

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Fakulta lesnická a dřevařská**

**Katedra ochrany lesa a entomologie**



**Fakulta lesnická  
a dřevařská**

**Míra odhořívání pozemního paliva lesních požárů**

**Bakalářská práce**

**Petr Mišek**

**Ing. Roman Berčák**

**2024**

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Petr Mišek

Lesnictví

Ochrana a pěstování lesních ekosystémů

Název práce

**Míra odhořívání pozemního paliva lesních požárů**

Název anglicky

**Consumption of flammable material during a surface forest fire**

### Cíle práce

- Stanovit míru odhořívání pozemního paliva při pozemním lesním požáru
- Vyhodnotit množství uvolněné tepelné energie při daném požáru v závislosti na míře vyhořelého materiálu.

### Metodika

Pro účely zpracování závěrečné práce bude využito databáze lesních požárů HZS České republiky. Z této databáze bude vytipováno minimálně deset lesních požárů, na kterých následně bude probíhat měření míry odhořívání materiálu na povrchu lesní půdy (do 30.6.2023)

Celkově na každém požářišti bude založeno 10 studijních ploch (5 dvojic) s rozměry 1 x 1 metr. Dvojice studijních ploch se budou nacházet těsně vedle sebe, a to tak, že první z dvojice bude vně požářiště a druhá studijní plocha bude uvnitř požářiště. V rámci měření budou zjišťovány váhy jednotlivých segmentů pozemního paliva, které budou zaznamenány do terénního formuláře. Dále bude pořízen fotografický záznam studijních ploch, požářiště a okolí, popsána struktura lesního porostu (dřevinná skladba, věk, zakmenění aj.) a odebrány vzorky pro účely laboratorního zjištění množství sušiny paliva pomocí analyzátoru vlhkosti. Celkově bude analyzováno 100 studijních ploch (do 31.8.2023).

Výsledky budou vhodně statisticky vyhodnoceny s cílem určit míru vyhořelého materiálu a také množství uvolněné tepelné energie při daném požáru (do 31.12.2023).

do konce června 2023 – vytipované lesní požáry vhodné pro zpracování závěrečné práce

červenec – srpen 2023 – terénní práce

září – říjen 2023 – laboratorní práce (analyzování vlhkosti)

do konce prosince 2023 – statistické vyhodnocení výsledků

leden – únor 2024 – literární rešerše

do konce března 2024 – předložení závěrečné práce

**Doporučený rozsah práce**

30 s.

**Klíčová slova**

palivo, intenzita hoření, lesní požár

---

**Doporučené zdroje informací**

- Berčák, R., Holuša, J., Lukášová, K., Hanuška, Z., Agh, P., Vaněk, J., Chromek, I. (2018). Lesní požáry v České republice—Charakteristika, prevence a hašení. Zprávy lesnického výzkumu, 63(3), 184-194.
- Hlaváč, P., Chromek, I. (2016). Lesné požiare a integrovaný systém ochrany lesov pred požiarimi. Zvolen, Technical University in Zvolen.
- Pecl, J., Berčák, R., Vaněk, J. (2021) Hašení požárů v přírodním prostředí. Ministerstvo vnitra – Generální ředitelství Hasičského a záchranného sboru České republiky. Praha.
- Szczygieł, R., Kwiatkowski, M., & Kołakowski, B. (2018). Influence of bark beetle infestation on the forest fire risk in the Białowieża Forest. Sylwan, 162(11), 955-964.
- Thomas, P. A., McAlpine, R. S., Hirsch, K., Hobson, P. (2010). Fire in the forest. Cambridge University Press.

---

**Předběžný termín obhajoby**

2023/24 LS – FLD

**Vedoucí práce**

Ing. Roman Berčák

**Garantující pracoviště**

Katedra ochrany lesa a entomologie

---

Elektronicky schváleno dne 24. 4. 2023

**prof. Ing. Jaroslav Holuša, Ph.D.**

Vedoucí katedry

---

Elektronicky schváleno dne 28. 7. 2023

**prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.**

Děkan

V Praze dne 27. 03. 2024

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Míra odhořívání pozemního paliva lesních požárů vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil, a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze dne 5. 4. 2024

---

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Romanu Berčákovi za vedení práce, pomoc se získáním databáze požárů a statistickým zpracováním dat. Rodině a přítelkyni za trpělivost a podporu při sběru dat a psaní práce. A na závěr také sestře, Marii Miškové, za ilustraci.

# Míra odhořívání pozemního paliva lesních požárů

## Souhrn

Ač požáry v minulosti nepředstavovaly na území České republiky až tak zásadní hrozbu v oblasti lesnictví, může snadno dojít ke změně tohoto stavu, především pak v návaznosti na klimatickou změnu. Proto začíná být příkládám důraz jejich zkoumání a doplnění znalostí o jejich vzniku a šíření v návaznosti na naše podmínky.

Rešerše se zabývá samotným hořením a následně se přesouvá k lesním požárům. Jsou shrnuty statistické údaje o příčinách jejich vzniku, jsou rozděleny do třech typů a je blíže zkoumána jejich struktura. Následuje rozbor mechanik stojících za jejich šířením a jak je ovlivňují další faktory jako terén. Je také ujasněna terminologie popisující průběh a důsledky působení požáru. Vliv paliva a s tím související druhové a věkové skladby na stanovišti nebyl opomenut a zahrnuty byly i faktory měnící tyto poměry jako jsou škody větrem na porostu, hmyzí škůdci či dokonce předchozí požár.

V rámci výzkumu v terénu bylo na deseti lokalitách s recentními požáry vybudováno celkem 100 výzkumných ploch, z nichž byla polovina uvnitř samotného požářiště a zbytek nedaleko na vnější straně jeho hranice. Na všech došlo k změření hmotnosti třech složek pozemního paliva (bylinné, drobné dřevo a hrabanka). Ty byly za pomoci analýzy vlhkosti odebraných vzorků přepočteny na hmotnosti sušiny, která byla dále porovnávána statistickými metodami mezi plochou spálenou a nespálenou. Tato porovnání byla také učiněna samostatně pro plochy dle stanovištně převažující dřeviny.

Na stanovištích došlo vlivem požáru k úbytku celkové hmotnosti pozemních paliv. V případě bylinné složky k tomu došlo na všech stanovištích bez ohledu na převládající dřevinu. Úbytek hmotnosti drobného dřeva vykazovala stanoviště krom podmnožiny, kde byla převaha borovice lesní. V kategorii hrabanky nedošlo k prokazatelnému úbytku hmotnosti u žádné zkoumané množiny ploch. U 82 % dvojic ploch došlo k úbytku hmotnosti pozemních paliv a s tím spojenému uvolnění průměrné energie 17,113 MJ. Ta pocházela u smrku převážně z hrabanky a u borovice z bylin. Obecně shořelo 90 % bylin, 44 % drobného dřeva a 24 % hrabanky, což dohromady představuje 37 % hmotnosti paliva na ploše.

Přínos této práce spočívá v nasbírání výše zmíněných dat o odhořívání pozemního paliva lesních požárů, které nebylo doposud ve střední Evropě provedeno a které lze použít při tvorbě modelů šíření požáru pro podmínky v ČR.

**Klíčová slova:** palivo, intenzita hoření, lesní požár

# Consumption of flammable material during a surface forest fire

## Summary

Fires could be due to the climatic change potentially very dangerous in the future. It is therefore very important to better understand variables in their spread and upon which they ignite.

In the literary research we focus on the burning and forest fires. The statistical data regarding their ignition are summarised, we define three types of forest fires and describe their structure more in depth. Physics and mechanics that play a role in the forest fire spread and other factors such as terrain are discussed too. Then we continue with defining of the terminology describing the processes and consequences of the forest fire. The forest fire fuels and their relations to the species and age of the trees at the location were described together with the factors that change the fuel type distribution such as wind, hymn infestations or even the forest fires that happened before.

In methodology chapter the process of choosing the locations, data collection and processing are described. The locations were chosen with following criteria. The locations must have been big enough to host a set of data collection sites, the fire must have been recent enough to prevent site regeneration. On site, the weight of each ground forest fire fuel category was measured and samples for moisture content evaluation in laboratory were taken. Dry matter was then counted based on the collected data and statistically analysed in Statistika.

Statistically significant differences were found between burned and unburned sites when sums of fuel categories were compared together. The plant category has burned in all groups based on tree type around the site. The small wood category has burned everywhere apart sites with Scots pine and the forest litter category did not burn significantly in any examined set of site.

A loss of ground forest fire fuel weight due to fire was found on 82 % of study site couples. Energy released from this burning was on average 17,113 MJ. On sites with dominance of Norway spruce the main source of the energy was forest litter and on the sites dominated by Scots pine it was the plant category of forest fuel. On average across the sites 90 % of plant vegetation, 44 % of small wood and 24 % of forest litter were burned judging by weight. This sums up as a 37 % weight loss of ground forest fire fuel.

The contribution of this thesis lies in the collected data which have never been collected in central Europe before. The data can be used to make a fire spread model aimed for the forest in Czech Republic.

**Keywords:** fire fuel, fire intensity, forest fire

# Obsah

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>1</b>   | <b>Úvod.....</b>                                      | <b>10</b> |
| <b>2</b>   | <b>Cíl práce.....</b>                                 | <b>11</b> |
| <b>3</b>   | <b>Literární řešerše.....</b>                         | <b>12</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Oheň a hoření .....</b>                            | <b>12</b> |
| <b>3.2</b> | <b>Lesní požáry .....</b>                             | <b>13</b> |
| 3.2.1      | Vznik lesních požárů .....                            | 13        |
| 3.2.2      | Dělení lesních požárů.....                            | 14        |
| 3.2.2.1    | Podzemní lesní požár .....                            | 14        |
| 3.2.2.2    | Korunový lesní požár.....                             | 15        |
| 3.2.2.3    | Pozemní lesní požár .....                             | 15        |
| 3.2.3      | Struktura lesního požáru .....                        | 15        |
| 3.2.4      | Šíření lesního požáru.....                            | 16        |
| 3.2.4.1    | Přenos tepla .....                                    | 16        |
| 3.2.4.2    | Trojúhelník hoření.....                               | 17        |
| 3.2.4.3    | Intenzita a krutost požáru .....                      | 17        |
| 3.2.4.4    | Potok, terén.....                                     | 18        |
| <b>3.3</b> | <b>Vliv paliva na šíření a vznik požáru.....</b>      | <b>19</b> |
| 3.3.1      | Vliv dřevinné skladby .....                           | 19        |
| 3.3.2      | Vliv porostu .....                                    | 20        |
| 3.3.2.1    | Věk porostu .....                                     | 20        |
| 3.3.3      | Vliv složek paliva .....                              | 21        |
| 3.3.4      | Jevy měnící podíl složek paliva a riziko požáru ..... | 21        |
| 3.3.4.1    | Škůdci a choroby .....                                | 21        |
| 3.3.4.2    | Vítr.....   | 21        |
| <b>4</b>   | <b>Metodika.....</b>                                  | <b>23</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Výběr lokalit.....</b>                             | <b>23</b> |
| <b>4.2</b> | <b>Sběr dat .....</b>                                 | <b>23</b> |
| 4.2.1      | Postup po příchodu na lokalitu.....                   | 23        |
| 4.2.2      | Vytyčení výzkumné plochy.....                         | 24        |
| 4.2.3      | Dokumentace plochy a odběr vzorků.....                | 25        |
| 4.2.4      | Měření na ploše .....                                 | 26        |
| <b>4.3</b> | <b>Laboratorní zpracování vzorků.....</b>             | <b>27</b> |
| <b>4.4</b> | <b>Statistické zpracování vzorků.....</b>             | <b>27</b> |



|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>5</b>   | <b>Výsledky</b> .....                                 | <b>28</b> |
| <b>5.1</b> | <b>Testování normality dat</b> .....                  | <b>28</b> |
| <b>5.2</b> | <b>Rozdíl v hmotnosti složek na plochách</b> .....    | <b>30</b> |
| 5.2.1      | Souhrn pro všechny plochy.....                        | 30        |
| 5.2.2      | Dle převažující dřeviny na lokalitě .....             | 32        |
| 5.2.2.1    | Plochy s převahou borovice lesní.....                 | 32        |
| 5.2.2.2    | Plochy s převahou smrku ztepilého .....               | 34        |
| <b>5.3</b> | <b>Spalné teplo a uvolněná energie</b> .....          | <b>36</b> |
| 5.3.1      | Spalné teplo .....                                    | 36        |
| 5.3.2      | Podíl uvolněné energie na celkové energii vázané..... | 37        |
| <b>6</b>   | <b>Diskuze</b> .....                                  | <b>39</b> |
| <b>7</b>   | <b>Závěr</b> .....                                    | <b>41</b> |
| <b>8</b>   | <b>Literatura</b> .....                               | <b>42</b> |

# 1 Úvod

Lesní požáry představují vzhledem k současným klimatickým změnám v budoucnu potenciálně závažnou hrozbu pro lesnictví a subjekty se statky v bezprostřední blízkosti lesů. Proto je velice důležité lépe porozumět mechanismům, které stojí za jejich vznikem a faktorům ovlivňujícím jejich šíření. V našich podmínkách většina požárů vzniká z důsledku lidského jednání, ať již úmyslného či neúmyslného (MV-generální ředitelství HZS ČR, *n.d.*; Longauerová, 2015) a ve většině požárů se jedná o požáry pozemní (Holuša, 2018). To souvisí pravděpodobně s jejich rolí jakožto kategorií, ze které obvykle vznikají ty ostatní (Thomas, 2010).

Tato práce se zaměřuje především na zkoumání jednotlivých složek paliva právě u těchto pozemních požárů, konkrétně na to, jaké složky při požárech shořely a uvolnily tak energii pomáhající požáru v dalším šíření. Takové šetření nebylo podle dostupných informací doposud provedeno v rámci střední Evropy, natož pak na území České republiky, a ani v kontextu většiny světa není zastoupeno nikterak převratným dílem. To představuje trhlinu ve znalostech, jejíž alespoň částečné zacelení lze považovat za cíl a přínos práce. Vzhledem k vyskytujícím se dřevinám na lokalitách, kde došlo ke sběru dat, představujícím právě obě dřeviny s nejvyšším rizikem požárů v kontextu jejich zastoupení v českých lesích (MZE, 2023) a požárního rizika, které jejich porosty představují (Moreira, 2012). Po rozdělení ploch na dvě skupiny dle převládající dřeviny byly při zpracování dat mezi nimi nalezeny drobné rozdíly.

Příspěvkem práce pro poznání je ověření předpokladů pro hoření daných složek pozemního paliva a obecně přispění k pochopení požárů na území České republiky, neboť jim doposud nebyl logicky přikládán takový význam, jako tomu je v oblastech, kde způsobují škody vyšší.

Ačkoliv pochopení souvislostí mezi odhoříváním pozemních paliv lesních požárů a jejich chováním počínaje jejich šířením a konče důsledky, které požár zanechá na místech, která zasáhl, především pak formou odumírání dřevin a vlivem na jejich obnovu, lze označit za velmi přínosné, nesmíme opomenout faktor zcela zásadní pro rozšíření lesních požárů i množství škod jimi způsobených a to prevenci. Té je třeba věnovat pozornost v mnoha oblastech. Například osvětu veřejnosti a patřičnou informovanost správců lesních pozemků a lesních pracovníků o rizikovém chování, které může způsobit lesní požáry, a podmínkách, za nichž se rizika jejich vzniku a intenzivního šíření zvyšují, nelze rozhodně podcenit. Taktéž spolupráce s Hasičským záchranným sborem by mohla potenciálně prospět v oblasti zkrácení dojezdové doby díky zefektivnění komunikace a zlepšení orientace na lesních pozemcích, nicméně to by zasluhovalo svou vlastní práci nebo dokonce studii.

