvislosti s relativní vlhkostí vzduchu a s tím související pravděpodobnost zapálení a další projevy požáru (National Wildfire Coordinating Group 1989).*

Relativní vlhkost	Vlhkost jemného paliva	Pravděpodobnost zapálení	Pravděpodobnost zapálení, bodových požárů a základní stav hoření
> 60 %	1-h > 20 % 10-h > 15 %	< 10 %	velmi nízká pravděpodobnost zapálení, bodový požár se může objevit při vyšších rychlostech větru (nad 9 míl za hodinu)
45-60 %	1-h = 15-19 % 10-h = 12-15 %	10-20 %	nízká pravděpodobnost zapálení, ohniště se stávají nebezpečnými, odlétávající uhlíky se stávají nebezpečnými pod relativní vlhkostí 50 %
30-45 %	1-h = 11-14 % 10-h = 10-12 %	20-30 %	střední pravděpodobnost zapálení, zápalky se stávají nebezpečnými, snadné podmínky pro hoření
26-40 %	1-h = 8-10 % 10-h = 8-9 %	30-50 %	vysoká pravděpodobnost zapálení, zápalky jsou nebezpečné, příležitostně korunnové požáry, bodové požáry způsobuje nárazový vítr, střední podmínky hoření
15-30 %	1-h = 5-7 % 10-h = 5-7 %	50-70 %	rychlé zapálení, rapidní šíření, rozsáhlé korunnové požáry, jakékoliv poryv větru způsobuje bodové požáry, ztráta kontroly, požár se šíří v korunách, bodové šíření požárů na velké vzdálenosti v borových porostech, nebezpečné podmínky hoření
< 15 %	1-h < 5 % 10-h < 5 %	80-100 %	všechny zdroje tepla jsou nebezpečné, agresivní hoření, časté bodové požáry a jejich rychlé šíření, pravděpodobnost extrémního projevu požáru, kritické podmínky hoření

V případě živého paliva byla uvažován vrchol vegetační sezóny, kdy byliny, traviny vegetují, ale zároveň prosychají vlivem suchého teplého počasí. Pro účely výpočtu byla zvolena hodnota 100% vlhkosti pro palivový typ živé dřevo a hodnota 75 % pro palivový typ živá vegetace, a to na základě empirického stanovení s pomocí tabulky (Tab. 5). Tento stav odpovídá měsíci srpnu dle tabulky č. 6, která prezentuje vývoj vlhkosti živého paliva v rámci jednotlivých měsíců v roce.



*Tabulka 5: Parametry vlhkosti živého paliva vstupující do Rothermelova matematického modelu šíření pozemního požáru (Fireline Handbook 2004).*

Vlhkost živého paliva	Stádium vývoje vegetace
300%	čerstvé listí, počátek vegetační sezóny
200%	dozrávající listí, vrcholící přírůst
100%	zralé listí, přírůst kompletní
50%	vstup do dormance, změny barvy listí, některé listy mohou padat
< 30 %	mimo vegetační sezónu

#### *Vlhkost pro vyhasnutí mrtvého paliva „moisture of extinction“*

Z anglického překladu pojem „moisture of extinction“ je proměnná, která reprezentuje vlhkost daného palivového typu, při které není dané palivo schopné samostatně šířit požár a nevstupuje tedy do procesu hoření. Pro účely výpočtu byla pro mrtvé palivo zvolena hodnota 30 % vlhkosti pro 1-hodinový palivový typ a hodnota 25 % pro 10- a 100-hodinový palivový typ. Tyto hodnoty jsou stanoveny na základě studie palivových modelů (Scott & Burgan 2005), které běžně vstupují do výpočtu Rothermelova matematického modelu například v prostředí Farsite/FlamMap.

#### *4.8.2.2 Výpočet*

##### *Rychlost šíření pozemního požáru*

Výsledná rychlost šíření pozemního požáru bez vlivu sklonu svahu a větru je pak vypočtena na základě vstupních údajů popsanych a definovaných výše pomocí na sebe navazujících matematických výpočtů, které jsou detailně popsány v kapitole 3.7.

##### *Délka plamenů, výkon fronty požáru*

Stejně jako předchozí parametr, tak i tyto parametry jsou kalkulovány na základě definovaných vzorců, které jsou detailně popsány v kapitole 3.7.

## 4.9 Validace palivových modelů na reálných požářištích

V rámci České republiky bylo vybráno celkem 11 požářišť, které dle statistiky HZS České republiky byly větších rozměrů. K jednotlivým vybraným požárům bylo získáno množství proměnných ať už z prostředí dálkového průzkumu země, terénním průzkumem daných požářišť, meteorologických proměnných aj. Vstupní proměnné sloužící pro výpočet velikosti požáru jsou detailně popsány níže.

### 4.9.1 Časové proměnné

Pro účely výpočtu predikované velikosti požáru bylo nutné znát dobu tzv. volného rozvoje požáru, tedy dobu, kdy se požár rozšiřuje a zároveň není ovlivňován hasebními pracemi. K tomuto účelu byla stanovena doba vzniku požáru 5 minut před ohlášením na OPIS a doba lokalizace 10 minut po zahájení hašení. Výsledkem tedy byl počet minut, kdy se předpokládal volný rozvoj požáru. Důvod zvolení tohoto způsobu je níže diskutován.

### 4.9.2 Meteorologické proměnné

Meteorologické proměnné pro jednotlivé požáry byly získány k daným požárům nejbližším meteorologickým stanicím, které má ve správě Český hydrometeorologický ústav. Data ke konkrétnímu dni, ve kterém vznikl daný požár byla poskytnuta v hodinovém kroku. Pro účely přiřazení hodnoty k jednotlivým požárům byl kalkulován průměr z hodinových hodnot, které byly naměřeny v období od předpokládaného vzniku požáru po čas předpokládané lokalizace požáru. Konkrétně pro účely validace byly zjišťovány tyto proměnné.

#### 4.9.2.1 Teplota vzduchu

Teplota vzduchu pro účely validace sloužila pouze jako doplňková proměnná, která doplňovala představu o počasí v den vzniku požáru.

#### 4.9.2.2 Vlhkost vzduchu (vlhkost mrtvého paliva)

Stanovená vlhkost vzduchu byla zásadní pro stanovení vlhkosti tzv. mrtvého paliva (1-h, 10-h a 100-h paliva). Na základě stanovené průměrné vlhkosti vzduchu v období od vzniku po lokalizaci požáru byla předpokládaná vlhkost mrtvého paliva přepočtena dle tabulky č. 4, a to tak, že byla zvolena střední hodnota dané škály pro 1-h a 10-h paliva (např. škála 11-14 %, vlhkost = 12,5 %). Vlhkost 100-hodinového paliva byla zvolena stejná jako hodnota 10-hodinového paliva. Stejný postup je zpravidla zvolen i při spouštění například software

FlamMap, jehož kalkulace jsou taktéž pro pozemní požáry postaveny na Rothermelově matematickém modelu.

#### 4.9.2.3 Vlhkost živého paliva

Základní rámec informace o vlhkosti živého paliva byl dán tabulkou č. 5. Tento základní popis vlhkosti živého paliva byl dále na základě pozorování, empirického stanovení transformován do tabulky č. 6, která ukazuje hodnoty živého paliva pro vegetaci (byliny) „life herbaceous“ a pro živé dřevo. Následně byla stanovena i předpokládaná redukce množství biomasy v průběhu ročních období.

Tabulka 6: Vlhkost živého paliva vstupující do výpočtů požárních charakteristik validovaných požářišť.

Měsíc	Vlhkost živého paliva (%)		Množství živé vegetace (%)
	Byliny	Dřevo	
1	30	30	50
2	50	50	75
3	125	150	100
4	200	250	100
5	150	300	100
6	125	200	100
7	100	150	100
8	75	100	100
9	75	75	100
10	50	50	75
11	50	50	50
12	30	30	50

#### 4.9.2.4 Rychlost větru

Meteorologické stanice, které jsou ve správě Českého hydrometeorologického ústavu měří rychlost větru ve výšce 10 m. Rychlost větru tedy byla následně nutné přepočítat na rychlost větru ve výšce cca 0,5 metru, a to pomocí kalkulace dle ČSN 1991-1-4 Zatížení konstrukcí – zatížení větrem (ČSN 1991-1-4).

$$v_m(z) = c_r(z) * c_o(z) * v_b$$

kde  $c_r$  je součinitel drsnosti terénu a  $c_o$  součinitel orografie, doporučená hodnota 1,0.

$$c_r(z) = k_r * \ln\left(\frac{z_{min}}{z_o}\right)$$

kde  $z_0$  je koeficient drsnosti terénu a  $k_r$  je součinitel terénu, který závisí na uvažovaném parametru drsnosti terénu  $z_0$ .

$$k_r = 0,19 * \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07}$$

kde  $z_{0,II}$  je 0,05 (kategorie terénu II) viz. Tab. 7.

*Tabulka 7: Kategorie terénu pro účely přepočtu rychlosti větru (upraveno podle ČSN 1991-1-4).*

Kategorie terénu		$z_0$ (m)	$z_{min}$ (m)
0	Moře nebo pobřežní oblasti vystavené otevřenému moři.	0,0003	1
I	Jezera nebo vodorovné oblasti se zanedbatelnou vegetací a bez překážek.	0,01	1
II	Oblasti s nízkou vegetací jako je tráva a s izolovanými překážkami (stromy, budovy), jejichž vzdálenosti jsou větší než 20-ti násobek výšky překážek.	0,05	2
III	Oblasti rovnoměrně pokryté vegetací nebo budovami, nebo s izolovanými překážkami, jejichž vzdálenost je maximálně 20-ti násobek výšky překážek (jako jsou vesnice, předměstský terén, souvislý les).	0,3	5
IV	Oblasti, ve kterých je nejméně 15 % povrchu pokryto pozemními stavbami, jejichž průměrná výška je 15 m.	1,0	10

Pro účely přepočtu byla zvolena kategorie terénu III s následujícími výsledky přepočtu pro rychlost větru 10 km/h (Tab. 8).

*Tabulka 8: Výsledky přepočtu rychlosti větru.*

Proměnná	$V_b$	$Z_{min}$	$Z_0$	$Z_{0,II}$	$k_r$	$C_r(0,5)$	$C_o$	$V_m(0,5)$
Hodnota	10	5	0,3	0,05	2,813411	0,60598	1,00	6,059787

#### 4.9.2.5 Směr větru

Směr větru byl zjištěn jako průměrná hodnota směru větru v období od vzniku po lokalizaci požáru a je uváděn ve stupních. Pro účely stanovení směru se uvažuje sever s hodnotou  $0^\circ$ , resp.  $360^\circ$ , východ –  $90^\circ$ , jih –  $180^\circ$  a západ –  $270^\circ$ .

### **4.9.3 Topografické proměnné**

#### *4.9.3.1 Sklon*

Pro účely stanovení sklonu prostoru požáru bylo nutné vytvořit vrstvu perimetru jednotlivých požárů, a to v prostředí QGIS. Do stejného softwaru byla implementována i vrstva digitálního modelu České republiky. Pomocí nástroje „Zonální statistiky“ byla následně kalkulována průměrná hodnota sklonu v jednotlivých perimetrech požářišť.

#### *4.9.3.2 Expozice*

Stejným způsobem se postupovalo i v případě zjišťování expozice. Vložením existujících vrstev expozice České republiky a nástrojem „Zonální statistiky“ byla dopočítána průměrná expozice perimetru požáru.

### **4.9.4 Palivo**

Na základě dostupných vrstev, ortofoto mapy, základní mapy ČR 1:10000 byl identifikován palivový model, jehož hodnoty následně vstupovaly do výpočtu šíření požáru. Způsoby identifikace pomocí dálkového průzkumu země nebo vizuálních charakteristik stanoviště jsou detailněji popsány v kapitole 6.1.

### **4.9.5 Výpočet modelové veličin**

#### *4.9.5.1 Rychlost šíření*

Rychlost požáru byla zjišťována pomocí Rothermelova matematického modelu šíření pozemního lesního požáru s použitím identifikovaných proměnných (meteorologické, topografické proměnné, palivo), které jsou popsány výše.

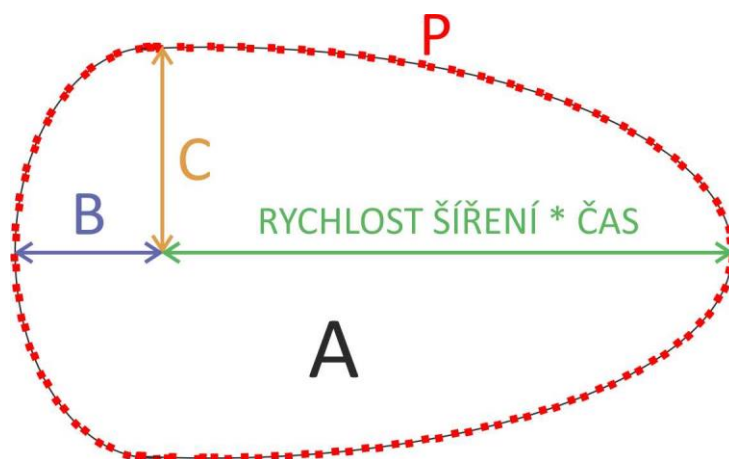
#### *4.9.5.2 Intenzita požáru*

Intenzita validovaných požárů byla zjišťována pomocí výpočtu, který byl definovaný Frankem Albinim (Albini, 1976a).

#### *4.9.5.3 Velikost požáru*

Velikost požáru je odhadována na základě kalkulací Albini (1976a). Tento výpočet využívá tzv. dvojitou elipsu ke stanovení parametru požáru. Jednu elipsu předpokládá v šíření požáru vpřed (fronta) a druhou elipsu, která předpokládá šíření vzad (týl). Jednoduchým výpočtem modelované rychlosti šíření násobené délkou volného rozvoje požáru získáme

informaci o vzdálenosti mezi místem vzniku požáru a frontou požáru. Kalkulace definované Frankem Albinim (Albini, 1976a) pak vyjadřují konstanty pro dopočítání jednotlivých parametrů požáru (křídla „C“, tyl „B“, obvod „P“, plocha „A“). Tyto informace jsou získány násobením vzdálenosti mezi bodem vzniku požáru a frontou požáru s danými vypočítanými konstantami. (Obr. 28).



Obr. 28: Přehled konstant pro výpočet parametrů požáru.

$$B = 0,46 * \exp(-0,04325 * W) \quad \text{„backing“ - tyl}$$

kde  $W$  je rychlost větru v mílech za hodinu

$$C = 0,748 * \exp(-0,03608 * W) * \left(\frac{1+B}{1+Q}\right)^{0,5} \quad \text{„flank“ - křídlo}$$

$$\text{kde } Q = 1,16 * \exp(0,04325 * W)$$

$$P = \frac{\pi}{\sqrt{2}} * C((1+S)^{0,5} C((1+S)^{0,5} + (1+QS)^{0,5}) \quad \text{„perimeter“ - obvod}$$

$$\text{kde } S = 3,19 * C^2 * \exp(0,14432 * W)$$

$$A = \pi * C * (1+B)/2 \quad \text{„area“ - plocha}$$

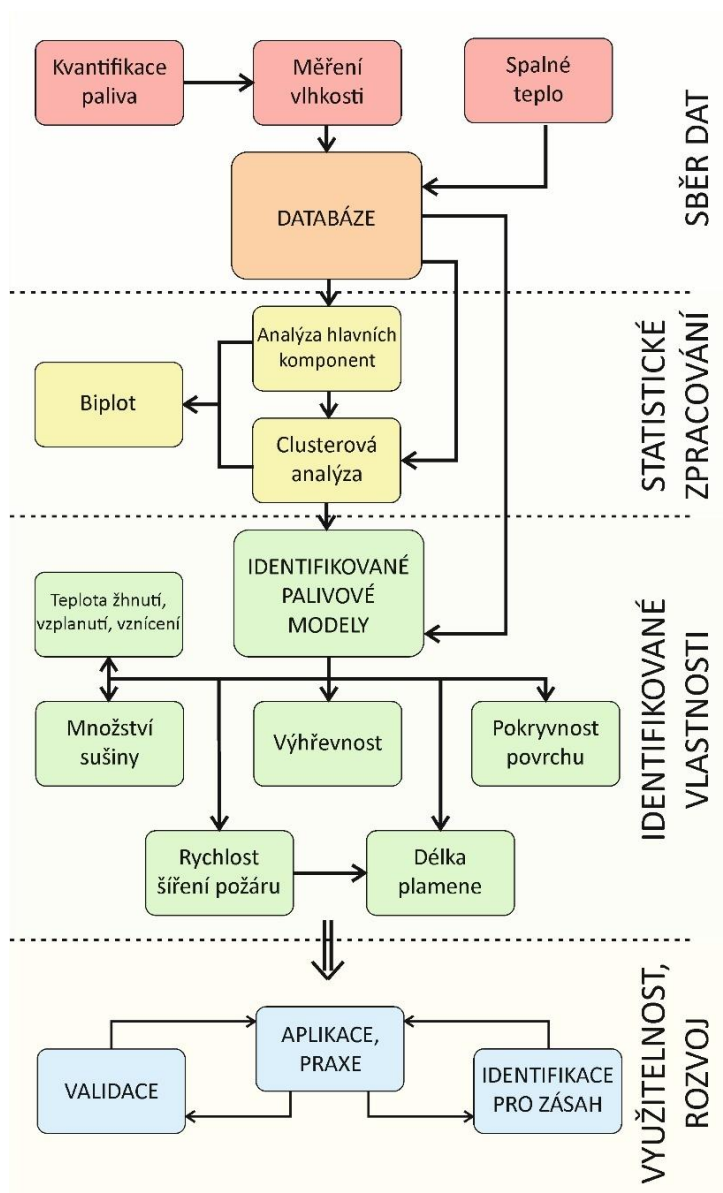
Hodnota plochy požáru je následně dána násobením konstanty „A“ s druhou mocninou délky požáru ve směru šíření (od místa vzniku po frontu požáru).

#### 4.9.5.4 Výkon fronty požáru

Výkon fronty požáru je výsledkem násobku šířky perimetru požáru s kalkulovanou intenzitou požáru, která je počítána v  $\text{kW}\cdot\text{m}^{-1}$ . Výsledkem výkonu fronty požáru je tedy množství tepla, které se uvolní na předpokládané délce fronty požáru za časový interval jednu minutu.

### 4.10 Grafické znázornění struktury dizertační práce

Pro účely snadnější orientace postupu vývoje palivových modelů, statistického zpracování, počátek validace palivových modelů a návrh implementace je graficky znázorněn na Obr. 29.



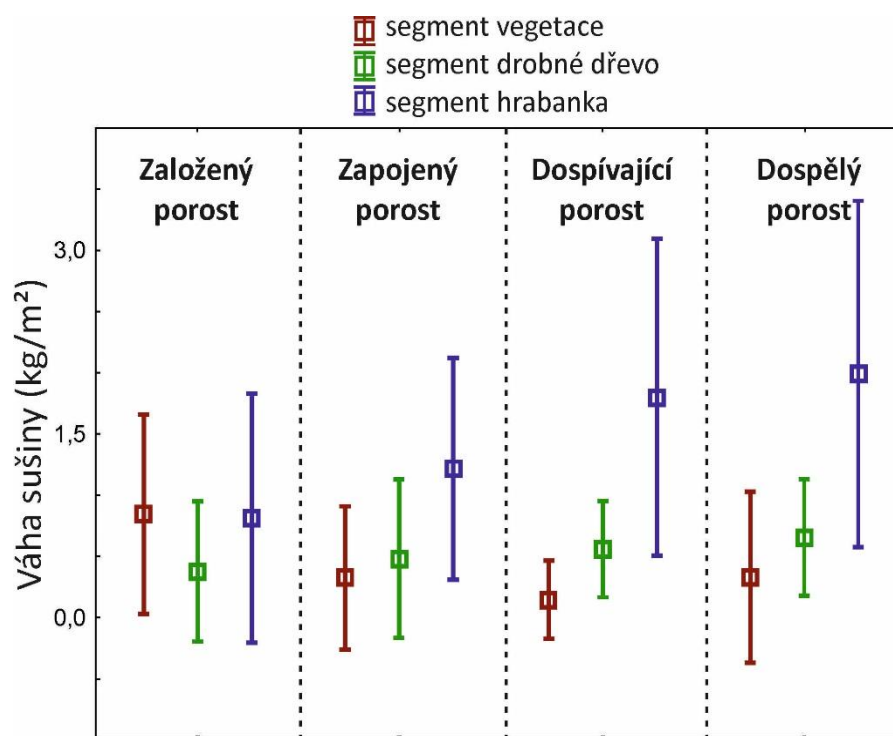
Obr. 29: Grafické schéma struktury praktické části dizertační práce.

## 5 Výsledky

V rámci vývoje palivových modelů bylo v první části v lesních porostech kvantifikováno pozemní palivo neboli byla zjišťována váha sušiny (vlhkost 0 %) jednotlivých segmentů pozemního paliva (vegetace, drobné dřevo, hrabanka, humus). Segment humus byl kvantifikován s cílem zjistit celkové množství humusu v jednotlivých skupinách, a také zjistit jeho vlastnosti v případě, že vstoupí do procesu hoření. Vzhledem k tomu, že požáry v České republice se v naprosté drtivé většině případů (mimo požáru v Národním parku České Švýcarsko) projevují nízkou závažností požáru, tzv. „fire severity“ není dále ve výpočtech týkající se kalkulace palivových modelů uváděn, nicméně jeho hodnoty byly zahrnuty do databázi pro případné budoucí použití.

### 5.1 Popisné statistiky kvantifikace pozemního paliva

#### 5.1.1 Sušina pozemního paliva ( $\text{kg/m}^2$ )



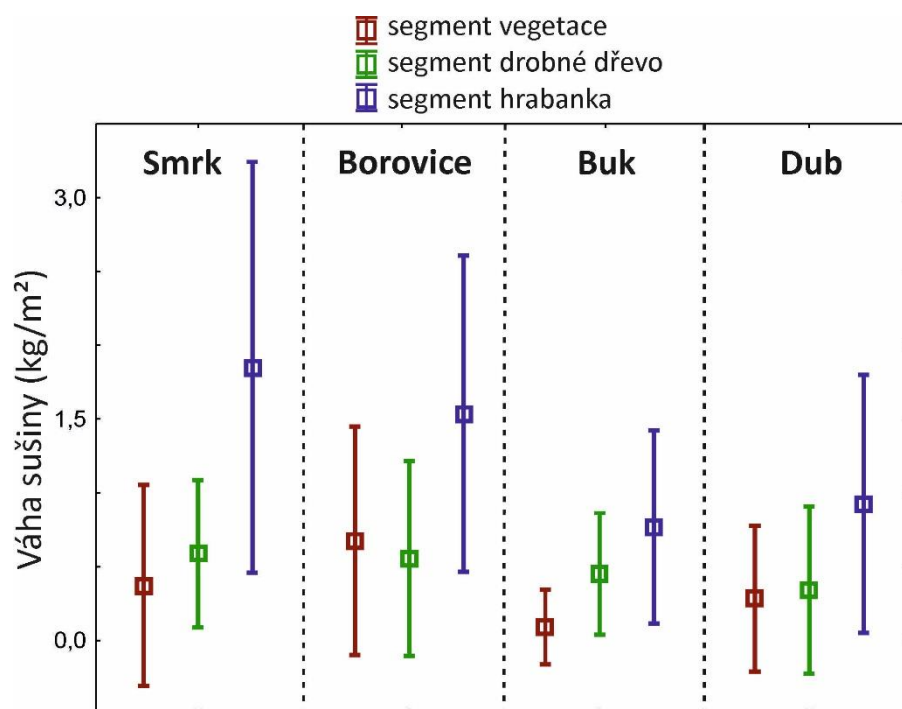
Graf 1: Výsledky váhy sušiny ( $\text{kg/m}^2$ ) jednotlivých segmentů pozemního paliva distribuované dle stádií z hlediska problematiky lesních požárů; průměr +/- směrodatná odchylka.

Při grafickém znázornění veškerých výsledků kvantifikace pozemního paliva rozdělené pouze dle stádií z hlediska problematiky lesních požárů bez ohledu na převládající dřevinu nebo ekologickou řadu daného stanoviště můžeme obecně říct, že s narůstajícím věkem rostlo



i množství hrabanky na povrchu lesní půdy. Segment drobné dřevo vykazuje poměrně vyrovnané hodnoty, zatímco segment vegetace logicky dominuje na otevřených nezapojených plochách ve stádiu založeného porostu (Graf 1).

Totožné vyhodnocení váhy sušiny jednotlivých segmentů pozemní paliva v závislosti pouze na druhu převládající dřeviny v daném porostu (60+ % zastoupení) ukazuje vyšší hmotnost sušiny segmentu hrabanka u jehličnatých dřevin. Zastoupení segmentu drobného dřeva je opětovně poměrně vyrovnané, stejně tak segment vegetace, kde je pouze určitý nárůst u převládající dřeviny borovice (Graf 2).



Graf 2: Výsledky váhy sušiny (kg/m<sup>2</sup>) jednotlivých segmentů pozemního paliva distribuované dle převládající dřeviny v daných lesních porostech; průměr +/- směrodatná odchylka.

Při porovnání váhy sušiny jednotlivých segmentů v rámci ekologických řad jsou viditelné poměrně vyrovnané výsledky s rozdílem ekologické řady extrémní, kde je množství všech segmentů výrazně nižší než u ostatních ekologických řad. Vzhledem k nulové směrodatné odchylce je však nutné říct, že se podařilo v této ekologické řadě analyzovat pouze jednu studijní plochu (Tab. 9).

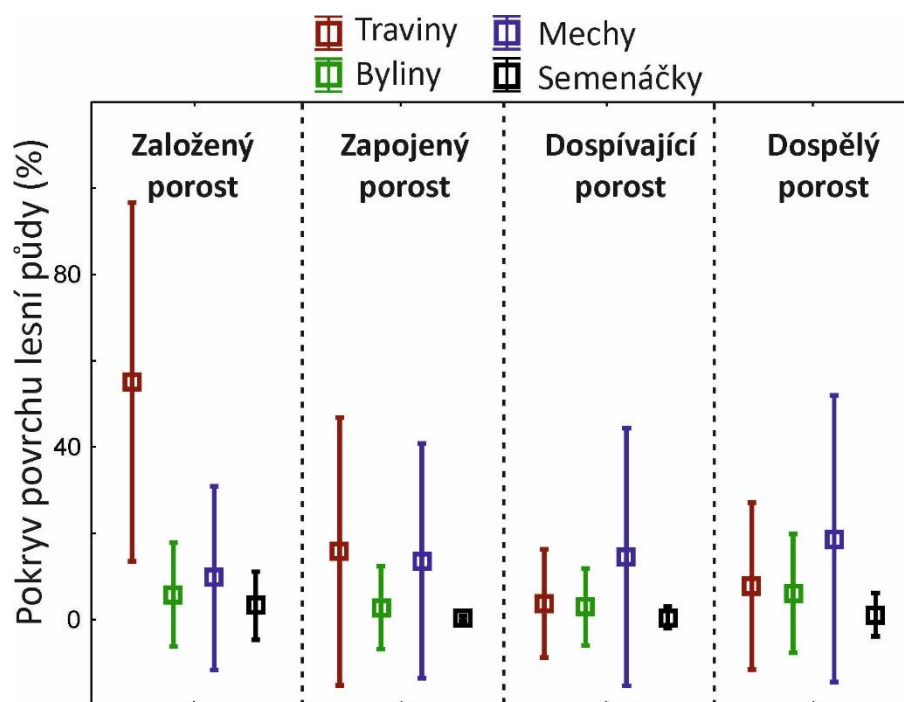
Tabulka 9: Srovnání váhy sušiny jednotlivých segmentů pozemního paliva (kg/m<sup>2</sup>) v rámci jednotlivých ekologických řad.

Ekologická řada	Segment	Průměr	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka
Extrémní	Vegetace	0,000	0,000	0,000	0,000
	Drobné dřevo	0,023	0,023	0,023	0,000
	Hrabanka	0,460	0,460	0,460	0,000
Kyselá	Vegetace	0,456	0,000	4,448	0,666
	Drobné dřevo	0,503	0,000	4,341	0,523
	Hrabanka	1,650	0,000	9,120	1,249
Živná	Vegetace	0,307	0,000	4,234	0,648
	Drobné dřevo	0,548	0,000	3,315	0,503
	Hrabanka	1,622	0,000	9,408	1,494
Obohacená humusem	Vegetace	0,270	0,000	1,456	0,461
	Drobné dřevo	0,580	0,000	1,848	0,479
	Hrabanka	1,412	0,000	4,560	1,064
Obohacená vodou	Vegetace	0,029	0,000	0,248	0,064
	Drobné dřevo	1,101	0,317	3,519	0,728
	Hrabanka	1,870	0,986	2,947	0,485
Oglejená	Vegetace	0,475	0,000	5,438	0,755
	Drobné dřevo	0,412	0,000	1,449	0,405
	Hrabanka	1,059	0,000	3,420	0,765

### 5.1.2 Pokryv povrchu lesní půdy vegetací

V rámci vyhodnocování pokryvu lesní půdy vegetací jsme rozdělovali čtyři základní typy vegetace, se kterými se běžně setkáváme v lesních porostech České republiky, jedná se o traviny, byliny, mechy a semenáčky (přirozená nebo umělá obnova). Při terénním měření bylo hodnoceno procentuální zastoupení těchto druhů vegetace na studijní ploše a jejich průměrná výška. Výšky jednotlivých typů vegetace jsou vyhodnoceny až u konkrétních palivových modelů v kapitole 5.5. Druhy jednotlivých typů vegetace nebyly rozlišovány.

Vyhodnocení procentuálního pokryvu dle jednotlivých stádií z hlediska problematiky lesních požárů ukazuje dominantní zastoupení travin u stádia založeného porostu, kde se průměrné hodnoty pohybovaly až okolo 60 %. Zbylé hodnocené typy vegetace se vyskytovaly v jednotlivých stádiích poněkud vyrovnaně. Ve výsledcích je viditelná mírná vzrůstající tendence v průměrném procentuálním zastoupením mechů na ploše (Graf 3).



Graf 3: Srovnání procentuálního pokryvu jednotlivými typy vegetace v rámci stádií z hlediska problematiky lesních požárů; průměr  $\pm$  směrodatná odchylka.

## 5.2 Spalné teplo jednotlivých segmentů pozemního paliva

Výsledky testování vzorků jednotlivých segmentů pozemního paliva ukázaly poměrně vyrovnané výsledky (Tab. 10) mezi množstvím uvolňované tepelné energie v rámci jednotlivých typů dřevin u segmentu drobné dřevo. Stejně výsledky ukazuje také segment vegetace, při porovnání jednotlivých typů vegetace. Větší odchylku a rozdíl byl pozorován pouze u segmentu hrabanka v lesním porostu s převahou borovice lesní. Hodnoty uvolňovaného spalného tepla jsou výrazně nižší než spalné teplo uvolňované ze segmentu hrabanka/opad v porostech s jinou dominantní dřevinou.

*Tabulka 10: Výsledky měření produkce spalného tepla (MJ/kg) u jednotlivých segmentů pozemního paliva a jejich částí.*

Segment	Počet měření	Průměr	Medián	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka
Byliny	21	16.99	16.94	16.16	18.02	0.36
Traviny	21	17.19	17.13	16.68	17.47	0.21
Mechy	21	17.21	17.45	16.42	17.76	0.49
Smrk hrabanka	45	17.06	16.97	14.96	18.36	0.93
Borovice hrabanka	23	12.31	12.18	11.33	14.39	0.67
Buk opad	26	17.48	17.52	16.24	18.43	0.45
Dub opad	21	16.03	16.05	14.38	17.48	0.85
Smrk drobné dřevo	50	18.81	18.85	17.50	19.34	0.34
Borovice drobné dřevo	30	18.41	18.51	17.99	18.89	0.26
Buk drobné dřevo	26	18.52	18.43	17.26	22.68	1.03
Dub drobné dřevo	21	18.08	18.25	16.29	18.71	0.56
Humus	48	9.66	9.45	3.58	16.36	3.29

Při srovnání výsledků měření produkce spalného tepla bez ohledu na typ převládající dřevin (Tab. 11) vidíme, že hodnoty spalného tepla drobného dřeva jsou nejvyšší (18,54 MJ/kg), následuje segment vegetace (17,25 MJ/kg), hrabanka (16,02 MJ/kg) a nejnižší hodnotou logicky disponuje humus (9,66 MJ/kg).

*Tabulka 11: Výsledky měření produkce spalného tepla (MJ/kg) u jednotlivých segmentů pozemního paliva bez ohledu na typ vegetace nebo převládající druh dřeviny.*

Segment	Počet měření	Průměr	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka
Vegetace	110	17.25	15.34	18.72	0.70
Hrabanka	115	16.02	11.33	18.43	2.07
Drobné dřevo	127	18.54	16.29	22.68	0.62
Humus	48	9.66	3.58	16.36	3.29

### 5.3 Teplota vzplanutí a vznícení jednotlivých segmentů pozemního paliva

Pro jednotlivé segmenty pozemního palivo byla laboratorně stanovena i teplota žhnutí, vzplanutí a vznícení (Tab. 12). Segmentem s nejnižší teplotou vzplanutí jsou traviny s 310 °C, následované bylinami a hrabankou borovice. To potvrzuje předpoklad, že traviny jsou jako

materiál v lese nejnádhněji zapalitelné, a právě v prostorách s vysokým výskytem travin vznikají požáry častěji.

*Tabulka 12. Laboratorní výsledky analýzy teploty žhnutí, vzplanutí a vznícení pro jednotlivé segmenty pozemního paliva.*

Segment	Teplota žhnutí (°C)	Teplota vzplanutí (°C)	Teplota vznícení (°C)
Byliny	280	340	500
Traviny	320	310	500
Mechy	310	360	490
Smrk hrabanka	290	360	480
Borovice hrabanka	310	340	470
Buk opad	300	370	500
Dub opad	300	360	500
Smrk drobné dřevo	290	360	460
Borovice drobné dřevo	320	360	460
Buk drobné dřevo	290	350	460
Dub drobné dřevo	240	370	450

#### 5.4 Zařazení k palivovým modelům

Zvolenou metodou pro statistické zpracování výsledků byla analýza hlavních komponent, která pomohla identifikovat vztah jednotlivých skupin k definovaným palivovým modelům a následná clusterová analýza tyto skupiny k těmto palivovým modelům přiřadila.

