

Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Biologie

Studijní obor: Biologie



Anna Mlčochová

Význam požárů v ekologii mykorrhizních hub

The importance of wild fires in the ecology of mycorrhizal fungi

Bakalářská práce

Vedoucí práce:

Mgr. Petr Kohout, Ph.D.

Praha, 2024

Poděkování:

Děkuji svému školiteli Mgr. Petr Kohout, Ph.D. a konzultantovi Mgr. Jakubu Skřivánkovi za odborné konzultace a především trpělivost. Děkuji také své rodině a přátelům za jejich pomoc a podporu.

Prohlášení:

Prohlašuji, že bakalářskou práci s názvem „Význam požárů v ekologii mykorhizních hub“ jsem vypracovala samostatně pod dohledem vedoucího práce a všechny informační zdroje a literatura, ze kterých jsem čerpala, jsou uvedené v „Seznamu použité literatury“. Umělou inteligenci (AI) jsem použila v omezené míře za účelem zlepšení čitelnosti a jazyka. Veškerá použitá formulace a korektura je má vlastní. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze 12.12. 2024

Podpis:

Abstrakt

Požár je přirozenou disturbancí v mnoha ekosystémech. V souvislosti s klimatickými změnami se však předpokládá nárůst jeho frekvence i závažnosti. Tato literární rešerše poskytuje přehled informací o vlivu požárů na ekologicky významnou složku většiny terestrických ekosystémů: mykorhizní houby, konkrétně arbuskulárně mykorhizní a ektomykorhizní houby. Tyto houby tvoří symbiózu s přibližně 74 % cévnatých rostlin, a protože regenerace rostlin může být ovlivněna nedostatkem mykorhizních symbiontů, je důležité porozumět významu požáru v ekologii těchto hub. Tato práce, formou literární rešerše, shrnuje dosavadní poznatky o hlavních vlivech požárů na mykorhizní houby. Dopady požárů na mykorhizní společenstva se liší podle různých vlastností požáru a rozdílných podmínek a prostředí. Závažnost požáru, se jeví jako důležitým faktorem ovlivňujícím složení společenstev mykorhizních hub. Především požáry o vysoké závažnosti mohou mít silný negativní vliv na diverzitu mykorhizních hub. Rozdíly mezi arbuskulárně mykorhizními a ektomykorhizními houbami v reakci na požár jsou především v délce doby obnovy společenstev po požáru. Podle dostupné literatury se zdá že společenstva ektomykorhizní houby nesou podstatně déle trvající následky. Dlouhotrvající následky po závažnějších požárech jsou i v půdě, což může být další z faktorů, utvářejících mykorhizní houbová společenstva. Z edafických podmínek, které požár ovlivňuje, se pH půdy jeví jako důležitý faktor, který může prostřednictvím druhově specifických preferencí ovlivnit poměr zastoupení jednotlivých druhů v mykorhizních společenstvech. Tato práce se také dotýká témat mykorhizních pyrofilních hub, rezistentních propagul a odolných spor, pro která však dosud existuje omezené množství studií.

Klíčová slova

mykorhizní symbióza, arbuskulární mykorhizní houby, ektomykorhizní houby, požár, klimatické změny, edafické podmínky, pyrofilní houby

Abstract

Fire is a natural disturbance in many ecosystems. However, it is predicted to increase in frequency and severity due to climate change. This bachelor thesis provides an overview of the impact of fire on an ecologically important component of most terrestrial ecosystems: mycorrhizal fungi, specifically arbuscular mycorrhizal and ectomycorrhizal fungi. These fungi form symbioses with approximately 74 % of vascular plants. Since plant regeneration can be affected by a lack of mycorrhizal symbionts, it is important to understand the role of fire in the ecology of arbuscular and ectomycorrhizal fungi. This paper, in the form of a literature review, summarizes existing knowledge on the main effects of fire on mycorrhizal fungi. The impacts of fire on mycorrhizal communities vary depending on fire characteristics, as well as environmental and ecological conditions. Fire severity appears to be an important factor influencing the composition of mycorrhizal fungal communities. In particular, fires of high severity can have a strong negative effect on the diversity of mycorrhizal fungi. The differences between arbuscular mycorrhizal and ectomycorrhizal fungi in response to fire are primarily related to the length of recovery time of the communities after fire. According to the available literature, ectomycorrhizal fungal communities seem to experience significantly longer-lasting effects. Longer-lasting effects after more severe fires are also observed in the soil, which may be another factor shaping mycorrhizal fungal communities. Of the edaphic conditions affected by fire, soil pH appears to significantly influence the proportion of species in mycorrhizal communities through species-specific preferences. This work also touches on the topics of mycorrhizal pyrophilic fungi, resistant propagules, and resistant spores, although studies on these topics are still limited.

Key words

mycorrhizal symbiosis, arbuscular mycorrhizal fungi, ectomycorrhizal fungi, fire, climate change, edaphic conditions, pyrophilous fungi

Obsah

1. ÚVOD.....	6
1.1. EKOLOGIE EKTOMYKORHIZNÍCH A ARBUSKULÁRNĚ MYKORHIZNÍCH HUB	7
1.2. KLIMATICKÉ ZMĚNY A LIDSKÝ FAKTOR.....	9
1.3. ROZDĚLENÍ POŽÁRŮ	10
1.4. PŮDNÍ HORIZONTY.....	11
2. VLIV POŽÁRŮ NA PŮDNÍ PROSTŘEDÍ	12
2.1. PŘÍMÉ VLIVY.....	12
2.1.1. <i>Mikrobiální společenstva a teplo.....</i>	<i>14</i>
2.2. NEPŘÍMÉ VLIVY	14
2.3. EDAFICKÉ PODMÍNKY.....	15
2.3.1 <i>Volatilizace živin a mykorhizní houby.....</i>	<i>16</i>
3. EFEKT POŽÁRU NA MYKORHIZNÍ HOUBY	17
3.1. VLIV TEPLA NA MYKORHIZNÍ HOUBY.....	20
3.2. ZDROJE MYKORHIZNÍCH HUB PO POŽÁRU	20
4. VLIV POŽÁRŮ NA EKTOMYKORHIZNÍ HOUBY	21
4.1. SPOLEČENSTVA EKTOMYKORHIZNÍCH HUB PO POŽÁRU V BOREÁLNÍCH LESÍCH	21
4.2. SPOLEČENSTVA EKTOMYKORHIZNÍCH HUB PO POŽÁRU V LESÍCH MÍRNÉHO PÁSU	22
4.3. VLIV EDAFICKÝCH PODMÍNEK NA SPOLEČENSTVA EKTOMYKORHIZNÍCH HUB PO POŽÁRU.....	23
4.4. EKTOMYKORHIZNÍ PYROFILNÍ HOUBY	24
5. VLIV POŽÁRŮ NA ARBUSKULÁRNĚ MYKORHIZNÍ HOUBY	25
5.1. VLIV EDAFICKÝCH PODMÍNEK NA SPOLEČENSTVA ARBUSKULÁRNĚ MYKORHIZNÍCH HUB PO POŽÁRU.....	26
5.2. ODOLNÉ SPORY ARBUSKULÁRNĚ MYKORHIZNÍCH HUB.....	27
6. ZÁVĚR.....	27
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	29

1. Úvod

Mykorhizní houby jsou celosvětově rozšířené pudní organismy, které tvoří mutualistický symbiotický svazek s rostlinami. Jsou významnou složkou většiny terestrických ekosystémů, jelikož mají zásadní vliv na růst i produktivitu rostlinného společenstva (Smith a Smith 2011). Mykorhizní houby se podílejí na cyklu uhlíku a minerálních živin. V současné době se odhaduje, že 90 % všech terestrických rostlin žijí v symbiotickém vztahu s mykorhizními houbami (Lanfranco et al. 2016; Smith a Read 2008).

Mykorhizní symbionti vytvářejí spleť podzemní sítě hyfových vláken vázanou na kořeny rostlin. Tyto myceliální sítě mimo jiné přináší rostlinám ochranu proti patogenům (Jung et al. 2012; Van Wees et al. 2008) a lepší vyrovnávání se stresovými podmínkami, jakými jsou například nedostatek vody (Püschel et al. 2021; Voříšková et al. 2019), vyšší salinita půdy (Gómez-Bellot et al. 2015; Navarro et al. 2014), či toxické látky (Colla et al. 2008). Největším přínosem mykorhizní symbiomy pro hostitelské rostliny je zlepšení příjmu živin a vody. Z hlediska živin se jedná především o klíčové živiny fosfor a dusík. Rostlina houbovým symbiontům poskytuje především produkty fotosyntézy.

Základní rozdělení mykorhizních hub se odvíjí od způsobu interakce s kořeny. Ekologicky nejdůležitějšími typy mykorhizy jsou arbuskulární a ektomykorhizní symbióza (Smith a Read 2008; Kadowaki et al. 2018). Nejrozšířenějším typem je arbuskulární mykorhiza, která se vyskytuje u 72 % cévnatých rostlin (Brundrett a Tedersoo 2018). Ektomykorhiza je méně častější, nejobvykleji je přítomná u dřevin a převažuje v jehličnatých lesích (Brundrett a Tedersoo 2018). Má práce se zabývá právě těmito dvěma typy. Existují, ale i další v tomto textu neprobírané symbiózy, ze kterých bych mohla zmínit erikoidní mykorhizu či orchideoidní mykorhizu.

Následující práce se zabývá vlivem požáru na mykorhizní houbová společenstva. Požár je přírodní disturbance, pozměňující distribuci, strukturu a produktivitu vegetace, ovlivňující globální cyklus uhlíku a celkové klima (Bowman et al. 2009). Oheň tak do ekosystémů přináší enviromentální změny, změny týkající se i již zmíněných mykorhizních hub.

Vyhodnocení složení mykorhizních společenstev po požáru by mohlo být užitečné pro pochopení a předvídání obnovy různých lokalit zasažených požárem, jelikož regenerace některých rostlin může být omezena nedostatkem jejich mykorhizních symbiontů (Nuñez et

al. 2009). Tato práce má proto přinést přehled dostupných informací o vlivu a změnách společenstev ektomykorhizních a arbuskulárně mykorhizních hub po požáru.

1.1. Ekologie ektomykorhizních a arbuskulárně mykorhizních hub

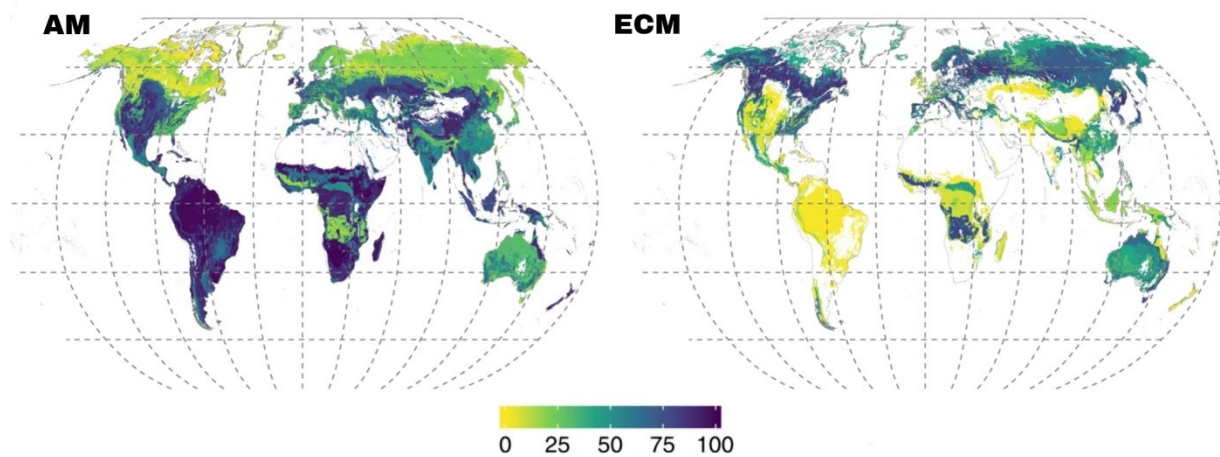
Jak bylo již zmíněno v úvodu, ektomykorhizní a arbuskulárně mykorhizní houby jsou ekologicky významnými druhy hub s velkým globálním rozšířením. Obě skupiny tvoří symbiotické vztahy s rostlinami, ale liší se škálou hostitelů, morfologií, způsobem příjmu živin a evolučním vývojem. Jmenované odlišnosti v této kapitole rozvedu, spolu s obecnými informacemi, které jsou zásadní pro porozumění ekologii těchto hub.

Ektomykorhizní (ECM) symbióza je mutualistická symbióza, kterou tvoří především houby z oddělení *Basidiomycota* a *Ascomycota* s vyššími rostlinami (Tedersoo et al. 2010). Tato skupina hub, ve srovnání s arbuskulárně mykorhizními houbami, je poměrně různorodá a zahrnuje větší počet fylogenetických skupin (Smith a Read 2008). Ektomykorhizní houby jsou vybavené poměrně velkým enzymatickým aparátem, což může být vysvětleno jejich možným vývojem ze saprotrofních hub (Tedersoo et al. 2010). Tento enzymatický aparát jim umožňuje rozkládat organickou hmotu a získávat z ní jinak nepřístupný dusík, jak pro mykorhizní houby samotné, tak pro své rostlinné hostitele (Lindahl a Tunlid 2015). Pro efektivní výměnu živin mezi houbou a rostlinou je důležitá struktura nazývaná Hartigova síť, která se nachází ve mezibuněčných prostorech kořenů. Kořeny rostlin ECM houby obalují hyfovým pláštěm, ze kterého vyrůstá extraradikální mycelium, které prorůstá do okolního substrátu a může se rozšiřovat na značné vzdálenosti, čímž efektivně zvětšuje objem půdy, ze které je rostlina schopna čerpat živiny a vodu (Smith a Read 2008). Tento typ mykorhizy je charakteristický pro dřeviny, a je dominantní mykorhizní symbiózou v lesích mírného pásu a tajgy (Smith a Read 2008).

Arbuskulárně mykorhizní (AM) symbióza je symbióza mezi houbami z oddělení *Glomeromycota* a širokou škálou druhů rostlin. Oproti ECM houbám jsou AM houby řádově taxonomicky chudé, ale vynikají diverzitou jejich hostitelských rostlin a rozšířením ve většině suchozemských ekosystémů (Sánchez-Ramírez et al. 2017). Tato symbióza pravděpodobně hrála roli v přechodu rostlin na souš (Simon et al. 1993), což jen dokazuje stáří tohoto symbiotického vztahu. Arbuskulárně mykorhizní houby jsou charakteristické tvorbou arbuskulí, čemuž napovídá jejich jméno. Arbuskule jsou hojně větvené intracelulární hyfy, které slouží ke zvětšení prostoru pro výměnu živin mezi houbou a hostitelskou rostlinou. Získávání živin z půdy zajišťuje myceliální síť tvořená nepřehrádkovaným myceliem. Některé

druhy arbuskulárně mykorhizních hub tvoří také struktury zvané vezikuly, které mají pravděpodobně zásobní funkci (Smith a Read 2008).

Arbuskulární mykorhiza představuje nejrozšířenější typ mykorhizní symbiózy. Přibližně 72 % cévnatých rostlin jsou v symbiotickém vztahu s arbuskulárně mykorhizními houbami (Brundrett a Tedersoo 2018). AM symbióza je široce rozšířená po celém světě (Obrázek 1.), zejména v tropech jak u bylin, tak u stromů. (Smith a Read 2008). Ektomykorhizní houby mohou být nalezeny u poměrně menšího (2 %) počtu čeledí rostlin, a to převážně u dřevin (Brundrett 2017; Smith a Read 2008). I přes menší diverzitu rostliny tvořící ECM dominují v několika různých prostředích, a to převážně ve výše zmíněných lesích mírného pásu.



Obrázek 1.: Procentuální zastoupení nadzemní rostlinné biomasy arbuskulárně mykorhizních a ektomykorhizních rostlin, převzato a upraveno dle Soudzilovskaia et al. 2019.