## **2 Cíl práce**

Cílem práce bylo stanovit míru odhořívání pozemního paliva při pozemním lesním požáru a vyhodnotit množství uvolněné tepelné energie při daném požáru v závislosti na míře vyhořelého materiálu.

## 3 Literární rešerše

### 3.1 Oheň a hoření

Oheň je definován v Ottově slovníku naučném (1902) jako: „výsledek pochodu chemického, při kterém se vyvinuje světlo a teplo.“ Podle Thomase (2010) se jedná o chemickou reakci, která vyvolá velmi rychlé uvolnění energie obsažené v palivě.

Jedná se o zcela zásadní reakci, jejíž první fosilní důkazy pocházejí z období Siluru, tedy cca z období před 419 miliony let (Glasspool, 2004), a která byla a zůstává zásadním způsobem významnou pro rod Homo a lidstvo, ať už v kladném či záporném slova smyslu.

U ohně lze vymezit tři fáze jeho průběhu, a to fázi před zahořením, zahoření a hoření (Thomas, 2010). Nejčastěji se s nimi setkáme u hoření dřeva, proto na něm budou popisovány.

Ve fázi před zahořením se palivo zahřívá, což je však zpravidla zpomalováno přítomností vody, která díky své vysoké tepelné kapacitě a výparnému teplu pohltí značnou část dodané energie. To znamená, že se povrch paliva ohřeje na teplotu 100 °C a na té se na určitý čas zarazí. Avšak po současné evaporaci části vody a jejímu částečnému odvedení hlouběji do dřeva se povrch začne opět zahřívát a uvolňují se terpeny, odpařuje pryskyřice, oleje a obecně řečeno dochází pyrolýze neboli rozkladu ohněm. Při teplotě nad 130 °C začíná rozklad na chemické složky a nad 260 °C se celulóza začíná přeměňovat v dřevěné uhlí, methanol a dehtové látky v plynném skupenství. Se stoupající teplotou až k 500 °C poté následuje i lignin, ze kterého vzniká více dřevěného uhlí (Thomas, 2010).

Druhou fází je zahoření, které může nastat buď při teplotě nad 292 °C, pokud dojde ke kontaktu hořlavých plynů unikajících z dřeva s plamenem, nebo při teplotách přibližně 600 °C, kdy se tyto plyny sami vznítí při kontaktu s okolním vzduchem (Hlaváč, 2016; Thomas, 2010). Konečným výsledkem tedy je plamen, který poté je dalším zdrojem tepla v následující fázi spalování.

Poslední fází je spalování, kdy radiace způsobená plameny způsobuje další pokračování pyrolýzy a uvolňování krátkých uhlovodíků, které jsou posléze páleny. Samotné plameny poté představují tenkou vrstvu dotyku těchto plynů a kyslíku z okolního vzduchu. Neopomenutelnou složkou vyskytující se v plamenu jsou saze složené z popela, uhlíku, dehtu a dalších látek. Ty díky absorpci tepla září oranžově blíže okrajům až červeně směrem ke středu. K jejich spálení je třeba vysokého obsahu kyslíku a teploty přes 800 °C, proto často unikají nespálené mimo plamen, a to především u větších ohňů. Při hoření vznikají především vodní páry a oxid uhličitý. Při hoření se postupem času nahromadí popel a uhlík na povrchu, což omezí pyrolýzu a dochází k odumření plamenů a začne spalování žhnutím. K tomu dochází díky přísunu kyslíku přímo k dané vrstvě uhlíku, která má stále teplotu 500 až 600 °C. Nevznikají plameny, pouze oranžové žhnutí. V případech, kdy je kyslíku nedostatek, spálí se uhlík pouze na oxid uhelnatý, který při unikání z povrchu hoří malým modrým plamenem. Tento typ hoření nevytváří téměř kouř, nicméně pokud zbyla část dřeva nezuhelnatělá, bude u ní docházet k pyrolýze a úniku plynů, které od žhnoucího spalování už nejsou obvykle zapáleny (Thomas, 2010).

## 3.2 Lesní požáry

„Lesní požár je ničivý činitel, který ovlivňuje veškeré funkce lesa. Je to komplex fyzikálně chemických jevů, jejichž základem jsou procesy hoření, výměna plynů a přenos tepla, které se mění v prostoru a čase.“ takto definuje Pelcl a kol. lesní požár v publikaci Hašení požárů v přírodním prostředí. Oficiální definice není nikde v české legislativě zakotvena, nicméně lze tak označit jakýkoliv přírodní požár, který se šíří či rozšíří do lesa a v případech zahraniční literatury se doplňuje o minimální zasaženou plochu lesního porostu 0,5 ha (Pelcl, 2021).

### 3.2.1 Vznik lesních požárů

Z hlediska příčiny vzniku lesního požáru máme základní dělení na požáry způsobené člověkem, ať již úmyslně či z nedbalosti, a požáry vzniklé bez jeho zásluhy přírodními vlivy. Mezi ty řadíme především blesky, vulkanickou činnost, ale také kolize kamenů při sesuvech, dopady meteoritů nebo samovolné vznícení tlejícího materiálu. Jsou známy i případy z Indonésie, kdy 13 až 15 tisíc let doutnající uhelné žíly, které vystoupily až na povrch, periodicky způsobovali požáry. Jako příklady požárů způsobených lidskou nedbalostí postačí nedopalky od cigaret, opuštěná ohniště, která nebyla řádně uhašena, ale také jiskry vniklé při použití různorodých nástrojů či při zkratu elektrického vedení (Thomas, 2010).

Ohledně podílu požárů člověkem způsobených vůči těm zapálenými přírodními vlivy, je situace poměrně jednoznačná. Ze 25 států, pro které byly shromážděny a sjednoceny statistické údaje o vzniku požárů, jednoznačně vyplívají lidmi způsobené požáry jako podstatně více zastoupené. U třinácti z pětadvaceti států je alespoň 80 % všech požárů včetně těch s neznámou příčinou označeno jako člověkem způsobených. Nejvyšší potvrzené zastoupení přírodních činitelů, jakožto viníků požáru, má Kanada s 35 % a následuje Austrálie s 26 %. Pouze tyto dva státy mají toto zastoupení přes 20 % (Holuša, 2018). To představuje jasným trend, kdy požáry zapálené přírodními vlivy jsou více zastoupeny pouze ve státech s nízkým zalidněním či s velmi suchým podnebím. Příkladem z Evropy jsou Kypr, Finsko a také Rusko (Thomas, 2010).

To potvrzují i data analyzovaná pro Aljašku za roky 1988 až 2005, která ukazují, že ve vzdálenosti do 30 až 40 km od obydlených oblastí, řek a silnic je zvýšený počet zapálených požárů. Nicméně v okolí obydlených oblastí a řek přesto pravděpodobně díky rychlejšímu zásahu hasičských jednotek shoří menší plocha ve srovnání s oblastmi mimo bezprostřední lidský dosah. Z neznámých příčin to však neplatí u okolí dálnic, kde je plocha zasažená požárem naopak vyšší (Calef, 2008).

Pokud se zaměříme na to, jak si stojí podíly spálené plochy dle původu požáru, dojdeme ke zjištění, že se požáry zapálené přírodními činiteli, i přes nízké zastoupení co se týče počtu, podílí na spálené ploše výrazně. Například za poslední dekádu 20. století v Austrálii tvořili tyto požáry 26 % požárů, ale přispěli polovinou spálené plochy. Oproti tomu lidmi způsobené tvořili 51 % požárů a pouze 22 % plochy. V případě Kanady a USA jsou tyto závěry podobné, procenta požárů a plochy u přírodních byly 35 % a 85 % v Kanadě a 12 % a 54 % v USA. To je připisováno pozdější detekci způsobené nižší hustotě zalidnění (Thomas, 2010).

Statistiky ze sousedního Slovenska, shromážděné paní doktorkou Longauerovou pro roky 2003 až 2014, vypovídají o naprosté převaze požárů lidmi způsobených. Z celkem 3935 požárů za 10 let, jich přibližně 5 % připadá na žhářství, 85 % na požáry z nedbalosti a pouhé 1 % na požáry způsobené bleskem, jakožto nejčastějšímu viníku požárů zapálených přírodními vlivy. Zbylých 9 % připadá na požáry s neznámou příčinou. Jako nejvíce zastoupenou podskupinou požárů z nedbalosti se jeví vliv veřejnosti (turisté, návštěvníci lesa a děti) s takřka 63 % z požárů způsobených nedbalostí. Na druhém místě pak jsou se zastoupením lehce přes 26 % práce na zemědělských pozemcích (Longauerová, 2015).

Statistická ročenka pro roky 2001 až 2020 vydaná generálním ředitelstvím Hasičského záchranného sboru České republiky uvádí pro počty požárů způsobených bleskem jinde než na objektu s hromosvodem či bez něj následující údaje: Za daných 20 let se jednalo celkem o 736 požárů. Na průměrný rok tedy připadá necelých 37 požárů, s tím, že minimum bylo roku 2013 a to pouhých 14 požárů, a naopak nejvíce bylo roku 2015, konkrétně 101 požárů. Nicméně se nemusí jednat pouze o požáry lesa. Pro kontext uvedu, že požárů na území lesa, zemědělských plochách a v přírodním prostředí, což je mnou předpokládaná oblast z předchozí statistiky, bylo celkem 34 773, průměrně 1739 ročně a hodnoty se pohybovaly mezi 1038 a 2840 požáry. V rámci průměrného roku by tedy připadalo 2,12 % požárů dané oblasti na způsobené bleskem (MV-generální ředitelství HZS ČR, *n.d.*).

### 3.2.2 Dělení lesních požárů

Lesní požáry se dělí do třech kategorií, lišících se tím, kde dochází k hoření. Tradičně existovala na území ČR i čtvrtá kategorie, a to požár dutého stromu, od které bylo upuštěno. Hasičský záchranný sbor se shodne v tomto dělení s většinou zahraniční literatury, ačkoliv například na Slovensku přidávají kategorii požár kalamitní plochy. Nicméně platí, že požáry mohou přecházet z jedné kategorie na jinou (Holuša, 2018).

#### 3.2.2.1 Podzemní lesní požár

Požár nejčastější v lokalitách s vysokou akumulací humusu jako jsou ložiska rašeliny či aktivního vápence. Dosahuje teploty cca 300 °C, což je méně než ostatní druhy požárů, a neprodukuje prakticky žádný plamen. Tomu odpovídá i rychlost hoření, která je v jednotkách až desítkách milimetrů za hodinu. Nicméně se jedná o těžce odhalitelný požár, který poškozují kořeny stromů a který může hořet týdny až měsíce. Zastoupení těchto požárů na území české republiky je méně než 0,5 % (Holuša, 2018).

Hoří pod povrchem, dokud nedohoří dole až na minerální podloží a obvykle nechává nespálenou vrstvu u povrchu díky jejímu ochlazení seshora vzduchem. To přispívá k obtížné detekci a může potenciálně ohrozit procházející osobu, které hrozí propadnutí. Tato kategorie požáru také produkuje vyšší podíl oxidu uhelnatého, který může rovněž ohrozit lidi a zvířata na životě. Jsou schopny hořet i pod sněhem a vyžadují velmi vysokou vlhkost k uhašení (Thomas, 2010).

### 3.2.2.2 Korunový lesní požár

Nejnebezpečnější kategorie lesního požáru, který se velmi rychle šíří a je těžko zvladatelný co se týče hašení. Často vzniká z pozemního požáru, a ačkoliv není příliš častý, zasahuje obvykle větší území a působí také vyšší škody (Holuša, 2018).

Plameny u této kategorie dosahují někdy i přes 30 m výšky a rychlostí přes 10 km/h. Hlavním palivem tohoto typu požár, navzdory ohromnému množství tepla, které uvolňuje, jsou především jehličí či listy a drobné odumřelé větvičky. Obvykle jej doprovází požár na povrchu, který pomáhá předehtvat palivo, nicméně za vhodných větrných podmínek a při nízké vlhkosti listový nemusí být korunový požár na pozemním absolutně závislý a zvládá si předehtvat palivo v dalších korunách sám, nicméně jedná se o vzácný jev, jehož existence byla donedávna některými vědci zpochybňována (Thomas, 2010).

### 3.2.2.3 Pozemní lesní požár

Při tomto požáru hoří půdní kryt v lese, především pak suché traviny, suché větve, jehličí či listí a malé stromky. Plameny mohou dosahovat od 5 cm při hoření samotné hrabanky po 4 m v případech nahromaděného těžebního odpadu. Jedná se o nejčastější kategorii lesního požáru v ČR a nejčastěji se objevuje v jarním a letním období. Rychlost šíření je obvykle přibližně do 50 cm za minutu (Holuša, 2018).

Všechny zkoumané požáry v praktické části této práce se řadili do této kategorie. Většina lesních požárů začne jako pozemní požár a také tak obvykle i končí (Thomas, 2010).

## 3.2.3 Struktura lesního požáru

Lesní požár v průběhu svého života nehoří a nešíří se vždy naprosto rovnoměrně a vytváří tak spálenou plochu mozaikovitého tvaru v závislosti na povětrnostních a dalších faktorech ovlivňujících hořlavý potenciál pro konkrétní plochy. Především pak pro účely hašení a orientace při zásahu se tedy používá názvosloví pro charakteristické části požáru, které se mohou lišit v rychlosti šíření a intenzitě hoření. V průběhu času a především s měnícími se povětrnostními podmínkami se mohou dané části přeměňovat z jedné na druhou a také platí, že nemusí být vždy přítomny všechny, pokud panují příslušné podmínky, například bezvětří (Pecl, 2021).

Požár byl zapálen v místě označovaném jako ohnisko požáru. Z tohoto místa následně dochází k šíření a vytváření dalších částí požáru. Čelo požáru, někdy též zvané fronta požáru je obvykle ve směru kam vane vítr a je charakteristická nerychlejším šířením spojeným s vysokou intenzitou hoření a často také nejvyššími způsobenými škodami. Na opačné straně, neboli na té, odkud vane vítr, se nachází tyl požáru. Vanutí větru zde působí proti směru šíření požáru, což zpomaluje jeho šíření a snižuje také jeho intenzitu hoření. Zbylé dvě strany požáru, které jsou kolmé na směr vanutí větru jsou pojmenována křídla požáru. Oddělují tedy čelo od tylu požáru (Pecl, 2021; Hlaváč, 2016).

Pokud se zaměříme na detailnější tvar požáru, vylišují se prsty neboli pásy požáru, což je označení pro dlouhé úzké pásy či výběžky požáru, obvykle zhruba rovnoběžné se směrem vanutí větru. Jejich vznik je zdůvodňován rozdílnou hořlavostí paliva ve směru postupující

fronty požáru. Mají potenciál vytvořit novou frontu požáru. Místa mezi nimi se pak označují v zahraniční literatuře jako „unburnt bay“ (Thomas, 2010), neboli volně přeloženo nespálené zálivy či výklenky. Místa s lokálně nižší hořlavostí paliva pak mohou vytvářet neshořelé ostrovy izolované uvnitř spálené plochy.