Ke statistickému zpracování výsledků analýzou hlavních komponent a clusterovou analýzou bylo pro účely zařazení jednotlivých skupin do definovaných palivových modelů zpočátku uvažováno použití pěti prediktorů (váha sušiny segmentu hrabanka, váha sušiny segmentu drobné dřevo, procentuální zastoupení travin, procentuální zastoupení bylin a procentuální zastoupení mechů). Z důvodů lepší vypovídající hodnoty výsledků byl však vypuštěn prediktor váha sušiny segmentu drobné dřevo.

Pro účely výpočtu clusterové analýzy byly ke čtyřem prediktorům použity ještě dva další prediktory, a to souřadnice dvou hlavních komponent pro jednotlivé skupiny na základě analýzy hlavních komponent.

Výsledky byly vizuálně zpracovány do podoby biplotu (Graf 5).

### 5.4.1 Korelační matice prediktorů

Samotnému statistickému zpracování metodou Analýzy hlavních komponent předcházelo vytvoření korelační matice navrhovaných prediktorů (Tab. 13). Z výsledků vyplývá signifikantní pozitivní korelace mezi procentuálním pokryvem bylin a mechů, což je dobře viditelné i biplotu výsledků analýzy hlavních komponent a clusterové analýzy. Dále byla zjištěna signifikantní negativní korelace mezi průměrem hmotnosti sušiny segmentu hrabanka a pokryvem plochy segmentem traviny.

Tabulka 13. Korelační matice prediktorů použitých pro statistické zpracování.

	Váha sušiny hrabanka (kg/m <sup>2</sup> )	Pokryv plochy mechem (%)	Pokryv plochy bylinami (%)	Pokryv plochy travinami (%)
Váha sušiny hrabanka (kg/m <sup>2</sup> )	1,00	-0,04	-0,06	<b>-0,39</b>
Pokryv plochy mechem (%)	-0,04	1,00	<b>0,57</b>	-0,11
Pokryv plochy bylinami (%)	-0,06	<b>0,57</b>	1,00	-0,09
Pokryv plochy travinami (%)	<b>-0,39</b>	-0,11	-0,09	1,00

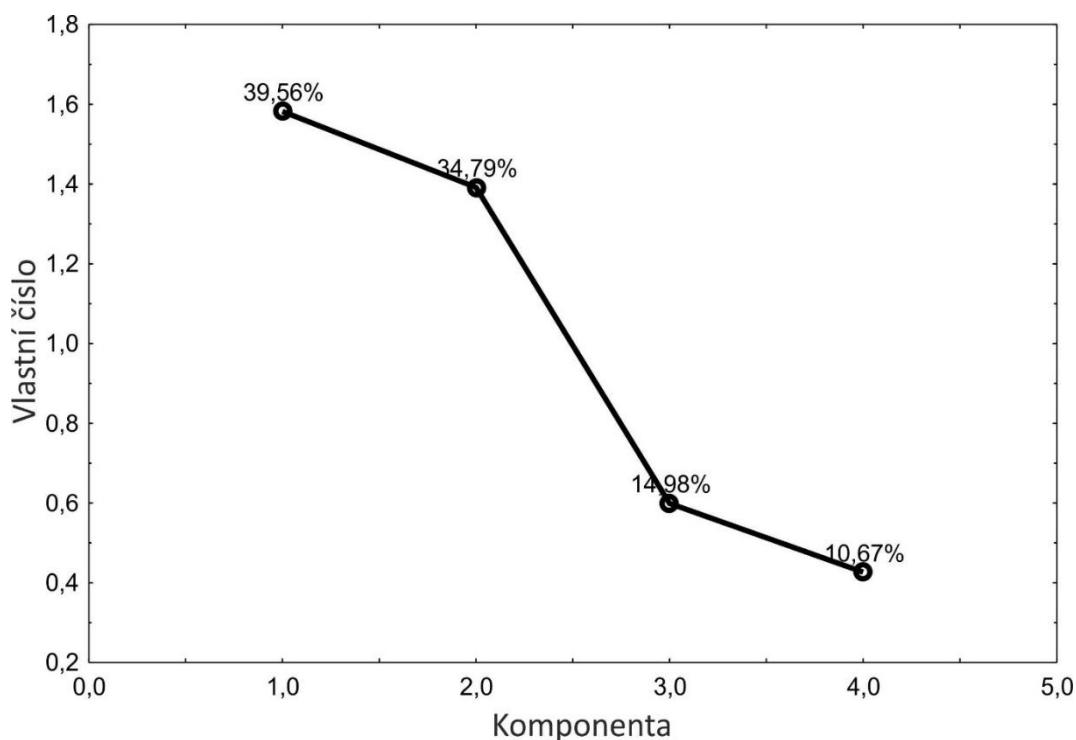
### 5.4.2 Analýza hlavních komponent

#### 5.4.2.1 Vlastní číslo (eigenvalues) a screeplot

Hodnota vlastního čísla „Eigenvalues“ na prvních dvou komponentách byla větší než 1,00. Celková variabilita, míra přenesené informace závislých proměnných na prvních dvou komponentách byla 74,35 % (Tab. 14). Výsledky tedy splňují základní podmínky a použití analýzy hlavních komponent při tomto výběru závislých proměnných je možné. Graficky znázorněny jsou tyto hodnoty pomocí tzv. screeplotu (Graf 4), který poskytuje totožné informace jako tabulka č. 14.

Tabulka 14: Vlastní číslo (eigenvalues) a míra promítnuté variability na komponentách.

Komponenta	Hodnota vlastního čísla	Kumulativní hodnota vlastního čísla	Promítnutá variabilita (%)	Kumulativní promítnutá variabilita (%)
1	1,58	1,58	39,56	39,56
2	1,39	2,97	34,79	74,35
3	0,60	3,57	14,98	89,33
4	0,43	4,00	10,67	100,00



Graf 4: Screeplot s hodnotami vlastního čísla a variabilitou na jednotlivých komponentách.

#### 5.4.2.2 Komunalita proměnných

Proměnná s nejvyšší promítnutou variabilitou na první komponentě je průměrný pokryv travin (76% variability) a průměrná hmotnost hrabanky (72 % variability) (Tab. 15). Na druhé komponentě se promítá výrazně proměnná mech (64 % variability) a byliny (66 % variability). Celkově je však na prvních dvou komponentách výrazně zachycena variabilita všech proměnných, a to v 70-79 procentech.

Tabulka 15: Komunality proměnných na jednotlivých komponentách.

Proměnná	Kumulativní variability na komponentách (%)			
	Komponenta 1	Komponenta 2	Komponenta 3	Komponenta 4
Sušina hrabanka	72,1	78,8	78,8	100,0
Pokryv mechů	6,2	69,8	100,0	100,0
Pokryv bylin	3,9	70,1	99,9	100,0
Pokryv travin	76,0	78,6	78,7	100,0

#### 5.4.2.3 Souřadnice dvou hlavních komponent

Výsledné nové souřadnice jednotlivých případů (skupin) vůči hlavním komponentám (kompletní soubor v Příloze 2) byly přidány do původního datového souboru, který byl dále statisticky vyhodnocen (Tab. 16).

Tabulka 16: Datový soubor jednotlivých skupin s doplněnými souřadnicemi dvou hlavních komponent.

Kategorie (skupina)	Sušina hrabanka	Pokryv mechu	Pokryv bylinami	Pokryv travinami	Souřadnice komponenta 1	Souřadnice komponenta 2
4_BO_ky	1,245946559	2,342158022	2,037523038	-0,742251828	-2,139429738	-2,614725474
4_BO_og	-0,088808215	2,619289038	2,10156567	0,019145318	-0,775699978	-3,243225859
4_BK_ex	-1,060664189	-0,685601725	-0,844395384	-0,757815754	0,458932178	0,914761777
4_BK_ky	-1,122621839	-0,47465125	-0,460139594	-0,228642267	0,765445384	0,421921881
4_BK_ži	-0,272882834	-0,685601725	-0,569926963	-0,649821165	-0,041004609	0,884418016
4_DB_ky	0,303712462	-0,675054201	1,605235275	-0,190844161	-0,455867736	-0,558198726
4_DB_og	-0,214436775	-0,680913936	1,888090231	1,090091659	0,738560186	-1,036492963
4_DB_ži	1,994472486	-0,685601725	-0,844395384	-0,757815754	-1,60297706	1,587944
4_SM_hu	0,38185437	-0,685601725	-0,764342095	-0,757815754	-0,527202553	1,177386935
4_SM_ky	1,442534953	0,399286428	-0,112479594	-0,563425493	-1,425553092	0,201509151

#### 5.4.3 Clusterová analýza K průměrů

Výsledkem clusterové analýzy K průměrů, kde je předem definován počet clusterů přiřadil jednotlivé skupiny k jednotlivým clusterům (palivovým modelům). K analýze bylo využito čtyři základních závislé proměnné, ze kterých byla počítána analýza hlavních komponent a dvě nové závislé proměnné, souřadnice jednotlivých případů (skupin) vůči dvou hlavním komponentám v rámci analýzy hlavních komponent.





letech vývoje nové generace porostů. Palivovému modelu PM2-Byliny, mechy zase dominují porosty s převládající dřevinou borovice. U palivový modelu PM3-Hrabanka dominují dospělé a dospívající porosty, převážně s dominancí smrku. Poslední neutrální palivový model PM4 je reprezentován zejména porosty s dominancí listnatých dřevin a tmavé zapojené porosty s převahou smrku.

*Tabulka 17: Zařazení jednotlivých skupin do jednotlivých palivových modelů na základě výsledků analýzy hlavních komponent a clusterové analýzy K průměrů.*

Palivová model	ID skupiny	Stádium z hlediska problematiky lesních požárů	Převládající dřevina	Ekologická řada
PM1 - Travniny	7	Dospělý porost	Dub	Oglejená
	17	Dospívající porost	Borovice	Živná
	30	Založený porost	Buk	Kyselá
	31	Založený porost	Buk	Živná
	33	Založený porost	Dub	Oglejená
	34	Založený porost	Smrk	Ovlivněná humusem
	35	Založený porost	Smrk	Kyselá
	37	Založený porost	Smrk	Oglejená
	38	Založený porost	Smrk	Živná
PM2 - Byliny, mechy	1	Dospělý porost	Borovice	Kyselá
	2	Dospělý porost	Borovice	Oglejená
	15	Dospívající porost	Borovice	Kyselá
	32	Založený porost	Dub	Kyselá
	39	Zapojený porost	Borovice	Kyselá
PM3 - Hrabanka	6	Dospělý porost	Dub	Kyselá
	8	Dospělý porost	Dub	Živná
	9	Dospělý porost	Smrk	Ovlivněná humusem
	10	Dospělý porost	Smrk	Kyselá
	11	Dospělý porost	Smrk	Ovlivněná vodou
	13	Dospělý porost	Smrk	Živná
	14	Dospívající porost	Borovice	Ovlivněná humusem
	16	Dospívající porost	Borovice	Oglejená
	22	Dospívající porost	Dub	Živná
	23	Dospívající porost	Smrk	Ovlivněná humusem
	24	Dospívající porost	Smrk	Kyselá
	25	Dospívající porost	Smrk	Ovlivněná vodou
	27	Dospívající porost	Smrk	Živná
	28	Založený porost	Borovice	Kyselá
36	Založený porost	Smrk	Ovlivněná vodou	
47	Zapojený porost	Smrk	Ovlivněná vodou	
PM4 - Neutrální	3	Dospělý porost	Buk	Extrémní
	4	Dospělý porost	Buk	Kyselá
	5	Dospělý porost	Buk	Živná
	12	Dospělý porost	Smrk	Oglejená

18	Dospívající porost	Buk	Kyselá
19	Dospívající porost	Buk	Živná
20	Dospívající porost	Dub	Kyselá
21	Dospívající porost	Dub	Oglejená
26	Dospívající porost	Smrk	Oglejená
29	Založený porost	Borovice	Oglejená
40	Zapojený porost	Borovice	Oglejená
41	Zapojený porost	Buk	Kyselá
42	Zapojený porost	Buk	Živná
43	Zapojený porost	Dub	Kyselá
44	Zapojený porost	Dub	Oglejená
45	Zapojený porost	Smrk	Ovlivněná humusem
46	Zapojený porost	Smrk	Kyselá
48	Zapojený porost	Smrk	Oglejená
49	Zapojený porost	Smrk	Živná

\*pokračování tabulky č. 17.

## 5.5 Identifikované vlastnosti palivových modelů

### 5.5.1 Palivový model PM1 – Travniny

Dominantním typem vegetace na povrchu lesní půdy u definovaného palivového modelu PM1 – Travniny jsou traviny, které pokrývají 68,43 % plochy, jejich průměrná výška je 41,38 cm (Tab. 18). Vegetace ve formě bylin, mechů a náletových semenáčků je zastoupená již v menší míře. Celkově však vegetace v tomto palivovém modelu dominuje a pokrývá 86,86 % povrchu. Množství sušiny jednotlivých segmentů pozemního paliva dominuje také logicky segment vegetace s 0,68 kg. Celkově se na ploše jednoho metru čtverečního nachází 1.31 kg sušiny hořlavého materiálu. Tento materiál v sobě nese 22,29 MJ/m<sup>2</sup> tepla. Výsledky Rothermelova matematického modelu šíření pozemního lesního požáru předpokládají při nulovém vlivu svahu a rychlosti větru 10 km/h rychlost šíření 3,96 metrů za minutu a intenzitu jednoho metru fronty požáru 70,89 kW/m.

Tabulka 18: Základní výsledky a požárně technické charakteristiky palivového modelu PM1 –  
Traviny.

Proměnná		Hodnota	Jednotky
Sušina pozemního paliva	Vegetace	0,68	kg/m <sup>2</sup>
	Hrabanka	0,46	kg/m <sup>2</sup>
	Drobné dřevo	0,18	kg/m <sup>2</sup>
	<b>Celkem</b>	<b>1,31</b>	<b>kg/m<sup>2</sup></b>
Zapojení plochy vegetací	Traviny	68,43	%
	Byliny	4,83	%
	Mechy	10,94	%
	Nálet	2,66	%
	<b>Celkem</b>	<b>86,86</b>	<b>%</b>
Průměrná výška travin		<b>41,38</b>	<b>cm</b>
Průměrná výška bylin		24,47	cm
Průměrná výška náletu		59,20	cm
Celkové spalné teplo palivového modelu		22,29	MJ/m <sup>2</sup>
Redukované spalné teplo palivového modelu		12,25	MJ/m <sup>2</sup>
Redukovaná výhřevnost		10,69	MJ/m <sup>2</sup>
		2,97	kWh/m <sup>2</sup>
Rychlost šíření požáru bez vlivu větru a sklonu		<b>0,13</b>	<b>m/min</b>
Rychlost šíření požáru	(0° sklon; vítr 10 km/h)	<b>3,96</b>	<b>m/min</b>
Intenzita výkonu na frontě požáru	(0° sklon; vítr 10 km/h)	<b>70,89</b>	<b>kW/m</b>
Předpokládaná délka plamene	(0° sklon; vítr 10 km/h)	<b>0,55</b>	<b>m</b>

### 5.5.2 Palivový model PM2 – Byliny, mechy

U palivového modelu PM2 – Byliny, mechy dominují na povrchu zejména mechy, a to s pokrytím 73,87 %, dále jsou to zmiňované byliny 12,74 % (Tab. 19). Celkově je tak povrch pokrytý z 92,99 % vegetací, převážně tedy mechem. Nejvyšším materiálem jsou traviny s průměrnou výškou 29,87 cm. V sušině jednotlivých segmentů pozemního paliva převládá hrabanka (1,31 kg/m<sup>2</sup>) a vegetace (0,99 kg/m<sup>2</sup>). Celkově se pak na jednom metru čtverečním nachází 2,87 kg sušiny hořlavého materiálu. Tento materiál má v sobě uložené celkově 48,02 MJ/m<sup>2</sup> tepelné energie. Při základním nastavení Rothermelova modelu (0° svah, 10 km/h vítr) je předpokládaná rychlost šíření požáru 2,56 m/min a výkon 1 metru fronty požáru 597,74 kW.

Tabulka 19: Základní výsledky a požárně technické charakteristiky palivového modelu PM2 –  
Byliny, mechy.

Proměnná		Hodnota	Jednotky
Sušina pozemního paliva	Vegetace	0,99	kg/m <sup>2</sup>
	Hrabanka	1,31	kg/m <sup>2</sup>
	Drobné dřevo	0,57	kg/m <sup>2</sup>
	<b>Celkem</b>	<b>2,87</b>	<b>kg/m<sup>2</sup></b>
Zapojení plochy vegetací	Traviny	5,49	%
	Byliny	12,74	%
	Mechy	73,87	%
	Nálet	0,89	%
	<b>Celkem</b>	<b>92,99</b>	<b>%</b>
Průměrná výška travin		29,87	cm
Průměrná výška bylin		21,38	cm
Průměrná výška náletu		13,72	cm
Celkové spalné teplo palivového modelu		48,02	MJ/m <sup>2</sup>
Redukované spalné teplo palivového modelu		23,19	MJ/m <sup>2</sup>
Redukovaná výhřevnost		21,63	MJ/m <sup>2</sup>
		6,01	kWh/m <sup>2</sup>
Rychlost šíření požáru bez vlivu větru		<b>0,14</b>	<b>m/min</b>
Rychlost šíření požáru	(0° sklon; vítr 10 km/h)	<b>2,56</b>	<b>m/min</b>
Intenzita výkonu na frontě požáru	(0° sklon; vítr 10 km/h)	<b>597,74</b>	<b>kW/m</b>
Předokládaná délka plamene	(0° sklon; vítr 10 km/h)	<b>1,47</b>	<b>m</b>

### 5.5.3 Palivový model PM3 – Hrabanka

V rámci palivového modelu PM3 – Hrabanka dominuje, jak už název napovídá, segment hrabanka, s váhou sušiny 2,04 kg/m<sup>2</sup>, dále je ve větší míře zastoupen segment drobné dřevo s váhou sušiny 0,89 kg/m<sup>2</sup>. Celkově na jednom metru čtvereční plochy lze očekávat 3,09 kg sušiny hořlavého materiálu. Pokryvnost segmentem vegetace byla 19,32 %. Množství hrabanky a drobného dřeva výrazně navyšuje množství tepelné energie, které dostupné palivo nese (51,21 MJ/m<sup>2</sup>). Potenciální rychlost šíření požáru v tomto palivovém modelu je 2,08 m/min, a to při nulovém vlivu sklonu terénu a rychlosti větru 10 km/h, výkon 1 metru fronty požáru tohoto palivového modelu je 327,00 kW/m (Tab. 20).

Tabulka 20: Základní výsledky a požárně technické charakteristiky palivového modelu PM3 – Hrabanka.

Proměnná		Hodnota	Jednotky
Sušina pozemního paliva	Vegetace	0,16	kg/m <sup>2</sup>
	Hrabanka	2,04	kg/m <sup>2</sup>
	Drobné dřevo	0,89	kg/m <sup>2</sup>
	<b>Celkem</b>	<b>3,09</b>	<b>kg/m<sup>2</sup></b>
Zapojení plochy vegetací	Traviny	5,16	%
	Byliny	3,79	%
	Mechy	8,41	%
	Nálet	1,96	%
	<b>Celkem</b>	<b>19,32</b>	<b>%</b>
Průměrná výška travin		25,79	cm
Průměrná výška bylin		13,61	cm
Průměrná výška náletu		15,00	cm
Celkové spalné teplo palivového modelu		51,21	MJ/m <sup>2</sup>
Redukované spalné teplo palivového modelu		15,64	MJ/m <sup>2</sup>
Redukovaná výhřevnost		14,08	MJ/m <sup>2</sup>
		3,91	kWh/m <sup>2</sup>
Rychlost šíření požáru bez vlivu větru		<b>0,11</b>	<b>m/min</b>
Rychlost šíření požáru	(0° sklon; vítr 10 km/h)	<b>2,08</b>	<b>m/min</b>
Intenzita výkonu na frontě požáru	(0° sklon; vítr 10 km/h)	<b>327,00</b>	<b>kW/m</b>
Předokládaná délka plamene	(0° sklon; vítr 10 km/h)	<b>1,11</b>	<b>m</b>

#### 5.5.4 Palivový model PM4 – Neutrální

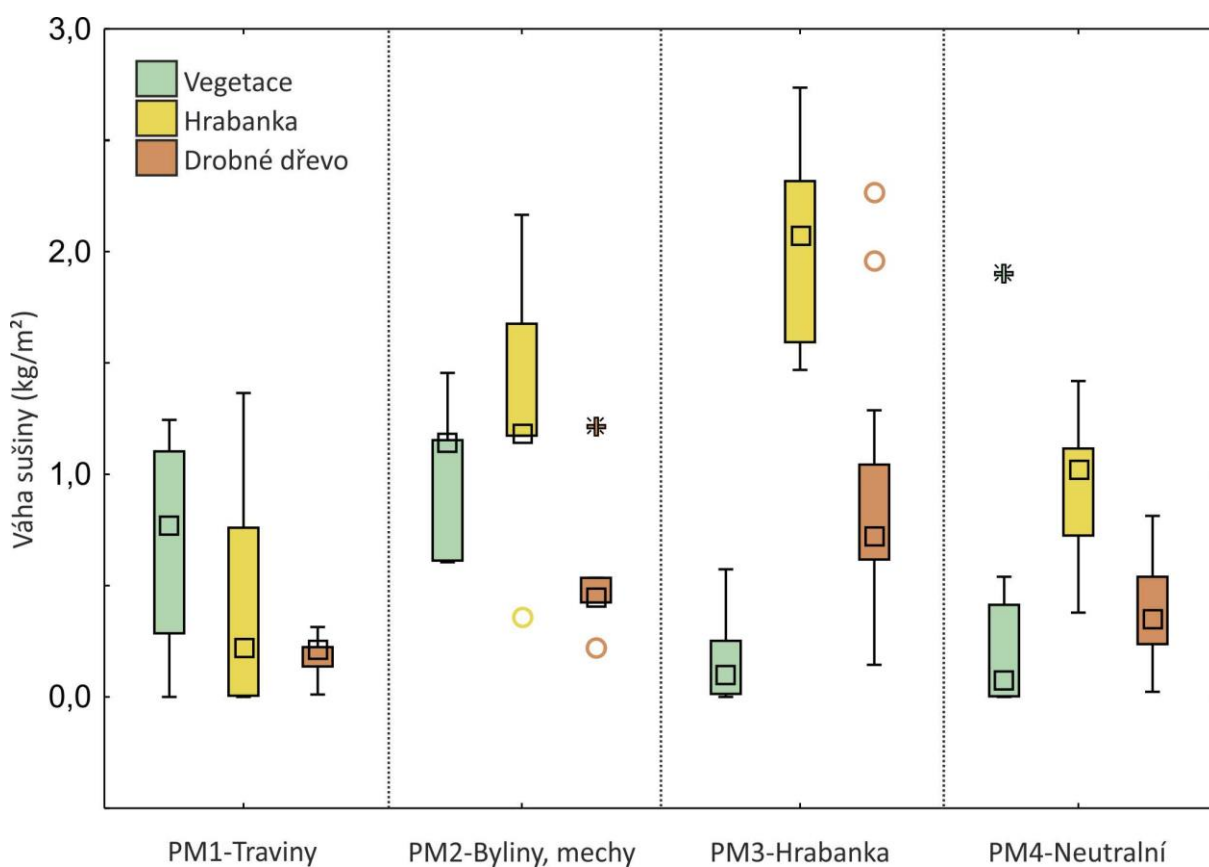
U palivového modelu PM4 – Neutrální nedominoval žádný ze segmentů pozemního paliva nebo druh segmentu vegetace. Sušinou je nejvíce zastoupen segment hrabanka, a to 0,93 kg/m<sup>2</sup>. Celkově je na ploše jednoho metru čtvereční 1,57 kg sušiny segmentů pozemního paliva. Plocha je pokryta z 27,38 % vegetací, a to ze 13,50 % travinami a 10,20 % mechy. Potenciální tepelná energie nesena v hořlavém materiálu na ploše je 26,13 MJ/m<sup>2</sup>. Rychlost šíření požáru v tomto prostředí bez vlivu sklonu terénu a rychlosti větru 10 km/h je dle Rothermelova matematického modelu šíření pozemního požáru 5,41 m za minutu a výkon 1 metru fronty požáru odpovídá hodnotě 414,60 kW (Tab. 21).

Tabulka 21: Základní výsledky a požárně technické charakteristiky palivového modelu PM4 -  
Neutrální.

Proměnná		Hodnota	Jednotky
Sušina pozemního paliva	Vegetace	0,26	kg/m <sup>2</sup>
	Hrabanka	0,93	kg/m <sup>2</sup>
	Drobné dřevo	0,39	kg/m <sup>2</sup>
	<b>Celkem</b>	<b>1,57</b>	<b>kg/m<sup>2</sup></b>
Zapojení plochy vegetací	Traviny	13,50	%
	Byliny	2,50	%
	Mechy	10,20	%
	Nálet	1,17	%
	<b>Celkem</b>	<b>27,38</b>	<b>%</b>
Průměrná výška travin		37,43	cm
Průměrná výška bylin		18,15	cm
Průměrná výška náletu		22,83	cm
Celkové spalné teplo palivového modelu		26,13	MJ/m <sup>2</sup>
Redukované spalné teplo palivového modelu		9,05	MJ/m <sup>2</sup>
Redukovaná výhřevnost		7,49	MJ/m <sup>2</sup>
		2,08	kWh/m <sup>2</sup>
Rychlost šíření požáru bez vlivu větru		<b>0,19</b>	<b>m/min</b>
Rychlost šíření požáru	(0° sklon; vítr 10 km/h)	<b>5,41</b>	<b>m/min</b>
Intenzita výkonu na frontě požáru	(0° sklon; vítr 10 km/h)	<b>414,60</b>	<b>kW/m</b>
Předkládaná délka plamene	(0° sklon; vítr 10 km/h)	<b>1,24</b>	<b>m</b>

## 5.6 Vzájemné srovnání palivových modelů

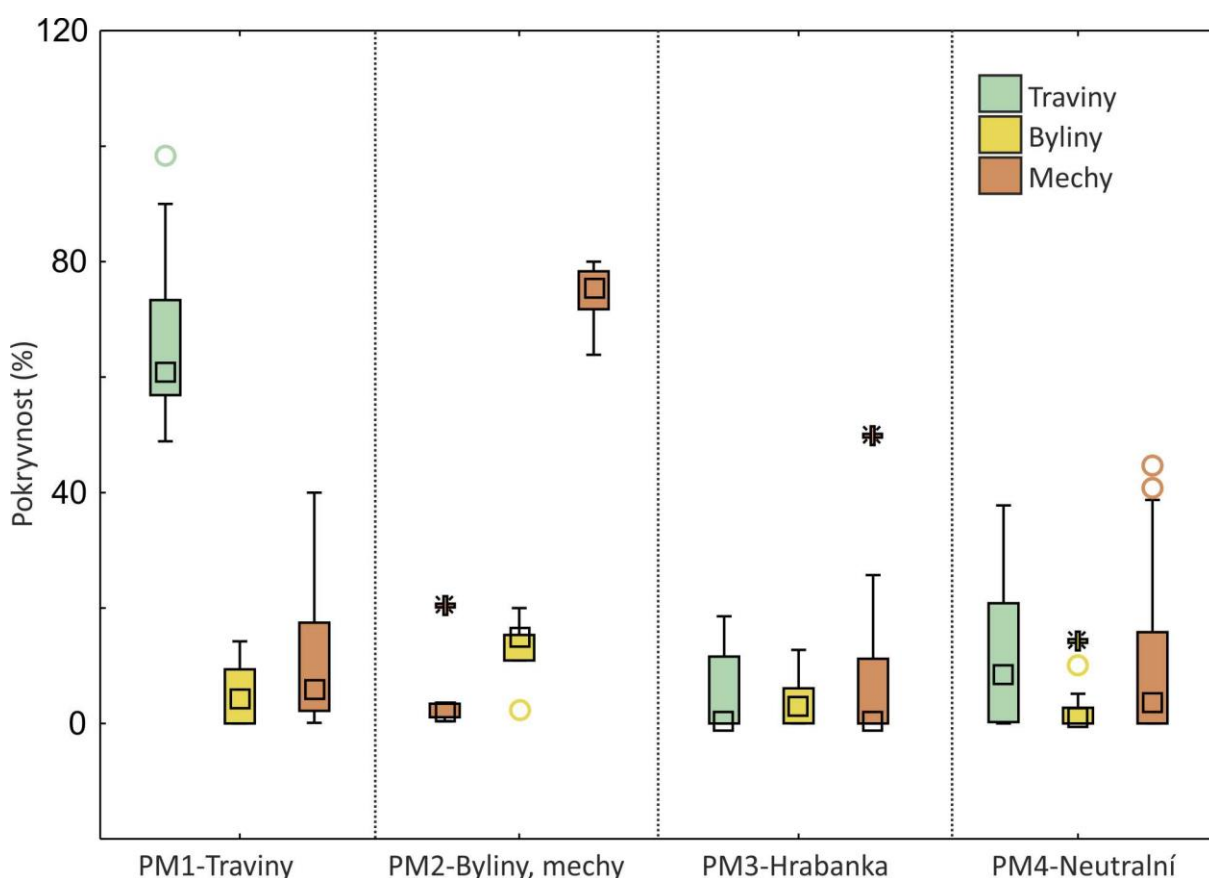
Při vzájemném srovnání sušiny jednotlivých segmentů pozemního paliva v rámci palivových modelů je evidentní, že největší zastoupení segmentu vegetace je u palivového modelu PM2 – Byliny, mechy, a to s hodnotou mediánu cca 1,15 kg sušiny (Graf 6). U palivového modelu PM1 – Travniny je také sušina vegetace logicky hojně zastoupena, a to s hodnotou mediánu 0,75 kg sušiny. V palivovém modelu PM3 – Hrabanka dominuje právě hrabanka, a to s mediánovou hodnotou sušiny 2,05 kg a maximem na hodnotě 2,75 kg. Sušina segmentu drobné dřevo je také nejvíce zastoupené v PM3 – Hrabanka.



Graf. 6: Srovnání sušiny vegetace, hrabanky a drobného dřeva v rámci jednotlivých palivových modelů; čtverec – medián; krabice – 25% a 75% kvantil; svorky – min, max; hvězdička – extrém, kolečko – vzdálené hodnoty.



Při vzájemném srovnání pokrývnosti jednotlivých palivových modelů jednotlivými typy vegetace (mechy, byliny, traviny) (Graf 7) je evidentní, že palivovému modelu PM1 – Traviny dominuje právě typ vegetace „traviny“, a to velmi výrazně. Stejně je tomu u palivového modelu PM2 – Byliny, mechy, kde výrazně dominuje ty vegetace „mechy“, zvýšená je také pokrývnost typem vegetace „byliny“. U zbývajících palivových modelů (PM3, PM4) je pokrývnost různými typy vegetace poměrně vyrovnaná, kdy 25% kvantil je vždy na hodnotě nula a hodnoty 75% kvantilu dosahují maximální hodnoty něco málo přes 20 % pokrývnosti daným typem vegetace.



Graf. 7: Srovnání pokrývu povrchu lesní půdy bylinami, travinami a mechy v rámci jednotlivých palivových model; čtverec – medián; krabice – 25% a 75% kvantil; svorky – min, max; hvězdička – extrémy, kolečko – vzdálené hodnoty.

Tabulka č. 22 ukazuje hodnoty pokryvnosti, procentuálního zastoupení jednotlivých typů vegetace v rámci jednotlivých palivových modelů. Největší množství vegetace se nachází v palivových modelech PM1 a PM2, a to 0,68 kg a 0,99 kg na jeden metr čtvereční. Po rozpočítání mezi jednotlivé typy vegetace a následném přiřazení hodnoty spalného tepla dostáváme celkové množství potenciálního spalného tepla na ploše jednoho metru čtverečního pro jednotlivé palivové modely. Je evidentní, že pro palivové modely PM1 – Travniny a PM2 – Byliny, mechy je hodnota celkového množství potenciálního spalného tepla nejvyšší a to 11,70 MJ/m<sup>2</sup>, respektive 16,93 MJ/m<sup>2</sup>.

*Tabulka 22: Srovnání celkového množství potenciální tepelné energie (MJ/m<sup>2</sup>) v typu segmentu vegetace v rámci identifikovaných palivových modelů.*

Palivový model	Typ vegetace	Pokryvnost různými typy vegetace (%)	Procentuální zastoupení z celku	Váha sušiny segmentu vegetace (kg)	Váha sušiny jednotlivých typů vegetace (kg)	Spalné teplo (MJ/kg)	Potenciální tepelná energie pro jednotlivé typy vegetace (MJ/m <sup>2</sup> )	Celkové množství potenciální tepelné energie MJ/m <sup>2</sup>
<b>PM1 - Travniny</b>	Mechy	10,94	12,59	0,68	0,09	16,99	1,46	<b>11,70</b>
	Semenáčky	2,66	3,06		0,02	17,13	0,36	
	Travniny	68,43	78,78		0,54	17,19	9,23	
	Byliny	4,83	5,56		0,04	17,21	0,65	
<b>PM2 - Byliny, mechy</b>	Mechy	73,87	79,44	0,99	0,79	16,99	13,41	<b>16,93</b>
	Semenáčky	0,89	0,96		0,01	17,13	0,16	
	Travniny	5,49	5,90		0,06	17,19	1,01	
	Byliny	12,74	13,70		0,14	17,21	2,34	
<b>PM3 - Hrabanka</b>	Mechy	8,41	43,54	0,16	0,07	16,99	1,18	<b>2,72</b>
	Semenáčky	1,96	10,13		0,02	17,13	0,28	
	Travniny	5,16	26,69		0,04	17,19	0,73	
	Byliny	3,79	19,63		0,03	17,21	0,54	
<b>PM4 - Neutral</b>	Mechy	10,20	37,27	0,26	0,10	16,99	1,62	<b>4,38</b>
	Semenáčky	1,17	4,27		0,01	17,13	0,19	
	Travniny	13,50	49,33		0,13	17,19	2,17	
	Byliny	2,50	9,13		0,02	17,21	0,40	

V následující tabulce č. 23 je možné vidět vzájemné srovnání celkového množství spalného tepla v jednotlivých palivových modelech. Pro tyto účely byly využity hodnoty spalného tepla segmentu vegetace z předchozí tabulky č. 22 a pro zbylé segmenty palivových modelů (drobné dřevo, hrabanka) byla násobena hodnota sušiny tohoto segmentu s výsledky analýzy uvolněného spalného tepla (Tab. 11). Ze srovnání výsledků celkového množství spalného tepla, které s sebou nese dostupné palivo na ploše vyplývá, že nejvíce tohoto spalného tepla je uloženo v palivových modelech PM2 – Byliny, mechy a PM3 – Hrabanka. Na přibližně poloviční hodnoty se dostaly zbylé palivové modely PM1 – Travniny a PM4 – Neutrální.

