

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra pěstování lesů



Struktura a vývoj autochtonních porostů s dominantním bukem lesním ve
východních Krkonoších

Disertační práce

Autor: Ing. Václav Šimůnek

Školitel: prof. RNDr. Stanislav Vacek, DrSc.

Praha

2021

Czech University of Life Sciences Prague

Faculty of Forestry and Wood Sciences

Department of Silviculture



Structure and Development of Autochthonous Stands with Dominant
European Beech in Eastern Krkonoše Mts.

Ph.D. Thesis

Author: Ing. Václav Šimůnek

Supervisor: prof. RNDr. Stanislav Vacek, DrSc.

Prague

2021

"Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma Struktura a vývoj autochtonních porostů s dominantním bukem lesním ve východních Krkonoších vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací a doporučení školitele.

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

V Praze dne 5. 12. 2021

Podpis autora

Poděkování

Velmi děkuji školiteli prof. RNDr. Stanislavu Vackovi, DrSc. za pomoc a pochopení při zpracování a zhotovení této disertační práce. Děkuji také Ing. Zdeňku Vackovi Ph.D. a celé katedře Pěstování lesů za významnou pomoc při tvorbě vědeckých publikací. Důležitou oporou při tvorbě disertační práce také byla má rodina, která mě podporovala ve vědeckém bádání a studiu.

Abstrakt

Tato studie popisuje strukturu a vývoj jedné z nejdůležitějších dřevin, která v posledních letech nahrazuje velkou část jehličnatých lesů v České republice. Tato práce hodnotí cíle zaměřené na strukturu a vývoj buku lesního (*Fagus sylvatica* L.) ve východních Krkonoších ve vztahu k úhrnům srážek, teplotám vzduchu a sluneční aktivitě. Hodnocen je i vliv imisní zátěže z 70. a 80. let minulého století. V této práci jsou pro porovnání také obsaženy studie o radiálním přírůstu buku lesního z oblasti Broumovských stěn nebo i z mediteránu z jižní Itálie. V této práci jsou porovnány i vlivy klimatických výkyvů na lesní hospodářství ve vztahu k celkovým, nahodilým listnatým nebo jehličnatým těžbám. Tato studie hodnotí celkem 340 dendrochronologických vzorků na 10 výzkumných plochách, z toho jsou dvě výzkumné plochy v jižní Itálii, 7 výzkumných ploch v Krkonoších a 1 plocha na Broumovsku. V této práci byla změřena a popsána i struktura bukových porostů, které jsou hodnoceny v reakci na klimatické podmínky. Radiální růst buku lesního ve východních Krkonoších nejvíce reaguje na sluneční cyklus, poté na teploty a následně na úhrn srážek. Výsledky dále ukazují, že homogenní bukové porosty reagují více na klimatické výkyvy než strukturálně heterogenní porosty. V této práci byl také porovnán radiální přírůst homogenních porostů buku lesního s výzkumnými plochami v jižní Itálii, kde byl zaznamenán zrcadlově opačný radiální přírůst porostů než v Krkonoších. Spektrální analýzy radiálního přírůstu ukazují, že buk lesní cyklicky vykazuje 4 až 7leté, 9 až 12leté a 17 až 35leté cykly. Radiální růst buku tvoří rozpětí 7,5 až 11leté cykly, což právě tvoří kombinaci mezi cykly sezonních teplot a sluneční aktivity. Analýza klimatických podmínek ve vztahu k těžbám dříví v České republice ukázala průnik se slunečním cyklem a ročními teplotami vzduchu, nicméně těžba dříví reaguje na klimatické a antropogenní vlivy. Celková těžba dřeva vykazuje nejvyšší korelace s průměrnými ročními teplotami, naproti tomu nahodilé těžby nejvíce korelují se slunečními cykly. Zároveň byla v posledních letech zaznamenána větší souběžnost nahodilých těžeb s 11letým slunečním cyklem. Spektrální analýzy dat ukazují, že sluneční 11letý cyklus se také projevuje i u listnatých těžeb a tento cyklický jev se projevuje i u procentuálního střídání jehličnatých a listnatých těžeb. Poznatky z této disertační práce by měly sloužit jako podklad pro další výzkum a zároveň by mohly pomoci lesnickému managementu pochopit cyklické výkyvy přírodních podmínek. Správný popis cyklických událostí v lesnictví by mohl v budoucnu lépe reagovat na klimatické změny.

Klíčová slova: buk lesní (*Fagus sylvatica* L.), radiální přírůst, srážky, teploty, bukové porosty, lesnický management, sluneční cyklus, cykly

Abstract

This study describes the structure and development of one of the most important tree species, which in recent years has replaced a large part of coniferous forests in the Czech Republic. This dissertation evaluates the aims which are structure and development of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in the eastern Giant Mountains (Krkonoše) in relation to precipitation, air temperatures and solar activity. The influence of the air pollution load from the time period in 1970s and 1980s is also evaluated. This work also includes for comparing studies of the radial growth of European beech from the Broumovské stěny or from the Mediterranean area in southern Italy. This research compares the effects of climatic fluctuations on forestry in relation to total timber harvest and salvage, deciduous or coniferous logging. This study evaluates a total of 340 dendrochronological samples in 10 research plots. Two research plots are in southern Italy, 7 research areas in the Giant Mountains and 1 research plot is in the Broumov region. The structure of beech stands was measured and described, which are evaluated in response to climatic conditions. The radial growth of beech in the eastern Giant Mountains is most responsive to the solar cycle, then to temperatures and then to total precipitation. The results further show that homogeneous beech stands respond more to climatic fluctuations than structurally heterogeneous stands. This work compared the radial growth of homogeneous beech stands with research plots in southern Italy and Giant Mountains. The mirror effect of the opposite radial growth was recorded than in the Giant Mountains in compare to southern Italy. Spectral analyses of radial growth show that beech forest radial growth indicates 4- to 7-year, 9- to 12-year, and 17- to 35-year cycles. The radial growth of beech cyclically exhibits a combination of air temperature and solar cycles, with is 7.5- to 11-year cycles. activities. The analysis of climatic conditions in relation to timber harvest and salvage logging in the Czech Republic showed the common course between the solar cycle and annual air temperatures. However, the timber harvest and salvage logging respond to climatic, anthropogenic, and political influences. Total timber harvest shows the highest correlations with average annual temperatures, while salvage logging correlates more with solar cycles. At the same time, in recent years, there has been a greater prevalence of salvage logging with an 11-year solar cycle. Spectral analysis of the data show that the solar 11-year cycles are also reflected in deciduous logging, and this cyclical phenomenon is also reflected in the percentage alternation of coniferous and deciduous logging. The findings from this dissertation should serve as a basis for further research and it can be used by forest management to understand cyclical fluctuations in natural conditions. A correct description of cyclical events in forestry could improve reaction against climate change.

Keywords: European beech (*Fagus sylvatica* L.), radial growth, precipitation, temperature, forest management, solar cycle, cycles

Obsah:

1. Úvod	9
2. Cíl práce.....	11
3. Rozbor problematiky	12
3.1. Ekologie buku lesního	12
3.2. Typy bučin v České republice	13
3.3. Struktura a vývoj bukových porostů	14
3.4. Postglaciální migrace buku lesního	15
3.5. Rozšíření buku lesního během klimatické změny	17
3.6. Faktory ovlivňující radiální přírůst buku	17
3.6.1. Přírůst buku ve vztahu k teplotám a srážkám.....	18
3.6.2. Sluneční cyklus a jeho možný dopad na růst buku lesního.....	19
3.7. Obhospodařování přírodě blízkých bukových lesů.....	21
3.8. Lesní hospodářství během klimatické změny nebo pod vlivem slunečního cyklu.....	22
4. Metodika.....	25
4.1. Charakteristika zkoumaného území	25
4.1.1. Popis zkoumané oblasti Krkonoš a Podkrkonoší	25
4.1.2. Popis zkoumané oblasti jižní Itálie.....	26
4.1.3. Popis lesních porostů v České republice	26
4.2. Sběr a získávání dat	27
4.3. Analýza dat	28
4.3.1. Indexy struktury	28
4.3.2. Základní analýza dendrochronologických dat.....	29
4.3.3. Zpracování dat.....	30
5. Výsledky	31
5.1. Tematický okruh 1: Struktura a dendrochronologický vývoj bukových porostů	32
5.1.1. Růstová variabilita přirozených porostů buku lesního: Dendroklimatická studie z Krkonošského národního parku.	32
5.1.2. Plocha slunečních skvrn jako neprozkoumaný trend v radiálním růstu buku lesního v Krkonoších: lesnická věda z jiné perspektivy	44
5.1.3. Sluneční cykly jako základní faktor ovlivňující přirozenou dynamiku porostů	62
5.1.4. Letokruhy buku lesního naznačují souvislosti s průběhem slunečních cyklů během klimatické změny ve střední a jižní Evropě	74
5.1.5. Otisky slunečních a klimatických cyklů v letokruzích buku lesního	96

5.2. Tematický okruh 2: Lesnický management pod vlivem klimatických vlivů.....	108
5.2.1. Sluneční cykly v nahodilé těžbě: Data z České republiky potvrzují statisticky významnou korelaci	108
5.2.2. Vztahy těžby listnatých a jehličnatých dřevin dle slunečních cyklů.....	131
6. Diskuse	140
6.1. Reakce bukových porostů na klimatické podmínky srážek a teplot	140
6.1.2. Struktura bukových porostů a jejich reakce na srážky a teploty	141
6.2. Sluneční cyklus v radiálním růstu buku lesního	141
6.2.1. Sluneční aktivita a její klimatická vazba na buk	142
6.3. Přírozené cykly radiálního růstu buku lesního	143
6.4. Klimatické výkyvy a změna druhové skladby ve prospěch buku?	144
6.3.1. Dopad nahodilých těžeb na management pěstování listnatých dřevin v souběhu se slunečním cyklem.....	145
7. Závěr a doporučení pro praxi.....	148
8. Seznam literatury a použitých zdrojů	150
9. Seznam obrázků.....	167
10. Seznam tabulek.....	167
11. Seznam zkratk.....	167

1. Úvod

Rýchory jsou jednou z méně známých částí Krkonoš, kde se nachází unikátní bukové porosty, které zasahují od 700 do 1050 m nad mořem. Z dlouhodobého hlediska je tato oblast významnou lokalitou pro dlouhodobé zkoumání antropogenních a klimatických vlivů na horské bukové porosty. V Krkonošském národním parku byla také zaznamenána v 70. a 80. letech minulého století významná imisní kalamita, která ovlivnila vývoj bukových porostů. Toto území má velkou vědeckou a přírodní hodnotu z hlediska přirozeného rozšíření bukových porostů do nejvýše položených území v ČR.

Již na počátku 20. století začaly v Evropě vznikat první národní parky, ve kterých byl stále více preferován ekologický přístup k lesu, což vedlo k většímu zájmu o přírodě blízké pěstování lesa (Hahn & Fanta 2001, Christensen et al. 2005). Bukové lesy byly využívány od 17. do 19. století jako zdroj krmiva pro dobytek v podobě bukovic a často v nich byla praktikována i lesní pastva (Nožička 1957). Po mnoho století byly bukové porosty využívány také pro zdroj palivového dříví a k výrobě dřevěného uhlí (Peters 1997). K výrazným antropogenním vlivům posledních let na lesní porosty patří synergický dopad znečištění ovzduší a klimatického stresu (Bytnerowicz et al. 2007, Vacek et al. 2013a, Vacek et al. 2015a).

Po druhé světové válce s rozvojem průmyslu a nárůstem emisí došlo k prvnímu patrnému velkoplošnému poškození lesních porostů v ČR (Materna 1989). Následně nejvýznamnější imisní zatížení způsobené vysokými koncentracemi SO₂ bylo v Krkonoších zaznamenáno v 70. až 90. letech 20. století (Vacek et al. 2013b). Od 90. let je jako problém vnímáno také znečištění ovzduší NO_x a O₃ (Hůnová & Schreiberová 2012, Vacek et al. 2017). Vzhledem k historickému vlivu člověka bylo zjištěno, že 85 % porostů buku se vyvíjelo v obnovních cyklech od 15 do 25 let, kdy docházelo ke kvalitní přirozené obnově v podúrovni mateřského porostu (Schütz 2001).

Z hlediska celorepublikové druhové skladby lesů bude hrát buk lesní (*Fagus sylvatica* L.) významnější roli než nyní. Klimatická změna se projevuje velkými kalamitami ve smrkových porostech a ostatních jehličnanech, což má za následek velkoplošný rozpad lesních porostů. Tím dochází k vyššímu prosazování bukových porostů při obnově lesa, kdy zastoupení buku se zvýšilo od roku 2000 o 2,8 % z 6 % na 8,8 % (MZe 2020). Buk je velmi ekologicky plastickou dřevinou a jeho reakce na klimatickou změnu je mnohem příznivější než u smrku ztepilého, což z něj dělá právě ideálního nástupce za smrkové porosty. Z hlediska významných klimatických výkyvů vykazují bukové porosty větší stabilitu a odolnost vůči nedostatku vody, než je tomu u smrku ztepilého (*Picea abies* /L./ Karst.) – (Dittmar et al. 2003a, Zang et al. 2011, Zang et al. 2014, Hartl-Meier et al. 2018). Bukové porosty vykazují lepší schopnost přirozeného zmalení než smrkové porosty, a také se dokáží lépe adaptovat na imisní kalamitu, která je dobře známá z období 70. až 90. let 20. století (Slanař et al. 2017).

Buk lesní se tak postupně stává částečnou náhradou za plošně odumírající smrk ztepilý (Lindner et al. 2010). Některé studie však dokládají i citlivost buku k dlouhotrvajícímu suchu (Geßler et al. 2007, Granier et al. 2007), kdy bučiny na Rýchorách a v okolních pohořích mohou trpět na jarními mrazy nebo suchem (Vacek et al. 2012, Králíček et al. 2017, Vacek et al. 2019a). V reakci na negativní události mohou bukové porosty zvýšit frekvenci semenných let a tím se lépe adaptovat na klimatickou změnu (Övergaard 2010). Ovlivněny jsou také růstové procesy této dřeviny, kdy se zvyšujícím se suchem v nižších oblastech narůstá mortalita a zároveň tento jev místy vede ke zkrácení délky životního cyklu buku (Filippo et al. 2012a).

Radiální růst buku lesního je podstatně ovlivněn přírodními faktory a antropogenními vlivy jako jsou srážky nebo teplota vzduchu (Stjepanović et al. 2018, Tognetti et al. 2019), hospodařením v lesích (Remeš et al. 2015, Vacek et al. 2015c, Mausolf et al. 2018) nebo znečištěním ovzduší (Špulák & Souček 2010). Na růst buku lesního může mít významný nepřímý vliv dokonce i sluneční aktivita, která se může odvodit z cyklu slunečních skvrn, které jsou úzce spojeny s dalšími solárními jevy jako jsou kosmická radiace, sluneční záření, sluneční vítr, tok rádiových vln nebo sluneční erupce (Usoskin 2017). Všechny tyto zmíněné sluneční faktory jsou poháněny slunečním magnetickým polem, které významně ovlivňuje zemské klima po celá milénia (Abbott & Juhl 2016, Le Mouél et al. 2019).

Tato disertační práce se zabývá potenciálem cyklického vývoje heterogenních a homogenních porostů buku lesního (*Fagus sylvatica* L.) ponechaných samovolnému vývoji. Tato práce hodnotí vliv slunečních cyklů, teplot vzduchu, úhrnů srážek a imisní zátěže na radiální přírůst buku lesního ve východních Krkonoších. Tato studie popisuje vztahy mezi letokruhovými řadami různých porostů buku lesního pro různá časová období od hospodaření v lesních porostech k období imisní zátěže a končí obdobím samovolného vývoje po založení Krkonošského národního parku. Pro celkové shrnutí vývoje bučin v Krkonoších s klimatickou změnou také nechybí porovnání s porosty z Itálie. Poznatky o vývoji buku lesního během klimatické změny budou v této disertaci porovnány se základními výstupy z lesnického managementu.

2. Cíl práce

Cílem této disertační práce je získat nové poznatky o struktuře a vývoji bukových porostů na východě Krkonoš. Jednotlivé dílčí cíle jsou uspořádány tak, aby bylo možné sestavit a popsat vliv jednotlivých faktorů, které ovlivňují bukové porosty a jejich stadia vývoje během klimatické změny. Jednotlivé faktory, které ovlivňují radiální přírůst buku jsou následně použity pro analýzu managementu lesního hospodářství. Tato disertační práce následně může určit vlivy, které jsou významné pro vývoj bukových porostů a zároveň jsou významné pro lesnický management a jeho budoucí vývoj. Dílčí cíle jsou následující:

1. Získání poznatků o **vývoji a struktuře homogenních a heterogenních bukových porostů během klimatické změny**. Tento cíl hodnotí aktuální stav bukových porostů na výzkumných plochách tak, aby bylo možné jednotlivé porosty buku lesního rozřadit od homogenních bučin (jedno etážové porosty s normálním rozdělením tloušťkových tříd) po heterogenní bučiny (různověké tloušťkově, výškově a strukturně rozrůzněné porosty).

2. Získat a popsat **dendrochronologický vývoj studovaných porostů**. Na základě předchozích terénních šetření jsou odebrány dendrochronologické vzorky ze všech studovaných výzkumných ploch. Vzorky jsou odebrány tak, aby dendrochronologické řady statisticky významně popisovaly historický vývoj jednotlivých stanovišť v čase.

3. Dendrochronologické analýzy jsou následně použity pro **zhodnocení radiálního růstu buku ve vztahu ke klimatu (srážky a teploty)**. Tento bod vysvětluje reakci bučin na změnu teplot vzduchu a změnu v úhrnech srážek.

4. Dalším bodem je **zhodnocení radiálního růstu buku ve vztahu k imisnímu zatížení**. Tento bod slouží ke krátkodobému určení jedné z nejvíce ničujících období pro bukové porosty na Rýchorách. Tento bod popisuje složité období růstu buku lesního, kdy došlo k nejnižšímu radiálnímu růstu způsobenému imisní zátěží.

5. Následný dílčí bod popisuje méně známé zhodnocení **radiálního růstu buku ve vztahu k sluneční aktivitě**, která není příliš hodnocena v lesním hospodářství. Tento bod počítá s proměnlivým vývojem sluneční aktivity, která se může projevit i v různých klimatických datech jednotlivými nebo i menšími dílčími cykly.

6. Poslední cíl hodnotí **možnost využití získaných poznatků v lesnickém managementu**. Tento bod by měl spojit získané poznatky této disertace a předat je pro možné využití v lesnickém managementu.

3. Rozbor problematiky

3.1. Ekologie buku lesního

Buk lesní je stín snášející dřevina, která vytváří silný zástin půdního povrchu. Při prosvětlení buk rychle roste, ale ve velmi hustém zástinu tvoří nekvalitní kmeny (Dobrovolný & Tesař 2010). Ve střední Evropě buk prosperuje díky humidnímu klimatu, které se vyznačuje srážkami okolo 1000 mm a roční průměrnou teplotou okolo 10 °C, kdy klimatickou bariérou této dřeviny je suché letní počasí (Zang et al. 2014) nebo výrazné jarní mrazy (Roibu et al. 2017). V podmínkách České republiky buk lesní dosahuje do horských poloh, kde dokáže růst i okolo nadmořské výšky 1050 m (Vacek & Hejcman 2012). V optimálních růstových podmínkách dosahují porosty buku i přes 40 m výšky, ale tyto hodnoty patří mezi maximální (Vacek et al. 2010b).

Buk lesní se v porovnání se smrkem ztepilým projevuje i svojí meliorační a zpevňující funkcí (Dorado-Liñán et al. 2019). Buk má bohatý opad listí oproti smrku, díky kterému se vytváří dobré půdní vlhkostní podmínky. Půdy pod bukovým porostem lépe podporují rozklad organických zbytků díky většímu provzdušnění horních půdních horizontů. Bučiny také zlepšují acidifikaci půd a jsou doporučovány pro meliorační schopnosti na lokality poškozené imisní zátěží. Díky hustému srdčitému až kulovitému kořenovému systému buk lesní lépe odolává bořivým větrům (Kacálek et al. 2017). Tato dřevina by v minulosti dokázala dobře odolávat imisní zátěži, která se projevila ve snížení schopnosti tvorby přirozeného zmlazení (Vacek et al. 2015b). Tento strom je také velmi dobrou dřevinou pro výživu zvěře z hlediska úživnosti honitby pomocí tvorby bukvic, ale s vysokým tlakem zvěře bohužel může docházet i k poškozování hlavního terminálního výhonu, což může vést k znehodnocení obnovy porostů (Vacek et al. 2021).

Buk lesní má indiferentní nároky na půdní podmínky. Roste na lokalitách od chudých kyselých půd až po krátkodobě vodou ovlivněná stanoviště. Nicméně buk neprosperuje na jílech, bažinách nebo písčitých půdách. Bukové porosty nejlépe prosperují v humosních půdních podmínkách nebo na vápencových lokalitách. Příznivé růstové podmínky pro buk se nachází od oligotrofní po kalcifilní řady, ve kterých se také dobře přirozeně obnovuje. Nejlépe se daří buku lesnímu na mezotrofní edafické řadě (Barna et al. 2011b). Optimální vlhkostní podmínky pro buk jsou od 4. lesního vegetačního stupně výše (Barna et al. 2011a). V horských a podhorských oblastech jsou pro buk optimální růstové podmínky, kde se tvoří čisté bučiny nebo smíšené porosty s hercynskou směsí s jedlí bělokorou (*Abies alba* Mill.) a se smrkem ztepilým (Poleno et al. 2011, Vacek et al. 2021).

3.2. Typy bučin v České republice

V České republice se dle soustavy Natura 2000 bukové porosty člení na čtyři základní kategorie, které charakterizují jejich ekologickou a národní hodnotu. Předmětem této klasifikace je popis a ochrana vybraných přírodních biotopů, které popisují rostliny i živočichy. Tyto biotopy jsou popsány z legislativního hlediska, a proto k nim jsou také přiřazené identifikovatelné číselné kódy. Biotopy zahrnující bučiny jsou následující:

L5.1 květnaté bučiny (*Asperulo-Fagetum*),

L5.2 horské klenové bučiny (*Acerenion*),

L5.3 vápencové středoevropské bučiny (*Cephalanthero-Fagion*),

L5.4 acidofilní bučiny (*Luzulo-Fagetum*) - (Chytrý et al. 2010).

Květnaté bučiny (*Asperulo-Fagetum*) jsou nejrozšířenější bukový biotop, který pochází z centrálních Karpat. Tyto bukové porosty patří do mezotrofních až eutrofních smíšených jedlových bučin. Ekologické optimum představují na hlubokých kambizemích s příznivými vlastnostmi humifikačních a vodních procesů (Jurko & Kubíček 1974). Nejvíce je v tomto biotopu zastoupen buk lesní a dále pak je přítomen jasan ztepilý (*Fraxinus excelsior* L.), habr obecný (*Carpinus betulus* L.), lípa srdčitá (*Tilia cordata* Mill.), jilm horský (*Ulmus glabra* Huds.), dub zimní (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.), jedle bělokorá, smrk ztepilý a jiné. Floristicky je tento biotop chudší až středně bohatý na bylinné patro. Při silném korunovém zápoji se hromadí listový opad a ten může způsobit nízkou pokryvnost bylinného patra. Tento biotop může být ohrožen změnou dřevinné skladby z bučin na smrkové monokultury (Barna et al. 2011a, Vacek et al. 2019a).

Horské klenové bučiny (*Acerenion*) jsou vysoko bylinné javorové bučiny, které jsou spojované s kamenitými až balvanitými sutěmi v hřebenovitých až balvanitých svahových partiích (Vacek et al. 2015b). Tyto bučiny se nachází na minerálně bohatších půdách s dostatkem vláhy a s vyšším množstvím skeletu. Stromové patro se vyznačuje biodiverzitou, kdy je na těchto stanovištích přítomen hlavně buk lesní a javor klen. Dále se vyskytuje v menší míře jilm horský nebo jedle bělokorá a ve vyšších nadmořských výškách i smrk ztepilý. Floristicky jsou tyto bučiny rozmanité a vystupují až do horských poloh (Barna et al. 2011a, Vacek et al. 2014b). Tyto bučiny se vyskytují i na návětrných svazích a jsou typické dobrou dekompozicí organické hmoty (Chytrý et al. 2010).

Vápencové středoevropské bučiny (*Cephalanthero-Fagion*) se vyskytují na bohatých minerálně silných karbonátových horninách. Hlavním půdním typem je rendzina nebo skeletovitá rendzina. Dřevinná skladba se skládá hlavně z buku lesního, ale jsou zde přítomné i dřeviny jako javor klen, javor mléč, lípa srdčitá, habr obecný a další (Wolfgang 2002, Vacek et al. 2018). Tyto bučiny se nachází na lokalitách s menším sklonem a jsou zde typické hlubší

půdy, kdy tyto porosty mají tendenci přecházet do květnatých bučin (Barna et al. 2011a). Půdy v tomto biotopu mají spíše vysychavý svahový charakter a porosty se nachází spíše na menší územní rozloze (Chytrý et al. 2010).