Mezi nebezpečné fenomény, které se při příznivých povětrnostních podmínkách mohou objevit patří rozhodně bod požáru. Tak se označují nově vznikající ohnisko požáru mimo jeho současný obvod. Vznikají odletem jisker, uhlíků a hořících částí stromu, například v případě blahovičnicku je riziková kůra, která za vhodných podmínek dává vznik bodu požáru i nižší desítky kilometrů daleko. Hrozí u nich nebezpečí obklíčení pro zasahující jednotky a mohou způsobit i velmi rozsáhlé škody na majetku. Mezi extrémní projevy požáru mohou patřit také ohnivé víry s průměry od desítek centimetrů po větší než 150 m či požáry s konvekčními sloupci, které jsou rozebrány později (Pecl, 2021; Thomas, 2010).

### 3.2.4 Šíření lesního požáru

Šíření požáru je závislé na mnoha faktorech a principech, které zasluhují bližší popis a rozbor. Jejich znalost nám může pomoci pochopit vzorce chování požáru v praxi či snad i z již uhašeného požářiště. Vliv vlhkosti je popsán v rámci kapitoly Oheň a hoření, nicméně je vhodné připomenout, ta souvisí silně na počasí, především srážkách.

#### 3.2.4.1 Přenos tepla

Naprost elementárním principem, který má na svědomí šíření požáru z jednoho kusu paliva na druhý je přenos tepla. Ten probíhá od zóny spalování pomocí kondukce (vedení), konvekce (proudění) a radiace neboli sálání (Pecl, 2021).

Kondukce hraje roli především v předehřívání zatím nehořící části v rámci jednoho objektu paliva, často směrem do hloubky, nebo také v případě podzemních požárů. V ostatních případech nehraje příliš velkou roli, neboť dřevo a další hořlavé materiály jsou zpravidla poměrně špatnými teplenými vodiči a protože vyžaduje přímý dotek paliva hořícího a nehořícího. V případě tlejícího dřeva je tepelná vodivost ještě na nižší úrovni, což hraje roli ve fenoménu bodových požárů. Dopadající žhavé uhlíky jsou schopny započít žhnoucí spalování u zetlelého dřeva, a to i přes nízké nesené teplo, jež by nestačilo na zapálení hrabanky či dřeva nezetlelého (Thomas, 2010; Pecl, 2021).

Konvekce je označován stoupavý pohyb horkého vzduchu, který odvádí teplé zplodiny, což způsobuje přívod čerstvého vzduchu s dostatkem kyslíku. Významnou ji tedy sledujeme pro přenos tepla směrem vzhůru do výše nacházejícího se paliva, například do korun nad pozemním požárem. Rychlejší šíření požáru na svazích a při silném větru, je způsobeno také z části konvekcí, neboť horké zplodiny proudí více kolem budoucího paliva a pomáhají tedy vyšší měrou jeho ohřevu (Thomas, 2010).

V případě velmi rozsáhlých požárů se vytváří ze stoupajících plynů díky konvekci úzký proud, jež postupně po zesílení přeroste v konvekční sloupec. Pokud jsou následně splněny příznivé atmosférické podmínky pro jeho zachování, může dosáhnout výšek nad 15 kilometrů. V momentě, kdy v něm vzduch proudí dostatečně rychle a je sloupec dostatečně široký, tak začne vznikat nové proudění. To nasává vzduch ze stran, aby nahradil masy stoupajícího vzduchu v konvekčním sloupci. Toto proudění díky přiváděnému kyslíku zvyšuje intenzitu

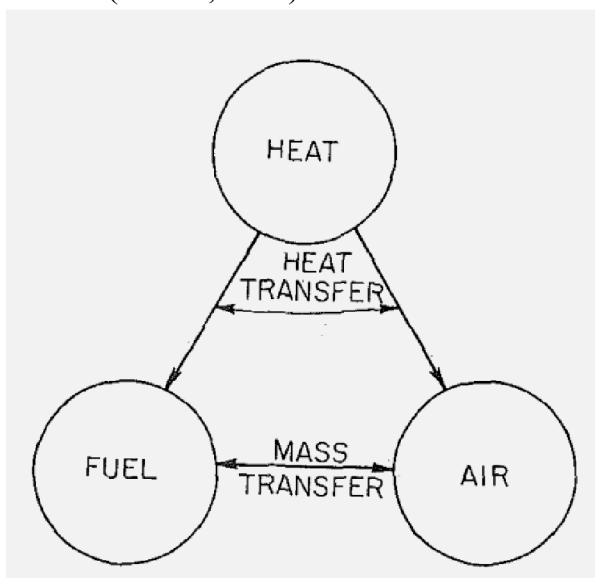


hoření, znemožňuje předvídat další vývoj požáru, který se stává nekontrolovatelným. Také pravděpodobnost vzniku bodových požárů a ohnivých výrů je zvýšena (Pecl, 2021).

Většinu přenosu tepla u požáru zajišťuje radiace, jež se šíří ze zóny spalování do všech směrů. Pod vlivem větru se plameny sklápějí, což zvyšuje účinnost přenosu tepla na palivo ve směru šíření požáru, pokud se jedná o čelo požáru, kde směr šíření požáru a vanutí větru je víceméně shodný (Pecl, 2021).

#### 3.2.4.2 Trojúhelník hoření

K hoření oheň potřebuje tři podmínky, pokud kterákoliv chybí, dojde k uhašení. Jedná se o palivo, teplo, jež rozkládá palivo a uvolňuje hořlavé plyny a vodní páry, a vzduch, rozumějme kyslík, jež je nutný pro spalování těchto plynů. K uhašení se používá odstranění jedné z těchto složek či vztahů mezi nimi, jež jsou popsány na obrázku 1 (Emmons, 1973). Tato znalost byla formulována Lavoisierem v 18. století a objevuje se později v pracích Emmonse roku 1973 a po upravená Osvaldem roku 1997 (Berčák, 2017).



Obrázek 1 Trojúhelník hoření dle Emmonse 1973

#### 3.2.4.3 Intenzita a krutost požáru

Pod těmito pojmy se skrývají v zahraniční literatuře často používané pojmy „fire intensity“ a „fire severity“. Nicméně vzhledem k nesprávnému užívání těchto termínů je zvažováno jejich nahrazení (Keeley, 2009).

Intenzita linie požáru (fireline intensity) je popisována jako uvolňovaná energie při hoření fronty vztážená na její délku. Výpočet je dle vzorečku  $I=H*W*R$ , kde  $H$  je spalné teplo v kJ na kg paliva,  $W$  značí hmotnost spáleného paliva na  $1\text{ m}^2$  plochy a  $R$  je rychlost šíření v m/s. Měří se v kW/m a je považována za vůbec nejlepší popisnou veličinu pro přírodní požáry. Pokud by se na požářišti vyskytovalo palivo o konstantním energetickém obsahu, lze z hodnoty intenzity požáru odvodit kolik paliva je spalováno a jak rychle. Lze jí okulárně odhadnout z výšky plamenů. Hodnoty jsou v rozmezí od nižších desítek kW/m, přes nižší stovky u požárů skromných rozměrů. Požár s plameny o výšce 1,2m má například intenzitu přibližně 400kW/m,

což je přibližně hranice, kdy se dá uhasit pomocí ručních nástrojů. S intenzitou 1700 kW/m a plameny 2,3 m si poté jen s obtížemi dokáží poradit hasiči se zapojením veškeré mechanizace. Nad 3500 kW/m již není možné použít přímý útok. Nejintenzivnější požáry jsou možné v porostech eukalyptu a intenzita se zde může blížit až k 100 000 kW/m (Thomas, 2010). Nicméně v případech, kdy je palivem požáru pouze borové jehličí, mohou nastat požáry nízké krutosti, pro které vztah výšky plamenů a intenzity linie požáru neplatí a plameny nabývají pro tyto požáry konstantní výšky (Nelson, 1986).

Dalším možnou metrikou s podobným názvem je právě intenzita požáru, která prezentuje více fyzikální definici, kde se jedná o průměrné množství energie v prostoru, pohybující se určitou rychlostí. Výsledkem tohoto součinu je veličina s jednotkami kW/m<sup>2</sup>, kterou například používal ve svých modelech šíření požárů Rothermel (Keeley, 2009).

Krutost požáru je pak termínem označujícím okamžitou míru vlivu na vegetaci, kterou měl požár, a to na nadzemní i podzemní část požářiště, projevující se ztrátou hmotnosti u organické hmoty. Někdy se pod tento termín začleňují i odezvy ekosystému na proběhlý požár, což Keeley označuje za matoucí a apeluje na jejich rozlišování.

U krutosti požáru se vylišují čtyři základní kategorie dle míry vlivu na lesní prostředí a to 0. plochy nespálené (bez ohoření i poškození radiací), I. plochy s mírně sežehnutým povrchem (ohořelé kmeny stromů které však mají stále zelené listy, požár nezasáhl ve větší míře do organické vrstvy, ale je spálené či zuhelnatělé bylinné patro a drobné dřevo), II. plochy se silně sežehnutým povrchem (usychají listy či jehlice stromů a následně opadávají, prohořelá organická vrstva a na povrchu zuhelnatělé větvičky na zemi ležící větve) a III. plochy kde požár pronikl i do korun (kde došlo k hoření jehlic a úhynu stromů, shoření pozemních paliv a nahromadění bílého popela). Později byla též přidána kategorie, kde nedošlo k sežehnutí, nicméně vlivem radiace došlo k poškození a následnému opadu listoví u bylin (Turner, 1994; Keeley, 2009).

Krutost požáru nebyla v případě zkoumaných požárů v Yellowstone Nacional Park ovlivněna expozicí, sklonem svahu ani hustotou porostu. V případech, kde byla krutost nízká, došlo do 3 let k obnově výskytu semenáčků v plné výši a v místech, kde měl pozemní požár vysokou krutost, se za toto období obnovila přibližně polovina semenáčků a keřové patro zůstalo oslabené (Turner, 1999).

Odezvy ekosystému na proběhlý požár zahrnuje jevy jako jsou eroze, přirozené znovuosídlení požářiště rostlinami. Obdobou jsou pak společenské důsledky, kam patří škody způsobené požárem na majetku a zdraví, náklady na boj s požárem.

#### 3.2.4.4 Potok, terén

Samozřejmě šíření požárů především nižší intenzity bývá značně zpomalováno či dokonce limitováno překážkami jako jsou vodní toky či zamokřená území a místy s menším množstvím paliva jako jsou například cesty, tábořiště, svahy pokryté sutí a útesy (Thomas, 2010; Hlaváč, 2016).

Jak již bylo zmíněno, důležitý faktor pro směr a rychlost šíření požáru je vítr. Oheň je sám o sobě díky gravitaci schopen šířit se efektivněji přes mezery bez paliva spíše do vertikálního směru než vodorovného, nicméně vítr ohýbající plameny může tyto predispozice

prohodit ve prospěch horizontálního šíření do bodu, kdy ani šestiproudá silnice neznamená pro oheň příliš překážku. Nejvhodnější pro šíření je samozřejmě suchý vítr (Thomas, 2010).

Další složka ovlivňující šíření požáru je topografie lokality. Její hlavní složky jsou definovány jako sklon, expozice a terén. Význam sklonu je podobný jako větru, zapříčiní totiž „sklonění“ plamene blíže k povrchu. Expozice ovlivňuje množství pohlcované sluneční energie, a s tím související vlhkost a vegetaci. Sušší a tedy s vyšším rizikem požáru jsou v našich podmínkách svahy jižní a jihozápadní. S terénem souvisí riziko zasažení bleskem, výskyt překážek pro šíření požáru, rychlost větru, která je vyšší u vrcholku než u paty kopců, a také turbulence vyskytující se taktéž u vrcholku kopce. Ta má potenciál roznášet hořící uhlíky a zakládat body požáru (Thomas, 2010).

### 3.3 Vliv paliva na šíření a vznik požáru

#### 3.3.1 Vliv dřevinné skladby

Různé dřeviny mají samozřejmě různé vlastnosti ovlivňující jejich chování ve spojitosti s požáry. Některé druhy dřevin jsou různými způsoby vázány na výskyt požárů, pionýrské druhy je využívají jako jednu z možných disturbancí.

Některé druhy se vlivu ohně díky stanovištním požadavkům spíše vyhnou. Příkladem mohou být mangrovové porosty, u nichž jsou díky velmi limitovanému množství suchého paliva požáry velmi vzácné. Objevují se v malé míře pouze v suchém období a v souvislosti s jevem El Niño. Dle dat pro Jižní Sumatru za roky 2007, 2008, 2009, 2010, 2015 a 2016 vyplývá, že požáry, které mangrovové porosty zasáhnou, jsou rozšířeny s největší pravděpodobností z okolních požárů. Shořelá plocha představuje do 1 % celkové plochy ročně krom výjimečného roku 2015, kdy dosáhla 3,2 % (Crowe, 2020). V našich podmínkách bych za jejich ekvivalent označil především olšiny na podmáčených stanovištích. Podobný jev Keeley pozoroval nicméně u borovice limby (*Pinus cembra*), která jako výjimka roku *Pinus*, jehož vývoj požáry obvykle ovlivnily ve vysoké míře, našla svoji niku ve vlhčím podnebí Alp (Keeley, 2012).

Rozdílné druhy dřevin mají také rozdílné předpoklady přežití pozemní požár nízké až střední intenzity v jejich okolí. Bär a Mayr zkoumali izolační vlastnosti borky deseti evropských dřevin a došli k názoru, že hlavními faktory ovlivňujícími čas, po který dokáží dřeviny přežít vystavení tomuto požáru bez poškození kambia jsou tloušťka borky a její hustota (Bär, 2020). Tloušťka borky byla velmi významným faktorem při porovnání jak různých dřevin, tak i jedinců stejného druhu. Nejlépe izolující, relativně k tloušťce, byly modřín opadavý (*Larix decidua*), borovice limba (*Pinus cembra*) a naprosto nejlepší testovaná dřevina – borovice lesní (*Pinus sylvestris*). To je vysvětlováno právě nízkou hustotou jejich borky. Nejdéle odolávali samozřejmě jedinci, z nichž odebrané vzorky kůry byly nejtlustší, což byly vzorky dubu letního (*Quercus robur*). A to navzdory podprůměrné izolační schopnosti jeho borky při dané tloušťce, která byla v rámci 10 porovnávaných dřevin podprůměrná. Nízká hustota borky zvyšuje její izolační vlastnosti a to díky vyššímu obsahu dutin naplněných vzduchem, který je poměrně dobrý izolant. Z dřevin citlivých na požáry z důvodu tenké či špatně izolující borky uvedu smrk ztepilý (*Picea abies*), jedlí bělokorou (*Abies alba*) a buk lesní (*Fagus sylvatica*).

