

**Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta  
Katedra Botaniky**

**Charles University in Prague, Faculty of Science  
Department of Botany**

Doktorský studijní program: Botanika  
Ph.D. study program: Botany

Autoreferát disertační práce  
Summary of the Ph.D. Thesis



**Požár jako ekologický faktor v lesích střední Evropy  
Wildfire as an ecological factor in the forests of Central Europe**

**Mgr. Martin Adámek**

Školitel/Supervisor:  
RNDr. Věroslava Hadincová, CSc.

Praha, 2016

## **Obsah / Contents**

Abstrakt .....	3
Abstract .....	4
Úvod .....	5
Cíle práce.....	7
Hlavní výsledky práce .....	7
Závěr.....	9
Introduction .....	10
Aims of the thesis .....	12
Main results / List of publication .....	12
Conclusion.....	14
References / Literatura .....	15
Curriculum vitae.....	18

## **Abstrakt**

V rámci lesů severní polokoule je požár považován za přirozenou součást dynamiky zejména v mediteránních ekosystémech a boreálních lesích a nově také v temperátních lesích Severní Ameriky. V případě temperátních oblastí střední Evropy byl však ekologický význam požárů pro lesní ekosystémy tradičně přehlížen i přes jejich relativně častý výskyt, zejména v některých oblastech a lesních typech. Příčinou tohoto přehlížení nejsou specifické přírodní podmínky střední Evropy, ale spíše tradiční přístup lesnické ekologie, který v úvahách o fungování lesních společenstev nebere v potaz vliv disturbancí a striktně vyčleňuje vliv člověka z přírodních procesů již od jeho prvopočátků. Tento přístup vedl k současnému nedostatku studií o vlivu požáru na vegetaci a zákonitostech výskytu požárů v krajině. Hlavním cílem této práce bylo objasnit ekologickou roli požárů pro středoevropské lesní ekosystémy se zaměřením na borové lesy, přičemž území České republiky bylo využito jako modelová oblast pro širší geografický region.

**Kapitola 1** se zabývá prostorovou analýzou výskytu lesních požárů v České republice. Zjistili jsme, že výskyt požárů v této kulturní krajině je řízen především faktory prostředí, zatímco frekvenci požárů ovlivňují zejména lidské faktory, které jsou nejčastějším zdrojem zážehu. Frekvence požárů však závisela také na hustotě výskytu blesků, přirozené příčině požárů. Identifikovali jsme tak v krajině oblastivlastně náchylné k požárům, které se vyznačují především vysokým podílem jehličnatých lesů v nižších nadmořských výškách, členitostí terénu a výskytem propustných půd. Typickým příkladem takovýchto oblastí jsou pískovcová skalní města severozápadní části České republiky.

**Kapitola 2** je zaměřena na konkrétní pískovcovou oblast, NP České Švýcarsko. Použili jsme kombinaci současných lesnických dat a hodnot koncentrace uhlíků v půdě k porovnání faktorů, které ovlivňují výskyt požárů na desetileté a tisícileté škále. Výsledky obou analýz si odpovídaly. Výskyt požárů nejvíce ovlivňovaly topografické faktory, konkrétně index tepelného požitku a větší zastoupení skal. Dalším důležitým faktorem bylo zejména zastoupení borovice, zatímco lidské faktory měly pouze okrajový vliv. Vzhledem k tomu, že topografické faktory jsou v čase neměnné, dospěli jsme k závěru, že požáry se vyskytovaly na podobných k požárům náchylných stanovištích přinejmenším od Subatlantiku. Na těchto lokalitách se tak mohla během tohoto období vyvinout vegetace podmíněná pravidelným výskytem požárů. Výsledky těchto analýz byly také použity pro vytvoření predikce požárového rizika pro území NP České Švýcarsko.

**Kapitola 3** se zabývá výzkumem spontánní, 192 let trvající sukcese vegetace polopřirozených borů čtyř pískovcových oblastí po požáru. Cílem výzkumu bylo zjistit, jak jsou tyto lesy rezistentní a resilientní k požáru a jak intenzita požáru a další faktory prostředí ovlivňují dynamiku vegetace po požáru. Zjistili jsme, že rezistence stromového patra závisí na intenzitě požáru a jeho druhovém složení, zatímco i požáry nízké intenzity způsobily výrazné změny druhového složení podrostu. Bory projevily značnou resilienci k požárům, což vedlo k rychlé obnově pokryvnosti všech vegetačních pater a podobného druhového složení jako před požárem po přibližně 140 letech. Zaznamenali jsme kontinuální posun od počátečního hojného výskytu semenáčků borovice a pionýrských druhů listnáčů směrem k vyššímu poměrnému zastoupení zmlazení stínomilných a požáru citlivých druhů dřevin. Proto se požáry vyskytující se s frekvencí nejméně jednou za 200 let zdají být faktorem udržujícím borové lesy v pískovcových oblastech temperátní střední Evropy.

Tyto výsledky naznačují, že výskyt požárů ve středoevropské krajině podléhá podobným zákonitostem jako v jiných oblastech světa, kde je požár považován za nedílnou součást dynamiky lesních ekosystémů. Požár se navíc zdá být důležitým faktorem, který ovlivňoval podobu středoevropských lesů v dlouhodobém horizontu, což se týká alespoň některých lesních typů a oblastí.

## Abstract

Within the Northern Hemisphere, wildfires are considered to be an integral part of natural dynamics mainly in boreal forests and Mediterranean ecosystems, and most recently also in temperate forests of Northern America. By contrast, in temperate forests of Central Europe, the importance of wildfire for forest ecosystems has been traditionally marginalised despite documented frequent wildfire occurrence and existence of fire-prone forests. Apparently, the reason of this rooted attitude does not lie in the specific environmental conditions of Central Europe, but more likely in the traditional forest ecology approach, which generally does not consider the effect of disturbances on the shape of vegetation communities and strictly excludes human activity from natural processes since its beginnings. This attitude resulted in the lack of knowledge about local vegetation-wildfire relationship and patterns of wildfire occurrence in the landscape. The general aim of this thesis was to clarify the ecological role of wildfires for Central European forest ecosystems with a focus on *Pinus sylvestris* forests and using the Czech Republic as a model area for a broader region.

**Chapter 1** deals with the spatial analysis of the occurrence of forest fires in the Czech Republic. We found that the presence of wildfire in this cultural landscape is controlled mainly by the environmental factors, while wildfire frequency is driven mainly by human factors, the most common ignition trigger. However, wildfire frequency was driven also by the density of cloud-ground lightning strikes. We traced naturally fire-prone areas in the landscape, which are determined mainly by a high proportion of coniferous forests in lower altitudes, ruggedness of the relief and occurrence of drainable soils. Striking example of such areas are the sandstone “rock towns” of the North Western part of the Czech Republic.

**Chapter 2** is focused on one of such “rock town” areas in the Bohemian Switzerland National Park. We used a combination of recent forestry data and soil charcoal concentration values to compare the factors influencing wildfire occurrence patterns on decadal and millennial scales. The results of both analyses corresponded with the main driving factors of the wildfire incidence being topographic features, namely the heat load index and presence of rocks. An additional important factor was especially the *Pinus sylvestris* abundance, while human factors were of marginal importance. Since the topographic factors were stable over the time, we concluded that wildfires, regardless whether of human or natural origin, have been occurring in similar fire-prone habitats at least since the Subatlantic period which could result on such sites in the development of fire-adapted vegetation. The results of the analyses were also used for the creation of the wildfire risk prediction for the National Park territory.

**Chapter 3** deals with the study of 192 years lasting spontaneous post-fire vegetation development of semi-natural *Pinus sylvestris* forests of four sandstone regions. The survey was focused on the forest resistance and resilience to wildfire and the role of fire severity and environmental factors on the post-fire vegetation dynamics. We found that the resistance of the tree layer turned out to be dependent on species composition and fire severity, while even low-severity fires induced great changes in the understorey species composition. The forests displayed structural and compositional resilience, resulting in fast recovery of the vegetation cover and return to a similar species composition to pre-fire stands after about 140 years. We noticed a continuous shift from initial prevalence of the regeneration of *Pinus sylvestris* and broad-leaved pioneer species towards higher proportional abundance of shade-tolerant and fire-sensitive tree species. Thus, periodic wildfires occurring at least once in 200 years seem to be a factor maintaining *Pinus sylvestris* forests in temperate sandstone landscapes.