Acidofilní bučiny (*Luzulo-Fagetum*) jsou smíšené acidofilní lesy, které mají chladnější a vlhčí mikroklima. Tyto bučiny představují hlavní klimaxovou vegetaci na minerálně chudších horninách, jako jsou křemence, žuly, ruly, fylity a jiné. Tyto bučiny se vyvinuly na kyselých půdách se zvýšeným obsahem skeletu a dochází zde k pomalé mineralizaci organických látek (Gärtner & Reif 2004). Floristicky reprezentují chudší společenstva rostlin s hlavním zastoupením buku lesního (Barna et al. 2011a). Dřevinná skladba těchto bučin bývá spojena s příměsí dubu zimního, lípy srdčité nebo jedle bělokoré se smrkem ztepilým. Acidofilní bučiny se vyskytují od středních poloh až po horské polohy (Jaworski & Kołodziej 2004, Chytrý et al. 2010).

3.3. Struktura a vývoj bukových porostů

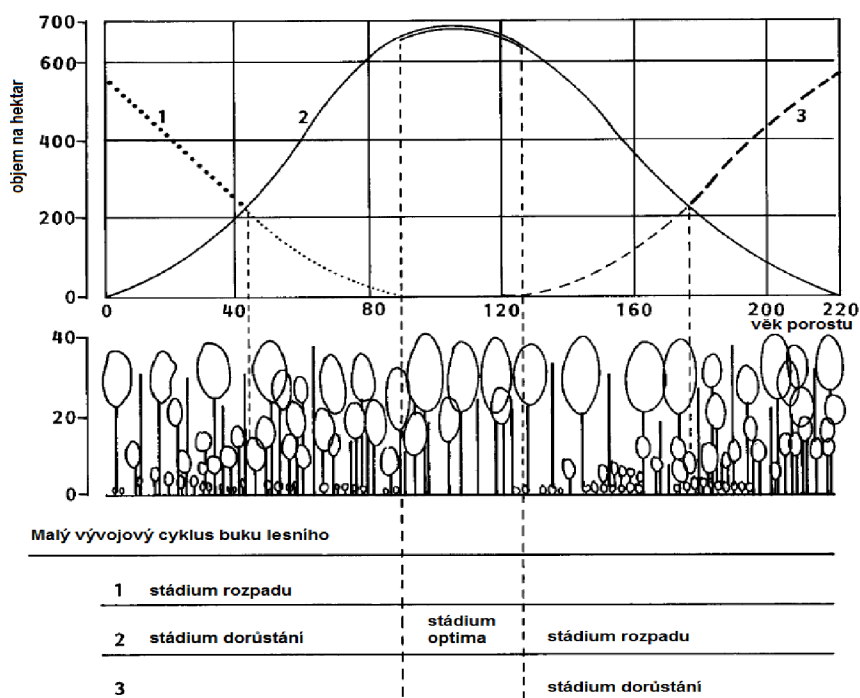
Přírodní bukové porosty se vyznačují malou variabilitou zásoby a velkou různověkostí. Struktura bučin je ovlivněna maloplošnou texturou porostů, protože zde nedochází k velkoplošnému rozpadu bukových porostů (Vacek et al. 2010c). Mozaika rozpadu přirozených bukových lesů je spojena s relativně krátkou dobou života buku, kdy délka jednoho vývojového cyklu bučin trvá okolo 250 let. Buk lesní při jeho přirozeném vývoji prochází všemi stádii malého vývojového cyklu (Vacek et al. 2010a, Vacek et al. 2016, Šimůnek et al. 2019b).

Stádium optima u buku lesního trvá okolo 40 let a je charakteristické vytvořením horizontálního zápoje (Vacek et al. 2010b). Buk lesní tvoří až tři etážové porosty, kdy k samostatnému vývoji dochází na 25–30 hektarech, což tvoří texturu bukových porostů. Tato textura je dána schopností této dřeviny snášet zástin (Vacek et al. 1988). Počet stromů ve stádiu optima kolísá v rozmezí 350–550 jedinců na hektar. Zásoba bukových porostů se pohybuje od 550 do 800 m³/ha. Přirozená obnova přichází v intervalu 100 až 120 let díky překryvům vývojových stádií malého cyklu lesa, což odpovídá začátku stádia rozpadu (Vacek et al. 2010b).

Stádium optima vývoje buku lesního je charakteristické tloušťkovou křivkou s četností jedinců s normálním rozdělením a mírnou pravostrannou asymetrií (Vacek et al. 2014a). Stádium rozpadu bukových porostů má překryv se stádiem dorůstání, v těchto dvou případech stromy ale mají větší maximální tloušťku, než je tomu u stádia optima (Králiček et al. 2017). Ve stádiu optima se snižuje role různého věku stromů, kdy může být rozmezí 30–40 let mezi jednotlivými jedinci (Barna et al. 2011b).

Bučiny jsou díky maloplošné textuře jedny z nejstabilnějších klimaxových lesních ekosystémů v ČR, a proto zde dochází i k akumulaci biomasy. V rámci vývojového cyklu se v průměru nejméně akumuluje odumřelá biomasa ve stádiu optima (Barna et al. 2011a). Objemová struktura bukových porostů má různé rozpětí v závislosti na vývojových stádiích

malého vývojového cyklu lesa. Stádium dorůstání se objemově může u bukových porostů pohybovat od 480 m³ do 780 m³/ha, kdy tyto hodnoty jsou silně ovlivněny ekologickými a fyzikálními podmínkami stanoviště. Nejvyšší objem se u bukových porostů objevuje ve stádiu optima, kdy porosty mohou dosáhnout rozpětí objemu od 521 m³/ha do 1029 m³/ha. Ve vývojovém stádiu optima se nejvíce projevují růstové vlastnosti stanoviště a lesní porost, tak dokáže nejlépe využít půdní a vlhkostní vlastnosti na dané lokalitě. Vývojové stádium rozpadu má menší rozpětí objemu než stádium dorůstání, kdy hodnoty se pohybují v rozmezí 480 m³ až 720 m³/ha. Variační kolísání objemových hodnot v porostu má v poměru podobný vztah i ke kruhové základně nebo i zápoji (Koop 1989, Vacek et al. 2010c). Zásoba bukových porostů je variabilní, ale typickým příkladem jsou porosty buku lesního v CHKO Jizerské hory, kde se porostní zásoba pohybuje okolo 450 až 720 m³/ha. Roční objemový přírůst těchto bučin se pohybuje od 3,7 po 7,0 m³/ha (Vacek et al. 2007). Podobný objemový vývoj buku popisuje i Korpeř (1991), kdy objem v jeho cyklu se pohybuje od 200 do 700 m³/ha. Malý vývojový cyklus buku lesního je zobrazen na Obr. 1.



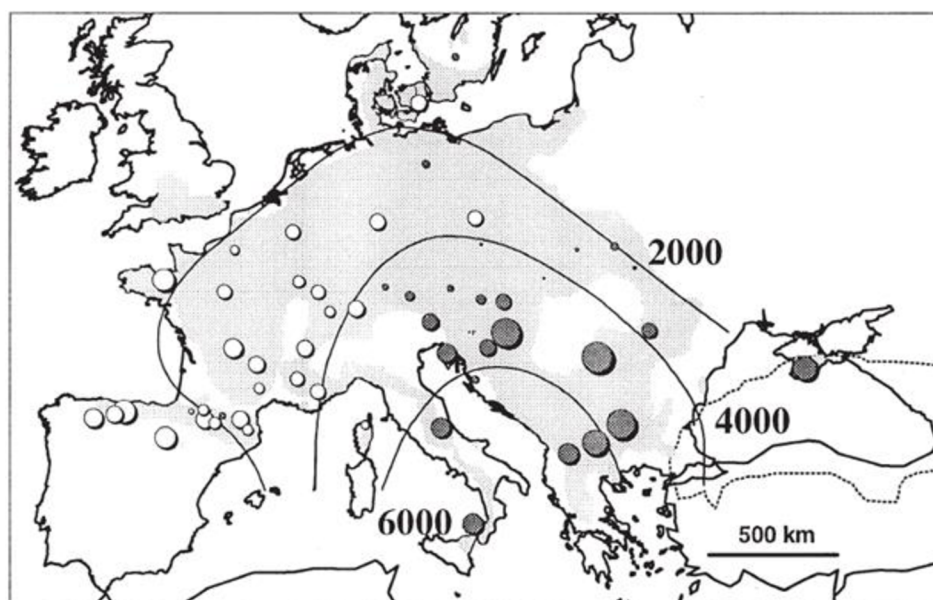
Obr. 1: Malý vývojový cyklus bukových porostů (Koop 1989).

3.4. Postglaciální migrace buku lesního

Buk lesní se v postglaciální době prakticky šířil díky klimaticky optimálním podmínkám, které dovozovali jeho rozšiřování po Evropě (Saltré et al. 2013). Vědecké studie o vývoji migrace buku lesního pochází hlavně z kombinací paleobotanických a genetických studií, které analyzovaly pylová zrna, která jsou hlavním nástrojem pro rekonstrukci dřevinné skladby vegetace. Tyto analýzy ukázaly, že v minulosti byl nalezen vysoký podíl pylových zrn buku v

jižní Evropě, nicméně výsledky pylových testů mohou být časově sporné, ale přesto jsou nalezeny důkazy o rozšiřování této dřeviny z jižní Evropy (Poljanec et al. 2010, Barna et al. 2011a).

První známky rozšíření buku lesního v Evropě jsou přibližně z doby 70 000–11 500 let před naším letopočtem. Znamky výskytu buku byly objeveny v Pyrenejích, jižní Francii, na Apeninském poloostrově, ve Slovinsku a jižním Balkáně. Buk lesní se nejvíce šířil v poslední době poletové a toto šíření probíhá do současnosti díky pozitivním klimatickým podmínkám (Saltré et al. 2013). Rozšiřování buku lesního začalo zhruba 10 000 let před naším letopočtem, kdy se buk lesní začal exponenciálně šířit do nových oblastí střední Evropy (Magri 2008). Před 5 000–8 000 lety probíhalo šíření buku lesního do střední Evropy ze západních Karpat. Při tomto šíření byly nejspíše největšími překážkami expanze buku lesního velké řeky, které blokovaly jeho expanzi. Nejvíce ho blokovala řeka Pád v expanzi z Apeninského poloostrova a řeka Dunaj mu znemožnila šíření z jižního Balkánu (Barna et al. 2011b). Expanze buku lesního dosáhla nejrychlejšího bodu šíření asi okolo roku 3 500 př. Kr., kdy se poté rozšiřování buku zpomalilo. Toto zpomalení mohlo být způsobeno lidskou činností nebo konkurencí jiných dřevin, změnou klimatických podmínek nebo dokonce lesními požáry (Tinner & Lotter 2006). Většina středo-evropských bukových lesů pochází geneticky právě ze západních Karpat (Comps et al. 2001). Rozšíření buku lesního a jeho expanze je uvedena a zobrazena na Obr. 2.



Obr. 2: Expanze buku lesního ve střední Evropě dle čtyř časových postupových zón v 10 000, 6 000, 4 000 a 2 000 letech před Kristem. Šedá barva je dnešní rozšíření, tmavě šedá kolečka značí genetická původní refugia a bílá kolečka značí nakřížené porosty z původních refugii (upraveno podle Comps et al. 2000).

3.5. Rozšíření buku lesního během klimatické změny

Rozšíření buku lesního zasahuje do velkého množství environmentálních zón přes celou Evropu (EUFORGEN 2020). Buk se vyznačuje značným geografickým rozšířením od Pyrenejí ve Španělsku až po balkánská pohoří na východě Evropy. Buk lesní je rozšířen od jihu Itálie přes celou střední Evropu až na jih Skandinávie. Buk potřebuje pro svůj produktivní růst alespoň 140 vegetačních dnů, a z toho důvodu nemůže přežít daleko na severu Skandinávie (Peters 1997). Ve střední Evropě se buk lesní nachází téměř všude s různou variabilitou půdních stanovišť. Člověk ovlivnil rozšíření buku lesního v poslední době poledové. Vliv člověka na buk byl způsoben především hospodářským pěstováním této dřeviny v lesních porostech (Peters 1997).

Nedostatek srážek spojený se suchem limituje buk lesní v jeho rozšíření na jihu Evropy (Geßler et al. 2007, Tegel et al. 2014, Dorado-Liñán et al. 2019) a nízké teploty s jarními mrazy limitují jeho rozšíření na severu (Eilmann et al. 2014, Lenz et al. 2016). Buk lesní se vyskytuje v optimálních podmínkách střední Evropy, ale zároveň také dochází k ústupu této dřeviny z jižněji položených částí Evropy díky intenzivnímu suchu. Navíc, tato dřevina potřebuje vlhké podnebí v létě, tak nemůže přežít na jihu Španělska, Řecka nebo v suchých oblastech jižní nebo střední Itálie (Dorado-Liñán et al. 2019). V severních oblastech jeho rozšíření se buk vyskytuje v nižších nadmořských výškách. V jižních oblastech roste ve výškách okolo 2000 m (Magri 2008).

V poslední době klimatické změny dochází i k expanzi buku lesního do severnějších oblastí jeho rozšíření (Penuelas & Boada 2003, Kramer et al. 2010, Kolář et al. 2017). Buk lesní v posledních desetiletích lépe prosperuje v severněji položených lokalitách, například v jižním Švédsku (Bolte et al. 2010), ale zároveň i v horských polohách, např. v České republice (Vacek et al. 2012, Tumajer et al. 2017, Vacek et al. 2019b). Během posledních let však dochází k větší citlivosti hospodářských porostů buku lesního na suchu a to hlavně v jižní části jeho přirozeného rozšíření (Conte et al. 2018), nicméně tato dřevina se dokáže vůči suchu ve střední Evropě plasticky adaptovat (Lenz et al. 2016, Etzold et al. 2019). Buk lesní patří k dřevinám s velmi pomalým růstovým rytmem (Assmann 1950, Barna 2001, Barna et al. 2011a). Z hlediska růstového rytmu patří buk lesní k dřevinám nejstabilnějším, a to i v podmínkách globálních klimatických změn (Bošela et al. 2016, Štefančík et al. 2018, Sharma et al. 2019)..

3.6. Faktory ovlivňující radiální přírůst buku

Porosty v Krkonoších byly ovlivněny nejen imisní zátěží, ale také klimatickými faktory, například přízemními mrazy v r. 1977, větrnou kalamitou v r. 2007 a 2008 či v posledních letech stále častěji se vyskytujícím extrémním suchem (Hartl-Meier et al. 2014, Bošela et al. 2016). Z hlediska biotických činitelů v průběhu imisní kalamity došlo u buku lesního k silnému výskytu červce bukového (*Cryptococcus fagi* /Baer./ Dougl.). Črvec způsobuje glejotok na

kůře buku a často tvoří i onemocnění kůry rakovinou (Vacek et al. 2013b). Mezi patogeny nejčastěji způsobující rakovinu a nekrózy u buku lesního napříč celou Evropou patří rod *Nectria*, *Ophiostoma*, *Phomopsis*, *Verticillium*. V poslední době navíc způsobují značné škody některé druhy hub rodu *Phytophthora* (Motta et al. 2003; Cicák et al. 2006). Ze škůdců v České republice významně negativně působí na růst buku lesního také bejlomorka buková (*Mikiola fagi* Htg.), chobotníček jilmový (*Bucculatrix ulmella* Zeller) a drobníček (*Ectoedemia lieberdella* Zimm.) – (Urban 2000, Cicák et al. 2006). Všichni tyto abiotičtí a biotičtí činitelé ovlivňují růstové podmínky buku lesního na stanovišti. V rámci dlouhodobého výzkumu přirozených bukových porostů ve východních Krkonoších byly publikovány práce na toto téma naposledy v roce 2010 či 2015 s tematikou zaměřenou na strukturu porostu buku lesního a vliv znečištění ovzduší (Špulák & Souček 2010, Vacek et al. 2015b).

3.6.1. Přírůst buku ve vztahu k teplotám a srážkám

Z hlediska radiálního růstu se buk lesní lépe přizpůsobuje na klimatické výkyvy v nižších polohách a na bohatých stanovištích (Aertsen et al. 2014, Vacek et al. 2019a, Vacek et al. 2021). Naproti tomu ve vyšších polohách dochází od roku 1975 k větším výkyvům v růstu buku (Dittmar et al. 2003b). Klimatické výkyvy v horských polohách střední Evropy jsou nejčastěji způsobeny nižšími teplotami, přičemž roční teploty ovlivňují radiální růst buku lesního více než úhrny srážek (Králíček et al. 2017, Šimůnek et al. 2019b, Vacek et al. 2019b). Výkyvy v radiálním růstu buku lesního mohou vést k jednotlivým cyklickým periodám a jsou způsobeny různými biotickými a abiotickými vlivy, které ovlivňují jeho přírůst (Šimůnek et al. 2019b). Například v 70. a 80. letech došlo k výraznému negativnímu vlivu imisí na radiální růst buku lesního v horách na severu a východě České republiky, což vedlo k oslabení nebo dokonce i odumírání lesních porostů (Špulák & Souček 2010, Vacek et al. 2015a). Bukové porosty sice zaznamenaly defoliaci v korunách během imisní kalamity, ale nedošlo k velkoplošnému rozpadu bučin. Nicméně buk lesní snížil výrazně produkci semen a to negativně snížilo přirozenou obnovu v nejhůře zasažených imisních oblastech (Šach et al. 2001, Vacek et al. 2010a). Důležité výkyvy v přírůstu buku lesního jsou způsobené i mrazy, které mohou ovlivnit přírůst celého vegetačního období (Kooijman et al. 2000, Šimůnek et al. 2019b).

Vztah radiálního růstu buku lesního k měsíčním úhrnům srážek má spíše negativní vztah, v červenci a srpnu aktuálního roku (Králíček et al. 2017). V horských polohách buk lesní netrpí nedostatkem srážek a v menší míře se dá naleznout i patrný pozitivní vliv srážek v předjaří (Drobyshev et al. 2010). Radiální růst buku lesního v horských oblastech střední Evropy je minimálně ovlivněn negativními vlivy průměrných měsíčních teplot. V ojedinělých případech však dochází k extrémním pozdním jarním mrazům (Vacek & Hejzman 2012, Šimůnek et al. 2019b).

Bukové porosty se liší také délkou životního cyklu, který má odlišné trvání napříč Evropou, kdy délka života této dřeviny je ovlivněna mnoha negativními činiteli. V Krkonoších se porosty

buku lesního generačně vyměňují v průměru po 230 až 250 letech (Vacek et al. 2010b). Naproti tomu staré porosty buku lesního v Itálii se dožívají okolo 300 let a více (Piovesan et al. 2008, Filippo et al. 2012b). Věk porostů buku lesního se může zkracovat v závislosti na klimatických výkyvech a to zejména v kombinaci se zvyšováním průměrných teplot a větším počtem suchých let (Filippo et al. 2012b). V mediteránu buk lesní nejvíce reaguje na negativní dopady sucha, což limituje rozšiřování této dřeviny na horské polohy v Apeninách (Tognetti et al. 2019). Porosty buku lesního jsou v mediteránu více a častěji stresovány suchem, což dlouhodobě snižuje jejich přírůst (Piovesan et al. 2008). V mediteránních lesích vyšších poloh také dochází i k jarním suchům, která se negativně projevují na přírůstu buku lesního (Di Filippo et al. 2007).

3.6.2. Sluneční cyklus a jeho možný dopad na růst buku lesního

Přírůst stromů může být ovlivněn slunečním cyklem, který se může objevit v letokruhových řadách na což ukázal v moderní historii například Moseley 1941. Sluneční cyklus je definován množstvím slunečních skvrn na Slunci, což odráží magnetickou aktivitu Slunce. Samotná sluneční skvrna je tmavá oblast na slunečním povrchu, kde dochází ke smyčkovému výboji magnetického pole z nitra Slunce (Hathaway 2015). Sluneční cykly probíhají v 11 letých intervalech a jsou přímo propojené s výskytem slunečních skvrn, které ovlivňují aktivitu slunečního ozáření zemské magnetické mřížky (Bonev et al. 2004). Výskyt slunečních skvrn je spojen s vývojem klimatu, což bylo sledováno již od středověku (Cecchini et al. 1996, Paulsen et al. 2003, Koch et al. 2007). Sluneční aktivita bývá spojována i s fluktuacemi ledovců během holocénu (Koch et al. 2007, Berger 2010). Aktivita slunečních skvrn a intenzita slunečních cyklů je spojena s teplotami zemského povrchu (Sunkara & Tiwari 2016). Mnoho vědeckých prací například dokazuje reálný vliv aktivity slunečních skvrn na srážky a teploty (Mauas et al. 2016, Baker et al. 2018, Maliniemi et al. 2018), což se přímo odráží na klimatu, přičemž toto působení slunečního cyklu může být také ovlivněno i dalšími vlivy (Gupta et al. 2015). Sluneční magnetická aktivita v atmosféře ovlivňuje radioisotopy ^{14}C a ^{10}Be , které chemickou reakcí oxidují přes ^{14}N a ^{16}O na CO_2 , které mohou být zpracovány rostlinami (Stuiver & Grootes 1980, Beer et al. 1990, Hathaway 2015). V souvislosti s přírůstem jiných druhů dřevin byly v minulosti provedeny studie, které potvrzují jak negativní (Surový et al. 2008, Surovy et al. 2010), tak i pozitivní spojitost výskytu slunečních skvrn a radiálního růstu stromů (Moseley 1941, Leavitt & Bannister 2009, Wang & Zhang 2011a).

Sluneční cykly ovlivňují proudění vzduchu ve vyšších částech atmosféry severní polokoule, což se projevuje na takzvaném Severoatlantickém proudění (Brugnara et al. 2013). Také bylo vyzkoumáno, že s vyšší nadmořskou výškou dochází i k většímu otisku slunečních cyklů do teplot vzduchu ve výškách od 1500 m do 8000 m (Kumar et al. 2018). Sluneční aktivita má dokonce vliv na vlastnosti a formování oblačnosti v naší atmosféře, což je způsobeno ionizací kosmického záření, které zrcadlově odráží 11cti leté sluneční aktivity (Jayaraman et al. 1998,

Haywood & Boucher 2000, Maghrabi & Kudela 2019) a tím dochází k výkyvům v ozáření zemského povrchu.

Cyklus slunečních skvrn navíc může pomoci v predikci významných klimatických událostí, jako například vulkanických erupcí, zemětřesení, El Nino efektu nebo lesních požárů (Uğur & Feriha 2017, Kim 2020). Sluneční aktivita způsobuje klimatickou změnu někdy dokonce více než antropogenní vlivy a také působí i na další faktory, jako jsou srážky nebo teploty (Mauas et al. 2016). Dokonce byl nalezen sluneční cyklus v průtoku řeky Amazonky (Baker et al. 2018), což úzce souvisí s El Nino efektem (Perone et al. 2016, Dong et al. 2018). Sluneční cykly ovlivňují průměrné měsíční teploty a dokonce i srážkové úhrny v Evropě (Laurenz et al. 2019, Lüdecke et al. 2020) a také i nepřímo ovlivňují NAO (North Atlantic oscillation) a AMO (Atlantic Multidecadal Oscillation) – (Bice et al. 2012), ale sluneční aktivita se může odrážet i na mnoha dalších klimatických ukazatelích (Le Mouél et al. 2019).

Buk lesní a jeho radiální přírůst reaguje na sluneční cyklus, což dokázalo hned několik publikací této disertační práce, ale v poslední době tento fenomén nezávisle potvrdili i vědci z Bulharska (Komitov 2021). Letokruhy buku lesního v Apeninách (mediteránu) jsou spjaté s NAO (Piovesan & Schirone 2000) a NAO je spojeno se slunečním cyklem (Brugnara et al. 2013, Laurenz et al. 2019). NAO ovlivňuje větrné proudy ve střední a východní Evropě (Gregow et al. 2017), což nepřímo zaznamenal i růst buku lesního v horách na severovýchodě České republiky a tím pádem může sluneční cyklus být promítnut i u nás (Šimůnek et al. 2019a, Šimůnek et al. 2020a, Šimůnek et al. 2021a, Šimůnek et al. 2021c). V poslední době došlo k publikování nových poznatků v oblasti sluneční aktivity a přírůstu buku lesního. Bylo doloženo, že buk lesní dokáže na sluneční cykly výrazně reagovat ve východních Krkonoších (Šimůnek, et al. 2019). Další faktor, který také narušuje radiální přírůst buku lesního byla imisní kalamita v 70. a 80. letech 20. století (Špulák & Souček 2010). Do celkového vlivu na přírůst buku lesního je také třeba započítat i vliv člověka a jeho těžební zásahy, které narušují přirozené cyklické vlivy růstu buku lesního (Šimůnek et al. 2020a).

Některé výzkumy v oblasti dendrochronologie dokazují vliv slunečních cyklů na radiální růst různých druhů stromů, což dobře popisují výzkumy ze severozápadního Ruska (Shumilov et al. 2011, Kasatkina et al. 2019), Chile (Rigozo et al. 2002), Tibetské plošiny (Wang & Zhang 2011b) nebo dokonce ze střední a jižní Evropy (Surový et al. 2008, Šimůnek et al. 2021c). Existuje i studie popisující dokonce souběžnost slunečního cyklu s rizikem výskytu lesních požárů (Uğur & Feriha 2017). Výkyvy v lesním hospodářství jsou ovlivňovány velkým součtem různých faktorů jako jsou silné bouře, vítr, sucho, povodně nebo lesní požáry (Lopez-Bustins et al. 2007, Lindner et al. 2010, Young et al. 2017, Whitman et al. 2019).