Z expertního hodnocení rizika požáru dle 20 dotazovaných expertů či týmů pro 60 typů vegetace v Evropě a severní Americe, které publikoval Xanthopoulos roku 2011, bylo vytáháno toto hodnocení pro vegetaci v České republice doplněné o několik srovnání s dalšími vegetačními typy. Jakožto vegetaci s nízkým rizikem, kde problémy s požáry nastávají až s extrémními podmínkami (teploty nad 38 °C, vlhkost do 15 %, vítr nad 30km/h), označil porosty s převahou smrku a jedle, šípákové doubravy a dubohabřiny. Vegetační typy se středním rizikem (za horkého léta časté požáry, které vyžadují vysoké úsilí k uhašení) představují pak bory a klečové porosty. Radí sem také olšiny, což je v rozporu s předchozími znalostmi i dohledanými vlastnostmi pro druhy *A. rubra*, *A. rhombifolia* a *A. viridis* (Uchytíl, 1989; Fryer, 2014; Matthews, 1992; Uchytíl, 1989). Jako typ vegetace s velmi nízkým rizikem (nízká hořlavost i za extrémních podmínek vypsanych výše, požáry vzácné) vegetace byla označena bučina. Pro srovnání poslouží travní porosty se středním rizikem, které je také u plantáže jedle bělokoré (*Abies alba*). Za extrémně hořlavé (požáry i za mírných podmínek, při neúspěšném včasném zásahu víceméně nekontrolovatelné) jsou pak označeny plantáže eukalyptu (*Eucalyptus sp*), borovice pinie (*Pinus pinea*) nebo lesy s vysokým zastoupením borovice přímořské (*Pinus pinaster*) (Moreira, 2012).

### 3.3.2 Vliv porostu

Na úrovni porostu zasluhují vyzdvihnout především jeho struktura úzce související s jeho věkem, hospodářskými zásahy a předchozí historii v souvislosti s požáry (Moreira, 2012).

#### 3.3.2.1 Věk porostu

S rostoucím věkem obecně stoupá podle Turnerové riziko vzniku požárů s většími dopady a intenzitou. Porosty s pasečným typem hospodaření lze z hlediska požárního rizika zjednodušeně rozdělit dle věku do čtyřech stádií a to na založený, zapojený, dospívající a dospělý porost (Pecl, 2021).

Pojmem založený porost se rozumí porost od momentu, kdy došlo k jeho vytěžení po dobu, kdy bude celá plocha pokryta korunami vysazených stromků či stromků z přirozené obnovy. Vzhledem k vysokému výskytu travin, suššímu mikroklimatu a dobré prostupnosti pro návštěvníky lesa se jedná o potenciální ohnisko vzniku požáru. Díky nižší intenzitě hoření troudy ve formě travin je hlavní riziko rozšíření na mladší porosty v okolí (Pecl, 2021).

Následující fází je zapojený porost, ve kterém je bylinný kryt potlačen víceméně na nulu. Hromadí se suché větve, stromky vyřezané při probírce a opad, takže porost je poměrně hořlavý. Díky neprostupnosti je však vzácně ohniskem požáru. Opět je zde riziko rozšíření požáru na starší sousední porosty a vzniku korunového požáru (Pecl, 2021).

U dospívajícího porostu dochází k intenzivnímu výškovému přírůstu, částečně k prosvětlení vlivem úhynu podúrovňových stromů, což opět spolu se semenným materiálem obnovuje možnost vzniku pozemního požáru. To podporuje i návrat návštěvníků lesa a lesních pracovníků, kteří opět zvyšují riziko vzniku požáru, který hoří zpravidla pomalu a bez sousedních mladších porostů nemá příliš šanci dostat se do korun (Pecl, 2021).

Dospělý porost je až na další prosvětlení a tedy zvýšení množství paliva na povrchu totožný. Pozemní požár se zde šíří o něco rychleji, riziko přenosu do korun je takřka nulové a obecně lze uhasit poměrně snadno (Pecl, 2021).

### 3.3.3 Vliv složek paliva

V jakémkoliv porostu najdeme mnoho složek paliva, které ovlivní v konečném důsledku potenciální vznik a vývoj požáru. Hořlavost těchto paliv je ovlivněna jejich chemickým složením, fyzikálními vlastnostmi a také jejich strukturací v porostu, která má potenciál ovlivnit například i proudění větru (Moreira, 2012). Již dříve byla zmíněna vlhkost, jakožto důležitý faktor pro vznik a šíření požáru.

Důležité složky paliva jsou ty, které mají vysoký poměr povrchu ku objemu (až 10 000:1). V anglické terminologii jsou nazývány „fine fuels“ a nabízí se použít zde český výraz troud. Rozumíme tím bylinou vegetaci, tenké větvičky, kusy kůry, jehličí či listy (Basic Forest Fire Suppression Course - Online Lessons, 2021). Jejich definice se lehce liší stanovenými rozměry (maximálním průměrem/tloušťkou), nicméně zásadní je jejich rychlá reakce na suché a teplé počasí, kde dochází k vysoušení v řádu desítek minut až nižších desítek hodin dle jejich konkrétního poměru povrchu ku objemu a hloubce v rámci hrabanky, kde se nacházejí (Rego, 2021; Anderson, 1990).

Ze základních znalostí fyziky hoření lze pak vyvodit, že díky vysokému povrchu je přístup ke vzduchu vyšší neboli hoření bude probíhat dokonaleji a rychleji. Díky nízkému objemu a vyšší rychlosti hoření pak dochází k rychlejšímu spálení paliva a vyhasínání. Oproti tomu objemnější složky paliva by měly hořet pomaleji, ale déle.

### 3.3.4 Jevy měnící podíl složek paliva a riziko požáru

Z logiky věci vyplývá, že podíl složek paliva se změní vlivem samotného požáru, který tak mění podmínky pro požáry budoucí. S frekvencí jejich návratu pak souvisí množství paliva, dřevinná skladba, kde při vyšší frekvenci mohou dominovat více druhy adaptované na požáry či druhy pionýrské, a také věková struktura.

#### 3.3.4.1 Škůdci a choroby

Dle studie Turnerové z roku 1999, která v Yellowstone provedla výzkum požárů v porostech s převahou borovice pokroucené (*Pinus contorta*), se u porostů závažně poškozených vlivem podkorního hmyzu či parazitací jmelí zvyšuje riziko na vznik korunového požáru. Tento vztah však není lineární, neboť u porostů se střední mírou poškození je toto riziko naopak nižší než u porostů zdravých (Turner, 1999).

U kalamity způsobené lýkožroutem smrkovým (*Ips typographus*) v Polsku před rokem 2017 došlo ke zvýšení množství mrtvého dřeva jakožto paliva z 24,9 m<sup>3</sup>/ha před kalamitou na 231,8 m<sup>3</sup>/ha během ní. To představuje podstatné zvýšení požárního rizika (Szczygieł, 2018).

#### 3.3.4.2 Vítr

Obdobného účinku, kdy se nahromadí mrtvé dřevo jako palivo na zemi a těsně nad ní, může nastat i za podmínek, kdy jsou stromy zlomeny či vyvráceny větrem. Jejich včasné zpracování je na místě obzvláště pokud se blíží či již probíhá období se zvýšeným rizikem výskytu požáru, nicméně by se tak mělo dít za přísného dodržení bezpečnostních podmínek, neboť jak již bylo zmíněno, lidský faktor a technické závady zapříčiní většinu požárů na území

ČR. Problematické jsou podmínky polomu také proto, že limitují přesun hasičských jednotek a jejich včasné zásahy blokací lesní cestní sítě. Pokud odstranění ležících stromů a jejich částí trvá déle, proschnou a díky prosvětlení a následnému růstu především travin je riziko vskutku vysoké (Hlaváč, 2016).

## 4 Metodika

### 4.1 Výběr lokalit

Pro zajištění kvalitních výsledků z nasbíraných dat o shořelém materiálu na daných lokalitách byly lokality z databáze lesních požárů za období 1. 1. 2023 až 30. 6. 2023 od Generálního ředitelství Hasičského záchranného sboru ČR vyfiltrovány na základě rozlohy zasaženého území a data vzniku. V případě rozlohy zasaženého území byla stanovena hranice čtvrt hektaru neboli 2500 m<sup>2</sup>, která měla umožnit umístění požadovaného počtu zkusných ploch a rozestupy mezi nimi. Ohledně staří byly zvažovány pouze recentní požáry března, dubna, května a června roku 2023. Pro měřená data bylo zásadní, aby plochy nestihly příliš zregenerovat po proběhlém požáru

Z požárů splňujících metodické požadavky, kterých pro vybrané období bylo na území ČR celkem 56, bylo vybráno celkem deset. Vybrané požáry byly ohlášeny mezi 20. 3. 2023 a 19. 6. 2023 a měly rozlohu od 2500 m<sup>2</sup> do 12800 m<sup>2</sup>. Sběr dat poté proběhl v období 31. 8. 2023 až 1. 10. 2023. K jejich nalezení v terénu pomohla data o jejich poloze v Systému jednotné trigonometrické síť katastrální, která obsahovala databáze.

### 4.2 Sběr dat

Jak již bylo řečeno, pro sběr dat bylo použito 10 požárů na území ČR. K orientaci byl použit mobilní telefon sloužící též k fotodokumentaci a vybavený aplikací Mapy.cz, kde byly vytyčeny body o souřadnicích hledaných požárů. Mezi nesené pomůcky patřily: skládací pilka, rukavice, lopatka, rýč, zahradnické nůžky, digitální závěsná váha EV020, skládací vědro z pevného laminovaného PVC a pracovní nůž, desky s protokoly a propiskou, ZIP sáčky z LDPE o rozměrech 10 x 10 cm na odběr vzorků a lihový fix k jejich popisu, plastová krabice na ochranu vzorků při transportu.

#### 4.2.1 Postup po příchodu na lokalitu

Po nalezení lokality byl uskutečněn průzkum s cílem zjistit rozsah požáru, jeho hranice a další relevantní informace pro odběr vzorků. S povědomím o jeho tvaru a rozsahu došlo následně k vytipování míst pro zkusné plochy o tvaru čtverce se stranou 1 m. Ty byly formou pěti dvojic víceméně rovnoměrně rozmístěny po obvodu požářiště.

V dané dvojici se vždy nacházela jedna plocha uvnitř požářiště, nedaleko jeho okraje a druhá plocha z dvojice byla poté nedaleko od té první, mimo požářiště v odstupu cca 2 m od jeho hranice. V případech, kdy okraj byl výběžkovitý, byla snaha zasadit zkusnou plochu tak, aby byla celá zasažena požárem. U ploch mimo požářiště byla snaha, aby se na ploše nacházela podobná vegetace jako na ploše shořelé, nicméně to není možné vždy dodržet z důvodu velké variability v porostu a samozřejmě to komplikují také přirozené bariéry (ilustrační obrázek 2) zpomalující a limitující šíření požáru jako například potok, kraj lesa, porostu apod.



Obrázek 2 Ilustrační schéma prvků v krajině, jež limitují šíření požáru  
Autor: Marie Mišková

#### 4.2.2 Vytyčení výzkumné plochy

Na konkrétní výzkumné ploše následně byl pomocí připravené konstrukce ze dřeva vyznačen čtverec o straně 1 m, který značila vnitřní strana konstrukce (obrázek číslo 3). Následovala jeho separace od okolí. Ta spočívala v přeříznutí dřevěného materiálu zasahujícího přes hranici s výjimkou šišek, ty byly posuzovány dle polohy většiny hmoty a odstraněny nebo posunuty blíže ke středu. Následovalo oddělení přerůstajícího ostružiní, které bylo na hranici odstřiženo nůžkami. V případě travin a dalších rostlin, které byly někdy ulehnuty, se posuzovalo, kde vyrůstají ze země. Na hranici byl oddělen drn a veškeré nadzemní části vyrůstající zevnitř plochy byly brány jako na ploše i v případě překročení hranice ven. Obdobně nadzemní části rostlin z okolí plochy, které překročily hranici dovnitř, byly posuzovány jako mimo plochu a odstraněny.

S takto odděleným bylinným patrem a drobným dřevem bylo posléze pomocí rýče a někdy nože odkrojena a oddělena povrchová vrstva v pásu cca 10 cm ven od okraje plochy. Takto připravená plocha byla následně označena ve formátu XX-YM nebo XX-YP, kde XX značí číslo lokality (1 až 10), kde Y značí pořadí dvojice ploch na ploše a kde M značí plochu mimo požářiště a P značí plochu uvnitř požářiště. Tedy například 10-2P značí výzkumnou



plochu z desáté lokality, které patří do druhé dvojice ploch a jedná se o plochu uvnitř požářiště.



*Obrázek 3 Vymezená a označená studijní plocha*

#### **4.2.3 Dokumentace plochy a odběr vzorků**

V tento moment je provedena fotodokumentace, kde je zachycena podoba plochy před dalšími zásahy a také její okolí, což pomohlo v pozdější orientaci a kontrole odhadovaných údajů o okolním porostu.

Na lokalitě byl vyplněn také formulář pro danou plochu (obrázek číslo 4). Obsahuje základní informace o ploše a slouží především k zaznamenání naměřených hodnot.

|                                   |           |            |             |                   |                         |
|-----------------------------------|-----------|------------|-------------|-------------------|-------------------------|
| LHC                               |           | Lesní typ  |             | Kód zkusné plochy |                         |
| Lokalita                          |           | Věk        |             |                   |                         |
| Porost                            |           | Souřadnice |             |                   |                         |
|                                   |           |            |             |                   |                         |
| Bylinné patro                     | Druh      |            | Výška (cm)  |                   | Procentuální pokryv (%) |
|                                   | Druh      |            | Výška (cm)  |                   | Procentuální pokryv (%) |
|                                   | Druh      |            | Výška (cm)  |                   | Procentuální pokryv (%) |
|                                   | Druh      |            | Výška (cm)  |                   | Procentuální pokryv (%) |
| <b>Váhy a vlhkosti</b>            |           |            |             |                   |                         |
| Bylinné patro                     | Váha (kg) |            | Vlhkost (%) |                   | Sušina (kg)             |
| Drobné dřevo                      | Váha (kg) |            | Vlhkost (%) |                   | Sušina (kg)             |
| Hrabanka                          | Váha (kg) |            | Vlhkost (%) |                   | Sušina (kg)             |
| Poznámky (popiš pár slovy porost) |           |            |             |                   |                         |

Obrázek 4 Formulář vyplňovaný na lokalitě

Pro naměřená data je zásadní odběr vzorků ze všech tří vážených složek na ploše. Zjištění jejich vlhkosti umožní přepočítání na hmotnost sušiny a porovnání dat, která byla naměřena v různých lokalitách za různých hydrologických podmínek (vyschlý materiál po delším suchu, vlhký materiál po nedávném dešti, ...).

Vzorky byly odebrány z plochy se snahou namíchat je z vysoce zastoupených položek dané vrstvy (šišky a drobné větvičky, převažující druhy bylin). Byly v malém množství po vytlačení většiny vzduchu uzavřeny do ZIP sáčku o rozměrech 10 x 10 cm, který byl uložen do stínu do krabice chránící vzorky proti mechanickému poškození.

Po ukončení prací na lokalitě a návratu do zázemí byly vzorky uloženy v taškách do mrazničky, aby se předešlo ztrátě vlhkosti, neboť jejich analýza probíhala později hromadně.

#### 4.2.4 Měření na ploše

Jako poslední práce na každé ploše následovalo postupné odebrání složek z každé ze třech kategorií měřených pro účely analýzy šíření požáru. Jednalo se o bylinné patro, drobné dřevo a hrabanku.

Bylinné patro se dále člení na mechové patro, traviny, byliny a nálet. Pod byliny pro účel kategorizace řadím i další zástupce buřeně jako je například rod *Rubus*. Bylinné patro bylo váženo včetně kořenů. U každé z těchto podkategorií bylo odhadnuto okulárně zastoupení na ploše a průměrná výška. Tyto údaje byly zaznamenány do protokolu.

Pod drobné dřevo se řadily šišky a drobné větve ležící na zemi, které byly do průměru 7 cm, tedy řadící se mezi nehroubí. Úlomky pod 1cm délky byly ignorovány a spadali již do hrabanky.