These results indicate that wildfire occurrence in Central European landscape is subjected to similar rules like in the other regions, where wildfire is considered an integral part of forest dynamics. Moreover, wildfire turned out to be an important factor shaping Central European forest vegetation in the long-term, at least within certain regions and forest types.

## Úvod

### *Obecný vliv požárů na lesní ekosystémy*

Požár je příkladem disturbančního faktoru, který ovlivňuje lesní ekosystémy celého světa (Engelmark 1987; Pausas et Vallejo, 1999; Skre et al., 1998; Podur et al., 2003). Působení požáru, podobně jako jiné disturbanční vlivy, dočasně sníží biomasu vegetace a změni lokální biotické a abiotické podmínky (Agee, 1998; Lloret et al., 2005). Na rozdíl od jiných typů disturbance, požár eliminuje nízké a citlivé druhy ve prospěch druhů, které jsou schopné přežít nebo zmlazovat na spáleništích a přímo ovlivňuje chemické, fyzikální a biologické vlastnosti půdy (Agee, 1998; Lloret et al., 2005). Požár na rozdíl od větrných disturbancí snižuje množství lesního opadu, což je následováno rychlým uvolněním živin (Uotila et al., 2005) a obnažením minerální půdy. Vítr poškozují hlavně vzrostlé stromy, což uvolní životní prostor spodní etáži stínomilných stromů. Požáry naopak přednostně poškozují podrost, který je pak obvykle nahrazen zmlazením světlomilných dřevin (Sinton et al., 2000). Účinek disturbance však závisí na její intenzitě. A tak se vliv požárů může lišit od totálního odstranění porostu v případě korunových požárů až po povrchové požáry nízké intenzity, které téměř nenaruší porost (Baird et al, 1999; Weisberg, 2004). Pravidelné požáry mohou proměnit ekosystémy v "požárový klimax", v němž dominují požáru adaptované druhy (Meeker et Merkel, 1984).

### *Globální výskyt požárů a středoevropská perspektiva*

V rámci lesů severní polokoule je požár považován za přirozenou součást dynamiky zejména v mediteránních ekosystémech a boreálních lesích Severní Ameriky a Eurasie (Agee, 1998; Engelmark, 1993; Skre et al., 1998; Pausas et Vallejo, 1999) a stále častěji také v severoamerických temperátních lesích (Abrams, 1992, Odion et al., 2004, Sturtevant et al., 2004; Hoss et al., 2008; Flatley et al, 2011; Brose et al., 2013). Specifické lesní formace, podmíněné častým výskytem požárů, jsou tzv. pine barrens, temperátní borové doubravy na písčitých půdách severovýchodního USA (Boerner, 1981; Scheller et al., 2011). V případě temperátních oblastí střední Evropy byl však ekologický význam požárů pro lesní ekosystémy tradičně přehlížen (Clark et Merkt, 1989; Ellenberg, 1996; Tinner et al., 2005; Stähli et al., 2006; Niklasson et al., 2010) a požár byl vnímán jen jako neblahý produkt lidské činnosti zcela nesouvisící s přírodními procesy. Proto bylo toto téma v ekologických studiích týkajících se středoevropského regionu téměř opomenuto.

Důvody pro takovýto postoj k požárům není nicméně snadné identifikovat. Některé části severoamerického temperátního regionu, odkud pochází četné ekologické studie zaměřené na požáry, mají podobné klima jako střední Evropa (Peel et al., 2006). Proto klima střední Evropy zřejmě nebude hlavním důvodem. Středoevropský postoj k požáru spíše souvisí s místní lesnicko-ekologickou tradicí, která obecně neuvažuje vliv disturbancí na dlouhodobé složení vegetačních společenstev (Falinski et Falinska, 1986; Korpel, 1995; Splechtna et al., 2005). Dalším důvodem může být poměrně husté lidské osídlení a dlouhodobý land-use v tomto regionu spojený se silným ovlivněním přírody, ve srovnání s např. Severní Amerikou nebo boreální Eurasií (Angelstam et Kuuluvainen, 2004). Listnaté lesy, které jsou potenciálně nejrozšířenějším klimaxovým vegetačním typem střední Evropy (Chytrý, 2012), jsou obecně vnímány jako nehořlavé. Přestože listnaté lesy jsou vsutku méně hořlavé než lesy jehličnaté (Clark et Royall, 1996; Moreira et al., 2001; Sturtevant et al., 2004; Parisien et al., 2011), k požáru může dojít i tam (Corona et al., 2014; Ascoli et al., 2015). V důsledku toho se poměrně častý výskyt požárů v současných po generace pěstovaných jehličnatých lesích nedostal do ekologických úvah vzhledem k jejich nepřirozenosti. Na vyšší zastoupení jehličnanů v „přirozených“ lesích i nižších poloh je však poukazováno v nejnovějších paleoekologických studiích (Novák et al., 2012, Bobek, 2013, Abraham, 2014). Další možný důvod tradičního přehlížení lesních požárů ve střední Evropě

ve srovnání se situací v např. Severní Americe by mohl být rozdíl v typickém průběhu požárů v jehličnatých lesích. Lesní požáry v Severní Americe se častěji projevují jako spektakulární korunové požáry velké intensity, zatímco v Eurasii převažují povrchové požáry nízké intenzity, které zřídka dosáhnou do korun stromů. Tento fakt však nijak nesouvisí s klimatem, ale spíše s rozdílnými požárně-adaptivními strategiemi jehličnatých dřevin těchto kontinentů (Rogers et al., 2015).

Ať tak či onak, požár byl v poslední době popsán jako důležitý proces také ve střední Evropě, konkrétně v alpských regionech (Delarze et al., 1992; Tinner et al., 1999; Stähli et al., 2006; Müller et al., 2013; Valese et al., 2014) a v hemiboreálních borových lesích jižní Litvy a východního Polska (Marozas et al., 2007; Niklasson et al., 2010; Zin et al., 2015). Statistické údaje o lesních požárech v Evropě ukazují, že v současnosti se požáry vyskytují ve střední Evropě poměrně často, podobně jako např. v jižních částech severských států. (www.eea.europa.eu/publications/european-forest-ecosystems, strana 43).

Přestože požáry jsou přirozeným jevem, hlavní příčinou vznícení v osídlené krajině byla již od svých počátků lidská aktivita (Niklasson et Granström, 2000; Vannière et al., 2008; Molinari et al., 2013). Stejně tak naprostá většina současných lesních požárů v České republice, hlavní oblasti této práce, je způsobena lidmi. Z ročního průměru cca 1200 lesních požárů je 69% způsobených lidmi, 30% vzniklo z nevysvětlených příčin a 1,4% jsou zapáleny úderem blesku (Kula et Jankovská, 2013). Vzhledem k tomu, že vliv člověka je dlouhodobou a integrální součástí středoevropské krajiny, je třeba přijmout i lidmi způsobené požáry jako faktor, který formoval středoevropské lesy v průběhu holocénu, podobně jako v jiných oblastech (Tinner et al., 1999; Abrams et Nowacki, 2008).

Vzhledem k těmto skutečnostem se důvod tradiční negace ekologické role požáru ve středoevropské krajině zdá být spíše záležitostí socio-kulturní paměti (Le Goff, 1992), než objektivním důsledkem specifických přírodních podmínek ve střední Evropě.

### *Výskyt požáru v krajině*

Prostorové rozložení výskytu požáru v krajině závisí na antropogenních a environmentálních faktorech, jako je klima, topografie a vegetace (Cardille et Ventura, 2001; Yang et al., 2007; Avila-Flores et al., 2010). Frekvence požárů je obecně vyšší v suchých podmínkách, na konvexních místech terénu a na jižně orientovaných svazích a klesá s rostoucí vlhkostí, např. směrem k pólům, s rostoucí nadmořskou výškou a oceanitou klimatu (Angelstam, 1998; Skre et al., 1998; Pew et Larsen, 2001; Futao et al., 2016). Lidské faktory mohou více nebo méně zastřít vliv prostředí (Flatley et al., 2011; Zumbunnen et al., 2012), ale na druhou stranu, prostorové rozložení i lidmi způsobenými požáry může být silně závislé na faktorech prostředí (Pew et Larsen, 2001).