3.7. Obhospodařování přírodě blízkých bukových lesů

Od 18. do 19. století byly bukové lesy užívány jako zdroj krmiva pro hospodářská zvířata v podobě sběru bukvic nebo v nich byla praktikována lesní pastva. Po mnoho staletí byly bukové lesy využívány pro získávání palivového dříví a později zde byly používány k výrobě dřevěného uhlí (Peters 1997). S nástupem průmyslové revoluce byly bukové porosty nahrazeny jehličnatými dřevinami z důvodu efektivnějšího zpracování dřevní hmoty (Hahn & Fanta 2001). Nicméně, klimatická změna posledních let nutí lesnický management k návratu pěstování buku lesního (Poljanec et al. 2010).

Buk lesní se pěstoval v minulosti hlavně za pomoci přirozené obnovy, kdy stromy byly těženy v 90ti až 100letém obnovním cyklu v závislosti na produkčních schopnostech stanoviště (Hahn & Fanta 2001). Bukové lesy byly z nejprve doplňovány i příměsí dřevin jako je modřín nebo bříza. Takto byly bukové lesy využívány například v Alpách, Anglii nebo Karpatech. Systém holosečného hospodaření v bukových porostech byl zaveden až později. Toto hospodaření v bukových porostech vedlo k tomu, že jen malá část lesů byla ponechána samovolnému vývoji bez vlivu člověka (Christensen et al. 2005). Na konci 19. století probíhalo převážně holosečné hospodaření v těchto porostech, což mělo za následek ztrátu dlouhověkých bukových porostů (Hahn & Fanta 2001). Ve 20. století začali vznikat první národní parky, kde započal jiný přístup k pěstování této dřeviny a tím došlo k většímu zájmu o přírodě blízké hospodaření v lesích (Christensen et al. 2005). Buk lesní se v poslední době také začal více prosazovat v důsledku samotné změny klimatu, která ukázala, že buk lesní se lépe adaptuje na klimatické výkyvy než jehličnaté dřeviny (Hanewinkel et al. 2013, Bošela et al. 2016, Vacek et al. 2020).

Hospodaření v přírodě blízkých bukových lesích by mělo mít převážně maloplošnou formu. Na druhou stranu přiklonění k výběrným lesním porostům není cesta, jelikož zde dochází k horší kvalitě a zároveň i k výskytu většího množství nepravého jádra (Račko et al. 2011). Proto je lepší buk lesní ve výběrném lese spíše pěstovat ve směsích a to nejčastěji s jedlí nebo smrkem (Vencurik 2002, Slanař et al. 2017). Buk lesní dokáže velmi dobře zacelit mezery v zápoji tím, že koruny mohou růst do šířky. Při výrazném otevření zápoje v mladším věku této dřeviny ale dochází k hodnotovému znehodnocení dříví (Korpeľ 1991). Při výběrném pěstování buku lesního se navíc musí postupovat tak, aby se zachovala mozaikovitá struktura porostu. Při tomto hospodaření se navíc musí těžit jen množství objemového přírůstu za období mezi těžebními zásahy (Dröbler 2006).

Formování struktury bukového výběrného lesa je pěstebně značně složitě a jsou nutné zásahy v probírkách tyčkovin a tyčovin, kdy je neefektivnější používat úrovnovou probírku s pozitivním výběrem (Štefančík 2015, Štefančík et al. 2018b). Proměnlivost tvaru buku lesního ovlivňuje jeho kvalitu v pozdějším věku. Dosažení dobré hodnotové produkce kmenů ve výběrném lese je daleko náročnější, než je tomu v podrobném hospodářství buku lesního.

Vysoké kvality kmenů lze dosáhnout jen pokud se přirozená obnova pěstuje v hloučcích. Samostatné výběrné těžby jsou v bukových porostech málo efektivní. Autoredukce v bukových porostech navíc způsobuje ztrátu na dřevní hmotě (Saniga et al. 2013). S probíhajícími klimatickými výkyvy dochází i k většímu vlivu teplot na produkční schopnost bučin, které při neprofesionálním a silném zásahu mohou vést i ke snížení produkční schopnosti bukového porostu (Bosela et al. 2016).

3.8. Lesní hospodářství během klimatické změny nebo pod vlivem slunečního cyklu

Lesnický management v České republice nejvíce hospodáří se smrkem ztepilým, kdy v posledních letech klimatické změny dochází k velkoplošným škodám na lesních porostech (MZe 2020). Klimatická změna ovlivnila obhospodařování jehličnatých dřevin v České republice a v okolních státech, které v poslední době zaznamenávají škody způsobené periodicky se vyskytujícím suchem, což je patrné hlavně na smrku ztepilém (*Picea abies* L./Karst.) – (Ashraf et al. 2015, Alvarez et al. 2016, Noce et al. 2016, Tumajer et al. 2017). Špatný stav smrkových porostů je doprovázen také přemnožením kůrovců, kteří se vyskytují souběžně se suchými lety a tím umocňují rozpad těchto porostů (Kopáček et al. 2015, Nováková & Edwards-Jonášová 2015). Smrkové porosty jsou také oslabované i častějším množstvím těžebních zásahů, které vedou k napadení ostatními sekundárními škůdci (Aosaar et al. 2020, Blomquist et al. 2020).

Lesnictví v České republice je postaveno na jehličnatých dřevinách, které jsou zastoupeny ze 71 % převážně jehličnatými porosty a zbytek (29 %) tvoří smíšené a listnaté porosty. Právě smrkové porosty tvoří největší část dřevinného zastoupení (49,5 %) v České republice (MZe 2020). Klimaticky se smrk ztepilý hůře přizpůsobuje suchu během letních měsíců, což je dáno jeho horší schopností dosáhnout k vlhčí půdě hlouběji v půdním profilu (Hartl-Meier et al. 2018). Lesní porosty zastoupené převážně smrkem jsou citlivější na negativní klimatické výkyvy nebo události jako znečištění ovzduší (Putalová et al. 2019, Vacek et al. 2021), sucho (Hlásny et al. 2017a, Šrámek et al. 2019, Mikulenkova et al. 2020) a větrné bouře (Šustek et al. 2017, Janík & Romportl 2018).

Klimatická změna má negativní vliv na ekonomické indikátory ovlivňující lesní hospodářství, které selhává v eliminaci negativních vlivů počasí a klimatu (Hlásny et al. 2017b). Navíc klimatická změna se zdá být velmi proměnlivá a dynamická ve vztahu k dlouhodobému lesnímu hospodářství jehličnatých dřevin, které jsou díky tomu na ústupu (Čermák et al. 2019, Kozak & Parpan 2019). K celkovému ústupu jehličnanů v České republice také přispívá i stárnutí lesních porostů, které jsou postupně více zastoupeny porosty staršími 81 let (údaj z roku 2019) (MZe 2020). Právě starší porosty smrku jsou citlivější na teplotní výkyvy (Kukumägi et al. 2017, Vacek et al. 2019a). Vyšší věk porostů je dále doprovázen vyšším rizikem výskytu disturbancí (Vacchiano et al. 2013) a právě například i u smrku ztepilého lýkožrout smrkový

(*Ips typographus* L.) napadá v první řadě oslabené stromy starší 60 let (Schroeder & Lindelöw 2002, Hlásny & Turčáni 2013).

Při rozšiřování kůrovců dochází k souběžným negativním vlivům klimatu na postupné přemnožování kůrovců, kteří přitom navýší populaci jedinců a tím dochází i k nátlaku a likvidaci zdravých stromů bez ohledu na klimatické podmínky (Marini et al. 2017, Netherer et al. 2019). S vyšším množstvím napadeného dřeva kůrovcem roste i množství nahodilé těžby v jehličnatých porostech (MZe 2020), které reagují na změnu klimatu často podobně jako smrk (Nascimbene et al. 2013). Vyšší nahodilé těžby krátkodobě způsobené kalamitou vedou ke snižování ceny dříví, což má přímý ekonomický dopad na hospodaření v lesích (Remeš et al. 2020, Toth et al. 2020). Dopady změny klimatu a velké lesní kalamity dlouhodobě snižují ekonomickou hodnotu lesa (Hanewinkel et al. 2013), ale také se objevují i možné dopady na fixaci uhlíku v atmosféře (Dobor et al. 2020).

Změna klimatu stále více ovlivňuje schopnost lesů poskytovat pro člověka nezbytné ekosystémové služby jako je produkce biomasy, regulace kvality ovzduší a vodního režimu povodí (Riedl & Šišák 2013, Bellassen & Luyssaert 2014). Obzvláště významné jsou tzv. nepřímé vlivy změny klimatu, které mohou zvýšit frekvenci abiotických disturbancí (např. vichřice, sucho, povodně, lesní požáry) i výskyt a populační dynamiky hmyzích škůdců a houbových chorob (Hlásny et al. 2017a). Poškození lesů se zvyšuje v důsledku klimatických změn postupem času (Härt et al. 2015).

Diferencované obhospodařování lesa dle stanovištních a porostních poměrů může zmírnit průběh změny klimatu. K tzv. mitigačním opatřením patří zvýšení množství uhlíku akumulovaném v lese (včetně půdy), zvýšení množství uhlíku vázaném v produktech ze dřeva a produkce biomasy pro energetické účely, čímž dochází k náhradě části fosilních paliv (Gömöry et al. 2012, Bošela et al. 2016, Keenan et al. 2016, Zhu et al. 2016). Naproti tomu adaptační opatření představují takové změny hospodaření, kdy jsou nepříznivé vlivy změny klimatu zmírňovány a pozitivně využívány (Lindner et al. 2010, Hember et al. 2012, Bellassen & Luyssaert 2014, Vacek et al. 2019b). Klíčovými nástroji jsou změna dřevinného složení, včetně introdukce nových druhů, zvýšení biodiverzity, snížení doby obmýtí méně tolerantních dřevin a využívání nepasečných hospodářských způsobů (Piovesan et al. 2008, Hanewinkel et al. 2010, Aertsens et al. 2014, Vacek et al. 2020).

Klimatická změna ovlivňuje lesnictví v České republice a v okolních státech nejvíce v rámci obhospodařování jehličnatých dřevin, které v poslední době zaznamenávají škody způsobené periodicky se vyskytujícím suchem, což je patrně hlavně na smrku ztepilém (*Picea abies* [L.] Karst.) – (Ashraf et al. 2015, Alvarez et al. 2016, Noce et al. 2016, Tumajer et al. 2017). Vysoké množství smrkových porostů je doprovázeno také přemnožováním kůrovců, kteří se vyskytují souběžně se suchými lety a tím umocňují rozpad smrkových porostů (Kopáček et al. 2015, Nováková & Edwards-Jonášová 2015). V kontextu klimatické změny lesního hospodářství

jehličnatých dřevin je třeba uvést, že v České republice jsou ze 63 % zastoupeny převážně jehličnaté porosty, převážně listnatých porostů je 10 % a zbytek (27 %) tvoří smíšené porosty (MZe 2020). Klimaticky se smrk ztepilý hůře přizpůsobuje suchu během letních měsíců, což je dáno jeho horší schopností dosáhnout k vlhčí půdě hlouběji v půdním profilu, naproti tomu lépe odolává suchu buk lesní (Vacek et al. 2019a).

Sluneční cykly ovlivňují klima naší planety, což zmiňuje teorie „solar forcing“, a právě u velkého množství sledovaných faktorů (ozonová vrstva, teploty, El Niño–Southern Oscillation, větrné bouře atd.) byla zaznamenána podobnost s vlivem cyklů slunečních skvrn (Jean et al. 2007, Lopez-Bustins et al. 2007, Tartaglione et al. 2020). Některé studie dokonce popisují, že sluneční aktivita ovlivňuje teplotu atmosféry Země dlouhodobě, což je doprovázeno výskytem chladnějších zimních období (Lockwood et al. 2017). Tento efekt dokládají korelace globálních teplot, slunečních skvrn, TSI (celkového slunečního záření), ^{14}C a ^{10}Be produkce v horní atmosféře, incidence kosmického záření a albedo efektu z mrakového pokryvu ukazují, že chladná období jsou výsledkem synchronií událostí, které jsou spojeny se slunečním cyklem (Easterbrook 2016). Sluneční cyklus je spojován s vlastnostmi a formováním oblačnosti v naší atmosféře, což je způsobeno ionizací kosmického záření (Jayaraman et al. 1998, Haywood & Boucher 2000, Maghrabi & Kudela 2019). Cyklická tvorba utváření slunečních skvrn je patrná i na cyklu kosmického záření. Sluneční skvrny svojí magnetickou aktivitou odráží kosmické záření a platí, že čím větší je plocha slunečních skvrn, tak tím menší je dopad kosmického záření na atmosféru planety (Hathaway 2015). Kosmické záření ovlivňuje ionizací tvorbou aerosolů, které mění vlastnosti pokryvu mraků v atmosféře, a tím mění jejich formační procesy. Následně dochází ke změně v radiaci dopadající na povrch planety. Atmosférické aerosoly patří k nejproměnlivějším faktorům ovlivňujícím klimatické modely (Jayaraman et al. 1998, Haywood & Boucher 2000, Maghrabi & Kudela 2019).

Sluneční cykly ovlivňují průměrné měsíční teploty v Evropě (Lüdecke et al. 2020) a také i nepřímo ovlivňují NAO (North Atlantic oscillation) a AMO (Atlantic Multidecadal Oscillation) – (Bice et al. 2012), ale sluneční aktivita se může odrážet i na mnoha dalších klimatických cyklech (Le Mouél et al. 2019). Větrné proudy vysoko v atmosféře tvoří „Jet streams“, což zjednodušeně tvoří větrné proudění ve troposféře v různých intenzitách a v odlišných výškách (Blackmon 1976). Sluneční cykly ovlivňují větrné proudy, což má za následek tvorbu přímých větrných proudů nebo jsou tyto proudy blokovány a tím tvoří nepravidelnost v Jet streamech (Brugnara et al. 2013, Hall et al. 2015, Ma et al. 2018). Souběžně s tím dochází v lesním hospodářství také k velkým výkyvům způsobeným součtem různých faktorů jako jsou silné bouře, vítr, sucho, povodně nebo lesní požáry (Lopez-Bustins et al. 2007, Lindner et al. 2010, Young et al. 2017, Whitman et al. 2019). Sluneční cyklus má vliv na mnohé z výše zmíněných faktorů a zároveň bylo dokázáno, že nahodilé těžby v lesním hospodářství České republiky probíhají společně se slunečním cyklem (Šimůnek et al. 2020b).

4. Metodika

4.1. Charakteristika zkoumaného území

Zkoumané území se skládá ze tří základních oblastí a těmi jsou Krkonoše a Podkrkonoší, jižní Itálie a následně celá Česká republika pro analýzu celkových a nahodilých těžeb dle přírodních podmínek. Detailní popis výzkumných ploch je uveden v kapitole „Výsledky“ (u jednotlivých publikací).

4.1.1. Popis zkoumané oblasti Krkonoš a Podkrkonoší

Toto zkoumané území leží v národních parcích Krkonoš, a to jak v České republice, tak i v Polsku, tj. v Bilaterální biosférické rezervaci Krkonoše/Karkonosze. Celkem je hodnoceno 8 výzkumných ploch pro oblast Krkonoše a Podkrkonoší. Z toho je 6 výzkumných ploch ve Východních Krkonoších na Rýchorách nedaleko města Žaclěř, dále je 1 výzkumná plocha v Polsku v Krkonoších na místě zvaném Chojník nedaleko od města Sobieszów a jedna výzkumná plocha se nachází nedaleko města Broumov v NPR (národní přírodní rezervace) Broumovské stěny.

Na lokalitě Rýchory se nachází 6 výzkumných ploch, na lokalitě Chojník je 1 výzkumná plocha a na lokalitě Broumov je také 1 výzkumná plocha. Všechny výzkumné plochy vykazují porosty dominantního buku lesního se zastoupením 99–100 %, které mají srovnatelné růstové podmínky na všech výzkumných plochách. Výzkumné plochy se nacházejí v nadmořské výšce od 510 do 1030 m na svazích s různou expozicí. Bukové porosty zde mají věkové rozpětí od 150 do 190 let. Zásoba porostů se pohybuje od 250 do 450 m³/ha a porostní výška může dosáhnout rozpětí od 15 do 29 m.

Půdním typem jsou kambizemě a kryptopodzoly s kamenitými příměsemi na geologických podložích metadiabazu a chlorit-serických břidlic. Průměrné teplotní poměry na lokalitách jsou od 5,2 do 7,3 °C. Celková průměrná vegetační sezóna je 120 dní s celkovým ročním úhrnem od 640 do 1000 mm srážek. Dle Köppenovy klasifikace je to vlhké kontinentální klima s teplými léty (Dfb) – (Tolazs 2007). Fytocenologicky lokality patří převážně do květnatých bučin svazu *Fagion sylvaticae* Luquet 1926, podsvazu *Eu-Fagenion* Oberdorfer 1957 a rostlinné asociace *Dentario enneaphylli-Fagetum* Oberdorfer ex W. et A. Matuszkiewicz 1960. Tyto autochtonní bukové lesy se vyvíjely od roku 1963 bez přímého vlivu člověka. V nejvyšších polohách Rýchor se pak vyskytují acidofilní horské bučiny svazu *Luzulo-Fagion sylvaticae* Lohmeyer et Tüxen in Tüxen 1954 a rostlinné asociace *Calamagrostio villosae-Fagetum sylvaticae* Mikyška 1972.

4.1.2. Popis zkoumané oblasti jižní Itálie

Italské výzkumné plochy se nacházejí v jižních Apeninách v národním parku Appennino lucano nedaleko místa zvaného Sellata. Celkem jsou v Itálii hodnoceny 2 výzkumné plochy. Dle klimatické Köppenovy klasifikace jde o Csa, tedy o horká léta středomořského klima se suchými léty a mírně vlhkými zimami (Tolazs 2007). V jižní Itálii jsou založeny dvě výzkumné plochy La lama a Sellata. Všechny výzkumné plochy vykazují porosty dominantního buku lesního se zastoupením 99–100 %. Výzkumné plochy byly v Itálii po roce 1980 ponechané samovolnému vývoji bez těžebních zásahů člověka. Bukové porosty v Itálii mají věkové rozpětí od 90 do 250 let. Zásoba těchto italských porostů se pohybuje od 560 do 720 m³/ha a porostní výška může dosáhnout rozpětí od 29 do 33 m.

Italské výzkumné plochy se nachází od 1275 do 1340 m nad mořem. Jednotlivé plochy nejčastěji směřují expozicí na jih nebo jiho-východ. Převládající půdní typy na lokalitách jsou černice. Průměrné roční teploty pro italské plochy jsou 13,7 °C s průměrným ročním úhrnem srážek 1032 mm. Průměrný počet vegetačních dní pro italské plochy je 135 dní (Piovesan et al. 2017). Fytocenologicky se jedná o vápnomilné bučiny svazu *Fagion sylvaticae* Luquet 1926, a rostlinné asociace *Cephalanthero damasonii-Fagetum sylvaticae* Oberdorfer 1957.

4.1.3. Popis lesních porostů v České republice

Zájmové území pro potřeby managementu pokrývá celé území České republiky, které má lesnatost 34,1 % (2,67 mil. ha). Plocha lesů se od 50. let 20. století neustále zvyšuje. Jehličnaté lesy tvoří 71 % a listnaté 29 % dřevinné skladby. Hlavní dřevinou je smrk ztepilý s podílem 49,5 %, přičemž v původní dřevinné skladbě tvořil pouze 11,2 %. Hospodářské lesy tvoří 74,3 % plochy lesů. Většinu lesů vlastní stát (56,0 %), následují soukromí vlastníci (19,2 %) a obce a města (17,1 %). Převládající formou hospodaření v lesích v ČR je holoseč. Převažuje umělá obnova lesa (81,7 %) nad přirozenou obnovou (18,3 %). Z hlediska věkové struktury lesů je vyšší podíl přestárých porostů vzhledem k normalitě lesa. Průměrný věk lesních porostů se v letech 1960–2018 zvýšil o 9,0 let (z 52 na 61 let) a průměrný věk obnovovaných porostů o 11,7 let (ze 101,2 na 112,9 let). Celkový objem dřeva v porostech v roce 2018 dosáhl 703 mil. m³. Průměrný objem porostu na 1 ha lesní půdy je 269 m³ (MZe 2020).

Klima v ČR je mírné, charakteristické kontinentálními vlivy. Podle Köppenovy klimatické klasifikace patří většina území České republiky do klimatické oblasti Dfb – vlhké kontinentální klima, které se vyznačuje horkými léty a chladnými zimami (Tolazs 2007). Roční teplota vzduchu se pohybuje od +9,5 do -0,4 °C (průměr 7,9 °C) a roční úhrn srážek od 410 do 1705 mm (průměr 650 mm) ve vztahu k nadmořské výšce (115–1603 m). Průměrná nadmořská výška České republiky je 430 m. Nejnižší průměrná teplota v lednu je -2,0 °C, nejvyšší v červenci

17,8 °C. Podobně minimum srážek je v lednu (40 mm) a maximum v červenci (85 mm). Průměrná rychlost větru se pohybuje v rozmezí 10–18 km/h (ČHMÚ 2020).

4.2. Sběr a získávání dat

Studované výzkumné plochy v této disertaci jako například v Krkonoších a na Broumovsku mají plochu 50 × 50 m (plocha 0,25 ha). Výzkumné plochy byly měřeny technologií Field-Map (IFER-Monitoring and Mapping Solutions Ltd.). Růstové charakteristiky jako výčetní tloušťka a výška stromu byly měřeny na každém jedinci, který se nacházel na výzkumných plochách. Výčetní tloušťka byla měřena u jedinců od ≥ 4 cm lesnickou průměrkou (Haglöf, Švédsko) s přesností na 0,1 mm v prsní výšce 1,3 m. Výška jednotlivých stromů byla měřena výškoměrem Laser Vertex (Haglöf, Švédsko) s přesností na 0,1 m.

Pro dendrochronologickou analýzu vzorků z České republiky, Polska a Itálie byly odebrány vývrty z buku lesního pomocí Presslerova nebozezu kolmo k ose kmene ve výšce 1.3 m nad zemí. Pro odběr vzorků byly vybrány bukové porosty se zakmeněním 0,8 až 1. Vzorky pro dendrochronologické analýzy byly odebírány ze zdravých úroňových a nadúroňových stromů. U všech stromů s odebranými vývrty byla změřena jejich výška a výčetní tloušťka. Celkem bylo použito 340 vzorků, z toho bylo 229 vzorků pro dendrochronologickou analýzu v České republice, dále v Polsku 33 vzorků a v Itálii 78 vzorků. Množství vzorků u jednotlivých výzkumných ploch je popsáno v každé publikaci zvlášť. Dendrochronologické vývrty byly změřeny pomocí měřického stolu LINTAB (Rinntech 2010) mikroskopem Olympus. Měření bylo provedeno s přesností 0,01 mm a pro zaznamenání letokruhů byl použit software TSAP-Win (Rinntech 2010). Měření bylo prováděno od kůry směrem k jádru kolmo ke středu kmene tak, aby každý letokruh byl měřen kolmo k ose kmene. Následující křížové datování vývrťů bylo provedeno v programu Cdendro tak, aby Crosscorrelation index byl pro každý vzorek CC > 25 (Larsson 2013).

Klimatická data (srážky a teploty) pro dendrochronologii byla použita různě dle jednotlivých vědeckých publikací. Výčet klimatických stanic je následující. Údaje měsíčních teplot a srážek pro Krkonoše a Broumovsko byly poskytnuty Českým hydrometeorologickým ústavem (ČHMÚ 2020). Celkem byla použita data ze 4 meteorologických stanic pro tuto disertaci a dále souhrn všech klimatických stanic. Průměrné měsíční klimatické údaje pro výzkumnou plochu v České republice a v Polsku charakterizuje meteorologická stanice Bedřichov (50°47'30.7"N 15°08'31.7"E), která je vzdálená od výzkumných ploch 35,5 km a 54,3 km. Data měsíčních teplot a srážek byla použita i z meteorologické stanice Pec pod Sněžkou 14 km od výzkumných ploch v nadmořské výšce 656 m (GPS 50°18'24"N, 16°21'07"E). Data o srážkách a teplotách pro Broumovskou výzkumnou plochu byla použita z trutnovské meteorologické stanice, která se nachází ve vzdálenosti 24 km od výzkumné plochy, kdy nadmořská výška stanice je

460 m (50°34'10.9"N 15°54'42.0"E). Dlouhodobá klimatická data pro dendrochronologii v ČR (1900–2017) byla získána z meteorologické stanice v Praze-Klementinu (nadmořská výška 191 m n. m.; 50°5'12" s. š., 14°24'56 "E), kdy tato data představují nejdelší klimatickou řadu dostupnou v České republice. Data o průměrných ročních teplotách a ročním úhrnu srážek pro celou Českou republiku pochází z Českého hydrometeorologického ústavu v Praze (ČHMÚ 2020).