Ve vztahu mykorhizních hub k rostlinám je klíčové získávání živin, které jsou pro rostliny jinak hůře dostupné. Mezi akvizicí živin ECM a AM houbami existuje určitá rozmanitost. Například AM houby zcela postrádají schopnost rozkladu organických látek, a proto primárně využívají anorganické zdroje dusíku (Smith a Smith 2011). Na druhou stranu ECM houby jsou vybaveny hydrolytickými a oxidativními extracelulárními enzymy, které jim umožňují získat dusík a fosfát vázaný v půdní organické hmotě (Phillips et al. 2013). Proto se ECM houbám daří na místech, kde se nachází více komplexních organických substrátů, jako jsou boreální lesy a lesy mírného pásu (Steidinger et al. 2019).

Podle dostupných informací lze říci, že arbuskulární mykorhiza vznikla právě jednou, na rozdíl od ektomykorhizy, která vznikala v evoluci opakovaně (Brundrett a Tedersoo 2018). Některé z těchto linií ektomykorhizních hub se vyvinuly z hub arbuskulárních a u některých

těchto linií jsou pozůstatkem tohoto vývoje takzvané „*multifunctional roots*“, neboli kořeny rostlin s arbuskulární i ektomykorhizní symbiózou (Brundrett a Tedersoo 2018). Podle (Brundrett a Tedersoo 2018) se často jedná o predominantně ektomykorhizní druhy, které v raných fázích růstu rostlin tvoří arbuskulární mykorhizu, nebo se jedná o strategii pro vyrovnání se s extrémními podmínkami.

1.2. Klimatické změny a lidský faktor

Klimatické změny jsou aktuálním tématem s globálním dopadem (Solomon et al. 2007). Klimatické změny a požáry jsou vzájemně komplexně provázány. Efekty klimatických změn, které mohou ovlivňovat aktivitu požárů, zahrnují oteplování a sucho (Flannigan et al. 2013), četnost výskytu blesků (Krause et al. 2014) a sekundárně dokonce i rozšíření invazivních druhů rostlin (Balch et al. 2013). Klimatické změny se tedy mohou projevit jako častější a silnější požáry o větší závažnosti a větším rozsahu (Doerr a Santín 2016; Fernandez-Anez et al. 2021; Tedim et al. 2015; Westerling et al. 2006). Tento trend ale není globální a jednoznačný, jak bylo již výše zmíněno jde o komplexní vztah, ve kterém hraje další hlavní roli lidský faktor.

Lidé ovlivňovali a využívali požáry napříč historií, a to mělo své následky. Z historického hlediska využívání požáru na úpravu vegetace, společně s přeměnou přírodní krajiny v urbánní a agrikolturní plochy, mohlo na některých místech vést k narušení přírodních požárních režimů (Pfeiffer et al. 2013; Santín a Doerr 2016). V současnosti mají největší dopady zásahy do vegetace, jako je odstraňování biomasy nebo řízené vypalování, potlačování požárů, a dokonce i introdukce invazivních druhů rostlin; to vše je spojováno se změnami v přírodních požárech (Balch et al. 2013; Pausas a Keeley 2009). Jeví se, že dopady lidského působení na požáry mohou být čím dál tím větší.

Pokud se v následujících letech zvýší četnost požárů, můžeme tak také očekávat nárůst emisí CO₂ způsobeným spalováním, což by mohlo nadále urychlovat a přispívat k výraznějším změnám klimatu (Menon et al. 2007). Složitý vztah klimatických změn, lidského vlivu a požárů je tak aktuálním tématem, které si vyžaduje lepšího porozumění.

Mykorhizní symbióza hraje klíčovou roli v pomoci rostlinám vyrovnávat se s nepříznivými podmínkami prostředí (Becerra et al. 2014; Martin 2016; Ruiz-Lozano a Azcón 2000). Abychom mohli předpovědět dopad klimatických změn na rostlinou vegetaci, je důležité se zaměřit na jejich působení na samotné mykorhizní houby.

1.3. Rozdělení požárů

Požáry jsou nedílnou součástí terestrických ekosystému po celé planetě. Na některých místech mohou být žádanou disturbancí, která je součástí životních cyklů tamní vegetace. Požáry můžeme popisovat podle několika měřítek. Správné popsání rozdílů mezi různými požáry je důležité pro pochopení odlišných dopadů na ekosystémy.

Prvním z měřítek je intenzita požáru. Intenzita požáru (fire intensity) se často zaměňuje se závažností (fire severity). Správné rozdělení nám ale umožní sledovat požární události ze dvou různých hledisek. Jedna z definic může znít: „Intenzita požáru popisuje fyzikální proces hoření, při kterém se uvolňuje energie z organických látek.“ (Keeley 2009). Měříme-li u požáru jeho intenzitu, měříme tím energii uvolněnou hořením. S touto definicí můžeme o intenzitě uvažovat jako o jedné z fyzikálních složek samotného ohně. Při měření intenzity bereme v potaz několik dalších faktorů, jako jsou například teplota, radiální energie a výška plamenů (He et al. 2019; Keeley 2009).

Při měření závažnosti požáru se měří proměna a ztráta organické hmoty vlivem hoření. Použijeme-li definici ze stejného článku: „Souhrnně lze říci, že intenzita požáru se vztahuje ke ztrátě nebo rozkladu nadzemní a podzemní organické hmoty“ (Keeley 2009). Uvažujeme-li nad závažností požáru, uvažujeme také nad ztrátou biomasy, a to jak nadzemní, tak i podzemní. Závažnost se liší v jednotlivých ekosystémech a je ovlivňována vlastnostmi vegetace a externími podmínkami, jako je například počasí a klima. Závažnost požáru je určena jeho intenzitou, přičemž je důležité rozlišovat mezi těmito dvěma pojmy, které nejsou zaměnitelné (He et al. 2019; Keeley 2009).

Dalším faktorem je čas. Při popisu a vymezení požáru sledujeme dobu trvání požáru, sezonalitu požáru a případnou frekvenci. Frekvence požárů popisuje četnost požáru na daném místě a v daném čase, tedy relativní pro sledované období (Firewords, 2008). Sezonalita se udává jako „načasování požáru v průběhu roku“ (Miller et al. 2019).

Všechny tyto vlastnosti lze shrnout pod pojmem *fire regime*. Jednotlivé ekosystémy a určitá vegetace mohou mít vlastní *fire regimes* na které jsou zvyklé a přizpůsobené. *Fire regime* můžeme rozdělit podle (Neary et al. 2005) nejprve na *understory fire regime*, neboli požár podrostu, který fakticky nemění podstatu vegetace a není letální pro dominantní porost. Naopak *stand replacement fire regime* je letální pro většinu nadzemní vegetace a jeho důsledkem jsou změny ve složení a struktuře porostu. *Mixed fire regime* je středně závažný (mezi stand replacement and understory) a je variabilní. Variabilita tohoto *fire regime* může

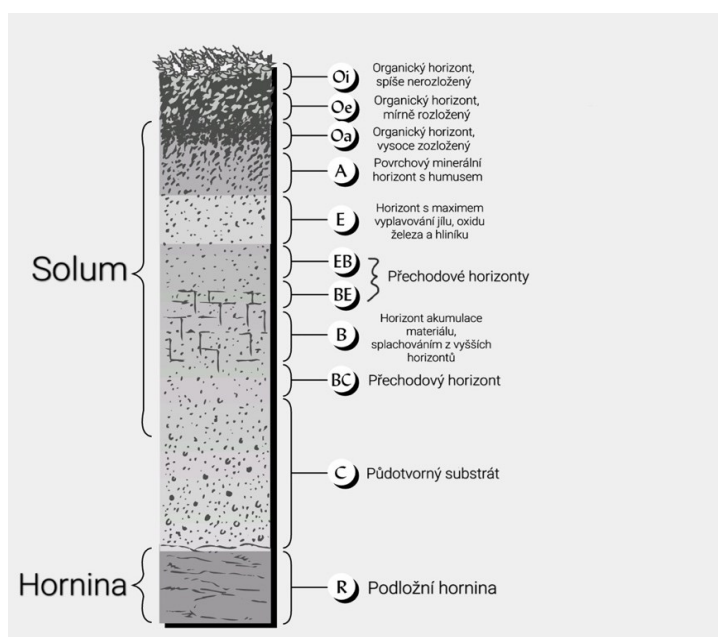
být časová, nebo prostorová. Ekosystémy, kde je pravděpodobnost požáru velmi malá se kategorizují do *nonfire regime*.

Z hlediska původu je pro tento text významné rozdělení na *wildfire* a *prescribed fire*. Pojmem *wildfire* se označují nekontrolované požáry, které se nacházejí napříč terestrickými ekosystémy (Encyclopedia Britannica 2024). *Wildfires* mohou vzniknout přírodními vlivy, nejčastěji bleskem, nebo mohou být úmyslně či neúmyslně založeny lidmi (Cardille et al. 2001). *Prescribed fires* jsou lidmi kontrolované požáry, prováděné z několika důvodů. Hlavními cíli *prescribed fires* je snížení množství suchého paliva, nebo například obnovení požárního režimu do ekosystémů k nim uzpůsobeným (Encyclopedia Britannica 2023). *Prescribed fire* se tedy používá jako preventivní opatření před nekontrolovatelnými požáry s vysokou závažností.

V kontextu lesů se požáry dělí na pozemní požár, podzemní požár a korunový požár, jak je specifikováno v oficiálním metodickém listu Hasičského záchranného sboru České republiky (Metodický list 21P 2001).

1.4. Půdní horizonty

Životním prostředím mykorhizních hub je kromě rostlinného hostitele, půda. Pohybem materiálu se zde vytváří půdní profil a formují se jednotlivé půdní horizonty. Půdní horizonty jsou vodorovné vrstvy půdy, vznikající pohybem materiálu v půdě o různých rychlostech (Obrázek 2.). Tyto vrstvy se liší vlastnostmi a složením, a jsou podle toho popsány od nejvyššího organického horizontu (O) až po kamenný (R) horizont (Ashman a Puri 2002).



Obrázek 2.: Půdní profil hypotetické minerální půdy, rozdělení jednotlivých horizontů, viditelné všechny organické horizonty, převzato a upraveno dle Brady a Weil., 2014

Každý typ půdy napříč terestrickými ekosystémy má specifickou sekvenci a kombinaci půdních horizontů (Brady a Weil 2014).

Z pohledu mykorhizních hub jsou důležité horizonty organické a minerální. Organické horizonty se nenachází ve všech půdách. Jsou typické v lesních ekosystémech, protože jsou tvořeny rozkládajícími se pozůstatky rostlin a živočichů. V lesích je hlavním zdrojem organických horizontů opad. Podle stádia dekompozice se tyto horizonty dále rozdělují na spíše nerozložený (Oi), mírně rozložený (Oe) a vysoce rozložený (Oa) horizont (Ashman a Puri 2002; Brady a Weil 2014). A horizonty neboli nejvyšší (povrchové) minerální vrstvy, jsou typické obsahem minerálních látek a humusu, s velkým podílem organické složky (Ashman a Puri 2002; Brady a Weil 2014). S hloubkou půdy se tak mění i její složení a struktura, stejně tak jako množství a typy mykorhizních hub (Neville et al. 2002; Becerra et al. 2014).

2. Vliv požárů na půdní prostředí

Požár je disturbancí pozměňující vegetaci, prostředí, i klima. Jeho dopady nejsou jednotvárné. Různorodost změn v důsledku jeho působení závisí na podmínkách, za kterých oheň vznikl a na faktorech, které působí během hoření. Míra dopadu konkrétního požáru se odvíjí od jeho závažnosti, která je spojována s topografií, počasím, fyzikálními podmínkami, typy vegetace, množstvím akumulovaných paliv i s požární historií určité lokality (Estes et al. 2017). V prostředí dojde ke změnám chemického, fyzikálního i biologického rázu. Změny mohou být buď okamžité a krátkodobé, nebo dlouhodobé a přetrvávající (Neary et al. 2005).

Existuje mnoho faktorů, kterými mohou požáry ovlivnit mykorhizní houby. V následujících podkapitolách popisují některé z vlivů ovlivňující mykorhizní houby přímo nebo nepřímo a rozvedu téma dopadů požáru na půdní prostředí.

2.1. Přímé vlivy

Mykorhizní houby žijí napříč půdními horizonty, od horní organického horizontu až hluboko v horizontu minerálním (Neville et al. 2002). V mnoha případech při silnějších požárech dochází k úplnému spálení O horizontu a částečnému spálení horizontu A (Glassman et al. 2016; Salo a Kouki 2018). Se ztrátou horních vrstev půdy, dochází ke ztrátě i příslušných mykorhizních hub, žijících v těchto vrstvách. Pokud tedy okupují hlubší vrstvy, mohou být do jisté míry před přímým požárem ukryty. Přímé poškození, či dokonce smrt houby mohou být způsobeny vysokými teplotami, kterým jsou tyto organismy během

závažnějších požárů vystaveny. V půdě se teploty razantně mění napříč její hloubkou. Vrchní vrstvy půdy mohou dosahovat nejvyšších teplot (až 200-300 °C) a s navyšující se hloubkou se teploty rychle snižují. To, jakých teplot samotný oheň dosáhne, je závislé na konkrétních attributech prostředí, ve kterém k požáru dochází a na aktuálních meteorologických a klimatických podmínkách. Množství a typ paliva, podnební podmínky, vlhkost, topografie a typ půdy jsou důležité faktory, které určují dopad požáru (Bruns et al. 2020; Kipfer et al. 2010).

Množství tepla, které se z nadzemního požáru přenáší do půdy, závisí na několika faktorech, včetně intenzity požáru, tloušťky organické vrstvy, relativního obsahu organické hmoty, minerálních částic, vody a vzduchu v dané půdě. Tyto faktory společně ovlivňují, jak efektivně a do jaké hloubky se teplo dostává do půdního profilu. Obecně se tedy dá říci, že do minerální vrstvy se přesune pouze 10-15 % nadzemního tepla (Hart et al. 2005). Pro odhad toho k jak velkému ohřevu půdy při požáru dojde, může být klíčové množství pozemního paliva v kontaktu s půdou (Neary et al. 1999). I v případě velkého množství pozemního paliva, je ale míra tepla přeneseného do půdy limitována její vlhkostí, jelikož teplota půdy nepřekročí 100 °C do doby, než se všechna voda vypaří (Neary et al. 1999). Oba tyto faktory jsou závislé na době trvání požáru, kdy se ukazuje že i velmi vysoké teploty mohou mít minimální vliv, když jsou krátkodobé (Thomaz et al. 2014).

Mykorhizní houby jsou silně vázané na své rostlinné hostitele. Smrt rostlinného symbionta, který houbě slouží jako jediný zdroj organických uhlíkatých látek, má přímý negativní dopad na symbiotickou mykorhizní houbu (Dove a Hart 2017). V některých případech však mrtvé orgány rostliny, především kořeny, mohou krátkodobě sloužit, jako útočiště pro houby, které přežily požár, avšak toto prostředí není dlouhodobě udržitelné (Kivlin et al. 2021; Livne-Luzon et al. 2021). Dalším faktorem je uvolnění živin a organického materiálu po spálení nadzemní biomasy. Tento materiál může sloužit jako zdroj živin pro mykorhizní houby, zároveň však poskytuje substrát pro saprotrofní houby, což může vést k vzájemné konkurenci (Livne-Luzon et al. 2021). Zdroj živin mohou zároveň mykorhizní houby plně využít, pouze za přítomnosti hostitelských rostlin. Komplexní vztah umírajícího rostlinného hostitele a přežívající houby si zaslouží více pozornosti při dalších studiích.