*Tabulka 23: Srovnání potenciální tepelné energie (spalného tepla) v jednotlivých palivových modelech.*

Palivový model	Segment	Průměrné množství sušiny jednotlivých segmentů (kg)	Spalné teplo (MJ/kg)	Celkové spalné teplo segmentu (MJ/m <sup>2</sup> )	Celkové spalné teplo palivového modelu (MJ/m <sup>2</sup> )
PM1 - Travniny	Vegetace	0,68		11,70	
	Drobné dřevo	0,18	18,54	3,28	<b>22,29</b>
	Hrabanka	0,46	16,02	7,31	
PM2 - Byliny, mechy	Vegetace	0,99		16,93	
PM2 - Byliny, mechy	Drobné dřevo	0,57	18,46	10,51	<b>48,02</b>
	Hrabanka	1,31	15,72	20,59	
	PM3 - Hrabanka	Vegetace	0,16		
PM3 - Hrabanka	Drobné dřevo	0,89	18,46	16,39	<b>51,21</b>
	Hrabanka	2,04	15,72	32,10	
	PM4 - Neutrální	Vegetace	0,26		
PM4 - Neutrální	Drobné dřevo	0,39	18,46	7,16	<b>26,13</b>
	Hrabanka	0,93	15,72	14,58	

## 5.7 Validace palivových modelů na reálných požářištích

V rámci validace palivových modelů, tedy ověření stavu, zda model produkuje hodnoty srovnatelné s realitou bylo vyhodnoceno celkově 11 požárů. Na základě vstupních údajů, jejichž identifikace je detailně popsána v metodické části práce byly nastaveny hodnoty vstupující do výpočtů rychlosti šíření, intenzity požáru, předpokládané velikosti požáru aj. Následně byla hodnota modelové velikosti požáru srovnávána s reálnou velikostí požáru identifikovanou terénním průzkumem s cílem zjistit spolehlivost a významnost shody.

### 5.7.1 Požár č. 1



Obr. 30: Požár č. 1 – perimetr požáru, fotografická dokumentace.

Prvním validovaným požárem byl požár v okrese Jihlava v blízkosti obce Zvolenovice. Jednalo se o požár v mírném svahu ( $7,33^\circ$ ). Na základě dostupných proměnných a terénním výzkumem bylo zjištěno, že je nutné využít palivový model PM1 pro analýzu tohoto požáru. Terénním šetřením bylo zjištěno, že požár měl velikost 0,57 hektaru, modelová velikost byla v tomto případě výrazně vyšší, a to 0,10 ha. Rychlost šíření byla modelována na 0,66 metrů za minutu s výkonem fronty požáru 355,95 kW (Obr. 30, Tab. 24).

Tabulka 24: Vstupní a výstupní proměnné v rámci validace požáru č. 1.

#### Požár č. 1

Obec	Zvolenovice	Palivový model	PM1
Okres	Jihlava	<b>Modelová rychlost šíření</b>	<b>0,66 m/min</b>
Souřadnice	49,1517	<b>Modelová velikost požáru</b>	<b>0,10 ha</b>
	15,5080	Modelová šířka požáru	31,46 m
Datum	17.09.2023	<b>Modelová intenzita požáru</b>	<b>11,31 kW/m</b>
<b>Skutečná velikost</b>	<b>0,57 ha</b>	<b>Modelový výkon fronty</b>	<b>355,95 kW</b>
Lesní typ	4K, 4S		
Průměrná výška stromů	0 m		
Dřevina	kultura		
Průměrný sklon ( $^\circ$ )	7,33	Předpokládaný vznik	15:56
Průměrná expozice ( $^\circ$ )	152,60	Oznámení	16:01
		Lokalizace	16:39
Vlhkost 1-h paliva (%)	17,00	Délka volného rozvoje	0:43

Vlhkost 10-h paliva (%)	13,50		
Vlhkost 100-h paliva (%)	13,50	Vlhkost vzduchu (%)	52,20
Vlhkost živých bylin (%)	75,00	Teplota (°C)	22,90
Vlhkost živých stromů (%)	75,00	Směr větru (°)	141,80
		Rychlost větru ve 20 m (km/h)	5,04

## 5.7.2 Požár č. 2



Obr. 31: Požár č. 2 – perimetr požáru, fotografická dokumentace.

Druhým validovaným požárem (Obr. 31, Tab. 25) byl požár v okrese Jihlava nedaleko obce Dolní Cerekev. Tento požár vznikl v rovinatém terénu v prostorách oplocenky nedaleko lesní cesty. Skutečná velikost požáru byla 0,74 hektaru, modelová velikost požáru byla velice podobná, a to 0,67 hektaru. Požár se podle modelu šířil rychlostí 2,31 m/min a výkon fronty požáru dosahoval hodnot 3051,96 kW.

Tabulka 25: Vstupní a výstupní proměnné v rámci validace požáru č. 2.

Požár č. 2			
Obec	Dolní Cerekev	Palivový model	PM1
Okres	Jihlava	<b>Modelová rychlost šíření</b>	<b>2,31 m/min</b>
Souřadnice	49,3533	<b>Modelová velikost požáru</b>	<b>0,67 ha</b>
	15,4291	Modelová šířka požáru	77,05 m
Datum	26.09.2023	<b>Modelová intenzita požáru</b>	<b>39,61 kW/m</b>
<b>Skutečná velikost</b>	<b>0,74 ha</b>	<b>Modelový výkon fronty</b>	<b>3051,96 kW</b>
Lesní typ	5K		
Průměrná výška stromů	1 m		



Dřevina	kultura		
Průměrný sklon (°)	7,33	Předpokládaný vznik	14:25
Průměrná expozice (°)	190,95	Oznámení	14:30
		Lokalizace	15:00
Vlhkost 1-h paliva (%)	17,00	Délka volného rozvoje	0:35
Vlhkost 10-h paliva (%)	13,50		
Vlhkost 100-h paliva (%)	13,50	Vlhkost vzduchu (%)	56,50
Vlhkost živých bylin (%)	75,00	Teplota (°C)	22,50
Vlhkost živých stromů (%)	75,00	Směr větru (°)	147,00
		Rychlost větru ve 20 m (km/h)	12,42

### 5.7.3 Požár č. 3



Obr. 32: Požár č. 3 – perimetr požáru, fotografická dokumentace.

Požár č. 3 vznikl v okrese Pelhřimov nedaleko Humpolce. Jednalo se o požár ve mírném sklonitém terénu ( $10,33^\circ$ ) na holině, která vznikla z důsledku kůrovcové kalamity. Požár z větší části zasahoval do oplocenky. Celková plocha požáru identifikovaná terénním průzkumem byla 0,71 hektaru, modelová velikost je nižší, a to 0,45 hektaru. Model predikuje rychlost šíření požáru 2,27 m/min a výkon fronty požáru odhaduje na 2500,43 kW (Obr. 32, Tab. 26).

Tabulka 26: Vstupní a výstupní proměnné v rámci validace požáru č. 3.

<b>Požár č. 3</b>			
Obec	Humpolec	<b>Palivový model</b>	PM1
Okres	Pelhřimov	<b>Modelová rychlost šíření</b>	2,27 m/min
Souřadnice	49,5214	<b>Modelová velikost požáru</b>	0,45 ha
	15,2932	Modelová šířka požáru	61,48 m
Datum	29.05.2023	<b>Modelová intenzita požáru</b>	40,67 kW/m
<b>Skutečná velikost</b>	<b>0,71 ha</b>	<b>Modelový výkon fronty</b>	2500,43 kW
Lesní typ	4S		
Průměrná výška stromů	1 m		
Dřevina	kultura		
Průměrný sklon (°)	10,33	Předpokládaný vznik	17:27
Průměrná expozice (°)	247,29	Oznámení	17:32
		Lokalizace	17:57
		Délka volného rozvoje	0:30
Vlhkost 1-h paliva (%)	12,50		
Vlhkost 10-h paliva (%)	11,00		
Vlhkost 100-h paliva (%)	11,00		
Vlhkost živých bylin (%)	150,00	Vlhkost vzduchu (%)	36,50
Vlhkost živých stromů (%)	300,00	Teplota (°C)	19,25
		Směr větru (°)	8,00
		Rychlost větru ve 20 m (km/h)	15,12

#### 5.7.4 Požár č. 4



Obr. 33: Požár č. 4 – perimetr požáru, fotografická dokumentace.

Požár č. 4 (Obr. 33, Tab. 27) byl validován v okrese Pelhřimov nedaleko obce Věžná. Jednalo se o separovaný lesní komplex na nacházející se na kopci obklopený zemědělskými plochami. Celý lesní komplex byl zdatelně poškozenný kůrovcovou kalamitou a byl z velké části odlesněn. Průměrný sklon požářiště byl 7,33°, zejména okrajové části požářiště ze severní a západní strany byly v poměrně prudkém svahu. Vzhledem k odlesnění a dominanci travin na ploše byl požár parametrizován s palivovým modelem PM1-Traviny. Skutečná velikost požáru byla identifikována na 0,88 hektaru, model predikoval velikost vyšší, a to 0,99 hektaru. Modelová rychlost šíření požáru byla 3,40 m/min a výkon 1 m fronty požáru byl odhadován na 60,84 kW/m.

*Tabulka 27: Vstupní a výstupní proměnné v rámci validace požáru č. 4.*

<b>Požár č. 4</b>			
Obec	Věžná	Palivový model	PM1
Okres	Pelhřimov	<b>Modelová rychlost šíření</b>	<b>3,40 m/min</b>
Souřadnice	49,4283	<b>Modelová velikost požáru</b>	<b>0,99 ha</b>
	14,9885	Modelová šířka požáru	89,34 m
Datum	23.03.2023	<b>Modelová intenzita požáru</b>	<b>60,84 kW/m</b>
<b>Skutečná velikost</b>	<b>0,88 ha</b>	<b>Modelový výkon fronty</b>	<b>5436,01 kW</b>
Lesní typ	4S		
Průměrná výška stromů	0 m		
Dřevina	kultura		
Průměrný sklon (°)	7,31	Předpokládaný vznik	12:08
Průměrná expozice (°)	270,59	Oznámení	12:13
		Lokalizace	12:39
		Délka volného rozvoje	0:31
Vlhkost 1-h paliva (%)	12,50		
Vlhkost 10-h paliva (%)	11,00		
Vlhkost 100-h paliva (%)	11,00	Vlhkost vzduchu (%)	42,00
Vlhkost živých bylin (%)	125,00	Teplota (°C)	16,66
Vlhkost živých stromů (%)	150,00	Směr větru (°)	128,66
		Rychlost větru (km/h)	18,12



### 5.7.5 Požár č. 5



Obr. 34: Požár č. 5 – perimetr požáru, fotografická dokumentace.

Požárem číslo pět (Obr. 34, Tab. 28) byl požár nacházející se v okrese Benešov nedaleko obce Mezno. Jednalo se opětovně o požár na odlesněné ploše s dominancí travin, v rovinatém terénu v blízkosti lesní cesty. V okolí se nacházely převážně mladší lesní porosty. Skutečná velikost požáru byla 0,21 hektaru, model tuto skutečnost podhodnotil s hodnotou 0,04 hektaru. Modelová rychlost šíření požáru byla 0,54 m/min a modelový výkon fronty požáru byl velmi nízký 225,55 kW.

Tabulka 28: Vstupní a výstupní proměnné v rámci validace požáru č. 5.

<b>Požár č. 5</b>			
Obec	Mezno	Palivový model	PM1
Okres	Benešov	<b>Modelová rychlost šíření</b>	<b>0,54 m/min</b>
Souřadnice	49,5102	<b>Modelová velikost požáru</b>	<b>0,04 ha</b>
	14,6466	Modelová šířka požáru	19,96 m
Datum	09.07.2023	<b>Modelová intenzita požáru</b>	<b>11,30 kW/m</b>
<b>Skutečná velikost</b>	<b>0,21 ha</b>	<b>Modelový výkon fronty</b>	<b>225,55 kW</b>
Lesní typ	4I		
Průměrná výška stromů	0 m		
Dřevina	kultura		
Průměrný sklon (°)	1,57	Předpokládaný vznik	16:27
Průměrná expozice (°)	264,20	Oznámení	16:32
		Lokalizace	17:00
Vlhkost 1-h paliva (%)	0,06	Délka volného rozvoje	0:33

Vlhkost 10-h paliva (%)	0,06		
Vlhkost 100-h paliva (%)	0,06	Vlhkost vzduchu (%)	23,00
Vlhkost živých bylin (%)	100,00	Teplota (°C)	30,25
Vlhkost živých stromů (%)	150,00	Směr větru (°)	16,00
		Rychlost větru (km/h)	4,32

### 5.7.6 Požár č. 6



Obr. 35: Požár č. 6 – perimetr požáru, fotografická dokumentace.

Šestým validovaným požárem (Obr. 35, Tab. 29) byl požár, který vznikl v okrese Rakovník nedaleko obce Šípy. Jednalo se o lesní požár uprostřed dospělého lesního komplexu. Došlo k zahoření paseky, která byla částečně oplocena. Na ploše požářiště se nacházelo i několik vzrostlých stromů, ale celkově dominovaly na ploše traviny, proto opět model pracoval s palivovým modelem PM1-Traviny. Skutečná velikost požáru činila 0,33 hektaru, modelová velikost byla vyšší, a to 0,49 hektaru.

Tabulka 29: Vstupní a výstupní proměnné v rámci validace požáru č. 6.

Požár č. 6			
Obec	Šípy	Palivový model	PM1
Okres	Rakovník	Modelová rychlost šíření	2,05 m/min
Souřadnice	50,0293	Modelová velikost požáru	0,49 ha
	13,6157	Modelová šířka požáru	66,66 m
Datum	08.07.2023	Modelová intenzita požáru	43,14 kW/m
Skutečná velikost	0,33 ha	Modelový výkon fronty	2875,48 kW
Lesní typ	3K		



Průměrná výška stromů	0 m		
Dřevina	kultura		
Průměrný sklon (°)	2,73	Předpokládaný vznik	11:01
Průměrná expozice (°)	123,90	Oznámení	11:06
		Lokalizace	11:33
Vlhkost 1-h paliva (%)	0,06	Délka volného rozvoje	0:32
Vlhkost 10-h paliva (%)	0,06		
Vlhkost 100-h paliva (%)	0,06	Vlhkost vzduchu (%)	24,00
Vlhkost živých bylin (%)	100,00	Teplota (°C)	27,40
Vlhkost živých stromů (%)	150,00	Směr větru (°)	131,00
		Rychlost větru (km/h)	10,80

### 5.7.7 Požár č. 7



Obr. 36: Požár č. 7 – perimetr požáru, fotografická dokumentace.

Požár č. 7 byl požár opětovně v okrese Rakovník v katastrálním území obce Čistá. Jednalo se o požár v separovaném pruhu lesa, který byl obklopený zemědělskou půdou využívanou jako travní porost. Požár vznikl v lese středního věku, kterému dominovaly dřeviny smrk a borovice. Na ploše se nacházela převážně hrabanka. Na základě vizuálních vlastností a dalších proměnných byl palivový model daného požářiště identifikován jako PM3-Hrabanka. Skutečná plocha požáru byla velmi malá cca 0.08 hektaru, modelová plocha se této malé ploše přiblížila a ukázala hodnotu 0.04 hektaru. Tomu odpovídá i nízká rychlost šíření požáru 0,57 metrů za minutu a výkon jednoho metru fronty požáru 91,10 kW/m (Obr. 36, Tab. 30).

Tabulka 30: Vstupní a výstupní proměnné v rámci validace požáru č. 7.

<b>Požár č. 7</b>			
Obec	Čistá	Palivový model	PM3
Okres	Rakovník	<b>Modelová rychlost šíření</b>	<b>0,57 m/min</b>
Souřadnice	50,0312	<b>Modelová velikost požáru</b>	<b>0,04 ha</b>
	13,5453	Modelová šířka požáru	20,10 m
Datum	29.05.2023	<b>Modelová intenzita požáru</b>	<b>91,10 kW/m</b>
<b>Skutečná velikost</b>	<b>0,08 ha</b>	<b>Modelový výkon fronty</b>	<b>1831,4 kW</b>
Lesní typ	2K		
Průměrná výška stromů	15 m		
Dřevina	smrk/borovice		
Průměrný sklon (°)	3,75	Předpokládaný vznik	11:09
Průměrná expozice (°)	147,00	Oznámení	11:14
		Lokalizace	11:38
		Délka volného rozvoje	0:29
Vlhkost 1-h paliva (%)	9,00		
Vlhkost 10-h paliva (%)	8,50		
Vlhkost 100-h paliva (%)	8,50	Vlhkost vzduchu (%)	31,00
Vlhkost živých bylin (%)	150,00	Teplota (°C)	21,30
Vlhkost živých stromů (%)	300,00	Směr větru (°)	19,00
		Rychlost větru (km/h)	7,20

### 5.7.8 Požár č. 8



Obr. 37: Požár č. 8 – perimetr požáru, fotografická dokumentace.

Dalším požárem byl požár s pořadovým číslem 8 (Obr. 37, Tab. 31), který se nacházel v katastrálním území obce Úhonice v okrese Praha-západ. Požár se nacházel v kopcovitém lesním komplexu (sklon 16,62°), kterému dominovaly dub s borovicí. Na základě vizuálního průzkumu s porovnáním vstupních vrstev pro identifikaci palivového modelu byl pro tento požár identifikovaný palivový model PM3-Hrabanka. Skutečná velikost požáru byla 0,09 hektaru, modelová velikost byla kalkulována na 0,19 hektaru a modelová fronta požáru ukázala hodnotu 9228,47 kW.

*Tabulka 31: Vstupní a výstupní proměnné v rámci validace požáru č. 8.*

<b>Požár č. 8</b>			
Obec	Úhonice	Palivový model	PM3
Okres	Praha-západ	<b>Modelová rychlost šíření</b>	<b>1,24 m/min</b>
Souřadnice	50,0392	<b>Modelová velikost požáru</b>	<b>0,19 ha</b>
	14,1736	Modelová šířka požáru	42,20 m
Datum	09.07.2023	<b>Modelová intenzita požáru</b>	<b>218,68 kW/m</b>
<b>Skutečná velikost</b>	<b>0,09 ha</b>	<b>Modelový výkon fronty</b>	<b>9228,47 kW</b>
Lesní typ	2S		
Průměrná výška stromů	19 m		
Dřevina	směs (DB/BO)		
Průměrný sklon (°)	16,62	Předpokládaný vznik	18:28
Průměrná expozice (°)	217,20	Oznámení	18:33
		Lokalizace	19:04
Vlhkost 1-h paliva (%)	6,00	Délka volného rozvoje	0:36
Vlhkost 10-h paliva (%)	6,00		
Vlhkost 100-h paliva (%)	6,00	Vlhkost vzduchu (%)	23,00
Vlhkost živých bylin (%)	100,00	Teplota (°C)	31,00
Vlhkost živých stromů (%)	150,00	Směr větru (°)	72,00
		Rychlost větru (km/h)	8,64



## 5.7.9 Požár č. 9



Obr. 38: Požár č. 9 – perimetr požáru, fotografická dokumentace.

Požár č. 9 (Obr. 38, Tab. 32) se nacházel v okrese Olomouc nedaleko obce Drahanovice. Požár se nacházel částečně na odlesněném místě a částečně v velmi světlé části lesa, kterou navíc lemovaly lesní cesty. Okraje požářiště se tak nacházeli na samotném kraji lesních cest, ze kterých probíhalo hašení požáru. Jednalo se o rovinný terén se smíšenými porosty v okolí. Pro účely validace požáru byl identifikovaný palivový model PM1-Traviny. Skutečná velikost byla kalkulována na 0,20 hektaru, možná o trochu více vzhledem k nemožnosti vstoupit do celého prostoru požářiště z důvodu oplocenky. Modelová velikost požáru byla 0,26 hektaru. Požár se podle modelu šířil rychlostí 1,51 metrů za minutu a na 1 metru fronty požáru produkoval výkon s 27,07 kW/m.

Tabulka 32: Vstupní a výstupní proměnné v rámci validace požáru č. 9.

Požár č. 9			
Obec	Drahanovice	Palivový model	PM1
Okres	Olomouc	<b>Modelová rychlost šíření</b>	<b>1,51 m/min</b>
Souřadnice	49,5890	<b>Modelová velikost požáru</b>	<b>0,26 ha</b>
	17,0482	Modelová šířka požáru	47,95 m
Datum	05.05.2023	<b>Modelová intenzita požáru</b>	<b>27,07 kW/m</b>
<b>Skutečná velikost</b>	<b>0,20 ha</b>	<b>Modelový výkon fronty</b>	<b>1297,98 kW</b>
Lesní typ	3K		
Průměrná výška stromů	1 m		
Dřevina	kultura		

Průměrný sklon (°)	3,00	Předpokládaný vznik	14:45
Průměrná expozice (°)	140,35	Oznámení	14:50
		Lokalizace	15:17
Vlhkost 1-h paliva (%)	12,50	Délka volného rozvoje	0:32
Vlhkost 10-h paliva (%)	11,00		
Vlhkost 100-h paliva (%)	11,00	Vlhkost vzduchu (%)	40,00
Vlhkost živých bylin (%)	150,00	Teplota (°C)	18,70
Vlhkost živých stromů (%)	300,00	Směr větru (°)	117,50
		Rychlost větru (km/h)	12,06

### 5.7.10 Požár č. 10



Obr. 39: Požár č. 10 – perimetr požáru, fotografická dokumentace.

Předposledním validovaným požárem byl požár nacházející se nedaleko obce Mírov v okrese Šumperk. Požár vzniknul na odlesněné ploše v poměrně svažitém terénu se složitým přístupem pro hasičskou techniku. Pro účely modelování byl opět identifikovaný palivový model PM1-Traviny. Skutečná velikost požáru byla 0,52 hektaru, modelová byla o trochu nižší 0,49 hektaru. Modelová rychlost šíření požáru byla 2,05 metrů za minutu s výkonem fronty požáru 2566,71 kW (Obr. 39, Tab. 33).

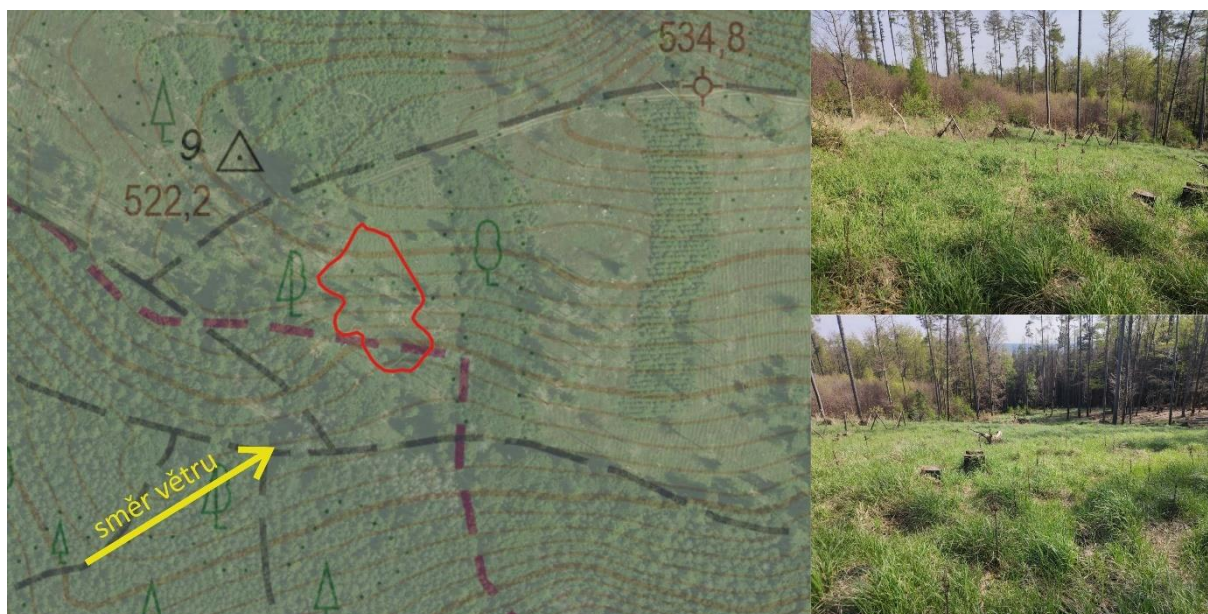
Tabulka 33: Vstupní a výstupní proměnné v rámci validace požáru č. 10.

Požár č. 10			
Obec	Mírov	Palivový model	PM1
Okres	Šumperk	Modelová rychlost šíření	2,05 m/min
Souřadnice	49,7859	Modelová velikost požáru	0,49 ha



	16,8570	Modelová šířka požáru	66,50 m
Datum	06.07.2023	<b>Modelová intenzita požáru</b>	<b>38,60 kW/m</b>
<b>Skutečná velikost</b>	<b>0,52 ha</b>	<b>Modelový výkon fronty</b>	<b>2566,71 kW</b>
Lesní typ	3S		
Průměrná výška stromů	1 m		
Dřevina	kultura		
Průměrný sklon (°)	13,88	Předpokládaný vznik	17:10
Průměrná expozice (°)	41,90	Oznámení	17:15
		Lokalizace	17:45
Vlhkost 1-h paliva (%)	9,00	Délka volného rozvoje	0:35
Vlhkost 10-h paliva (%)	8,50		
Vlhkost 100-h paliva (%)	8,50	Vlhkost vzduchu (%)	33,00
Vlhkost živých bylin (%)	100,00	Teplota (°C)	22,90
Vlhkost živých stromů (%)	150,00	Směr větru (°)	308,00
		Rychlost větru (km/h)	10,80

### 5.7.11 Požár č. 11



Obr. 40: Požár č. 11 – perimetr požáru, fotografická dokumentace.

Posledním požárem byl požár nacházející se v okrese Blansko, katastrální území obce Vísky. Požár se nacházel uprostřed lesního komplexu nad vesnicí, částečně v mírném kopcovitém terénu. Opětovně se jednalo o odlesněný kus lesa s dominancí travin na ploše = PM1-Traviny. Skutečná velikost požáru byla 0,52 hektaru, modelová byla vyšší, konkrétně 0,65



hektaru. Model predikoval rychlost šíření 2,46 m/min a výkon fronty požáru 54,76 kWh (Obr. 40, Tab. 34).

*Tabulka 34: Vstupní a výstupní proměnné v rámci validace požáru č. 11.*

<b>Požár č. 11</b>			
Obec	Vísky	Palivový model	PM1
Okres	Blansko	<b>Modelová rychlost šíření</b>	<b>2,46 m/min</b>
Souřadnice	49,5432	<b>Modelová velikost požáru</b>	<b>0,65 ha</b>
	16,6204	Modelová šířka požáru	74,39 m
Datum	03.06.2023	<b>Modelová intenzita požáru</b>	<b>44,08 kW/m</b>
<b>Skutečná velikost</b>	<b>0,52 ha</b>	<b>Modelový výkon fronty</b>	<b>3279,24 kW</b>
Lesní typ	3K		
Průměrná výška stromů	2 m		
Dřevina	kultura		
Průměrný sklon (°)	13,05	Předpokládaný vznik	14:39
Průměrná expozice (°)	178,68	Oznámení	14:44
		Lokalizace	15:09
		Délka volného rozvoje	0:30
Vlhkost 1-h paliva (%)	12,50		
Vlhkost 10-h paliva (%)	11,00		
Vlhkost 100-h paliva (%)	11,00	Vlhkost vzduchu (%)	41,50
Vlhkost živých bylin (%)	125,00	Teplota (°C)	15,80
Vlhkost živých stromů (%)	200,00	Směr větru (°)	55,50
		Rychlost větru (km/h)	14,40

### 5.7.12 Korelace proměnných

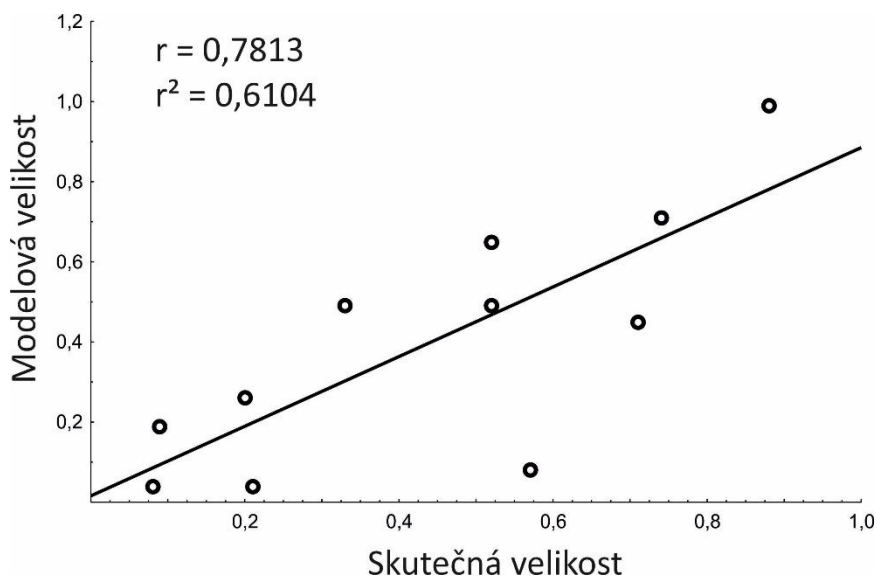
Identifikované proměnné v rámci přípravy validace požářišť a proměnné identifikované modelem v průběhu validace byly testovány pro účely zjištění vzájemných korelací (Tab. 35). Se skutečným požárem korelovala vlhkost vzduchu, a vlhkosti mrtvého paliva (1-h, 10-h, 100-h) a také rychlost šíření požáru. Tyto výsledky naznačují správné fungování modelu, neboť pokud skutečná velikost reaguje signifikantně na tyto proměnné, je to dobrý příslib toho, že model pracuje dobře. Modelová velikost požáru koreluje s rychlostí šíření požáru. Skutečná velikost, modelová velikost a rychlost šíření požáru dále koreluje s rychlostí větru.

*Tabulka 35: Korelace proměnných vstupující do modelu se skutečnou velikostí požáru a hlavními výstupy z modelování – velikost požáru, rychlost šíření a intenzita požáru.*

	Rychlost větru	Sklon	Expozice	Vlhkost vzduchu	Vlhkost 1-h paliva	Vlhkost 10-,100-h paiva	Vlhkost živých bylin	Vlhkost živého dřeva	Délka volného rozvoje požáru	Rychlost šíření požáru	Intenzita požáru
Skutečná velikost	<b>0,65</b>	0,12	0,22	<b>0,67</b>	<b>0,66</b>	<b>0,67</b>	-0,18	-0,34	0,08	<b>0,74</b>	-0,41
Modelová velikost	<b>0,89</b>	0,34	0,14	0,39	0,32	0,35	-0,01	-0,21	-0,30	<b>0,98</b>	-0,11
Rychlost šíření požáru	<b>0,95</b>	0,42	0,14	0,30	0,26	0,30	0,11	-0,07	-0,37	1,00	-0,07
Intenzita požáru	-0,02	0,60	0,15	-0,42	-0,43	-0,43	0,05	0,05	-0,03	-0,07	1,00

### 5.7.13 Srovnání pozorovaných a predikovaných hodnot velikosti požáru

V závěrečném vyhodnocení funkčnosti modelu byly pomocí lineární regrese srovnávány hodnoty skutečných velikostí požáru s hodnotami modelovanými (Graf 8). Výsledná hodnota Pearsonova korelačního koeficientu je  $r=0,7813$  s koeficientem determinace  $r^2=0,6104$ .



Graf. 8: Bodový graf srovnávající skutečnou a modelovou velikost analyzovaných požářišť s hodnotami Pearsonova korelačního koeficientu.

Pro přehlednost jsou výsledky validace a základní proměnné vstupující do procesu modelování zobrazeny přehledně v následující tabulce č. 36.

*Tabulka 36: Přehled základních vstupních proměnných do procesu validace a vybrané výsledné proměnné.*

Požár	Měsíc vzniku	Rychlost větru	Sklon	Expozice	Vlhkost vzduchu	Vlhkost 1-h paliva	Vlhkost 10-,100-h paiva	Vlhkost živých bylin	Vlhkost živého dřeva	Délka volného rozvoje požáru	Rychlost šíření požáru	Intenzita požáru	Skutečná velikost	Modelová velikost
1	9	3,05	0,99	152,6	52,2	17	13,5	75	75	43	0,66	0,19	<b>0,57</b>	<b>0,1</b>
2	9	7,53	7,33	190,95	56,5	17	13,5	75	75	35	2,31	0,66	<b>0,74</b>	<b>0,67</b>
3	5	9,16	10,3	247,29	36,5	12,5	11	150	300	30	2,27	0,68	<b>0,71</b>	<b>0,45</b>
4	3	10,98	7,31	270,59	42	12,5	11	125	150	31	3,4	1,02	<b>0,88</b>	<b>0,99</b>
5	7	2,62	1,57	264,2	23	6	6	100	150	33	0,54	0,19	<b>0,21</b>	<b>0,04</b>
6	7	6,55	2,73	123,9	24	6	6	100	150	32	2,05	0,72	<b>0,33</b>	<b>0,49</b>
7	5	4,36	3,75	147	31	9	8,5	150	300	29	0,57	1,52	<b>0,08</b>	<b>0,04</b>
8	7	5,24	16,6	217,2	23	6	6	100	150	36	1,24	3,65	<b>0,09</b>	<b>0,19</b>
9	5	7,3	3	140,35	40	12,5	11	150	300	32	1,51	0,45	<b>0,2</b>	<b>0,26</b>
10	7	6,55	13,9	41,9	33	9	8,5	100	150	35	2,05	0,65	<b>0,52</b>	<b>0,49</b>
11	6	8,73	13,1	178,68	41,5	12,5	11	125	200	30	2,46	0,74	<b>0,52</b>	<b>0,65</b>

## 6 Způsoby implementace palivových modelů do praxe

V následující kapitole jsou popsány základní úvahy ke způsobu identifikace palivových modelů přímo při reálném hasičském zásahu a myšlenky dalšího vývoje pro účely vytěžení množství informací plynoucích z palivového modelu velitelem zásahu při řešení mimořádné situace.