Data měsíčních teplot a srážek pro výzkumné plochy v Itálii byla poskytnuta italským úřadem pro Civil Protection - Basilicata Region (Protezione Civile - Regione Basilicata 2020). Italské výzkumné plochy jsou charakterizovány meteorologickou stanicí v místě zvaném Abriola (40°30'28.0"N 15°48'46.6"E) s nadmořskou výškou stanice 1050 m. Od výzkumných ploch je vzdálenost k meteorologické stanici od 3,2 km do 5,1 km.

Data o celkových, nahodilých, listnatých nebo jehličnatých těžbách byla získána od Ústavu hospodářské úpravy lesů v Brandýse nad Labem a Českého statistického úřadu v Praze. Data o ploše slunečních skvrn (sunspot area) jsou získána od the National Oceanic Atmospheric Administration (NOAA) (Hathaway et al. 2017). Data o kosmickém záření (cosmic rays) jsou získána z měřicí stanice Lomnický štít na Slovensku patřící pod institut experimentální fyziky SAS (Kudela 2019). Data o ročním čísle slunečních skvrn (sunspot number) byla použita z Royal Observatory of Belgium, Brussels (WDC-SILSO 2020).

4.3. Analýza dat

4.3.1 Indexy struktury

Základem charakteristicky popisu struktury homogenních nebo heterogenních porostů na stanovišti tvoří strukturální indexy, které byly využity na základní popis porostů buku lesního na Rýchorách v Krkonoších. Tyto indexy byly vypočteny softwarem, kdy vstupními daty byly jednotlivé stromové údaje, jako jsou souřadnice stromů, tloušťky, výšky, věk a nasazení živé koruny SIBYLA (Fabrika & Ďurský 2005).

Pro určení homogenních porostů nebo heterogenních porostů buku lesního byl vybrán index horizontální struktury, který počítá se vzdáleností všech stromů k nejbližšímu sousedovi, počtem stromů na ploše, velikostí plochy a velikostí obvodu plochy. Index se pohybuje v rozpětí od 0 po 2,15. Hodnota 0 znamená agregovanou strukturu, tj. stromy soustředěné ve shlucích. Hodnota 1 znamená zcela náhodné rozdělení stromů po ploše a hodnota 2,15 znamená pravidelné rozmístění stromů po ploše (Clark & Evans 1954).

Byl také použit index vertikální struktury Arten Profil index, který se počítá na základě kruhové základny dřeviny v porostní vrstvě. Tento index se pohybuje v rozpětí od 0 po 1. Čím

vyšší je hodnota indexu, tím je vertikální struktura více rozrůzněná. Při hodnotě indexu nad 0,9 lze strukturu považovat za výběrnou (Pretzsch 1992).

Pro celkové zhodnocení struktury porostu byl použit i index celkové diverzity. Celková diverzita vyjadřuje celkové číselné shrnutí složek diverzity: diverzity druhového složení, diverzity vertikální struktury, diverzity prostorového rozmístění stromů a diverzity korunové diferenciaci. Pokud je výsledná hodnota větší nebo rovna 9, pak má porost mimořádně různorodou strukturu, hodnota v rozpětí od 8 do 8,9 značí různorodou strukturu, index od 6 do 7,9 znamená nerovnoměrnou strukturu porostu, při hodnotách v intervalu od 4 do 5,9 jde o rovnoměrnou výstavbu a při hodnotách pod 4 má porost monotónní výstavbu (Jaehne & Dohrenbusch 1997).

Homogenní výzkumné plochy na Rýchorách mají náhodnou až pravidelnou horizontální strukturu porostu, nízkou výškovou diferenciaci a stejnorodou strukturu. Heterogenní výzkumné plochy mají náhodnou až agregovanou prostorovou střední vertikální strukturu a nerovnoměrně různorodou strukturu.

4.3.2. Základní analýza dendrochronologických dat

Dendrochronologická data buku lesního byla zpracována softwarem R (Team R Core 2018) s použitím „dplr“ package (Bunn 2008, Zang et al. 2018). Detrending každého stromu byl proveden negativně exponenciální detrendací s proloženým splinem za použití návodu do dplr (Bunn et al. 2018a). Detrendace odstraňuje věkový trend při zachování nízkofrekvenčních klimatických signálů (Cook et al. 1990, Shumilov et al. 2011). Pro detrendovaná data bylo vypočítáno EPS (expressed population signal). Ukazatel EPS představuje spolehlivost chronologie jako zlomek společného rozptylu teoretické nekonečné stromové populace. Limitem pro použití dat k porovnání vůči klimatickým údajům byla signifikantní hranice EPS tak, aby $EPS > 0.85$ (Bunn et al. 2018a). Také bylo spočítáno the SNR (signal to noise ratio), které reprezentuje sílu signálu chronologické křivky k dendrochronologickému šumu. Byla také vypočítána vnitřní korelace mezi jednotlivými vzorky každé křivky tedy R-bar (inter-series correlations) – (Fritts 1976), také byla vypočítána autokorelace prvního řádu first-order autocorrelation (Ar1). Dendrochronologické ukazatele EPS, SNR, R-bar a Ar1 byly vypočítané dle instrukcí do “dplr” (Bunn et al. 2018a) a jsou postavené na všeobecných dendrochronologických teoriích (Fritts 1976, Speer 2010). Popis dendrochronologických charakteristik je uveden v jednotlivých vědeckých publikacích.

4.3.3 Zpracování dat

V této disertaci byly použity pro zpracování dat a jejich úpravu software R (Team R Core 2018), Statistica 13 (StatSoft 2013), CANOCO 5 (© Leps & Smilauer). Pro analýzu dendrochronologických křivek s klimatickými měsíčními podmínkami byl použit program DendroClim 2002, kdy byla využita funkce „response and correlation“ v rozmezí měsíců od května do září (Biondi & Waikul 2004).

Všechna použitá data letokruhových řad, úhrnů srážek, teplot vzduchu, čísla slunečních skvrn, plochy slunečních skvrn, nahodilých těžeb, celkových těžeb atd. byla také proložena různými typy kubických splinů pro odstranění/uhlazení krátkodobých vlivů pomocí softwaru R (Team R Core 2018). Použitá data byla zpracována dle potřeby v softwaru R za použití balíčků dplr „package“ (Zang et al. 2018), „signal“ (Ligges et al. 2015) a „waveslim“ (Whitcher 2020). Byl také vytvořen softwarem R pomocí balíčků „signal“ a „dplr“ waveletový graf pro dendrochronologické údaje (Ligges et al. 2015, Bunn et al. 2018b). Výpočet spektrální analýzy ze softwaru R byl proveden jako Furierova analýza signálu, kdy byla použita funkce „redfit“ neboli Schulz's REDFIT (version 3.8e), kdy tato funkce odhaduje red-noise spektrum časové řady (Schulz & Mudelsee 2002) s optimálním testujícím spektrem vůči pozadí red-noise za použití analýzy Monte Carlo simulace. Tento výpočet byl proveden podle návodu do R dle Bunn & Mikko, 2018.

Výpočty Pearsonových korelací, spektrální analýzy a 3D grafy byly vytvořeny softwarem Statistica 13 (Statsoft, Tulsa). Výpočet spektrálních analýz softwarem Statistica 13 byl proveden funkcí „Single Furier (Spectral) Analysis“, přičemž byl použit výstup „Periodogram“ zobrazené dle „Period“. Dále byly tímto softwarem vypočteny korelační koeficienty a cross-correlace. Cross-correlace byly selektovány jako nejbližší signifikantní hodnota od Lag 0.

Hodnocení radiálního přírůstu buku ve vztahu ke klimatickým faktorům bylo statisticky zpracováno programem Statistica 12 (© Statsoft, Tulsa). Pro stanovení kombinovaného vlivu průměrné roční teploty a ročního úhrnu srážek na radiální růst buku byl použit regresní kvadratický model. Analýza hlavních složek (PCA) byla provedena v programu CANOCO 5 (© Leps & Smilauer) za účelem posouzení vztahu mezi radiálním růstem bukových lesních porostů, součtem srážek a průměrnými teplotami za celý rok, ve vegetačním období (od dubna do září), mimo vegetační období (od října předchozího roku do března běžného roku), v červnu až červenci a v lednu až březnu běžného a předchozího roku. Před analýzou byla data zlogaritmována a standardizována. Výsledky multi-variační PCA byly vizualizovány formou ordinačního diagramu.

5. Výsledky

Výsledky této disertační práce jsou prezentovány ve 2 tematických okruzích jako soubor 5 vědeckých prací a 2 recenzovaných příspěvků na konferencích. Prvním tematickým okruhem je struktura a dendrochronologický vývoj bukových porostů a druhým tematickým okruhem je lesnický management pod vlivem klimatických vlivů. Oba tyto okruhy na sebe navazují problematikou zkoumaných faktorů. Díky klimatické změně prochází bukové porosty proměnlivým vývojem, ale celkově jsou stabilní vůči kalamitním výkyvům. Naproti tomu zde máme nejrozšířenější problematiku velkých kalamit, které jsou propojeny hlavně s managementem jehličnatých dřevin. Buk lesní tedy nahrazuje jehličnaté porosty se stejnou rychlostí velkých kalamit. Seznam popisující tuto problematiku je obsažen v následujících vědeckých článcích a konferenčních příspěvcích.

Tematický okruh 1: Struktura a dendrochronologický vývoj bukových porostů

- **Kapitola 5.1.1.:** Růstová variabilita přirozených porostů buku lesního: Dendroklimatická studie z Krkonošského národního parku (článek ve Central European Forestry Journal),
- **Kapitola 5.1.2.:** Plocha slunečních skvrn jako neprozkoumaný trend v radiálním růstu buku lesního v Krkonoších: lesnická věda z jiné perspektivy (článek ve European Journal of Forest Research),
- **Kapitola 5.1.3.:** Sluneční cykly jako základní faktor ovlivňující přirozenou dynamiku porostů (článek Forests),
- **Kapitola 5.1.4.:** Letokruhy buku lesního naznačují souvislosti s průběhem slunečních cyklů během klimatické změny ve střední a jižní Evropě (článek Journal of Forest Science),
- **Kapitola 5.1.5.:** Otisky slunečních a klimatických cyklů v letokruzích buku lesního (příspěvek Proceedings of Central European Silviculture).

Tematický okruh 2: Lesnický management pod vlivem klimatických vlivů

- **Kapitola 5.2.1.:** Sluneční cykly v nahodilé těžbě: Data z České republiky potvrzují statisticky významnou korelaci (článek Foresto),
- **Kapitola 5.2.2.:** Vztahy těžby listnatých a jehličnatých dřevin dle slunečních cyklů (příspěvek Proceedings of Central European Silviculture).

Všechny uvedené články nebo příspěvky jsou vloženy za jednotlivé kapitoly a jsou zaměřeny na splnění cílů disertační práce tak, aby rozvíjely a doplňovaly danou problematiku.

5.1. Tematický okruh 1: Struktura a dendrochronologický vývoj bukových porostů

5.1.1. Růstová variabilita přirozených porostů buku lesního: Dendroklimatická studie z Krkonošského národního parku.

Tato publikace je analýzou a syntézou dendrochronologického vývoje buku lesního ve východních Krkonoších. Hlavní záměr této publikace je popsat vliv teplot vzduchu a úhrnů srážek na přírůst buku lesního. Tato publikace také popisuje další významné faktory, které ovlivnily dendrochronologický vývoj buku lesního, jako například imisní kalamita nebo vliv mrazů. V článku jsou spektrální analýzy pro dlouhodobý časový horizont od roku 1850, analýza měsíčních korelací teplot nebo srážek s radiálním přírůstem (software DendroClim) a PCA diagram.

Vývoj bukových porostů výrazně ovlivnila imisní kalamita v období 1977–1989 a v posledních letech častější klimatické výkyvy. Přírůstové periodické události se nejvíce opakovaly v rozmezí 10 až 18 let. Porosty na výzkumných plochách reagovaly odlišně na klimatické faktory, ale hlavním limitujícím faktorem byly nízké teploty během vegetačního období. Příkladnou nejvíce patrnou negativní událostí byl vliv mrazů v roce 2011. Pozitivní vliv teplot na přírůst buku byl zaznamenán během zimy, předjaří a zejména v červenci a srpnu aktuálního roku. Naopak tloušťkový přírůst byl negativně korelován se srážkami na začátku roku a v srpnu. Dendrochronologická analýza přírodě blízkých bukových porostů poskytuje cenné informace o reakci bučin na měnící se klimatické poměry. (Šimůnek et al. 2019b).

Citace článku:

ŠIMŮNEK, V., VACEK, Z., VACEK, S., KRÁLÍČEK, I., VANČURA, K. (2019): Growth variability of European beech (*Fagus sylvatica* L.) natural forests: Dendroclimatic study from Krkonoše Mountains National Park. *Central European Forestry Journal*, 65: 2: 3–11. DOI: 10.2478/forj-2019-0010



Growth variability of European beech (*Fagus sylvatica* L.) natural forests: Dendroclimatic study from Krkonoše National Park

Václav Šimůnek¹, Zdeněk Vacek^{1,*}, Stanislav Vacek¹, Ivo Králíček², Karel Vančura¹

¹Czech University of Life Sciences Prague, Faculty of Forestry and Wood Sciences, Kamýcká 129, CZ – 165 21 Prague 6 – Suchbát, Czech Republic

²University of Hradec Králové, Faculty of Science, Rokytanského 62, CZ – 500 03 Hradec Králové, Czech Republic

Abstract

Long-term temporal development of beech stands in relation to climatic conditions is well documented by dendrochronological analyses. The study aims to identify and describe growth factors affecting natural European beech stands (*Fagus sylvatica* L.) on permanent research plots in the eastern Krkonoše Mountains, the Czech Republic. The paper focus on radial growth dynamics, frequency and cyclicity, and the effect of climatic factors on diameter increment of beech stands since 1850. The growth development of beech stands was significantly affected by air pollution load in 1977–1989, and increasingly frequent climate extremes in recent years (since 2010). Periodic increment events recurred in approximately 10–18 years' periods. Stands on research plots responded differently to climatic factors, the main limiting factor being low temperatures during the growing season, frost damages and extreme droughts. The positive influence of temperatures on beech increments was recorded in winter, early spring, and especially in July and August of the current year. Conversely, precipitation in the previous year had higher impact on radial increment, with prevailing negative correlation. The plots were negatively affected by the decrease in sum of precipitation in February and March, but it was the temperature that influenced the beech increment most significantly. Dendrochronological analysis of close-to-nature beech stands provides valuable information on radial forest growth in response to changing climatic conditions.

Key words: dendrochronology; tree-ring data; cyclical dynamics; temperature; precipitation; Central Europe

Editor: Bohdan Konôpka

1. Introduction

In terms of ongoing global climate change, European beech stands (*Fagus sylvatica* L.) show greater stability and resistance to water scarcity than Norway spruce stands (*Picea abies* [L.] Karst.) – (Dittmar et al. 2003; Zang et al. 2011, 2014; Hartl-Meier et al. 2018). Climate change has long been forcing forestry management to change its approach to tree species composition in favour of deciduous tree species. Confirming the trend, the Czech Republic has witnessed an increasing percentage of European beech (1% increase since 2010) (Ministry of Agriculture 2017). Supposedly, the numbers will increase continually. As a result, European beech will partially substitute languishing stands of Norway spruce (Lindner et al. 2010; Holuša et al. 2018). Some studies, however, point out European beech sensitive response to long-lasting drought (Jump et al. 2006; Geßler et al. 2007; Granier et al. 2007; Cavin & Jump 2017). In comparison to spruce stands, beech stands show greater

success of natural regeneration (occurrence, density, growth) and adaptability to air pollution (Králíček et al. 2017; Slanař et al. 2017). The higher resilience and plasticity of the beech compared to spruce is caused by the annual replacement of the assimilation apparatus. However, during the long-term impact of pollution load the forest damage increased through the soil due to increased acidification, disruption of the sorption complex and decrease of mycorrhizal roots (Ling et al. 1993; Power & Ashmore 1996). In response to climate change, beech stands increase the frequency of seed years (Övergaard 2010). Growth processes of the tree species are also affected, its mortality increasing with increasing drought at lower altitudes, yet with the effect of prolongation of its lifetime cycle (Filippo et al. 2012).

As soon as the beginning of the 20th century, the first national parks began to emerge in Europe, together with increasing preferences for ecological approach to forests, which led to greater interest in close-to-nature forestry

*Corresponding author. Zdeněk Vacek, e-mail: vacekz@fd.czu.cz

(Christensen et al. 2005). National parks, including our area of interest in the Krkonoše Mountains, took over the beech stands with their noteworthy history. From the 17th to the 19th century the beech stands were used as forest pastures and source of cattle feed – beech nuts (Nožička 1961; Lokvenc 1978). For many centuries, beech stands were also used for fuel wood and production of charcoal (Peters 1997). In recent decades, the health status and development of forest stands were damaged by synergic effects of air pollution load (acidification, ozone effect) and climate stress (extreme fluctuations, frosts, droughts, wind storms) (Bytnerowicz et al. 2007; Paoletti et al. 2010; Vacek et al. 2013, 2015a).

Together with industrial development and increasing air pollution after World War II, the first macroscopically visible large-scale damage to forest stands in the Czech Republic occurred (Materna 1989). Consequently, the most significant air pollution loads caused by high concentrations of SO₂ were recorded in the Krkonoše Mountains in the 1970s–1990s (Bridgman 2002; Matějka et al. 2010; Vacek et al. 2010; Král et al. 2015; Vacek et al. 2017). Since the 1990s, NO_x and O₃ air pollution have also been perceived as a problem (Hůnová & Schreiberová 2012; Vacek et al. 2015a). Mankind has influenced forests throughout history, and on this basis it was found that 85% of beech stands developed in regeneration cycles of 15–25 years, with high-level regeneration in subdominant trees (Schütz 2001).

The Krkonoše Mountains stands were affected not only by air pollution loads but also by climatic factors such as ground frosts in 1977, wind disturbances in 2007 and 2008, or in increasingly frequent extreme droughts in recent years (Trnka et al. 2015; Bošela et al. 2016; Brázdil et al. 2017, 2018). Damaged by air pollution, forests were consequently infested with beech scale (*Cryptococcus fagi* /Baer./ Dougl.), followed by gummosis and more than often also by bark canker (Vacek 1988). Canker and necroses in beeches are most frequently induced by *Nectria*, *Ophiostoma*, *Phomopsis* and *Verticillium* pathogens, or some species of *Phytophthora*, fungi causing vast damage throughout Europe (Motta et al. 2003; Cíček et al. 2006). Among other pests in the Czech Republic we can name beech-leaf gall midge (*Mikiola fagi* Htg.), *Bucculatrix ulmella* Zeller and *Ectoedemia liebwerdella* Zimm. (Urban 2000; Mihál et al. 2014). All these abiotic and biotic factors affect the growth conditions of European beech stands on the research plot. Last studies bringing results of long-term research of natural beech stands in the eastern Krkonoše Mts. were published in 2010 and 2015, focusing on the European beech stand structure and the effects of air pollution (Špulák & Souček 2010; Vacek et al. 2015b), but no research on dendrochronological development of these unique forest stands has been published yet.

This study explores the potential of the cyclical dynamics of European beech in stands left to spontaneous development in conditions of the climate change and

uses a dendrochronological analysis that combines the evaluation of frequency dynamics of the lower and higher “bandpass filtering” of dendrochronological series (Bunn & Mikko 2018a, 2018b). The study also evaluates the effect of monthly temperatures and precipitation on radial growth to differentiate responses to climate during a particular season (Biondi & Waikul 2004). Particular attention is given to clarification of the influence of climate change on natural beech stands in the eastern part of the Krkonoše Mountains National Park, which was left to spontaneous development in 1963.

2. Material and methods

2.1. Study area

The studied area of Boberská stráň (Rýchory Hills) is situated in the east of the Krkonoše Mountains National Park near the town of Žacléř, close to Poland frontier. Studied three permanent research plots (PRP 30, 31, 32) with similar growth conditions are composed by dominant European beech (99.8–100.0%) and admixed sycamore maple (*Acer pseudoplatanus* L.; 0.0–0.2%). Research areas are in the first zone of protection of the Krkonoše National Park at an altitude of 740–790 m a.s.l. on a northeast facing slope. The predominant soil type is the Cambisol with meta-diabase subsoil. The climate at the site is characterized by temperatures oscillating around 5.2 °C with an annual total precipitation of 870 mm. The growing season lasts about 120 days with an average temperature of 11.9 °C and a total precipitation of 640 mm. In Köppen’s classification, this is a damp continental climate with warm summers (Dfb) – (Tolazs 2007). Phytosociology defines the area as *Fagion sylvaticae* Luquet 1926, *Eu-Fagenion* Oberdorfer 1957 suballiance and *Dentario enneaphylli-Fagetum* Oberdorfer ex W. et A. Matuszkiewicz 1960 plant association. In 1963, natural beech stands on the PRPs were left to spontaneous development.

The studied PRPs of 50 × 50 m (area of 0.25 ha) were established by Forestry and Game Management Research Institute, Forest Research Station at Opočno in 1980 to monitor long-term factors affecting the forest environment (Vacek 1988). Several measurements by technology Field-Map (Institute of Forest Ecosystem Research – Monitoring and Mapping Solutions Ltd.; IFER 2017) were carried out on these PRPs, studies of which were published (Vacek et al. 2010; Vacek et al. 2015b). This technology was used for repeated measurements of the positions of tree layer, dead wood and natural regeneration, tree heights, heights of the live crown base and crown projection areas together with the diameters at breast height (DBH). Fig. 1 illustrates the localization of natural beech forest stands on PRPs and Table 1 shows the basic site and stand characteristics of PRPs.

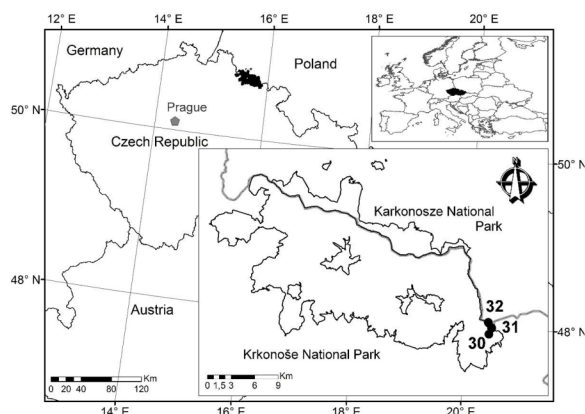


Fig. 1. Location of European beech forest stands on permanent research plots 30, 31 and 32 in the Krkonoše Mountains.

2.2. Data collection

For dendrochronological analysis, increment cores were taken from the European beech using the Pressler auger, perpendicularly to the stem axis, in the down-the-slope direction. Trees were randomly selected using the RNG selection (MS Excel); a total of 72 cores (24 per PRP) were taken from trees with DBH > 250 mm. The analysis required 67 samples: 23 from PRP 30, 21 from PRP 31, and 23 from PRP 32. Cores were measured by an Olympus microscope on a LINTAB measurement table (RINNTech). The samples were measured from the bark to the heartwood, perpendicularly to the centre of the stem so that each ring was measured perpendicularly to the axis of the stem with an accuracy to hundredths of millimetres. Subsequently, the increment cores were crossdated in CDendro program (Cybis Dendrochronology), with the $CC > 25$.

Climate data (monthly air temperatures and sum of precipitation) were taken from the nearest meteorological station of Pec pod Sněžkou (Czech Hydrometeorological Institute, Prague), 11 km from research areas at an altitude of 816 m a.s.l. (50°41'30.480"N, 15°43'43.320"E). The range of climate data surveyed was set to the 1976–2017 period. Data on average annual temperatures, growing season temperatures, temperatures out of the growing season, temperatures in particular months and annual sum of precipitation, sum of precipitation in the

growing season, precipitation out of the growing season, precipitation in particular months in 1976–2017 were used to describe the development of temperature and precipitation conditions. The meteorological data source was provided by operator Czech Hydrometeorological Institute. Climatic data was archived by the National Climatic Data Center.

2.3. Data analysis

Dendrochronological analysis data were processed in the R (R Core Team 2018) program, using negative exponential detrending to remove the age trend of analysed increment cores with an inserted spline of 1/3 sample age. Consequently, the values were averaged by the chron function (Bunn & Mikko 2018b). To generate information for each chronological curve signal, dplR-packages for R and signal were used. A graph of single high-pass filter spectrum signal was created in period ranges of 1 to 20 years. Splines from 4, 8, 16, 32, 64 to 128 years were inserted to the average data curve to show significant events (Bunn & Mikko 2018a; Team R Core 2018). DendroClim 2002 (DendroLab) was used for the analysis of dendrochronological curves with monthly climatic conditions, utilizing the response and correlation function in the months from May to September (Biondi & Waikul 2004).

Data from the evaluation of diameter increment of beech in relation to climate factors were statistically processed by the Statistica 12 program (Statsoft, Tulsa). To determine the combined effect of average annual temperature and annual sum of precipitation on radial growth of beech, the regression quadratic model was used. The principal component analysis (PCA) was run in CANOCO 5 program (Lepš & Šmilauer) to assess the relation between the radial growth of beech forest stands, sum of precipitation and average temperatures all the year round, in the growing season (from April to September), out of the growing season (from October of the previous year to March of the current year), in June to July and in January to March of the current and previous year. Prior to the analysis the data were logarithmized and standardized. The results of multivariate PCA were visualized in an ordination diagram.