2.1.1. Mikrobiální společenstva a teplo

Jedním z nejpřímějších vlivů požáru je teplo. To, do jaké míry se teplo přeneso do půdy, je, jak již bylo uvedeno výše, závislé na řadě faktorů, především na závažnosti a intenzitě požáru. V menší míře může zvýšená teplota vést k ohřívání půdy, urychlení tvorby organické hmoty a podpoře mikrobiální aktivity (Wang et al. 2021). Mikrobiální respirace se do určité hodnoty může zvyšovat. Podle studie (Liu et al. 2018), se optimální teploty pro půdní mikrobiální respiraci napříč různými lesními ekosystémy liší a pohybují v rozmezí 38,5 °C-46,0 °C, což je velmi vysoká teplota oproti výsledkům studie (Pietikäinen et al. 2005), kde se práh optimálních teplot pohyboval na škále 25°C-30°C. Jednotlivé hodnoty, které znázorňují práh, do kterého respirace stoupala a po němž prudce klesla, se silně lišily mezi různými ekosystémy, typy půdy a klimatickými oblastmi (Liu et al. 2018). Optimální teplota se liší mezi houbami a bakteriemi, přičemž houby vykazují větší citlivost na zvyšující se teploty než bakteriální společenstva (Pietikäinen et al. 2005). Zároveň bude odlišná teplota i mezi jednotlivými druhy hub a bakterií.

Jelikož zvýšená respirace vede k vyšší produkci CO₂, dochází k pozitivní zpětné vazbě s narůstající teplotou a urychlování oteplování (Nissan et al. 2023). V poslední době vyšlo několik studií, které se i ve spojení s klimatickými změnami zaměřují na adaptaci mykorhizních hub na zvyšující se teploty. Z výsledků těchto několika studií lze odvodit trend adaptace mykorhizních hub, a stejně tak jiných půdních mikrobiálních společenstev, na zvyšující se průměrné roční teploty, spojené s posouváním hranice pro optimální respiraci (Nottingham et al. 2019; Bárcenas-Moreno et al. 2009).

2.2. Nepřímé vlivy

Nepřímé vlivy jsou změny, které ovlivňují život organismu nepřímo, a mohou zahrnovat různé ekologické, fyzikální nebo chemické faktory, které se projevují prostřednictvím interakcí s jinými organismy nebo prostředím. Většinou se jedná o změny podmínek prostředí, ve kterém organismy žijí. Pro mykorhizní houby je tímto prostředím, kromě hostitelské rostliny, půda. Některé houby vykazují druhově specifické preference edafických podmínek jako je pH, nebo forma a poměr živin (Tedersoo et al. 2014). Oheň má schopnost zásadně měnit fyzikální i chemické atributy půdy.

Jedna z významných změn, které nastávají v půdě po požáru, je modifikace jejích hydrologických vlastností a funkcí. Míru těchto změn ovlivňuje především závažnost požáru (Moody et al. 2016). Podle závažnosti a také obsahu organického materiálu v půdě, může

docházet ke změnám v evotranspiraci, kapacitě zadržování vody v půdě, či ke zvýšením povrchového odtoku (Stoof et al. 2010; Moody et al. 2016; Atchley et al. 2018). Zajímavou roli v tomto ohledu hraje popel a míra spálení nadzemní vegetace. Naprosto spálený popel může zvyšovat kapacitu zadržování vody v půdě (Stoof et al. 2010). Při velmi závažných požárech může pár centimetrů pod povrchem, dojít k vytvoření vrstvy odpuzující vodu, která vede až k hydrofobicidě půdy (DeBano 2000). Na základě nedávných článků (Castaño et al. 2023; Fu et al. 2022) je evidentní že obsah vody v půdě může ovlivnit složení společenstev AM i ECM hub.

Samotné spálení nadzemní vegetace, může mít za následek změnu albeda půdní plochy a vést ke zvýšení ohřevu půdy (Hart et al. 2005). Ztráta ochranné vrstvy nadzemní vegetace a biomasy spojená s vyšší erozí půdy a větším povrchovým odtokem, znamená že déšť může být dalším dlouhotrvajícím negativním faktorem (Shakesby a Doerr 2006).

Důležité změny se také týkají dostupnosti a poměru živin, či pH. Požár může zvýšit pH půdy (Arocena a Opio 2003; Switzer et al. 2012) a ovlivnit poměry živin (Kong et al. 2018; Nave et al. 2011). Změna koloběhu živin v půdě, společně s rozdílem pH, může mít silné dopady na mykorhizní houby, které jsou jednou z hlavních součástí podzemního mikrobiomu a jsou s ním úzce vázány. Tyto houby hrají klíčovou roli v interakcích s rostlinami a ovlivňují dostupnost živin, což má zásadní význam pro zdraví ekosystémů.

2.3. Edafické podmínky

V této podkapitole se věnuji vlastnostem půdy a změnám v půdním prostředí, které nastávají v důsledku požáru, neboť houby, jakožto půdní organismy, jsou citlivé na změny těchto podmínek.

Půda je komplex skládající se z anorganických a organických částí, vody a vzduchu. Anorganickou část můžeme nazvat také částí minerální, tvořenou primárními a sekundárními minerály (Neary et al. 2005). Organická část je tvořena mrtvou i živou biomasou a organickými látkami, které vznikly jako produkty metabolismu v půdě (Brady a Weil 2014). To, jak jsou jednotlivé části půdy ovlivněny silně závisí na teplotách, kterých půda dosáhne. Do teploty 200 °C se jedná převážně o změny biologických vlastností (Santín a Doerr 2016). Ve vyšších teplotách pak dochází k chemickým a fyzikálním změnám kdy se může měnit struktura a textura půdy, s rozdílným poměrem jednotlivých složek (Ketterings et al. 2000).

Organická hmota je základní složkou horních vrstev půdy, a míra jejího rozkladu stoupá s hloubkou, což znamená že, na povrchu je strukturovaný opad s rozeznatelnými částmi

biomasy a níže je humus, jakožto homogennější organická hmota (Vokoun et al. 2002). Humus je důležitý pro strukturu půdy, spojuje organickou a anorganickou (minerální) část v půdní agregáty (Neary et al. 2005). Půdní agregáty fungují jako základní stavební složka půdní struktury, což je klíčové pro pohyb vzduchu a vody pod zemí (Neary et al. 2005; Brady a Weil 2014). Stabilita agregátů po požáru je kontroverzním tématem vzhledem k její dependenci na fyzických, chemických a biologických vlastnostech půdy (Magomani a van Tol 2019).

Změny v půdě způsobené požárem se týkají jak již zmíněné struktury (Magomani a van Tol 2019; Thomaz et al. 2014), tak i snížení schopnosti zadržování vlhkosti a vzniku hydrofobních vrstev (Macdonald a Huffman 2003), ovlivnění cyklu živin a jejich volatilizaci (Wilson et al. 2002; Neff et al. 2005; Verma et al. 2019), ztráty biomasy, organické hmoty a změnách v populaci organismů, ke kterým dochází především při spalování vegetace.

Oboustranná výměna živin je základním principem mykorhizní symbiózy (Smith a Read 2008). Obsah a dostupnost živin v půdě, jsou tak klíčovými faktory pro pochopení a predikci budoucího vývoje obou organismů. Vystává tak otázka, jak požáry ovlivňují koloběh živin v půdě a jejich dostupnost pro mykorhizní houby a hostitelské rostliny.

2.3.1 Volatilizace živin a mykorhizní houby

Většina významných chemických změn v půdě nastává při vysokých teplotách, přičemž se obvykle uvádí teplota nad 200 °C (Certini 2005; Santín a Doerr 2016). Po požáru dojde k uvolnění značného množství dostupných živin, z organických zdrojů v půdě a z popela ze spálené biomasy nad zemí (Certini 2005; Thomaz et al. 2014). Spalování biomasy vede ke zvýšení pH, obsahu vyměnitelných zásad a kationtové výměnné kapacity (Juo a Manu 1996). Popel hraje klíčovou roli v obohacení půdy po požáru a ve zvyšování jejího pH, neboť má zpravidla poměrně vysokou hodnotu pH (Thomaz et al. 2014). Zvýšení pH při závažnějších požárech může být výsledkem samotného ohřívání půdy, při kterém za vysokých teplot dochází k denaturaci organických kyselin (Certini 2005). Zásaditý charakter popela je ovlivněn obsahem zásaditých kationtů jako je Ca, K, Na a Mg, které se mohou podílet na efektivitě kationtové výměnné kapacity. Do jaké míry bude půda ovlivněna, ale závisí na jejích vlastnostech před požárem (Juo a Manu 1996). Efekt požáru na půdní živiny a jejich obsah a poměr se liší napříč horizonty (Thomaz et al. 2014).

Požár ovlivňuje dostupnost klíčových minerálních živin v půdním prostředí. Mezi tyto klíčové živiny patří dusík (N) a fosfor (P), jejichž dostupnost je zásadní nejen pro ekologickou

roli mykorhizních hub ve vztahu k jejich rostlinným partnerům, ale také pro jejich vlastní metabolické procesy. Při spalování organického materiálu a nadzemní vegetace, dochází k uvolňování N a P, které byly vázané v organických formách (Debano 1991). Jedním z hlavních faktorů, který může ovlivnit mykorhizní houby, je značný úbytek dusíku, který byl pozorován v půdách boreálních lesů (Brais et al. 2000; Harden et al. 2003; Treseder et al. 2004). Úbytek dusíku, ale není jednoznačný, a naopak může docházet k mineralizaci organických látek a zvýšení obsahu jeho dostupných forem NO_3^- a NH_4^+ (Verma et al. 2019). Efekt požáru na fosfor není tak výrazný a často se projevuje jen v nejvyšších vrstvách půdy (Neff et al. 2005; Thomaz et al. 2014; Verma et al. 2019).

Spálením biomasy a organických složek půdy dochází, především v jejích horních vrstvách, k úbytku organického uhlíku (C) uvolněním do atmosféry (Neff et al. 2005; Verma et al. 2019). Ztráty C mohou být dlouhodobé, návrat množství půdního uhlíku do předpožárního stavu může trvat poměrně dlouhou dobu. Ve studii (Verma et al. 2019) nebyla úroveň uhlíku obnovena ani 15 let po požáru. Tyto ztráty se mohou projevit ve změnách poměru C:N.

3. Efekt požáru na mykorhizní houby

Studie zabývající se dopadem požáru na mykorhizní houby, sledují většinou změny diverzity, změny v kolonizaci mykorhizními houbami, změny inokulačního potenciálu a případně enzymatickou aktivitu mykorhizních hub. Kvůli velké škále vlivů, působících a ovlivňujících mykorhizní houby během i po požáru (viz 2.1. a 2.2.) je zobecnění jeho celkového efektu na mykorhizní houby složité. Promítá se to do rozporuplných výsledků studií, které zároveň ukazují negativní (Kivlin et al. 2021; Pérez-Izquierdo et al. 2020; Tedersoo a Bahram 2019), neutrální (Chen a Cairney 2002; Orumaa et al. 2022), nebo i pozitivní (Hewitt et al. 2013; Salo a Kouki 2018) efekt na diverzitu mykorhizních hub. Nejednoznačné výsledky se ukazují i v případě měření potenciálu kolonizace mykorhizními houbami, kde stejně jako u diverzity vidíme jak poklesy (Barker et al. 2013), tak žádné změny, či dokonce zvýšení kolonizace po požáru (Eom et al. 1999; Rincón a Pueyo 2010). Tyto nesrovnalosti, jsou výsledkem různých podmínek, rozdílných prostředí a neznalosti všech okolností.

Používání rozdílných metod na určování diverzity a efektu požáru na mykorhizní houby, má vliv na různorodé výsledky. V metastudii (Dove a Hart 2017) bylo zjištěno, že u měření druhové bohatosti pomocí plodnic vychází 47% snížení druhové bohatosti

v porovnání s molekulárními metodami. Tyto výsledky tak mohou ukazovat spíše na rozdílné investování do rozmnožování jednotlivých hub po požáru než na přímé změny v půdní diverzitě. Ve stejné studii je také rozdíl v *in situ* a *ex situ* měření kolonizace mykorhizními houbami, kdy měření v přírodních podmínkách vykazuje snížení na rozdíl od uměle vytvořených podmínek. Rozdíly ve výsledcích naznačují, že reakce hub na disturbance ve formě požáru je v přírodě úzce spojena s prostředím a místně specifickými podmínkami.

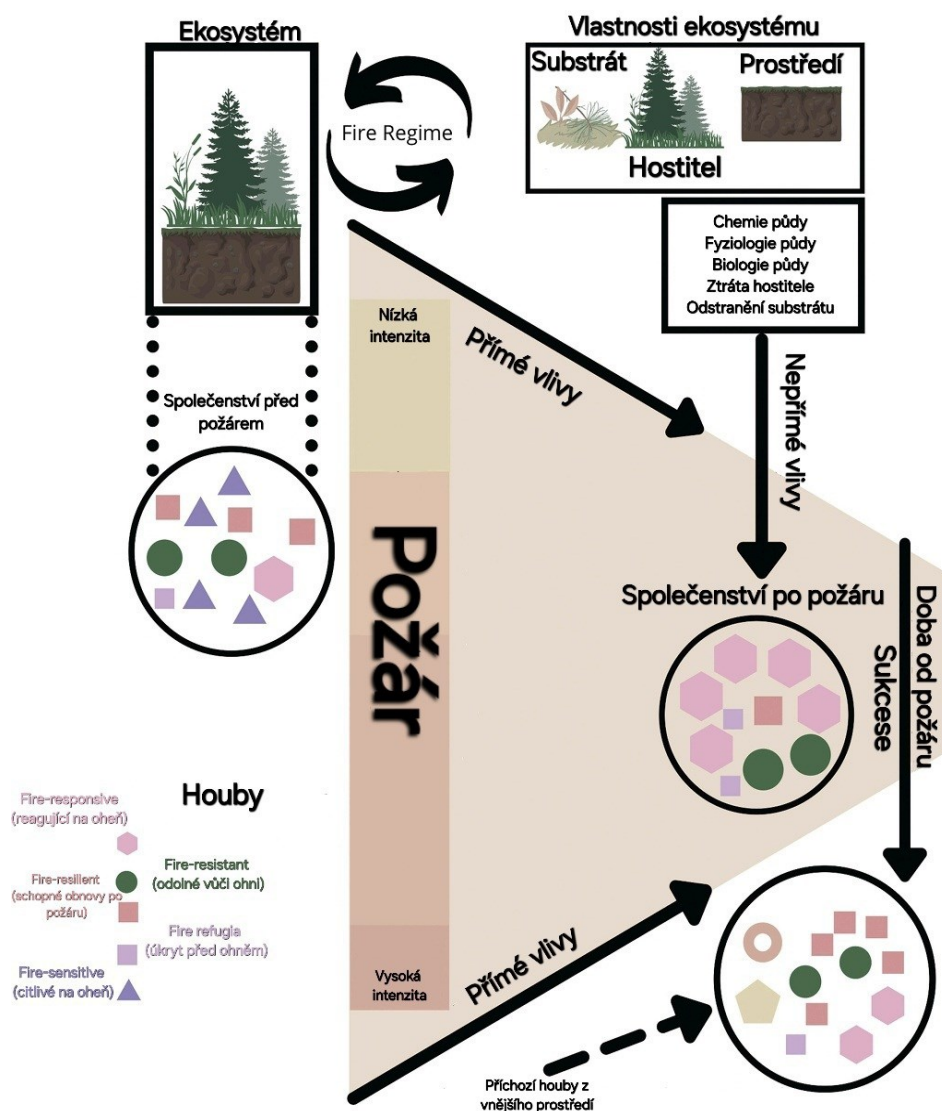
Požár ovlivňuje mykorhizní houby a se silným trendem snižování druhové bohatosti (Day et al. 2019; Dove a Hart 2017; Sun et al. 2015). Může tu docházet ke specifickým odpovědím na požár podle taxonomických skupin. Požáry snižují počet druhů hub ze třídy *Basidiomycota* a množství jejich plodnic (Hernández-Rodríguez et al. 2013; Gassibe et al. 2014). Oproti tomu houby ze třídy *Ascomycota*, vykazují poměrně vysokou toleranci vůči požárům a jejich počet po požáru může stoupat (Holden et al. 2016; Sun et al. 2015).