### 6.1 Způsob identifikace palivových modelů

#### 6.1.1 Využití dostupných GIS vrstev

S rychlým a významným rozvojem dálkového průzkumu země jsou v dnešní době snadno dostupná data, ze kterých je možné čerpat velké množství informací o prostředí, ve kterém lesní požár vznikl. Jedná se o rastrové vrstvy, vektorové vrstvy, letecké nebo satelitními snímky. Při práci s těmito vrstvami je dále formou různých analýz a úprav možné získávat další potřebné informace. Velké množství těchto zmiňovaných vrstev a dat je v dnešní době již volně dostupných. V rámci rozvoje, zdokonalování přípravy a samotné akce při zdolávání lesních požárů lze předpokládat, že i některé podklady, kterou nejsou běžně dostupné budou poskytovány a pravidelně aktualizovány v rámci zainteresování některých institucí do vytváření nástrojů využitelných pro Integrovaný záchranný systém ČR. Je samozřejmě nutné říct, že tomu musí předcházet různá jednání a smluvní vztahy, nicméně sdílení dat, jejich pravidelná aktualizace a jejich poskytování bezpečnostním složkám státu je běžnou praxí a správnou cestou v oblasti zvyšování připravenosti na řešení mimořádných událostí v krajině.

Z výše uvedeného lze tedy předpokládat, že Hasičský záchranný sbor může v budoucnu disponovat minimálně níže uvedenými podklady pro identifikaci palivového modelu a pro získání velkého množství informací o lesním požáru a prostředí, ve kterém tento požár vzniknul ještě před samotným příjezdem na místo mimořádné události.

Tyto níže popsané nástroje cílí na zvýšení efektivity taktiky zdolávání lesních požárů poskytováním maximálního množství informací, které by mohly být využitelné pro velitele zásahu. Ve spolupráci s Ústavem pro hospodářskou úpravu lesa, pobočka Frýdek-Místek byl pro názornou ilustraci vytvořen jednoduchý balík vrstev (Obr. 41), díky kterým je možné identifikovat palivový model před samotným příjezdem na místo mimořádné události.



Obr. 41: Příklad dostupných vrstev pro identifikaci palivového modelu v místě vzniku lesního požáru.

Pro účely identifikace palivového modelu byly do geoinformačního systému promítnuty tyto vrstvy:

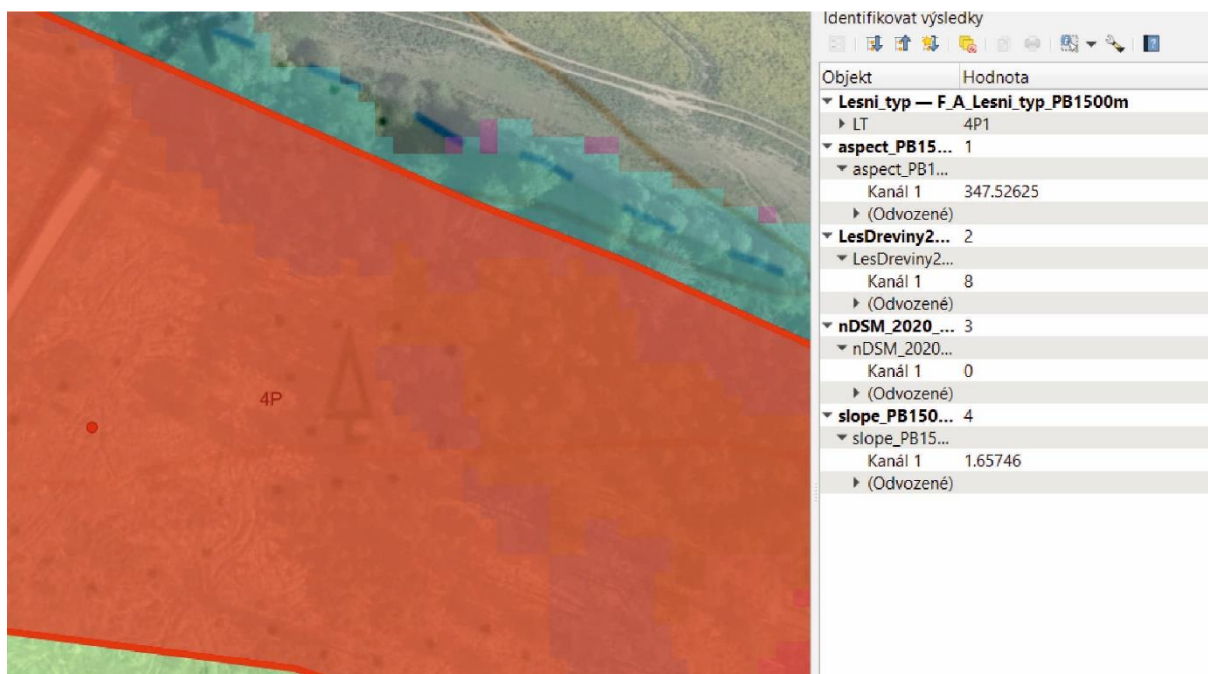
- Ortofoto mapa
- Základní mapa ČR 1:10000
- Sklon
- Expozice
- Výška stromu
- Dřevina
- Lesní typ
- Výskyt souší
- Bod vzniku požárů (červená tečka)

Vrstva ortofoto mapy poskytuje velice dobrou informaci o současném stavu lesního porostu. V případě, že není dostatečně aktualizovaná, lze její informaci dále upřesnit například

výskytem souší z předchozích let, což dává předpoklad tomu, že v tomto daném místě bude holina nebo zalesněná kultura. Tuto informaci dále potvrzuje i vrstva dřevin, který dokáže definovat základní typy dřevin (smrk, borovice, dub, buk, smíšené porosty, ostatní listnaté, ostatní jehličnaté, kleč, kultura, těžba). Posledním doplňující vrstvou je výška stromu, která je kalkulována jako rozdíl výšky pokryvu s výškou stanovenou digitálním modelem terénu. Tato informace tedy odpovídá výšce stromu v daném porostu. Pokud je identifikována hodnota 0 nebo 1 je jisté, že na takovém místě se nachází holina, zalesněná kultura, případně nálet. Z výše uvedených je tedy bezpečně možné identifikovat růstové fáze lesa nebo pro účely lesních požárů zjednodušená stádia z hlediska problematiky lesních požárů.

Další vrstvou je informace o lesním typu, a tedy možnosti identifikovat ekologickou řadu v prostoru požáru.

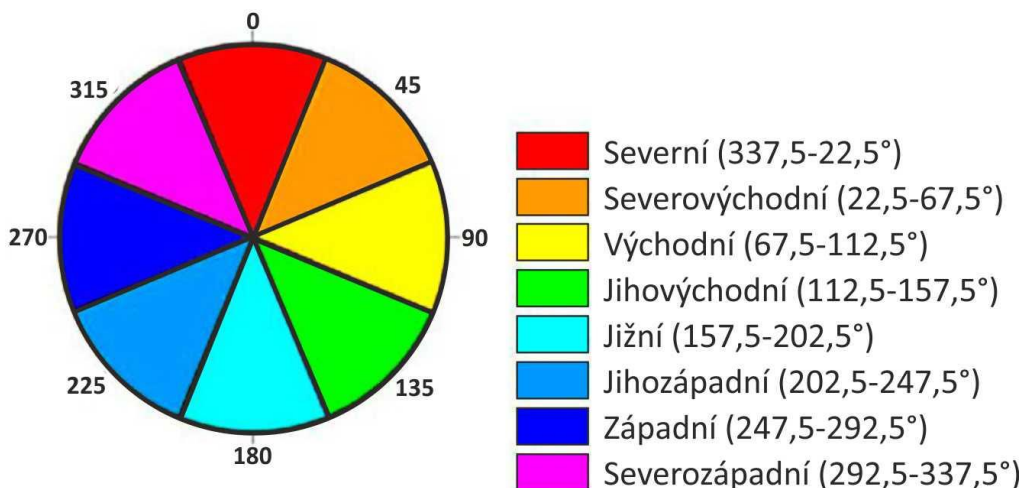
Tento soubor vrstev tak vytváří předpoklady pro správné identifikování palivového modelu, protože dostáváme informaci o stádiu z hlediska problematiky lesních požárů, lesním typu a převládající dřevině. Vrstvy identifikující sklon nebo expozici jsou pak již proměnnými, které mohou sloužit pro nastavení parametrů k identifikování předpokládané rychlosti šíření požárů, intenzitě aj. Způsob využití těchto vrstev pro účely stanovení těchto parametrů bude popsán níže.



Obr. 42: Ukázka identifikace parametrů ke konkrétnímu bodu v připravených vrstvách.

V připravených datových vrstvách lze zadáním/propsáním konkrétní souřadnice okamžitě těžít informace, které mohou být dále využívány. Obr. 42 ukazuje informace

konkrétního bodu lesního požáru. Je viditelné, že daný bod požáru se nachází na lesním typu 4P1, soubor lesních typů je tedy identifikován jako 4P, resp. oglejená ekologická řada. Dřevina je identifikována jako 8, což je identifikátor odpovídající typu dřeviny „kultura“. Parametr „nDSM\_2020“ definuje výšku porostu nad terénem, tedy výšku stromu, zde je identifikována hodnota 0 (výška v metrech), což odpovídá holině, zalesněné kultuře. Dále je zde uveden sklon „slope“, který je identifikován na 1,65° a expozice „aspect“ identifikována na 347°, což odpovídá severní expozici (Obr. 43).



Obr. 43: Identifikování expozice na základě hodnoty stupně (Supergeo 2016).

Na základě těchto identifikovaných hodnot je evidentní, že se porost nachází ve stavu založeného porostu z hlediska stádia problematiky lesních požárů, v ekologické řadě oglejená, převládající dřevinu v tomto případě určit nejde, ale vzhledem k dřevinné skladbě okolních porostů, výskytu souší z předchozích let a lesnímu typu 4P1 lze usuzovat, že v daném prostředí před odtěžením dominoval smrk. Z výše uvedeného lze tedy identifikovat palivový model PM1 – Travniny, viz tabulka č. 17 v kapitole 5.4.4. Samotnou přítomnost velkého množství travin na ploše potvrzuje i ortofoto mapa.

### 6.1.2 Identifikace/kalibrace na základě vizuálních charakteristik prostředí

Navzdory předpokládané pravidelné aktualizaci může dojít v terénu k situaci, kdy stav identifikovaný pomocí datových vrstev nebude odpovídat realitě. Nebo nastane situace, kdy datové podklady nebude možné využít. V těchto případech by mělo být možné identifikovat palivový model jiným způsobem, a to pomocí vizuálních charakteristik stanoviště. Způsoby identifikace pomocí vizuálních charakteristik by měly být jedna ze základních dovedností,



kteřou by měli minimálně velitelé zásahu zdolávající lesní požár disponovat. I z toho důvodu je celý systém palivových modelů nastaven na velmi jednoduchých základech identifikace. Také se předpokládá, že by klíč k identifikaci palivového modelu byl velmi jednoduše popsán v příručce pro velitele zásahu, případně ve formě kapesních průvodců „pocket guides“, kterými jsou například vybavení hasiči při zdolávání lesních požárů v USA (Obr. 44).

## 6.2 Kapesní průvodce pro potřeby velitelů zásahů při zdolávání lesního požáru

Kapesní průvodce nebo příručka velitele zásahu je nástrojem, který by mohl pomoci držitelům čerpat informace kdykoliv, kdekoliv, za jakýkoliv podmínek. Součástí kapesního průvodce by neměly být pouze informace k identifikaci palivového modelu, ale také popis palivových modelů ve vztahu k rychlosti šíření požáru, intenzitě požáru, a obecně dynamice požáru. Dále by měl obsahovat balík základních informací, na které je třeba myslet při zdolávání požáru a další užitečné informace. Tento průvodce by měl být součástí výbavy hasebních jednotek při zdolávání lesního požáru, ať už umístěním v kabině vozidla nebo přímo ve výstroji hasiče. V některých situacích by se tak mohl stát užitečným nástrojem, který by hasičům poskytl množství informací nebo pomáhal se ujistit o vhodnosti přístupu, taktiky.



Obr. 44: Ukázka kapesního průvodce „National Wildfire Coordinating Group – Incident Response Pocket Guide (IRPG)“ (National Wildfire Coordinating Group 2024).



### 6.3 Aplikace v telefonech, tabletech velitelů zásahu

Rozšířenou verzi a nástrojem, který by mohl být rozšířením kapesních průvodců a poskytovat velmi rychle informace o lesním požáru je vývoj aplikace, který by byla součástí tabletů nebo telefonů, kterými hasiči při hasičském zásahu disponují. Zadáním nebo propsáním souřadnice z operačního řízení (možná korekce po příjezdu hasičů na místo mimořádné události) by byly okamžitě dle dostupných vrstev identifikovány parametry stanoviště, identifikován palivový model. Jednoduchým zadáním nebo propsáním meteorologických dat by aplikace definovala předpokládanou rychlost a šíření požáru. Uživatel by také mohl identifikovat možné změny přenastavením různých parametrů jako rychlost větru, sklon, vlhkost aj. Na základě identifikovaného palivového modelu, rychlosti a intenzitě šíření požáru by měl být uživatel krátce informován o nejdůležitějších aspektech lesního požáru se souborem některých doporučení. Součástí by byl také balík základních informací jako v případě kapesních průvodců.

Další modifikací aplikace a kontinuálním vývojem by bylo možné získávat kalkulovat informace o ploše požáru, směru šíření, velikosti požáru za uvedený časový interval, předpokládanou velikost fronty požáru aj. Veškeré výpočty kalkulující tyto veličiny jsou již dostatečně popsány a ověřeny v praxi a záleželo by pouze na šikovnosti vývojářů aplikace a jejich schopnosti uvedené výpočty zakomponovat do fungující aplikace.

## 7 Diskuze

### 7.1 Základní metodické úvahy

Základní myšlenkou, se kterou se vstupovalo do závěrečné fáze vývoje palivových modelů byl maximální důraz na využitelnost, a to i pro lidi bez lesnického vzdělání nebo většího povědomí o lese. Závěrečné vyhodnocení modelů, způsoby identifikace, aplikace v praxi se řídí myšlenkou využitelnost = jednoduchost. Předpokládáme, že tohle je základ pro zvýšení potenciálu toho, že s výsledky dizertační práce budou pracovat lidé v praxi. Modely obecně mají za úkol především zobecňovat věci, kategorizovat a popisovat složitě fungující jevy (Jaakkola & Thalheim 2020). Právě s ohledem na zobecnění, jednoduchost a využitelnost jsme dospěli k názoru, že 4 palivové modely budou pro základní popis povrchu lesní půdy porostů České republiky dostačující.

Je určitě na místě poukázat, že pouhé 4 palivové modely daný prostor výrazně unifikují, ale to je tak nějak podstata modelů. Navíc v dizertační práci navrhujeme možnost, jak jít více do hloubky v případě, že disponuji lesnickými daty a dokážu se z nich zorientovat. Tento směr však již naráží na základní princip jednoduchost = využitelnost, proto jeho aplikování bude možné spíše ve vědecké sféře, ve vyhodnocování některých mimořádných událostí, nikoliv však během hasičského zásahu při zdolávání lesního požáru. Tedy tam, kam se snažíme výsledky celé práce směřovat. Je dobré poukázat, že i například velmi rozvinutý systém protipožární ochrany na území USA, který je pro účely šíření pozemního požáru postaven na stejné práci Rothermel (1972) uvažoval v počátcích 11 palivových modelů pro celé Spojené státy americké. Později byl rozšířen na 13 palivových modelů (Albini 1976a). Tyto palivové modely se využívají prakticky až do dnes, protože pro mnohé prvky protipožární ochrany jsou stále dostačující. Pro oblasti, kde bylo nutné některé proměnné modelů zpřesnit byl definováno 40 palivových modelů (Scott & Burgan, 2005). Celkově je nutné říct, že by palivové modely měly být živý organismus, který se bude vyvíjet na základě validace výsledků z praxe a dále zpřesňovat a zvyšovat svůj potenciál uplatnění.

Samotnému sestavení metodiky celé studie od kvantifikace, přes měření tepelné energie uvolňované při hoření až po samotné definování jednotlivých palivových modelů předcházelo důkladné studium množství nejrůznější literatury a vědeckých publikací zabývajících se tímto tématem (např. Rothermel 1972; Deeming & Brown 1975; Albini 1976a; Anderson 1982; Brown 1982; Scott & Burgan 2005; Sedliak & Majlingová 2013; Szczygiel et al. 2016; Szczygiel et al. 2017; Majlingová et al. 2018). I přes důkladné studium docházelo v průběhu vývoje palivových modelů k drobným metodickým úpravám, jejichž potřeba se ukázala až při

realizaci terénních nebo laboratorních měření. Myslím, že je to však běžné při vývoji podobných nástrojů, které se formou čísel a grafů snaží vyjádřit vzhled živé přírody a jejich vztah k nějakému činiteli, v našem případě požáru. V následujících kapitolách jsou popsány a diskutovány metodické postupy na základě, kterých byly palivové modely vyvinuty.

### **7.1.1 Kvantifikace pozemního paliva**

Samotným začátkem a zároveň jednou z hlavních částí výzkumu byla kvantifikace pozemního paliva, jejichž cílem bylo zjistit strukturu a množství pozemního paliva na povrchu lesní půdy. Pro tyto účely byla zvolena metodika obdobná polskému kvantifikování paliva (Szczygiel et al. 2017), zároveň určitou metodickou předlohu poskytla i práce Brown et al. (1982), Sedliak & Majlingová (2013), Szczygiel et al. (2016) nebo Majlingová et al. (2018).

Způsob výběru studijních ploch byl definován několika základními parametry. Jedním z parametrů byl druh převládající dřeviny, kdy jsme pracovali s nejdůležitějšími a nejhojnějšími dřevinami v lesích České republiky (Zpráva o stavu lesa 2023), a to se smrkem, borovicí, dubem a bukem. Druhým parametrem byl věk dřeviny, kdy jsme v počátcích pracovali s 5-6 kategoriemi. Postupně jsme však dospěli k názoru, že pro účely kategorizace budou postačující 4 skupiny. Tyto skupiny jsou popsány v práci Pecl et al. (2021) jako stádia z hlediska problematiky lesních požárů a definovány jako založený porost, zapojený porost, dospívající porost a dospělý porost. Jejich konkrétní vlastnosti jsou popsány v rešeršní části práce. Třetím parametrem pak byla ekologická řada daného stanoviště (Plíva 1987). Snahou při výběru ploch bylo promítnout co největší množství edafických kategorií (Plíva 1987). Je nutné přiznat, že stále existují kombinace kategorií porostů, ve kterých nebylo palivo kvantifikováno. Nicméně se jedná o kombinace „vzácnějších“ porostů, jejichž výskyt je v České republice minimální, možná dokonce nulový. Jsme přesvědčeni, že množství vybraných a naměřených studijních ploch poskytlo dostatečné podklady a informace pro vývoj palivových modelů. Velmi hojně jsou zastoupeny zejména ekologické řady kyselá a živná, které mají v našich lesích největší zastoupení (cca 69 % podle Plíva (1987)). Budoucí rozšiřování studijních ploch nebo více měření v již naměřených studijních plochách bude však jistě pro další vývoj palivových modelů prospěšné.

Při samotném měření se postupovalo tak, aby studijní plocha co nejvěrněji definovala plochu celého porostu (porostní skupiny). Zároveň se dbalo na to, aby byla založena mimo trasy zvěře, přibližovací linky a v dostatečné vzdálenosti od hranice se sousedním porostem. Bylo by

nelogické a zavádějící založit studijní plochy v poměrně hustém porostu s jednou světlinou právě v této světlině. Stejně tak založit studijní plochy v místech, které jsou ovlivňovány pohybem zvěře nebo lesní techniky. Původně se pracovalo s verzí založit v jednom porostu vždy jednu studijní plochy. I s ohledem na snižující se počet porostů u vzácnějších „skupin/kategorií“ nakonec byly zakládány 1-3 studijní plochy v jednom porostu.

### **7.1.2 Výkon požáru aneb výhřevnost segmentů pozemního paliva**

Samotná informace o množství paliva a jeho struktuře je sice cenná informace, ale pro účely využitelnosti v oblasti protipožární ochrany lesa bylo nutné k těmto výsledkům doplnit i množství tepla, které toto palivo může produkovat. Množství tepla produkované tímto palivem bylo analyzováno tzv. spalovací kalorimetrií (Sunner & Mansson 2016). Spalovací kalorimetrie je samostatný vědní obor, který je svou širokou využitelností aplikovatelný v desítkách nejrůznějších odvětvích, včetně lesnictví a dřevařství a metodologie měření množství uvolněného spalného tepla ze vzorku je předem daná, případně mírně modifikována v závislosti na použitém kalorimetru (van Herwaarden 2000; Sunner & Mansson 2016). V případě zpracování vzorků pro dizertační práci byl využit isoperibolický kalorimetr Parr 6400. V tomto přístroji probíhalo spálení homogenizovaného a slisovaného vzorku (Parr Instrument Company 2024).

Měření probíhalo v celkově 12 kategoriích popsaných v metodice práce (kapitola 4.2). Segment vegetace byl záměrně rozdělen do tří kategorií – traviny, byliny a mechy. Původně však bylo uvažováno měření spalného tepla segmentu vegetace dohromady, a to tak že spalovaný vzorek měl být mixem odebraných vzorků segmentu vegetace z jednotlivých lokalit. Vzhledem k významu pokrývnosti půdy segmentem vegetace, což je jedna z hlavních proměnných, která definuje samotné palivové modely bylo upuštěno od tohoto zjednodušeného měření a segment vegetace byl rozdělen do tří výše zmiňovaných podkategorií. Množství spalného tepla se však ukázalo poměrně vyrovnané s hodnotami 16,99-17,25 MJ/kg. Spalné teplo čtvrté kategorie segmentu vegetace – Semenáčky bylo stanoveno jako průměr předchozích tří kategorií (17,13 MJ/kg). Pro účely měření spalného tepla byla uvažována dále převládající dřevina v daném porostu, a to při analýze spalného tepla opadu (hrabanky) a drobného dřevěného materiálu.

Je jasné, že i v případě měření spalného tepla mohla jít studie více do hloubky. Rozlišovat například v segmentu drobné dřevo – větvičky a semenný materiál. Měřit spalné teplo u různých druhů travin a bylin, mechů na různých souborech lesních typů. Tenhle přístup

byl samozřejmě možný, ale vedl by k extrémnímu zvýšení náročnosti výzkumu a zároveň s velmi spekulativním zpřesněním finálních výsledků. Již při 12 kategoriích jsme s výjimkou spalného tepla humusu dosahovali velmi podobných hodnot, které lze očekávat u většiny organického materiálu. Hodnoty spalného tepla se pohybovaly mezi 17 a 19 MJ/kg. Při rozšířenější a více komplexní kategorizaci bychom nedosahovali jistě výrazně odlišných výsledků u jednotlivých druhů travin, bylin, mechů aj. Je dobré zmínit, že palivové modely (celkem 53 modelů) vyvinuté pro podmínky USA používají hodnotu tepelné energie přiřazovanou k jednotlivým palivovým typům jednotnou, a to 8000 Btu/lb (Rothermel 1972; Albini 1976a; Anderson 1982; Scott & Burgan 2005). Studování spalného tepla pozemního paliva pomocí kalorimetrie je možné, avšak zabývat by se touto studií měl spíš člověk, který je profesně a vědecky zaměřen právě na kalorimetrii. Pro účely vývoje palivových modelů jsme přesvědčeni, že naše kategorizace je dostačující a její zjemňování nemá pro naše účely smysl.

Pro další účely dalšího zpracování výsledků dizertační práce bylo přepočítána hodnota spalného tepla na výhřevnost. Způsob přepočtu je uveden v metodice práce v kapitole 4.4.

### **7.1.3 Závažnost požáru aneb množství vyhořelého paliva**

V průběhu zpracování dizertační práce jsme navštívili množství nejrůznějších požářišť a postupně dospěli k názoru, že samotná informace o množství paliva, spalného tepla nebo výhřevnosti nestačí k dokreslení reálné situace při požáru. Potřebovali jsme parametrizovat množství paliva, které v daném prostoru při běžných podmínkách vstupuje do procesu hoření. K tomuto účelu jsme si v prvotních myšlenkách vypůjčili pojem závažnost požáru, aneb v anglickém jazyce pojem zvaný „fire severity“ (Helms 1998; Agee 2007; Keeley 2009). Je to proměnná, která parametrizuje vliv požáru na životní prostředí a schopnost regenerace daného stanoviště. Jednoduše řečeno, čím vyšší závažnost požáru se na daném místě objeví, tím celý prostor více trpí, vyhoří více organické hmoty, je zničeno více stromů a celková regenerace je složitější (viz kapitola 3.9.2). Lesní požáry v České republice svojí běžnou velikostí, průběhem i intenzitou požáru odpovídají zpravidla kategorii nejnižší krutosti požáru (Berčák et al. 2023).

Pro ještě přesnější informaci nás však v posledním roce vývoje palivových modelů napadlo analyzovat přímo množství vyhořelé hmoty na reálných požářištích. Pro tyto účely byl vytvořen jednoduchý metodický postup a následně byla realizována pilotní studie (Mišek 2024), která kvantifikovala pozemní palivo na předem vytipovaných lesních požárech, a to tak, že vždy v páru docházelo ke kvantifikaci paliva na samém okraji požářiště ve spálené ploše (černá zóna) a hned vedle na ploše nespálené (zelená zóna). Vzájemná rozdílnost množství

paliva byla následně statisticky vyhodnocena. Z výsledků vyplynulo, že dochází v průměru k redukci 90 % segmentu vegetace, 44% redukci segmentu drobné dřevo a 23% redukci segmentu hrabanka (Mišek 2022). Z pozorování reálných požářišť bylo evidentní, že redukce segmentu vegetace je nejvyšší, neboť traviny svým malým objemem těla a zároveň velkým povrchem těla mají schopnost velmi rychle ztrácet vodu, a proto velmi ochotně vstupují do procesu hoření (Bracmort 2013; Birch et al. 2023). Stejně tak na základě pozorování víme, že zpravidla vyhoří jen první 1-2 cm hrabanky nebo silnější drobný dřevěný materiál nevyhoří kompletně (Flinn & Wein 1977; Keeley 2006). Číselné výsledky tak jen potvrdili empiricky stanovenou hypotézu. Tyto hodnoty byly následně využity pro výpočet redukovaného výkonu požáru. Tento redukovaný výkon požáru pak vstupuje do matematických výpočtů rychlosti šíření pozemního lesního požáru (Rothermel 1972).

Jedná se o pilotní studii, která prozatím nerozlišovala například druh převládající dřeviny, věk porostu apod (Mišek 2024). Pro účely zpřesňování palivových modelů bude tedy prospěšné tuto studii dále rozšiřovat a vytvořit větší datový soubor s větším množstvím kategorizujících proměnných.

V této pilotní studii není uvažován segment humus, který vstupuje do procesu hoření pouze v naprosto ojedinělých případech (Keeley 2006). V okamžiku, kdy vstupuje do procesu hoření i humusový segment lze pozorovat vysokou závažnost požáru (Keeley 2006; 2009). Tento jev s objevil například při požáru v Národním parku České Švýcarsko v Pravčickém dole (Obr. 45a), kde bylo možné pozorovat prakticky kompletní vyhoření veškeré organické hmoty na ploše. Vyhoření kompletních kmenů stromů také nebylo výjimkou (Obr. 45b).



Obr. 45: Pravčický důl v Národním parku České Švýcarsko po požáru; A) vysoká závažnost požáru; B) kompletně vyhořelé kmeny stromů (foto Roman Berčák).

#### **7.1.4 Teplota žhnutí, vzplanutí a vznícení**

Stanovení teploty žhnutí, vzplanutí a vznícení přímo nesouvisí s proměnnými, které jsou zakomponovány do výpočtů palivových modelů, ale dokreslují, jakou roli hrají jednotlivé segmenty lesního paliva (palivové modely) při vzniku nebo šíření požáru. Hlavní představa této dílčí studie byla potvrdit některá obecně známá fakta (např. Dimitrakopoulos 2002) a zjistit, jaká teplota je třeba ke vzplanutí daných segmentů paliva. Teplota žhnutí a vznícení pak byly „doplňkové“ veličiny. Výsledky potvrdily předpoklad (Dimitrakopoulos 2002), že traviny jsou materiálem, který nejrychleji ztratí svoji vlhkost a dokáže se tedy nejrychleji připravit na hoření a začít hořet. Množství tepla, které je tak třeba k zapálení tohoto materiálu (při úvaze stejné počáteční vlhkosti) je nižší než u ostatních segmentů paliva nebo typů segmentu vegetace.

Celý dílčí výzkum probíhal v úzké spolupráci s Technickým ústavem požární ochrany, kdy navržená metodika byla s kolegy z ústavu konzultována a samotné pilotní měření probíhalo v režii pracovníků s množstvím zkušeností při stanovování požárně technických charakteristik. Samotné pilotní výsledky (Tab. 12) jsou průměrem dvou kladných zkoušek zaokrouhlených na nejbližších 10 °C, stejně jako popisuje norma ČSN 64 0149 – Stanovení vznětlivosti materiálu. Metodické zpracování je popsáno v metodice práce v kapitole 4.6. Samotné měření bylo komplikované hlavně z důvodu vysokého procenta negativních zkoušek, kdy nedošlo ke vzplanutí vzorků (cca 80% neúspěšnost). V minulosti byly stanovovány některé požárně technické charakteristiky zejména pro dřevěný materiál (Svaz požární ochrany ČSSR 1990). U dalších materiálů šlo pak v našich podmínkách o prvotní stanovení. V našich očích byl tento dílčí výzkum další logickou skládačkou k pochopení lesního paliva a jeho schopnost ovlivňovat vznik a šíření lesního požáru.

#### **7.1.5 Rothermelův matematický model šíření pozemního lesního požáru**

Samotnému vývoji matematického modelu, který byl v roce 1972 publikován Richardem C. Rothermelem předcházela dlouhodobý výzkum, předávání zkušeností s lesními požáry, palivem a ucelenému chápání požárů v přírodním prostředí s nejrůznějšími pokusy, které daly vzniknout matematickým rovnicím a vztahům, které ve výsledku popisují rychlost šíření požáru (Rothermel 1972). Tento model by následně v drobných úpravách a rozšířeních doplněn v práci Franka Albinho (Albini 1976a). V průběhu práce s finálními výpočty a k hlubšímu pochopení celé kalkulace bylo evidentní, že model velmi citlivě reaguje na některé vstupní proměnné a správné fungování modelu neležící v naprosto dokonalé přesnosti množství

paliva a jeho produkci tepelné energie, ale v ostatních proměnných. Těmito proměnnými jsou zejména vlhkost paliva, a to jak živého, tak mrtvého (Andrews 2018). Právě toto nastavení velmi výrazně ovlivňuje hodnoty, které model produkuje. Je tedy evidentní, že hlavní snahou do budoucna bude větší pochopení a znalost právě vlhkosti mrtvého a živého paliva. Hodnoty živého paliva byly generovány na základě jednoduché tabulky 6, které byla na základě empirického pozorování přepracována pro účely použití v jednotlivých měsících, a to na základě prací (Burgan 1984; National Wildfire Coordinating Group 1989). V dalším výzkumu bude nutné ověřit, zda tyto hodnoty jsou nastaveny opravdu dobře nebo nutná korekce pro lepší výsledky modelových situací. Stejně tak by mohlo být předmětem výzkumu ověření stavu mezi vlhkostí pozemního paliva a vlhkostí vzduchu.

Není důležité, aby model dokonale přesně identifikoval velikost požáru, rychlost nebo intenzitu, ale aby dokázal spolehlivě rozpoznat podmínky prostředí, které mají potenciál produkovat vyšší intenzitu, agresivnější šíření než obvykle, to je zásadní úloha pro fungování modelu, identifikovat tento stav a doporučit velitelům zásahů rady, návody k úspěšnému řešení.

Je evidentní, že model vždy zůstane modelem a nedokáže dokonale přesně popsat prostor hoření (např. Arca et al. 2007). Model obecně předpokládá, že palivo, které vstupuje do procesu hoření je v prostoru rozmístěno rovnoměrně, nedokáže tedy předpovídat zvýšení intenzity požáru v některých místech nahromaděného paliva jako hromady kletu, terénní nerovnosti s nahromaděným opadem aj (Andrews 2018). Je opět na zkušenosti hasičů a osvojení si základních dovedností v oblasti dynamiky požáru, aby takovou situaci dokázali rozeznat a pracovat s ní (Lovell 2020). K tomuto účelu by měl sloužit jak kapesní průvodce, tak aplikace, které by o takových skutečnostech měly informovat a zasloužit se o to, že hasiči tyto věci budou mít na paměti.