Table 1. Overview of basic site and stand characteristics of permanent research plots (according to the Forest Management Plan).

PRP	GPS	Altitude [m]	Exposure	Slope [°]	Tree species	Age of tree layers [years]	Height [m]	DBH [cm]	Volume [m ³ ha ⁻¹]	Forest type*
30	50°39'52"N 15°53'01"E	790	NE	24	beech	182/22	31	49	420	6D
					sycamore		28	40	38	
					beech		29	43	398	
31	50°40'04"N 15°52'57"E	740	NE	23	sycamore	165/23	27	39	40	6B
					spruce		31	40	20	
					beech		26	41	313	
32	50°40'13"N 15°52'48"E	760	NE	35	149/71/24	26	35	34	5B	
						sycamore	26	35		34

Notes: *Forest site type classification: 6D – *Piceeto-Fagetum acerisum diluvium* (Enriched-colluvial spruce-beech), 6B – *Piceeto-Fagetum eutrophicum* (Nutrient-rich spruce-beech), 5B – *Abieto-Fagetum eutrophicum* (Nutrient-rich fir-beech) – (Viewegh et al. 2003).

3. Results

3.1. Dynamics and frequency of radial growth

Detrended radial growth data series (Fig. 2) show that each stand on the studied PRPs developed differently. On PRP 30, no substantial drops in production were detected. This finding is also related to the fact that only five climatically significant years (12) were documented on the PRP until 1973. PRP 31, though, witnessed the highest number of climatically significant years (13) in terms of radial growth, and the increment varied significantly throughout the years. PRP 32 showed the most substantial cyclicity of radial growth and revealed five climatically significant years.

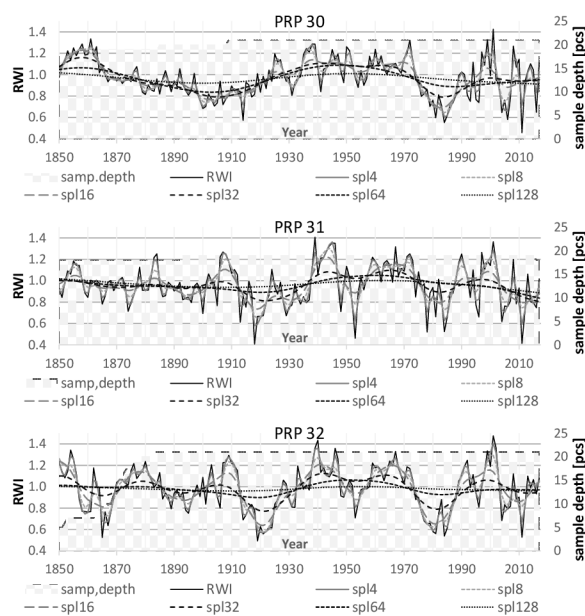


Fig. 2. Standardized ring-width chronologies of European beech on permanent research plots 30, 31 and 32 with added splines and sample depth (RWI – ring-width index, spl4 – spline 4 years, spl8 – spline 8 years, spl16 – spline 16 years, spl32 – spline 32 years, spl64 – spline 64 years, spl128 – spline 128 years).

On Boberská stráň, beech stands generally show great plasticity of radial growth (Fig. 2). The analysis of climatically significant years since the mid-19th century for all PRPs shows major significances as late as in 2011, 2016 and 2017. During the 3th to 8th May in 2011 the temperature was $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$, which these extreme late spring frosts damaged the fresh budding leaves and negatively affected whole growth of European beech in season 2011. The year of 2016 was specific for frost damage of the assimilation apparatus, serious infestation with beech-leaf gall midge and a significantly low precipitation of about 1 000 mm (300 mm below an average).

Forest stands on each PRP developed differently, while the longest, 17-year periodic growth cycle of beech occurred in PRP 31; the following cycles repeated every 2, 5, 6 and 7 years (Fig. 3). In PRP 30, the cycles repeated mostly in periods from 10 to 16 years. PRP 32 witnesses small cycles from 2 years and significant periods from 6–7, 10 and 18. Overall, in all PRPs, periods from 10 to 18 years prevail (Fig. 3).

3.2. Effects of temperature and precipitation on radial growth

In term of monthly air temperatures in relation to the average annual radial growth of beech, the growth responds positively in May of the previous year, where significant ($P < 0.05$) values ($r = 0.30 - 0.37$) were found for PRP 30 and 31 (Fig. 4). Other significant months are January and February of the current year, when PRP 31 and 32 are significant ($r = 0.23 - 0.42$) and PRP 30 ($r = 0.24$) shifts the relation to February and March (i.e. by one month). In August of the current year, all stands on the PRPs ($r = 0.28 - 0.44$) responded significantly, with a longer response in PRP 32 – from July to August. In total, PRP 32 responds most significantly, followed by PRP 30, where a minor trend is apparent during growing periods, depending on the linear curve. All PRP stands show a rising positive trend of temperature effects in individual months (Fig. 4).

The effect of monthly sum of precipitation on the PRPs stands varies during vegetation periods (Fig. 5). The first significant month is August of the previous year,

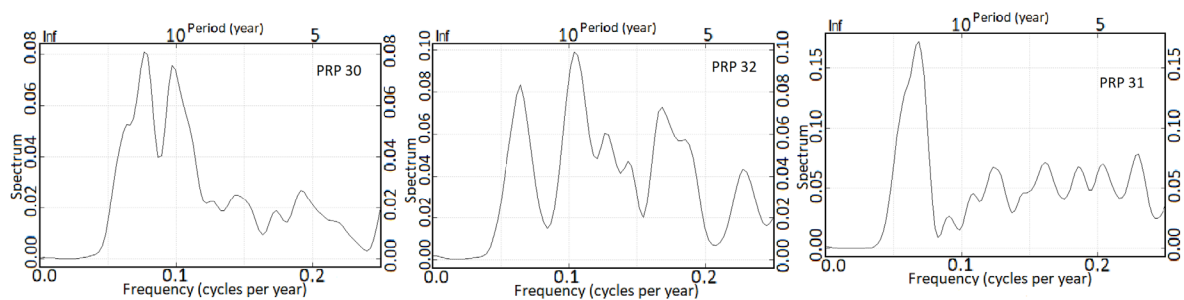


Fig. 3. Single spectral analysis of the indexed ring-width chronology for permanent research plot 30, 31 and 32, with middle pass filtering from 1 to 20 years cycles.

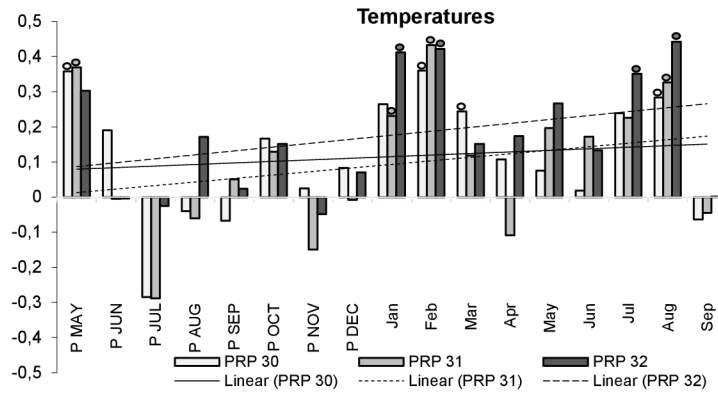


Fig. 4. The values of correlation coefficients of the regional residual index tree-ring chronology of European beech with the monthly temperatures from May of the previous year (P) to September of the current year for the period of 1976–2017 for. Values are statistically significant ($\alpha = 0.05$) and marked with round symbol and linear excel function is calculated for each PRP.

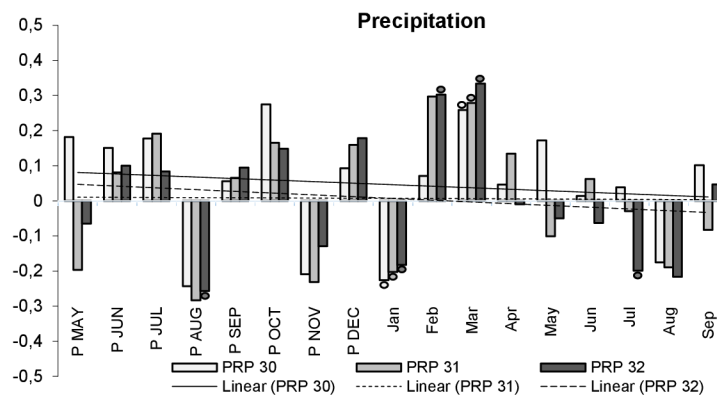


Fig. 5. The values of correlation coefficients of the regional residual index tree-ring chronology of European beech with the monthly precipitation from May of the previous year (P) to September of the current year for the period of 1976–2017. Values are statistically significant ($\alpha = 0.05$) and marked with round symbol and linear excel function is calculated for each PRP.

when the negative correlation was significant only in PRP 32 ($r = -0.26$). January of the current year is another significant month, when the negative relationship in the stands on all PRPs was significantly demonstrated ($r = 0.18 - 0.23$). Positive correlation was found in March of the current year in stands on all PRPs ($r = 0.28 - 0.33$) and in February of the current year in the stand on PRP 32 ($r = 0.30$). Another significant negative correlation was found in July of the current year ($r = 0.20$). Overall, the growing season shows an increasing negative influence of precipitation on radial growth of European beech (linear curve of all the plots; Fig. 5).

The main factor influencing the diameter increment of European beech in the study area according to regression quadratic model was the temperature (Fig. 6). Annual average temperature had significantly higher effect on radial growth compared to an annual sum of precipitation. Diameter increment only slightly increased with increasing precipitation, while optimal growth was observed in the range of annual air temperature from 5.5 to 6.5 °C.

3.3. Interactions between radial growth and climate

In terms of relationships between climate and radial growth presenting by PCA, the first ordination axis explains 32.7% of data variability, the first two axes together explain 50.0% and the first four axes 72.2% (Fig. 7). The x-axis illustrates the radial growth of beech with temperature parameters and the second y-axis represents the prevailing precipitation amount. Ring width index was positively correlated with temperature in January to March, out of the growing season and in the growing season of the current year, while temperature in the previous year had low effect on diameter increment. In terms of precipitation, the highest positive correlation of radial growth with precipitation was observed from January to March and out of the growing season of the current year, but these precipitations had small explanatory variable in the ordination diagram. Overall, the effect of temperature on increment was more significant than that of precipitation. Comparing similarity of growth on particular PRPs, diameter increment of beech on PRP 30

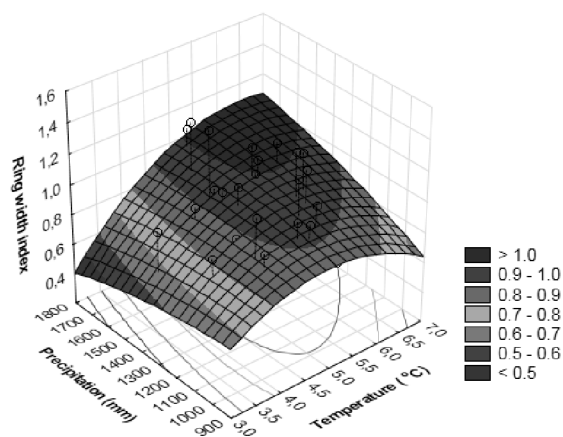


Fig. 6. Response of mean ring width index of European beech to annual sum of precipitation and annual mean temperature for all stands (regression quadratic model, years 1976–2017).

and 31 was very close to each other compared to PRP 32. Species diversity diagram showed that years 2007, 2014, 2015 and 2016 brought the highest values.

4. Discussion

A standard dendrochronological analysis suggests that all studied PRPs showed increments of 0.4 to 1.4 RWI, which is close to the results obtained from the nearby Orlické hory Mountains, where the index reached similar values 0.4 – 1.6 RWI (Králíček et al. 2017). Foreign studies also show a similar range of values. For example, in southern Sweden, RWI ranges from 0.4 to 1.6 (Bolte et al. 2010).

The development of studied stands was affected by intensive thinning interventions in 1953 (on PRP 31 and 32) and 1954 (on PRP 30), in response to severe frost damage of the stands (beech crown breakage) at the end of winter 1952–1953. The ring series on studied PRPs also show a significant decrease in radial growth during 1975–1989, caused by effect of air-pollution load. Between 1980–1986 average SO₂ deposition from the EPO II thermal power plant in Poříčí reached to 59 µg m⁻³, respectively seventeen times higher concentration than nowadays (Samec & Vránová 2005; Tesař et al. 2011). Air pollution impact on radial growth is well documented in Norway spruce in the Krkonoše Mountains and the whole Sudeten system (Kroupová 2002; Rydval & Wilson 2012; Vacek et al. 2013; Kolář et al. 2015), less in European beech (Vacek & Hejcman 2012; Králíček et al. 2017). In early spring 1981, beech crowns were heavily

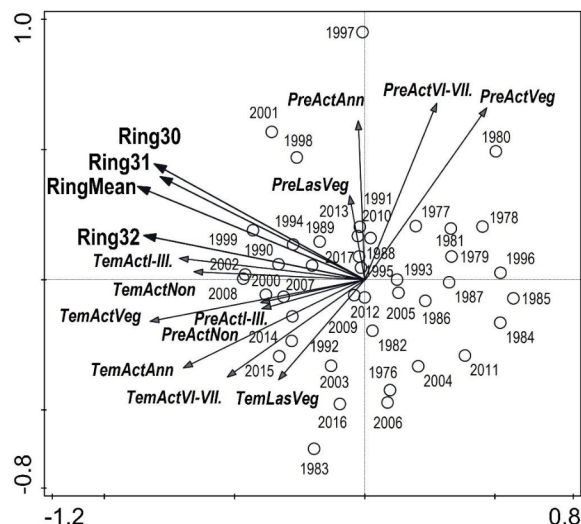


Fig. 7. Ordination diagram of PCA showing relationships between climate data (Tem – mean temperature, Pre – sum of precipitation, Act – current year, Las – previous year, Veg – growing season, NonVeg – out of growing season, I–III, VI–VII – months) and radial growth (Ring – tree-ring width index) of beech forest stands (PRP 30, 31, 32 and Mean); codes O indicate years 1976–2017.

damaged by ice-load and, consequently, the assimilation apparatus of the trees suffered from frost. The air-pollution calamity in 1984 was followed by strong infestation with beech scale (*Cryptococcus fagi*) and beech-leaf gall midge (*Mikiola fagi*) (Vacek 1988). Furthermore, lower temperatures during the winter period in 1996 combined with the reverberating pollution load led to beech scale outbreak, recorded in other mountain regions of the Czech Republic as well (Králíček et al. 2017). A similar situation occurred in Europe in 1976 when beech scale along with extreme drought caused considerable damage and decreased radial growth of European beech (Wainhouse et al. 1988). Negative impact of beech scale on beech growth was also recorded in America (Gavin & Peart 1993; Kasson & Livingston 2009, 2012). To a lesser extent, ice-load induced crown damage repeated in winter 2004–2005. Above mentioned types of damage on many PRPs in the Krkonoše Mountains was reported by Vacek et al. (2007). Assimilation apparatus was severely damaged at the beginning of the vegetation period in 2011 and, less severely, in 2016. In respect to the economic function of studied beech stands until 1963, their development on all PRPs was different, which has also been confirmed (Kooijman et al. 2000).

A spectral dendrochronology analysis shows, in all PRP stands, 10 – 18 years' cycles occurring in the largest frequency spectrum. Short, mostly 2-year cycles are usually rationalized by fructification and seed-year cyclicality (Övergaard 2010; Nussbaumer et al. 2018) or local climate particularities associated with fructification of European beech (Drobyshev et al. 2010) or other events such as spring late frosts (Vacek & Hejcman 2012). More

significant cycles occur in 10–18 years' periods, mainly due to repeated extensive harvesting or climatic extremes in given periods (Mausolf et al. 2018). However, detailed studies on cyclical growth of European beech in the Sudeten system are yet to be carried out.

The relation of European beech radial growth to monthly sum of precipitation was similar in all stands on the PRPs. Negative correlations were recorded in August of the previous year and in January of the current year. Positive correlations were observed in February and March of the current year. Statistically significant negative correlations were also documented in July and August of the current year. The results are comparable with Králíček et al. (2017), who present similar positive correlations until March and negative impact of precipitation on radial growth in July. In Sweden, European beech does not suffer from the lack of precipitation as much as in our country, but a minor positive effect of precipitation in early spring is detectable (Drobyshev et al. 2010).

The relation of radial growth of European beech to average monthly temperatures suggest the prevailing positive influence of temperatures, except in July of previous year. In rare cases, however, extreme frosts negatively affected radial growth in late spring (in 1996, 2011 and 2016). Similar events are reported by Vacek & Hejcman (2012) from the western parts of Krkonoše. In our study, the most significant month influencing radial growth was August in current year, similarly such as in beech forests in Balkan (Tegel et al. 2014). A comparison of our results and the study of European beech from the Orlické hory Mountains (Králíček et al. 2017) shows that our results from the Krkonoše Mts. differ in these correlations by two months earlier. Also, the results of a study carried out in Turkey show a similar trend of a shift in *Fagus orientalis* (Köse & Güner 2012). In contrast to the Swedish growth conditions (Drobyshev et al. 2010), the correlation we have found is significantly positive.

The main climatic factor affecting the growth of beech trees in the studied montane localities is the positive effect of temperature. This was also observed by Vacek & Hejcman (2012) in beech stands at higher altitudes of the Krkonoše Mountains. On the contrary, at lower altitudes of the Czech Republic high temperatures were a limiting factor of growth, especially in the growing season (Remeš et al. 2015). The altitude significantly supports the influence of climatic factors on radial growth; the positive effect of temperature on radial growth increases with the altitude, especially in June and July (Meyer & Bräker 2001; Andreassen et al. 2006; Hauck et al. 2012). A similar situation is reported from Germany and Italy, where the temperature had significant positive influence in May in montane areas (1560 m a.s.l.), while in the lowlands (420–450 m a.s.l.) the temperature in June had a negative impact on the radial growth of the beech (Skomarkova et al. 2006). In contrast, Opała-Owczarek et al. (2018) documented that the tempera-

ture from April to June is decisive for the radial growth in the mountainous parts of the Sudetes. The diameter increment is a slightly less influenced by precipitation, as described by regression quadratic model and PCA or foreign references (Ježík et al. 2016; Rohner et al. 2016). It can be assumed that the global warming and lack of precipitation will bring growth decline at lower altitudes and growth increase at higher altitudes in the centre of the beech distribution range (Penuelas et al. 2007; Kramer et al. 2010; Dulamsuren et al. 2017; Ruosteenoja et al. 2018). The trend is confirmed by gradual expansion of natural regeneration of beech in montane areas in recent years (Vacek et al. 2015c; Janik et al. 2016). Similarly, global climate change may lead to rapid decline in the growth of range-edge populations, consequent retreat of the beech distribution in southern Europe and conversely it spread to the north (Sykes & Prentice 1996; Jump et al. 2006). On the base of modern species distribution models, the ecological consequences of the range contractions would lead to serious nature conservation and forest management in future (Dyderski et al. 2018).

5. Conclusion

Growth and development of beech stands in the Krkonoše National Park is influenced by several abiotic (late frosts, droughts), biotic (beech scale, beech-leaf gall midge) and anthropogenic factors (extensive harvesting, air pollution load). The climatically significant years show that radial growth of the stands on the PRPs responded differently, but low temperatures during the growing season and lack of precipitation at the beginning of the year were the most important limiting factors. The overall effect of the average temperature on the beech diameter increase was significantly higher compared to precipitation. As regards the radial growth period, 2-year cycles were most often followed by cycles ranging from 10 to 18 years. Dendrochronological analyses of close-to-nature beech stands show us possible trends of their development in the ongoing global climate change, as European beech is considered to be one of the most important tree species in the Czech Republic.

Acknowledgement

This study was supported by the Czech University of Life Sciences Prague, Faculty of Forestry and Wood Sciences (No. IGA B03/18).

References

- Andreassen, K., Solberg, S., Tveito, O. E., Lystad, S. L., 2006: Regional differences in climatic responses of Norway spruce (*Picea abies* L. Karst) growth in Norway. *Forest Ecology and Management*, 222:211–221.

- Biondi, F., Waikul, K., 2004: DENDROCLIM2002 AC+ + program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers & Geosciences*, 30:303–311.
- Bolte, A., Hilbrig, L., Grundmann, B., Kampf, F., Brunet, J., Roloff, A., 2010: Climate change impacts on stand structure and competitive interactions in a southern Swedish spruce-beech forest. *European Journal of Forest Research*, 129:261–276.
- Bosela, M., Štefančík, I., Petráš, R., Vacek, S., 2016: The effects of climate warming on the growth of European beech forests depend critically on thinning strategy and site productivity. *Agricultural and Forest Meteorology*, 222:21–31.
- Brázdil, R., Trnka, M., Mikšovský, J., Tolasz, R., Dobrovolný, P., Rezníčková, L. et al., 2017: Drought events in the Czech Republic: past, present, future. In: 19th EGU General Assembly, proceedings from the conference held 23–28 April, 2017 in Vienna, Austria, 19285 p.
- Brázdil, R., Stucki, P., Szabó, P., Řezníčková, L., Dolák, L., Dobrovolný, P. et al., 2018: Windstorms and forest disturbances in the Czech Lands: 1801–2015. *Agricultural and Forest Meteorology*, 250:47–63.
- Bridgman, H. A., Davies, T. D., Jickells, T., Hunova, I., Tovey, K., Bridges, K. et al., 2002: Air pollution in the Krusne Hory region, Czech Republic during the 1990s. *Atmospheric Environment*, 36:3375–3389.
- Bunn, A., Korpela, M., 2018a: Time Series Analysis in dplR, 14 p.
- Bunn, A., Korpela, M., 2018b: Chronology Building in dplR, 13 p.
- Bytnerowicz, A., Omasa, K., Paoletti, E., 2007: Integrated effects of air pollution and climate change on forests: A northern hemisphere perspective. *Environmental Pollution*, 147:438–445.
- Cavin, L., Jump, A. S., 2017: Highest drought sensitivity and lowest resistance to growth suppression are found in the range core of the tree *Fagus sylvatica* L. not the equatorial range edge. *Global Change Biology*, 23:362–379.
- Christensen, M., Hahn, K., Mountford, E. P., Ódor, P., Standovár, T., Rozenberger, D. J. et al., 2005: Dead wood in European beech (*Fagus sylvatica*) forest reserves. *Forest Ecology and Management*, 210:267–282.
- Cicák, A., Mihál, I., Tsakov, H., Petkov, P., 2006: Actual status of the beech bark necrotic disease in North Western Bulgaria. *Journal of Forest Science*, 52:226–232.
- Dittmar, C., Zech, W., Elling, W., 2003: Growth variations of Common beech (*Fagus sylvatica* L.) under different climatic and environmental conditions in Europe—a dendroecological study. *Forest Ecology and Management*, 173:63–78.
- Drobyshev, I., Övergaard, R., Saygin, I., Niklasson, M., Hickler, T., Karlsson, M. et al., 2010: Masting behaviour and dendrochronology of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in southern Sweden. *Forest Ecology and Management*, 259:2160–2171.
- Dulamsuren, C., Hauck, M., Kopp, G., Ruff, M., Leuschner, C., 2017: European beech responds to climate change with growth decline at lower, and growth increase at higher elevations in the center of its distribution range (SW Germany). *Trees - Structure and Function*, 31:673–686.
- Dyderski, M. K., Paž, S., Frelich, L. E., Jagodziński, A. M., 2018: How much does climate change threaten European forest tree species distributions? *Global Change Biology*, 24:1150–1163.
- Filippo, A. D. I., Biondi, F., Maugeri, M., 2012: Bioclimate and growth history affect beech lifespan in the Italian Alps and Apennines. *Global Change Biology*, 18:960–972.
- Gavin, D. G., Peart, D. R., 1993: Effects of beech bark disease on the growth of American beech (*Fagus grandifolia*). *Canadian Journal of Forest Research*, 23:1566–1575.
- Geßler, A., Keitel, C., Matyssek, R., Seiler, W., Rennenberg, H., 2007: Potential risks for European beech (*Fagus sylvatica* L.) in a changing climate Potential risks for European beech (*Fagus sylvatica* L.). *Trees*, 21:1–11.
- Granier, A., Reichstein, M., Bréda, N., Janssens, I. A., Falge, E., Ciais, P., 2007: Evidence for soil water control on carbon and water dynamics in European forests during the extremely dry year: 2003. *Agricultural and Forest Meteorology*, 143:123–145.
- Hartl-Meier, C., Zang, C., Büntgen, U., Esper, J., Rothe, A., Göttelein, A. et al., 2018: Uniform climate sensitivity in tree-ring stable isotopes across species and sites in a mid-latitude temperate forest. *Tree Physiology*, 35:4–15.
- Hauck, M., Zimmermann, J., Jacob, M., Dulamsuren, C., Bade, C., Ahrends, B., Leuschner, C., 2012: Rapid recovery of stem increment in Norway spruce at reduced SO₂ levels in the Harz Mountains, Germany. *Environmental Pollution*, 164:132–141.
- Holuša, J., Lubojacký, J., Čurn, V., Tonka, T., Lukášová, K., Horák, J., 2018: Combined effects of drought stress and Armillaria infection on tree mortality in Norway spruce plantations. *Forest Ecology and Management*, 427:434–455.
- Hünová, I., Schreiberová, M., 2012: Ambient ozone phytotoxic potential over the Czech forests as assessed by AOT40. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 5:153.
- IFER 2017: Field-Map Software & Hardware Catalogue – www.fieldmap.com. IFER – Monitoring and Mapping Solutions, Ltd., Jílové u Prahy, 51 p.