Do kategorie hrabanka patřilo jehličí, opadané listoví a další drobné částičky včetně popela z požáru.

U každé kategorie bylo postupně vysbíráno či vytrháno vše do kategorie spadající a umístěno do vědra z PVC. Jeho zvážením včetně obsahu pomocí digitální závěsné váhy EV020 a následným odečtením váhy samotného vědra byla získána hmotnost obsahu. Ta byla zaznamenána do protokolu. Pokud bylo materiálu hodně, byl vážen po částech. Každá plocha byla po dokončení sběru dat na lokalitě navrácena do původního stavu.

### **4.3 Laboratorní zpracování vzorků**

Vzorky, které byly 30 až 60 dní uskladněny v mrazničce byly ve dnech 1.11 a 9.11 následně vzaty do laboratoře ke zpracování. To probíhalo na analyzátoru vlhkosti ATS120 od firmy Axis. Z každé lokality bylo vybráno celkem 6 vzorků, přičemž se jednalo o 3 vzorky pro lokality mimo požářiště a 3 odebrané v požářišti a vždy byly z každé měřené vrstvy (drobné dřevo, hrabanka, bylinné patro). Byly vybrány takové vzorky, které byly v neporušených ZIP sáčcích a zdáli se reprezentativní pro danou lokalitu. Z každého vzorku bylo odebráno množství 0,8 až 2 g, aby byly podrobeny analýze vlhkosti. Toto množství bylo vybráno z důvodů přesnosti naměřených hodnot a optimalizaci času analyzování. Naměřené hodnoty byly následně zaznamenávány na papír.

### **4.4 Statistické zpracování vzorků**

Veškerá naměřená data z terénu i při analýze vzorků v laboratoři byla následně vložena do databáze formou tabulky za použití prostředí Microsoft Excel, kde byly provedeny základní výpočty hmotnosti měřených kategorií hořlavin (hrabanka, bylinné patro, drobné dřevo).

Po tomto doplnění posloužila jako zdroj pro další statistické zpracování, které bylo provedeno v prostředí softwaru Statistica. Důraz byl přikládán především předpokládanému rozdílnému množství hořlavého materiálu na plochách uvnitř požářiště oproti plochám, které byly mimo něj. Za hranici významnosti byla stanovena hodnota  $\alpha=0,05$ .

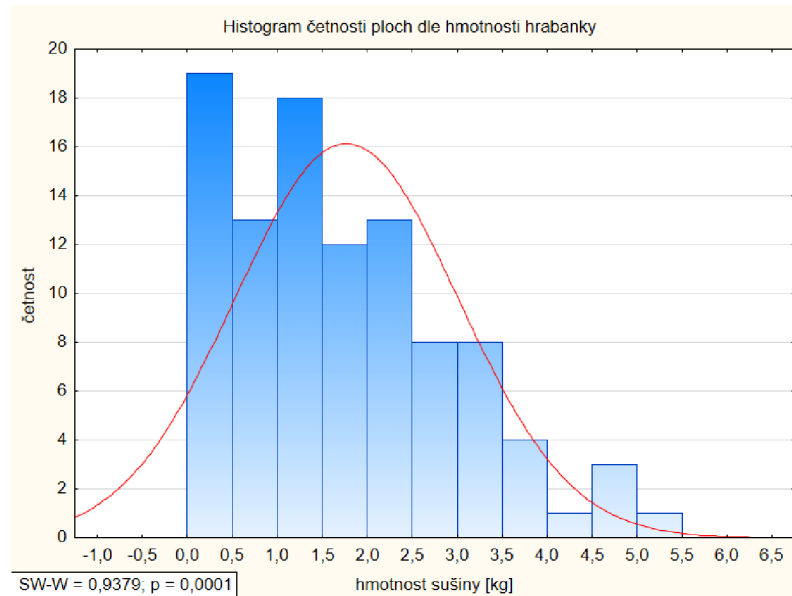
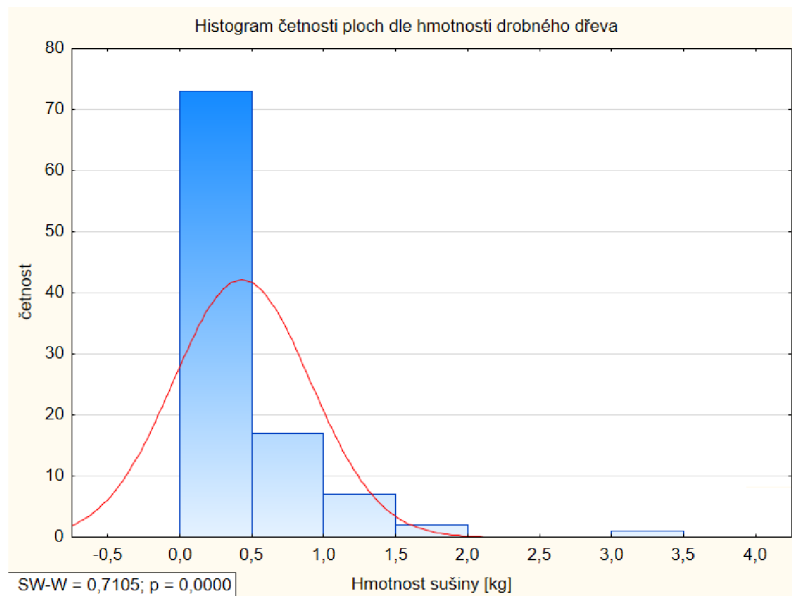
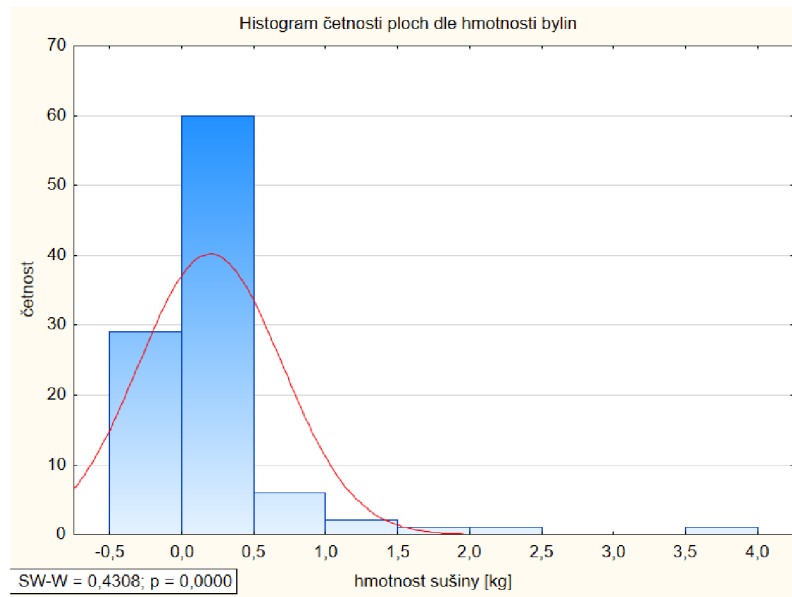
Následně byla stanovena míra odhořívání pro jednotlivé kategorie paliv, což bylo cílem této bakalářské práce. Byly též vygenerovány tabulky a grafy, které jsou použity v kapitole Výsledky.

Z hmotností sušiny pozemních paliv a jejich změn v rámci dvojice výzkumných ploch byly posléze na základě údajů o spalném teple na kilogram sušiny dopočteny hodnoty pro množství uvolněného tepla v rámci jednotlivých kategorií pozemních paliv. Dané výsledky byly vypočteny pro plochy souhrnně i dle převažující dřeviny na lokalitě. Bylo též určeno, u jakého podílu studijních ploch došlo k uvolnění energie a jaký podíl z energie uložené v daných palivech byl uvolněn. Výsledky zmíněné v tomto odstavci jsou prezentovány formou tabulek vytvořených opět v prostředí Microsoft Excel.

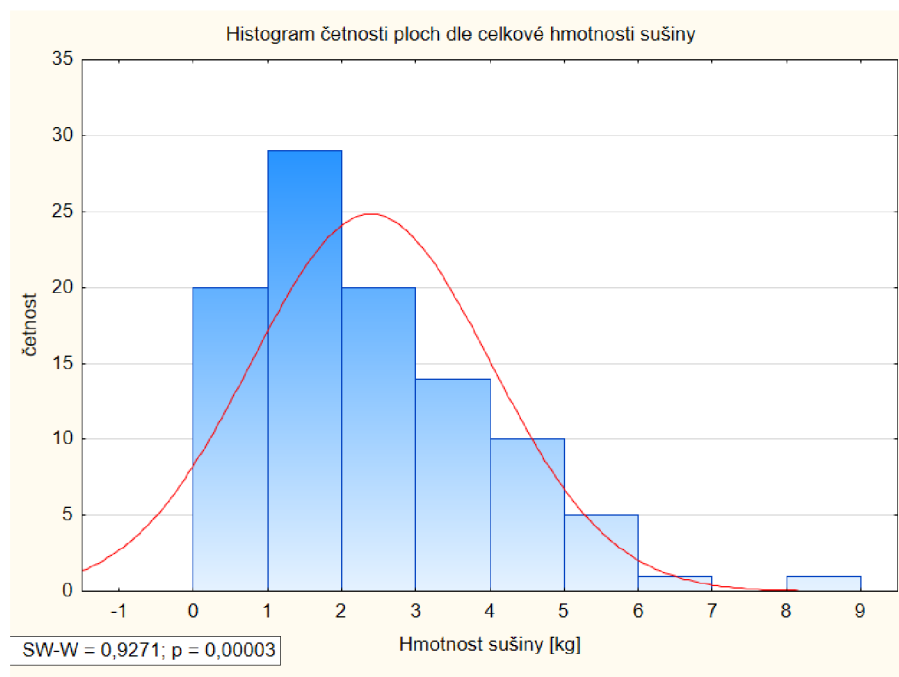
## **5 Výsledky**

### **5.1 Testování normality dat**

U dat bylo nejdříve hodnoceno, zda mají normální rozdělení. Za tímto účelem byl použit Shapiro–Wilkův test, který u všech zkoumaných množin dat zjistil významnou odchylku od normálního rozdělení dat. To je patrné i na histogramech četnosti hmotností pro jednotlivé kategorie pozemního paliva na obrázku 5 a pro četnost hmotností celkové sušiny na ploše na obrázku 6. Pro další zpracování tedy bylo nutné používat neparametrické statistické metody.



Obrázek 5 Histogramy četnosti dle hmotnosti sušiny u měřených kategorií pozemního paliva



Obrázek 6 Histogramy četnosti dle celkové hmotnosti sušiny pozemních paliv na ploše

## 5.2 Rozdíl v hmotnosti složek na plochách

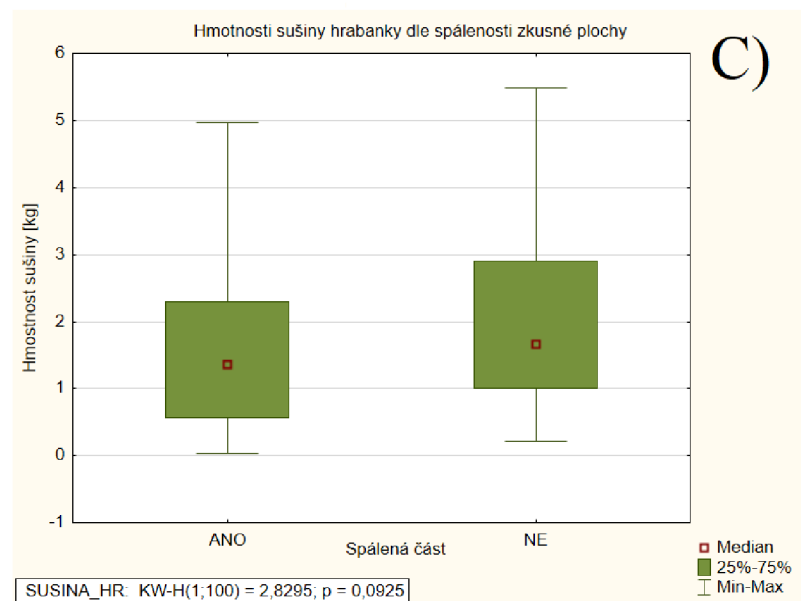
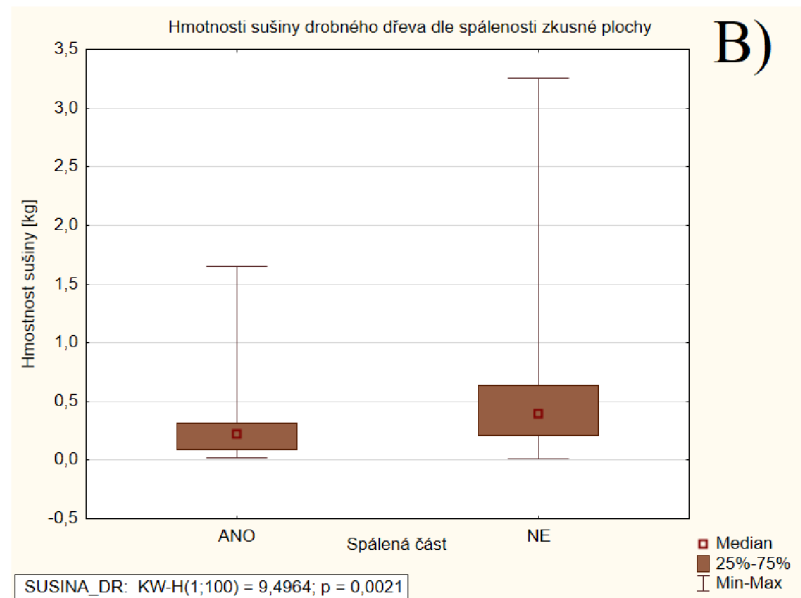
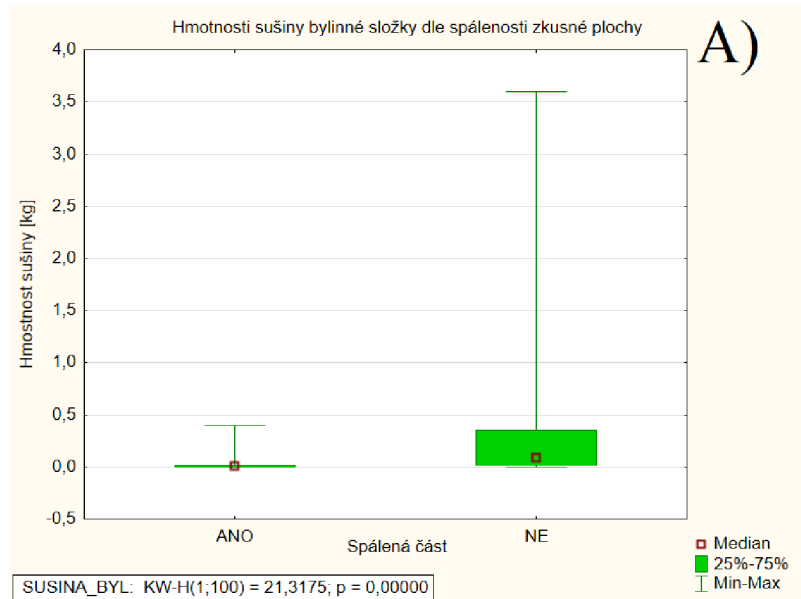
Jakožto hlavní výstup naměřených dat lze označit data týkající se rozdílů hmotnosti složek na plochách uvnitř a vně požářiště. K porovnání těchto naměřených hodnot byl použit Mann–Whitneyho U test. Jak již bylo řečeno v metodice, hranice významnosti byla stanovena  $\alpha=0,05$ .