Složení mykorhizních společenstev po požáru je ovlivněno prostředím, ve kterém houby rostou (Obrázek 3.), přičemž biom (např. vegetační typ a klimatické podmínky) hraje významnou roli, při určování odpovědi mykorhizních hub na požár. Výsledky meta-analýzy ukazují, že biom je klíčovým prediktorem změn druhové bohatosti a kolonizace mykorhizních hub po požáru (Dove a Hart 2017). Přírodní požáry představují přirozenou disturbance, která podporuje diverzitu vegetace v různých biomech. Některé ekosystémy jsou na požáry lépe přizpůsobeny než jiné (Heim et al. 2022; Nasi et al. 2002; Burkle et al. 2015). Historie disturbance je důležitým prvkem v určování toho, jak je ekosystém „připraven“ na disturbance v podobě požáru. Příkladem může být studie (Dahlberg et al. 2001), ve které těžba dřeva souvisela s nižší diverzitou hub.

U méně závažných požárů mohou být rozdíly ve složení hub, určovány podmínkami prostředí, spíše než v důsledku požáru (Rodrigues dos Santos et al. 2019). V návaznosti na to změny v půdě mohou odrážet změny v rostlinné vegetaci (Kivlin et al. 2021) a ve změnách půdního prostředí (viz 2.3.). Míra a délka trvání změn v mikrobiálních společenstvech je určována závažností požáru (Dove et al. 2022; Holden et al. 2016). Ukazuje se, že při málo závažných požárech jsou změny minimální, či dokonce dochází k zvýšení mykorhizní diverzity (Rodrigues dos Santos et al. 2019; Salo a Kouki 2018).

S různými ekologickými strategiemi a rozdílnými abundancemi v biomech a ekosystémech můžeme očekávat i rozdílnou odpověď arbuskulárních a ektomykorhizních hub. Arbuskulární houby se jeví jako odolnější vůči požáru, s kratšími intervaly rekonvalescence (Treseder et al. 2004; Xiang et al. 2015). V chronosekvenční studii (Treseder

et al. 2004), trvalo ektomykorhizním houbám navrácení se do stavu před požárem 15 let, v porovnání s AM, které se vrátilo do původního stavu 3 roky po požáru. Hlavním důvodem delší obnovy může být závislost ECM hub na organických substrátech, kterých je po požáru nedostatek, na rozdíl od AM hub, které získávají živiny především z anorganických zdrojů. Jako další důvody zmiňuje článek rychlejší obnova AM hub, jejich relativní tolerance vysokých teplot a jako poslední dostupnost ECM hostitelských rostlin na tříletém spáleništi. Ve studii (Chen a Cairney 2002) nebyly zaznamenány změny v druhové bohatosti hub po požáru, ale došlo ke změnám v relativním poměru ECM a AM hub. Na rozdílné reakce AM a ECM hub může mít vliv i jejich rozdělení v půdě, s ECM houbami ve vyšších vrstvách a AM v nižších vrstvách půdního horizontu (Neville et al. 2002).



Obrázek 3.: Konceptuální model, ukazující vzájemnou provázanost systémových a enviromentálních faktorů, a z toho vyplývající variabilitu reakcí houbových společenstev na požár. Převzato a upraveno dle Fox et. al. 2022

3.1. Vliv tepla na mykorhizní houby

Teplota může ovlivnit ECM a AM houby různě, stejně jako sucho a dostupnost živin. AM houby mohou být, ve srovnání s ECM houbami, citlivější na nízké teploty a sucho (Kilpeläinen et al. 2020). Nárůsty teplot se v případě AM hub promítly do změny struktury hyfových vláken a změnách ve strategii alokace, kde došlo k posunu od investice do zásobních vezikul k investicím do růstu extraradikálního mycelia (Hawkes et al. 2008). U ECM hub se projevuje vliv zahřívání půdy na druhové složení jejich společenstev, což může být důsledkem teplotní citlivosti některých druhů (Mucha et al. 2018; Kipfer et al. 2010). Nicméně, podle výsledků studie (Mucha et al. 2018), mírné zahřívání půdy nevedlo k celkovému snížení druhové bohatosti. Množství ECM huby vykazuje určitou toleranci na změny teplot (Kilpeläinen et al. 2020; Kipfer et al. 2010). Práh teploty pro 100% úhyn hub v půdě je různý pro vlhkou a suchou půdu, pohybuje se kolem 80 °C pro suchou půdu a 60 °C pro půdu vlhkou (Hart et al. 2005). Vyšší teplotní práh pro suchou půdu lze odvodit od faktu, že vlhká půda má mnohem vyšší tepelnou vodivost, což vede k vyššímu přenosu tepla v půdě (Hedayati-Dezfooli a Leong 2019).

Z dostupných informací lze vyvodit, že požár i o menší intenzitě, kdy dochází jen k částečnému přenosu tepla do půdy, může ovlivnit mykorhizní houby, a že dopad tepla může být rozdílný u ektomykorhizních a arbuskulárních hub, i u jednotlivých druhů hub.

3.2. Zdroje mykorhizních hub po požáru

Pro přežití hub po požáru existují dvě hlavní strategie. První strategií je adaptace zajišťující přežití, druhou pak adaptace zajišťující rychlé rozšíření hub na plochy, které byly zničeny požárem.

Nejjednodušším způsobem je být dosti hluboko, aby je požár a ohřev půdy nikterak neovlivnil, s rizikem ve formě ztráty svého rostlinného hostitele. To by mohlo naznačovat tomu, že, ECM houby vázané na vyšší vrstvy půdy (viz 3. kapitola), by mohly být přímým efektem zasaženy více než hlouběji žijící AM houby. Ideálními hostiteli pro mykorhizní houby mohou být rostliny, jejichž kořenový systém přežije požár a může následně regenerovat. Toto je jedna z hlavních strategií rostlin podrostu v lesích tajgy (Day et al. 2020; De Grandpré et al. 1993; Hollingsworth et al. 2013). Pro život rostlin v disturbovaných biomech je důležitá schopnost *resproutingu* neboli vyrašení, růstu rostliny z přeživších pupenů po ztrátě větší části své biomasy (Clarke et al. 2013). Pro mykorhizní houby tak tyto

rostliny představují útočiště po spálení ostatních rostlin (Hewitt et al. 2013). Houby, které na těchto rostlinách přežijí mohou poté kolonizovat rostliny v pozdějších stádiích v pozdějších stádiích sukcese, čímž podporují obnovu ekosystému (Hewitt et al. 2017).

Dalším způsobem, kterým houby v půdě přežívají je formou rezistentních spor, či propagulí (Buscardo et al. 2010; Korb et al. 2003). Stále existují mezery v naší znalosti adaptace hub na oheň a vysoké teploty, především pokud mluvíme o mykorrhizních houbách. Existují ale studie dokazující rašení spor stimulované teplem, například u ektomykorrhizní houby *Rhizopogon olivaceoticus* (Bruns et al. 2019). Molekulární mechanismy tolerancí nejsou ještě detailně známe, ale významnou roli může hrát pigmentace, protože melanin poskytuje houbám toleranci vůči teplotním extrémům (Cordero a Casadevall 2017).

Šíření spor během a po požáru je dalším způsobem, kterým houby osidlují spálené plochy. Disperze spor vzduchem ovlivňuje složení houbových společenstev (Kobziar et al. 2018; Kivlin et al. 2014) po vystavení ohni. Zde hraje roli vzdálenost nespálených ploch (Peay et al. 2012), která může být dána i heterogenitou požáru. Po více heterogenních požárech se oblast zasažená ohněm skládá z různě spálených částí, kde ty méně zasažené mohou sloužit jako zdroj pro disperzi spor do okolních více zasažených míst (Kivlin et al. 2021). Disperze vzduchem se jeví jako jeden ze selekčních procesů, jelikož menší spory jsou schopny letem zdolat delší vzdálenosti, než spory velké (Chaudhary et al. 2020; Golan a Anne 2017).

4. Vliv požárů na ektomykorrhizní houby

ECM houby se jeví jako rezistentní vůči požáru, kdy lehčí požáry mají minimální účinek na jejich složení, ale rozsáhlé požáry o vyšší intenzitě limitují regeneraci společenstev a mohou mít dlouhotrvající následky (Owen et al. 2019). Dlouhodobé studie jako jsou dále zmíněné (Orumaa et al. 2022; Yang et al. 2020) tento trend potvrzují. Efekt požáru na ECM houby může mít komplexní a dalekosáhlé důsledky, které si vyžadují další výzkum pro pochopení jejich plného rozsahu.

4.1. Společenstva ektomykorrhizních hub po požáru v boreálních lesích

Zásadní část studií zkoumajících vliv požáru na ECM houby se soustředí na lesy tajgy. V lesích tajgy převládají ECM stromy, ECM keře a erikoidně mykorrhizní byliny a keře, přičemž se zde vyskytuje jen několik AM rostlin (Paulson et al. 2021; Hollingsworth et al. 2006; Day et al. 2020). Jedním z dominantních dřevin v boreálních lesích jsou stromy z rodu

Pinus, které jsou obligatorními ECM symbionty. Obnova takovýchto lesů je tak kriticky závislá na ECM houbovém společenství v půdě (Pérez-Izquierdo et al. 2021). V lesích tajgy je požár přírodně se vyskytující a důležitou disturbancí, určující biodiverzitu a strukturní komplexitu ekosystému (Manton et al. 2022). Z toho lze vyvodit, že zde existuje určitá daná odolnost prostředí a reakce ekosystému budou odpovídat evolučnímu přizpůsobení boreálních druhů k častým požárům.

Mnoho studií, zaměřujících se na místa s bohatou požární historií, provádí výzkum formou chronosekvence (Orumaa et al. 2022; Sun et al. 2015; Yang et al. 2020). Chronosekvence je typ studie, kdy se v jeden čas sleduje více různě starých ploch (čas je v tomto případě čas od posledního požáru). V takto prováděných studiích je patrný trend zvyšující se diverzity a abundance ECM s narůstajícím časem po požáru (Sun et al. 2015; Yang et al. 2020). Tyto studie obsahovaly plochy zasažené požáry o různých závažnostech, ve studii (Sun et al. 2015), dokonce nedošlo ke spálení O horizontu. Tým Yang et al. (2020) pozoroval v čínském pohoří Velký Chingan, více než 40% snížení druhové bohatosti ECM hub v Oe horizontu zasaženém požárem, spolu s jejich potlačením ve srovnání s patogenními houbami. Dalším způsobem pro sledování sukcesních změn, je periodické odebrání vzorků z jednoho místa po dobu několika let. Taková studie byla prováděna ve Finském Kitsi, po dobu 12ti let. Ukázalo se že nižší až střední závažností požáru, vedla v tomto případě, ke zvýšení druhové bohatosti v postdisturbační době (Salo a Kouki 2018). Ve stejné studii byla na plochách zasažených korunovým požárem o vysoké intenzitě zaznamenána výrazně nižší diverzita ECM hub, a to i 12 let po požáru. Diverzita a druhová bohatost, byly v této studii měřeny sběrem plodnic, což může přinést rozdílné výsledky a určitá omezení v porovnání se sekvenčními analýzami půdy.

4.2. Společenstva ektomykorhizních hub po požáru v lesích mírného pásu

Výše jsem zmínila roli biomu v mykorhizních odpovědi na požár (viz 3.). Zároveň jsem v úvodu (1.1.) uváděla, že ektomykorhizní houby často dominují mezi mykorhizními druhy v lesích mírného pásu. Podle výsledků z metastudie provedené (Dove a Hart 2017), je tento typ lesů nejvíce studovaným biotem z hlediska vlivu požáru na houby. Dostupné informace obecně ukazují, že požár v mírném pásu snižuje druhovou bohatost ektomykorhizních hub (Buscardo et al. 2010; Glassman et al. 2016; Kipfer et al. 2011). Studie, prováděná týmem Glassman et al. (2016), se zaměřila konkrétně na přežívání ECM hub v bankách spor v oblasti

Sierra Nevada, na východě Kalifornie. Banka spor, která představuje zásobu klidových propagulí hub v půdě, po požáru zaznamenala snížení druhové bohatosti, ale zároveň zůstala z velké části nedotčena. Podle této studie, požár o silné intenzitě snížily druhovou bohatost ECM hub odstraněním vzácných druhů. Pokles diverzity ektomykorhizních hub, by mohl být také v přímé souvislosti se spálením celého OH horizontu během požáru. Pro testování přežití hub ve formě bank spor, byly provedeny biotesty. Při těchto biotestech byly zasazeny semenáčky borovic do půdy odebírané z kontrolních a požárem zasažených ploch. Těmito testy byla sledována ECM kolonizace, která byla 85% u biotestů s půdou po požáru, zatímco u biotestů s půdou, která požárem nebyla zasažena, byla kolonizace 100%. Podle těchto výsledků lze usuzovat, že i přes významné zásahy do složení společenstev ECM hub v bankách spor, může zásoba klidových propagulí v půdě, hrát významnou roli v obnově ekosystému. Naopak ve studii provedené v Oregonu (Cowan et al. 2016), nebyly rozdíly mezi oblastmi s různou intenzitou požáru dostatečné pro potvrzení hypotézy o poklesu druhové bohatosti ECM hub. Nicméně, bylo ve stejné studii zjištěno, že složení společenstev ECM hub na spálených plochách silně koreluje s obsahem uhlíku a organické hmoty v půdě. Takový výsledek naznačuje, že půdní podmínky hrají klíčovou roli při utváření ektomykorhizních společenstev po požáru.

4.3. Vliv edafických podmínek na společenstva ektomykorhizních hub po požáru

Edafické podmínky jsou často jedním z hlavních faktorů ovlivňujících diverzitu hub po požáru. Důležitým faktorem půdních podmínek je pH, které vykazuje jasný trend ve vztahu ke změnám v diverzitě ektomykorhizních hub napříč biomy (Orumaa et al. 2022; Pérez-Izquierdo et al. 2020; Vázquez-Veloso et al. 2022). Například ve studii provedené v severozápadní Kanadě, vykazovala místa, která byla zasažena požárem o vyšší závažnosti, a zároveň měla nižší pH, vyšší druhovou bohatost (Day et al. 2019). Také v lesích severozápadního Estonska (Orumaa et al. 2022), nebo v borovicových lesích ve Španělsku (Vázquez-Veloso et al. 2022), měly změny pH významný vliv na houbové společenstva. V obou těchto studiích byl obsah draslíku v půdě dalším faktorem, který koreloval se složením půdních ECM společenstev. Draslík se v půdě vyskytuje ve značném množství, avšak jen malá část je dostupná pro rostliny (Brady a Weil Raymond 2014). Mykorhizní symbióza může být důležitou součástí rostlinné K⁺ výživy, především v prostředí, kde jsou rostliny dostupností draslíku limitovány (Garcia a Zimmermann 2014). Ve studii (Pérez-

Izquierdo et al. 2020) měly edafické podmínky, zejména pH, vliv na formování ECM houbových společenstev především na lokální úrovni, nezávisle na frekvenci požárů.

4.4. Ektomykorhizní pyrofilní houby

Při zkoumání vlivu požáru na společenstva mykorhizních rostlin se přirozeně nabízí otázka, zda některé z mykorhizních hub, mohou mít po požáru určitou výhodu. Houby, které požár ve svém životním cyklu využívají, se nazývají pyrofilní. Pojem pyrofilní doslovně znamená „milující oheň“ a není ve spojení s houbami v nové literatuře úzce specifikován. Pro potřeby této práce budu tento pojem definovat jako: houby u kterých má oheň pozitivní vliv na tvorbu plodnic, nebo na jejich abundanci po požáru. Pyrofilní houby jsou schopné využít podmínky po požáru a sníženou mikrobiální konkurenci k rychlému rozvoji a expanzi (Raudabaugh et al. 2020). Po požáru, kdy se uvolní prostor a zdroje, mohou tyto houby efektivně kolonizovat zasažené oblasti. Tyto houby se na nespálených stanovištích objevují málokdy, nebo v malém množství.

Houby, které k fruktifikaci požár přímo nepotřebují, ale jejich výskyt je zvýšený na spálených plochách, v porovnání s nespálenými, se řadí mezi „pyrofilní houby 2. kategorie“. Je známo několik druhů hub, které tvoří ektomykorhizní symbiózu a které svojí odpovědí na požár spadají do 2. kategorie. Některé takové druhy vyzdvihl tým Hughes et al. (2020b), zkoumající růst hub po požáru v americkém národním parku Great Smoky Mountains. Tato studie představuje hlavní zdroj, ze kterého čerpám informace o pyrofilních ECM houbách, a na který budu v následujících odstavcích opakovaně odkazovat.