- Janík, D., Král, K., Adam, D., Hort, L., Samonil, P., Unar, P. et al., 2016: Tree spatial patterns of *Fagus sylvatica* expansion over 37 years. *Forest Ecology and Management*, 375:134–145.
- Ježík, M., Blaženec, M., Kučera, J., Střelcová, K., Ditmarová, L., 2016: The response of intra-annual stem circumference increase of young European beech provenances to 2012–2014 weather variability. *IForest*, 9:960–969.
- Jump, A. S., Hunt, J. M., Penuelas, J., 2006: Rapid climate change-related growth decline at the southern range edge of *Fagus sylvatica*. *Global Change Biology*, 12:2163–2174.
- Kasson, M. T., Livingston, W. H., 2009: Spatial distribution of *Neonectria* species associated with beech bark disease in northern Maine. *Mycologia*, 101:190–195.
- Kasson, M. T., Livingston, W. H., 2012: Relationships among beech bark disease, climate, radial growth response and mortality of American beech in northern Maine, USA. *Forest Pathology*, 42:199–212.
- Kolář, T., Čermák, P., Oulehle, F., Trnka, M., Štěpánek, P., Cudlín, P. et al., 2015: Pollution control enhanced spruce growth in the “Black Triangle” near the Czech–Polish border. *Science of the Total Environment*, 538:703–711.
- Kooijman, A. M., Emmer, I. M., Fanta, J., Sevink, J., 2000: Natural regeneration potential of the degraded Krkonoše forests. *Land Degradation and Development*, 11:459–473.
- Köse, N., Güner, H. T., 2012: The effect of temperature and precipitation on the intra-annual radial growth of *Fagus orientalis* Lipsky in Artvin, Turkey. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 36:501–509.
- Král, J., Vacek, S., Vacek, Z., Putalová, T., Bulušek, D., Štefančík, I., 2015: Structure, development and health status of spruce forests affected by air pollution in the western Krkonoše Mts. in 1979–2014. *Forestry Journal*, 61:175–187.
- Králíček, I., Vacek, Z., Vacek, S., Remeš, J., Bulušek, D., Král, J. et al., 2017: Dynamics and structure of mountain autochthonous spruce-beech forests: Impact of hilltop phenomenon, air pollutants and climate. *Dendrobiology*, 77:119–137.
- Kramer, K., Degen, B., Buschbom, J., Hickler, T., Thuiller, W., Sykes, M. T. et al., 2010: Modelling exploration of the future of European beech (*Fagus sylvatica* L.) under climate change—range, abundance, genetic diversity and adaptive response. *Forest Ecology and Management*, 259:2213–2222.
- Kroupová, M., 2002: Dendroecological study of spruce growth in regions under long-term air pollution load. *Journal of Forest Science*, 48:536–548.
- Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbati, A., Garcia-Gonzalo, J. et al., 2010: Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 259:698–709.
- Ling, K. A., Power, S. A., Ashmore, M. R., 1993: A survey of the health of *Fagus sylvatica* in southern Britain. *Journal of Applied Ecology*, 30:295–306.
- Lokvenc, T., 1978: Toulky krkonošskou minulostí. Kruh, Hradec Králové, 267 p.
- Matějka, K., Vacek, S., Podrázský, V., 2010: Development of forest soils in the Giant Mts. in the period 1980–2009. *Journal of Forest Science*, 56:485–504.
- Materna, J., 1989: Air pollution and forestry in Czechoslovakia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 12:227–239.
- Mausolf, K., Wilm, P., Härdtle, W., Jansen, K., Schuldt, B., Sturm, K. et al., 2018: Higher drought sensitivity of radial growth of European beech in managed than in unmanaged forests. *Science of the Total Environment*, 642:1201–1208.
- Meyer, F. D., Bräker, O. U., 2001: Climate response in dominant and suppressed spruce trees, *Picea abies* (L.) Karst., on a subalpine and lower montane site in Switzerland. *Ecoscience*, 8:105–114.
- Mihál, I., Cicák, A., Tsakov, H., 2014: Selected biotic vectors transmitting beech bark necrotic disease in Central and South-Eastern Europe. *Folia Oecologica*, 41:62–74.
- Ministry of Agriculture, 2017: Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2016. Praha, 132 p.
- Motta, E., Annesi, T., Pane, A., Cooke, D. E. L., Cacciola, S. O., 2003: A new *Phytophthora* sp. causing a basal canker on beech in Italy. *Plant Disease*, 87:1005–1005.
- Nožička, J., 1961: Vývoj krkonošských lesů na Vrchlabsku a Maršovsku. *Práce VÜLHM*, 18:161–228.
- Nussbaumer, A., Waldner, P., Apuhtin, V., Aytar, F., Benham, S., Bussotti, F. et al., 2018: Impact of weather cues and resource dynamics on mast occurrence in the main forest tree species in Europe. *Forest Ecology and Management*, 429:336–350.
- Opała-Owczarek, M., Błaś, M., Owczarek, P., Sobik, M., Godek, M., 2019: A dendroclimatological study of east- and west-facing slopes in mountainous areas subjected to strong air pollution (the Sudetes, Central Europe), *Physical Geography*, 40:186–208.
- Övergaard, R., 2010: Seed Production and Natural Regeneration of Beech (*Fagus sylvatica* L.) in Southern Sweden. *Swedish University of Agricultural Sciences*, 74 p.
- Peters, R., 1997: Beech Forests. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, p. 39–40.
- Paoletti, E., Schaub, M., Matyssek, R., Wieser, G., Augustaitis, A., Bastrup-Birk, A. M. et al., 2010: Advances of air pollution science: from forest decline to multiple-stress effects on forest ecosystem services. *Environmental Pollution*, 158:1986–1989.

- Penuelas, J., Ogaya, R., Boada, M., S. Jump, A., 2007: Migration, invasion and decline: changes in recruitment and forest structure in a warming-linked shift of European beech forest in Catalonia (NE Spain). *Ecography*, 30:829–837.
- Power, S. A., Ashmore, M. R., 1996: Nutrient relations and root mycorrhizal status of healthy and declining beech (*Fagus sylvatica* L.) in southern Britain. *Water, Air, and Soil Pollution*, 86:317–333.
- Remeš, J., Bílek, L., Novák, J., Vacek, Z., Vacek, S., Putalová, T., Koubek, L., 2015: Diameter increment of beech in relation to social position of trees, climate characteristics and thinning intensity. *Journal of Forest Science*, 61:456–464.
- Rohner, B., Weber, P., Thürig, E., 2016: Bridging tree rings and forest inventories: How climate effects on spruce and beech growth aggregate over time. *Forest Ecology and Management*, 360:159–169.
- Ruosteenoja, K., Markkanen, T., Venäläinen, A., Räisänen, P., Peltola, H., 2018: Seasonal soil moisture and drought occurrence in Europe in CMIP5 projections for the 21st century. *Climate Dynamics*, 50:1177–1192.
- Rydval, M., Wilson, R., 2012: The impact of industrial SO₂ pollution on north Bohemia conifers. *Water, Air, & Soil Pollution*, 223:5727–5744.
- Samec, P., Vránová, V., 2005: Bioindication of soil sorption properties in the substitute tree stands at submontane conditions. In: Šimková, P.: *MendelNet 2005, Contemporary state and development trends of forest in cultural landscape*. Brno, Mendelova univerzita v Brně, p. 113–119.
- Schütz, J. P., 2001: *Der Plenterwald*. Parey Buch-verlag, Berlin, 207 p.
- Skomarkova, M. V., Vaganov, E. A., Mund, M., Knohl, A., Linke, P., Boerner, A., Schulze, E. D., 2006: Inter-annual and seasonal variability of radial growth, wood density and carbon isotope ratios in tree rings of beech (*Fagus sylvatica*) growing in Germany and Italy. *Trees*, 20:571–586.
- Slanař, J., Vacek, Z., Vacek, S., Bulušek, D., Cukor, J., Štefančík, I. et al., 2017: Long-term transformation of submontane spruce-beech forests in the Jizerské hory Mts.: Dynamics of natural regeneration. *Central European Forestry Journal*, 63:212–224.
- Sykes, M. T., Prentice, I. C., 1996: Climate change, tree species distributions and forest dynamics: a case study in the mixed conifer/northern hardwoods zone of northern Europe. *Climatic Change*, 34:161–177.
- Špulák, O., Souček, J., 2010: The Sibyla model and development of beech forests affected by air pollution. *Central European Journal of Biology*, 5:317–383.
- Team R Core, 2018: *A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria.
- Tegel, W., Seim, A., Hakelberg, D., Hoffmann, S., Panev, M., Westphal, T., Büntgen, U., 2014: A recent growth increase of European beech (*Fagus sylvatica* L.) at its Mediterranean distribution limit contradicts drought stress. *European Journal of Forest Research*, 133:61–71.
- Tesař, V., Balcar, V., Lochman, V., Nehyba, J., 2011. *Přestavba lesa zasaženého imisemi na Trutnovsku*. Brno, Mendelova univerzita v Brně, 177 p.
- Tolazs, R., 2007: *Atlas podnebí Česka*. Praha a Olomouc, 256 p.
- Trnka, M., Brázdil, R., Možný, M., Štěpánek, P., Dobrovolný, P., Zahradníček, P. et al., 2015: Soil moisture trends in the Czech Republic between 1961 and 2012. *International Journal of Climatology*, 35:3733–3747.
- Vacek, S., 1988: Dynamics of the defoliation of beech forest stands under the influence of air pollution. In: 3. IUFRO Buchensymposium. Zvolen, 3. 6. – 6. 6. 1988. Zvolen, VŠLD, p. 377–388.
- Vacek, S., Matějka, K., Simon, J., Malík, V., Schwarz, O., Podrázský, V. et al., 2007: Zdravotní stav a dynamika lesních ekosystémů Krkonoš pod stresem vyvolaným znečištěním ovzduší. *Folia forestalia Bohemica, Kostelec nad Černými lesy, Lesnická práce*, 4:216 p.
- Vacek, S., Nosková, I., Bílek, L., Vacek, Z., Schwarz, O., 2010: Regeneration of forest stands on permanent research plots in the Krkonoše Mts. *Journal of Forest Science*, 56:541–554.
- Vacek, S., Hejzman, M., 2012: Natural layering, foliation, fertility and plant species composition of a *Fagus sylvatica* stand above the alpine timberline in the Giant (Krkonoše) Mts., Czech Republic. *European Journal of Forest Research*, 131:799–810.
- Vacek, S., Bílek, L., Schwarz, O., Hejzmanová, P., Mikeska, M., 2013: Effect of Air Pollution on the Health Status of Spruce Stands Effect of Air Pollution on the Health Status of Spruce Stands. *Mountain Research and Development*, 33:40–50.
- Vacek, S., Hůnová, I., Vacek, Z., Hejzmanová, P., Podrázský, V., Král, J., 2015a: Effects of air pollution and climatic factors on Norway spruce forests in the Orlické hory Mts. (Czech Republic) 1979–2014. *European Journal of Forest Research*, 134:1127–1142.
- Vacek, S., Černý, T., Vacek, Z., Podrázský, V., Mikeska, M., Králíček, I., 2017: Long-term changes in vegetation and site conditions in beech and spruce forests of lower mountain ranges of Central Europe. *Forest Ecology and Management*, 398:75–90.
- Vacek, Z., Vacek, S., Bílek, L., Remeš, J., Štefančík, I., 2015b: Changes in horizontal structure of natural beech forests on an altitudinal gradient in the Sude-tes. *Dendrobiology*, 73:33–45.
- Vacek, Z., Vacek, S., Podrázský, V., Bílek, L., Štefančík, I., Moser, W. K. et al., 2015c: Effect of tree layer and microsite on the variability of natural regeneration in autochthonous beech forests. *Polish Journal of Ecology*, 63:233–246.

- Viewegh, J., Kusbach, A., Mikeska, M., 2003: Czech forest ecosystem classification. *Journal of Forest Science*, 49:85–93.
- Wainhouse, D., Gate, I. M., Lonsdale, D., 1988: Beech Resistance to the Beech Scale: A Variety of Defenses. In: Mattson, V. J., Leveux, J., Bernard-Dagan, C. (eds.): *Mechanisms of Woody Plant Defenses against Insects*. Springer, New York, NY, p. 277–293.
- Urban, J., 2000: Beech gall midge (*Mikiola fagi* Htg.) and its natural enemies. *Journal of Forest Science*, 46:543–568.
- Zang, C., Hartl-Meier, C., Dittmar, C., Rothe, A., Menzel, A., 2014: Patterns of drought tolerance in major European temperate forest trees: Climatic drivers and levels of variability. *Global Change Biology*, 20:3767–3779.
- Zang, C., Rothe, A., Weis, W., Pretzsch, H., 2011: Zur Baumarteneignung bei Klimawandel: Ableitung der trockenstress-anfälligkeit wichtiger Waldbaumarten aus Jahrringbreiten. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, 182:98–112.

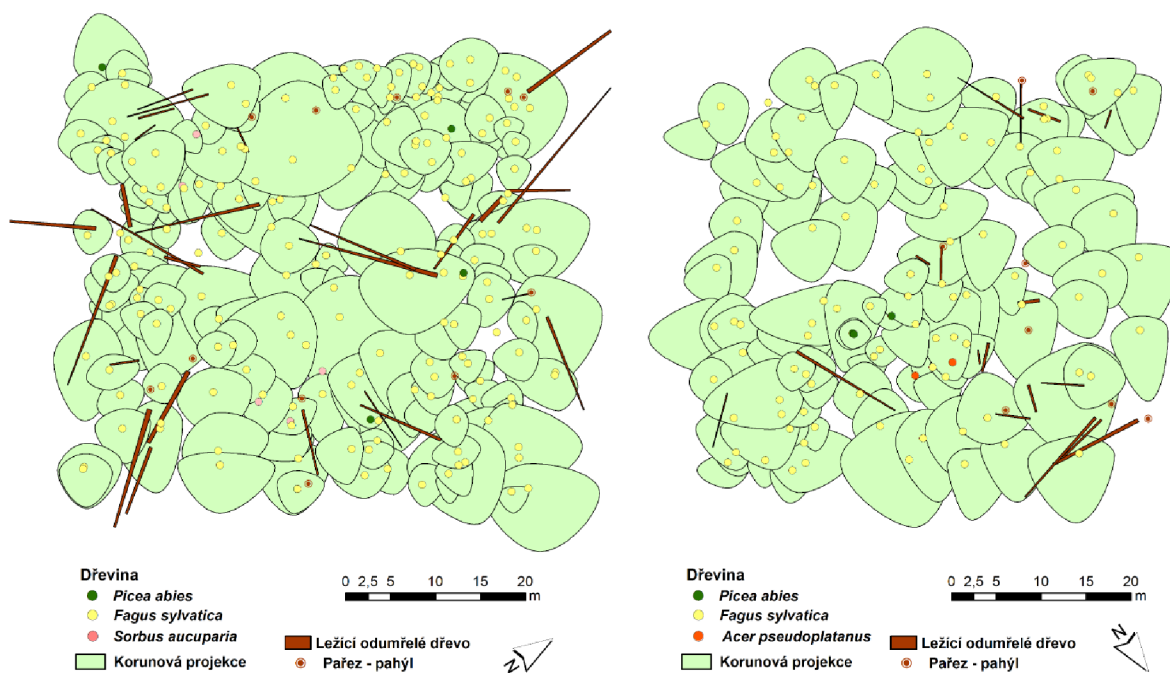
5.1.2. Plocha slunečních skvrn jako neprozkoumaný trend v radiálním růstu buku lesního v Krkonoších: lesnická věda z jiné perspektivy

V této publikaci jsou hodnoceny výzkumné plochy z hlediska homogenní nebo heterogenní struktury bukových porostů v Krkonoších na Rýchorách a také jsou posuzovány různé časové periody radiálního růstu během obhospodařování lesních porostů, během imisní kalamity i po založení národního parku. Tato publikace hodnotí radiální přírůst buku lesního a klimatické faktory, které ho ovlivňují. Zkoumanými faktory jsou roční srážky a teploty vzduchu, ale také srážky a teploty během vegetační sezony. Do této studie byl také přidán vliv slunečních cyklů v podobě plochy slunečních skvrn. V článku jsou použity korelační tabulky, lineární regresní analýza, PCA diagram i waveletová analýza pro popis cyklického růstu buku lesního. Tato publikace též dokládá signifikantní korelaci radiálního přírůstu buku lesního se slunečním cyklem, který vykazuje vyšší korelace než se srážkami nebo teplotami. Výsledky studie také popisují, že nejvíce strukturálně rozrůzněné výzkumné plochy reagují více na teploty a porosty se stejnorodou strukturou více reagují na sluneční cyklus (Šimůnek et al. 2020a).

Citace článku:

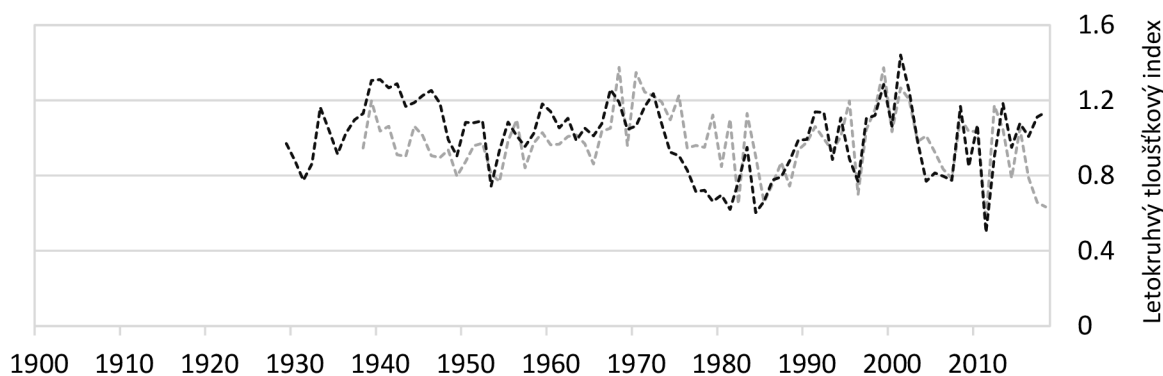
ŠIMŮNEK, V., SHARMA, R. P., VACEK, Z., VACEK, S., HŮNOVÁ, I., (2020): Sunspot area as unexplored trend inside radial growth of European beech in Krkonoše Mountains: a forest science from different perspective. *European Journal of Forest Research*, 139: 5; doi.org/10.1007/s10342-020-01302-7.

V této publikaci byly využity strukturální indexy tak, aby bylo možné kategorizovat strukturu bukových porostů. Struktura bučin byla hodnocena tak, aby jednotlivé porosty mohly být kvantifikovány do homogenních nebo heterogenních bukových porostů. Na ukázkou tohoto zařazení jsme vybrali výzkumnou plochu 29 a 32 na Rýchorách ve východních Krkonoších. Tyto výzkumné plochy jsou popsány tabulkou základních stanovištních porostních charakteristik (Tab. 1) a ukázkou struktury na Obr. 3. Výsledky z terénního šetření struktury porostů buku lesního byly následně použity v tabulce a porovnány s dendrochronologickými křivkami (Obr. 4). Homogenní a heterogenní porosty buku lesního reagují odlišně dle své struktury, což je hodnoceno v plné míře v publikovaném článku níže (Šimůnek et al. 2020a).



Obr. 3: Ukázka vizualizace struktury výzkumných ploch 29 (vpravo) a 32 (vlevo) na Rýchorách ve východních Krkonoších v roce 2017.

Dendrochronologické křivky ukazují, že například výzkumná plocha 29 reaguje menším poklesem na imisní zátěž v 70. a 80. letech minulého století. Na dendrochronologických křivkách je také vidět, že i v roce 2011 došlo u homogenních porostů k nepatrně většímu poklesu letokruhového tloušťkového indexu než u heterogenních bučin. Celkově lépe přirůstají homogenní bučiny, které mají i nižší celkovou vertikální diverzitu dle Tab. 1.



Obr. 4: Ukázka letokruhové křivky buku lesního na výzkumných plochách 29 a 32.

Příklad základní charakteristiky ploch studovaných porostů buku lesního je uveden v Tab. 1. Struktura bukových porostů pro tuto publikaci byla hodnocena indexem horizontální struktury, který většinu výzkumných ploch zařadil do náhodného rozmístění stromů. Pro náš příklad vidíme, že heterogenní i homogenní plochy mají náhodné rozmístění stromů na ploše. Vertikální struktura na výzkumných plochách ukazuje, že většina výzkumných ploch na Rýchorách je spíše výškově rozrůzněná. Nicméně nejlépe zhodnotil strukturu heterogenních nebo homogenních porostů index celkové diversity, který ukázal, že výzkumné plochy s vyšším číslem tohoto indexu jsou stabilnější z hlediska radiálních výkyvů růstu. Celkový popis indexů struktury se nachází v článku níže této kapitoly (Šimůnek et al. 2020a).

Tabulka 1: Základní charakteristika ploch pro popis struktury porostů

Číslo plochy	Nadm. výška (m)	Dřevina	Věk (rok)	Výška (m)	Tloušťka (cm)	Objem (m ³ /ha)	Lesní typ	Zakmenění	Horizontální struktura [R (C&Ei)]	Vertikální struktura [TM _h (Fi)]	Celková diversity [B (J&Di)]
29	950	Buk	183	25	47	210	6S	0.7	0,96 ^{RN}	0,37↓	7,52 ↑↑
		Smrk		27	45	23					
32	760	Buk	150	26	41	313	5B	0.8	1,15 ^{RN}	0,15↓↓	4,66 ↓
		Jeřáb		26	35	34					

Popisky: Klasifikace lesního typu: 6S – *Piceeto-Fagetum mesotrophicum* (Svěží smrková bučina), 5B – *Abieto-Fagetum eutrophicum* (Bohatá jedlová bučina) (Viewegh et al. 2003); Horizontální struktura: AG – agregovaná, RN – náhodná a RG – normální rozmístění stromů (signifikance při, $\alpha = 0.05$); Šipky: ↓↓ - nízká, ↓ - střední, ↑ - vysoká a ↑↑ - velmi vysoká diversity



Sunspot area as unexplored trend inside radial growth of European beech in Krkonoše Mountains: a forest science from different perspective

Václav Šimůnek¹ · Ram P. Sharma^{1,2} · Zdeněk Vacek¹ · Stanislav Vacek¹ · Iva Hůnová³

Received: 19 April 2020 / Revised: 16 June 2020 / Accepted: 22 June 2020
© Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2020

Abstract

Many studies have examined the relationships between the effects of the sunspot area and growth of trees; however, none of them considered European beech (*Fagus sylvatica* L.). We investigated the relationships between the sunspot area, climate factors (temperature and precipitation) and radial growth of beech in the Krkonoše Mts. in the Czech Republic. We used the core samples of 199 beech trees representing the century-long growth, two sets of climate data (local short-term data and general long-term climate data), and more than a century-long sunspot area dataset acquired from the National Oceanic Atmospheric Administration. Our results showed the significant effects of the sunspot area, temperature and precipitation on the radial growth of beech. The correlations between sunspot area and tree-ring width index varied from 0.9 to 0.5 in the period between 1986 and 2017, a period during which none of the significant anthropogenic disturbances occurred in the study area. The strong correlations were found between the sunspot area and climate factors for a longer period. The largest effect of the sunspot area on the radial growth was observed in the previous year, especially in growing season. Structurally diversified (heterogeneous) beech stands were less affected by the sunspot area compared to the homogeneous stands. In conclusion, the sunspot area is one of the important factors that significantly influence the radial growth of beech in the Krkonoše Mts. Our results will be useful for understanding beech forests in the context of global change, and will have an important contribution to the knowledge for predicting potential impact of the sunspot area on the Earth's surface.

Keywords *Fagus sylvatica* · Solar activity · Climate factors · Growth variability · Tree-ring width index · Central Europe

Introduction

The radial growth of European beech (*Fagus sylvatica* L.) is substantially influenced by natural factors and anthropogenic activities, such as precipitation, temperature (Stjepanović et al. 2018; Tognetti et al. 2019; Vacek et al. 2019a), forest management practices (Remeš et al. 2015; Mausolf et al.

2018; Štefančík et al. 2018), and air pollution (Špulák and Souček 2010; Králíček et al. 2017). There can be significant influence of the solar activity on beech growth; however, this has not been explored yet. The information of solar activities may be derived from the sunspot analysis and is closely linked to other solar phenomena, such as cosmic rays, solar irradiance, solar wind, radio wave flux, solar flares, and solar eruptions (Usoskin 2017). All these solar activities are driven by solar magnetic field, which also significantly influences the Earth's climate (Abbott and Juhl 2016; Le Mouél et al. 2019).

One of the most important indicators of the solar activities is the sunspot area—dark area on the sun's photosphere where the intense magnetic fields would loop up through the surface from the deep interior (Hathaway 2015). The sunspot area could have substantial effects on the Earth's atmosphere (Abbott and Juhl 2016). The sunspot area is significantly correlated with the glacier fluctuations in the past millennia and the sunspot area minima, indicating that solar irradiance

Communicated by Martina Meincken.