### **7.1.6 Shrnutí metodických úvah**

Jak už bylo naznačeno v předchozí části diskuze, vývoj palivových modelů a následné kalkulace s využitím prací Rothermela (1972), Albinho (1976a) a dalších popisován v této práci byl živým organismem a živým organismem by měl nadále zůstat. Metodické postupy a úvahy jsou mixem nejrůznějších studií (Rothermel 1972; Deeming & Brown 1975; Albin 1976a; Anderson 1982; Brown 1982; Burgan 1984; Scott & Burgan 2005; Sedliak & Majlingová 2013; Szczygiel et al. 2016; Szczygiel et al. 2017; Majlingová et al. 2018 a mnoho dalších) s kombinací vlastních nápadů a poznatků, které byly získány a stále jsou získávány v rámci spolupráce s hasiči, v akademické sféře nebo vzájemnou diskuzí s kolegy



z nejrůznějších zemí světa. Při shrnutí je nutné konstatovat, že k získání vyčerpávajících informací o lesním palivu ve vztahu s lesními požáry na území České republiky nás čeká ještě dlouhá cesta. Studie však poskytuje velmi důležitý základ pro pochopení pozemního paliva lesních porostů v České republice a jeho potenciálního vlivu na lesní požár. Zároveň se jedná o důležitý odrazový můstek pro další rozšiřující a zpřesňující studie. Některé tyto možnosti dalšího rozšiřování palivových modelů nebo jejich aplikace do praxe jsou popisovány v další části diskuze.

## **7.2 Identifikované palivové modely**

### **7.2.1 Statistické zpracování**

Samotné definování palivových modelů vycházelo ze záměru udělat celý systém maximálně jednoduchý a aplikovatelný do různých směrů a identifikovatelný více metodami (kapitola 6.1). Následné přiřazování jednotlivých skupin kategorizovaných převládající dřevinou, stádiem porostu z hlediska problematiky lesních požárů a lesním typem je pak svědomitě statisticky podloženo pomocí hojně používaných statistických metod analýzy hlavních komponent (Pearson 1901; Hotelling 1933) a clusterové analýzy (Forgy 1965; MacQueen 1967). Hodnoty množství jednotlivých typů paliva v identifikovaných palivových modelech následně sloužili pro dopočítání některých požárních charakteristik těchto palivových modelů při univerzálním nastavení.

Je naprosto zásadní zmínit, že výzkum paliva a identifikování paliva probíhal v porostech hospodářských lesů, nelze je tedy v tuto chvíli využívat pro analýzy požárů v územích s jiným režimem obhospodařování, kde dochází k vyšší kumulaci paliva. Pro tyto účely bude nutné analyzovat prostředí a dopočítat korekce, což by mělo být úkolem dalšího výzkumu. Obzvláště není možné tyto palivové modely využít v tomto stavu pro analyzování požárů v porostech postihnutých větrnou nebo kůrovcovou kalamitou, kde leží množství stromů na povrchu lesní půdy (Berčák et al. 2023). K tomuto účelu je nutné parametrizovat množství tzv. 1000-hodinového a 10000-hodinového paliva, neboť 100-hodinové palivo je palivo s průměrem maximálně 7,60 cm (např. Albini 1976a; Anderson 1982), palivo větších rozměrů není v rámci standardních 53 palivových modelů uvažováno (Anderson 1982; Scott & Burgan 2005).

## 7.2.2 PM1 – Travniny

Prvním definovaným palivovým modelem je PM1 – Travniny. Jak už název napovídá, jedná se o palivový model, kdy na povrchu lesní půdy dominují právě traviny. Typicky se jedná o holiny vzniklé těžbou, ať už nahodilou nebo úmyslnou. Na těchto místech začnou poměrně rychle dominovat právě tyto zmiňované traviny, které zpravidla plochu zcela zaplní (Berčák et al. 2023). Mimo tyto plochy se palivový model ještě může vyskytovat ve velmi prosvětlených starých porostech (Obr. 46). Vzhledem k množství jemného paliva, kterým traviny bezesporu jsou je tento palivový model možné velmi snadné zapálit (Dimitrakopoulos 2002), jak potvrzují i výsledky analýzy teploty vzplanutí. To vše umocňuje i fakt, že se často tento palivový model nachází na otevřené ploše, kde dochází k intenzivnímu dopadu slunečných paprsků na povrch, což zrychluje a zintenzivňuje prosychání daného stanoviště (Byram 1943). Právě na tomto palivovém modelu vzniká a bude vznikat lesní požár nejčastěji (např. Cumming 2001; Nunes et al. 2005; Bajocco & Ricotta 2008).



Obr. 46: Ukázka typického prostředí s výskytem palivového modelu PM1 – Travniny.

Tuto skutečnost mimo jiné potvrzuje i to, že většina lesních požárů větších rozměrů, které byla vytipována pro validaci modelu šíření lesního požáru zahořela právě na odlesněných kalamitních plochách s výraznou dominancí travin. Je tedy logické, že se z důvodu kůrovcové kalamity se od roku 2018 výrazně zvýšil počet lesních požárů (Statistická ročenka 2022). Očekáváme, že tento rychle narůstající trend v budoucích letech zpomalí, a to s ohledem na to, že odlesněné kalamitní plochy budou postupně zarůstat novou generací porostů, které dříve nebo později povrch lesní půdy zakryjí svými korunami, dojde tedy k redukci travin na ploše a ke zvýšení vlhkosti povrchu půdy, což povede ke snížení zapalitelnosti tohoto prostředí (Berčák et al. 2023). V horizontu příštích let tedy očekáváme spíše mírný nárůst počtu lesních požárů, nikoliv „drastický“ jak tomu bylo při porovnání období před kůrovcovou kalamitou a po jejím vypuknutí (Statistická ročenka 2022).

V průběhu ročního období se pro tento palivový model jeví jako nejrizikovější v období časného jara. V případě mírné (suché) zimy v kombinaci s vyššími teplotami a suchem na začátku jara jsou lesní porosty s dominancí tohoto palivového modelu velmi snadno zapalitelné. Druhým mimořádně kritickým obdobím bude druhá polovina léta, kdy traviny výrazně zasychají z důvodu velmi teplého počasí (Berčák et al. 2023). Obecně lze však říci, že kdykoliv se objeví delší periody sucha a vysokých teplot, tak se tato skutečnost velmi rychle projeví v nejjemnějším materiálu jako v travinách (Burgan 1984), tedy velmi rizikové období mohou nastávat prakticky kdykoliv a kdekoliv, pokud tomu v delším časovém období napomáhají meteorologické podmínky (Možný et al. 2020).

Požární charakteristiky ukazují na poměrně rychlé šíření požáru 3,96 m/min v základním nastavení, viz metodika. Tuto poměrně vysokou rychlost však doprovází nízká intenzita požáru s hodnotou 70,89 kWm<sup>-1</sup>. Jedná se o druhou nejvyšší rychlost v rámci palivových modelů a zároveň nejnižší intenzitu. Je však nutné brát zřetel na to, že tento palivový model se vyskytuje na holinách nebo velmi prosvětlených porostech. Zejména tak na holinách bude docházet k mnohem intenzivnějšímu vanutí větru než v jiných částech lesního porostu (Vicena et al. 1979), což bude mít vliv na rychlejší šíření požáru (Thomas & McAlpine 2010), a lze tedy předpokládat, že šíření požáru v tomto prostředí bude nejrychlejší ze všech. Intenzita požáru však zůstane pravděpodobně poměrně malá v závislosti na míře zaschnutí živého materiálu a schopnosti vstupovat do procesu hoření (Andrews 2018). To v konečném důsledku bude znamenat to, že požár se bude rychle šířit, ale bude také poměrně snadné je zastavit. V případě dostatečného množství sil a prostředků nebude tento požár představovat výraznější problém pro hasičské jednotky, pokud nedojde k extrémnímu zakouření prostoru a také pokud bude možné rozvinout hasičský útok v dostatečné vzdálenosti před frontou požáru (Pecl et al. 2021).

Při srovnání s palivovými modely od Scott & Burgan (2005), kteří původní palivové modely (Rothermel 1972; Albini 1976a) vstupující do Rothermelova matematického modelu šíření pozemního požáru rozpracovali z původních 11, resp. 13 na celkově 40 zjišťujeme, že žádný z uvedených palivových modelů neodpovídá hodnotám, které odpovídají palivovému modelu PM1 – Traviny. Nejvíce se z těchto palivových modelů přibližuje GR5 „Low load, humid climate grass“ (Tab. 37). Nicméně tento palivový model zcela opomíjí 10-hodinové palivo, hodnota 1-hodinového paliva je nižší zhruba o třetinu nižší, naopak hodnota živých bylin zase o něco vyšší. Kompletní hodnoty palivových modelů definovaných Scott & Burgenem (2005) naleznete v příloze č. 1.

Tabulka 37: Srovnání vybraných palivových modelů Scott & Burgan (2005) s palivovým modelem PM1-Traviny; hodnoty jsou uváděny v jednotkách angloamerické soustavy – tuny na akr (t/ac) a stopy (ft).

Palivový model	1-h palivo (t/ac)	10-h palivo (t/ac)	100-h palivo (t/ac)	Živé byliny (t/ac)	Živé dřevo (t/ac)	Výška paliva (ft)
PM1 - Traviny	0,62	0,29	0,03	2,24	0,07	1,36
GR4	0,25	0,00	0,00	1,90	0,00	2,00
GR5	0,40	0,00	0,00	2,50	0,00	1,50

### 7.2.3 PM2 – Byliny, mechy

Palivový model PM2 – Byliny a mechy jsou taktéž palivovým modelem, kde dominuje vegetace na povrchu lesní půdy, v tomto případě jsou to však zmiňované byliny a mechy. Podmínky pro vznik tohoto palivového modelu se nacházejí zejména v borových porostech, tedy na stanovištích, kde se typicky v České republice borové porosty vyskytují, což jsou stanoviště s písčitymi půdami (Plíva 1987). Z toho důvodu je evidentní, že může být tento model identifikovaný i v dubových porostech, které na těchto písčitých stanovištích borové porosty často doprovázejí. Vzhledem k předpokladu výskytu na písčitých stanovištích lze očekávat, že tyto stanoviště budou častěji prosychat (Plíva 1987) (Obr. 47).



Obr. 47: Ukázka typického prostředí s výskytem palivového modelu PM2 – Byliny, mechy.

Při úvahách náchylnosti k zapalitelnosti prostředí je nutné zmínit, že i byliny a mechy mají poměrně nízkou teplotu vzplanutí. Nicméně mechy v sobě dokáží efektivněji zadržovat vodu (Heijmans et al. 2004) a byliny příliš nezasychají v průběhu vegetační sezóny (Eziz et al. 2017). Část druhů bylin také v průběhu mimo vegetační sezónu z povrchu lesní půdy zcela



zmizí, což vede k drobné redukci dostupného paliva. Z výše uvedeného se snažíme naznačit, že zapalitelnost tohoto prostřední je nižší než v případě palivového modelu PM1, který považujeme za model, kde vznikne lesní požár nejspíše. Nejrizikovějším obdobím v průběhu roku bude teplé a suché léto, kdy dojde k výraznému proschnutí mechů na daných stanovištích (Koelemeijer et al. 2023). Právě mechy celému palivovému modelu dominují, kdy reprezentují cca 75 % segmentu vegetace v daném palivovém modelu.

Dopočítáním požárních charakteristik tohoto modelu bylo zjištěno, že tento palivový model má schopnost produkovat nejvyšší intenzitu požáru, a to 597,74 kWm<sup>-1</sup> v základním nastavení při rychlosti 2,55 m/min. Z toho lze usuzovat, že při vysokém proschnutí paliva na povrchu půdy může docházet v tomto prostředí i požárům, která mohou být v podmínkách běžného obhospodařovaného lesa ty nejsložitější. Nicméně i s ohledem na výše uvedenou schopnost mechů zadržovat větší množství vody (Heijmans et al. 2004) budou tyto podmínky pro vyšší intenzitu požárů vznikat mnohem pomaleji než například u palivového modelu PM1. Tím však nelze snižovat skutečnost, že borové porosty na písčitéch stanovištích mohou představovat pro hasiče největší výzvu při hašení požáru v běžně obhospodařovaném porostu.

V rámci srovnání s existujícími palivovými modely definovaných pro podmínky USA se opětovně velmi těžko hledalo srovnání nejen co se týče množství, ale i vizuálních charakteristik stanovišť s palivovým modelem PM2 – Byliny, mechy. Je tedy nutné říct, že tento palivový model nelze nahradit univerzálním modelem od Scott & Burgan (2005) (Tab. 38).

*Tabulka 38: Srovnání vybraných palivových modelů Scott & Burgan (2005) s palivovým modelem PM2-Byliny, mechy; hodnoty jsou uváděny v jednotkách angloamerické soustavy – tuny na akr (t/ac) a stopy (ft).*

Palivový model	1-h palivo (t/ac)	10-h palivo (t/ac)	100-h palivo (t/ac)	Živé byliny (t/ac)	Živé dřevo (t/ac)	Výška paliva (ft)
PM2 - Byliny, mechy	1,24	0,91	0,10	3,58	0,04	0,98
GS4	1,90	0,30	0,10	3,40	7,10	2,10
SH2	1,35	2,40	0,75	0,00	3,85	1,50

#### 7.2.4 PM3 – Hrabanka

Třetím palivovým modelem jsou prostory lesních porostů s dominancí běžného opadu, hrabanky, tedy jehličí a listí na povrchu lesní půdy, jedná se o palivový model PM3 – Hrabanka. Pro tento palivový model jsou typickými stanoviště smrkové monokultury, které jsou zpravidla

tmavšího charakteru s minimem vegetace na povrchu. Stejnou charakteristiku vykazovaly některé dubové porosty, které jsou v tomto palivovém modelu taktéž zahrnuty. Zpravidla se jedná o porosty středního až dospělého věku. V tomto palivovém modelu dominuje právě opad a hrabanka, které doprovází drobný dřevěný materiál z okolních vzrostlých stromů (Obr. 48).



*Obr. 48: Ukázka typického prostředí s výskytem palivového modelu PM3 – Hrabanka.*

V rámci sezóny budou tyto porosty nejvíce náchylné k zapálení v průběhu dlouhodobého sucha a vysokých teplot (Berčák et al. 2024), tedy převážně v letním období (Trnka et al. 2021). Zapálit hrabanku nebo opad je však výrazněji složitější než v případě travin (Prior et al. 2017), z toho důvodu bude třeba výraznějšího tepelného zdroje pro zapálení požáru v tomto lesa. Tomu odpovídají i vyšší hodnoty vzplanutí než v případě travin (360-370 °C). Ze studie Kim et al. 2023 vyplývá, že povrch pokrytý jehličnatou hrabankou ve srovnání s listnatým opadem má srovnatelnou schopnost vsaku vody, vyšší schopnost retence vody a nižší evaporaci. Z toho lze predikovat, že častěji v tomto palivovém modelu nastanou podmínky pro možný vznik požáru spíše v listnatých porostech, navzdory obecně uznávanému názoru. V tomto případě však nejsou uvažovány světelné podmínky v porostu, které mohou hrát zásadní roli při vysychání povrchu lesní půdy (Byram 1943). Vzájemná odlišnost vlastností jehličnaté hrabanky a listnatého by měla být předmětem dalšího výzkumu, který by mohl případně doporučit rozdělení palivového modelu PM3-Hrabanka na jehličnatou a listnatou variantu.

Požární charakteristiky v základním nastavení ukázaly rychlost šíření požáru 2,08 metrů za minutu s intenzitou 327,00 kWm<sup>-1</sup>. Intenzita požáru je zhruba na střední hodnotě mezi nejvyšší predikovanou intenzitou v palivovém modelu PM2 a nejnižší v palivovém modelu PM1. Číslo však opětovně reprezentuje poměrně nízkou hodnotu intenzity požáru (Tedim et al.

2018). Rychlost šíření požáru je poměrně malá, to je způsobeno minimem dostupnosti jemného paliva ve formě vegetace, kolem které díky její výšce mnohem efektivněji proudí vzduch a přehřívá tak toto palivo. U hrabanky a opadu díky nízké výšce „mocnosti“ probíhá tento proces výrazně pomaleji (Nelson 2001).

Při srovnání s palivovými modely od Scott & Burgan (2005) opětovně velmi těžko nacházíme srovnatelné hodnoty. Nejbližší tomuto modelu je asi palivový model TL6, co se týče vizuálního charakteru stanoviště, tak pravděpodobně TL8. Oba palivové modely i další vykazují velmi výrazné odchylky od palivového modelu PM3-Hrabanka (Tab. 39).

*Tabulka 39: Srovnání vybraných palivových modelů Scott & Burgan (2005) s palivovým modelem PM3-Hrabanka; hodnoty jsou uváděny v jednotkách angloamerické soustavy – tony na akr (t/ac) a stopy (ft).*

Palivový model	1-h palivo (t/ac)	10-h palivo (t/ac)	100-h palivo (t/ac)	Živé byliny (t/ac)	Živé dřevo (t/ac)	Výška paliva (ft)
PM3 - Hrabanka	1,91	1,43	0,16	0,50	0,07	0,85
TL6	2,40	1,20	1,20	0,00	0,00	0,30
TU2	0,95	1,80	1,25	0,00	0,20	1,00
TL8	5,80	1,40	1,10	0,00	0,00	0,30

### 7.2.5 PM4 – Neutrální

Poslední identifikovaný palivový model PM4-Neutrální reprezentuje stanoviště, kde nedominují žádné z výše uvedených segmentů pozemního paliva. Nejčastěji se jedná o stanoviště zapojených smrkových porostů a také listnaté porosty středního a vyššího věku nebo oglejená stanoviště starších smrkových porostů (Obr. 49).



*Obr. 49: Ukázka typického prostředí s výskytem palivového modelu PM4 – Neutrální.*



U tohoto palivového modelu je předpoklad vyšší vlhkosti paliva a menší pravděpodobnosti extrémního vysychání. U mladších smrkových porostů je to způsobeno zapojením prostoru a celkově nízkým dopadem slunečních paprsků na povrch půdy, tyto porosty jsou velmi tmavé a dokážou v sobě držet vlhkost mnohem déle (Byram 1943). Tyto mladší porosty budou pak v extrémních suchých podmínkách zranitelné na případné korunové požáry (Alvarez et al. 2012; Hevia et al. 2018). Z vlastních zkušeností a pozorování víme, že prozatím většinou v těchto porostech jsou podmínky takové, že se v nich požár výrazněji nešíří a spíše vyhasíná (Berčák pers.). I z tohoto důvodu lze říct, že v takovém prostředí bude požár velmi špatně vznikat a náchylnost na vznik požáru tedy bude nízká (Sun et al. 2018). V případě listnatých porostů středního a vyššího věku dochází k rychlejšímu prosychání opadu (Kim et al. 2023) a v porovnání s mladými zapojenými jehličnatými porosty je logické, že v takových porostech vzniknou podmínky velmi příhodné pro vznik požáru častěji. Je tedy nutné pamatovat na to, že informace o množství paliva a spalného tepla je pouze část vstupních dat do modelu a až vstupní údaje o vlhkosti paliva, meteorologická a topografická situace finálně definují požární charakteristiky daného paliva v daném palivovém modelu (Andrews 2018).

Tyto požární charakteristiky v základním nastavení modelů ukazovaly u PM4 hodnotu rychlosti šíření požáru 5,41 m/min což je nejvyšší hodnota, která byla na identifikovaných modelech stanovena. Vysokou rychlost šíření lze přisuzovat zejména určitému zastoupení travin na ploše, kterých není v prostoru moc, a tudíž jejich přehřívání (cirkulace vzduchu kolem) může být efektivnější (Nelson 2001) než v případě palivového modelu PM1, zároveň přítomná hrabanka a drobné dřevo dodává dostatečné množství tepla do procesu hoření a tím celý proces přehřívání ještě zefektivňuje (Prior et al. 2017). Opětovně však musíme mít na paměti, že jsme uvnitř lesa, což bude ovlivňovat vanutí větru v daných porostech (Vicena et al. 1979). Intenzita hoření tohoto palivového modelu je druhou nejvyšší, ale zároveň výrazněji nižší než u palivového modelu PM2 – Byliny, mechy, a to 414,60 kWm<sup>-1</sup>. Zároveň tento výsledek poukazuje na skutečnost, že listnaté lesy středního a vyššího věku mohou produkovat intenzivnější požáry než smrkové porosty stejného stáří. Tedy do budoucna určitý předpoklad toho, že klidně můžeme být svědky intenzivnějších požárů, a to pouze při úvahách srovnání dřevinné skladby.

Při srovnávání s palivovými modely (Tab. 40) podle Scott & Burgan (2005) zjišťujeme, že opětovně není možné najít v nabídce modelů ten, který by se dokázal výrazněji srovnávat s palivovým modelem PM4-Neutrální. Zejména je evidentní, že tyto srovnávané palivové modely obsahují mnohem více živého dřeva. Přítomnost náletů/nárostů nebo křovin v tomto palivovém modelu je spíše výjimkou. Obecně křoviny jsou v našich hospodářských lesích spíše

výjimkou a objevují se zpravidla na krajích porostů, kde mají dostatek světla pro svoji existenci. Palivový model SH4 je palivovým modelem pro stanoviště porostlé keři (Scott & Burgan 2005).

*Tabulka 40: Srovnání vybraných palivových modelů Scott & Burgan (2005) s palivovým modelem PM4-Neutrální; hodnoty jsou uváděny v jednotkách angloamerické soustavy – tony na akr (t/ac) a stopy (ft).*

Palivový model	1-h palivo (t/ac)	10-h palivo (t/ac)	100-h palivo (t/ac)	Živé byliny (t/ac)	Živé dřevo (t/ac)	Výška paliva (ft)
PM4 - Neutrální	0,91	0,62	0,07	0,86	0,04	1,23
TU3	1,10	0,15	0,25	0,65	1,10	1,30
SH4	0,85	1,15	0,20	0,00	2,55	3,00

## 7.2.6 Shrnutí

Je evidentní, že palivové modely pro hospodářské lesy České republiky jsou výrazně odlišné svými hodnotami a vzhledem oproti modelům, které jsou v různých softwarech standardně využívány a stojí na pracích Rothermel (1972), Albini (1976a), Anderson 1982 a Scott & Burgan (2005). Jen velmi těžko se hledají v nabídce palivových modelů srovnatelné s modely identifikovanými na území České republiky v rámci této dizertační práce. Jaká je pak rozdílnost v kalkulacích požárních charakteristik může být předmětem dalšího výzkumu. Z výsledků však vyplývá, že používání palivových modelů Scott & Burgan (2005) pro analýzy požáru ve střední Evropě je minimálně diskutabilní. Dobrou zprávou je, že většina software však dokáže pracovat s upravenými hodnotami vstupních dat do palivových modelů (Sullivan 2009c; Andrews 2018), tudíž korekce a přiblížení se stavu pro podmínky střední Evropy je velice snadné a dostupné.

Při stanovování charakteristik lesního požáru bude vždy záviset nejen na faktoru paliva, ale také na faktorech topografických a meteorologických. Šíření požáru je vždy kombinací těchto faktorů a opomíjejí některého z nich je zásadní chybou (Thomas & McAlpine 2010). Nelze tedy univerzálně říct, že jeden model je horší než ten druhý aj. Každý z uvedených palivových modelů má svoje specifika, které je nutné mít na zřetel, pokud s těmito palivovými modely a produkty vzniklými na bázi těchto modelů pracují. Některý model drží více vody, druhý ji zase rychleji ztrácí, v jednom dochází k rychlejšímu vanutí větru než v jiném. Celkově je však nutné říct, že stanovená intenzita požáru, rychlost šíření požáru bude v drtivé většině případů na té nejnižší úrovni při srovnání s prací Tedim et al. (2018) (Tab. 41) a tedy, že požáry

v hospodářských lesích České republiky v současnosti zpravidla nejsou výraznější hrozbou pro hasiče i okolí

*Tabulka 41: Klasifikace požárů v přírodním prostředí a základní požární charakteristiky (upraveno podle Tedim et al. 2018).*

Kategorie požáru	Intenzita fronty požáru (kW/m)	Rychlost šíření (m/min)	Délka plamene (m)	Aktivita bodových požárů	Vzdálenost bodových požárů (m)	Popis
1	do 500	do 5	do 1,5	bez přítomnosti	0	Pozemní požár, snadná kontrola.
2	500-2000	do 15	do 2,5	nízká	do 100	Pozemní požár, obtížnější kontrola.
3	2000-4000	do 20	2,5-3,5	vyšoká	nad 100	Pozemní požár, možné ohoření stromů, zapálení individuálních stromů, náročná kontrola.
4	4000-10000	do 50	3,5-10	významná	500-1000	Pozemní požár, korunový požár závislý na typu vegetace, extrémně náročná kontrola.
5	10000-30000	do 150	X.50	významná	nad 1000	Korunový požár poháněný větrem, bodové požáry hrají významnou roli při šíření, požár může skokově překonávat velké požární pásy a překážky, chaotické a nepředvídatelné šíření požáru, hašení prakticky nemožné.
6	30000-100000	do 300	50-100	masivní	nad 2000	Požáry vytvářející si vlastní podmínky, vysoce turbulentní požáry, bodové požáry na velkou vzdálenost, požár může skokově překonávat velké požární pásy a překážky, nemožná kontrola a hašení.
7	více než 100000	nad 300	více než 100	masivní	nad 5000	Požáry vytvářející si vlastní podmínky, vysoce turbulentní požáry, ohňové bouře, hoření celého prostoru, masivní bodové požáry, nehasitelný požár.

Je nutné mít na paměti, že pokud bude docházet k výraznějšímu navyšování například mrtvého dřeva v lesních porostech (Dodge 1972), prohlubující se ztrátě vlhkosti v lesních porostech a k extrémnějším projevům počasí (Trnka et al. 2021), můžeme začít být svědky intenzivnějších a složitější zvládatelných požárů i v hospodářských lesích (Berčák et al. 2023).

Je také dobré si uvědomit, že například současný preferovaný směr lesního hospodářství v podobě porostů s velkým množstvím druhů s výrazně rozrůzněnou věkovou strukturou může vést do budoucna k většímu výskytu tzv. „ladder fuels“ – žebříkového paliva (Bracmort 2013), což může v kombinaci s výše uvedeným znamenat větší výskyt korunových požárů (Kramer et al. 2014). Nicméně struktura porostu s rozrůzněnou věkovou strukturou a minimalizace holin zase povede k úbytku snadno zapalitelného modelu PM1, k pomalejšímu vysychání povrchu lesní půdy (Byram 1943), tedy menší náchylnosti vzniku požáru (Ellis et al. 2022). Je třeba neustále tyto nejrůznější aspekty lesního hospodářství zvažovat a ideálně tuto informaci

vštěpovat do znalostí hasičských jednotek (Eriksen & Prior 2011). I z tohoto důvodu považujeme za naprosto zásadní znalost, potřebnou pro práci v sektoru protipožární ochrany lesa, právě znalost lesa a lesního hospodářství.

### 7.3 Způsoby identifikace palivových modelů

Jak správně palivové modely identifikovat? Tato otázka nabývá na významu v okamžiku, kdy uvažujete potenciální využití výsledků výzkumů v praxi. Svět geografických informačních systémů postupuje rychlým tempem vpřed (ESRI 2021) a možnosti využívání nejrůznějších informací (vrstev) plynoucích právě z geografických informačních systémů je jednou z možností, jak identifikovat palivový model ještě před příjezdem na požářiště. Považujeme za důležité, aby velitel zásahu dokázal s předstihem analyzovat, co v daném prostoru může očekávat a již během příjezdu na místo události disponoval určitým množstvím informací, které by mu mohly být užitečné při zvolení taktiky zdolávání požáru (Duff & Tolhurst 2015).

Je více než adekvátní, aby hasičské sbory disponovaly vyčerpávajícím množstvím informací o prostoru, do kterého vjíždějí vykonávat svoji činnost (Duff & Tolhurst 2015). Z tohoto důvodu jsme přesvědčeni, že tyto dostupné informace by měly být sborům poskytovány a cíleně verifikovány a aktualizovány v rámci dlouhodobé spolupráce mezi správci těchto dat a hasičským sborem. Zároveň si uvědomujeme, že operační a informační středisko nemusí při přijetí události dostat přesnou informaci o místě požáru, tedy i identifikace palivového modelu by mohla být zkreslená. Pokud si však velitel zásahu osvojí základní parametry palivových modelů, tak pouhým pohledem na ortofoto mapu s doplněním několika vrstev může velice dobře tušit, co ho na místě zásahu čeká a jaké je situace v širším okolí bez ohledu na to, že pravděpodobně nemá přesnou informaci o místě požáru (Berčák pers.).

Po příjezdu na požářiště by pak v rámci běžně prováděného rychlého průzkumu mohlo dojít k případné korekci palivového modelu na základě vizuálních charakteristik nebo upřesnění místa mimořádné události. V tomto okamžiku by již mohl pracovat s nástroji, které jsou níže popisovány, pokud to bude povaha mimořádné události vyžadovat. K účelu identifikace palivových modelů pomocí vizuálních charakteristik by měl být vytvořen jednoduchý identifikační klíč.

Již samotné názvy palivových modelů mají určitým způsobem napovědět. V případě, že na stanovišti naprosto dominují traviny, tak se bude jednat o PM1-Traviny. Pokud dominují byliny a zejména mechy a zároveň jsem v borovém lese = PM2-Byliny, mechy. V případě, že se na stanovišti nachází převážně hrabanka a jsem ve smrkovém lese středního a vyššího věku = PM3 – Hrabanka. A pokud se nacházím v listnatém dospělém lese, který disponuje tak nějak

od každého segmentu paliva něco, budu model identifikovat jako PM4-Neutrální. Tedy již názvy modelů mají pomoci identifikaci.

Pro účely výzkumu a zpětných analýz je možné mnohem detailněji zkoumat a identifikovat palivový model. Jak již bylo zmíněno v úvodu diskuze, identifikace palivových modelů byla získána statistickými výpočty, a to seskupením různých skupin identifikovaných na základě převládající dřeviny, stádia z hlediska problematiky lesních požárů a lesního typu. Disponujeme tedy i daty pro tyto jednotlivé skupiny, které můžou v určitých případech nahrazovat hodnoty pro 4 definované palivové modely. To však celou situaci komplikuje, proto tento způsob využití lze aplikovat spíše ve vědecké sféře ve zpětných analýzách požárů. Lze si představit, že tato informace by mohla být promítnuta i v některých vrstvách GIS, při znalosti aktuálních lesnických dat.

#### **7.4 Validace na reálných požářištích**

Funkčnost celého modelu a míra správnosti predikovaných dat byla ověřována zpětnou analýzou požářišť, které vznikly v období roku 2023. K tomuto účelu byla získána veškerá dostupná data o jednotlivých požárech, přes informace, kterými disponují hasiči, meteorologické proměnné až po topografické proměnné. Již při sběru těchto dat bylo evidentní, že je množství věcí, které by bylo možné zlepšit pro účely přesnější identifikaci sbíraných dat.

Za jednu z největších slabin považujeme velikost požáru identifikovanou hasičskými sbory. Při výběru požárů k validaci byly vybrány větší lesní požáry. Podle oficiální statistik měly být tyto požáry o rozměrech 0,5-8,0 hektaru s mediánem na 1,5 hektarech. Po terénní rekognoskaci vybraných stanovišť, zaznamenání přesných perimetrů požárů se však tyto vybrané požáry pohybovaly ve velikostech od 0,08 hektaru do 0,88 hektaru s mediánem 0,52 hektaru. Z toho lze usuzovat, že plochy lesních požárů jsou výrazně nadhodnoceny. Plocha požáru se pravděpodobně stanovuje odhadem délky a šířky požáru a jednoduchým násobením těchto hodnot.

Informace o velikosti lesního požáru se může zdát jako nezajímavá a vysoká odchylka nepodstatná. Nicméně je třeba si uvědomit, že během požáru v roce 2022 v Národním parku České Švýcarsko (Pronto et al. 2023) se zjistilo množství nedostatků v oblasti protipožární ochrany lesa (Ošlejšek 2022) a současnou aktivitou se zodpovědné osoby tyto nedostatky snaží odstranit nastavením ucelených pravidel pro rozvoj protipožární ochrany na území České republiky (Berčák pers.). Spoustu těchto pravidel v oblasti prevence a připravenosti mj. odvíjí i od historických požárů, jejich velikostí, počtů, míst vzniku (Casartelli & Mysiak 2023). Pokud tedy budeme dostávat chybné informace v oblasti dokumentování požáru, povede to k chybným

rozhodnutím při zavedení pravidel v oblasti protipožární ochrany lesa. Proto je zde zcela zásadní sbírat a poskytovat co nejlepší a snadno využitelné informace o lesních požárech a požárech v přírodním prostředí také mj. pro budoucí správné nastavení požadavků a povinností v rámci protipožární ochrany lesa. Z toho důvodu je nutné přemýšlet, zda by informace o lesních požárech neměly být sbírány efektivnějším způsobem než doposud. Mnohá opatření v souvislosti s boji proti lesním požárům v minulosti existovaly (např. požární plány). Zpravidla byly součástí rezortních předpisů, směrnic, které vycházeli do roku 1990 (např. Směrnice MLVH SSR č. j. 730/110-77 1974). Změnami, které doprovázely období po roce 1989 a následně rozdělením Československa se na tyto opatření pozapomnělo a až v souvislosti s požárem v Národním parku České Švýcarsko probíhá snaha o obnovení podobných principů a opatření.

Na místě požáru jsou často přítomny jednotky sboru dobrovolných hasičů, kteří slouží jako záloha, případně pro foto a videodokumentaci požáru. Tyto jednotky by ideálně měly posbírat dobré informace o požáru, rozšiřující balík informací identifikovaných ve zprávě o zásahu (v rámci Statistického sledování událostí (Pokyn č. 10/2006 2006)). Je vizi budoucnosti vytvořit jednoduchý formulář, co by mohl hasič v oblasti lesních požárů hodnotit a také vytvořit dostatečně jednoduchý klíč pro toto hodnocení. Pro účely velikosti požáru je třeba využít jednoduchých aplikací, které sledují GPS signál a obejdí s tímto zařízením perimetr požářiště. V mém případě jsem pro účely této analýzy využíval aplikaci MapItGIS, volně dostupnou v chytrých telefonech s OS Android (MapitGIS 2024) (Obr. 50).