Jedním z rodů, který obsahuje pyrofilní druhy, je rod *Laccaria*. *Laccaria laccata* je ektomykorhizní houbou (Machón et al. 2009) s hojným výskytem sporokarpů na středně spálených (Hughes et al. 2020b) až velmi spálených (Salo a Kouki 2018) plochách. Výskyt na středně spálených plochách měla ve studii (Hughes et al. 2020b) i *Laccaria trichodermophora*, která po požáru často tvořila přímé asociace s *Pinus pungens*. Zároveň ale v textu (Hughes et al. 2020b), diskutují, že by se mohlo jednat o houbu se obecnější specifikací na disturbance, spíše než přímo na požáry.

Dalším rodem je *Sphaerosporella*, konkrétně druh *Sphaerosporella brunnea* který je známou pyrofilní houbou, často nacházenou na spálených stanovištích (Molina 1992; Motiejūnaitė et al. 2014). Ve studii (Hughes et al. 2020a) sledovali ekologii *Sphaerosporelly*, v asociaci s *Pinus pungens*, a to v kontextu požárů. *Sphaerosporella* tvoří s *Pinus pungens* ektomykorhizní a endofytní symbiózu. V této studii je nadhozena teorie osidlování spálených

ploch *Sphaerosporella* formou opadaných jehlic *Pinus pungens*, ve kterých se vyskytuje jako endofyt. Další zmíněná forma přežití požáru je pomocí tepelně odolných askospor, známých u ostatních pyrofilních hub (El-Abyad a Webster 1968). V tomto případě se ECM symbióza jeví důležitým faktorem pro rekonvalescenci porostů *Pinus pungens* (Hughes et al. 2020a). *Sphaerosporella* se vyskytovala konkrétně na místech zasažených požárem s vysokou závažností (Hughes et al. 2020b).

Ve stejné studii (Hughes et al. 2020b) je další zmíněným rodem *Thelephora*, která se vyskytovala na místech zasažených požárem o střední závažnosti. *Thelephora* je poměrně dobře prostudovaným rodem, s celosvětovým rozšířením, který tvoří ECM symbiózu se širokou škálou rostlin. Tým Hughes et al. (2020b) ve své studii zařadili do pyrofilních hub 2. kategorie tři druhy: *T. terrestris*, *T. vialis* a *T. palmata*. Již dříve byla popsána přítomnost *T. terrestris* 2 měsíce (Collier a Bidartondo 2009) a 6 let po požáru, ale nebyla detekována v pozdějších obdobích (Visser 1995). Tyto poznatky naznačují její roli při regeneraci vegetace.

Posledním probíraným rodem ze stejné studie je *Coltricia*. Do rodu *Coltricia* patří známý ektomykorhizní druh *Coltricia perennis*, jemuž blízký vzorek našel tým Hughes et al. (2020b) a zařadil ho do 2. kategorie pyrofilních hub. Kvůli nejistému taxonomickému zařazení se nedá s jistotou říci, že se jedná právě o tento ECM druh.

Tým Glassman et al. (2016) popisuje zvýšení abundance ECM houby *Rhizopogon olivaceotinctus*, po požáru v kalifornské Sierra Nevadě. Dále zmiňují schopnost spor této houby přežít vysoké teploty, což se projevilo v prováděných biotestech.

5. Vliv požárů na arbuskulárně mykorhizní houby

Složení společenstev AM hub může ovlivnit diverzitu a produktivitu rostlin, stejně jako na jejich vzájemné vztahy (van der Heijden et al. 1998). Porozuměním reakce AM hub na požár tak nahlédneme na princip obnovování celých ekosystémů po požáru.

Stejně jako u ECM hub je i u AM hub vidět trend snižování druhové bohatosti vlivem požárů (Eom et al. 1999; Longo et al. 2014; Xiang et al. 2015). V porovnání s ECM houbami, se ale jeví tyto negativní vlivy, jako poměrně krátkodobé. Tým Xiang et al. (2015) ve své studii pozoroval stejnou plochu 1 rok a 10 let po požáru. Popisuje, že složení společenstev AM hub, jejich alfa diverzita i fylogenetická struktura byly výrazně pozměněny jeden rok po požáru. V rámci téže studie bylo zjištěno, že 10 let po požáru se složení společenstev AM hub na plochách zasažených požárem nelišilo od složení na nespálených plochách, což bylo v

souladu s obnovením vegetace a půdních podmínek do stavu před požárem. Autoři diskutují, že tyto výsledky naznačují, že se AM houby mohou v řádě desítek let, jevit odolnými vůči účinkům požárů.

V jiné studii, kde byl sledován dopad krátkodobého, ale silného a opakovaného požáru na arbuskulární mykorhizní houby v západním Íránu (Mirzaei et al. 2023). Podle výsledků frekventovaný požár nevykazovalo výrazné změny v diverzitě AM hub. Autoři spekulují, že disturbance způsobená požárem, může podpořit výskyt vzácnějších druhů hub, a zároveň poukazují, že efekt požáru nemusí být okamžitý a je třeba reakci společenstev hub sledovat s větším časovým odstupem. S časovým odstupem předpokládají snížení biodiverzity AM hub ze tří důvodů. Zaprvé se může se zpožděním projevit spálení hostitelských rostlin. Následně se projeví nedostatek půdní organické hmoty, a nakonec dojde k vyčerpání biologických vlastností půdy. Studií, které by se zaměřily na efekt požáru na AM houby po delší uplynulé době je nedostatek.

AM houby se často vyskytují na místech, které jsou vystaveny různým typům disturbancí, což vede k obecnému předpokladu jejich odolnosti, vůči nepříznivým vlivům prostředí. Ve článku (Kivlin et al. 2021), se autoři zabývají AM houbovými společenstvy v Národním parku Great Smoky Mountains, který leží na jihovýchodě Spojených států amerických. Tento národní park je vystavován jak urbanizačnímu tlaku, tak i požárům. Požár v těchto místech snížil diverzitu, abundanci, i kolonizaci AM houbami. Urbanizace a intenzita požárů neměly výrazný vliv na AM houby. Nejvýraznější vliv na AM houby mělo složení hostitelských rostlin. Pokud nedochází k zásadním změnám v nadzemní vegetaci, změny v populacích AM hub jsou minimální. I v tomto případě se jednalo o heterogenní požár s nespálenými místy, která mohou sloužit k jednoduché disperzi po požáru.

5.1. Vliv edafických podmínek na společenstva arbuskulárně mykorhizních hub po požáru

Změny půdních podmínek v důsledku požáru se mohou, podobně jako u ECM hub, promítnout do změn v AM společenstvech. V již výše zmíněné studii (Xiang et al. 2015) je pozorováno snížení alfa diverzity AM hub společně se ztrátou rostlinné biomasy a biochemickými změnami v půdě. Konkrétní změny s negativním dopadem na společenstva AM hub byly následující: dostupný fosfor a zvýšení NH_4^+ . Zvýšená dostupnost těchto živin mohla negativně ovlivnit symbiotický vztah AM hub s jejich rostlinnými hostiteli. Naopak (Longo et al. 2014) nenašli korelaci mezi negativním vlivem požáru na AM komunitu a

změnami v půdě, s výjimkou pH. V článku je diskutováno, že negativní korelace mezi pH a diverzitou AM spor je v souladu s pozorováním (Switzer et al. 2012), který naznačuje, že snížení množství AM hub může být prisuzováno zvýšení pH po požáru. Mezi výše zmíněnými studii, byli nicméně základní rozdíly. Studie (Longo et al. 2014) se zaměřovala pouze na spory arbuskulárně mykorhizních hub, na rozdíl od studie (Xiang et al. 2015), která nespecifikuje části AM hub používané k sekvenční analýze. I přesto výsledky (Longo et al. 2011) kontrastují s předešlými studii zahrnujícími spory AM hub. Longo et al. 2011 diskutují, že tyto rozdíly mohou být odrazem rozdílů v lokalitách, rozdílných výzkumných postupech, jiných typech biomasy a požárů. Heterogenita výsledků, tak často vychází z rozdílných podmínek a vlastností zkoumaných stanovišť.

5.2. Odolné spory arbuskulárně mykorhizních hub

Jednou z adaptací AM hub pro rychlé osídlení spálených míst, jsou odolné spory. Požár může selektovat tmavší a větší spory (Hopkins a Bennett 2023). Odolnost tmavších spor je často spojována s melaninem, přírodním pigmentem syntetizovaným nejen houbami. Tento polymerní pigment má mnoho významných funkcí, včetně ochrany před škodlivým UV zářením a před teplotním stresem, což jsou klíčové faktory, se kterými se mykorhizní houby musí vyrovnávat v prostředí postiženém požárem. (Cordero a Casadevall 2017). Spojitost požáru a většího objemu spor ve studii (Hopkins a Bennett 2023), může být vysvětlena tím, že druhy hub s větším objemem, často obsahují poměrně velké množství „izolačních lipidů“. Jak moc jsou různé spory odolné a jak moc jsou houby schopné své spory přizpůsobit prostředí, jsou ale zatím otevřené otázky.

6. Závěr

Tato práce poskytuje literární přehled tematiky požáru v ekologii mykorhizních hub, se zaměřením na arbuskulární a ektomykorhizní houby. Popisuje hlavní vlivy, kterými požár mykorhizní houby ovlivňuje a jak se to projevuje ve složení společenstev, sukcesních procesech a na jejich ekologické funkci. Současně se tato práce zaměřuje na případné rozdíly v odpovědi ektomykorhizních a arbuskulárně mykorhizních hub na požár.

Dopady požárů se liší podle jejich závažnosti. Mírné požáry mohou mít na diverzitu neutrální či dokonce pozitivní vliv, zatímco závažné požáry často vedou ke snížení druhové bohatosti a změnám ve složení společenstev. Návrat ektomykorhizních hub do původního stavu bývá delší než u arbuskulárních hub, což souvisí s jejich ekologickými nároky. Mezi

důležité faktory ovlivněné požárem patří pH půdy, které může selektivně měnit složení společenstev.

S ohledem na rostoucí frekvenci a závažnost požárů vlivem klimatických změn, je důležité pochopit a predikovat způsoby obnovy ekosystémů. S tím mohou pomoci i studie zabývající se vlivem požáru na mykorhizní houbová společenstva, jelikož složení mykorhizních hub, může limitovat obnovu určité nadzemní vegetace. Studií, na toto téma v poslední době přibývá, což postupně přispívá k lepšímu porozumění vztahu mykorhizních hub s požáry.

Seznam použité literatury

AROCENA, J M a C OPIO, 2003. Prescribed fire-induced changes in properties of sub-boreal forest soils. *Geoderma* [online]. 113(1), 1–16. ISSN 0016-7061. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00312-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00312-9)

ASHMAN, M.R., PURI, G. (2002). Essential soil science a clear and concise introduction to soil science. Oxford: Blackwell Science.

ATCHLEY, Adam L., Alicia M. KINOSHITA, Sonya R. LOPEZ, Laura TRADER a Richard MIDDLETON, 2018. Simulating Surface and Subsurface Water Balance Changes Due to Burn Severity. *Vadose Zone Journal* [online]. 17(1), 1–13. ISSN 1539-1663. Dostupné z: doi:10.2136/vzj2018.05.0099

BALCH, Jennifer K., Bethany A. BRADLEY, Carla M. D'ANTONIO a José GÓMEZ-DANS, 2013. Introduced annual grass increases regional fire activity across the arid western USA (1980-2009). *Global Change Biology* [online]. 19(1), 173–183. ISSN 13541013. Dostupné z: doi:10.1111/gcb.12046

BÁRCENAS-MORENO, Gema, Maria Gómez BRANDÓN, Johannes ROUSK a Erland BÅÅTH, 2009. Adaptation of soil microbial communities to temperature: Comparison of fungi and bacteria in a laboratory experiment. *Global Change Biology* [online]. 15(12), 2950–2957. ISSN 13541013. Dostupné z: doi:10.1111/j.1365-2486.2009.01882.x

BARKER, Jason S, Suzanne W SIMARD, Melanie D JONES a D M DURALL, 2013. Ectomycorrhizal fungal community assembly on regenerating Douglas-fir after wildfire and clearcut harvesting. *Oecologia* [online]. 172(4), 1179–1189. ISSN 1432-1939. Dostupné z: doi:10.1007/s00442-012-2562-y

BECERRA, Alejandra, Norberto BARTOLONI, Noelia COFRÉ, Florencia SOTERAS a Marta CABELLO, 2014. *Arbuscular mycorrhizal fungi in saline soils: Vertical distribution at different soil depth* [online]. Dostupné z: www.sbmicrobiologia.org.br

BOWMAN, David M J S, Jennifer K BALCH, Paulo ARTAXO, William J BOND, Jean M CARLSON, Mark A COCHRANE, Carla M D'ANTONIO, Ruth S DEFRIES, John C DOYLE, Sandy P HARRISON, Fay H JOHNSTON, Jon E KEELEY, Meg A KRAWCHUK, Christian A KULL, J Brad MARSTON, Max A MORITZ, I Colin PRENTICE, Christopher I ROOS, Andrew C SCOTT, ... a Stephen J PYNE, 2009. *Fire in the Earth System* [online]. Dostupné z: <https://www.science.org>

BRADY, Nyle a WEIL RAYMOND, 2014. *Elements of the Nature and Properties of Soils*. 3. vyd. B.m.: Pearson Education Limited.

BRAIS, Suzanne, Pare À DAVID a Roch OUIOMET, 2000. *Impacts of wild fire severity and salvage harvesting on the nutrient balance of jack pine and black spruce boreal stands.*

Britannica, Editors of Encyclopaedia. "wildfire." Encyclopedia Britannica. Online. Poslední změna 16.5. 2024. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/wildfire>. [citováno 2024-05-30]

BRUNDRETT, Mark C., 2017. Global Diversity and Importance of Mycorrhizal and Nonmycorrhizal Plants. In: TEDERSOO LEE, ed. *Biogeography of Mycorrhizal Symbiosis* [online]. B.m.: Springer International Publishing AG 2017, s. 533–556. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-56363-3_21

BRUNDRETT, Mark C. a Leho TEDERSOO, 2018. *Evolutionary history of mycorrhizal symbioses and global host plant diversity* [online]. 1. prosinec 2018. B.m.: Blackwell Publishing Ltd. ISSN 14698137. Dostupné z: doi:10.1111/nph.14976

BRUNS, Thomas D., Maren L. HALE a Nhu H. NGUYEN, 2019. Rhizopogon olivaceotinctus increases its inoculum potential in heated soil independent of competitive release from other ectomycorrhizal fungi. *Mycologia* [online]. 111(6), 936–941. ISSN 15572536. Dostupné z: doi:10.1080/00275514.2019.1657354

BRUNS, Thomas D., Judy A. CHUNG, Akiko A. CARVER a Sydney I. GLASSMAN, 2020. A simple pyrocasm for studying soil microbial response to fire reveals a rapid, massive response by Pyronema species. *PLoS ONE* [online]. 15(3). ISSN 19326203. Dostupné z: doi:10.1371/journal.pone.0222691

BURKLE, Laura A., Jonathan A. MYERS, R. Travis BELOTE a D. P.C. PETERS, 2015. Wildfire disturbance and productivity as drivers of plant species diversity across spatial scales. *Ecosphere* [online]. 6(10). ISSN 21508925. Dostupné z: doi:10.1890/ES15-00438.1

BUSCARDO, Erika, Susana RODRÍGUEZ-ECHEVERRÍA, María P. MARTÍN, Paolo DE ANGELIS, João Santos PEREIRA a Helena FREITAS, 2010. Impact of wildfire return interval on the ectomycorrhizal resistant propagules communities of a Mediterranean open forest. *Fungal Biology* [online]. 114(8), 628–636. ISSN 18786146. Dostupné z: doi:10.1016/j.funbio.2010.05.004

CARDILLE, Jeffrey A., Stephen J. VENTURA a Monica G. TURNER, 2001. Environmental and social factors influencing wildfires in the Upper Midwest, United States. *Ecological Applications* [online]. 11(1), 111–127. ISSN 10510761. Dostupné z: doi:10.1890/1051-0761(2001)011[0111:EASFIW]2.0.CO;2