### 5.2.1 Souhrn pro všechny plochy

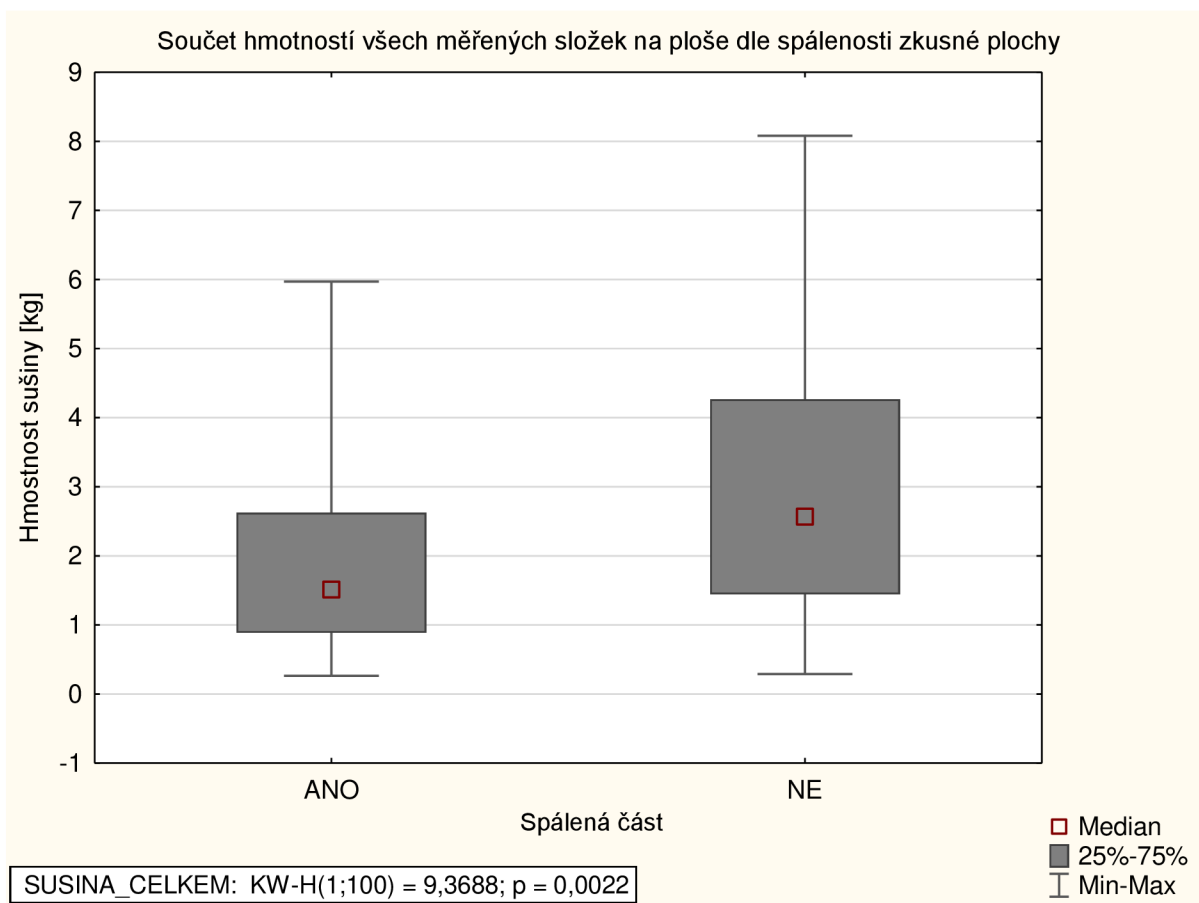
Při porovnání hmotnosti sušiny pro vybranou kategorii na spálené a nespálené ploše pro všechny lokality bez ohledu na převažující dřevinu, které jsou zobrazeny v příslušných dvojících pomocí krabicových diagramů (obrázek 7), byly zjištěny následující výsledky.

U hmotnosti sušiny bylinné složky (obrázek 7A) byl zjištěn statisticky významný rozdíl mezi spálenými a nespálenými plochami se signifikancí  $p=0,00000$  a totéž platí i pro hmotnost sušiny drobného dřeva (obrázek 7B), kde byla signifikance  $p=0,0021$ . V případě hmotnosti sušiny hrabanky vyšel rozdíl shořelé a neshořelé části statisticky nevýznamný (obrázek 7C), hodnota  $p=0,0925$  je mimo stanovenou hladinu významnosti.

Dále byla porovnána také celková hmotnost sušiny pozemního paliva na ploše pro plochy zasažené požárem a požáru ušetřené. Jak si můžete povšimnout na obrázku 8, naměřené hodnoty se statisticky významně liší, a to se hodnotou signifikance  $p=0,0022$ . Můžeme tedy vyvodit, že během požáru došlo k úbytku hmotnosti pozemních paliv obecně, především však v bylinné složce a kategorii drobného dřeva.



Obrázek 7 Boxploty s rozdíly hmotnosti spálené a nespálené plochy pro kategorie pozemního paliva



Obrázek 8 3 Boxplot s rozdíly hmotnosti celkové sušiny pozemních paliv mezi spálenými a nespálenými plochami

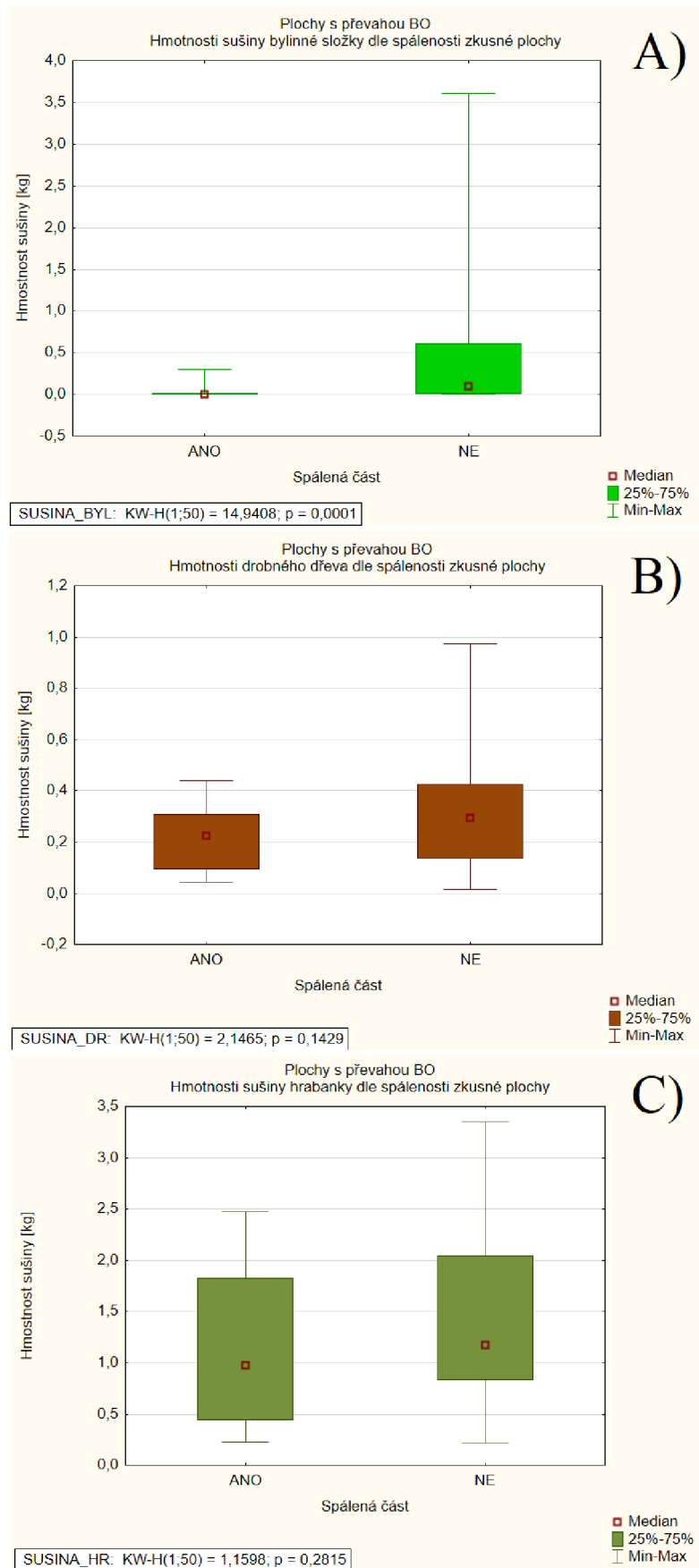
## 5.2.2 Dle převažující dřeviny na lokalitě

Na plochách byla odhadem stanovena i dřevinná skladba s důrazem na převažující dřevinu v okolí každé výzkumné plochy. U poloviny neboli 50 výzkumných ploch, byla převažující dřevina borovice lesní a u 46 ploch jí byl smrk ztepilý. Tyto plochy byly následně zpracovány týmž způsobem jako data celková, nicméně samostatně pro jednotlivé dřeviny. Zbylé 4 plochy dominovala bříza bělokorá či modřín opadavý a díky nízkému zastoupení nepředstavovaly dostatečný vzorek pro další statistické zpracování.

### 5.2.2.1 Plochy s převahou borovice lesní

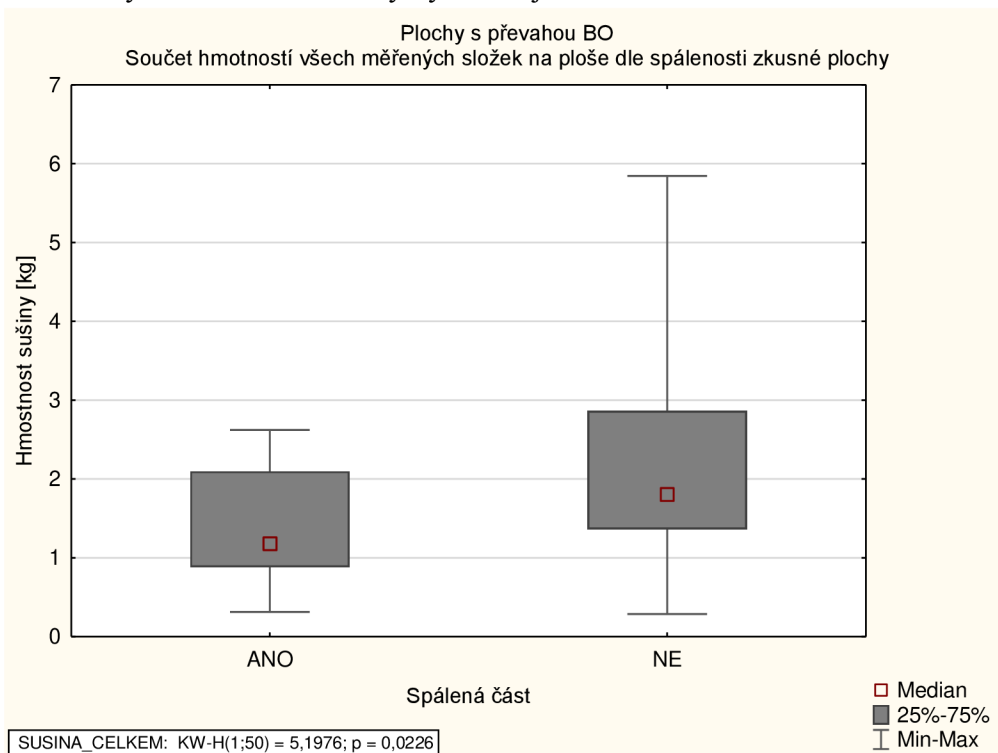
Pro hmotnost sušiny jednotlivých pozemních paliv na padesáti plochách s převahou borovice lesní vyšly následující výsledky. Mezi hmotnostmi sušiny bylinné složky na spálených a nespálených plochách byl statisticky významný rozdíl se signifikací 0,0001 (obrázek 9A), ale u kategorií drobné dřevo a hrabanka zjištěn nebyl zjištěný rozdíl dostatečný na stanovené hladině významnosti. Hodnoty signifikance pro drobného dřeva byly  $p=0,1429$  a u hrabanky dokonce pouze 0,2815. To lze pozorovat i na obrázku 9B a 9C.





Obrázek 9 Boxploty s rozdíly hmotnosti sušiny pro jednotlivé kategorie pozemních paliv na plochách s převahou borovice lesní

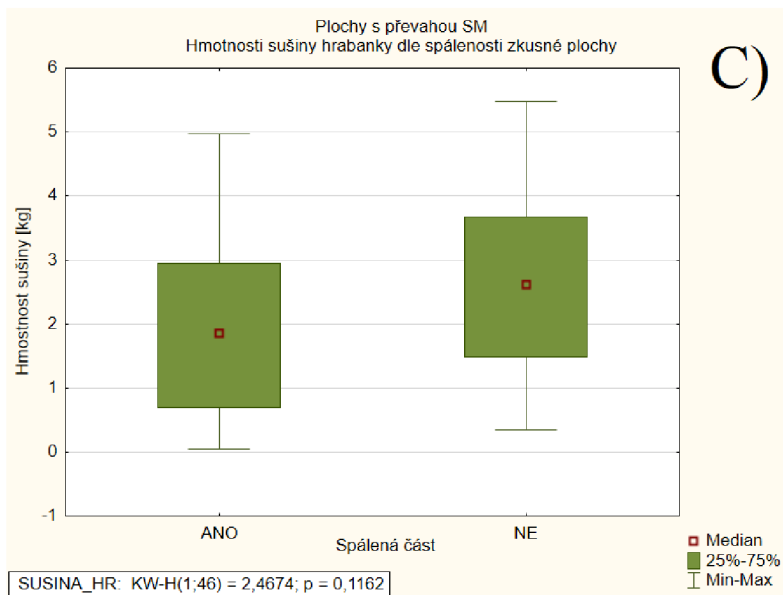
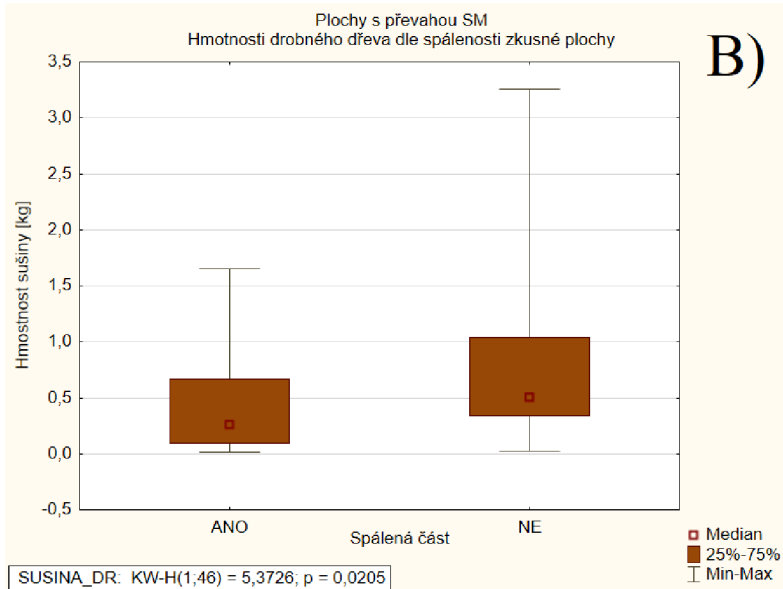
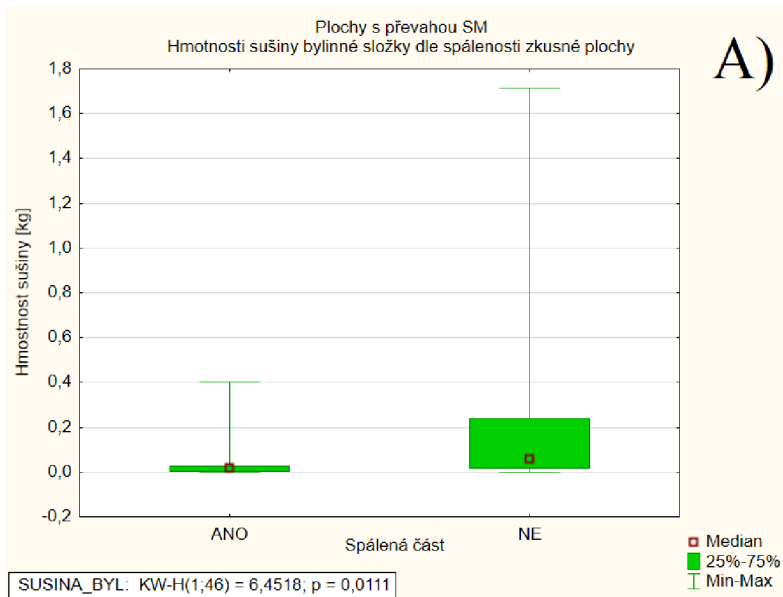
Pokud bychom na těchto lokalitách s převahou borovice lesní brali hmotnosti všech kategorií pozemních paliv dohromady, tak nám však vyjde statisticky významný rozdíl mezi hmotnostní sušiny na plochách spálených pozemním požárem a plochami požáru ušetřenými. Signifikance vyšla  $p=0,0226$ , což je významné v kontextu námi stanovené hladiny významnosti. Zmíněný výsledek je vizualizován na obrázku číslo 10.