*Obr. 50: Ukázka aplikace MapitGIS využívaná pro identifikaci perimetru reálných požářišť (MapitGIS 2024).*

Samozřejmě chápeme, že některé informace o mimořádných událostech a celý systém statistického sledování událostí stojí na určitém právním základu (Pokyn č. 10/2006 2006). Nejjednodušší by tedy bylo, kdyby takové informace byly sbírány hasičskými jednotkami dobrovolně, k čemuž je třeba vytvořit podmínky ve spolupráci s Generálním ředitelstvím Hasičského záchranného sboru České republiky. Je jasné, že lesní požáry budou vždy disciplínou, která je určitým způsobem trochu specifická oproti jiným činnostem, při kterých nám hasiči pomáhají. Víze, se kterou pracujeme je vytvořit aplikaci, která by disponovala různými nástroji v oblasti protipožární ochrany lesa. Více o těchto myšlenkách vývoje aplikace jsou rozvedeny v dalších kapitolách diskuze.

Co se týče času a délky volného rozvoje požáru, která je naprosto zásadní pro stanovení požárních charakteristik. Vznik požáru byl uvažován 5 minut před oznámením, a to s ohledem na množství pohybu lidí v našich lesích. Došli jsme tedy k závěru, že průměrná doba 5 minut od vzniku po oznámení může být adekvátní. Druhou neznámou bylo období, kdy se požár přestal volně rozvíjet a začal být ovlivňován hasebními pracemi. Pro tyto účely jsme v původních úvahách chtěli využít čas tzv. lokalizace požáru, který je běžně uvádět ve zprávách o zásahu (Pokyn č. 10/2006 2006). Nicméně jsme narazili na problém, že je složité tuto informaci k účelům validace využít. V jednom případě byla lokalizace požáru ještě před rozvinutím bojových proudů, v jiném případě to bylo po asi 3 hodinách od rozvinutí bojového proudu u požáru velikosti cca 0,5 hektaru, což výrazně snížilo naši důvěru ve správnost této informace. Z výše uvedeného jsme se rozhodli, že za konec volného rozvoje požáru budeme považovat dobu po uplynutí 10 minut po rozvinutí prvních útočných proudů. Je jasné, že v případě těchto malých požárů začali hasiči svojí hasební činností ihned ovlivňovat větší část fronty požáru, proto jsme zvolili tento způsob identifikace délky volného rozvoje požáru. Tento přístup nám dal poměrně konstantní dobu volného rozvoje požáru. Je jasné, že tímto způsobem nemůžeme postupovat u větších lesních požárů, kde požár není delší dobu pod kontrolou. Do budoucna tedy musíme hledat cesty, jak efektivně zvolit dobu volného rozvoje požáru. Opětovně v tomto slova smyslu je důležité dobrá statistika z požárů, tedy pokud znám období od nahlášení po lokalizaci a mám přesné informace o daných požárech, můžu statistickými metodami analyzovat průměrné doby volného rozvoje na základě různých charakteristik požáru. Tento přístup by pak mohl být využíván a analyzování velkého množství požárů, které by následně dokázaly vylepšovat parametry modelů a různých dalších nástrojů, které by pro účely lesních požárů mohly vzniknout (Morvan 2020).

Další proměnnou, na které je nutné do budoucna pracovat jsou vlhkosti paliva ať už živého nebo mrtvého. Právě vliv vlhkosti paliva je zásadní pro přesné stanovení požárních



charakteristik (Nelson 2001; Jurdao et al. 2012). Další výzkum v oblasti vlhkosti živého paliva v rámci ročních období, míra převodu živého paliva na mrtvé (Andrews 2018) míra úbytku mimo vegetační sezónu je určitě úkol, na kterém musíme dále pracovat. Stejně tak musí být ověřeno, zda přepočítání vlhkosti vzduchu na vlhkost mrtvého paliva (tab. 4) je možné plně využívat i pro naše podmínky, nebo budou nutné korekce i v tomto směru. Informací o palivu, jeho vlhkost se dlouhodobě zabývá CzechGlobe (Firerisk 2024) a ČHMÚ (ČHMÚ 2024), kteří vlastní již poměrně rozvinutou síť meteorologických stanic k tomuto účelu.

Meteorologická data byla získána z nejbližších meteorologických stanic, což je běžně používaný přístup a nelze říct, že by byl špatný. Vždy záleží na velikosti této sítě meteorologických stanic, protože je evidentní, že čím blíže meteorologická stanice je, tím věrněji poskytuje informace o meteorologické situaci. Hasiči jistě disponují množstvím informací o počasí, které získávají od ČHMÚ nebo ze svých zařízení umístěných na automobilech, ale existují také nástroje, které tuto informaci můžou ještě vylepšit.

Pro zlepšení představy dané situace nebo pro účely zjišťování parametrů požárů v budoucím kapesním průvodci nebo aplikaci by mohl posloužit přístroj, který je často využíván hasebními jednotkami v zahraničí. Jedná se kapesní meteostanice, např. Kestrel 3000 Pocket Wind Meter (Vallfirest, 2024) (Obr. 51). Toto zařízení dokáže identifikovat informace o vlhkosti vzduchu, teplotě vzduchu a rychlosti větru. Existují zařízení vyšších řad, které poskytnou ještě více informací. Nicméně pro naše účely je nutné znát lokální rychlost větru, vlhkost vzduchu a jsme velmi dobře schopni identifikovat vlastnosti požáru (Rothermel 1972). V budoucnu by se tak mohlo stát toto zařízení běžnou výbavou hasebních jednotek, protože může poskytovat množství velmi důležitých informací při zdolávání lesního požáru.



*Obr. 51: Kapesní meteorologická stanice Kestrel 3000 Pocket Wind Meter (Vallfirest, 2024).*

Pro vývoj různých nástrojů, strojů a pomůcek pro zdolávání lesních požárů je dobré sledovat firmu Vallfirest (Vallfirest, 2024), která patří k předním výrobcům vybavení pro zdolávání lesních požárů na celém světě.

Při srovnávání výsledků velikosti požárů predikovaných modelem v porovnání se skutečnou velikostí identifikovanou v rámci terénního průzkumu byla hodnota Pearsonova korelačního koeficientu  $r=0,7813$  a koeficient determinace  $r^2=0,6104$ . Tyto prvotní výsledky považujeme za poměrně uspokojivé a poukazují na to, že celý proces vývoje palivových modelů a následná validace jde správným směrem. Je evidentní, že model může pracovat ještě lépe a jen dalším výzkumem a prací můžeme dosáhnout ještě lepších výsledků, prozatím však výsledky působí velice slibně a dodávají nám množství optimismu pro další vývoj. Další výzkum by se měl zaměřit především na hodnoty vlhkosti paliva, a to jak živého, tak mrtvého nebo metody, jak správně stanovit délku volného rozvoje požáru. Celý systém by měl zůstat pružný, aby základní nastavení bylo možné velice snadno měnit.

Dalším velkým úkolem je pak všechny tyto výsledky přenést do praxe, respektive snaha o to, aby tyto modely a jiné nástroje, které budou vznikat také na bázi těchto výsledků byly využívány v terénu. Způsoby, jak toho chceme docílit jsou popisovány v následující kapitole.

## **7.5 Úvahy využitelnosti palivových modelů**

### **7.5.1 Základní úvahy využitelnosti**

Úkolem práce bylo přiblížit lesní prostředí z hlediska struktury, potenciálu hoření, množství paliva a energie v palivu uloženém zejména hasičům, případně jiným osobám zainteresovaným v požární ochraně bez lesnického vzdělání. Hasiči dostávají do rukou jednoduchý systém 4 palivových modelů, které jsou detailně popsány a poskytují množství informací potřebných proto, aby si velitel zásahu dokázal představit, co na požářišti očekávat. Nelze říct, že je to informace bezpodmínečně nutná, ale z hasičské praxe je známé, že čím více informací, prostředků využitelných pro účely hašení velitel zásahu má k dispozici, tím lépe.

Dále jsou v textech této práce rozpracovány myšlenky budoucího využívání výsledků tohoto výzkumu a popsány výzkumné směry a záměry, kterým by měla být věnována pozornost pro účely dalšího rozvoje těchto modelů a výsledků z nich pramenících. Je zmiňována například nemožnost využití současného stavu palivových modelů na kalamitních plochách nebo na plochách s jiným režimem hospodaření. Stejně tak je vyjádřena potřeba v případě úvahy kalkulování parametrů požárů na těchto plochách přidání 1000-hodinového a 10000-hodinového paliva do výpočtů. Zvýšená pozornost by měla být i na množství redukce paliva.

Samotné palivo, které zůstane v porostu po požáru totiž nepřidalo teplo do procesu hoření, nicméně nějaké teplo odebralo díky svojí vlhkosti. Takže i studium míry redukce paliva na ploše po požáru a hlubší analýza charakteristických znaků mající vliv na tuto redukci je určité směr, který by mohl v budoucnosti být řešen. Stejně tak můžeme přidat informaci o míře uvolňovaného tepla v průběhu času k jednotlivému palivu, tzv. HRR (Heat Release Rate). Poslední několikrát naznačenou otázkou, ale nedostatečně zodpovězenou zůstává implementace výsledků tohoto výzkumu a dalších výsledků do praxe. Jedním z uváděných způsobů je kapesní průvodce a vývoj „elektronického“ kapesního průvodce ve formě aplikace to chytrých telefonů, tabletů, počítačů.

## **7.5.2 Kapesní průvodce/aplikace**

Je jasné, že velitel zásahu nebude trávit čas s identifikováním požárně technických charakteristik požáru, který je velmi malých rozměrů, rozšiřuje se pomalu s malou intenzitou a je naprosto jednoduché jej uhasit. Myšlenka využití kapesních průvodců, aplikací přichází v úvahu u větších požárů, které již vyžadují jisté důležité taktické rozhodnutí a mohou veliteli zásahu poskytnout cenné informace velice rychle a efektivně. V České republice se v rámci požární sezóny objeví mnoho těchto „středních“ požárů. Vzhledem k trendu ubývajících vlhkosti z prostoru lesa (Trnka et al. 2021) budou jistě tyto požáry nabývat na počtech a bohužel také intenzitě.

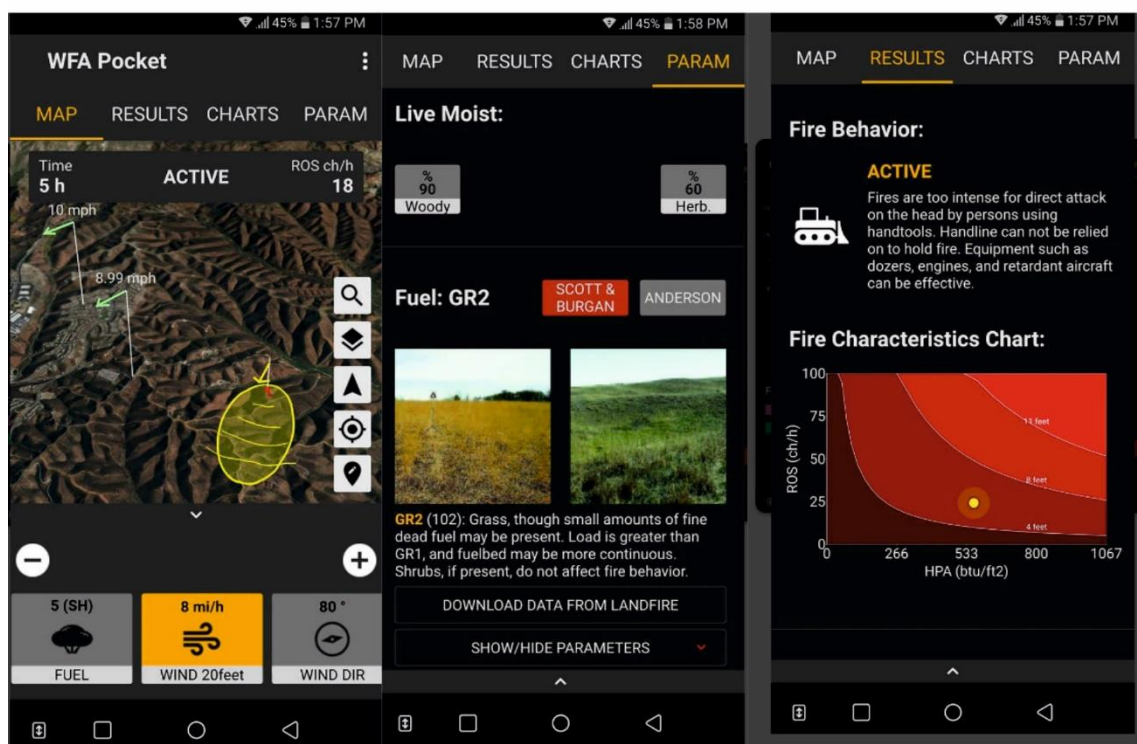
### *7.5.2.1 Kapesní průvodce*

Kapesní průvodce by měl být malý bloček, který by mohl být součástí výstroje velitelů zásahu při zdolávání lesních požárů. V tomto kapesním průvodci by byly základní klíče pro identifikování palivového modelu a odhadnuté parametry požáru formou číselné matice. Dále by kapesní průvodce měl obsahovat informace užitečné pro zásah, popis palivových modelů a jejich vlastností, různá upozornění, možnosti taktiky zdolávání požárů aj. Měl by sloužit jako pomůcka pro velitele zásahu, kdykoliv si velitel zásahu bude chtít nějakou informaci ověřit nebo nějakou informaci získat. Tento kapesní průvodce by byl vyvíjen v úzké spolupráci s hasiči, tak aby obsah informací byl opravdu užitečný a vyčerpávající. Jednalo by se také u určitý druh studijního materiálu, který by mohl být rozšířen mezi profesionální hasiče i mezi velitele jednotek sboru dobrovolných hasičů.

### 7.5.2.2 Aplikace

Aplikace je vlastně totožná s kapesním průvodcem, jen přenáší tyto informace do elektronické podoby. Způsob identifikace palivového modelu by mohl probíhat na základě dostupných mapových podkladů. Následný odhad parametrů požáru by pak by zobrazený v mapové aplikaci a ukazoval možné perimetr požáru za určité časové období. Podobná aplikace zobrazující základní perimetr šíření požáru v současnosti již existuje. Jedná se o WFA Pocket nebo-li „Wildfire Analyst Pocket Edition“ od společnosti TechnoSylva Inc. (TechnoSylva 2024), která je zaměřena na vývoj nástrojů v oblasti protipožární ochrany lesa a přírodního prostředí (Obr. 52). Výpočty v této aplikaci jsou postaveny taktéž na Rothermelově matematickém modelu (Rothermel 1972), ale využívají již mnohokrát zmiňované palivové modely Scott & Burgan (2005). Nicméně tato aplikace je určitým vzorem, jak by mohly být výsledky tohoto výzkumu implementovány do tabletů a zařízení zejména hasičů (GINA tablet).

## Wildfire Analyst Pocket



Obr. 52: Ukázka z prostředí aplikace Wildfire Analyst Pocket (TechnoSylva 2024).

Dle našeho názoru je dobré poskytnout velitelům zásahu nástroje, v okamžicích, kdy pro ně tato informace o požárních charakteristikách může být užitečná a zároveň modelování pomocí softwarů typu FlamMap (Finney 2006) nedává z hlediska časového a z hlediska velikosti požáru větší smysl.

### 7.5.3 Simulace šíření požáru

Využití softwarů typu software Farsite (Finney 1998), v současnosti již zahrnutý do software FlamMap (Finney 2006) nebo software BehavePlus (Andrews 1986) „aktuálně Behave<sup>7</sup> vyžaduje delší časovou přípravu a nastavení množství vstupních údajů. Pokud jsou tyto vstupní údaje nastaveny dobře, poskytuje velmi dobrou informaci o šíření požáru a predikování budoucího vývoje na základě různých scénářů počasí (Duff & Tolhurst 2015). Může tedy posloužit jako pomocný nástroj při rozhodování o taktice zdolávání požárů (Ferragut et al. 2008). Tyto software jsou vyvíjeny tak, aby bylo možné do nich nahrávat vlastní vstupní údaje a tyto údaje upravovat, včetně palivových modelů (Andrews 2018). Palivové modely vyvinuté tímto výzkumem tedy můžou být jednoduše implementovány do těchto software. Využitelnost těchto nástrojů je však při déletrvajících rozsáhlých požárech, kterých nejsme naštěstí v České republice svědky s výjimkou požáru v Národním parku České Švýcarsko. S těmito softwary pro účely analyzování šíření právě probíhající požáru lze pracovat, ale je nutné mít na paměti, že jejich využití bude velmi ojedinělé v našich podmínkách.

Otázkou zůstává další využívání těchto nástrojů pro účely dopředného predikování požárních charakteristik daných požárů, které jsou hodnoceny na základě průměrných vstupních hodnot na daném stanovišti z dlouhodobého sledování. Tato informace může být cenná, ale podmínky, pro které byly požární charakteristiky kalkulovány jsou průměrné v daném prostoru, a tedy nemusí odpovídat skutečnému stavu. Jednoduše řečeno, pokud bude foukat opačný vítr, než je obvyklé nebo pokud bude rychlejší než vítr průměrný, případně pokud bude větší sucho, než je v tomto období obvyklé, dopředný model bude podávat chybné informace. Software FlamMap pro tyto účely v současnosti využívá Ústav výzkumu globální změny, AV ČR v. v. i. ve spolupráci se společností IFER, s. r. o. (Cienciala et al. 2022).

Se znalostí citlivosti výpočtů na různé vstupní proměnné (vítr, vlhkost paliva) považují však tento přístup za méně přesný než navrhovaný přístup využití kapesních průvodců a aplikací, které by tyto parametry stanovovaly na základě okamžitých podmínek, ať už s využitím meteorologických stanic nebo kapesních meteorologických stanic.

### 7.5.4 Analýza náchylnosti lesního porostu na lesní požár

Analýza náchylnosti je hlavním pilířem celého systému protipožární ochrany lesa (Casartelli & Mysiak 2023). Implementování palivových modelů do tohoto hodnocení náchylnosti je určitě možné a v zásadě tato informace dokáže nahradit množství lesnických proměnných (Aragoneses & Chuvieco 2021). Je vždy pouze na preferovaném způsobu

kalkulace a výběru proměnných, které do hodnocení náchylnosti budou vstupovat. V zásadě by však mělo hodnocení náchylnosti obsahovat porostní proměnné (informace o daném porostu), prostorové proměnné jako nadmořská výška, expozice, sklon a nejdůležitější sociálně ekonomické proměnné, které jsou v našich podmínkách naprosto zásadní (Berčák et al. 2024). Jedná se o pravděpodobnost přítomnosti člověka v daném prostoru, a to z toho důvodu, že člověk způsobí v našich podmínkách až 98 % lesních požárů (Berčák et al. 2024). Tedy v místech, kde se koncentrují lidé, kde častou proudí lidé existuje mnohem výraznější předpoklad vzniku požáru.

Co je třeba si uvědomit, je k čemu slouží hodnocení náchylnosti, je to nástroj, který hodnotí pravděpodobnost vzniku lesního požáru v daném prostoru bez ohledu na meteorologické podmínky nebo bez úvah intenzity požáru, šíření požáru. Jedná se o nástroj, který má identifikovat v lese, v okrese, kraji, celé republice místa, která jsou predispozičně nejvíce náchylná pro vznik lesního požáru. Těmto místům se pak věnuje zvýšená pozornost v oblasti rozvoji protipožární ochrany, ať už se jedná o kontrolu a budování infrastruktury v těchto náchylných územích, financování rozvoje jednotek požární ochrany v těchto územích aj. Jedná se o čistě strategické stanovení toho, do kterých míst by měly být směřovány prioritně finanční prostředky pro rozvoj protipožární ochrany lesa (Casartelli & Mysiak 2023).

### **7.5.5 Analýza rizika šíření požáru**

Na druhou stranu analýza rizika šíření požáru nás informuje o tom, kde jsou nejlepší podmínky pro rychlé šíření požáru, pro intenzivní šíření požáru. V těchto analýzách jde také využít palivových modelů. Tato dvě hodnocení bývají v českých podmínkách neustále zaměňovány, také možné z toho důvodu, že angličtina příliš nepoužívá výraz „vulnerability“ a obecně používá pro obě hodnocení pojem „risk“ (např. Scott et al. 2013). Do výpočtů vstupují velmi podobné proměnné, mající ale jiný vliv pro dané hodnocení. Například vysoké sklony výrazně ovlivňují šíření požáru, protože zde dochází k efektivnějším předehrívání prostoru (Rothermel 1972; Wildfires on slopes 2018). Zatímco v případě hodnocení náchylnosti je sklon proměnnou, která limituje přístup člověka do daného prostoru, proto vysoké sklony jsou považovány v tomto ohledu za málo náchylná místa pro vznik požáru, neboť ve vysoce sklonitých terénech je málo pravděpodobné, že se tam bude pohybovat člověk, nebo že tam bude rozdělávat oheň (Berčák pers.).

Analýza šíření požáru je tedy přínosná zejména pak při zdolávání lesního požáru. Práce, kterou realizuje Ústav výzkumu globální změny, AV ČR v. v. i. (CzechGlobe) se společností

IFER, s. r. o. je tedy hodnocením rizika šíření požáru (např. Cienciala et al. 2022). Stejně tak zamýšlený přístup vývoje aplikace (kapitola 7.5.2.2), která je vlastně analýzou šíření požáru v reálném čase, stejně tak kapesní průvodce ve zjednodušené formě (kapitola 7.5.2.1).

### **7.5.6 Denní riziko vzniku lesního požáru**

Na hodnocení náchylnosti prostředí (kapitola 7.5.4) je pak postaveno i stanovení denního požárního rizika. Toto riziko je počítáno na základě meteorologických proměnných vyjádřených formou tzv. požárních indexů jako „Fire weather index“ (Canadian Forestry Service 1970; Fosberg 1981; Van Wagner 1987) nebo „Forest fire danger index“ (McArthur 1967). Informací o denním požárním indexu společně s promítnutím náchylnosti prostoru pro vznik požáru tak dokáže identifikovat místa s největší pravděpodobností vzniku požáru v daném okamžiku (dne/části dne). I zde je možné palivové modely uplatnit, neboť mohou být součástí hodnocení náchylnosti.

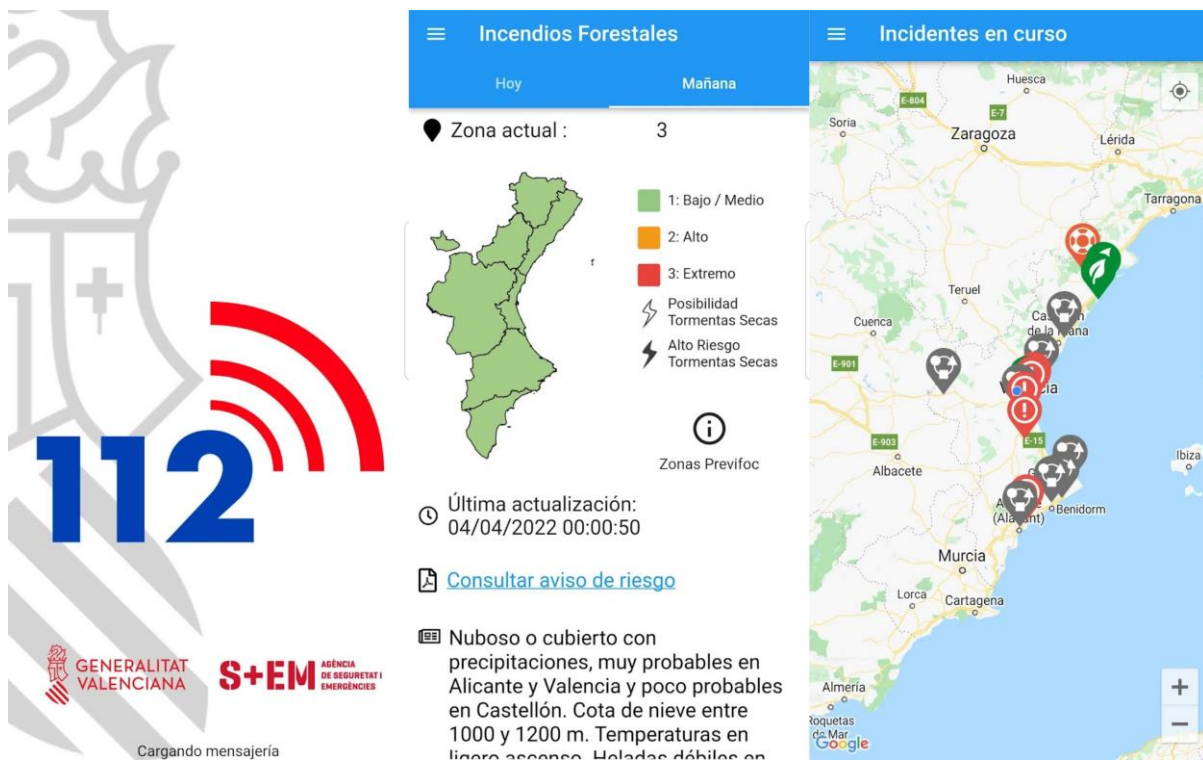
## **7.6 Aplikace zastřešující problematiku lesních požárů**

Závěrem diskuze je možné zmínit představy o jednotné platformě, které by poskytovala vyčerpávající množství informací o lesních požárech, zároveň by dokázala sbírat data o požárech, informovala veřejnost o informacích souvisejících s lesními požáry. Představou je aplikace, která by v jednotlivých sekcích, balíčcích nabízela pro hasiče aplikaci pro odhadování požárních charakteristik (kapitola 7.5.2.2), balíček pro sběr informací o požárech (kapitola 7.4), dále by obsahovala obecné informace k lesním požárům popsaných v předešlých kapitolách. Mohla by obsahovat informace o denním riziku vzniku požáru (podobně jako portál Firerisk (Firerisk 2024)), informaci o náchylnosti prostředí k požáru, kategorizace obtížnosti zdolávání požáru nebo infrastrukturu pro zdolávání požáru (lesní cesty, vodní zdroje). Tyto všechny informace a další by mohly být součástí balíčku pro IZS.

Pro veřejnost by mohly být dostupné informace o současných požárech, denní riziko požáru, informace o omezeních v důsledku vysokého požárního rizika atd. Inspirací byla opět existující aplikace tentokrát ze Španělska, která část těchto informací veřejnosti poskytuje a je dostupná všem na světě. Jedná se o aplikaci „GVA 112 Avisos“ (Obr. 53), která zahrnuje nejen lesní požáry, ale vzhledem k tomu, že byla vyvinuta v tzv. Valencijském společenství, což je autonomní společenství na území Španělska v jednom z nejsušších míst v Evropě (Vicente-Serrano et al. 2004), tak lesní požáry v této aplikaci hrají zásadní roli.



Je jen otázkou množství zájmu o takové nástroje, které lze poměrně snadno vyvinout a dále rozvíjet. Předpoklad využitelnosti těchto nástrojů určitě je, a to i v současnosti, kdy prozatím lesní požáry nepředstavují pro obyvatelstvo České republiky zpravidla výraznější komplikace.



Obr. 53: Ukázka z prostředí aplikace GVA 112 Avisos (Generalitat Valenciana 2024).

## 8 Závěr

Znalost prostředí, ve kterém požár může vzniknout nebo vzniknul, stejně tak dostupná infrastruktura a další informace jsou naprosto zásadní pro účely nastavování preventivních nebo represivních metod, ať už je to požár lesní, v přírodním prostředí nebo uvnitř budovy. Identifikací palivových modelů a schopností identifikovat základní požární charakteristiky získáváme možnost, jak být v budoucnu efektivnější při zdolávání požárů, jak citlivěji nastavovat prvky protipožární prevence v lesích nebo systematicky rozvíjet připravenost na vznik požárů. Celý koncept práce od metodiky, přes výsledky až po finální diskuzi, byly sepsány s ohledem a důrazem na možnou využitelnost v praxi.

První výsledky ukazují, že model dokáže pracovat poměrně spolehlivě a dokáže tak kalkulovat reálné požární charakteristiky. Nicméně dalším vývojem a výzkumem je možné pracovat na zlepšení výkonnosti a využitelnosti modelu, ať už je to zahrnutí palivových modelů pro kalamitní plochy, studium vlhkosti živého a mrtvého paliva, redukce paliva aj. Je však na místě podotknout, že model vždy zůstane modelem a navzdory tomu, že bude snaha jej maximálně zlepšovat, nebude nikdy pracovat se stoprocentní přesností. Proto musíme v České republice také rozvíjet obecné povědomí o lesních požárech, vštěpovat základní znalosti našim hasičským záchranným sborům a také občanům. S ohledem na to, jakým požárům v současnosti ve většině případů čelíme, se to může zdát lehce úsměvné, ale je dobré mít na paměti citát Henryho Forda: „Být připraven je nejdůležitější předpoklad k úspěchu“.

Nabízená řešení dalšího rozvoje např. formou kapesních průvodců nebo aplikací jsou možná příliš ambiciózní, ale v případě projevení zájmu ze strany hasičského nebo veřejného sektoru určitě reálná. Bude také záležet na „mediální síle“ dané problematice, zda časem nedojde k odklonu pozornosti, s tím, jak bude upadat v zapomnění rok 2022 a požár v Národním parku České Švýcarsko.

Na úplný závěr bych rád zmínil, že úkolem dizertační práce nebylo pouze vytvořit model šíření lesního požáru, ale poskytnout i určitý náhled do teorie hoření, dynamiky požáru a osvětlit co vše ovlivňuje výsledný požár jako takový. V neposlední řadě poukázat na to, jak velmi komplexní celá problematika lesních požárů je a nabídnout další postupy a řešení navazující na tuto práci.

## 9 Literatura

- AGEE, J. Fire severity. In: FireWords: Fire Science Glossary [electronic]. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fire Sciences Laboratory (Producer). 2007.
- ALBINI, F. A. Estimating wildfire behavior and effects. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1976.
- ALBINI, F. A. Spot fire distance from burning trees: a predictive model (Vol. 56). Intermountain Forest and Range Experiment Station, Forest Service, US Department of Agriculture. 1979.
- ALBINI, F. A.; REINHARDT, E. D. Modeling ignition and burning rate of large woody natural fuels. *International Journal of Wildland Fire*, 1995, 5.2: 81-91.
- ALBINI, F. A.; BROWN, J. K.; REINHARDT, E. D.; OTTMAR, R. D. Calibration of a large fuel burnout model. *International Journal of Wildland Fire*, 1995, 5.3, 173-192.
- ALEXANDER, M. E.; LANOVILLE, R. A. Predicting fire behavior in the black spruce-lichen woodland fuel type of western and northern Canada. Northern Forestry Centre, 1989.
- ALEXANDER, M. E.; DE GROOT, W. J. Fire Behavior in Jack Pine Stands: As Related to the Canadian Forest Fire Weather Index (FWI) System. Northern Forestry Centre, 1988.
- ALVAREZ, A.; GRACIA, M.; VAYREDA, J.; RETANA, J. Patterns of fuel types and crown fire potential in *Pinus halepensis* forests in the Western Mediterranean Basin. *Forest Ecology and Management*, 2012, 270: 282-290.
- ANDERSON, M. C. Stand structure and light penetration. II. A theoretical analysis. *Journal of applied ecology*, 1966, 41-54.
- ANDERSON, H. E. Flame shape and fire spread. *Fire Technol.* 1968, 51-58.
- ANDERSON, H. E. Heat transfer and fire spread. Intermountain Forest and Range Experiment Station, Forest Service, US Department of Agriculture, 1969.
- ANDERSON, H. E. Aids to determining fuel models for estimating fire behavior. *The Bark Beetles, Fuels, and Fire Bibliography*, 1982, 143.
- ANDREWS, P. L. BEHAVE: fire behavior prediction and fuel modeling system. USDA Forest Service General Technical Report INT, 1986, 194.
- ANDREWS, P. L.; BEVINS, C. D.; SELI, R. C. BehavePlus fire modeling system, version 4.0: User's Guide. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-106 Revised. Ogden, UT: Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 2005, 132 s.

- ANDREWS, P. L. The Rothermel surface fire spread model and associated developments: A comprehensive explanation. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-371. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 2018, 121 s.
- ARAGONESES, E.; CHUVIECO, E. Generation and mapping of fuel types for fire risk assessment. *Fire*, 2021, 4.3: 59.
- ARCA, B.; DUCE, P.; PELLIZZARO, G.; BACCIU, V.; SALIS, M.; SPANO, D. Evaluation of Farsite simulator in a Mediterranean area. In: *The 4th International Wildland Fire Conference*, Seville, Spain. 2007.
- ARCHER, C. L.; JACOBSON, M. Z. Evaluation of global wind power. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, 110.D12.
- ASCOLI, D.; RUSSO, L.; GIANNINO, F.; SIETTOS, C.; MOREIRA, F. Firebreak and fuelbreak. In: *Encyclopedia of wildfires and wildland-urban interface (WUI) fires*. Cham: Springer International Publishing, 2020. 444-452.
- ASENSIO, M.; FERRAGUT, L. On a wildland fire model with radiation. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2002, 54(1): 137–157.
- BABRAUSKAS, V. Ignition of wood: a review of the state of the art. *Journal of Fire Protection Engineering*, 2002, 12.3: 163-189.
- BAJOCCO, S.; RICOTTA, C. Evidence of selective burning in Sardinia (Italy): which land-cover classes do wildfires prefer? *Landscape Ecology*, 2008, 23: 241-248.
- BATES, C. G. Transect of a mountain valley. *Ecology*. 1923, 4: s. 54-62.
- BERČÁK, R.; HOLUŠA, J.; KACZMAROWSKI J.; TYBURSKI, Ł.; SZCZYGIEL, R.; HELD, A. & CHROMEK, I. Fire protection principles and recommendations in disturbed forest areas in central Europe: a review. *Fire*, 2023, 6.8: 310.
- BERČÁK, R.; HOLUŠA, J.; TROMBIK, J.; RESNEROVÁ, K. & HLÁSNÝ T. A Combination of Human Activity and Climate Drives Forest Fire Occurrence in Central Europe: The Case of the Czech Republic. *Fire*, 2024, 7.4: 109.
- BILLINGS, W. D. Vegetation zonation in the Great Basin of Western North America. In: *C. R. de Colloque sur les bases ecologiques dela regeneration de la vegetation des zones arides*. U. I. S. B. Paris, 1951.
- BIRCH, J. D.; DICKINSON, M. B.; REINER, A.; KNAPP, E. E.; DAILEY, S. N.; EWELL, C. & MIESEL, J. R. Heading and backing fire behaviours mediate the influence of fuels on wildfire energy. *International Journal of Wildland Fire*, 2023, 32.8: 1244-1261.
- BLACKSHEAR, P. L. *Heat Transfer of Fires: Thermophysics, Social Aspects and Economic Impact*. Washington, DC, 1974.