Charakteristika lesní vegetace je jedním z nejdůležitějších faktorů ovlivňujících výskyt požáru, neboť přímo ovlivňuje kvalitu a množství paliva (Bessie et Johnson, 1995; Krawchuk et al., 2006; Fang et al., 2015). Požáry se vyskytují s větší pravděpodobností v jehličnatých lesích než v listnatých, což platí ve Středomoří, v temperátních i boreálních oblastech (Díaz-Delgado et al., 2004, Sturtevant et al., 2004, Parisien et al., 2011). V euroasijské boreální zóně jsou požáry asociovány převážně s borovými lesy (Engelmark 1987, Tanskanen, 2007). Borovice lesní roste obvykle v sušších podmínkách, produkuje pryskyřičný a snadno vznětlivý opad a starší porosty mají poměrně řídký zápoj umožňující vysychání hrabanky (Lecomte et al., 2005). Zároveň má několik uzpůsobení k požárům: tlustou kůru; hluboký kořenový systém; odvrhování spodních větví; rychlý růst a schopnost regenerace na otevřených místech s minerální půdou (Agee, 1998; Rogers et al., 2015). Pravidelné požáry tak mohou udržovat borové porosty i na místech, kde by jinak převládly jiné druhy dřevin vzhledem k edafickým podmínkám (Engelmark, 1987; Angelstam, 1998; Gromtsev, 2002). V temperátní střední Evropě se jehličnaté lesy přirozeně vyskytují také (např. Bendel et al.,

2006). V České republice je výskyt přirozených (dubo-) borových lesů, tzv. reliktních borů, běžně omezován na místa s edaficky nepříznivými podmínkami pro jiné druhy dřevin, jako jsou skalní vrcholy nebo extrémně živinově chudé a propustné půdy. Větší plochy přírodě blízkých borů na živinově chudých substrátech jsou dnes považovány za obdobu boreo-kontinentálních borů vzhledem k jejich podobné fyziologii a druhovému složení (Novák et al., 2012, Chytrý, 2012). Největší region takovýchto borů se nachází v severozápadní části České republiky na pískovcovém podloží. Současný výskyt požárů v této oblasti je výrazně častější (Kula a Jankovská, 2013) a recentní paleoekologické průzkumy zde potvrdily kontinuální výskyt požárů a borových uhlíků v průběhu celého holocénu (Pokorný a Kuneš, 2005; Abraham, 2006; Novák et al., 2012; Bobek, 2013). Tyto skutečnosti naznačují, že tyto ekosystémy byly ovlivňovány opakujícími se požáry v dlouhodobém horizontu. Nicméně otázka, zda požáry mohly hrát důležitou roli v dynamice a dlouhodobém vývoji těchto lesů, podobně jako např. v severoamerických pine barrens nebo euroasijských boreálních lesích, a přispěly tak k zachování reliktních borů až do současnosti, nebyla dosud uspokojivě vyřešena.

### **Cíle práce**

Cílem této disertační práce je objasnit ekologickou roli požárů v lesích na území České republiky, sloužící jako modelový prostor pro širší středoevropský region. Práce je zaměřena na borové lesy českých a německých pískovcových oblastí, kde se požáry vyskytují nápadně často. Výhodou této oblasti je také koncentrace chráněných přírodních oblastí, což mi umožnilo pozorovat vliv požáru na polopřirozené lesní ekosystémy na plochách bez lesnické intervence po požáru.

Zajímalo mě zejména:

- 1) Které faktory ovlivňují výskyt požárů ve středoevropské krajině na různých geografických škálách?
- 2) Je prostorové rozmístění požárů v kulturní krajině ovlivňováno více antropogenními nebo environmentálními faktory?
- 3) Jaké faktory prostředí vymezují v krajině oblasti přirozeně náchylné požárům?
- 4) Jaký mají požáry vliv na vývoj a druhové složení vegetace borových lesů pískovcových oblastí?
- 5) Jak jsou tyto lesy resistantní a resilientní k požárové disturbanci?
- 6) Je požár důležitým faktorem podmiňujícím zachování reliktních borů ve středoevropské krajině?

### **Hlavní výsledky práce**

#### **Kapitola 1: Faktory ovlivňující výskyt požárů v kulturní krajině střední Evropy**

V této studii jsme se zabývali faktory ovlivňující prostorové rozmístění lesních požárů v krajině České republiky. Konkrétně jsme se zaměřili: Na srovnání vlivu environmentálních a antropogenních faktorů na prezenci a frekvenci požárů na celorepublikové škále a v rámci zvoleného, požáru náchylného regionu v severozápadní části České republiky; zjištění vlivu hustoty blesků na výskyt požárů; zjištění oblastí se specifickými přírodními podmínkami podporujícími výskyt požárů. Použili jsme 15985 záznamů lesních požárů zahrnující 12 leté období a snažili jsme se objasnit jejich výskyt s využitím GIS vrstev antropogenních, topografických, klimatických a vegetačních faktorů. Důležité faktory jsme identifikovali pomocí GLM a metody hierarchical partitioning. Zjistili jsme, že na presence požáru měly vliv především environmentální faktory, kdežto frekvence požárů byla řízena hlavně lidskými faktory, zejména hustotou obyvatelstva. Identifikovali jsme přírodní podmínky podporující výskyt požárů v krajině: vyšší zastoupení borovice, smrku a břízy v nižších nadmořských výškách, členitost reliéfu a výskyt propustných půd. Příkladem krajiny, kde

všechny tyto faktory interagují, jsou pískovcová skalní města. Ve vybrané oblasti, kde takovéto podmínky převládají, byl vliv environmentálních faktorů na výskyt požárů ještě výraznější, než na celorepublikové úrovni. Frekvence požárů v místních, požáru náchylných borových lesích byla ovlivněna také hustotou blesků s pozitivním nábojem. Kombinace podmínek podporujících výskyt požárů s dostupností zdrojů vznícení pravděpodobně vedla k rozvoji místních požárem podmíněných ekosystémů.

## **Kapitola 2: Lesní požáry v temperátní krajině: Dekádní a tisíciletá perspektiva v pískovcové oblasti střední Evropy**

V této studii jsme zjišťovali, zda má pískovcová krajina NP České Švýcarsko kontinuální dlouhodobou historii výskytu požárů a zda je prostorové rozložení výskytu recentních i dávných požárů řízeno stejnými faktory prostředí. Použili jsme současná lesnická data z období 1974-2008 a pedoantrakologický přístup k odhalení požárových událostí v dnešní krajině a v dávné minulosti. Jako vstupní data jsme použili digitalizované lokalizace současných požárů a půdních sond s naměřenými hodnotami koncentrace půdních uhlíků a GIS vrstvy topografických, vegetačních a antropogenních faktorů. Časový rozsah analyzovaných dávných požárů byl odhadnut na 0 - 3.500 let BP podle <sup>14</sup>C datování 14 uhlíků. Současný výskyt požárů byl analyzován ve vztahu ke všem dostupným faktorům pomocí metody ENFA, koncentrace půdních uhlíků byla analyzována pouze ve vztahu k časově neměnným topografickým faktorům pomocí lineární regrese. Výsledky analýz koncentrací půdních uhlíků byly konzistentní s výsledky ze současných lesnických dat. Nejdůležitějšími faktory ovlivňující výskyt požárů byly topografické faktory, konkrétně index tepelného požitku a přítomnost skal. Dalším významným faktorem bylo zejména zastoupení borovice lesní. I přes to, že je tato oblast osídlena a turisticky atraktivní, antropogenní faktory jako blízkosti vesnic, turistických tras a silnic měly pouze marginální vliv na výskyt požárů. Výsledky ukázaly, že požáry se vyskytovaly na podobných stanovištích náchylných k požárům, jako jsou vyvýšené skalní plošiny a jihozápadní svahy, přinejmenším od Subatlantiku. Vegetace takových míst, v současné době hlavně polopřirozené porosty s dominancí borovice lesní, tak musela být ovlivňována periodicky se opakujícími požáry po tisíciletí.