CASTAÑO, Carles, Estefanía SUAREZ-VIDAL, Rafael ZAS, José Antonio BONET, Jonàs OLIVA a Luis SAMPEDRO, 2023. Ectomycorrhizal fungi with hydrophobic mycelia and rhizomorphs dominate in young pine trees surviving experimental drought stress. *Soil Biology and Biochemistry* [online]. 178. ISSN 00380717. Dostupné z: doi:10.1016/j.soilbio.2022.108932

CERTINI, Giacomo, 2005. *Effects of fire on properties of forest soils: A review* [online]. březen 2005. ISSN 00298549. Dostupné z: doi:10.1007/s00442-004-1788-8

CLARKE, P J, M J LAWES, J J MIDGLEY, B B LAMONT, F OJEDA, G E BURROWS, N J ENRIGHT a K J E KNOX, 2013. Resprouting as a key functional trait: how buds, protection and resources drive persistence after fire. *New Phytologist* [online]. 197(1), 19–35. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1111/nph.12001

COLLA, Giuseppe, Youssef ROUPHAEL, Mariateresa CARDARELLI, Monica TULLIO, Carlos Mario RIVERA a Elvira REA, 2008. Alleviation of salt stress by arbuscular mycorrhizal in zucchini plants grown at low and high phosphorus concentration. *Biology and Fertility of Soils* [online]. 44(3), 501–509. ISSN 01782762. Dostupné z: doi:10.1007/s00374-007-0232-8

COLLIER, Fay A. a Martin I. BIDARTONDO, 2009. Waiting for fungi: The ectomycorrhizal invasion of lowland heathlands. *Journal of Ecology* [online]. 97(5), 950–963. ISSN 00220477. Dostupné z: doi:10.1111/j.1365-2745.2009.01544.x

CORDERO, Radames J.B. a Arturo CASADEVALL, 2017. *Functions of fungal melanin beyond virulence* [online]. 1. březen 2017. B.m.: Elsevier Ltd. ISSN 17494613. Dostupné z: doi:10.1016/j.fbr.2016.12.003

COWAN, Ariel D., Jane E. SMITH a Stephen A. FITZGERALD, 2016. Recovering lost ground: Effects of soil burn intensity on nutrients and ectomycorrhiza communities of ponderosa pine seedlings. *Forest Ecology and Management* [online]. 378, 160–172. ISSN 03781127. Dostupné z: doi:10.1016/j.foreco.2016.07.030

DAHLBERG, Anders, Johnny SCHIMMEL, Andy F S TAYLOR a Hanna JOHANNESSON, 2001. *Post-fire legacy of ectomycorrhizal fungal communities in the Swedish boreal forest in relation to fire severity and logging intensity* [online]. Dostupné z: www.elsevier.com/locate/biocon

DAY, Nicola J., Kari E. DUNFIELD, Jill F. JOHNSTONE, Michelle C. MACK, Merritt R. TURETSKY, Xanthe J. WALKER, Alison L. WHITE a Jennifer L. BALTZER, 2019. Wildfire severity reduces richness and alters composition of soil fungal communities in boreal forests of western Canada. *Global Change Biology* [online]. 25(7), 2310–2324. ISSN 13652486. Dostupné z: doi:10.1111/gcb.14641

DAY, Nicola J., Alison L. WHITE, Jill F. JOHNSTONE, Geneviève DEGRÉ-TIMMONS, Steven G. CUMMING, Michelle C. MACK, Merritt R. TURETSKY, Xanthe J. WALKER a Jennifer L. BALTZER, 2020. Fire characteristics and environmental conditions shape plant communities via regeneration strategy. *Ecography* [online]. 43(10), 1464–1474. ISSN 16000587. Dostupné z: doi:10.1111/ecog.05211

DE GRANDPRÉ, Louis, Daniel GAGNON a Yves BERGERON, 1993. Changes in the understory of Canadian southern boreal forest after fire. *Journal of Vegetation Science* [online]. 4(6), 803–810. ISSN 1100-9233. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.2307/3235618

DEBANO, L F, 2000. The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: a review. *Journal of Hydrology* [online]. 231–232, 195–206. ISSN 0022-1694. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00194-3

DEBANO, Leonard F, 1991. The effect of fire on soil properties. In: [online]. Dostupné z: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:128112074

DOERR, Stefan H. a Cristina SANTÍN, 2016. Global trends in wildfire and its impacts: Perceptions versus realities in a changing world. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* [online]. 371(1696). ISSN 14712970. Dostupné z: doi:10.1098/rstb.2015.0345

DOVE, Nicholas C. a Stephen C. HART, 2017. Fire reduces fungal species richness and in situ mycorrhizal colonization: A meta-analysis. *Fire Ecology* [online]. 13(2), 37–65. ISSN 19339747. Dostupné z: doi:10.4996/fireecology.130237746

DOVE, Nicholas C, Neslihan TAŞ a Stephen C HART, 2022. Ecological and genomic responses of soil microbiomes to high-severity wildfire: linking community assembly to functional potential. *The ISME Journal* 2022 16:7 [online]. 16(7), 1853–1863. ISSN 1751-7370. Dostupné z: doi:10.1038/s41396-022-01232-9

EL-ABYAD, M S H a J WEBSTER, 1968. Studies on pyrophilous discomycetes: I. Comparative physiological studies. *Transactions of the British Mycological Society* [online]. 51(3), 353–367. ISSN 0007-1536. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/S0007-1536(68)80002-6

EOM, Ahn-Heum, David C HARTNETT, Gail W T WILSON a Deborah A H FIGGE, 1999. The Effect of Fire, Mowing and Fertilizer Amendment on Arbuscular Mycorrhizas in Tallgrass Prairie. *The American Midland Naturalist* [online]. 142(1), 55–70. ISSN 00030031, 19384238. Dostupné z: http://www.jstor.org/stable/2426892

ESTES, Becky L., Eric E. KNAPP, Carl N. SKINNER, Jay D. MILLER a Haiganoush K. PREISLER, 2017. Factors influencing fire severity under moderate burning conditions in the Klamath Mountains, northern California, USA. *Ecosphere* [online]. 8(5). ISSN 21508925. Dostupné z: doi:10.1002/ecs2.1794

FERNANDEZ-ANEZ, Nieves, Andrey KRASOVSKIY, Mortimer MÜLLER, Harald VACIK, Jan BAETENS, Emira HUKIĆ, Marijana KAPOVIC SOLOMUN, Irena ATANASSOVA, Maria GLUSHKOVA, Igor BOGUNOVIĆ, Hana FAJKOVIĆ, Hakan DJUMA, George BOUSTRAS, Martin ADÁMEK, Miloslav DEVETTER, Michaela HRABALIKOVA, Dalibor HUSKA, Petra MARTÍNEZ BARROSO, Magdalena Daria VAVERKOVÁ, ... a Artemi CERDA, 2021. *Current Wildland Fire Patterns and Challenges in Europe: A Synthesis of National Perspectives* [online]. 2021. B.m.: SAGE Publications Ltd. ISSN 11786221. Dostupné z: doi:10.1177/11786221211028185

FLANNIGAN, Mike, Alan S. CANTIN, William J. DE GROOT, Mike WOTTON, Alison NEWBERY a Lynn M. GOWMAN, 2013. Global wildland fire season severity in the 21st century. *Forest Ecology and Management* [online]. 294, 54–61. ISSN 03781127. Dostupné z: doi:10.1016/j.foreco.2012.10.022

FireWords. Online. Poslední změna 11.03.2008. Dostupné z: <http://www.firewords.net/>. [citováno 2023-04-10]

FOX, S., SIKES B. A., BROWN, S. P., Cripps, C. L., GLASSMAN, S. I., HUGHES, K., SEMENOVA-NELSEN, T., a JUMPPONEN, A. (2022). Fire as a driver of fungal diversity — A synthesis of current knowledge. In *Mycologia* (Vol. 114, Issue 2, pp. 215–241). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/00275514.2021.2024422>

FU, Wei, Baodong CHEN, Matthias C. RILLIG, Jan JANSKA, Wang MA, Chong XU, Wentao LUO, Honghui WU, Zhipeng HAO, Hui WU, Aihua ZHAO, Qiang YU a Xingguo HAN, 2022. Community response of arbuscular mycorrhizal fungi to extreme drought in a cold-temperate grassland. *New Phytologist* [online]. 234(6), 2003–2017. ISSN 14698137. Dostupné z: doi:10.1111/nph.17692

GARCIA, Kevin a Sabine D. ZIMMERMANN, 2014. *The role of mycorrhizal associations in plant potassium nutrition* [online]. 17. červenec 2014. B.m.: Frontiers Research Foundation. ISSN 1664462X. Dostupné z: doi:10.3389/fpls.2014.00337

GASSIBE, Pablo Vásquez, Raul Fraile FABERO, María HERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, Juan Andrés ORIA-DE-RUEDA, Felipe Bravo OVIEDO a Pablo MARTÍN-PINTO, 2014. Post-fire production of mushrooms in Pinuspinaster forests using classificatory models. *Journal of Forest Research* [online]. 19(3), 348–356. ISSN 1610-7403. Dostupné z: doi:10.1007/s10310-013-0419-9

GLASSMAN, Sydney I., Carrie R. LEVINE, Angela M. DIROCCO, John J. BATTLES a Thomas D. BRUNS, 2016. Ectomycorrhizal fungal spore bank recovery after a severe forest fire: Some like it hot. *ISME Journal* [online]. 10(5), 1228–1239. ISSN 17517370. Dostupné z: doi:10.1038/ismej.2015.182

GOLAN, Jacob a Pringle ANNE, 2017. Long-Distance Dispersal of Fungi. *Microbiology Spectrum* [online]. 5(4), 10.1128/microbiolspec.funk-0047–2016. Dostupné z: doi:10.1128/microbiolspec.funk-0047-2016

GÓMEZ-BELLOT, María José, María Fernanda ORTUÑO, Pedro Antonio NORTES, Javier VICENTE-SÁNCHEZ, Félix Fernández MARTÍN, Sebastián BAÑÓN a María Jesús SÁNCHEZ-BLANCO, 2015. Protective effects of *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* on soil and *Viburnum tinus* plants irrigated with treated wastewater under field conditions. *Mycorrhiza* [online]. 25(5), 399–409. ISSN 09406360. Dostupné z: doi:10.1007/s00572-014-0621-4

HARDEN, Jennifer W., Michelle MACK, Hugo VELDHUIS a S. T. GOWER, 2003. Fire dynamics and implications for nitrogen cycling in boreal forests. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* [online]. 108(3). ISSN 01480227. Dostupné z: doi:10.1029/2001jd000494

HART, Stephen C, Thomas H DELUCA, Gregory S NEWMAN, M Derek MACKENZIE a Sarah I BOYLE, 2005. Post-fire vegetative dynamics as drivers of microbial community structure and function in forest soils. *Forest Ecology and Management* [online]. 220(1), 166–184. ISSN 0378-1127. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.012

HAWKES, Christine V., Iain P. HARTLEY, Phil INESON a Alastair H. FITTER, 2008. Soil temperature affects carbon allocation within arbuscular mycorrhizal networks and carbon transport from plant to fungus. *Global Change Biology* [online]. 14(5), 1181–1190. ISSN 13541013. Dostupné z: doi:10.1111/j.1365-2486.2007.01535.x

HE, Tianhua, Byron B. LAMONT a Juli G. PAUSAS, 2019. Fire as a key driver of Earth's biodiversity. *Biological Reviews* [online]. 94(6), 1983–2010. ISSN 1469185X. Dostupné z: doi:10.1111/brv.12544

HEDAYATI-DEZFOOLI, M. a Wey H. LEONG, 2019. An experimental study of coupled heat and moisture transfer in soils at high temperature conditions for a medium coarse soil. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. 137, 372–389. ISSN 00179310. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.03.131

HEIM, Ramona J., Wieland HEIM, Helga BÜLTMANN, Johannes KAMP, Daniel RIEKER, Andrey YURTAEV a Norbert HÖLZEL, 2022. Fire disturbance promotes biodiversity of plants, lichens and birds in the Siberian subarctic tundra. *Global Change Biology* [online]. 28(3), 1048–1062. ISSN 13652486. Dostupné z: doi:10.1111/gcb.15963

HERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, María, Juan Andrés ORIA-DE-RUEDA a Pablo MARTÍN-PINTO, 2013. Post-fire fungal succession in a Mediterranean ecosystem dominated by *Cistus ladanifer* L. *Forest Ecology and Management* [online]. 289, 48–57. ISSN 0378-1127. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.10.009

HEWITT, Rebecca E, Elizabeth BENT, Teresa N HOLLINGSWORTH, F Stuart CHAPIN III a D Lee TAYLOR, 2013. Resilience of Arctic mycorrhizal fungal communities after wildfire facilitated by resprouting shrubs. *Écoscience* [online]. 20(3), 296–310. ISSN 1195-6860. Dostupné z: doi:10.2980/20-3-3620

HEWITT, Rebecca E, F Stuart CHAPIN III, Teresa N HOLLINGSWORTH a D Lee TAYLOR, 2017. The potential for mycobiont sharing between shrubs and seedlings to facilitate tree establishment after wildfire at Alaska arctic treeline. *Molecular Ecology* [online]. 26(14), 3826–3838. ISSN 0962-1083. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1111/mec.14143

HOLDEN, Sandra R., Brendan M. ROGERS, Kathleen K. TRESEDER a James T. RANDERSON, 2016. Fire severity influences the response of soil microbes to a boreal forest fire. *Environmental Research Letters* [online]. 11(3). ISSN 17489326. Dostupné z: doi:10.1088/1748-9326/11/3/035004

HOLLINGSWORTH, T. N., M. D. WALKER, F. S. CHAPIN a A. L. PARSONS, 2006. Scale-dependent environmental controls over species composition in Alaskan black spruce communities. *Canadian Journal of Forest Research* [online]. 36(7), 1781–1796. ISSN 00455067. Dostupné z: doi:10.1139/X06-061

HOLLINGSWORTH, Teresa N, Jill F JOHNSTONE, Emily L BERNHARDT a F Stuart CHAPIN III, 2013. Fire Severity Filters Regeneration Traits to Shape Community Assembly in Alaska's Boreal Forest. *PLOS ONE* [online]. 8(2), e56033-. Dostupné z: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0056033

HOPKINS, Jacob R. a Alison E. BENNETT, 2023. Spore traits mediate disturbance effects on arbuscular mycorrhizal fungal community composition and mutualisms. *Ecology* [online]. 104(5). ISSN 19399170. Dostupné z: doi:10.1002/ecy.4016

HUGHES, Karen W., Alexis CASE, P. Brandon MATHENY, Stephanie KIVLIN, Ronald H. PETERSEN, Andrew N. MILLER a Teresa ITURRIAGA, 2020a. Secret lifestyles of pyrophilous fungi in the genus *Sphaerospora*. *Applications in Plant Sciences* [online]. 107(6), 876–885. ISSN 15372197. Dostupné z: doi:10.1002/ajb2.1482

HUGHES, Karen W., P. Brandon MATHENY, Andrew N. MILLER, Ronald H. PETERSEN, Teresa M. ITURRIAGA, Kristine D. JOHNSON, Andrew S. METHVEN, Daniel B. RAUDABAUGH, Rachel A. SWENIE a Thomas D. BRUNS, 2020b. Pyrophilous fungi detected after wildfires in the Great Smoky Mountains National Park expand known species ranges and biodiversity estimates. *Mycologia* [online]. 112(4), 677–698. ISSN 15572536. Dostupné z: doi:10.1080/00275514.2020.1740381

CHAUDHARY, V Bala, Sarah NOLIMAL, Moisés A SOSA-HERNÁNDEZ, Cameron EGAN a Jude KASTENS, 2020. Trait-based aerial dispersal of arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytologist* [online]. 228(1), 238–252. ISSN 0028-646X. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1111/nph.16667

CHEN, David M a John W G CAIRNEY, 2002. Investigation of the influence of prescribed burning on ITS profiles of ectomycorrhizal and other soil fungi at three Australian sclerophyll forest sites. *Mycological Research* [online]. 106(5), 532–540. ISSN 0953-7562. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1017/S0953756202005890

JUNG, Sabine C., Ainhoa MARTINEZ-MEDINA, Juan A. LOPEZ-RAEZ a Maria J. POZO, 2012. Mycorrhiza-Induced Resistance and Priming of Plant Defenses. *Journal of Chemical Ecology* [online]. 38(6), 651–664. ISSN 00980331. Dostupné z: doi:10.1007/s10886-012-0134-6

JUO, Anthony S R a Andrew MANU, 1996. *Chemical dynamics in slash-and-burn agriculture*.