Obrázek 10 Boxplot s rozdíly celkové hmotnosti sušiny pozemních paliv na plochách s dominancí borovice lesní dle zasažení požárem

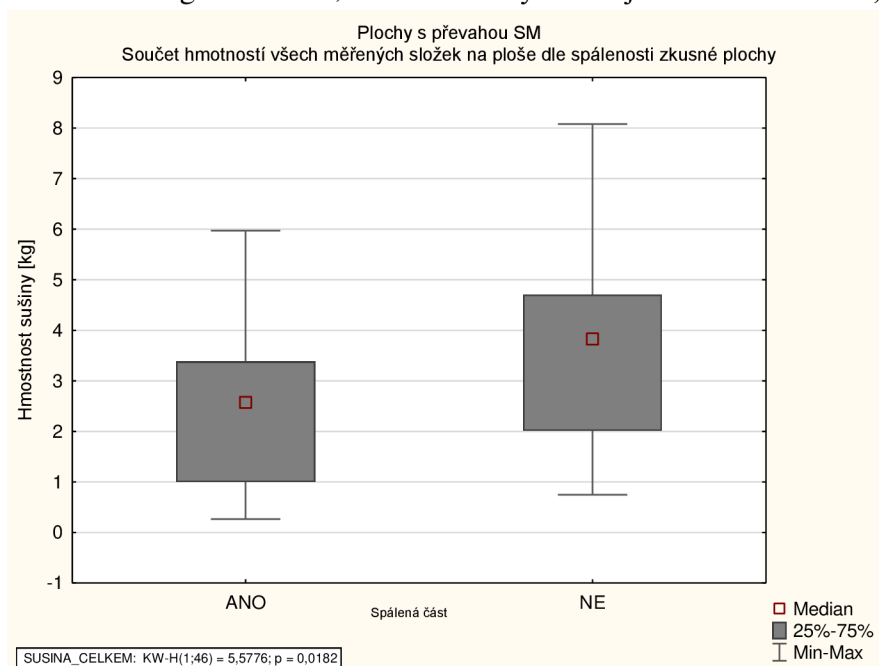
### 5.2.2.2 Plochy s převahou smrku ztepilého

Pro čtyřicet šest ploch, kde je převažující dřevinou smrk ztepilý vychází statisticky významný rozdíl mezi hmotnostmi sušiny bylinného patra na plochách spálených a nespálených (obrázek 11A). Hodnota signifikance zde má hodnotu 0,0111 Totéž platí i pro drobné dřevo (obrázek 11B), kde je tento rozdíl statisticky významný s signifikancí 0,0205. V kategorii hrabanky však již opět není rozdíl hmotností sušiny statisticky významný (obrázek 11C). Signifikance  $p=0,1162$  může naznačit určitou závislost, nicméně ne dostatečnou na námi stanovené hladině významnosti. Tyto výsledky dokládají krabicové diagramy na obrázku číslo 11.



Obrázek 11 Boxploty s rozdíly hmotnosti sušiny na plochách s převahou smrku pro jednotlivé kategorie pozemních paliv

Celkově pro plochy s převahou smrku ztepilého platí, že rozdíl hmotnostní sušiny mezi plochami zasaženými a nezasaženými požárem je u pozemního paliva statisticky významný, a to dokonce na signifikanci 0,0182. Tento výsledek je taktéž znázorněn, a to na obrázku 12.



Obrázek 12 Boxplot s rozdíly celkové hmotnosti sušiny pozemních paliv na plochách s převahou smrku dle zasažení požárem

### 5.3 Spalné teplo a uvolněná energie

Díky tomu, že plochy byly vytvářeny ve dvojicích, kde jedna byla uvnitř požářiště a druhá blízko od jeho hranice, lze odečíst naměřené údaje pro hmotnost sušiny pozemního paliva pro jednotlivé kategorie a dostat tak hmotnost spáleného paliva. Ta však bohužel k vysoké variabilitě v porostech nevyšla ve všech případech kladná. Toho si lze povšimnout na obrázku číslo 13.

|                          | Procento dvojic studijních ploch kde došlo k uvolnění energie v dané kategorii paliva |              |          |               |
|--------------------------|---|--------------|----------|---------------|
|                          | Bylinné patro   | Drobné břevo | Hrabanka | Z celé plochy |
| Všechny plochy dohromady | 74%   | 70%          | 66%      | 82%           |
| Borovice lesní           | 76%   | 60%          | 64%      | 76%           |
| Smrk ztepilý             | 70%   | 78%          | 70%      | 87%           |

Obrázek 13 tabulka s procentuálním podílem dvojic ploch, kde došlo k úbytku hmotnosti pozemních paliv, údaje děleny na kategorie paliva a dle převažující dřeviny

#### 5.3.1 Spalné teplo

Souhrnné údaje na obrázku 13 pro všechny plochy ukazují, že kladné hodnoty pro úbytek hmotnosti vyšly při součtu všech kategorií pozemních paliv u 82 %, neboli u čtyřiceti jedna dvojic z padesáti. U kategorie bylin jakožto pozemního paliva byla hodnota 74 % s tím, že však doplněk představovalo i 6 dvojic ploch (12 % z 50 celkových), kde se byliny nevyskytovaly v rámci dvojice vůbec, což zanechává 7 dvojic (14 %), kde naměřené hodnoty pro hmotnost

bylin byly vyšší u spálené plochy. To by znamenalo že požárem hmotnost vzrostla, což lze s klidem vyloučit. Hodnoty pro drobné dřevo a hrabanku jsou pak nižší a to 70 % a 66 %.

V případě ploch s převahou borovice lesní jsou výsledky 76 % pro bylinné patro a 64 % pro hrabanku obdobné jako pro všechny plochy dohromady, nicméně hodnota 60 % u drobného dřeva je nejnižší ze všech množin dvojic znázorněných v tabulce a se 76 % při souhrnu všech paliv na ploše se jedná poměrně znatelně nižší hodnotu než u souhrnu ploch či ploch s převahou smrku. Lokality se smrkem vykazovaly nejvyšší spolehlivost naměřených údajů pro kategorie drobného dřeva (78 %), hrabanky (70 %) i souhrnně paliv, která se 87 % představují nejvyšší hodnotu v tabulce. Pouze v případě bylin jsou naměřené hodnoty se 70 % méně přesné.

Pro stanovení množství uvolněné energie z rozdílů sušiny mezi plochami ve dvojici byly použity spalná tepla pro jednotlivá paliva. Pro byliny bylo použito hodnoty 17,25 MJ/kg sušiny, pro drobné smrkové dřevo 18,85 MJ/kg a pro ostatní drobné dřevo 18,51 MJ/kg. Větší rozdíly byly pouze u použitých hodnot spalného tepla u hrabanky, kde borovice s 12,18 MJ/kg má značně nižší hodnotu než smrk s 16,97 MJ/kg (Berčák, in. prep.). Po přepočtu vyšly následující hodnoty shrnuté na obrázku 14. Na průměrné zkusné ploše o výměře 1 m<sup>2</sup> došlo k uvolnění celkem 17,113 MJ energie, která převážně byla uvolněná z hrabanky (7,067 MJ). Navzájem podobné hodnoty byly u bylinného patra (5,519 MJ) a drobného dřeva, které mělo hodnotu lehce nižší a to 4,528 MJ.

Mezi lokalitami s převahou borovice lesní a smrku ztepilého pak panovaly značné rozdíly. Borové plochy měly podstatně nižší množství uvolněné energie celkově, což bylo způsobeno takřka čtvrtinovou energií uvolněnou z hrabanky ve srovnání se smrkem (3,237 MJ proti 11,774 MJ) a třetinovou v případě drobného dřeva (2,199 MJ proti 6,304 MJ). Přes 58 % veškeré energie na borových stanovištích (7,708 MJ ze 13,144 MJ) bylo uvolněno z bylinné složky pozemního paliva. U smrku bylo celkem uvolněno 21,670 MJ energie na 1 m<sup>2</sup> a jak již bylo zmíněno značná část z toho byla původem z hrabanky. Oproti borovici bylo však z bylinné složky uvolněno pouze 3,590 MJ, což je pouze lehce přes osminu celkové uvolněné energie.

|                          | Průměrná energie v MJ uvolněná z jednotlivých kategorií pozemních paliv |              |          |               |
|--------------------------|---|--------------|----------|---------------|
|                          | Bylinné patro   | Drobné dřevo | Hrabanka | Z celé plochy |
| Všechny plochy dohromady | 5,519   | 4,528        | 7,067    | 17,113        |
| Plochy - borovice lesní  | 7,708   | 2,199        | 3,237    | 13,144        |
| Plochy - smrk ztepilý    | 3,590   | 6,306        | 11,774   | 21,670        |

Obrázek 14 tabulka průměrného množství uvolněné energie při požáru v MJ/m<sup>2</sup>, členěno dle kategorie pozemního paliva a dle převažující dřeviny na lokalitě

### 5.3.2 Podíl uvolněné energie na celkové energii vázané

Pokud bychom se soustředili na podíl hmotnosti pozemního paliva spálené při požáru, dostaneme vzhledem lineárnímu vztahu mezi hmotností paliva a energií v něm obsaženou, také podíl energie, kterou požár uvolnil z celkové obsažené v pozemních palivech daných typů. Tyto poměry jsou znázorněny na obrázku číslo 15. Podíl uvolněné energie vychází dle předpokladů vysoký pro bylinné patro s hodnotou 90 % napříč plochami a s hodnotami 95 % u ploch dominovaných borovicí lesní a 84 % u ploch smrkových. U drobného dřeva se pohybuje podíl uvolněné energie kolem 44 %, pouze borové porosty mají nižší a to 36 %. Ačkoli hrabanka byla

zásadním zdrojem energie obzvláště u smrkových porostů, uvolněno jí bylo pouhých 26 %, u borovice dokonce jen 19 % z celkové obsažené. Mezi těmito hodnotami leží s 24 % hodnota pro všechny plochy bez ohledu na převažující dřevinu.

Vezmeme-li všechny kategorie podzemích paliv souhrnně, dostaneme 37% uvolnění energie napříč plochami, což mírně klesá na 34 % u smrkových lokalit a naopak stoupne na 42 % u ploch na lokalitách s převahou borovice.

|                          | Průměrný podíl uvolněné energie z celkové energie obsažené v palivu |              |          |               |
|--------------------------|---|--------------|----------|---------------|
|                          | Bylinné patro   | Drobné břevo | Hrabanka | Z celé plochy |
| Všechny plochy dohromady | 90%   | 44%          | 24%      | 37%           |
| Plochy - borovice lesní  | 95%   | 36%          | 19%      | 42%           |
| Plochy - smrk ztepilý    | 84%   | 44%          | 26%      | 34%           |

*Obrázek 15 tabulka s podílem uvolněné energie z celkové obsažené energie na průměrné ploše, rozděleno dle převažující dřeviny a dle kategorie paliva*

## 6 Diskuze

Na základě naměřených hodnot lze prohlásit, že na výzkumných plochách došlo k poměrně značnému úbytku hmotnosti pozemních paliv lesních požárů, a to o přibližně 37 %. Nejvyšší devadesátiprocentní úbytek byl zaznamenán v kategorii bylin, následovalo drobné dřevo se čtyřiačtyřiceti procenty a nejméně shořela hrabanka s pouhými čtyřiaadvaceti procenty. S přibližně 40% úbytkem hmotnosti sušiny drobného dřeva je tento výsledek v souladu s daty nasbíranými v jižních australských porostech eukalyptu (Hollis, 2010). Ten samozřejmě bohužel nepředstavuje optimální srovnání, nicméně vzhledem k současné absenci výzkumu této problematiky pro evropské, natož pak středoevropské lesy, bude muset postačit.

Celková procentuální ztráta hmotnosti pozemních paliv byla poměrně srovnatelná u obou kategorií ploch dle dominantní dřeviny (34% u smrku a 42% u borovice), ale mezi dřevinami byly značné rozdíly co se týče kategorie pozemního paliva, které bylo většinovým zdrojem energie. U borů sehrálo naprosto zásadní roli bylinné patro, zatímco u smrkových porostů jasně dominovala hrabanka, ač drobné dřevo uvolnilo také přibližně třikrát tolik tepla než u borového porostu. S tím pravděpodobně souvisí také značný rozdíl v celkové průměrně uvolněné energii z plochy, která byla 21,670 MJ u smrku a 13,144 MJ u borovice. Průměrná hodnota napříč všemi plochami pak byla 17,113 MJ energie.

Základním odhadem pro množství tepla vyprodukovaného během hoření drobného dřeva na stanovišti, které mělo střední množství sušiny bylo následující: 0,611 kWh/m<sup>2</sup> (2,198 MJ/m<sup>2</sup>) u ploch s převahou borovice a 1,763 kWh/m<sup>2</sup> (6,345 MJ/m<sup>2</sup>) u plochy s převahou smrku. Hodnoty byly určeny za předpokladu 0% relativní vlhkosti, kdy je vyprodukovaná energie 5,14 kWh/kg (18,504 MJ/kg) u dřeva borovice a 5,269 kWh/kg (18,967 MJ/kg) v případě smrkového dřeva (Krajnc, 2015).