✉ Zdeněk Vacek
vacekz@fld.czu.cz

¹ Faculty of Forestry and Wood Sciences, Czech University of Life Sciences in Prague, Kamýcká 129, 165 00 Praha-Suchbát, Czech Republic

² Institute of Forestry, Tribhuvan University, Kathmandu 446 00, Nepal

³ Czech Hydrometeorological Institute, Na Šabatce 2050/17, 143 06 Praha 4-Komořan, Czech Republic

is playing an important role in the late Holocene climate change (Koch et al. 2007). The sunspot area observed in 11-year cycles could have the tendency of influencing the magnetic flux over the Earth in the 21st century (Bonev et al. 2004). The long-term magnetic variability of the Sun is caused by the solar activities, which is considered one of the main drivers of climate changes. The evidence of the sunspot area and other solar activities by the geomagnetic processes on the temperature record was found in the past (Sunkara and Tiwari 2016).

The relationship between tree growth and sunspot area may be substantial, as some past studies have indicated this possibility. For example, influence of the sunspot area was investigated by Perone et al. 2016, and this shows the evidence on the relationship between sunspot area, climate patterns and tree ring over the centuries. The studies on the influence of the sunspot area on the tree rings of the fossils go to the medieval times (Cecchini et al. 1996; Koch et al. 2007).

Some studies have reported the significant correlations between tree growth and sunspot area, for example, Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) (Dorotovič et al. 2014), cork oak (*Quercus suber* L.) (Surový et al. 2002), maritime pine (*Pinus pinaster* Aiton) and Swiss pine (*Pinus cembrae* L.) (Surový et al. 2010). All these studies have reported the negative correlations of the radial growth of trees with the sunspot area. Some other studies have reported the significant positive influence of the sunspot area on tree growth (Moseley 1941; Leavitt and Bannister 2009; Hathaway 2015). Most recent studies, such as Li et al. (2019) showed the substantial influence of the sunspot area and other factors on cypress trees in China, and Kasatkina et al. (2019) reported the sunspot activity imprinted in the tree rings of Scots pine in north-western Russia.

There can be strong relationships between the sunspot area and temperature on the Earth's surface, and thus the radial growth of trees is significantly influenced through the temperature changes caused by solar activities. The sunspot area influences the temperature of the Earth's atmosphere, which is confined mainly to the altitude between 1.5 to 8.5 km above the Earth's surface (Kumar et al. 2018). The relationship of the sunspot area and temperature might be weakened due to the intense global warming occurring in recent years. The solar activities could cause the variability of temperature in the long-run, but variability might be affected by other factors as well (Duan and Zhang 2014; Gupta et al. 2015). There is a well-established fact that the radioisotopes ^{14}C and ^{10}Be are produced in the Earth's stratosphere by the galactic cosmic rays on ^{14}N and ^{16}O . The oxidized ^{14}C and CO_2 are taken up by plants (Stuiver and Grootes 1980; Beer et al. 1990; Hathaway 2015). The galactic cosmic rays, which are influenced by solar cycles (Usoskin 2017), play major

roles in creating Earth's climate that is associated with cloudiness and amount of sunlight falling on the Earth's surface (Easterbrook 2016).

The temperature is one of the main factors influencing the radial growth of European beech at higher altitude areas (Vacek et al. 2015a, b; Králíček et al. 2017) and similar effect was also observed on Oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) (Köse and Güner 2012). The negative impact for growth of European beech due to low temperature in the spring and autumn has been demonstrated in Serbia (Stjepanović et al. 2018) and in the Krkonoše Mts., where frequent spring frost damages occur (Vacek et al. 2013; Šimůnek et al. 2019). The vulnerability of European beech to the damages caused by climate change may be associated with silvicultural tending, species composition, and stand management. For example, unmanaged forest is more resistant to the negative impact due to its complex structure compared to the managed forest (Mausolf et al. 2018), and mixed species forests are more resistant to the negative impact of climate changes than monospecific forests. European beech has a remarkable competitive adaptability through expansion of its crown throughout all seasons including dry season (González et al. 2019). European beech is an important constituent of European forests, and therefore contributes to economic advantages. This species has adequate ability to efficiently respond to increased CO_2 , precipitation and temperature, when sensitivity to the inner water use efficiency during photosynthesis increases with an increased CO_2 (Rezaie et al. 2018). European beech has a higher sensitivity to CO_2 compared to conifer species, for example, Scots pine (Conte et al. 2018) and Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) (Kováč et al. 2018). The increasing overall tree growth due to increased temperature and CO_2 (Lindner et al. 2010) may show the potential relationship between sunspot area, CO_2 , altitude, precipitation, temperature, and growth of European beech. The climate factors (Nováková 2007) and physiographic conditions (Kusiak et al. 2014) determined by the unique location of the Krkonoše Mts. forms an ideal sub-alpine taiga with growing unique tree species. This location is climatically linked to the taiga forests where other studies have shown the influence of the sunspot on radial growth (Shumilov et al. 2011; Kasatkina et al. 2019).

The impacts of climate changes and air pollution on beech forest have already been explored. However, none of the studies attempted to show the influence of the solar activities (e.g. sunspot area) on the beech forest. This study aimed to show the relationships between tree-ring growths of European beech for three different forest management periods including natural disaster period (air pollution or emission period) using radial growth data collected from a part of the Krkonoše Mts. forests (Czech Republic). The tree-ring growth of this area was also compared with other sites and stand characteristics. The influence of other climate factors

on the tree growth, such as precipitation and temperature in relation to the sunspot area was also investigated.

This study used a large number of core samples covering adequate growth dynamics of European beech in situation to the anthropo-historical influence in the Krkonoše Mts. of central Europe. More than a century-long sunspot area dataset acquired from the National Oceanic Atmospheric Administration (NOAA) (Hathaway et al. 2017) and two different climate databases (short-and long-term databases) were used.

Materials and methods

Study area

Our study was conducted on the six permanent research plots (PRPs 27–32) distributed across the altitudes between 740 and 1030 m a.s.l. in the Rýchory mountain which is located in the eastern part of the Krkonoše Mts, the Czech Republic (Fig. 1). European beech is a dominating species that accounts for 97–100%, other associate tree species are rowan (*Sorbus aucuparia* L.) 0–3.5%, Norway spruce 0–2.5% and sycamore maple (*Acer pseudoplatanus* L.) 0–0.6%. All the PRPs are located in the Krkonoše Mts. National Park, and this area was chosen for several studies in the past due to its uniqueness in terms of the historical and geological settings that have created ideal habitats and growing conditions for European beech. Beech

stands originated through natural regeneration (autochthonous beech stands) and influenced by small-scale shelter wood management system, which was applied until 1963 (declaration of the Krkonoše National Park). After that, anthropogenic influences substantially decreased, but there were severe influences of the air pollution on the beech forests during 1960–1980s (Matějka et al. 2010; Vacek et al. 2015a; Králíček et al. 2017). Beech forests were also significantly affected by climate extremes (late frost, winter desiccation, summer drought, windstorm) (Vacek and Hejzman 2012; Králíček et al. 2017; Vacek et al. 2019b).

The soil types of the study area are Cambisols (PRP 28-32) and Cryptopodzols (PRP 27) and bedrock consist of metamorphosed diabase and chlorite-seric shale. The mean annual temperature in the locality fluctuates around 5.2 °C with an average annual sum of precipitation 870 mm. The growing season lasts for 120-days (Špulák and Souček 2010; Putalová et al. 2019) with a mean temperature of 11.9 °C and with an annual sum of precipitation 640 mm. The study area experiences the humid continental climate characterized by hot and humid summers and mild cold to severely cold winters (classification symbol Dfb) according to the Köppen climate classification (Tolazs 2007). In terms of phytocoenology, PRP 27-29 belong to association *Calamagrostio villosae-Fagetum sylvaticae* Mikyška 1972 and PRP 30-32 belong to association *Dentario enneaphylli-Fagetum sylvaticae* Oberdorfer ex Matuszkiewicz et Matuszkiewicz 1960. Autochthonous

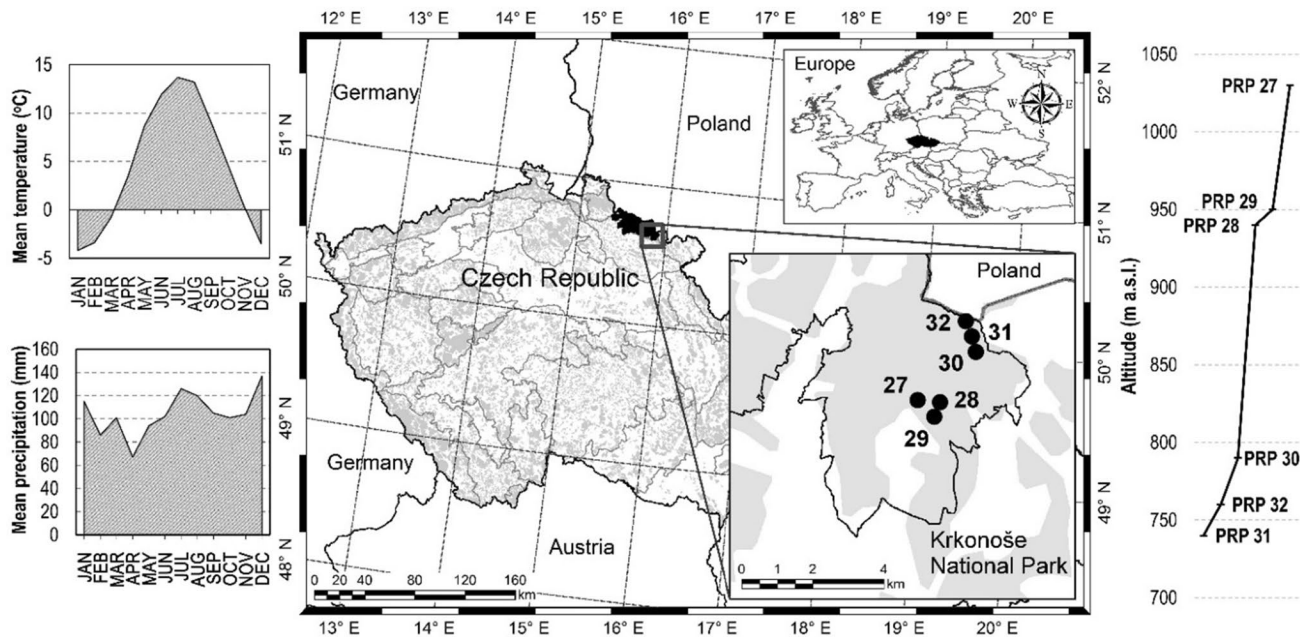


Fig. 1 Location of permanent research plots (PRPs) in European beech stands in a part of the Krkonoše Mountains; PRP numbers are 27, 28, 29, 30, 31, 32; grey area is forest cover; mean monthly climate values (1961–2017) (left); altitude of PRPs (right)

beech forests have been left to spontaneous development without direct anthropogenic influence since 1963.

Each PRP of 50×50 m in size (0.25 ha) was established in 1980 for long-term study of the Krkonoše Mountains forest ecosystem. The PRPs were measured using the Field-Map technology (IFER-Monitoring and Mapping Solutions Ltd.) and detailed stand and site characteristics are also found in numerous literatures (Vacek et al. 2010, 2015b). Table 1 shows the basic site and stand characteristics for all PRPs. The PRP 30-32 are characterized by nutrient-rich site conditions compared to the prevailing acidic site on other PRPs. The PRP 30-32 have random to regular horizontal stand structure (*R* index; Clark and Evans 1954), low height differentiation (*TM_h* index; Földner 1995) and homogeneous structure (*B* index, Jaehne and Dohrenbusch 1997), while random to aggregated spatial pattern, medium vertical structure and unevenly diverse structure are typically attributed to PRP 30-32.

Data

The core samples of 199 European beech trees on the 6 PRPs were taken for dendrochronological analysis. These samples were taken randomly (random number generation in MS Excel) from healthy predominant and dominant trees with diameter at breast height (DBH) > 25 cm using the Pressler borer (Haglöf, Sweden). The tree-ring widths were measured using LINTAB (Rinntech) with Olympus binocular magnifier. Measurement was done in a scale 0.01 mm using TSAP-Win (Rinntech 2010). Cross-dating was done using C dendro software (Cybis Elektronik & Data). The short-term climate data (1964–2017), henceforth local climate data, were acquired from the nearest meteorological station (14 km away from PRPs) located at Pec pod Sněžkou (altitude 656 m a.s.l.; 50°18'24"N, 16°21'07"E; Czech Hydrometeorological Institute). The long-term climate data (1900–2017), henceforth general climate data, were obtained from the meteorological station in Prague-Clementinum (altitude 191 m a.s.l.; 50°5'12"N, 14°24'56"E; Czech Hydrometeorological Institute) representing the longest climate series available in the Czech Republic. The sunspot data were acquired from NASA website (Hathaway et al. 2017).

Analysis

Data analysis was done using R software (R Core Team 2018) with dplR package (Zang et al. 2018). Detrending of each tree-ring chronology was calculated by negative exponential detrending to remove age trend and other stand related trends. The tree-ring width data were smoothed with 1/3 spline of the age of each tree and the mean was calculated for each PRP (Bunn and Mikko 2018a). This removes

the age-related trends while preserving the low-frequency climatic variations (Shumilov et al. 2011).

Various dendrochronological indices were calculated using R software in dplR package according to the instructions provided by previous studies (Bunn 2018; Bunn and Mikko 2018a). The detrended ring width data were used to compute the expressed population signal (EPS). The EPS indicates the reliability of chronology as a fraction of the joint variance of the theoretical infinite tree population (Fritts 1976). To make dendrochronological results more precise, an “EPS cutoff” was used to reduce dendrochronological time series while the data with EPS > 0.85 were left using 40-year segments (frames) according to available instructions for dplR (Bunn and Mikko 2018a). We also computed signal-to-noise ratio (SNR) and \bar{R} inter-series correlations (Fritts 1976). We used raw dendrochronological data to calculate mean sensitivity MS (sens2) (Westfall et al. 2013; Zang et al. 2018). To generate chronological curve signals, dplR package of R and signal were used. The splines from 4, 8, and 64 years were inserted to an average ring width curve (Bunn and Mikko 2018b; Team R Core 2018). We calculated similar length of splines for climate and sunspot area data.

A quadratic regression models and correlation tests were used the Statistica 12 program (Statsoft, Tulsa) for evaluation of dendrochronological data in relation to climate factors and sunspot area. The canonical correspondence analysis (CCA) was carried out in the CANOCO 5 program (Šmilauer and Lepš 2014) to assess the relationships between radial growth of beech, precipitation, temperature, and sunspot area.

Results

Tree-ring characteristics

The dendrochronological data are summarized in Table 2, which also includes mean sensitivity (MS), signal-to-noise ratio (SNR), and inter-series correlations (\bar{R}). The largest mean value of tree-ring width was found for PRP 32, whose altitude is the second lowest after PRP 31, and the lowest mean was found for PRP 27, which is located at the highest altitude of the study area (Table 1). The SNR shows the best dendrochronological pattern (without any noise) for PRP 32 and the poorest for PRP 28. This indicates that these PRPs with higher SNR are structurally more homogeneous than PRPs with low SNR.

Climatic variabilities in relation to sunspot area

The short-term climatic data (Fig. 2a) and long-term climatic data (Fig. 2b) were analysed. We plotted both sets of

Table 1 Basic site and stand characteristics of six permanent research plots

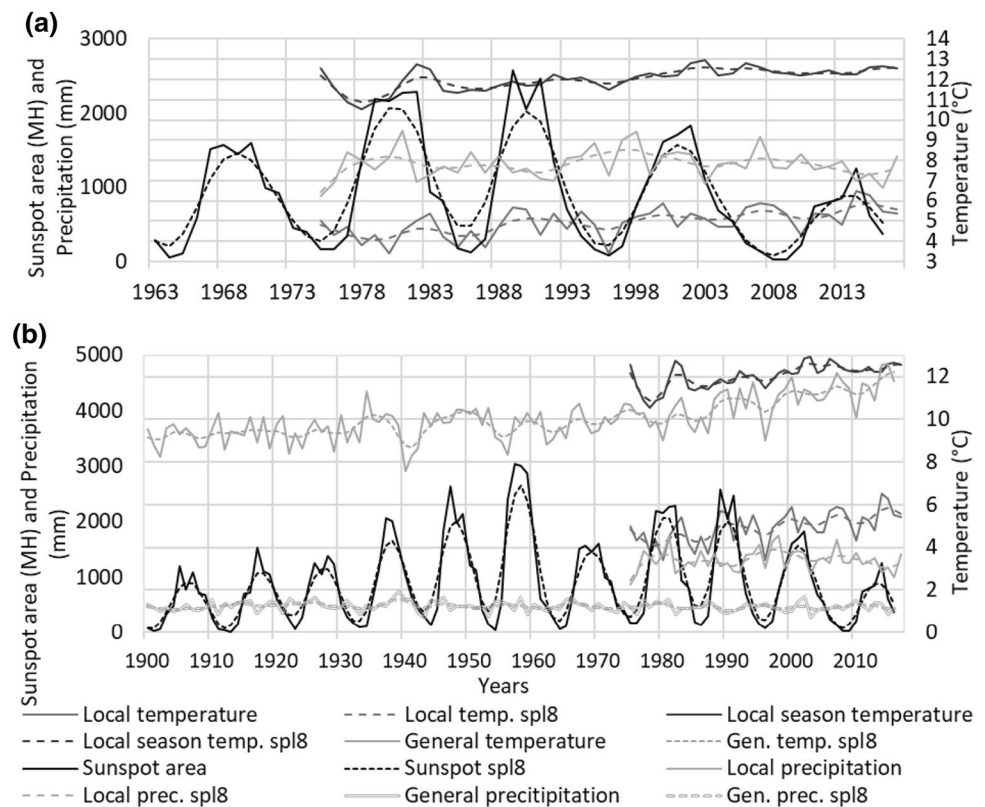
PRP	GPS	Altitude (m)	Exposure	Slope (°)	Tree species	Age of tree layers (year)	Mean height (m)	Mean DBH (cm)	Stand vol- ume (m ³ ha ⁻¹)	Forest type	Stand stock- ing	Horizontal structure [R (C&Ei)]	Vertical structure [TM _h (Fi)]	Total diver- sity [B (J&Di)]
27	50°38'44" N 15°52'14" E	1030	W	3	beech spruce rowan	181	15 18 15	30 32 20	82 43 2	6Z	0.8	0.64 ^{AG}	0.30 ↓	7.34 ↑↑
28	50°38'54"N 15°52'17"E	940	SW	15	beech	162	24	34	235	6K	0.9	0.89 ^{RN}	0.24 ↓↓	5.52 ↑
29	50°38'57" N 15°51'46" E	950	SE	16	beech spruce	183	25 27	47 45	210 23	6S	0.7	0.96 ^{RN}	0.37 ↓	7.52 ↑↑
30	50°39'52"N 15°53'01"E	790	NE	24	beech sycamore	183	31 28	49 40	420 38	6D	0.9	1.09 ^{RN}	0.13 ↓↓	4.08 ↓
31	50°40'04"N 15°52'57"E	740	NE	23	beech sycamore spruce	166	29 27 31	43 39 40	398 40 20	6B	0.9	1.27 ^{RG}	0.16 ↓↓	4.72 ↓
32	50°40'13"N 15°52'48"E	760	NE	35	beech sycamore	150	26 26	41 35	313 34	5B	0.8	1.15 ^{RN}	0.15 ↓↓	4.66 ↓

Forest site type classification: 6Z – *Piceeto-Fagetum humile* (Scrub Spruce-Beech), 6K – *Piceeto-Fagetum acidophilum* (Acidic Spruce-Beech), 6S – *Piceeto-Fagetum mesotrophicum* (Nutrient-medium Spruce-Beech), 6D – *Piceeto-Fagetum acerosum diluvium* (Enriched-colluvial spruce-beech), 6B – *Piceeto-Fagetum eutrophicum* (Nutrient-rich Spruce-Beech), 5B – *Abieto-Fagetum eutrophicum* (Nutrient-rich Fir-Beech) (Viewegh et al. 2003); Horizontal structure: AG – aggregation, RN – random and RG – regular distribution of trees (significance level, $\alpha=0.05$); Arrows: ↓↓-low, ↓-medium, ↑-high and ↑↑-very high diversity

Table 2 Characteristics of standardized tree-ring chronologies of beech trees (in years 1900–2017) on permanent research plots (PRP); MS: mean sensitivity; Std.: standard deviation; SNR: signal-to-noise ratio; R-bar: inter-series correlation

PRP ID	No. trees	Mean (mm)	Std.	MS	R-bar	SNR
27	34	1.01	0.48	0.37	0.29	5.04
28	33	1.11	0.54	0.34	0.27	4.96
29	33	1.15	0.57	0.35	0.31	5.53
30	36	1.28	0.73	0.34	0.24	5.47
31	31	1.04	0.49	0.33	0.30	7.96
32	32	1.17	0.62	0.31	0.32	7.31

Fig. 2 Precipitation, temperature and sunspot area (in millionths of a solar hemisphere—MH) with their 8-year splines (spl8); **a** locally measured precipitation and temperature with sunspot area for a period between 1963 and 2017; **b** long-term (general) precipitation and temperature with sunspot area for a period between 1900 and 2017

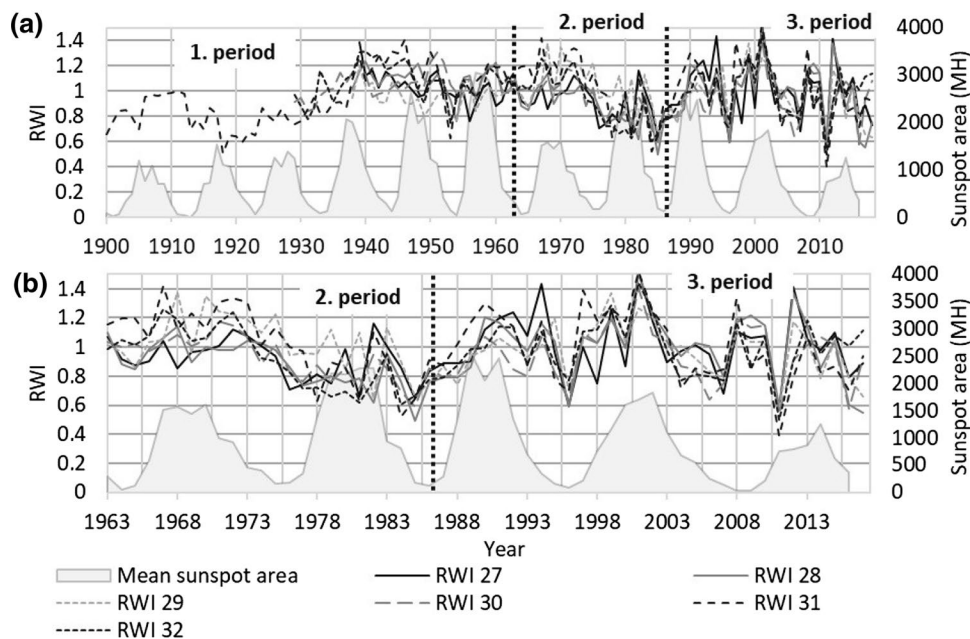


these datasets together with the sunspot area and compared their variabilities across measurement periods. Figure 2 illustrates overall differences of variabilities between the sunspot area and climate data. The sunspot area shows a more pronounced cyclical variability than that of the temperature or precipitation. Variability of the sunspot area was not identical to that of either local or general climate while they were plotted without splines. However, much more similarities or differences were observed while 8-year spline was applied to data. There was an increased pattern of temperature for last 50 years, and both local and general precipitation had stable variability patterns across measurement period. Variability of the sunspot area significantly decreased from 2590 to 1183 MH after 1986 while local temperature (seasonal temperature May to October) increased from 11.5 to 12.5 °C, and precipitation increased from 999 to 1750 mm.

Influences of sunspot area and climate factors on tree-ring chronology

The effects of the sunspot area and climate factors on tree-ring index (RWI) were thoroughly analysed. For this purpose, we divided the entire measurement period (1900–2017) into three shorter periods (Fig. 3). The first period (1900–1962) was assumed until declaration of the Krkonoše National Park, during which regular forest management practices were done. In this first period, the differences of RWIs were the greatest because of small-scale shelter wood management practices applied to beech stands. The second period (1963–1985) began in the first year of declaration of the National Park and ended by air pollution crisis (emission period: 1979–1985). During second period, RWI significantly decreased because of severe impact of air pollution on forests. The third period

Fig. 3 Standardized ring width chronologies of European beech on permanent research plots 27, 28, 29, 30, 31 and 32; RWI: ring width index; sunspot area (in millionths of a solar hemisphere—MH); **a** RWI during the entire measurement period; **b** RWI from declaration of National Park. The period is described in the time window: period 1: 1900–1962 (regular harvesting period), period 2: 1963–1985 (air pollution crisis period); period 3: 1986–2017 (strict forest protection period)



(1986–2017) started at the end of emission period and lasted until 2017, and during which strict protection rules were applied. Compared to other two periods, this period was considered as more important for evaluation of the effects of the sunspot area and climate factors. In this period, we observed the cyclic growth of beech trees that corresponded to the variability of the sunspot area. The periodic influence of the sunspot area on RWI increased from 0.79 to 1.16 while sunspot area also increased from 124.7 to 2048.68 MH in 1986 to 1989. Similar situation was found in increases and decreases of the sunspot area and in RWI more or less for entire third period. The 2011 was a year when the late spring frosts negatively affected European beech growth. This indicated a significant relationship between RWI and sunspot area. Similarly, in general, in other years, RWI indicated to have the identical variability patterns to those of the sunspot area.