KADOWAKI, Kohmei, Satoshi YAMAMOTO, Hirotohi SATO, Akifumi S. TANABE, Amane HIDAHA a Hirokazu TOJU, 2018. Mycorrhizal fungi mediate the direction and strength of plant–soil feedbacks differently between arbuscular mycorrhizal and ectomycorrhizal communities. *Communications Biology* [online]. 1(1). ISSN 23993642. Dostupné z: doi:10.1038/s42003-018-0201-9

KANE, J.. "prescribed fire." *Encyclopedia Britannica*. Online. Poslední změna 09.12.2023. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/prescribed-fire>. [citováno 2024-05-30]

KEELEY, Jon E., 2009. Fire intensity, fire severity and burn severity: A brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire* [online]. 18(1), 116–126. ISSN 10498001. Dostupné z: doi:10.1071/WF07049

KETTERINGS, Quirine M., Jerry M. BIGHAM a Valérie LAPERCHE, 2000. Changes in Soil Mineralogy and Texture Caused by Slash-and-Burn Fires in Sumatra, Indonesia. *Soil Science Society of America Journal* [online]. 64(3), 1108–1117. ISSN 0361-5995. Dostupné z: doi:10.2136/sssaj2000.6431108x

KILPELÄINEN, Jouni, Pedro J. APHALO a Tarja LEHTO, 2020. Temperature affected the formation of arbuscular mycorrhizas and ectomycorrhizas in *Populus angustifolia* seedlings more than a mild drought. *Soil Biology and Biochemistry* [online]. 146. ISSN 00380717. Dostupné z: doi:10.1016/j.soilbio.2020.107798

KIPFER, Tabea, Simon EGLI, Jaboury GHAZOUL, Barbara MOSER a Thomas WOHLGEMUTH, 2010. Susceptibility of ectomycorrhizal fungi to soil heating. *Fungal Biology* [online]. 114(5–6), 467–472. ISSN 18786146. Dostupné z: doi:10.1016/j.funbio.2010.03.008

KIPFER, Tabea, Barbara MOSER, Simon EGLI, Thomas WOHLGEMUTH a Jaboury GHAZOUL, 2011. Ectomycorrhiza succession patterns in *Pinus sylvestris* forests after stand-replacing fire in the Central Alps. *Oecologia* [online]. 167(1), 219–228. ISSN 00298549. Dostupné z: doi:10.1007/s00442-011-1981-5

KIVLIN, Stephanie N., V. Rosanne HARPE, Jackson H. TURNER, Jessica A.M. MOORE, Leigh C. MOORHEAD, Kendall K. BEALS, Mali M. HUBERT, Monica PAPES a Jennifer A. SCHWEITZER, 2021. Arbuscular mycorrhizal fungal response to fire and urbanization in the Great Smoky Mountains National Park. *Elementa* [online]. 9(1). ISSN 23251026. Dostupné z: doi:10.1525/elementa.2021.00037

KIVLIN, Stephanie N, Greg C WINSTON, Michael L GOULDEN a Kathleen K TRESEDER, 2014. Environmental filtering affects soil fungal community composition more than dispersal limitation at regional scales. *Fungal Ecology* [online]. 12, 14–25. ISSN 1754-5048. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.funeco.2014.04.004

KOBZIAR, Leda N, Melissa R A PINGREE, Heather LARSON, Tyler J DREADEN, Shelby GREEN a Jason A SMITH, 2018. Pyroaerobiology: the aerosolization and transport of viable microbial life by wildland fire. *Ecosphere* [online]. 9(11), e02507. ISSN 2150-8925. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1002/ecs2.2507

KONG, Jian jian, Jian YANG a Edith BAI, 2018. Long-term effects of wildfire on available soil nutrient composition and stoichiometry in a Chinese boreal forest. *Science of the Total Environment* [online]. 642, 1353–1361. ISSN 18791026. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2018.06.154

KORB, Julie E., Nancy C. JOHNSON a W. W. COVINGTON, 2003. Arbuscular mycorrhizal propagule densities respond rapidly to ponderosa pine restoration treatments. *Journal of Applied Ecology* [online]. 40(1), 101–110. ISSN 00218901. Dostupné z: doi:10.1046/j.1365-2664.2003.00781.x

KRAUSE, Andreas, Silvia KLOSTER, Stiig WILKENSJELD a Heiko PAETH, 2014. The sensitivity of global wildfires to simulated past, present, and future lightning frequency. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* [online]. 119(3), 312–322. ISSN 21698961. Dostupné z: doi:10.1002/2013JG002502

LANFRANCO, Luisa, Paola BONFANTE a Andrea GENRE, 2016. The Mutualistic Interaction between Plants and Arbuscular Mycorrhizal Fungi. *Microbiology Spectrum* [online]. 4(6). ISSN 21650497. Dostupné z: doi:10.1128/microbiolspec.funk-0012-2016

LINDAHL, Björn D a Anders TUNLID, 2015. Ectomycorrhizal fungi – potential organic matter decomposers, yet not saprotrophs. *New Phytologist* [online]. 205(4), 1443–1447. ISSN 0028-646X. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1111/nph.13201

LIU, Yuan, Nianpeng HE, Xuefa WEN, Li XU, Xiaomin SUN, Guirui YU, Liyin LIANG a Louis A. SCHIPPER, 2018. The optimum temperature of soil microbial respiration: Patterns and controls. *Soil Biology and Biochemistry* [online]. 121, 35–42. ISSN 00380717. Dostupné z: doi:10.1016/j.soilbio.2018.02.019

LIVNE-LUZON, Stav, Hagai SHEMESH, Yagil OSEM, Yohay CARMEL, Hen MIGAEL, Yael AVIDAN, Anat TSAFRIR, Sydney I. GLASSMAN, Thomas D. BRUNS a Ofer OVADIA, 2021. High resilience of the mycorrhizal community to prescribed seasonal burnings in eastern Mediterranean woodlands. *Mycorrhiza* [online]. 31(2), 203–216. ISSN 14321890. Dostupné z: doi:10.1007/s00572-020-01010-5

LONGO, M. Silvana, Carlos URCELAY a Eduardo NOUHRA, 2011. Long term effects of fire on ectomycorrhizas and soil properties in *Nothofagus pumilio* forests in Argentina. *Forest Ecology and Management* [online]. 262(3), 348–354. ISSN 03781127. Dostupné z: doi:10.1016/j.foreco.2011.03.041

LONGO, Silvana, Eduardo NOUHRA, Bruno T. GOTO, Ricardo L. BERBARA a Carlos URCELAY, 2014. Effects of fire on arbuscular mycorrhizal fungi in the Mountain Chaco Forest. *Forest Ecology and Management* [online]. 315, 86–94. ISSN 03781127. Dostupné z: doi:10.1016/j.foreco.2013.12.027

MACDONALD, Lee H a Edward L HUFFMAN, 2003. *Post-fire Soil Water Repellency: Persistence and Soil Moisture Thresholds*.

MAGOMANI, M. I. a J. J. VAN TOL, 2019. The impact of fire frequency on selected soil physical properties in a semi-arid savannah Thornveld. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science* [online]. 69(1), 43–51. ISSN 16511913. Dostupné z: doi:10.1080/09064710.2018.1495253

MACHÓN, P., J. A. PAJARES, J. J. DIEZ a F. M. ALVES-SANTOS, 2009. Influence of the ectomycorrhizal fungus *Laccaria laccata* on pre-emergence, post-emergence and late damping-off by *Fusarium oxysporum* and *F. verticillioides* on stone pine seedlings. *Symbiosis* [online]. 49(2), 101–109. ISSN 03345114. Dostupné z: doi:10.1007/s13199-009-0015-0

MANTON, Michael, Charles RUFFNER, Gintautas KIBIRKŠTIS, Gediminas BRAZAITIS, Vitas MAROZAS, Rūtilė PUKIENĖ, Ekaterina MAKRIČKIENE a Per ANGELSTAM, 2022. Fire Occurrence in Hemi-Boreal Forests: Exploring Natural and Cultural Scots Pine Fire Regimes Using Dendrochronology in Lithuania. *Land* [online]. 11(2). ISSN 2073445X. Dostupné z: doi:10.3390/land11020260

MARTIN, Francis, 2016. *Molecular Mycorrhizal Symbiosis* [online]. B.m.: Wiley. ISBN 9781118951415. Dostupné z: doi:10.1002/9781118951446

MENON, Surabi, Kenneth L DENMAN, Guy BRASSEUR, Amnat CHIDTHAISONG, Philippe CIAIS, Peter M COX, Robert E DICKINSON, Didier HAUGLUSTAINE, Christoph HEINZE, Elisabeth HOLLAND, Daniel JACOB, Ulrike LOHMANN, Srikanthan RAMACHANDRAN, Pedro LEITE DA SILVA DIAS, Steven C WOFSY a Xiaoye ZHANG, 2007. *Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry* [online]. Dostupné z: <https://www.osti.gov/biblio/934721>

Metodický list č. 21 P. 2001. Lesní požáry. Bojový řád jednotek požární ochrany – taktické postupy zásahu. Praha, MV GR HZS ČR:3 s.

MILLER, Russell G., Ryan TANGNEY, Neal J. ENRIGHT, Joseph B. FONTAINE, David J. MERRITT, Mark K.J. OOI, Katinka X. RUTHROF a Ben P. MILLER, 2019. *Mechanisms of Fire Seasonality Effects on Plant Populations* [online]. 1. prosinec 2019. B.m.: Elsevier Ltd. ISSN 01695347. Dostupné z: doi:10.1016/j.tree.2019.07.009

MIRZAEI, Javad, Mehdi HEYDARI, Reza OMIDIPOUR, Nahid JAFARIAN a Christopher CARCAILLET, 2023. Decrease in Soil Functionalities and Herbs' Diversity, but Not That of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Linked to Short Fire Interval in Semi-Arid Oak Forest Ecosystem, West Iran. *Plants* [online]. 12(5). ISSN 22237747. Dostupné z: doi:10.3390/plants12051112

MOLINA, Randy, 1992. Specificity Phenomena in Mycorrhizal Symbioses: Community-Ecological Consequences and Practical Implications Randy Molina, Hugues Massicotte, and James M. Trappe. Mycorrhizal functioning: an integrative plant-fungal process. *Mycorrhizal functioning: an integrative plant-fungal process*. 357.

MOODY, John A., Brian A. EBEL, Petter NYMAN, Deborah A. MARTIN, Cathelijne STOOFF a Randy MCKINLEY, 2016. Relations between soil hydraulic properties and burn severity. *International Journal of Wildland Fire* [online]. 25(3), 279–293. ISSN 10498001. Dostupné z: doi:10.1071/WF14062

MOTIEJŪNAITĖ, Jurga, Gražina ADAMONYTĖ, Reda IRŠĖNAITĖ, Sigita JUZĖNAS, Jonas KASPARAVIČIUS, Ernestas KUTORGA a Svetlana MARKOVSKAJA, 2014. Early fungal community succession following crown fire in *Pinus mugo* stands and surface fire in *Pinus sylvestris* stands. *European Journal of Forest Research* [online]. 133(4), 745–756. ISSN 16124669. Dostupné z: doi:10.1007/s10342-013-0738-6

MUCHA, Joanna, Kabir G. PEAY, Dylan P. SMITH, Peter B. REICH, Artur STEFAŃSKI a Sarah E. HOBBIE, 2018. Effect of Simulated Climate Warming on the Ectomycorrhizal Fungal Community of Boreal and Temperate Host Species Growing Near Their Shared Ecotonal Range Limits. *Microbial Ecology* [online]. 75(2), 348–363. ISSN 00953628. Dostupné z: doi:10.1007/s00248-017-1044-5

NASI, R, R DENNIS, E MEIJAARD, G APLEGATE a P MOORE, 2002. *Forest fire and biological diversity*.

NAVARRO, Josefa M., Olaya PÉREZ-TORNERO a Asunción MORTE, 2014. Alleviation of salt stress in citrus seedlings inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi depends on the rootstock salt tolerance. *Journal of Plant Physiology* [online]. 171(1), 76–85. ISSN 01761617. Dostupné z: doi:10.1016/j.jplph.2013.06.006

NAVE, Lucas E, Eric D VANCE, Christopher W SWANSTON a Peter S CURTIS, 2011. *Fire effects on temperate forest soil C and N storage*.

NEARY, Daniel G, Carole C KLOPATEK, Leonard F DEBANO a Peter F FFOLIOTT, 1999. *Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis*.

NEARY, Daniel G, Kevin C RYAN a Leonard F DEBANO, 2005. *Wildland fire in ecosystems: effects of fire on soils and water* [online]. Dostupné z: doi:10.2737/rmrs-gr-42-v4

NEFF, J. C., J. W. HARDEN a G. GLEIXNER, 2005. Fire effects on soil organic matter content, composition, and nutrients in boreal interior Alaska. In: *Canadian Journal of Forest Research* [online]. s. 2178–2187. ISSN 00455067. Dostupné z: doi:10.1139/x05-154

NEVILLE, J, J L TESSIER, I MORRISON, J SCARRATT, B CANNING a J N KLIRONOMOS, 2002. *Soil depth distribution of ecto-and arbuscular mycorrhizal fungi associated with Populus tremuloides within a 3-year-old boreal forest clear-cut.*

NISSAN, Alon, Uria ALCOLOMBRI, Nadav PELEG, Nir GALILI, Joaquin JIMENEZ-MARTINEZ, Peter MOLNAR a Markus HOLZNER, 2023. Global warming accelerates soil heterotrophic respiration. *Nature Communications* [online]. 14(1). ISSN 20411723. Dostupné z: doi:10.1038/s41467-023-38981-w

NOTTINGHAM, Andrew T., Erland BÅÅTH, Stephanie REISCHKE, Norma SALINAS a Patrick MEIR, 2019. Adaptation of soil microbial growth to temperature: Using a tropical elevation gradient to predict future changes. *Global Change Biology* [online]. 25(3), 827–838. ISSN 13652486. Dostupné z: doi:10.1111/gcb.14502

NUÑEZ, Martin A., Thomas R. HORTON a Daniel SIMBERLOFF, 2009. Lack of belowground mutualisms hinders Pinaceae invasions. *Ecology* [online]. 90(9), 2352–2359. ISSN 00129658. Dostupné z: doi:10.1890/08-2139.1

ORUMAA, Argo, Ahto AGAN, Sten ANSLAN, Tiia DRENKHAN, Rein DRENKHAN, Karin KAUER, Kajar KÖSTER, Leho TEDERSOO a Marek METSLAID, 2022. Long-term effects of forest fires on fungal community and soil properties along a hemiboreal Scots pine forest fire chronosequence. *Science of the Total Environment* [online]. 851. ISSN 18791026. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2022.158173

OWEN, Suzanne M., Adair M. PATTERSON, Catherine A. GEHRING, Carolyn H. SIEG, L. Scott BAGGETT a Peter Z. FULÉ, 2019. Large, high-severity burn patches limit fungal recovery 13 years after wildfire in a ponderosa pine forest. *Soil Biology and Biochemistry* [online]. 139. ISSN 00380717. Dostupné z: doi:10.1016/j.soilbio.2019.107616

PAULSON, Alison K., Homero PEÑA, Heather D. ALEXANDER, Sergei P. DAVYDOV, Michael M. LORANTY, Michelle C. MACK a Susan M. NATALI, 2021. Understory plant diversity and composition across a postfire tree density gradient in a Siberian arctic boreal forest. *Canadian Journal of Forest Research* [online]. 51(5), 720–731. ISSN 12086037. Dostupné z: doi:10.1139/cjfr-2020-0483