## **Kapitola 3: Dlouhodobý vliv požárů na temperátní borové lesy: Dynamika vegetace a resilience ekosystému.**

V této studii jsme se zaměřili na polopřirozené borové lesy čtyř středoevropských pískovcových oblastí. Zjišťovali jsme schopnost těchto lesů spontánně regenerovat po požáru. Sledovali jsme konkrétně vývoj druhového složení a rozmanitosti vegetace, roli intenzity požáru pro dynamiku vegetace, schopnost jednotlivých druhů dřevin přežít požár a zajímalo nás také, zda požáry mohou přispět k přetrvávání borových lesů v těchto oblastech. Naše studie byla založena na kvantitativní analýze vegetačních dat sebraných v designu space-for-time substitution. Záznam vegetace probíhal na spontánně regenerujících spáleništích, starých od 1 do 192 let po požáru. Takové časové rozpětí nám umožnilo odhalit kompletní sukcesní trajektorii a posoudit, jak jsou tyto lesy rezistentní a resilientní k požáru, vzhledem k intenzitě disturbance a ve smyslu času potřebného k návratu vegetace do stavu před požárem.

Rezistence stromového patra závisela na druhovém složení a intenzitě požáru. Druhové složení lesního podrostu naproti tomu bylo silně ovlivněno i požáry nízké intenzity. Lesy byly však k požáru resilientní, což vedlo k rychlé obnově pokrývnosti všech vegetačních pater a návratu k podobné druhové skladbě jako před požárem cca po 140 letech. V raných sukcesních stádiích převládalo zmlazení pionýrských druhů listnáčů a borovice lesní, ale v průběhu vývoje porostu jsme zaznamenali kontinuální posun směrem k vyššímu zastoupení zmlazení stínomilných a zároveň k požáru citlivých druhů dřevin. Požáry vyskytující se



s frekvencí alespoň jednou za 200 let jsou tak pravděpodobně faktorem, který udržuje lesy s dominancí borovice lesní v temperátních pískovcových oblastech střední Evropy.

### **Závěr**

Výskyt požárů v kulturní krajině České republiky ovlivňují antropogenní i environmentální faktory. Faktory prostředí řídí hlavně náchylnost stanoviště k požárům, zatímco lidské faktory ovlivňují zejména frekvenci požárů. I na tak hustě osídleném území není vliv environmentálních faktorů, včetně hustoty blesků jako potenciálního přirozeného zdroje vznícení, zcela potlačen lidskými faktory. Tento výsledek ukazuje, že výskyt požárů se ve středoevropské krajině řídí stejnými zákonitostmi jako v jiných oblastech světa, kde je požárová ekologie dobře zavedeným vědeckým odvětvím. Podmínky prostředí přirozeně podporující výskyt požárů jsou však v rámci střední Evropy omezeny spíše jen na konkrétní oblasti. Tyto podmínky zahrnují zejména výskyt jehličnatých lesů v nižších nadmořských výškách a členitý reliéf s výskytem propustných půd. Zaměříme-li se na místa, kde se takové podmínky vyskytují více či méně přirozeně, pak jsou nápadným příkladem takových oblastí náchylných k požárům pískovcová skalní města s vysokým podílem borových lesů. Naše studie, zaměřená na jednu z těchto pískovcových oblastí, do značné míry potvrdila tyto výsledky a ještě více zdůraznila vliv environmentálních faktorů na výskyt požárů v tomto členitém terénu. Tyto výsledky byly konzistentní i ve srovnání mezi dvěma časovými škálami. Výsledky vegetační terénní studie v borových lesích pískovcových oblastí přispěla k pochopení mechanismu, jak požár může v našich podmínkách udržovat lesy s převahou borovice lesní v dlouhodobém horizontu. Tyto výsledky jsou srovnatelné s již známou, požárem řízenou dynamikou euroasijských boreálních lesů, navzdory odlišným druhům interagujícím v těchto ekosystémech. Tyto výsledky naznačují, že i v temperátní střední Evropě může být požár důležitým faktorem formujícím lesní vegetaci v dlouhodobém měřítku, alespoň v případě určitých oblastí a lesních typů. Přijmeme-li lidskou přítomnost, hlavní zdroj vznícení požárů, jako dlouhodobou a nedílnou součást středoevropské krajiny, pak není důvod pro další marginalizaci významu požárů pro přirozeně k požáru náchylné ekosystémy.

## **Introduction**

### *General effect of wildfire on forest ecosystems*

Wildfire represents a disturbance factor that shapes forest ecosystems worldwide (Engelmark, 1987; Pausas and Vallejo, 1999; Skre et al., 1998; Podur et al., 2003). Similarly to other types of disturbance, its activity temporarily reduces vegetation biomass and changes local biotic and abiotic conditions (Agee, 1998; Lloret et al., 2005). In contrast to other disturbances types, fire eliminates low and sensitive species in favour of species that are able to survive or regenerate in burned places and directly affects chemical, physical and biological qualities of the soil (Agee, 1998; Lloret et al., 2005). In contrast to wind disturbances, fire reduces forest necromass that is followed by rapid nutrients release (Uotila et al., 2005) and barring of mineral soil. Wind blows down mainly large mature trees while shade-tolerant understory trees are released. By contrast, fire preferentially destroys understory which is usually replaced by the regeneration of light-demanding tree species (Sinton et al., 2000). However, the immediate effect of a disturbance depends on its severity. Thus, the impact of fire varies from totally stand-replacing crown fires to low-severity surface fires which do not almost disrupt the tree canopy (Baird et al., 1999; Weisberg, 2004). Periodic fires can shift the ecosystems towards “fire climax” dominated by fire-adapted species (Meeker and Merkel, 1984).

### *Global wildfire occurrence and the Central European perspective*

In the context of forests of Northern Hemisphere, wildfires are considered to be an integral part of natural dynamics mainly in Mediterranean ecosystems and boreal forests of North America and Eurasia (Agee, 1998; Engelmark, 1993; Skre et al., 1998; Pausas and Vallejo, 1999) and increasingly also in Northern American temperate forests (Abrams, 1992; Odion et al., 2004; Sturtevant et al., 2004; Hoss et al., 2008; Flatley et al., 2011; Brose et al., 2013). Specific forest formations dependent of frequent wildfire occurrence are the pine barrens, a temperate pine-oak forests on sandy soil of North Eastern USA (Boerner, 1981; Scheller et al., 2011). By contrast, the ecological role of wildfire for temperate Central European forest ecosystems has been traditionally omitted (Clark and Merkt, 1989; Ellenberg, 1996; Tinner et al., 2005; Stähli et al., 2006; Niklasson et al., 2010) and wildfire has been there perceived just as an adverse human product without any relevance to natural processes. Therefore, this topic has been almost left out from ecological studies of the Central European region.

However, the reasons for this attitude towards wildfire seem to be a complex matter. Part of the temperate Northern American region of numerous fire ecology studies has similar climate to those of the Central Europe (Peel et al., 2006). Thus, the climate of the Central Europe does not seem to be an important reason. The Central European wildfire perspective can more likely be related to the local tradition in forest ecology which generally does not consider the effect of disturbances on the shape of vegetation communities (Falinski and Falinska, 1986; Korpel, 1995; Splechtna et al., 2005). The other reasons can be relatively dense human population and long-lasting land-use associated with strong influence of natural vegetation and processes, compared to e.g. Northern America or boreal Eurasia (Angelstam and Kuuluvainen, 2004). The broadleaved forest, hypothetically the most widespread climax vegetation in Central Europe (Chytrý, 2012), is commonly perceived as non-fire-prone vegetation type. However, even though broadleaved forests are generally less fire-prone than coniferous (Clark and Royall, 1996; Moreira et al., 2001; Sturtevant et al., 2004; Parisien et al., 2011), wildfires can occur there as well (Corona et al., 2014; Ascoli et al., 2015). Consequently, relatively frequent occurrence of wildfires in recent man-made coniferous forests did not get into the consideration of ecologists due to unnaturalness of these forests. The other possible reason of traditional overlooking of wildfires in Central Europe in comparison with e.g. Northern America could be the pattern of typical wildfire behavior in

coniferous forests. Forest fires in Northern America exhibit more likely as spectacular high-intensity crown fires, whereas in Eurasia prevail low-intensity surface fires that rarely reach tree crowns. It has not been explained by different climate but more likely by different fire-adaptive strategies of the coniferous tree species (Rogers et al., 2015).