Námi použitý odhad uvedený výše se shoduje velmi dobře s hodnotami uvedenými v kapitole výsledky, kde byly použity hodnoty 18,85 MJ/kg u smrkového a pro ostatní drobné dřevo 18,51 MJ/kg. Výsledné energie pak vycházely pro zkoumané plochy o obsahu 1 m<sup>2</sup> 2,199 MJ u borových a 6,304 MJ u smrkových lokalit. Hodnoty odhadu se podobně jako hodnoty pro spalná tepla takřka neliší, což potvrzuje správnost použitých hodnot pro spalná tepla.

Co se týče navštívených požářišť, na základě stop, které po sobě požár zanechal, bych zařadil 6 z 10 požárů do I. kategorie krutosti požáru, neboť došlo k ohoření kmenů stromů, spálení drobného dřeva i bylinného patra, ale listy na stromech neusychaly. Zbylé 4 požáry patří do II. kategorie krutosti požáru, a to z důvodu, že na nich byly nalezeny ve větší míře zuhelnatělé na zemi ležící větve a objevily se i poškozené stojící stromy, ze kterých padaly uschlé jehlice a byla také pozorována vyšší míra prohoření organické vrstvy (Turner, 1994).

Co se týče odhoření kategorie pozemního paliva lesních požárů, u kategorie drobného dřeva nebylo dospěno pro plochy s převahou borovice lesní (*Pinus sylvestris*) k závěru, že došlo k statisticky významnému úbytku hmotnosti sušiny, zatímco v případě ploch s převahou smrku ztepilého tomu tak bylo. To je v rozporu možným předpokladem srovnatelného výsledku u obou dřevin či dokonce výsledku opačného, neboli v prospěch borovice. Nicméně po další úvaze lze prohlásit, že vyšší riziko požáru u borovice, které uvádí Moreira, lze vysvětlit spíše lokalitami a mikroklimatem borových porostů ve srovnání se smrkovými, než vyššímu množství pozemního paliva ve formě drobného dřeva (především šišky a větvičky). Naměřená

střední hodnota pro hmotnost drobného dřeva na nespálených stanovištích se smrkem byla 504 g a u nespálených borových stanovišť 294 g. Hmotnost v případě borových porostů je nižší, lze za použití váhy s přesností 0,05kg předpokládat vyšší zkreslení naměřených dat než u smrku.

Samotné šíření požáru a jeho intenzita pak závisí na mnoha faktorech, počínaje topologií stanoviště, kde se požár nachází. Jak již bylo zmíněno, existují překážky brzdící postup požáru jako jsou třeba potoky, liniové stavby či ochranné zóny například kolem elektrického vedení, kde je palivo periodicky odstraňováno za účelem prevence zkratu a přerušení dodávek elektřiny (Majlingova, 2018; Hlaváč, 2016).

Mezi další zásadní faktory patří vlhkost a rozmístění paliva, které požár spaluje. Vítr má také silný vliv na chování požáru, a to v mnoha ohledech. Určuje často směr jeho šíření a pomocí ohýbání plamenů i dráhy proudění spalin reguluje také rychlost jeho šíření (Majlingova, 2018; Thomas, 2010). Všechny výše zmíněné faktory lze pouze velmi těžko dohledat pro požáry zvolené ke sběru dat a mohly mít vliv na to jakého rozsahu dané požáry dosáhly, což silně ovlivnilo, zda byly vybrány z důvodu splnění kritéria na rozlohu.

V porostech zkoumaných v rámci sběru dat bylo přibližně polovina smrkových a polovina borových. Tyto lesy se řadí dle hodnocení expertů do kategorie s nízkým, respektive středním požárním rizikem (Moreira, 2012), nicméně toto hodnocení je pro celosvětové měřítko a zahrnuje i například extrémně hořlavé porosty eukalyptu v Austrálii i jinde. Vysoké zastoupení právě smrkových a borových porostů dává smysl, pokud vezmeme v úvahu dřevinnou skladbu na území České republiky. Ta je podle Zprávy o stavu lesa 2022 taková, že na 46,8 % rozlohy lesů je smrk ztepilý a na 16 % je borovice jakožto druhá nejzastoupenější dřevina. Následují buk 9,6 % a dub 7,8 % (MZE, 2023). Vzhledem k vyššímu zastoupení i vyšší hořlavosti jehličnatých dřevin se nelze divit, že právě tyto dvě dominovaly na vybraných požářištích. Buk totiž patří dokonce do nejnižší kategorie, co se týče požárního rizika (Moreira, 2012) Vezmeme-li pak rozdíl v tomto hodnocení požárního rizika, dorovnají se rozdíl v zastoupení smrku a borovice a rovnoměrné rozdělení ploch mezi tyto dřeviny je tedy vysvětlitelné. Nicméně vzhledem k nízkému počtu lokalit (10) nelze usuzovat o obecné platnosti tohoto tvrzení. Navíc lokality prošly nenáhodným selektivním výběrem upřednostňujícím požáry velké, vzniklé v poměrně krátkém období a diskriminující na základě polohy především požáry na Moravě a ve Slezsku, kterým se nedostalo žádného zastoupení. Samozřejmě se lesní požáry neomezují pouze na nejrizikovější porosty. Za správných podmínek, kdy se nahromadí dostatek suchého paliva a zažehne se bod požáru vlivem lidského pochybení či jiným, může obzvláště za působení větru či díky příznivé topologii stanoviště hořet takřka jakýkoliv porost. Stačí splnit podmínky trojúhelníku hoření: přístup vzduchu (kyslíku), zdroj tepla a hořlavé palivo (Berčák, 2017; Emmons, 1973).



## 7 Závěr

Na základě analýzy naměřených dat bylo stanoveno, že při pozemních lesních požárech o rozloze nad 2500 m<sup>2</sup> došlo, s mírnými rozdíly dle převažující dřeviny na lokalitě, k vyhoření 84 až 95 % paliva v bylinné kategorii. Drobného dřeva bylo spáleno mezi 36 a 44 % a hrabanky shořelo méně než 26 %. Z toho lze usuzovat, že krutost požáru nebyla na příliš vysoké úrovni. Celkově tedy úbytek hmotnosti pozemních paliv na požářišti představoval 34 až 42 %.

Při hoření se průměrně uvolnilo 17,113 MJ/m<sup>2</sup>, převážně původem z hrabanky a bylinné kategorie. V množství uvolněné energie byly mezi lokalitami s rozdílnými dominujícími dřevinami nalezeny značné rozdíly. U lokalit se smrkem ztepilým byla hlavním zdrojem energie hrabanka a poté drobné dřevo. Oproti tomu borové porosty uvolnily nejvíce energie z bylinné kategorie a nejméně z drobného dřeva. Tyto hodnoty odpovídají tomu, jaké bylo zastoupení dané kategorie na zkusné ploše, neboť podíl shořelé hmoty byl u lokalit dominovaných oběma dřevinami podobný.

Na průměrné ploše s převahou smrku bylo před požárem 249 g bylinného paliva, 764 g drobného dřeva a 2 627 g hrabanky. U plochy dominované borovicí to bylo 471 g bylin, 330 g drobného dřeva a 1 409 g hrabanky. Průměrné hodnoty napříč všemi nespálenými plochami byly 354 g bylin, 547 g drobného dřeva a 1 983 g hrabanky, což dohromady dává 2 884 g pozemního paliva.

Výše uvedené výsledky lze použít k odhadu intenzity požáru, porovnání požárů v budoucnu zaznamenaných a také je lze použít při stavbě modelů šíření požáru v podmínkách lesů na území České republiky. Samozřejmě, že pro vyšší přesnost modelu, by bylo vhodné data nasbíraná dále rozšířit v rámci požárů podobných charakteristik, a především pak na požárech jiných dimenzí a na lokalitách s rozdílnou dřevinnou skladbou.

## 8 Literatura

- ANDERSON, Hal E., 1990. Moisture diffusivity and response time in fine forest fuels. *Canadian Journal of Forest Research*. **20**(3), 315-325.
- BÄR, Andreas a Stefan MAYR, 2020. Bark insulation: Ten Central Alpine tree species compared. *Forest Ecology and Management*. (474). ISSN 0378-1127.
- Basic Forest Fire Suppression Course - Online Lessons, 2021. GOVERNMENT OF NOVA SCOTIA. *Government of Nova Scotia - Programs, services and information* [online]. [cit. 2024-03-15]. Dostupné z:  
<https://novascotia.ca/natr/forestprotection/wildfire/bffsc/lessons/lesson3/fuels.asp>
- BERČÁK, Roman, 2017. *Ohrožení lesních porostů požáry na území České republiky*. Praha. Diplomová práce. Česká zemědělská univerzita v Praze.
- BERČÁK, Roman, in. prep. *Model šíření lesního požáru v podmínkách České republiky*. Praha. Dizertační práce. Česká zemědělská univerzita v Praze.
- CALEF, M. P., AND F. S. CHAPIN III a F. S. CHAPIN III, 2008. Human Influences on Wildfire in Alaska from 1988 through 2005: An Analysis of the Spatial Patterns of Human Impacts. *Earth interactions*. **12**(1), 1-17.
- CROWE, Martine, 2020. *Do mangroves burn? A remote sensed study of the impacts of forest fires on mangrove populations in South Sumatra, Indonesia*. London. Dissertation. King's College London.
- EMMONS, H. W., 1973. Heat Transfer in Fire. *Journal of Heat Transfer*. **95**(2), 146-151.
- FRYER, Janet, 2014. *Alnus rhombifolia*. U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE. *Fire Effects Information System (FEIS)* [online]. [cit. 2024-03-14]. Dostupné z:  
<https://www.fs.usda.gov/database/feis/plants/tree/alnrho/all.html>
- GLASSPOOL, I. J., D EDWARDS a L. AXE, 2004. Charcoal in the Silurian as evidence for the earliest wildfire. *Geology*. **32**(5), 381–383.
- HLAVÁČ, Pavol a Ivan CHROMEK, 2016. *LESNÉ POŽIARE A INTEGROVANÝ SYSTÉM OCHRANY LESOV PRED POŽIARMI Monografia*. I. Technická univerzita vo Zvolene. ISBN 978-80-228-2930-4.
- HOLLIS, J.J., S. MATTHEWS, R.D. OTTMAR, S.J. PRICHARD a A. SLJEPCEVIC, 2010. Testing woody fuel consumption models for application in Australian southern eucalypt forest fires. *Forest Ecology and Management*. **260**(6), 948-964.
- HOLUŠA, Jaroslav, Roman BERČÁK, Karolína LUKÁŠOVÁ, Zdeněk HANUŠKA, Pavel AGH, Jan VANĚK, Emanuel KULA a Ivan CHROMEK, 2018. LESNÍ POŽÁRY V ČESKÉ REPUBLICE – DEFINICE A ROZDĚLENÍ: REVIEW. *ZPRÁVY LESNICKÉHO VÝZKUMU*. **63**(2), 10. ISSN 0322-9688.
- KEELEY, J.E., 2012. Ecology and evolution of pine life histories. *Annals of Forest Science*. **69**, 445–453.
- KEELEY, Jon E., 2009. Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire*. **18**(1), 116–126.
- KRAJNC, Nike, 2015. *WOOD FUELS HANDBOOK* [online]. Pristina: FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS [cit. 2024-03-19]. ISBN 978-92-5-108728-2. Dostupné z:  
<http://large.stanford.edu/courses/2017/ph240/timcheck1/docs/fao-krajnc-2015.pdf>

- LONGAUEROVÁ, V., 2015. Antropogénne škodlivé činitele. In: *Výskyt škodlivých činiteľov v lesoch Slovenska za rok 2014 a ich prognóza na rok 2015*. Národné lesnícke centrum - Lesnícky výskumný ústav Zvolen, 4.2.5. ISBN ISBN 978-80-8093-207-7.
- MAJLINGOVA, Andrea, Marián DRITOMSKÝ a Jaroslav KAPUSNIAK, 2018. *Manažment a taktika hasenia požiarov v prírodnom prostredí*. I. vydanie. Technická univerzita vo Zvolene, 140 s. ISBN 978-80-228-3114-7.
- MATTHEWS, Robin F., 1992. *Alnus viridis* subsp. *crispa*. U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE. *Fire Effects Information System (FEIS)* [online]. [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: <https://www.fs.usda.gov/database/feis/plants/shrub/alnvirc/all.html>
- MOREIRA, Francisco, Margarita ARIANOUTSOU, Piermaria CORONA a Jorge DE LAS HERAS, 2012. *Post-Fire Management and Restoration of Southern European Forests*. Springer Netherlands. ISBN 978-94-007-2207-1.
- MV-GENERÁLNI ŘEDITELSTVÍ HZS ČR. *STATISTICKÁ ROČENKA 2001–2020* [online]. 41 [cit. 2024-03-01]. Dostupné z: <https://www.hzscr.cz/soubor/rocenka-2001-2020-pdf.aspx>
- MZE, 2023. *Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2022* [online]. Ministerstvo zemědělství [cit. 2024-03-18]. ISBN 978-80-7434-703-0. Dostupné z: [https://eagri.cz/public/portal/-a30268---rWtfkQZD/zprava-o-stavu-lesa-a-lesniho-hospodarstvi-ceske-republiky-v-roce-2022-strucna-verze?\\_linka=a540692](https://eagri.cz/public/portal/-a30268---rWtfkQZD/zprava-o-stavu-lesa-a-lesniho-hospodarstvi-ceske-republiky-v-roce-2022-strucna-verze?_linka=a540692)
- NELSON, R.M. Jr. a C.W. ADKINS, 1986. Flame characteristics of wind-driven surface fires. *Canadian Journal of Forest Research*. **16**(6), 1293–1300.
- PECL, Jan, Roman BERČÁK a Jan VAŇEK, 2021. *Hašení požárů v přírodním prostředí*. Praha: Ministerstvo vnitra ČR. ISBN 978-80-7616-098-9.
- REGO, Francisco Castro, Penelope MORGAN, Paulo FERNANDES a Chad HOFFMAN, 2021. *Fire Science - From Chemistry to Landscape Management*. Springer Nature Switzerland. ISBN 978-3-030-69814-0.
- SZCZYGIEL, Ryszard, Mirosław KWIATKOWSKI a Bartłomiej KOTAKOWSKI, 2018. Wpływ gradacji kornika drukarza na zagrożenie pożarowe Puszczy Białowieskiej. *Sylvan*. **162**(11), 10.
- THOMAS, Peter A. a Rob MCALPINE, 2010. *Fire in the Forest*. New York: Cambridge University Press. ISBN 978-0-521-82229-9.
- TURNER, Monica G. a Robert H. GARDNER, 1999. Prefire Heterogeneity, Fire Severity, and Early Postfire Plant Reestablishment in Subalpine Forests of Yellowstone National Park, Wyoming. *International Journal of Wildland Fire*. **9**(1), 21-36.
- TURNER, Monica G., William W. HARGROVE, Robert H. GARDNER a William H., 1994. Effects of fire on landscape heterogeneity in Yellowstone National Park, Wyoming. *Journal of Vegetation Science*. **5**(5), 731-742.
- UCHYTIL, Ronald J., 1989. *Alnus rubra*. U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE. *Fire Effects Information System* [online]. [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: <https://www.fs.usda.gov/database/feis/plants/tree/alnrub/all.html>
- UCHYTIL, Ronald J., 1989. *Alnus viridis* subsp. *sinuata*. U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE. *Fire Effects Information System (FEIS)* [online]. [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: <https://www.fs.usda.gov/database/feis/plants/shrub/alnvirs/all.html>