PAUSAS, Juli G. a Jon E. KEELEY, 2009. A burning story: The role of fire in the history of life. *BioScience* [online]. 59(7), 593–601. ISSN 00063568. Dostupné z: doi:10.1525/bio.2009.59.7.10

PEAY, Kabir G, Max G SCHUBERT, N H U H NGUYEN a Thomas D BRUNS, 2012. Measuring ectomycorrhizal fungal dispersal: macroecological patterns driven by microscopic propagules. *Molecular Ecology* [online]. 21(16), 4122–4136. ISSN 0962-1083. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2012.05666.x>

PÉREZ-IZQUIERDO, Leticia, Karina E CLEMMENSEN, Joachim STRENGBOM, Gustaf GRANATH, David A WARDLE, Marie Charlotte NILSSON a Björn D LINDAHL, 2021. Crown-fire severity is more important than ground-fire severity in determining soil fungal community development in the boreal forest. *Journal of Ecology* [online]. 109(1), 504–518. ISSN 13652745. Dostupné z: doi:[10.1111/1365-2745.13529](https://doi.org/10.1111/1365-2745.13529)

PÉREZ-IZQUIERDO, Leticia, Mario ZABAL-AGUIRRE, Miguel VERDÚ, Marc BUÉE a Ana RINCÓN, 2020. Ectomycorrhizal fungal diversity decreases in Mediterranean pine forests adapted to recurrent fires. *Molecular Ecology* [online]. 29(13), 2463–2476. ISSN 1365294X. Dostupné z: doi:[10.1111/mec.15493](https://doi.org/10.1111/mec.15493)

PFEIFFER, M., A. SPESSA a J. O. KAPLAN, 2013. A model for global biomass burning in preindustrial time: LPJ-LMfire (v1.0). *Geoscientific Model Development* [online]. 6(3), 643–685. ISSN 1991959X. Dostupné z: doi:[10.5194/gmd-6-643-2013](https://doi.org/10.5194/gmd-6-643-2013)

PHILLIPS, Richard P., Edward BRZOSTEK a Meghan G. MIDGLEY, 2013. *The mycorrhizal-associated nutrient economy: A new framework for predicting carbon-nutrient couplings in temperate forests* [online]. červenec 2013. ISSN 0028646X. Dostupné z: doi:[10.1111/nph.12221](https://doi.org/10.1111/nph.12221)

PIETIKÄINEN, Janna, Marie PETTERSSON a Erland BÅÅTH, 2005. Comparison of temperature effects on soil respiration and bacterial and fungal growth rates. *FEMS Microbiology Ecology* [online]. 52(1), 49–58. ISSN 01686496. Dostupné z: doi:[10.1016/j.femsec.2004.10.002](https://doi.org/10.1016/j.femsec.2004.10.002)

PÜSCHEL, David, Michael BITTERLICH, Jana RYDLOVÁ a Jan JANSKA, 2021. Drought accentuates the role of mycorrhiza in phosphorus uptake. *Soil Biology and Biochemistry* [online]. 157. ISSN 00380717. Dostupné z: doi:[10.1016/j.soilbio.2021.108243](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108243)

RAUDABAUGH, Daniel B, P Brandon MATHENY, Karen W HUGHES, Teresa ITURRIAGA, Malcolm SARGENT a Andrew N MILLER, 2020. Where are they hiding? Testing the body snatchers hypothesis in pyrophilous fungi. *Fungal Ecology* [online]. 43, 100870. ISSN 1754-5048. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.funeco.2019.100870>

RINCÓN, Ana a José J PUEYO, 2010. Effect of fire severity and site slope on diversity and structure of the ectomycorrhizal fungal community associated with post-fire regenerated *Pinus pinaster* Ait. seedlings. *Forest Ecology and Management* [online]. 260(3), 361–369. ISSN 0378-1127. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.04.028>

RODRIGUES DOS SANTOS, Gil, Sandra RUTH SAAVEDRA MAGALLANES, Fernando MACHADO HAESBAERT, Eliane APARECIDA ROTILI, Jader NUNES CACHOEIRA a Marcos GIONGO, 2019. FIRE EFFECTS ON SOIL FUNGI IN A CERRADO VEGETATION AREA ACCORDING TO THE COLLECTION PERIOD [online]. 50(1), 1113–1122. Dostupné z: doi:10.5380/rf.v50

RUIZ-LOZANO, J. M. a R. AZCÓN, 2000. Symbiotic efficiency and infectivity of an autochthonous arbuscular mycorrhizal *Glomus* sp. from saline soils and *Glomus deserticola* under salinity. *Mycorrhiza* [online]. 10(3), 137–143. ISSN 09406360. Dostupné z: doi:10.1007/s005720000075

SALO, Kauko a Jari KOUKI, 2018. Severity of forest wildfire had a major influence on early successional ectomycorrhizal macrofungi assemblages, including edible mushrooms. *Forest Ecology and Management* [online]. 415–416, 70–84. ISSN 03781127. Dostupné z: doi:10.1016/j.foreco.2017.12.044

SÁNCHEZ-RAMÍREZ, Santiago, Andrew W WILSON a Martin RYBERG, 2017. Overview of Phylogenetic Approaches to Mycorrhizal Biogeography, Diversity and Evolution. In: Leho TEDERSOO, ed. *Biogeography of Mycorrhizal Symbiosis* [online]. Cham: Springer International Publishing, s. 1–37. ISBN 978-3-319-56363-3. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-56363-3_1

SANTÍN, Cristina a Stefan H. DOERR, 2016. *Fire effects on soils: The human dimension* [online]. 5. červen 2016. B.m.: Royal Society of London. ISSN 14712970. Dostupné z: doi:10.1098/rstb.2015.0171

SHAKESBY, R. A. a S. H. DOERR, 2006. Wildfire as a hydrological and geomorphological agent. *Earth-Science Reviews* [online]. 74(3–4), 269–307. ISSN 00128252. Dostupné z: doi:10.1016/j.earscirev.2005.10.006

SIMON, Luc, Jean BOUSQUET, Roger C. LÉVESQUE a Maurice LALONDE, 1993. Origin and diversification of endomycorrhizal fungi and coincidence with vascular land plants. *Nature* [online]. 363(6424), 67–69. ISSN 00280836. Dostupné z: doi:10.1038/363067a0

SMITH, Sally E. a David READ, 2008. *Mycorrhizal symbiosis* [online]. Third edition. Amsterdam: Elsevier. ISBN 978-0-12-370526-6. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-370526-6.X5001-6

SMITH, Sally E. a F. Andrew SMITH, 2011. Roles of arbuscular mycorrhizas in plant nutrition and growth: New paradigms from cellular to ecosystem scales. *Annual Review of Plant Biology* [online]. 62, 227–250. ISSN 15435008. Dostupné z: doi:10.1146/annurev-arplant-042110-103846

SOLOMON, Susan (Atmospheric chemist), INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. a INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. WORKING GROUP I., 2007. *Climate change 2007 : the physical science basis : contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. B.m.: Cambridge University Press. ISBN 9780521880091.

SOUZILOVSKAIA, N. A., VAN BODEGOM, P. M., TERRER, C., ZELDFE, M. van't, MCCALLUM, I., Luke MCCORMAK, M., FISHER, J. B., BRUNDRETT, M. C., de Sá, N. C., a TEDERSOO, L. (2019). Global mycorrhizal plant distribution linked to terrestrial carbon stocks. *Nature Communications*, 10(1), 5077. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13019-2>

STEIDINGER, B. S., T. W. CROWTHER, J. LIANG, M. E. VAN NULAND, G. D.A. WERNER, P. B. REICH, G. NABUURS, S. DE-MIGUEL, M. ZHOU, N. PICARD, B. HERAULT, X. ZHAO, C. ZHANG, D. ROUTH, K. G. PEAY, Meinrad ABEGG, C. Yves ADOU YAO, Giorgio ALBERTI, Angelica ALMEYDA ZAMBRANO, ... Irie Casimir ZOBI, 2019. Climatic controls of decomposition drive the global biogeography of forest-tree symbioses. *Nature* [online]. 569(7756), 404–408. ISSN 14764687. Dostupné z: [doi:10.1038/s41586-019-1128-0](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1128-0)

STOOF, Cathelijne R., Jan G. WESSELING a Coen J. RITSEMA, 2010. Effects of fire and ash on soil water retention. *Geoderma* [online]. 159(3–4), 276–285. ISSN 00167061. Dostupné z: [doi:10.1016/j.geoderma.2010.08.002](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.08.002)

SUN, Hui, Minna SANTALAHTI, Jukka PUMPANEN, Kajar KÖSTER, Frank BERNINGER, Tommaso RAFFAELLO, Ari JUMPPONEN, Fred O. ASIEGBU a Jussi HEINONSALO, 2015. Fungal community shifts in structure and function across a boreal forest fire chronosequence. *Applied and Environmental Microbiology* [online]. 81(22), 7869–7880. ISSN 10985336. Dostupné z: [doi:10.1128/AEM.02063-15](https://doi.org/10.1128/AEM.02063-15)

SWITZER, Joshua M, Graeme D HOPE, Sue J GRAYSTON a Cindy E PRESCOTT, 2012. Changes in soil chemical and biological properties after thinning and prescribed fire for ecosystem restoration in a Rocky Mountain Douglas-fir forest. *Forest Ecology and Management* [online]. 275, 1–13. ISSN 0378-1127. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.02.025](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.02.025)

TEDERSOO, Leho a Mohammad BAHRAM, 2019. Mycorrhizal types differ in ecophysiology and alter plant nutrition and soil processes. *Biological Reviews* [online]. 94(5), 1857–1880. ISSN 1469185X. Dostupné z: [doi:10.1111/brv.12538](https://doi.org/10.1111/brv.12538)

TEDERSOO, Leho, Mohammad BAHRAM, Sergei PÖLME, Urmas KÖLJALG, Nourou S YOROU, Ravi WIJESUNDERA, Luis Villarreal RUIZ, Aída M VASCO-PALACIOS, Pham Quang THU, Ave SUIJA, Matthew E SMITH, Cathy SHARP, Erki SALUVEER, Alessandro SAITTA, Miguel ROSAS, Taavi RIIT, David RATKOWSKY, Karin PRITSCH, Kadri PÖLDMAA, ... a K. ABARENKOV, 2014. Global diversity and geography of soil fungi. *Science* [online]. 346(6213), 1256688. Dostupné z: doi:10.1126/science.1256688

TEDERSOO, Leho, Tom W. MAY a Matthew E. SMITH, 2010. *Ectomycorrhizal lifestyle in fungi: Global diversity, distribution, and evolution of phylogenetic lineages* [online]. duben 2010. ISSN 09406360. Dostupné z: doi:10.1007/s00572-009-0274-x

TEDIM, Fantina, Gavriil XANTHOPOULOS a Vittorio LEONE, 2015. Forest Fires in Europe: Facts and Challenges. In: *Wildfire Hazards, Risks, and Disasters* [online]. B.m.: Elsevier Inc., s. 77–99. ISBN 9780124096011. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-410434-1.00005-1

THOMAZ, Edivaldo L., Valdemir ANTONELI a Stefan H. DOERR, 2014. Effects of fire on the physicochemical properties of soil in a slash-and-burn agriculture. *Catena* [online]. 122, 209–215. ISSN 03418162. Dostupné z: doi:10.1016/j.catena.2014.06.016

TRESEDER, Kathleen K, Michelle C MACK a Alison CROSS, 2004. *RELATIONSHIPS AMONG FIRES, FUNGI, AND SOIL DYNAMICS IN ALASKAN BOREAL FORESTS* [online]. Dostupné z: <http://weather.noaa.gov/>

VAN DER HEIJDEN, Marcel G A, John N KLIRONOMOS, Margot URSIC, Peter MOUTOGLIS, Ruth STREITWOLF-ENGEL, Thomas BOLLER, Andres WIEMKEN a Ian R SANDERS, 1998. Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity. *Nature* [online]. 396(6706), 69–72. ISSN 1476-4687. Dostupné z: doi:10.1038/23932

VAN WEES, Saskia CM, Sjoerd VAN DER ENT a Corné MJ PIETERSE, 2008. *Plant immune responses triggered by beneficial microbes* [online]. srpen 2008. ISSN 13695266. Dostupné z: doi:10.1016/j.pbi.2008.05.005

VÁZQUEZ-VELOSO, Aitor, Tatak DEJENE, Juan Andrés ORIA-DE-RUEDA, Mercedes GUIJARRO, Carmen HERNANDO, Juncal ESPINOSA, Javier MADRIGAL a Pablo MARTÍN-PINTO, 2022. Prescribed burning in spring or autumn did not affect the soil fungal community in Mediterranean *Pinus nigra* natural forests. *Forest Ecology and Management* [online]. 512. ISSN 03781127. Dostupné z: doi:10.1016/j.foreco.2022.120161

VERMA, Satyam, Dharmatma SINGH, Ajeet Kumar SINGH a Shanmuganathan JAYAKUMAR, 2019. Post-fire soil nutrient dynamics in a tropical dry deciduous forest of Western Ghats, India. *Forest Ecosystems* [online]. 6(1). ISSN 21975620. Dostupné z: doi:10.1186/s40663-019-0168-0

VISSER, Suzanne, 1995. Ectomycorrhizal fungal succession in jack pine stands following wildfire. *New Phytologist* [online]. 129(3), 389–401. ISSN 14698137. Dostupné z: doi:10.1111/j.1469-8137.1995.tb04309.x

VOŘÍŠKOVÁ, Alena, Jan JANSÁ, David PÜSCHEL, Miroslav VOSÁTKA, Petr ŠMILAUER a Martina JANOUŠKOVÁ, 2019. Abiotic contexts consistently influence mycorrhiza functioning independently of the composition of synthetic arbuscular mycorrhizal fungal communities. *Mycorrhiza* [online]. 29(2), 127–139. ISSN 09406360. Dostupné z: doi:10.1007/s00572-018-00878-8

WANG, Chao, Ember M. MORRISSEY, Rebecca L. MAU, Michaela HAYER, Juan PIÑEIRO, Michelle C. MACK, Jane C. MARKS, Sheryl L. BELL, Samantha N. MILLER, Egbert SCHWARTZ, Paul DIJKSTRA, Benjamin J. KOCH, Bram W. STONE, Alicia M. PURCELL, Steven J. BLAZEWICZ, Kirsten S. HOFMOCKEL, Jennifer PETT-RIDGE a Bruce A. HUNGATE, 2021. The temperature sensitivity of soil: microbial biodiversity, growth, and carbon mineralization. *ISME Journal* [online]. 15(9), 2738–2747. ISSN 17517370. Dostupné z: doi:10.1038/s41396-021-00959-1

WESTERLING, A L, H G HIDALGO, D R CAYAN a T W SWETNAM, 2006. Warming and Earlier Spring Increase Western U.S. Forest Wildfire Activity. *Science* [online]. 313(5789), 940–943. Dostupné z: doi:10.1126/science.1128834

WILSON, Carlos A, Robert J MITCHELL, Lindsay R BORING, Joseph J HENDRICKS a Joseph W JONES, 2002. *Soil nitrogen dynamics in a re-maintained forest ecosystem: results over a 3-year burn interval* [online]. Dostupné z: www.elsevier.com/locate/soilbio

XIANG, Xingjia, Sean M. GIBBONS, Jian YANG, Jianjian KONG, Ruibo SUN a Haiyan CHU, 2015. Arbuscular mycorrhizal fungal communities show low resistance and high resilience to wildfire disturbance. *Plant and Soil* [online]. 397(1–2), 347–356. ISSN 15735036. Dostupné z: doi:10.1007/s11104-015-2633-z

YANG, Teng, Leho TEDERSOO, Xingwu LIN, Matthew C. FITZPATRICK, Yunsheng JIA, Xu LIU, Yingying NI, Yu SHI, Pengpeng LU, Jianguo ZHU a Haiyan CHU, 2020. Distinct fungal successional trajectories following wildfire between soil horizons in a cold-temperate forest. *New Phytologist* [online]. 227(2), 572–587. ISSN 14698137. Dostupné z: doi:10.1111/nph.16531