Either way, wildfire has been recently recognized as an important process also in Central Europe, namely in Alpine regions (Delarze et al., 1992; Tinner et al., 1999; Stähli et al., 2006; Müller et al., 2013; Valese et al., 2014) and in hemiboreal *Pinus sylvestris* forests of Southern Lithuania and Eastern Poland (Marozas et al., 2007; Niklasson et al., 2010; Zin et al., 2015). The statistics on forest fires in Europe indicate that wildfire recently occurs in the Central Europe relatively frequently, similarly to e.g. southern parts of Northern countries. ([www.eea.europa.eu/publications/european-forest-ecosystems](http://www.eea.europa.eu/publications/european-forest-ecosystems), page 43).

Although the forest fire is a natural phenomenon, the main cause of ignition in populated landscapes has been, since its beginnings, the human activity (Niklasson and Granström, 2000; Vanni re et al., 2008; Molinari et al., 2013). Equally, overwhelming majority of recent forest fires in the Czech Republic, a main study area of this thesis, is caused by humans. From annual average of about 1200 forest fires, 69% are human-caused, 30% are of unexplained causes and 1.4 % are ignited by the lightning strike (Kula and Jankovská, 2013). Since human influence has been long-lasting and integral component of Central European landscape, it is necessary to consider even human-caused fires as a factor shaping Central European forest vegetation through the Holocene period, similarly like in other regions (Tinner et al., 1999; Abrams and Nowacki, 2008).

Considering these facts, the reason of the traditional negation of the ecological role of wildfire in Central European landscape seems to be mostly a matter of socio-cultural memory (Le Goff, 1992) rather than an objective result of specific Central European natural conditions.

#### *Patterns of the wildfire occurrence in the landscape*

The spatial distribution of the wildfire occurrence in the landscape depends on anthropogenic and environmental factors like the climate, topography and vegetation (Cardille and Ventura, 2001; Yang et al., 2007; Avila-Flores et al., 2010). Wildfire frequency is generally higher in dry conditions, on convex terrain sites and south-facing slopes and it decreases with increasing humidity, e.g. towards poles, with raising altitude and oceanity of the climate (Angelstam, 1998; Skre et al., 1998; Pew and Larsen, 2001; Futao et al., 2016). Human factors can more or less obscure the effect of environment (Flatley et al., 2011; Zumbrennen et al., 2012) but on the other hand, spatial distribution even of human-caused wildfires can be strongly dependent on environmental factors (Pew and Larsen, 2001).

Forest vegetation characteristics is one of the most important drivers of wildfire occurrence, as it directly influences the quality and load of the fuel (Bessie and Johnson, 1995; Krawchuk et al., 2006; Fang et al., 2015). Wildfires occur more likely in coniferous forests than in deciduous, correspondingly in Mediterranean, temperate and boreal regions (Díaz-Delgado et al., 2004, Sturtevant et al., 2004, Parisien et al., 2011). In the Eurasian boreal zone, wildfires are associated mainly with *Pinus sylvestris* forests (Engelmark, 1987; Tanskanen, 2007). *Pinus sylvestris* grows usually under drier conditions, produces resinous and easily flammable litter and its mature stands form a relatively sparse canopy allowing the ground layer to dry out (Lecomte et al., 2005). At the same time, it possesses several fire-adaptation traits: a thick bark; a deep root system; self-pruning of lower branches; fast growth and an ability of regeneration in barren places with mineral soil (Agee, 1998; Rogers et al., 2015). Regular fires can thus maintain pine stands also in places where other tree species would otherwise prevail due to site conditions (Engelmark, 1987; Angelstam, 1998; Gromtsev, 2002).

In temperate Central Europe, the conifer-dominated forests occur naturally as well (e.g. Bendel et al., 2006). In the Czech Republic, the occurrence of natural pine(-oak) forests, so-called “relic pinewoods”, is commonly supposed on sites with edaphically unfavorable conditions for other tree species, like rock tops or extremely nutrient poor and drainable soils. Larger areas of semi-natural pine-dominated forests on nutrient poor substrates are nowadays considered to be an analogy of boreo-continental pinewoods due to their similar physiognomy and species composition (Novák et al., 2012, Chytrý, 2012). The largest region of such pine forests is situated in North Western part of the Czech Republic on sandstone bedrock. Present-day wildfire occurrence in this region is markedly frequent (Kula and Jankovská, 2006) and recent palaeoecological surveys confirmed local continuous occurrence of wildfires and *Pinus sylvestris* charcoals through whole Holocene period (Pokorný and Kuneš, 2005; Abraham, 2006, Novák et al., 2012; Bobek, 2013). These facts indicate that such ecosystems have been influenced by recurrent wildfires in the long-term. However, the question whether the fire disturbance could play an important role in the dynamics and long-term development of these pine forests, similarly to e.g. American pine barrens or analogous Eurasian boreal forests, and contribute thus to preserve „relict pinewoods“ until recent, still remains unresolved.

### **Aims of the thesis**

The aim of this dissertation thesis was to clarify the ecological role of wildfire in forests of the Czech Republic as a model area for broader Central European region. The main focus of the thesis was pointed towards conspicuously fire-prone *Pinus sylvestris* dominated forests of Czech and German sandstone region. The great advantage of this region was also the concentration of protected natural areas, what enabled me to observe the effect of wildfire on relatively preserved forest ecosystems and without post-fire forestry intervention.

Specifically, I asked:

- 1) Which factors influence the wildfire occurrence in the Central European landscape on various geographical scales?
- 2) Is the spatial pattern of wildfire occurrence in the cultural landscape driven more by anthropogenic or natural environmental factors?
- 3) Which environmental factors define the naturally fire-prone areas in Central European landscape?
- 4) How does wildfire influence the development and species composition of the vegetation of *Pinus sylvestris* dominated forests of sandstone regions?
- 5) How resilient and resistant are these forest to wildfires?
- 6) Is wildfire an important factor conditioning the persistence of “relict pinewoods” in Central European landscape?

### **Main results / List of publications**

#### **Chapter 1: Adámek, M., Jankovská, Z., Hadincová, V., Kula, E., Wild, J. Drivers of Forest Fire Occurrence in the Cultural Landscape of Central Europe. *Manuscript***

In this study, we aimed to reveal the factors influencing the spatial distribution of forest fires in the landscape of the Czech Republic. Specifically, we aimed to compare the role of environmental and human factors for wildfire occurrence and frequency on the country scale and within selected fire-prone region of North Western part of the Czech Republic; to examine the role of lightning strikes for the wildfire incidence; and to trace the areas with specific naturally driven fire-prone conditions. We used 15985 forest fires records covering 12 years period and explained their occurrence by GIS layers of human, topographic, climatic and vegetation composition factors. We detected important factors using GLM and

hierarchical partitioning methods. We found that wildfire presence was controlled mostly by environmental factors, while wildfire frequency was strongly driven by human factors, especially by the population density. We identified the naturally driven fire-prone conditions in the landscape, which consisted mainly of higher abundance of *Pinus sylvestris*, *Picea abies* and *Betula spp.* in lower altitudes, ruggedness of the relief and occurrence of drainable soils. An example of the landscape type, where all these factors interact, are the sandstone “rock towns”. In the selected region, where such conditions are prevalent, the effect of environmental factors on wildfire incidence was even more pronounced than on the country scale. Wildfire frequency in local fire-prone *Pinus sylvestris* forests was driven also by the density of lightning strikes of positive polarity. The combination of the fire-prone conditions with the availability of ignition triggers probably led to the development of local fire-dependent ecosystems.