- BRACMORT, K. Wildfire fuels and fuel reduction. Congressional Research Service, 2013, 1  
15.
- BROWN, J. K. Handbook for inventorying surface fuels and biomass in the Interior West. US  
Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment  
Station, 1982.
- BROWN, J. K.; SIMMERMAN, D. G. Appraising fuels and flammability in western aspen: a  
prescribed fire guide. US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain  
Research Station, 1986.
- BURGAN, R. E. Estimating live fuel moisture for the 1978 national fire danger rating system.  
Intermountain Forest and Range Experiment Station, Forest Service, US Department of  
Agriculture, 1979.
- BURGAN, R. E. Behave: fire behavior prediction and fuel modeling system, fuel subsystem.  
US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment  
Station, 1984.
- BURGAN, R. E. Concepts and interpreted examples in advanced fuel modeling. US  
Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station, 1987.
- BURGAN, R. E. Behave: fire behavior prediction and fuel modeling system, fuel subsystem.  
US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment  
Station, 1984.
- BURROWS, N. D. Fire behaviour in jarrah forest fuels: 1. Laboratory experiments. CALM  
Science. 1999, 3(1): 31-56.
- BYRAM, G. M. Solar Radiation and Forest Fuel Moisture. Journal of Agricultural Research,  
1943, 67: 149.
- CANADIAN FORESTRY SERVICE. Canadian Forest Fire Weather Index. Canadian Forestry  
Service, Department of Fisheries and Forestry, 1970.
- CANHAM, C. D. An index for understory light levels in and around canopy gaps. Ecology,  
1988, 69.5: 1634-1638.
- CARLSON, J. D.; BURGAN, R. E. Review of users' needs in operational fire danger  
estimation: The Oklahoma example. International Journal of Remote Sensing. 2003, 24.8:  
1601-1620.
- CARRIER, G.; FENDELL, F.; WOLFF, M. Wind-aided firespread across arrays of discrete  
fuel elements. I. Theory. Combustion Science and Technology. 1991, 75: 31-51.

- CASARTELLI, V.; MYSIAK, J. Union Civil Protection Mechanism - Peer Review Programme for disaster risk management: Wildfire Peer Review Assessment Framework (Wildfire PRAF) European Commission, Brusel. 2023.
- CIENCIALA, E.; BERANOVÁ J.; ČERMÁK, P.; KUDLÁČKOVÁ L. & ZATLOUKAL, V. Návrh managementových opatření snižující riziko vzniku lesních požárů s využitím nejnovějších výsledků bezpečnostního výzkumu. Závěrečná zpráva projektu. Grantová služba LČR. 2022. 81 s.
- COLEMAN, R. J. Management of Fire Service Operations. Massachusetts: Breton Publishers, North Scituate. 1978, 560 s.
- COLEMAN, J. R.; SULLIVAN, A. L. A real-time computer application for the prediction of fire spread across the Australian landscape. *Simulation*. 1996, 67.4: 230-240.
- COTTRELL W. H. The Book of Fire. Science Reference Center, Mountain Press Publishing: Missoula, USA. 2004, 72 s.
- CROBA, D.; LALAS, D.; PAPADOPOULOS, C. & TRYFONOPOULOS, D. Numerical simulation of forest fire propagation in complex terrain. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Forest Fire Research. Coimbra, Portugal. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands. 1994. 491-500.
- CUMMING, S. G. Forest type and wildfire in the Alberta boreal mixedwood: what do fires burn? *Ecological applications*, 2001, 11.1: 97-110.
- CURRY, J. R.; FONS, W. L. Rate of spread of surface fires in the Ponderosa pine type of California. *Journal of Agricultural Research*. 1938, 57.4: 239-267.
- CURRY, J. R.; FONS, W. L. Forest Fire Behavior Studies, *Mechanical Engineering*. 1940, 62: 219-225.
- DE MESTRE, N. J.; CATCHPOLE, E. A.; ANDERSON, D. H.; ROTHERMEL, R. C. Uniform propagation of a planar fire front without wind. *Combustion Science and Technology*. 1989, 65: 231-244.
- DEEMING, J. E.; BROWN, J. K. Fuel models in the national fire-danger rating system. *Journal of forestry*, 1975, 73.6: 347-350.
- DIMITRAKOPOULOS, A. P. Mediterranean fuel models and potential fire behaviour in Greece. *International Journal of Wildland Fire*, 2002, 11.2: 127-130.
- DODGE, M. Forest fuel accumulation—a growing problem. *Science*, 1972, 177.4044: 139-142.
- DRYSDALE, D. An Introduction to Fire Dynamics. Wiley: Chichester, Velká Británie, 1985.

- DUFF, T. J.; TOLHURST, K. G. Operational wildfire suppression modelling: a review evaluating development, state of the art and future directions. *International Journal of Wildland Fire*, 2015, 24.6: 735-748.
- DUJKA, P.; KUSBACH, A. Zonální koncept v lesnické typologii. *Zprávy lesnického výzkumu*, 2022, 67.4., 236-245.
- DUPUY, J.; LARINI, M. Fire spread through a porous forest fuel bed: a radiative and convective model including fire-induced flow effects. *International Journal of Wildland Fire*. 1999, 9.3: 155–172.
- ELLIS, Todd M.; BOWMAN, D. M.; JAIN, P.; FLANNIGAN, M. D. & WILLIAMSON, G. J. Global increase in wildfire risk due to climate-driven declines in fuel moisture. *Global change biology*, 2022, 28.4: 1544-1559.
- EMMONS, H. W. Fire in the forest, *Fire Res. Abstr. and Rev.* 1963, 5: 163-178.
- EMMONS, H. W. Heat transfer in Fire. *Journal of Heat Transfer*. 1973, 145-151.
- ERIKSEN, C.; PRIOR, T. The art of learning: wildfire, amenity migration and local environmental knowledge. *International Journal of Wildland Fire*, 2011, 20.4: 612-624.
- EVANS, G. C. Model and measurement in the study of woodland light climates. Light as an ecological factor. Blackwell, Oxford, 1966, 53-76.
- EZIZ, A.; YAN, Z.; TIAN, D.; HAN, W.; TANG, Z. & FANG, J. Drought effect on plant biomass allocation: A meta-analysis. *Ecology and evolution*, 2017, 7.24: 11002-11010.
- FERNANDES, P. M.; BOTELHO, H. S.; LOUREIRO, C. Models for the sustained ignition and behaviour of low-to-moderately intense fires in maritime pine stands. In: *Proceedings of the IV International Conference on Forest Fire Research 2002 Wildland Fire Safety Summit*. Luso, Portugalsko, 2002, 98.
- FERRAGUT, L.; MONEDERO, S.; ASENSIO M. I. & RAMIREZ, J. Scientific advances in fire modelling and its integration in a forest fire decision system. Billerica, MA, USA: WIT Press, 2008.
- FINNEY, M. A. FARSITE: a fire area simulator for fire managers. In: *the Proceedings of The Biswell Symposium*, Walnut Creek, California. 1994.
- FINNEY, M. A. FARSITE: Fire Area Simulator - Model Development and Evaluation. Rocky Mountain Research Station, Forest Service, United States Department of Agriculture. 1998, 47 s.
- FINNEY, M. A. An overview of FlamMap fire modeling capabilities. In: *In: Andrews, Patricia L.; Butler, Bret W., comps. 2006. Fuels Management-How to Measure Success: Conference Proceedings*. 28-30 March 2006; Portland, OR. *Proceedings RMRS-P-41*. Fort Collins, CO:



- US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 213-220. 2006.
- FIRELINE HANDBOOK. National Wildfire Coordinating Group. National Interagency Fire Center: Boise, USA. 2004.
- FLINN, M. A.; WEIN, R. W. Depth of underground plant organs and theoretical survival during fire. *Canadian Journal of Botany*, 1977, 55.19: 2550-2554.
- FONS, W. L. Analysis of Fire Spread in Light Forest Fuels, *Journal of Agricultural Research*. 1946, Vol. 72, 3: 93-121.
- FORESTRY CANADA FIRE DANGER GROUP. Development and structure of the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System. Forestry Canada Science and Sustainable Development Directorate, Information Report ST-X-3. Ottawa, Kanada. 1992.
- FORGY, E. W. Cluster analysis of multivariate data: efficiency versus interpretability of classifications. *Biometrics*, 1965, 21: 768-769.
- FOSBERG, M. A. Weather in wildland fire management: the fire weather index. USDA Forest Service, Fort Collins, USA. 1981.
- FOSBERG M. A.; SCHROEDER, M. J. Fine herbaceous fuels in fire-danger rating. Res. Note. RM-185. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experimental Station. 1971. 7 s.
- FRANDSEN, W. H. Fire spread through porous fuels from the conservation of energy. *Combustion and Flame*, 1971, 16.1: 9-16.
- GAIL, F. G. Factors controlling the distribution of douglas fir in semi-arid regions of the northwest. *Ecology*. 1921, 2: 281-291.
- GISBORNE, H. T. The objectives of forest fire-weather research. *Journal of Forestry*. 1927, 25.4: 452-456.
- GISBORNE, H. T. Measuring forest fire danger in Northern Idaho. U.S. Dep. Agr. Misc. Pub. 1928, 29: 64 s.
- GISBORNE, H. T. The complicated controls of fire behaviour. *Journal of Forestry*. 1929, 27.3: 311-312.
- GOULD, J. S.; MCCAWE, W. L.; CHENEY, N. P.; ELLIS, P. F.; KNIGHT, I. K.; SULLIVAN, A. L. Project Vesta – Fire in Dry Eucalypt Forest: Fuel Structure, Dynamics and Fire Behaviour. CSIRO Ensis and Department of Environment and Conservation: Canberra, ACT, 2007.

- GREEN, D. G.; TRIDGELL, A.; GILL, A. M. Interactive simulation of bushfires in heterogeneous fuels. *Mathematical and Computer Modelling*. 1990, 13.12: 57–66.
- GRISHIN, A. M. *Mathematical Modeling of Forest Fires and New Methods of Fighting Them*. Publishing House of Tomsk State University, Tomsk, Rusko, 1997.
- GUARISO, G.; BARACANI, M. A simulation software of forest fires based on two-level cellular automata. In: *Proceedings of the IV International Conference on Forest Fire Research, 2002 Wildland Fire Safety Summit., Luso, Portugalsko, 2002*, s. 100.
- HAWLEY, L. F. Theoretical considerations regarding factors which influence forest fires. *J. Forest*. 1926, 24: 756-763.
- HEIJMANS, M.; ARP, W. J.; CHAPIN III, F. S. Controls on moss evaporation in a boreal black spruce forest. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18.2.
- HEINSCH, F. A.; MCHUGH, C. W.; HARDY, C. C., Editors. *Fire, Fuel, and Smoke Science Program 2015 Research Accomplishments*. Missoula, MT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Missoula Fire Sciences Laboratory, Missoula, USA. 2016, 73 s.
- HELMS, J. A. (Editor). *The Dictionary of Forestry*. Society of American Foresters. Bethesda, Md. 1998. 210 s.
- HEVIA, A.; JENSEN, S. E. Assessing the effect of pruning and thinning on crown fire hazard in young Atlantic maritime pine forests. *Journal of environmental management*, 2018, 205: 9-17.
- HLAVÁČ, P.; CHROMEK, I. *Lesné požiare a integrovaný systém ochrany lesov pred požiarimi*. Technická univerzita vo Zvolene. Zvolen, 2016. ISBN 978-80-228-2930-4.
- HLAVÁČ, P.; CHROMEK, I.; MAJLINGOVÁ, A.; OSVALD, A. *Projekt protipožiarnej ochrany lesa na území Vysokých Tatier po vetrovej kalamite: realizačný projekt*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene. 2005, 67 s.
- HOINKA, K. P.; CARVALHO, A.; MIRANDA, A. I. Regional-scale weather patterns and wildland fires in central Portugal. *International Journal of Wildland Fire*. 2009, 18.1: 36-49.
- HOLUŠA, J.; BERČÁK, R.; LUKÁŠOVÁ, K.; HANUŠKA, Z.; AGH, P.; VANĚK, J. & CHROMEK, I. *Lesní požáry v České republice – definice a rozdělení. Zprávy lesnického výzkumu*. 2018, 63(2), 102-111.
- HOTELLING, H. Analysis of a complex of statistical variables with principal components. *J. Educ. Psy.*, 1933, 24: 498-520.

- HOUGH, W. A.; ALBINI F. A. Predicting fire behavior in palmetto-gallberry fuel complexes. Res. Pap. SE-174. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station. 1978, 44 s.
- CHANDLER, C.; CHENEY, P.; THOMAS, P.; TRABAUD, L.; WILLIAMS, D. Fire in Forestry, 1. vyd., New York: John Wiley & Sons, 1983.
- CHANG, H. The hidden history of phlogiston. HYLE–International journal for philosophy of chemistry. 2010, 16.2: 47-79.
- CHAPLOT, V.; BERNOUX, M.; WATLER, C.; CURMI, P.; HERPIN, U. Soil carbon storage prediction in temperate hydromorphic soils using a morphologic index and digital elevation model. Soil Sci. 2001, 166: 48-60.
- CHEN, Z. S.; HSIEH, C. F.; JIANG, F. Y.; HSIEH, T. H.; SUN, I. F. Relationships of soil properties to topography and vegetation in a subtropical rain forest in southern Taiwan. Plant Ecol. 1997, 132: s. 229-241.
- CHU, P.; YAN, W.; FUJIOKA, F. Fire-climate relationships and long-lead seasonal wildfire prediction for Hawaii. International Journal of Wildland Fire. 2002, 11.1: 25-31.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. Introduction to Heat Transfer. Wiley: New York, 1985.
- INTRODUCTION TO THE WILDLAND FIRE BEHAVIOUR. National Wildfire Coordinating Group. National Interagency Fire Center: Boise, USA, 91 s.
- JAAKKOLA, H.; THALHEIM, B. Functions of Models in Scenarios and their Maturity. In: Information Modelling and Knowledge Bases XXXI. IOS Press, 2020. 265-284.
- JENNY, H. Factors of Soil Formation-A System of Quantitative Pedology McGrawHill, New York, 1941.
- JOLLIFFE, I. T.; CADIMA, J. Principal component analysis: a review and recent developments. Philosophical transactions of the royal society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2016, 374.2065: 20150202.
- JURDAO, S.; CHUVIECO, E.; AREVALILLO, J. M. Modelling fire ignition probability from satellite estimates of live fuel moisture content. Fire Ecology, 2012, 8: 77-97.
- KEELEY, J. E. Fire severity and plant age in postfire resprouting of woody plants in sage scrub and chaparral. Madrono, 2006, 53.4: 373-379.
- KEELEY, J. E. Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage. International journal of wildland fire, 2009, 18.1: 116-126.
- KEELEY, J. E.; BRENNAN, T.; PFAFF, A. H. Fire severity and ecosystem responses following crown fires in California shrublands. Ecological Applications, 2008, 18.6: 1530-1546.

- KIM, T.; KIM, J.; LEE, J.; KIM, H. S.; PARK, J. & IM, S. Water retention capacity of leaf litter according to field lysimetry. *Forests*, 2023, 14.3: 478.
- KOELEMEIJER, I. A.; EHRLÉN, J.; DE FRENNE, P.; JÖHNSON, M.; BERG, P. & HYLANDER, K. Forest edge effects on moss growth are amplified by drought. *Ecological Applications*, 2023, 33.4: e2851.
- KOLAKS, J. J.; CUTTER, B. E.; LOEWENSTEIN, E. F.; GRABNER, K. W.; HARTMAN, G. W. & KABRICK, J. M. The effect of thinning and prescribed fire on fuel loading in the central hardwood region of Missouri. In: *Proceedings of the 14th Central Hardwood Conference*, Wooster, Ohio. US For. Serv. Gen. Tech. Rep. NE-316. 2004. 168-178.
- KRAKOVSKÝ, A. *Lesné požiare*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene. 2004, 78 s.
- KRAMER, H. A., COLLINS, B. M.; KELLY, M. & STEPHENS, S. L. Quantifying ladder fuels: A new approach using LiDAR. *Forests*, 2014, 5.6: 1432-1453.
- KULA, E. Výskyt a příčiny lesních požárů v ČSSR (1979-1983). *Acta Univ. Agric. (Brno)*. 1985a, series C (Fac. silvic.), 54.1-2: 225-246.
- KULA, E.; JANKOVSKÁ, Z. Forest fires and their causes in the Czech Republic (1992- 2004). *Journal of Forest Science*. 2013, 59.2: 41-53.
- KUNT, A. *Lesní požáry*. Praha, Československý svaz požární ochrany. 1967, 313 s.
- KVARČÁK, M. *Základy požární ochrany*. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2005.
- LARINI, M.; GIROUD, F.; PORTERIE, B.; LORAUD, J. C. A multiphase formulation for fire propagation in heterogeneous combustible media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1998, 41(6-7): 881-897.
- LINN, R. R. A transport model for prediction of wildfire behaviour. Los Alamos National Laboratory, Science Report LA-13334-T. Los Alamos, NM, 1997.
- LIU, Y.; STANTURF, J.; GOODRICK, S. Trends in global wildfire potential in a changing climate. *Forest Ecology and Management*. 2010, 259: 685-697.
- LOPEZ A. M. G.; CRUZ M. G.; VIEGAS D. X. Firestation – an integrated software system for the numerical simulation of fire spread on complex topography. *Environmental Modelling & Software*. 2002, 17.3, 269-285.
- LOVELL, L. The importance of realistic firefighter training. *Fire Engineering*. Retrieved October 21, 2019, from <https://www.fireengineering.com/features/the-importance-of-realistic-firefighter-training/#gref>, 2020.

- MACQUEEN, J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In: Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability. 1967. 281-297.
- MAJLINGOVÁ, A. Informačné systémy efektívneho nasadenia hasičských jednotiek pri lesných požiaroch na vybranom území Slovenskej republiky. Dizertační práce, Žilinská univerzita v Žiline, Fakulta bezpečnostného inžinierstva, Katedra požiarneho inžinierstva. Žilina, 2014, 168 s.
- MAJLINGOVÁ, A.; SMREČEK, R. Riešenie krízových situácií: Aplikácie GIS. Príručka. Technická univerzita vo Zvolene, Zvolen, Slovenská republika, 2013, 142 s.
- MAJLINGOVÁ, A.; SEDLIAK, M.; SMREČEK, R. Spatial distribution of surface forest fuel in the Slovak Republic. *Journal of Maps*, 2018, 14.2: 368-372.
- MCARTHUR, A. G. Weather and grassland fire behaviour. Leaflet. Forestry Timber Bureau Australia, 1966.
- MCARTHUR, A. G. Fire behaviour in Eucalypt forests. 9th Commonw. For. Conf., New Delhi, Australia. 1967.
- MCARTHUR, A. G. Fire as an ecological tool in conserving natural resources. Institute of Riverina Studies, 1969.
- MCKENZIE, N. J.; RYAN, P. J. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. *Geoderma*. 1999, 89: 67–94.
- HA, M.; MORROW, M; ALGIERS, K. Botany. Libra Text Project, Yuba College, College of the Redwoods, Ventura College, USA. 520 s.
- MELL, W.; JENKINS, M. A.; GOULD, J.; CHENEY, P. A physics based approach to modeling grassland fires. *Int. J. Wildland Fire*. 2007, 16: 1-22.
- MENG, Y.; DENG, Y.; SHI, P. Mapping forest wildfire risk of the world. *World atlas of natural disaster risk*, 2015, 261-275.
- MIŠEK, P. Míra odhořívání pozemního paliva lesních požárů. Bakalářská práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Praha, Česká republika. 2024, 43 s.
- MOLČANOV, V. P. Skorost rasprostraněnija lesnych požarov v zavsimosti ot metėorologičeskich uslovij i charaktera drevostoja. *Lesn. chozjajstvo*. 1940, 6 s.
- MORVAN, D. Validation of wildfire spread models. In: *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires*. Cham: Springer International Publishing, 2020. 1031-1037.

- MOŽNÝ, M.; TRNKA, M.; VLACH, V.; VIZINA, A.; POTOPOVÁ, V.; ZAHRADNÍČEK, P. & ŽALUD, Z. Past (1971–2018) and future (2021–2100) pan evaporation rates in the Czech Republic. *Journal of Hydrology*, 2020, 590: 125390.
- NATIONAL WILDFIRE COORDINATING GROUP: Fire Behaviour Field Reference Guide. National Interagency Fire Center: Boise, USA. 1989
- NATIONAL WILDFIRE COORDINATING GROUP: Fire Behaviour Field Reference Guide. National Interagency Fire Center: Boise, USA. 1989
- NELSON, R. M. Prediction of diurnal change in 10-h fuel stick moisture content. *Canadian Journal of Forest Research*. 2000, 30.7: 1071–1087.
- NELSON, R. M. An effective wind speed for models of fire spread. *International Journal of Wildland Fire*. 2002, 11.2: 153–161.
- NELSON J. R.; RALPH, M. Water relations of forest fuels. In: *Forest fires*. Academic Press, 2001. 79-149.
- NUNES, M. C. S.; VANCONCELOS, M. J.; PEREIRA, J. M.; DASGUPTA, N.; ALLDREDGE, R. J. & REGO, F. C. Land cover type and fire in Portugal: do fires burn land cover selectively? *Landscape Ecology*, 2005, 20: 661-673.
- OLLINGER, S. V.; SMITH, M. L.; MARTIN, M. E.; HALLETT, R. A.; GOODALE, C. L.; ABER, J. D. Regional variation in foliar chemistry and N cycling among forests of diverse history and composition. *Ecology*. 2002, 83: 339–355.
- OŠLEJŠEK, P. Analýza okolností požáru v Národním parku České Švýcarsko. MV-Generální ředitelství Hasičského záchranného sboru ČR. Praha, Česká republika, 2022, 112 s.
- OŠŤÁDAL S. Pozemní palivo bukových lesů v závislosti na sklonu svahu. Diplomová práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Praha, Česká republika. 2020, 94 s.
- PEARSON, K. LIII. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1901, 2.11: 559-572.
- PECL, J.; BERČÁK, R.; VANĚK, J. Hašení požárů v přírodním prostředí. MV-Generální ředitelství hasičského záchranného sboru ČR. Praha, Česká republika. 2021.
- PFEFFER, A. Ochrana lesů. SZN Praha. Praha, Česká republika. 1961.
- PLATT, R. B. An ecological study of the mid-Appalachian shale barrens and of the plants endemic to them. *Ecol. Monogr.* 1951, 21: 269-300.
- PLÍVA, K. Typologický systém ÚHUL. Ústav pro hospodářskou úpravu lesů. Brandýs nad Labem, Česká republika. 1971, 90 s.

- PLÍVA, K. Typologický klasifikační systém ÚHUL. Ústav pro hospodářskou úpravu lesů. Brandýs nad Labem, Česká republika. 1987, 52 s.
- POTTER, B. E. Spot fires. Synthesis of Knowledge of Extreme Fire Behavior: Volume I for Fire Managers, 2011, 81.
- PRIOR, L. D.; MURPHY, B. P.; WILLIAMSON, G. J.; COCHRANE, M. A.; JOLLY, W. M. & BOWMAN, D. M. Does inherent flammability of grass and litter fuels contribute to continental patterns of landscape fire activity? *Journal of Biogeography*, 2017, 44.6: 1225-1238.
- PRONTO, L. Forest fires of summer 2022: Lessons to draw from the cohesion policy response. European Parliament, Directorate-General for Internal Policies of the Union, Belgium. 2023, 83 s.
- PYNE, S. J.; ANDREWS, P. L.; LAVEN, R. D. Introduction to Wildland Fire. 2 vyd., Wiley: New York, 1996.
- RIEBOLD, R. J. The early history of wildfires and prescribed burning. In: *Prescribed burning symposium: Proceedings. New Orleans, LA: US Department of Agriculture, Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station*. 1971. 11-20.
- ROHSENOW, W. M.; HARTNETT, J. P.; CHO, Y. I. Handbook of heat transfer (Vol. 3). New York: McGraw-hill. 1998.
- ROTHERMEL R. C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels (Vol. 115). Intermountain Forest & Range Experiment Station, Forest Service, US Department of Agriculture. 1972 48 s.
- ROTHERMEL, R. C. Predicting behaviour and size of crown fires in the northern Rocky Mountains. USDA Forest Service, Intermountain Research Station, Ogden, Utah. Research Paper INT-438. 1991, 46 s.
- ROTHERMEL, R. C.; ANDERSON, H. E. Fire spread characteristics determined in the laboratory. 1966.
- ROTHERMEL, R. C.; PHILPOT, C. W. Predicting changes in chaparral flammability. *Journal of Forestry*, 1973, 71.10: 640-643.
- SÁ, A. C. L.; BENALI, A.; APARICIO, B. A.; BRUNI, C.; MOTA, C.; PEREIRA, J. M. C. & FERNANDES, P. M. A method to produce a flexible and customized fuel models dataset. *MethodsX*, 2023, 10: 102218.
- SAN-MIGUEL-AYANZ, J.; DURRANT, T.; BOCA, R.; MAIANTI, P.; LIBERTA, G.; JACOME FELIX OOM, D.; BRANCO, A.; DE RIGO, D.; SUAREZ-MORENO, M.; FERRARI, D.; ROGLIA, E.; SCIONTI, N.; BROGLIA, M.; ONIDA, M.; TISTAN, A.;



- LOFFLER, P. *Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2022*, Publications Office of the European Union, Lucembursko. 2023.
- SANDERLIN, J. C.; SUNDERSON, J. M. A simulation for wildland fire management planning support (FIREMAN). Vol. 2. Prototype models for FIREMAN (Part II): Campaign fire evaluation. Mission Research Corp. Contract, 1975, 21-343.
- SANDERLIN, J. C.; VAN GELDER, R. J. A simulation of fire behavior and suppression effectiveness for operation support in wildland fire management. In: Proceedings of the 1st International Conference on Mathematical Modeling. 1977. 619-630.
- SANTONI, P-A.; FILIPPI, J. B.; BALBI, J. H. & BOSSEUR, F. Wildland fire behaviour case studies and fuel models for landscape-scale fire modeling. *Journal of Combustion*, 2011, 2011.
- SCOTT, J. H.; BURGAN, R. E. Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model. US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2005.
- SCOTT, J. H.; THOMPSON, M. P.; CALKIN, D. E. A wildfire risk assessment framework for land and resource management. 2013.
- SEDLIAK, M.; MAJLINGOVÁ, A. Kvantifikácia pozemného paliva v lese. GIS Ostrava. Ostrava, Česká republika. 2013, 6 s.
- SHARPLES, J. J.; GILL, A. M.; DOLD, J. W. The trench effect and eruptive wildfires: lessons from the King's Cross Underground disaster. In: Proceedings of Australian Fire and Emergency Service Authorities Council 2010 Conference. 2010. 8-10.
- SHREVE, F. Conditions indirectly affecting vertical distribution on desert mountains. *Ecology*. 1922, 3: 269-274.
- SHREVE, Forrest. Soil temperature as influenced by altitude and slope exposure. *Ecology*. 1924, 5.2: 128-136.
- SHREVE, F. The physical conditions of a coastal mountain range. *Ecology*. 1927, 8: 398-414.
- SKINNER, W. R.; FLANNIGAN, M. D.; STOCKS, B. J. A 500 hPa synoptic wildland fire climatology for large Canadian forest fires, 1959–1996. *Theoretical and Applied Climatology*. 2002, 71: 157–169.
- SNEEUWJAGT, R. J.; PEET, G. B. Forest fire behaviour tables for Western Australia. Perth: Western Australian Department of Conservation and Land Management. 1985.
- STATISTICKÁ ROČENKA. Statistická ročenka Hasičského záchranného sboru ČR. MV-Generální ředitelství HZS ČR. Praha, Česká republika. 2022, 68 s.

- STOCKS, B. J.; LAWSON, B. D.; ALEXANDER, M. E.; VAN WAGNER, C. E.; MCALPINE, R. S.; LYNHAM, T. J.; DUBÉ, D. E. The Canadian system of forest fire danger rating. In: Conference on Bushfire Modelling and Fire Danger Rating Systems. Canberra, Austrálie, 1991, 9–18.
- STOLINA, M. Ochrana lesa. Příroda. Bratislava, Československo 1985, 473 s.
- SULLIVAN, A. L. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 1: Physical and quasi-physical models. *International Journal of Wildland Fire*. 2009b, 18: 349–368.
- SULLIVAN, A. L. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 2: Empirical and quasi-empirical models. *International Journal of Wildland Fire*, 2009b, 18: 369–386.
- SULLIVAN, A. L. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 3: Simulation and mathematical analogue models. *International Journal of Wildland Fire*. 2009c, 18: 387–403.
- SULLIVAN, A.; CRUZ, M.; PLUCINSKI, M., A guide to reconstructing cropland wildfires – data collection, collation and analysis for case study construction, Bushfire and Natural Hazards CRC, Melbourne. 2021.
- SUNNER, S.; MÅNSSON, M. (ed.). Combustion Calorimetry: Experimental Chemical Thermodynamics. Elsevier, 2016.
- SVAZ POŽÁRNÍ OCHRANY ČSSR. Požárně a bezpečnostně technické charakteristické hodnoty nebezpečných látek. Praha, Česká republika. 1990.
- SWETMAN, T. W.; BETANCOURT, J. L. El Niño-Southern Oscillation (ENSO) phenomena and forest fires in the southwestern United States. In: Betancourt, J. L.; Mackay, A. M., eds. Proceedings of the sixth annual Pacific Climate (PACLIM) workshop. California Department of Water Resources, Interagency Ecological Studies Program Technical Report. 1990, 23: 129–134.
- SZCZYGIEŁ R.; KWIATKOWSKI M.; KOŁAKOWSKI B. Martwe drewno a zagrożenie pożarowe lasu. *Postępy Techniki w Leśnictwie*. 2016, 135: 33–38.
- SZCZYGIEŁ R.; KWIATKOWSKI M.; KOŁAKOWSKI B. 2017. Opracowanie modeli paliw leśnych materiałów roślinnych pokrywy gleby. IBL, Sękocin Stary. Polsko. 2017.
- SZCZYGIEŁ R.; KWIATKOWSKI M.; KOŁAKOWSKI B. Instrukcja ochrony przeciwpożarowej lasu. IBL, Sekocin Stary. Polsko. 2020.
- TANSKANEN, H.; GRANSTROM, A.; LARJAVAARA, M.; PUTTONEN, P. Experimental fire behaviour in managed *Pinus sylvestris* and *Picea abies* stands of Finland. *International Journal of Wildland Fire*. 2007, 16.4: 414–425.

- TEDIM, F.; LEONE, V.; AMRAOUI, M.; BOUILLON, C.; COUGHLAN, M. R.; DELOGU, G. M. & XANTHOPOULOS, G. Defining extreme wildfire events: Difficulties, challenges, and impacts. *Fire*, 2018, 1.1: 9.
- THOMAS, P. H., The Size of Flames from Natural Fires, Ninth Symposium (International) on Combustion. Academic Press, New York a Londýn. 1963, 844-859.
- THOMAS, P. A.; MCALPINE, R. S. Fire in the forest. Cambridge University Press, Cambridge, Velká Británie. 2010.
- TRNKA, M.; MOŽNÝ, M.; JUREČKA, F.; BALEK, J.; SEMERÁDOVÁ, D.; HLAVINKA, P.; & BRÁZDIL, R. Observed and estimated consequences of climate change for the fire weather regime in the moist-temperate climate of the Czech Republic. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 310: 108583.
- TURESSON, G. Slope exposure as a factor in distribution of *Pseudotsuga taxifolia* in arid parts of Washington. *Torrey Botan. Club Bull.* 1914, 41: 337-345.
- USDA Forest Service. Glossary of terms used in forest fire control. Agric. Handb. 104, Gov. Print. Off., Washington D.C. 1956, 24 s.
- VACEK, Z.; VACEK, S.; BÍLEK, L.; BALÁŠ, M. Základy pěstování lesů. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha, Česká republika. 2020, 120 s.
- VAN HERWAARDEN, Sander. Calorimetry measurement. In: *Mechanical Variables Measurement-Solid, Fluid, and Thermal*. CRC Press, 2000. 1-17.
- VAN WAGNER, C. E. Conditions for the start and spread of crown fire. *Canadian Journal of Forest Research*. 1977, 7.1: 23–24.
- VAN WAGNER, C. E. Development and Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Forestry Technical Report 35. Chalk River, Petawawa National Forest Forestry Institute, Canadian Forestry Service: 37, 1987.
- VAN WAGTENDONK, J. W. The history and evolution of wildland fire use. *Fire Ecology*, 2007, 3.2: 3-17.
- VASCONCELOS, M. J.; GUERTIN, D. P. FIREMAP – simulation of fire growth with a geographic information system. *International Journal of Wildland Fire*. 1992, 2.2: 87-96.
- VICENA, I.; PAŘEZ, J.; KONOPKA, J. Ochrana lesa proti polomům. Ministerstvo lesního a vodního hospodářství ČSR. I. vydání. Praha, Česká republika. 1979, 244 s.
- VICENTE-SERRANO, S. M.; GONZÁLEZ-HIDALGO, J. C.; DE LUIS, M. & RAVENTÓS, J. Drought patterns in the Mediterranean area: the Valencia region (eastern Spain). *Climate Research*, 2004, 26.1: 5-15.

- VIEGAS, D. X. Fuel moisture evaluation for fire behaviour assessment. In G. Eftichidis, P. Balabaris, & A. Ghazi (Eds.), *Advanced study course on wildfire management. Final Report, Marathon*. Athens: European Union, 1998, 81-92.
- VIEGAS, D. Slope and wind effect on fire propagation, *International Journal of Wildland Fire*. 2004, 13: 143–156.
- WANGENHEIM, G. J. The long range air temperature and rivers break-up forecast. *GGO, Transactions*, 1940, 10.
- WEBER, R. O. Modelling fire spread through fuel beds. *Progress in Energy and Combustion Science*. 1991, 17.1: 67–82.
- WILLIAMS, F. A. *Combustion Theory: the Fundamental Theory of Chemically Reacting Flow Systems*. 2. vyd., Addison-Wesley Publishing Company: Reading, Massachusetts, USA. 1985.
- WOLFF, M. F.; CARRIER, G. F.; FENDELL, F. E. Wind-aided firespread across arrays of discrete fuel elements. II. Experiment. *Combustion Science and Technology*. 1991, 77: 261-289.
- ZLATNÍK, A. *Lesnická fytoecnologie*. SZN, Praha, Česká republika. 1978, 495 s.
- ZPRÁVA O STAVU LESA. *Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství 2022*, Ministerstvo zemědělství ČR, Praha, Česká republika. 2023, 138 s.
- WEIR, J. R. *Conducting prescribed fires: a comprehensive manual*. Texas A&M University Press, Texas, USA. 2009.