**Chapter 2:** Adámek, M., Bobek, P., Hadincová, V., Wild, J., Kopecký, M. 2015. **Forest fires within a temperate landscape: a decadal and millennial perspective from a sandstone region in Central Europe.** *Forest Ecology and Management* 336, 81-90

In this study, we asked whether there is the continuous long-term fire history in the sandstone landscape, the Bohemian Switzerland National Park, and whether spatial distribution of recent and ancient wildfires is driven by the same environmental factors. We used a combination of contemporary forestry data from the period of 1974-2008 and pedoanthracological approach to reveal wildfire events in the present-day landscape and in the distant past. As the input data, we used digitalized locations of recent wildfire occurrences and soil probes with measured soil charcoal concentration and GIS layers of topographic factors, forest composition and anthropogenic factors. The time span of analysed ancient wildfires was estimated as ca. 0-3500 years BP by <sup>14</sup>C dating of 14 charcoal particles. The recent wildfire distribution was analysed with all available factors using the ENFA method, the soil charcoal concentration was analysed in relation to temporally stable topographic factors only, using the linear regression. The results of the analyses of soil charcoal concentrations corresponded with contemporary forestry data. The main driving factors affecting the wildfire incidence were topographic features, namely the heat load index and presence of rocks. Additional important factors were forest composition features, especially the abundance of *Pinus sylvestris*. Even though the landscape is populated and attractive to tourists, present-day anthropogenic factors like the proximity of villages, tourist paths and roads had only marginal effects on wildfire occurrence. The results indicate that fires have been occurring in similar fire-prone habitats, namely the elevated rock plateaus and South Western slopes, at least since the Subatlantic period. The vegetation of such sites, which is recently represented mostly by semi-natural *Pinus sylvestris* dominated stands, thus has to be influenced by recurrent wildfires for millennia.

**Chapter 3:** Adámek, M., Hadincová, V., Wild, J. **Long-term effect of wildfires on temperate *Pinus sylvestris* forests: vegetation dynamics and ecosystem resilience.** *Under review in Forest Ecology and Management*

In this study, we focused on semi-natural forests dominated by *Pinus sylvestris* in Central European sandstone regions. We studied the ability of these forests to recover spontaneously after a fire event. Specifically, we observed the development of vegetation composition and diversity, the role of fire severity and the ability of tree species to resist fire, and asked whether wildfires can contribute to the preservation of pine-dominated forests in the region. Our study took a space-for-time substitution approach based on a quantitative analysis of vegetation data collected in spontaneously regenerating burnt forest plots of post-fire age ranging from 1 to 192 years. This time span allowed us to reveal the complete successional

trajectory and to assess how resistant and resilient the forests are to fire in terms of severity of damage and time needed to return to the pre-fire state.

The resistance of the tree layer turned out to be dependent on species composition and fire severity, while even low-severity fires induced great changes in the understorey species composition. All study stands displayed structural and compositional resilience, resulting in fast recovery of the vegetation cover in all stand layers and return to a similar species composition as in pre-fire stands after about 140 years. In early post-fire phases, broad-leaved pioneer species and *Pinus sylvestris* regeneration prevailed, but during stand development, there was a continuous shift towards stands with higher proportional abundance of more shade-tolerant and fire-sensitive tree species. Periodic wildfires occurring at least once in 200 years thus seem to be a factor maintaining forests dominated by *Pinus sylvestris* in temperate sandstone landscapes.

## **Conclusion**

The wildfire occurrence in the cultural landscape of the Czech Republic is driven by both human and natural environmental factors. Environmental factors determine the fire-proneness of a site while the human factors have stronger impact on wildfire frequency. Even in such a densely populated country, the effect of the environment including the lightning density as a potential driver of natural ignitions was not totally overridden by human factors. This result indicates that wildfire occurrence in Central European landscape is subjected to similar rules like in other parts of the world, where fire ecology is a well-established scientific line. However, naturally driven fire-prone conditions are within Central Europe restricted to specific regions. Such conditions encompass namely the prevalence of coniferous forest in lower altitudes and rugged relief forms with drainable soils. When we focus on places where such vegetation occurs more or less naturally, the sandstone landscapes with high proportion of pine forests emerge as a striking example of such fire-prone area. Our study that focused in detail on one of the sandstone regions largely confirmed the results from the country scale and even more emphasized the driving effect of environmental factors on wildfire occurrence in this rugged landscape, which was consistent also across temporal scales. The vegetation field study conducted in pine forests of sandstone regions provided an insight into the mechanism how wildfire can preserve local pine-dominated forests in the long run. These results are comparable with the well-known fire-driven dynamics of Eurasian boreal forests despite different species that interact in these ecosystems. These results indicate that even in temperate Central Europe wildfire can be the important factor shaping forest vegetation in the long-term perspective, at least within certain regions and forest types. When one accepts the human presence, a major source of wildfire ignitions, as a long-term and integral part of Central European landscape, then there is no reason for further marginalization of the wildfire importance for naturally fire-prone ecosystems.

## Literatura / References

- Abraham, V., 2006. Přirozená vegetace a její změny v důsledku kolonizace a lesnického hospodaření v Českém Švýcarsku. Diplomová práce, Univerzita Karlova v Praze.
- Abraham, V., 2014. Palynological synthesis for the Czech Republic. Dissertation Thesis, Charles University in Prague.
- Abrams, M.D., 1992. Fire and the Development of Oak Forests. *Bioscience* 42, 346–353.
- Abrams, M.D., Nowacki, G.J., 2008. Native Americans as active and passive promoters of mast and fruit trees in the eastern USA. *The Holocene* 18, 1123.
- Agee, J.K., 1998. Fire and Pine Ecosystems, in: Richardson, D.M. (Ed.), *Ecology and Biogeography of Pinus*. Cambridge University Press.
- Angelstam, P., Kuuluvainen, T., 2004. Boreal forest disturbance regimes, successional dynamics and landscape structures - a European perspective. *Ecol. Bull.* 117–136.
- Angelstam, P.K., 1998. Maintaining and restoring biodiversity in European boreal forests by developing natural disturbance regimes. *J. Veg. Sci.* 593–602.
- Ascoli, D., Vacchiano, G., Maringer, J., Bovio, G., Conedera, M., 2015. The synchronicity of masting and intermediate severity fire effects favors beech recruitment. *For. Ecol. Manage.* 353, 126–135.
- Avila-Flores, D., Pompa-Garcia, M., Antonio-Nemiga, X., Rodriguez-Trejo, D. a., Vargas-Perez, E., Santillan-Perez, J., 2010. Driving factors for forest fire occurrence in Durango State of Mexico: A geospatial perspective. *Chinese Geogr. Sci.* 20, 491–497.
- Baird, M., Zabowski, D., Everett, R.L., 1999. Wildfire effects on carbon and nitrogen in inland coniferous forests. *Plant Soil* 233–243.
- Bendel, M., Tinner, W., Ammann, B., 2006. Forest dynamics in the Pfyn forest in recent centuries (Valais , Switzerland , Central Alps): interaction of pine (*Pinus sylvestris*) and oak (*Quercus sp.*) under changing land use and fire frequency. *Landsc. Res.* 1, 81–89.
- Bessie, W.C., Johnson, E.A., 1995. The Relative Importance of Fuels and Weather on Fire Behavior in Subalpine Forests 76, 747–762.
- Bobek, P., 2013. Dlouhodobý vliv požárů na složení lesní vegetace, in: Seiler, U., Wild, J., Csaplovics, E. (Eds.), *Historische Waldentwicklung in Der Sachsisch-Bohmischen Schweiz/Historický Vývoj Lesa v Českosaském Švýcarsku*. Rhombos-Verlag, Berlin, pp. 225–244.
- Boerner, R.E.J., 1981. Forest Structure Dynamics Following Wildfire and Prescribed Burning in the New Jersey Pine Barrens. *Am. Midl. Nat.* 105, 321–333.
- Boerner, R.E.J., 1982. Fire and Nutrient Cycling in Temperate Ecosystems. *Bioscience* 32, 187–192.
- Brose, P.H., Dey, D.C., Phillips, R.J., Waldrop, T. a., 2013. A meta-analysis of the fire-oak hypothesis: Does prescribed burning promote oak reproduction in Eastern North America? *For. Sci.* 59, 322–334.
- Cardille, J. a, Ventura, S.J., 2001. Environmental and Social Factors Influencing Wildfires in the Upper Midwest, United States. *Ecol. Appl.* 11, 111–127.
- Clark, J., Merkt, J., 1989. Post-glacial fire, vegetation, and human history on the northern alpine forelands, south-western Germany. *J. Ecol.* 77, 897–925.
- Clark, J.S., Royall, P.D., 1996. The Role of Fire During Climate Change in an Eastern Deciduous Forest at Devil's Bathtub, New York. *Ecology* 77, 2148–2166.
- Corona, P., Ferrari, B., Cartisano, R., Barbati, A., 2014. Calibration assessment of forest flammability potential in Italy. *IForest* 7, 300–305.
- Delarze, R., Caldelari, D., Hainard, P., 1992. Effects of fire on forest dynamics in southern Switzerland. *J. Veg. Sci.* 3, 55–60.
- Díaz-Delgado, R., Lloret, F., Pons, X., 2004. Spatial patterns of fire occurrence in Catalonia, NE, Spain. *Landsc. Ecol.* 19, 731–745.
- Ellenberg, H., 1996. *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht*. No Title. Ulmer, Stuttgart.
- Engelmark, O., 1987. Fire history correlations to forest type and topography in northern Siberia.pdf. *Ann. Bot. Fenn.* 24, 317–324.
- Engelmark, O., 1993. Early Post-Fire Tree Regeneration in a *Picea-Vaccinium* Forest in Northern Sweden. *J. Veg. Sci.* 4, 791–794.
- Falinski, J.B., Falinska, K., 1986. *Vegetation dynamics in temperate lowland primeval forests: ecological studies in Bialowieza Forest*. Dr W Junk Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Fang, L., Yang, J., Zu, J., Li, G., Zhang, J., 2015. Quantifying influences and relative importance of fire weather, topography, and vegetation on fire size and fire severity in a Chinese boreal forest landscape. *For. Ecol. Manage.* 1–11.

- Flatley, W.T., Lafon, C.W., Grissino-Mayer, H.D., 2011. Climatic and topographic controls on patterns of fire in the southern and central Appalachian Mountains, USA. *Landsc. Ecol.* 26, 195–209.
- Futao, G., Su, Z., Wang, G., Sun, L., Lin, F., Liu, A., 2016. Wildfire ignition in the forests of southeast China: Identifying drivers and spatial distribution to predict wildfire likelihood. *Appl. Geogr.* 66, 12–21.
- Gromtsev, A., 2002. Natural Disturbance Dynamics in the Boreal Forests of European Russia : a Review. *Silva Fenn.* 36, 41–55.
- Hirzel, A.H., Hausser, J., Chessel, D., Perrin, N., 2002a. Ecological-niche factor analysis: How to compute habitat-suitability maps without absence data? *Ecology* 83, 2027–2036.
- Hirzel, A., Hausser, J., Perrin, N., 2002b. *Biomapper* 3.1.
- Hoss, J. a., Lafon, C.W., Grissino-Mayer, H.D., Aldrich, S.R., DeWeese, G.G., 2008. Fire History of a Temperate Forest with an Endemic Fire-Dependent Herb. *Phys. Geogr.* 29, 424–441.
- Chytrý, M., 2012. Vegetation of the czech republic: Diversity, ecology, history and dynamics. *Preslia* 84, 427–504.
- Jankovská, Z., 2006. Lesní požáry v ČR (1992-2004) – příčiny, dopady a prevence. Diplomová práce, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně.
- Korpel, Š., 1995. The virgin forests of the western Carpathians. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.
- Krawchuk, M. a., Cumming, S.G., Flannigan, M.D., Wein, R.W., 2006. Biotic and abiotic regulation of lightning fire initiation in the mixedwood boreal forest. *Ecology* 87, 458–468.
- Kula, E., Jankovská, Z., 2013. Forest fires and their causes in the Czech Republic ( 1992 – 2004 ). *J. For. Sci.* 59, 41–53.
- Le Goff, J., 1992. *History and Memory*. Columbia University Press.
- Lecomte, N., Simard, M., Bergeron, Y., Larouche, A., Asnong, H., Richard, P.J.H., 2005. Effects of fire severity and initial tree composition on understorey vegetation dynamics in a boreal landscape inferred from chronosequence and paleoecological data. *J. Veg. Sci.* 16, 665–674.
- Lloret, F., Estevan, H., Vayreda, J., Terradas, J., 2005. Fire regenerative syndromes of forest woody species across fire and climatic gradients. *Oecologia* 146, 461–8.
- Marozas, V., Racinkas, J., Bartkevicius, E., 2007. Dynamics of ground vegetation after surface fires in hemiboreal *Pinus sylvestris* forests. *For. Ecol. Manage.* 250, 47–55.
- Meeker, D.O., Merkel, D.L., 1984. Climax Theories and a Recommendation for Vegetation Classification : A Viewpoint. *J. Range Manag.* 37, 427–430.
- Molinari, C., Lehsten, V., Bradshaw, R.H.W., Power, M.J., Harmand, P., Arneth, A., Kaplan, J.O., Vannière, B., Sykes, M.T., 2013. Exploring potential drivers of European biomass burning over the Holocene: a data-model analysis. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 22, 1248–1260.
- Moreira, F., Rego, F.C., Ferreira, P.G., 2001. Temporal (1958-1995) pattern of change in a cultural landscape of northwestern Portugal: Implications for fire occurrence. *Landsc. Ecol.* 16, 557–567.
- Müller, M.M., Vacík, H., Diendorfer, G., Arpacı, A., Formayer, H., Gossow, H., 2013. Analysis of lightning-induced forest fires in Austria. *Theor. Appl. Climatol.* 111, 183–193.
- Niklasson, M., Granström, A., 2000. Numbers and Sizes of Fires: Long-Term Spatially Explicit Fire History in a Swedish Boreal Landscape.pdf. *Ecology* 81, 1484–1499.
- Niklasson, M., Zin, E., Zielonka, T., Feijen, M., 2010. A 350-year tree-ring fire record from Białowieża Primeval Forest, Poland: implications for Central European lowland fire history. *J. Ecol.* 98, 1319–1329.
- Novák, J., Sadlo, J., Svobodova-Svitavska, H., 2012. Unusual vegetation stability in a lowland pine forest area (Doksy region, Czech Republic). *The Holocene* 22, 947–955.
- Odion, D.C., Frost, E.J., Strittholt, J.R., Jiang, H., Dellasala, D.A., Moritz, M.A., 2004. Patterns of fire severity and forest conditions in the western Klamath mountains, California. *Conserv. Biol.* 18, 927–936.
- Parisien, M.A., Parks, S.A., Krawchuk, M.A., Flannigan, M.D., Bowman, L.M., Moritz, M.A., 2011. Scale-dependent controls on the area burned in the boreal forest of Canada, 1980-2005. *Ecol. Appl.* 21, 789–805.
- Pausas, J.G., Vallejo, V.R., 1999. The role of fire in European Mediterranean Ecosystems, in: Chuvieco, E. (Ed.), *Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin*. Springer-Verlag, pp. 3–16.
- Peel, M.C., Finlayson, B.L., McMahon, T.A., 2006. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Meteorol. Zeitschrift* 15, 259–263.
- Pew, K., Larsen, C.P., 2001. GIS analysis of spatial and temporal patterns of human-caused wildfires in the temperate rain forest of Vancouver Island, Canada. *For. Ecol. Manage.* 140, 1–18.
- Podur, J., Martell, D.L., Csillag, F., 2003. Spatial patterns of lightning-caused forest fires in Ontario, 1976-1998. *Ecol. Modell.* 164, 1–20.
- Pokorný, P., Kuneš, P., 2005. Holocene acidification process recorded in three pollen profiles from Czech sandstone and river terrace environments. *Ferrantia* 44, 101–107.
- Rogers, B.M., Soja, A.J., Goulden, M.L., Randerson, J.T., 2015. Influence of tree species on continental differences in boreal fires and climate feedbacks. *Nat. Geosci.* 8, 228–234.