## **Normy, zákony, vyhlášky**

- Česká republika. ČSN. ČSN EN 1991-1-4 (730035) Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-4: Obecná zatížení – Zatížení větrem. 2007. Dostupná také z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-1991-1-4-730035-221172.html>
- Československo. ČSN. ČSN 64 0149 Stanovení vznětlivosti materiálů. 1978. Dostupná také z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-64-0149-640149-211648.html>
- Česká republika. ČSN. ČSN EN 15170 (758066) Charakterizace kalů – Stanovení spalného tepla a výhřevnosti. 2009. Dostupná také z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-15170-758066-226771.html>
- Česká republika. Pokyn. Pokyn č. 10/2006 generálního ředitele HZS ČR a náměstka ministra vnitra ze dne 13. března 2006, kterým se stanoví pravidla statistického sledování událostí a

dokumentace o vedení zásahu. 2006. Dostupný také z: [https://www.hasici-vzdelavani.cz/download/bravansky/pokyn\\_ssu.pdf](https://www.hasici-vzdelavani.cz/download/bravansky/pokyn_ssu.pdf)

Slovenská socialistická republika. Směrnice. Směrnice MLVH SSR č.j. 730/110-77 na zabezpečenie a organizačné usporiadanie požiarnej ochrany. 1974.

## **Webové odkazy**

Český hydrometeorologický ústav [online]. Praha, 2024 [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: [www.chmi.cz](http://www.chmi.cz)

ESRI. ArcGIS Blog. Why GIS is important for Fire and EMS Agencies [online]. Kalifornie, 2021 [cit. 2024-05-15]. Dostupné z: <https://www.esri.com/en-us/lg/industry/public-safety/fire-service-ebook>

FRAMES. Behave<sup>7</sup> Fire Modeling System [online]. Missoula, 2024 [cit. 2024-04-14]. Dostupné z: <https://www.frames.gov/behave/home>

Generalitat Valenciana. App GVA 112 Avisos [online]. Valencia, 2024 [cit. 2024-4-23]. Dostupné z: <https://www.112cv.gva.es/es/app-gva-112-avisos>

National Wildfire Coordinating Group. Incident Response Pocket Guide [online]. Boise, 2024 [cit. 2024-5-3]. Dostupné z: <http://www.nwecg.gov/publications/pms461>

Parr Instrument Company. 6400 Automatic Isoperibol Calorimeter [online]. Illinois, 2024 [cit. 2024-03-10]. Dostupné z: <https://www.parrinst.com/products/oxygen-bomb-calorimeters/6400-automatic-isoperibol-calorimeter/>

Supergeo. Spatial Analyst Extension Help [online]. Taiwan, 2016 [cit. 2024-4-4]. Dostupné z: [https://www.supergeotek.com/SpatialAnalyst\\_ENG\\_HTML/aspect.htm](https://www.supergeotek.com/SpatialAnalyst_ENG_HTML/aspect.htm)

TechnoSylva. Wildfire Analyst Pocket Edition [online]. Kalifornie, 2024 [cit. 2024-5-1]. Dostupné z: <https://pocket.wildfireanalyst.com/>

Vallfirest [online]. Colorado, 2024 [cit. 2024-5-10]. Dostupné z: <https://www.vallfirest.com/en/>

Portugal Wildfires. Wildfires on slopes [online]. Lisabon, 2018 [cit. 2023-10-20]. Dostupné z: <https://www.portugalwildfires.com/wildfires-on-slopes/>

## 10 Seznam obrázků, grafů a tabulek

### 10.1 Seznam obrázků

**Obr. 3:** Trojúhelník hoření podle Emmons 1973 (Pecl et al. 2021).

**Obr. 4:** Proces hoření (Cottrell 2004; Thomas & McAlpine 2010).

**Obr. 3:** Proces žhnoucího spalování (Cottrell 2004; Thomas & McAlpine 2010).

**Obr. 4:** Přenos tepla, 1 - konvekce, 2 - radiace, 3 – kondukce (Pecl et al. 2021).

**Obr. 5:** a) Konvekční sloupec podporující vznik ohňových vírů; b) konvekční sloupec ohnutý vanutím větru způsobující vznik bodových požárů (Thomas & McAlpine 2010).

**Obr. 6:** Oblast postihnutá větrnou kalamitou (foto Ján Slivinský).

**Obr. 7:** Postupný rozpad porostů postihnutých kůrovcovou kalamitou (foto Ján Slivinský).

**Obr. 8:** Kalamitní plochy ve vztahu k lesnímu požáru; a) okamžitá změna způsobená větrnou kalamitou; b) pozvolná změna prostředí způsobená kůrovcovou kalamitou (Berčák et al. 2023).

**Obr. 9:** Přenos tepla fronty požáru při bezvětří (Pecl et al. 2021 podle Rothermel 1972); 1 – radiace působící na palivo a porost, 2 – vnitřní přenos tepla radiací a konvekcí.

**Obr. 10:** Přenos tepla fronty požáru při větrném počasí (Pecl et al. 2021 podle Rothermel 1972); 1 – intenzivní radiace působící na palivo a porost, 2 – vnitřní přenos tepla radiací a konvekcí, 3 – konvekce, 4 – dotyk plamene, 5 – směr větru.

**Obr. 11:** Schéma turbulentního proudění (Pecl et al. 2021).

**Obr. 12:** Přenos tepla fronty požáru ve svahovitém terénu (Pecl et al. 2021 podle Wildfires on slope 2018); 1 – intenzivní radiace působící na palivo a porost, 2, 3 – konvekce, 4 – vnitřní přenos tepla radiací a konvekcí.

**Obr. 13:** Příklad změny rychlosti šíření lesního požáru ve svahovitém terénu (Pecl et al. 2021).

**Obr. 14:** Šíření lesního požáru směrem dolů ve svahovitém terénu (Ošťádal 2020; Pecl et al. 2021); 1 – proudění čerstvého vzduchu, 2 – směr předehřívání, 3 – ze svahu dolů padající hořící palivo.

**Obr. 15:** Charakteristika expozice terénu z hlediska potenciálu vzniku a šíření požáru (Ošťádal 2020).

**Obr. 16:** Komínový/příkopový efekt v ostrém zářezu v krajině (Pecl et al. 2021 podle Wildfires on slope 2018); 1 – směr proudění čerstvého vzduchu, 2 – směr šíření požáru, 3 – odtah kouře, pásmo přípravy hoření.

**Obr. 17:** Šíření lesního požáru v roklí, úzkém údolí (Pecl et al. 2021 podle Wildfires on slope 2018); 1 – odletující části hořícího paliva přenáší požár na protilehlý svah údolí, 2 – směr šíření hlavního požáru po svahu nahoru.

**Obr. 18:** Protipožární pás ve stejnověkém porostu, který vznikl zalesněním předchozího požářiště. Pás je realizován dle metodiky Szczygiel et al. 2020. (foto Roman Berčák).

**Obr. 19:** Schéma šíření požáru pomocí přenosu na blízkého souseda; černý raster – spálená plocha, červený – hořící plocha; bílý – nehořící plocha (Sullivan 2009c).

**Obr. 20:** Ukázka způsobu výpočtu perimetru požáru pomocí Huygensova principu šíření vln (Sullinan 2009c).

**Obr. 21:** Převod palivové skupiny živé byliny do kategorie mrtvé byliny v závislosti na vlhkosti živých bylin (Burgan 1979a; Andrews 2018).

**Obr. 22:** Základní rozdělení intenzity požáru (Sullivan 2021).

**Obr. 23:** Základní rozdělení závažnosti požáru; A) – nízká závažnost; B) – střední závažnost; C) – vysoká závažnost (foto Roman Berčák).

**Obr. 24:** Mapa lokalit, ve kterých probíhala kvantifikace pozemního paliva.

**Obr. 25:** Postup kvantifikace pozemního paliva.

**Obr. 26:** Měření vlhkosti paliva pomocí sušící váhy.

**Obr. 27:** Laboratorní měření spalného tepla v kalorimetru.

**Obr. 28:** Přehled konstant pro výpočet parametrů požáru.

**Obr. 29:** Grafické schéma struktury praktické části dizertační práce.

**Obr. 30:** Požár č. 1 – perimetr požáru, fotografická dokumentace.

**Obr. 31:** Požár č. 2 – perimetr požáru, fotografická dokumentace.

**Obr. 32:** Požár č. 3 – perimetr požáru, fotografická dokumentace.

**Obr. 33:** Požár č. 4 – perimetr požáru, fotografická dokumentace.

**Obr. 34:** Požár č. 5 – perimetr požáru, fotografická dokumentace.

**Obr. 35:** Požár č. 6 – perimetr požáru, fotografická dokumentace.

**Obr. 36:** Požár č. 7 – perimetr požáru, fotografická dokumentace.

**Obr. 37:** Požár č. 8 – perimetr požáru, fotografická dokumentace.

**Obr. 38:** Požár č. 9 – perimetr požáru, fotografická dokumentace.

**Obr. 39:** Požár č. 10 – perimetr požáru, fotografická dokumentace.

**Obr. 40:** Požár č. 11 – perimetr požáru, fotografická dokumentace.

**Obr. 41:** Příklad dostupných vrstev pro identifikaci palivového modelu v místě vzniku lesního požáru.

**Obr. 42:** Ukázka identifikace parametrů ke konkrétnímu bodu v připravených vrstvách.



- Obr. 43:** Identifikování expozice na základě hodnoty stupně (Supergeo 2016).
- Obr. 44:** Ukázka kapesního průvodce „National Wildfire Coordinating Group – Incident Response Pocket Guide (IRPG)“ (National Wildfire Coordinating Group 2024).
- Obr. 45:** Pravčický důl v Národním parku České Švýcarsko po požáru; A) vysoká závažnost požáru; B) kompletně vyhořelé kmeny stromů (foto Roman Berčák).
- Obr. 46:** Ukázka typického prostředí s výskytem palivového modelu PM1 – Travniny.
- Obr. 47:** Ukázka typického prostředí s výskytem palivového modelu PM2 – Byliny, mechy.
- Obr. 48:** Ukázka typického prostředí s výskytem palivového modelu PM3 – Hrabanka.
- Obr. 49:** Ukázka typického prostředí s výskytem palivového modelu PM4 – Neutrální.
- Obr. 50:** Ukázka aplikace MapitGIS využívaná pro identifikaci perimetru reálných požářišť (MapitGIS 2024).
- Obr. 51:** Kapesní meteorologická stanice Kestrel 3000 Pocket Wind Meter (Valfirest, 2024).
- Obr. 52:** Ukázka z prostředí aplikace Wildfire Analyst Pocket (TechnoSylva 2024).
- Obr. 53:** Ukázka z prostředí aplikace GVA 112 Avisos (Generalitat Valenciana 2024).

## 10.2 Seznam grafů

- Graf 1:** Výsledky váhy sušiny (kg/m<sup>2</sup>) jednotlivých segmentů pozemního paliva distribuované dle stádií z hlediska problematiky lesních požárů; průměr +- směrodatná odchylka.
- Graf 2:** Výsledky váhy sušiny (kg/m<sup>2</sup>) jednotlivých segmentů pozemního paliva distribuované dle převládající dřeviny v daných lesních porostech; průměr +- směrodatná odchylka.
- Graf 3:** Srovnání procentuálního pokryvu jednotlivými typy vegetace v rámci stádií z hlediska problematiky lesních požárů; průměr +- směrodatná odchylka.
- Graf 4:** Screeplot s hodnotami vlastního čísla a variabilitou na jednotlivých komponentách.
- Graf 5:** Biplot výsledků analýzy hlavních komponent s vyznačením clusterů.
- Graf. 6:** Srovnání sušiny vegetace, hrabanky a drobného dřeva v rámci jednotlivých palivových modelů.
- Graf. 7:** Srovnání pokryvu povrchu lesní půdy bylinami, travinami a mechy v rámci jednotlivých palivových modelů.
- Graf. 8:** Bodový graf srovnávající skutečnou a modelovou velikost analyzovaných požářišť s hodnotami Pearsonova korelačního koeficientu.

## 10.3 Seznam tabulek

- Tabulka 1:** Vstupní proměnné pro účely výpočtu Rothermelova matematického modelu šíření pozemního požáru (Rothermel 1972; Andrews 2018).

**Tabulka 2:** Popis palivových typů vstupujících do výpočtů Rothermelova matematického modelu šíření pozemního lesního požáru (Andrews 2018).

**Tabulka 3:** Přiřazení jednotlivých skupin dle kvantifikace pozemního paliva do palivových typů Rothermelova matematického modelu šíření pozemního požáru.

**Tabulka 4:** Vlhkost jemného paliva v souvislosti s relativní vlhkostí vzduchu a s tím související pravděpodobnost zapálení a další projevy požáru (National Wildfire Coordinating Group 1992).

**Tabulka 5:** Parametry vlhkosti živého paliva vstupující do Rothermelova matematického modelu šíření pozemního požáru (Fireline Handbook 2004).

**Tabulka 6:** Vlhkost živého paliva vstupující do výpočtů požárních charakteristik validovaných požářišť.

**Tabulka 7:** Kategorie terénu pro účely přepočtu rychlosti větru (upraveno podle ČSN 1991-1-4).

**Tabulka 8:** Výsledky přepočtu rychlosti větru.

**Tabulka 9:** Srovnání váhy sušiny jednotlivých segmentů pozemního paliva ( $\text{kg/m}^2$ ) v rámci jednotlivých ekologických řad.

**Tabulka 10:** Výsledky měření produkce spalného tepla ( $\text{MJ/kg}$ ) u jednotlivých segmentů pozemního paliva a jejich částí.

**Tabulka 11:** Výsledky měření produkce spalného tepla ( $\text{MJ/kg}$ ) u jednotlivých segmentů pozemního paliva bez ohledu na typ vegetace nebo převládající druh dřeviny.

**Tabulka 12:** Laboratorní výsledky analýzy teploty žhnutí, vzplanutí a vznícení pro jednotlivé segmenty pozemního paliva.

**Tabulka 13:** Korelační matice prediktorů použitých pro statistické zpracování.

**Tabulka 14:** Vlastní číslo (eigenvalues) a míra promítnuté variability na komponentách.

**Tabulka 15:** Komunality proměnných na jednotlivých komponentách.

**Tabulka 16:** Datový soubor jednotlivých skupin s doplněnými souřadnicemi dvou hlavních komponent.

**Tabulka 17:** Zařazení jednotlivých skupin do jednotlivých palivových modelů na základě výsledků analýzy hlavních komponent a clusterové analýzy K průměrů.

**Tabulka 18:** Základní výsledky a požárně technické charakteristiky palivového modelu PM1 – Travniny.

**Tabulka 19:** Základní výsledky a požárně technické charakteristiky palivového modelu PM2 – Byliny, mechy.

**Tabulka 20:** Základní výsledky a požárně technické charakteristiky palivového modelu PM3 – Hrabanka.

**Tabulka 21:** Základní výsledky a požárně technické charakteristiky palivového modelu PM4-Neutrální.

**Tabulka 22:** Srovnání celkového množství potenciální tepelné energie ( $\text{MJ/m}^2$ ) v typu segmentu vegetace v rámci identifikovaných palivových modelů.

**Tabulka 23:** Srovnání potenciální tepelné energie (spalného tepla) v jednotlivých palivových modelech.

**Tabulka 24:** Vstupní a výstupní proměnné v rámci validace požáru č. 1.

**Tabulka 25:** Vstupní a výstupní proměnné v rámci validace požáru č. 2.

**Tabulka 26:** Vstupní a výstupní proměnné v rámci validace požáru č. 3.

**Tabulka 27:** Vstupní a výstupní proměnné v rámci validace požáru č. 4.

**Tabulka 28:** Vstupní a výstupní proměnné v rámci validace požáru č. 5.

**Tabulka 29:** Vstupní a výstupní proměnné v rámci validace požáru č. 6.

**Tabulka 30:** Vstupní a výstupní proměnné v rámci validace požáru č. 7.

**Tabulka 31:** Vstupní a výstupní proměnné v rámci validace požáru č. 8.

**Tabulka 32:** Vstupní a výstupní proměnné v rámci validace požáru č. 9.

**Tabulka 33:** Vstupní a výstupní proměnné v rámci validace požáru č. 10.

**Tabulka 34:** Vstupní a výstupní proměnné v rámci validace požáru č. 11.

**Tabulka 35:** Korelace proměnných vstupující do modelu se skutečnou velikostí požáru a hlavními výstupy z modelování – velikost požáru, rychlost šíření a intenzita požáru.

**Tabulka 36:** Přehled základních vstupních proměnných do procesu validace a vybrané výsledné proměnné.

**Tabulka 37:** Srovnání vybraných palivových modelů Scott & Burgan (2005) s palivovým modelem PM1-Traviny; hodnoty jsou uváděny v jednotkách angloamerické soustavy – tuny na akr ( $\text{t/ac}$ ) a stopy (ft).

**Tabulka 38:** Srovnání vybraných palivových modelů Scott & Burgan (2005) s palivovým modelem PM2-Byliny, mechy; hodnoty jsou uváděny v jednotkách angloamerické soustavy – tuny na akr ( $\text{t/ac}$ ) a stopy (ft).

**Tabulka 39:** Srovnání vybraných palivových modelů Scott & Burgan (2005) s palivovým modelem PM3-Hrabanka; hodnoty jsou uváděny v jednotkách angloamerické soustavy – tuny na akr ( $\text{t/ac}$ ) a stopy (ft).

**Tabulka 40:** Srovnání vybraných palivových modelů Scott & Burgan (2005) s palivovým modelem PM4-Neutrální; hodnoty jsou uváděny v jednotkách angloamerické soustavy – tony na akr (t/ac) a stopy (ft).

**Tabulka 41:** Klasifikace požárů v přírodním prostředí a základní požární charakteristiky (upraveno podle Tedim et al. 2018).

# 11 Přílohy

Kódy palivového modelu	Stručný popis modelu	Typ	Zásoba paliva (tuny/akr)						Poměr povrchu a objemu (ft <sup>2</sup> /ft <sup>3</sup> )			Výška paliva (ft)	Vlhkost vyhasnutí mrtvého paliva (%)	Objemová hmotnost (lb/ft <sup>3</sup> )	Relativní stíněnost paliva
			Statický/ Dynamický	1-h palivo	10-h palivo	100-h palivo	Živé byliny	Živé dřevo	1-h palivo	Živé a mrtvé byliny	Živé dřevo				
1	1	Krátké traviny	S	0,74	0	0	0	0	3 500	--	--	1	12	0,03	0,25
2	2	Traviny v lese a podrost	S	2	1	0,5	0,5	0	3 000	1 500	--	1	15	0,18	1,14
3	3	Vysoké traviny	S	3	0	0	0	0	1 500	--	--	2,5	25	0,06	0,21
4	4	Chaparral	S	5	4	2	0	5	2 000	--	1 500	6	20	0,12	0,52
5	5	Křoviny	S	1	0,5	0	0	2	2 000	--	1 500	2	20	0,08	0,33
6	6	Křoviny, větve tvrdého dřeva	S	1,5	2,5	2	0	0	1 750	--	--	2,5	25	0,11	0,43
7	7	Jižní drsný	S	1,1	1,9	1,5	0	0,37	1 750	--	1 500	2,5	40	0,09	0,34
8	8	Hrabanka krátké jehlice	S	1,5	1	2,5	0	0	2 000	--	--	0,2	30	1,15	5,17
9	9	Hrabanka dlouhé jehlice nebo listnatý opad	S	2,9	0,41	0,15	0	0	2 500	--	--	0,2	25	0,8	4,5
10	10	Hrabanka a podrost	S	3	2	5	0	2	2 000	--	1 500	1	25	0,55	2,35
11	11	Nízká zásoba těžebních zbytků	S	1,5	4,5	5,5	0	0	1 500	--	--	1	15	0,53	1,62
12	12	Střední zásoba těžebních zbytků	S	4	14	16,5	0	0	1 500	--	--	2,3	20	0,69	2,06
13	13	Vysoká zásoba těžebních zbytků	S	7	23	28	0	0	1 500	--	--	3	25	0,89	2,68
GR1	101	Krátká tráva na suchých stanovištích	D	0,1	0	0	0,3	0	2 200	2 000	--	0,4	15	0,05	0,22
GR2	102	Traviny na suchých stanovištích (nízká zásoba)	D	0,1	0	0	1	0	2 000	1 800	--	1	15	0,05	0,22
GR3	103	Drsné traviny na vlhkých stanovištích (nízká zásoba)	D	0,1	0,4	0	1,5	0	1 500	1 300	--	2	30	0,05	0,15
GR4	104	Traviny na suchých stanovištích (střední zásoba)	D	0,25	0	0	1,9	0	2 000	1 800	--	2	15	0,05	0,22
GR5	105	Traviny na vlhkých stanovištích (nízká zásoba)	D	0,4	0	0	2,5	0	1 800	1 600	--	1,5	40	0,09	0,35
GR6	106	Traviny na vlhkých stanovištích (střední zásoba)	D	0,1	0	0	3,4	0	2 200	2 000	--	1,5	40	0,11	0,51
GR7	107	Traviny na suchých stanovištích (vysoká zásoba)	D	1	0	0	5,4	0	2 000	1 800	--	3	15	0,1	0,43
GR8	108	Drsné traviny na vlhkých stanovištích (vysoká zásoba)	D	0,5	1	0	7,3	0	1 500	1 300	--	4	30	0,1	0,33
GR9	109	Traviny na vlhkých stanovištích (velmi vysoká zásoba)	D	1	1	0	9	0	1 800	1 600	--	5	40	0,1	0,4
GS1	121	Suché travino-křoviny (nízká zásoba)	D	0,2	0	0	0,5	0,65	2 000	1 800	1 800	0,9	15	0,07	0,3
GS2	122	Suché travino-křoviny (střední zásoba)	D	0,5	0,5	0	0,6	1	2 000	1 800	1 800	1,5	15	0,08	0,35
GS3	123	Vlhké travino-křoviny (střední zásoba)	D	0,3	0,25	0	1,45	1,25	1 800	1 600	1 600	1,8	40	0,08	0,33
GS4	124	Vlhké travino-křoviny (vysoká zásoba)	D	1,9	0,3	0,1	3,4	7,1	1 800	1 600	1 600	2,1	40	0,28	1,12
SH1	141	Suché křoviny (nízká zásoba)	D	0,25	0,25	0	0,15	1,3	2 000	1 800	1 600	1	15	0,09	0,36
SH2	142	Suché křoviny (střední zásoba)	S	1,35	2,4	0,75	0	3,85	2 000	--	1 600	1	15	0,38	1,56
SH3	143	Vlhké křoviny (střední zásoba)	S	0,45	3	0	0	6,2	1 600	--	1 400	2,4	40	0,18	0,64
SH4	144	Vlhké křovino-stromy (nízká zásoba)	S	0,85	1,15	0,2	0	2,55	2 000	1 800	1 600	3	30	0,07	0,3
SH5	145	Suché křoviny (vysoká zásoba)	S	3,6	2,1	0	0	2,9	750	--	1 600	6	15	0,07	0,21
SH6	146	Vlhké křoviny (nízká zásoba)	S	2,9	1,45	0	0	1,4	750	--	1 600	2	30	0,13	0,39
SH7	147	Suché křoviny (velmi vysoká zásoba)	S	3,5	5,3	2,2	0	3,4	750	--	1 600	6	15	0,11	0,35
SH8	148	Vlhké křoviny (vysoká zásoba)	S	2,05	3,4	0,85	0	4,35	750	--	1 600	3	40	0,16	0,57
SH9	149	Vlhké křoviny (velmi vysoká zásoba)	D	4,5	2,45	0	1,55	7	750	1 800	1 500	4,4	40	0,16	0,56
TU1	161	Suché stromy-traviny-křoviny (nízká zásoba)	D	0,2	0,9	1,5	0,2	0,9	2 000	1 800	1 600	0,6	20	0,28	1,12
TU2	162	Vlhké křovino-stromy (střední zásoba)	S	0,95	1,8	1,25	0	0,2	2 000	--	1 600	1	30	0,19	0,82
TU3	163	Vlhké stromy-traviny-křoviny (střední zásoba)	D	1,1	0,15	0,25	0,65	1,1	1 800	1 600	1 400	1,3	30	0,11	0,45
TU4	164	Podrost klečových porostů	S	4,5	0	0	0	2	2 300	--	2 000	0,5	12	0,6	3,06
TU5	165	Suché křovino-stromy (velmi vysoká zásoba)	S	4	4	3	0	3	1 500	--	750	1	25	0,64	2,03
TL1	181	Kompaktní jehličnatá hrabanka (nízká zásoba)	S	1	2,2	3,6	0	0	2 000	--	--	0,2	30	1,56	6,49
TL2	182	Listnatý opad (nízká zásoba)	S	1,4	2,3	2,2	0	0	2 000	--	--	0,2	25	1,35	5,87
TL3	183	Jehličnatá hrabanka (střední zásoba)	S	0,5	2,2	2,8	0	0	2 000	--	--	0,3	20	0,84	3,19

Kódy palivových o modelu	Stručný popis modelu	Typ	Zásoba paliva (tuny/akr)						Poměr povrchu a objemu (ft <sup>2</sup> /ft <sup>3</sup> )			Výška paliva (ft)	Vlhkost vyhasnutí mrtvého paliva (%)	Objemová hmotnost (lb/ft <sup>3</sup> )	Relativní stísněnost paliva
			Statický/ Dynamický	1-h palivo	10-h palivo	100-h palivo	Živé byliny	Živé dřevo	1-h palivo	Živé a mrtvé byliny	Živé dřevo				
TL4 184	Ležící malé kmeny	S	0,5	1,5	4,2	0	0	2 000	--	--	0,4	25	0,71	2,75	
TL5 185	Jehličnatá hrabanka (vysoká zásoba)	S	1,15	2,5	4,4	0	0	2 000	--	1 600	0,6	25	0,62	2,56	
TL6 186	Listnatý opad (střední zásoba)	S	2,4	1,2	1,2	0	0	2 000	--	--	0,3	25	0,73	3,37	
TL7 187	Ležící větší kmeny	S	0,3	1,4	8,1	0	0	2 000	--	--	0,4	25	1,12	3,56	
TL8 188	Jehličnatá hrabanka (dlouhé jehlice)	S	5,8	1,4	1,1	0	0	1 800	--	--	0,3	35	1,27	5,42	
TL9 189	Listnatý opad (velmi vysoká zásoba)	S	6,65	3,3	4,15	0	0	1 800	--	1 600	0,6	35	1,08	4,52	
SB1 201	Ležící dřevo s nízkou aktivitou při hoření	S	1,5	3	11	0	0	2 000	--	--	1	25	0,71	2,87	
SB2 202	Ležící dřevo se střední aktivitou při hoření (nízký vývrat)	S	4,5	4,25	4	0	0	2 000	--	--	1	25	0,59	2,63	
SB3 203	Ležící dřevo s vysokou aktivitou při hoření (střední vývrat)	S	5,5	2,75	3	0	0	2 000	--	--	1,2	25	0,43	1,97	
SB4 204	Vysoká zásoba vývrácených stromů	S	5,25	3,5	5,25	0	0	2 000	--	--	2,7	25	0,24	1,08	

\* konstatními parametry pro všechny palivové modely jsou: Poměr povrchu a objemu 10-h paliva (109 ft<sup>2</sup>/ft<sup>3</sup>) a 100-h paliva (30 ft<sup>2</sup>/ft<sup>3</sup>); výhřevnost 8000 Btu/lb; hustota částic 32 lb/ft<sup>2</sup>; celkový obsah minerálních látek 0,0555; efektivní obsah minerálních látek 0,010.

*Příloha 1: Popis základních parametrů palivových modelů dle Anderson (1982) a Scott & Burgan (2005).*

Kategorie (skupina)	Sušina hrabanka	Pokryv mechu	Pokryv bylinami	Pokryv travinami	Souřadnice komponenta 1	Souřadnice komponenta 2
4_BO_ky	1,245946559	2,342158022	2,037523038	-0,742251828	-2,139429738	-2,614725474
4_BO_og	-0,088808215	2,619289038	2,10156567	0,019145318	-0,775699978	-3,243225859
4_BK_ex	-1,060664189	-0,685601725	-0,844395384	-0,757815754	0,458932178	0,914761777
4_BK_ky	-1,122621839	-0,47465125	-0,460139594	-0,228642267	0,765445384	0,421921881
4_BK_ži	-0,272882834	-0,685601725	-0,569926963	-0,649821165	-0,041004609	0,884418016
4_DB_ky	0,303712462	-0,675054201	1,605235275	-0,190844161	-0,455867736	-0,558198726
4_DB_og	-0,214436775	-0,680913936	1,888090231	1,090091659	0,738560186	-1,036492963
4_DB_ži	1,994472486	-0,685601725	-0,844395384	-0,757815754	-1,60297706	1,587944
4_SM_hu	0,38185437	-0,685601725	-0,764342095	-0,757815754	-0,527202553	1,177386935
4_SM_ky	1,442534953	0,399286428	-0,112479594	-0,563425493	-1,425553092	0,201509151
4_SM_vo	0,991467215	-0,685601725	0,11624409	-0,757815754	-1,077011289	0,70422887
4_SM_og	-0,022190698	-0,305890871	-0,844395384	-0,729467174	-0,297467693	0,882978145
4_SM_ži	1,990868152	-0,199054663	0,38584291	-0,448115142	-1,675513254	0,367613608
3_BO_hu	0,859137749	1,423903017	-0,844395384	-0,757815754	-1,254450805	-0,088763704
3_BO_ky	0,584869701	2,008537188	1,255288038	-0,717317783	-1,486996457	-1,998513012
3_BO_og	0,392978206	0,341023916	0,548531853	-0,187694319	-0,549068723	-0,497093661
3_BO_ži	-1,675338447	-0,263700776	-0,844395384	2,644013802	3,148578678	0,034690744
3_BK_ky	-1,170153041	-0,685601725	-0,844395384	-0,757815754	0,532826115	0,890636523
3_BK_ži	-0,44895238	-0,653959153	-0,354469252	-0,748366227	-0,030616764	0,688893641
3_DB_ky	-0,927994741	-0,01759189	1,076883564	0,029644792	0,481108726	-0,939485614
3_DB_og	-0,588990589	-0,661493099	-0,322905384	-0,00185363	0,577952357	0,540561347
3_DB_ži	0,55132266	-0,67153836	1,076883564	-0,757815754	-0,933704489	-0,064973347
3_SM_hu	2,019091922	-0,685601725	-0,844395384	-0,757815754	-1,619592697	1,593368754
3_SM_ky	1,326411027	-0,225528786	-0,830671963	-0,750616114	-1,240368929	1,119178781
3_SM_vo	1,270752391	-0,685601725	-0,604235516	-0,757815754	-1,152279377	1,262799201
3_SM_og	-0,366693705	0,947757661	-0,844395384	-0,433831987	-0,108250672	-0,080622627
3_SM_ži	1,459804492	-0,25422953	-0,417008843	-0,715389308	-1,365297614	0,877853217
1_BO_ky	1,248068286	-0,660287668	0,269946406	-0,058550789	-0,794586533	0,543201321
1_BO_og	-0,41539149	0,031629888	-0,709905858	0,621815122	0,816722127	0,292859407
1_BK_ky	-1,490703503	-0,516841345	-0,460139594	1,963647891	2,542040188	0,073340247
1_BK_ži	-1,384933944	-0,593310892	0,95680363	1,391951535	1,866796895	-0,751945265
1_DB_ky	-1,202266525	2,689605862	2,998162512	-0,682219541	-0,665275871	-4,059949759
1_DB_og	-1,682616061	0,059756617	-0,043862489	1,52896967	2,190626832	-0,587350888
1_SM_hu	-1,682616061	-0,64341163	-0,844395384	2,958998021	3,447043488	0,247335063
1_SM_ky	0,164015524	0,051720409	0,967096196	1,544268904	0,797665101	-0,874509119
1_SM_vo	0,381281076	-0,685601725	0,253478301	-0,730817106	-0,668046089	0,471459713
1_SM_og	-0,65455172	1,002002069	-0,844395384	1,321080086	1,291890096	-0,417685091
1_SM_ži	-0,965402047	-0,432461156	-0,020990121	2,014945321	2,137357561	-0,177853016
2_BO_ky	-0,095293738	2,496234594	-0,380086305	-0,628672224	-0,806076836	-1,361973088
2_BO_og	-0,222285836	1,204514524	-0,652267489	0,618035311	0,442470309	-0,497000944
2_BK_ky	-0,275818228	-0,685601725	-0,652267489	-0,599063708	0,009104068	0,933721426
2_BK_ži	-0,299221065	-0,664506677	-0,844395384	-0,75309099	-0,055866785	1,067638118
2_DB_ky	-0,70172596	-0,673547412	1,92773567	-0,747016295	-0,213847276	-0,92814556
2_DB_og	0,101736897	-0,385583272	-0,652267489	0,670112702	0,574751385	0,642660506
2_SM_hu	-0,173435646	-0,685601725	-0,844395384	-0,757815754	-0,139857639	1,110257608
2_SM_ky	-0,171919476	-0,271234722	0,143690932	0,023795085	0,163651951	0,043200006
2_SM_vo	0,664288637	-0,655465943	-0,844395384	-0,055850925	-0,224561659	1,179685454
2_SM_og	-0,233518792	1,030128799	-0,203969068	0,628114806	0,421121047	-0,692173447
2_SM_ži	0,236812779	-0,52567183	-0,419926779	-0,127554309	-0,078172461	0,714577704

*Příloha 2: Datový soubor kategorií (skupin) se standardizovanými hodnotami proměnných pro účely vyhodnocení pomocí clusterové analýzy.*