- Scheller, R.M., van Tuyl, S., Clark, K.L., Hom, J., La Puma, I., 2011. Carbon Sequestration in the New Jersey Pine Barrens Under Different Scenarios of Fire Management. *Ecosystems* 14, 987–1004.
- Sinton, D.S., Jones, J.A., Ohmann, J.L., Swanson, F.J., 2000. Windthrow Disturbance, Forest Composition, and Structure in the Bull Run Basin, Oregon. *Ecology* 81, 2539–2556.
- Skre, O., Wielgolanski, F.E., Moe, B., 1998. Biomass and chemical composition of common forest plants in response to fire in western Norway. *J. Veg. Sci.* 501–510.
- Splechtna, B.E., Gratzner, G., Black, B.A., 2005. Disturbance history of a European old-growth mixed-species forest—A spatial dendro-ecological analysis. *J. Veg. Sci.* 16, 511–522.
- Stahli, M., Finsinger, W., Tinner, W., Allgower, B., 2006. Wildfire history and fire ecology of the Swiss National Park (Central Alps): new evidence from charcoal, pollen and plant macrofossils. *The Holocene* 16, 805–817.
- Sturtevant, B.R., Zollner, P.A., Gustafson, E.J., Cleland, D.T., 2004. Human influence on the abundance and connectivity of high-risk fuels in mixed forests of northern Wisconsin, USA. *Landscape Ecol.* 19, 235–254.
- Tanskanen, H., 2007. Fuel conditions and fire behavior characteristics of managed *Picea abies* and *Pinus sylvestris* forests in Finland, *Dissertationes Forestales*, University of Helsinki.
- Tinner, W., Conedera, M., Ammann, B., Lotter, F., Bern, C., 2005. Fire ecology north and south of the Alps since the last ice age. *The Holocene* 8, 1214–1226.
- Tinner, W., Hubschmid, P., Wehrli, M., Ammann, B., Conedera, M., 1999. Long-term forest fire ecology and dynamics in southern Switzerland. *J. Ecol.* 87, 273–289.
- Uotila, A., Hotanen, J.-P., Kouki, J., 2005. Succession of understory vegetation in managed and seminatural Scots pine forests in eastern Finland and Russian Karelia. *Can. J. For. Res.* 35, 1422–1441.
- Valese, E., Conedera, M., Held, A.C., Ascoli, D., 2014. Fire, humans and landscape in the European Alpine region during the Holocene. *Anthropocene* 6, 63–74.
- Vanni re, B., Colombaroli, D., Chapron, E., Leroux, A., Tinner, W., Magny, M., 2008. Climate versus human-driven fire regimes in Mediterranean landscapes: the Holocene record of Lago dell’Accesa (Tuscany, Italy). *Quat. Sci. Rev.* 27, 1181–1196.
- Weisberg, P.J., 2004. Importance of non-stand-replacing fire for development of forest structure in the Pacific Northwest, USA. *For. Sci.* 50, 245–258.
- Yang, J., He, H.S., Shifley, S.R., Gustafson, E.J., 2007. Spatial patterns of modern period human-caused fire occurrence in the Missouri Ozark Highlands. *For. Sci.* 53, 1–15.
- Zin, E., Drobyshev, I., Bernacki, D., Niklasson, M., 2015. Dendrochronological reconstruction reveals a mixed-intensity fire regime in *Pinus sylvestris*-dominated stands of Bialowieza Forest, Belarus and Poland. *J. Veg. Sci.* 26, 934–945.
- Zumbrunnen, T., Men endez, P., Bugmann, H., Conedera, M., Gimmi, U., B urgi, M., 2012. Human impacts on fire occurrence: A case study of hundred years of forest fires in a dry alpine valley in Switzerland. *Reg. Environ. Chang.* 12, 935–949.

## **Martin Adámek**

Born: 20<sup>th</sup> April 1982, Praha

### **Education:**

2007-2016: Graduate study: Charles University in Prague, Faculty of Science, Botany.

2001-2007: Undergraduate study: Charles University in Prague, Faculty of Science, Geobotany. Master thesis: Vegetation changes of the meadows of the Žebrákovský potok basin after 30 years.

### **Employment:**

2014-2016: Researcher, Institute of Botany of the ASCR, Průhonice, Department of GIS and Remote Sensing. Project: Fire in postglacial Central Europe: neglected historical and present effect in forest dynamics.

2009-2014: Researcher, Institute of Botany of the ASCR, Průhonice, Department of GIS and Remote Sensing. Project: Cíl 3/ Ziel 3: Historical Forest Development. Spatial historical information as a basis for the management and development of semi-natural forests in the Saxon-Bohemian Switzerland.

2008-2011: GIS technician, Institute of Botany of the ASCR, Průhonice, Department of GIS and Remote Sensing. Project: Invasion by *Heracleum mantegazzianum*: the role of time and spatial scales.

### **International conferences**

2015: IAVS Brno, Czech Republic. Presentation: Long-term effect of wildfire on temperate Scots pine forests: vegetation dynamics and ecosystem resilience. Authors: M. Adámek, V. Hadincová.

2014: 9th European Conference on Ecological Restoration, Oulu, Finland. Presentation: Wildfire in Central European sandstone landscape: effect on long-term forest vegetation development. Authors: M. Adámek & V. Hadincová.

2012: Sandstone Landscapes III. Kudowa Zdrój, Poland. Poster "Wildfire in Bohemian Switzerland NP (Czech Republic): frequency, distribution and the impact on forest vegetation". Authors: Martin Adámek, Věroslava Hadincová.

2012: ECER 2012 The 8th European Conference on Ecological Restoration, České Budějovice, Czech Republic. Poster "Wildfire in Bohemian Switzerland NP (Czech Republic): frequency, distribution and the impact on forest vegetation". Authors: Martin Adámek, Věroslava Hadincová.

2012: Final Meeting of the Ziel3/Cíl3 Project "Historische Waldentwcklung - Historický rozvoj lesa", Bad Schandau, Germany. Presentation: Vliv lesních požárů na vývoj lesa / Effect of wildfires on the forest development.

2011: BES Annual Symposium 2011: Forests and Global Change. University of Cambridge, UK. Poster: "Wildfire in Bohemian Switzerland NP (Czech Republic): long-term dynamics and the impact on forest vegetation". Authors: M. Adámek, P. Bobek, V. Hadincová.

2011: 10th meeting on vegetation databases: Vegetation databases and spatial analysis, Freising, Germany. Poster: "Wildfire in Bohemian Switzerland NP (Czech Republic): long-term dynamics and the impact on forest vegetation". Authors: Martin Adámek, Přemysl Bobek, Věroslava Hadincová.

2008: 7th workshop on vegetation databases, University of Oldenburg, Germany. Poster: "Vegetation changes in wet meadows in Bohemian uplands after 30 years". Authors: M. Adámek, V. Hadincová.

### Research grants

2014-2016: GAČR Fire in postglacial Central Europe: neglected historical and present effect in forest dynamics. Applicant Jan Wild.

2009-2011: GAUK Dynamika lesních požárů v pískovcových oblastech Čech a její vliv na současnou vegetaci. Applicant Přemysl Bobek.

### Teaching

2010-2015: Field course in botany, Dobronice.

2012-2015: Morfologie rostlin – praktika / Morphology of plants – practice course

2012-2015: Botanika cévnatých rostlin – praktika / Botany of vascular plants – practice course

2013-2014: Ecological-floristic field excursions

### Supervised students

Monika Šmidrkalová (konsultant), Karolína Pánková (supervisor, Bc.)

### Publications

Prach K., Tichý L., Lencová K., **Adámek M.**, Koutecký T., Sádlo J., Bartošová A., Novák J., Kovář P., Jírová A., Šmilauer P., Řehouňková K. (2016): Does succession run towards potential natural vegetation? An analysis across seres. *Journal of Vegetation Science* 02/2016; 27(3).

**Adámek M.**, Bobek P., Hadincová V., Wild J., Kopecký M. (2015): Forest fires within a temperate landscape: A decadal and millennial perspective from a sandstone region in Central Europe (2015): *Forest Ecology and Management* 01/2015; 336.

**Adámek M.**, Hadincová V., Wild J., Bobek P., Kopecký M. (2013): Faktory ovlivňující výskyt lesních požárů a predikce požárového rizika na území NP České Švýcarsko / Factors influencing the occurrence of forest fires and fire risk prediction in the Bohemian Switzerland National Park, in: Seiler U., Wild J., Csaplovics E. (Eds.), *Historische Waldentwicklung in Der Sachsisch-Bohmischen Schweiz/Historický Vývoj Lesa v Českosaském Švýcarsku*. Rhombos-Verlag, Berlin, pp. 225–244.

Marková I., **Adámek M.**, Antonín V., Benda P., Jurek V., Trochta J., Švejnhová A., Šteflová D. (2011): Havraní skála u Jetřichovic v národním parku České Švýcarsko: vývoj flóry a fauny na ploše zasažené požárem. *Ochrana přírody* 66(1): 18-21.

Černý T., Petřík P., Boublík K., Kolbek J., **Adámek M.** (2011): Vegetation with *Gagea bohemica* in the landscape context. *Plant Biosystems* 09/2011; 145(3):1-14.