The relationships between sunspot area, RWI and climate factors are evident (Table 3). In the first period (1900–1962), when normal harvesting practices were used, there was a significant positive correlation occurred between the sunspot area and RWI ($r=0.3273$), and a positive correlation between sunspot area and temperature ($r=0.2272$). In the second period (1963–1985), when forest stands were placed under the strict protection, but disturbed by natural disasters towards the end of this period, the negative correlation was found between sunspot area and RWI ($r=-0.1015$). In the third period (1986–2017), the highest positive significant correlation occurred between sunspot area and RWI ($r=0.3743$). In two periods out of three, the sunspot area seems to have a significant influence on the radial growth of beech.

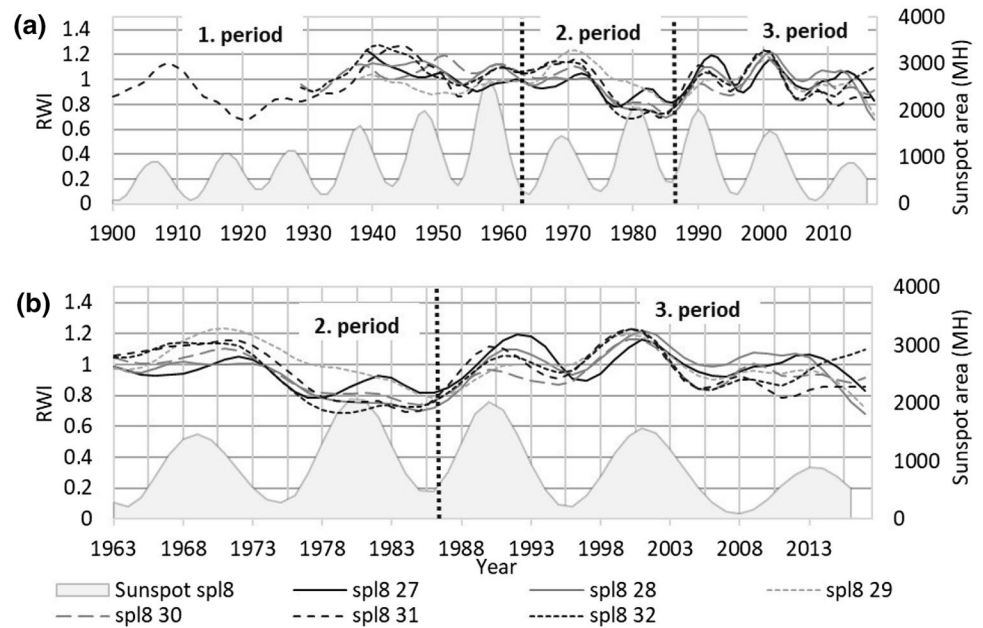
Table 3 Correlation coefficients showing the relationship between sunspot area, tree-ring width index (RWI) and climatic factors.

Time period	Variables	RWI	sunspot	temperature
1 (general climate data)	Sunspot	0.3273		
	Temperature	0.1137	0.2272	
	Precipitation	0.0501	0.0777	-0.1572
2 (general climate data)	Sunspot	-0.1015		
	Temperature	0.1303	-0.0010	
	Precipitation	-0.1420	0.1175	-0.0311
3 (local climatic data)	Sunspot	0.3743		
	Temperature	0.1426	0.1804	
	Precipitation	0.1443	-0.2393	-0.0831

The period is described in the time window: period 1: 1900–1962 (regular harvesting period), period 2: 1963–1985 (air pollution crisis period); period 3: 1986–2017 (forest protection period). Significant correlation values are in bold; correlations are significant at $p<0.05$

The 8-year splines of both RWI and sunspot area were calculated for each sample plot and their variability patterns were examined (Fig. 4). Splines were used to reduce short-term disturbance and variability in these variables. There were similar variabilities in these two variables in the third period (1986–2017). We also used 8-year splines for local temperature and precipitation. The air pollution disturbance during a period between 1974 and 1988 had a significant negative influence on RWI (Fig. 4b). Even during such a short-term period, a small effect of the sunspot area could be seen for all the PRPs, except PRP 32. After air pollution crisis began, none of the harvesting operations was carried out during third period, and consequently a better response of beech growth to sunspot area

Fig. 4 Ring width chronologies of European beech with splines for all six permanent research plots (27, 28, 29, 30, 31, 32), spl8: 8-year spline of RWI and spl8: 8-year spline of sunspot area. Sunspot area is in the millionths of a solar hemisphere (MH). RWI is ring width index; **a** RWI during entire measurement period; **b** RWI from declaration of National Park. The period is described in the time window: period 1: 1900–1962 (regular harvesting period), period 2: 1963–1985 (air pollution crisis period); period 3: 1986–2017 (forest protection period)



was observed. Three cycles of variability of the sunspot occurred during a period between 1985 and 2017, which also significantly affected RWI.

We analysed the influences of temperature, precipitation, and sunspot area on beech during a period between 1986 and 2017 (third period) using scattered plots of 8-year spline series. Compared to the influence of temperature, both precipitation and sunspot area had significantly higher influence on the radial growth of beech (Fig. 5) with the largest influence of precipitation on PRP 29 ($R^2 = 0.2668$) and sunspot area on PRP 32 ($R^2 = 0.4339$). All these influences were in favour of the radial growth. On average, RWI variability explained by temperature is 3.2% ($R^2 = 0.0323$), by precipitation 9.5% ($R^2 = 0.0945$), and by sunspot area 24.6% ($R^2 = 0.2462$).

We also compared the variability patterns of the sunspot area and RWI by smoothing them with 64-year spline to reduce variabilities to a shorter period. Overall, there were almost similar variability patterns in these factors during a period between 1974 and 1963 (Fig. 6). However, some dissimilarity of patterns was found between sunspot area and RWI for an air pollution crisis period (1963–1985).

The wavelet analysis documents the cyclical pattern of beech growth (Fig. 7). The analysis shows that from 1985 to 2011 the impacts of 11-year cycles on beech growth were significant. The 33-year cycles also had significant impacts along the entire data series. Interestingly, there is a significant phenomenon of the 3-year periodicity from 2009 to 2014, with the negative influence of spring frosts and lower temperatures on beech radial growth.

Interactions between radial growth, sunspot area and climatic factors

We investigated the interactions between RWI, sunspot area, and local climate factors using data from a third period (1986–2017). We analysed data using quadratic regression modelling and three-dimensional graphs were produced (Fig. 8). Temperature had a significantly higher influence on the radial growth compared to precipitation. Precipitation had hardly any influence on the radial growth in relation to temperature, while optimal growth was observed in the range of temperatures between 4.5 and 6 °C. The sunspot area had a positive influence on the radial growth in both cases—in relation to temperature and precipitation. Radial growth increased with increasing sunspot area with an optimum for temperature range, while there was a continuous increase in the interaction effect with precipitation.

The interactions between RWI, sunspot area, and climate factors were analysed using the canonical correspondence analysis (CCA). The first ordination axis of CCA explained 55.3% variability, first two axes together explained 75.8%, and all four axes explained 95.4% variability (Fig. 9). The sunspot area had the largest influence on the radial growth, followed by temperature and precipitation. Generally, the sunspot area influenced positively on PRP 31 and 32, while other PRPs, which are located at the higher altitude and have more heterogeneous stand structures, were favourably influenced by increased temperature. In detail, the largest influence of the sunspot area on the radial growth of beech was observed in a more homogeneous stand with the most regular distribution of

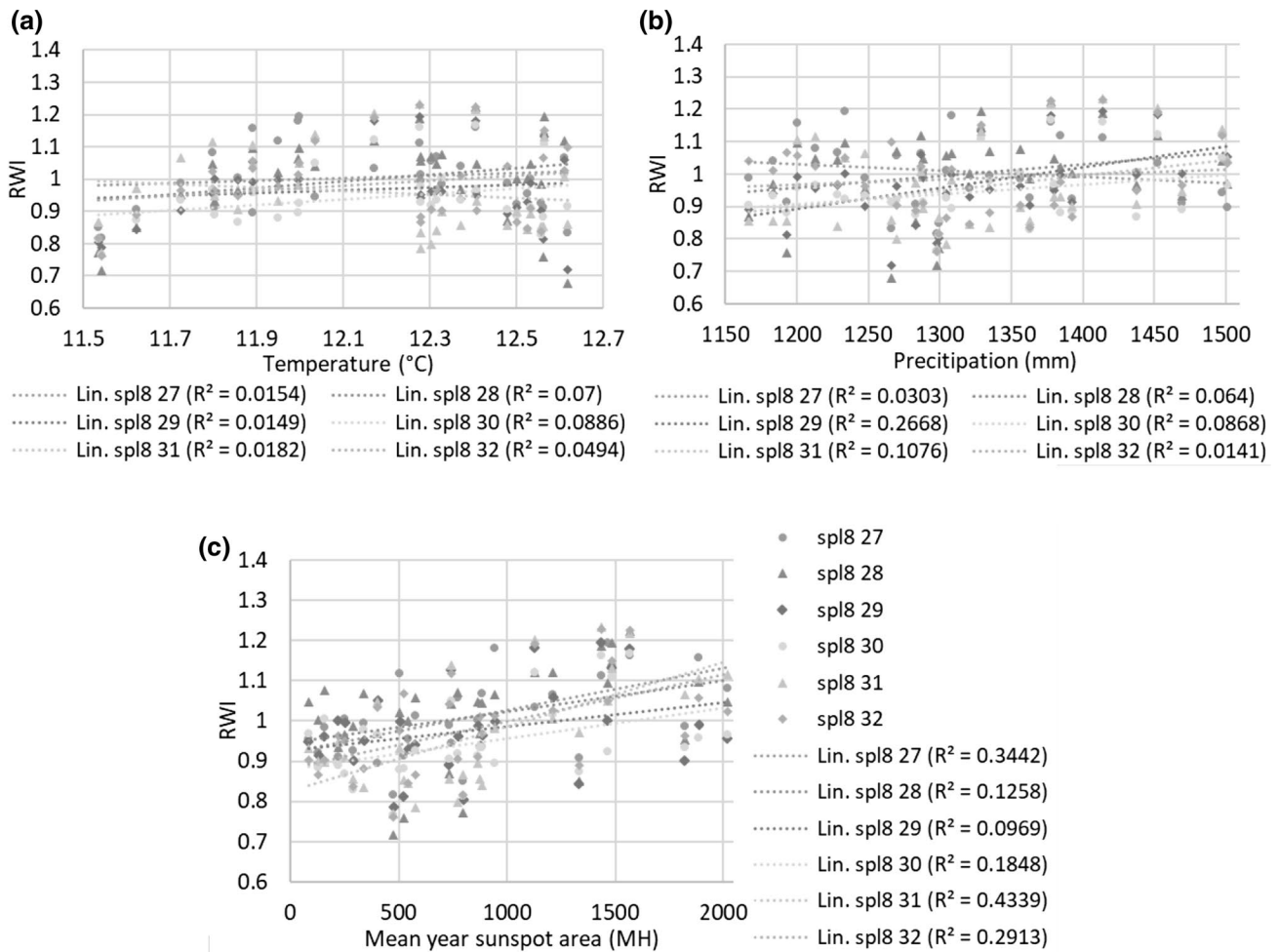
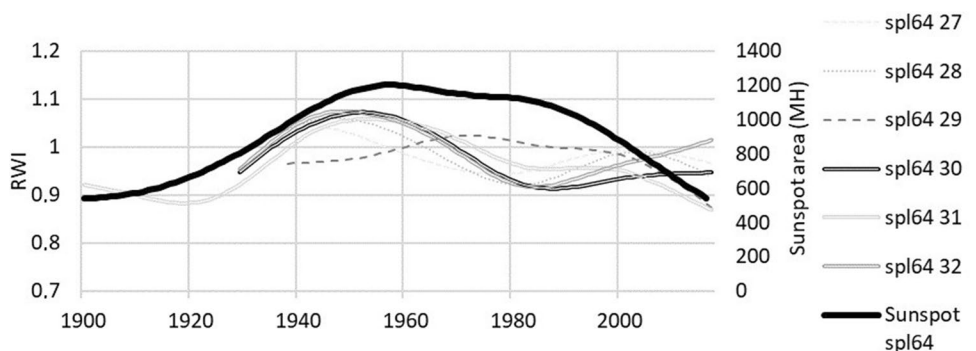


Fig. 5 Scattered plots of 8-year splines of RWI plotted against temperature, precipitation and sunspot area for a period between 1986 and 2017 (forest protection period). Fitted linear regression lines were overlaid on those scatter plots for each PRP (27, 28, 29, 30, 31, 32); **a**

8-year splines of RWI vs season temperature, **b** 8-year splines of RWI vs precipitation sum, **c** 8-year splines of RWI vs sunspot area (millions of a solar hemisphere—MH)

Fig. 6 The 64-year spline of RWI and sunspot area – spl64 (PRP 27, 28, 29, 30, 31, 32); sunspot area in the millions of a solar hemisphere (MH)



trees (PRP 31), and the smallest influence was observed in the beech stands with rich vertical and complex diversity (PRP 29). The average radial growth had the highest significant correlation ($p = 0.022$, $r = 0.41$) with the mean sunspot area in the previous year, especially in the growing season ($p = 0.013$, $r = 0.44$). The sunspot area in the

growing season of the previous year had significant influences on the four PRPs ($p < 0.05$), especially on PRP 31 ($p = 0.007$, $r = 0.48$). Conversely, the smallest influence was observed in the beginning of the current year (January-March) ($p > 0.05$).

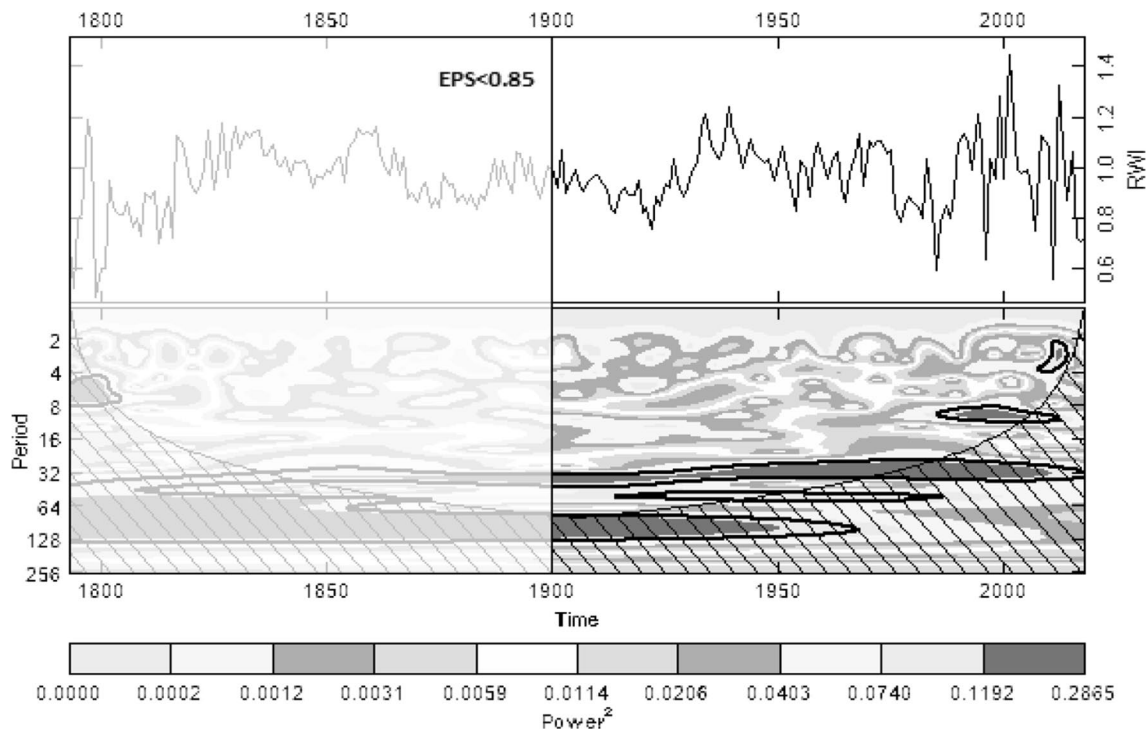


Fig. 7 Wavelet plot from all European beech stands in the Krkonoše Mts. Black thick line represents 1% significance level against dark grey noise level, hatched part describes effects of disruption and lighter shade represents insignificant tree-ring data for analysis

Discussion

Disturbances in European beech tree-ring signal

Under the climate change scenario, forest stands would not only undergo average change but also they could be subject to a higher variability of the extreme weather fluctuations, such as droughts, storms and floods (Lindner et al. 2010). European beech in the mountain forests is more influenced by temperature than by precipitation (Vacek and Hejman 2012; Králíček et al. 2017; Putalová et al. 2019). European beech is also negatively affected by spring frost (Matějka et al. 2010; Stjepanović et al. 2018; Šimůnek et al. 2019) and drought events (Geßler et al. 2007; Granier et al. 2007; Maes et al. 2019), but drought periods are not significant in the studied mountain forest due to sufficient annual precipitation. Nevertheless, the negative climate factors can have direct impacts on beech seed production, which is reflected not only in the reproductive capacity of beech but also in its diameter increment (Hacket-Pain et al. 2017). In the context of our area's pointer year in the beech growth, when there was a deep slump of the tree-ring signal, was the year 2011, when late spring frosts occurred (Kooijman et al. 2000). Another interesting year was 1976 with the impact of severe drought when beech radial growth decreased, however, beech can adapt itself to these factors

(Hartl-Meier et al. 2014; Zang et al. 2014; Farahat and Linderholm 2018; Sedmáková et al. 2019).

The second period (1963–1986), which was more important from the aspect of tree growth and stand structure during the air pollution crisis, was chosen for detail investigations in the past (Špulák and Souček 2010; Vacek et al. 2013; Král et al. 2015; Vacek et al. 2019b). Specifically, in a period between 1980 and 1986, an average SO_2 emission from the thermal power plant in the Poříčí reached $59 \mu\text{g m}^{-3}$, which was a six fold amount of today's concentrations (Dobrovolný and Tesař 2010). This is the reason why negative effects of the air pollution disaster on RWI were clearly visible on all the research plots in the second period. However, after this period of air pollution, soil over acidification occurred (Kolář et al. 2015), which partly influenced beech stands also in the studied area, but this problem was significantly reduced within 5 years from the air pollution disaster. Other harmful factors were nitrogen and ozone, whose impacts could be observed in this studied area also in the 90 s (Hůnová et al. 2019); these factors caused partial weakening of beech stands but the effect was not significant.

This study considered both the homogeneous and heterogeneous beech stands that are described in Table 1; it is demonstrated that the stand structure significantly affects the dendrochronological characteristics (Matisons et al. 2017). Different structural variability may be caused by different slope, altitude, stand age, stand development, and site

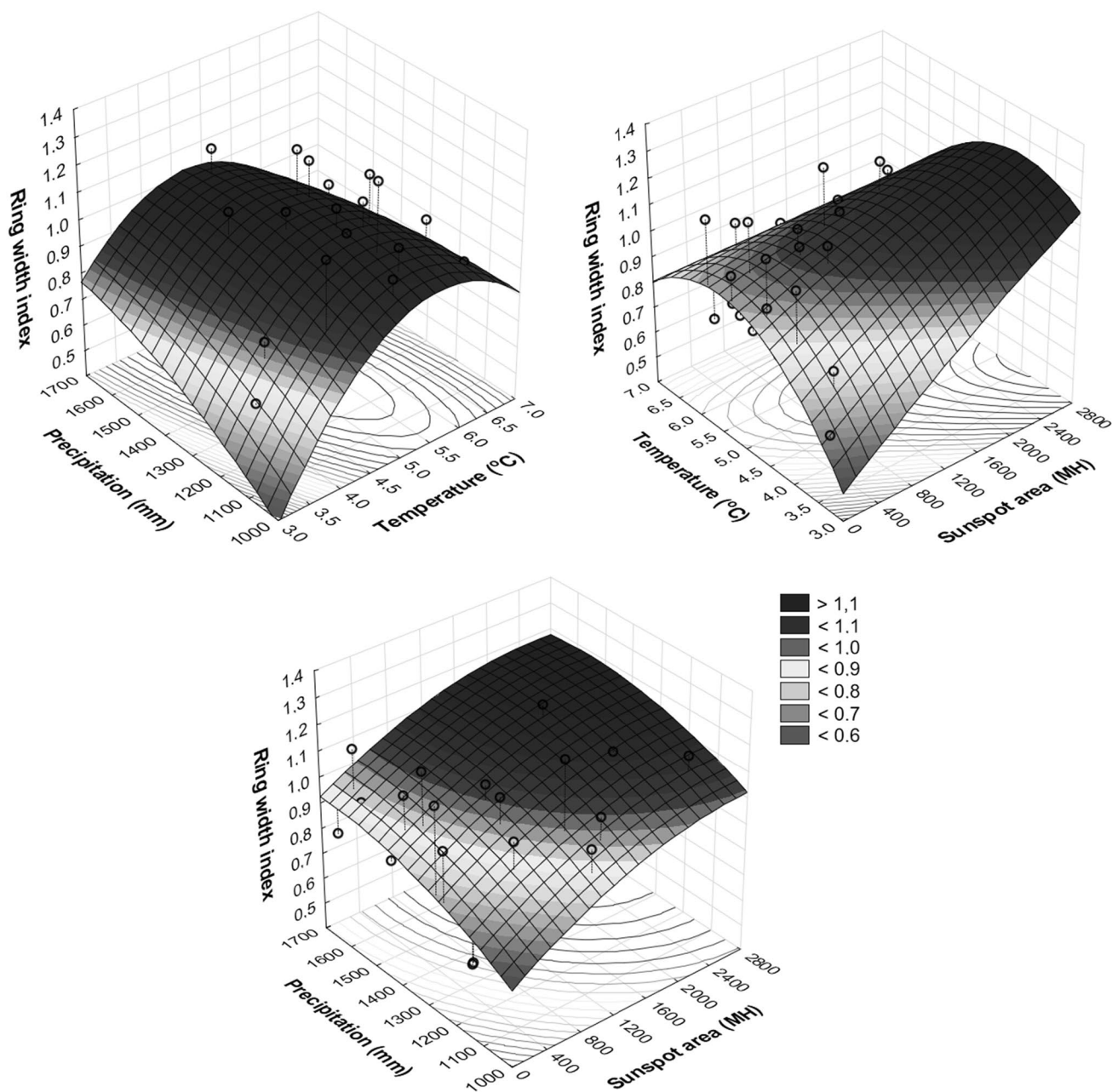


Fig. 8 Responses of the mean tree-ring width index of European beech to the sum of annual precipitation, mean annual temperature, and mean annual sunspot area for six PRPs. Climate data used for

this analysis were local and tree-ring width data were from a period between 1963 and 2017

quality. The studied stands are characterized by structural complexity and diversity, which has been proved in other studies also (Vacek et al. 2010, 2015a, b; Šimůnek et al. 2019). Heterogeneous stands of European beech are less vulnerable to climate fluctuations (Mölder and Leuschner 2014), which was also documented by our results in Figs. 4 and 9, where the homogeneous stand of European beech (PRP 32) showed a greater response to climate fluctuations than the heterogeneous one (PRP 28).

Influences of the sunspot area on radial growth

The sunspot area is significantly correlated with precipitation. The hydrological characteristics are also reported to be significantly affected by the sunspot area (Mauas et al. 2016; Baker et al. 2018). Some other studies also show the significant effects of the sunspot area on the precipitation and temperature (Dong et al. 2018; Sun et al. 2018). Our study confirms their findings. A weaker but more

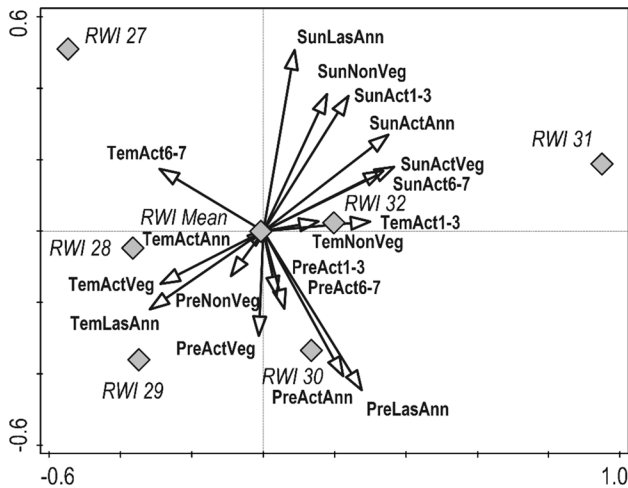


Fig. 9 Ordination diagram of the canonical correspondence analysis showing relationships of radial growth of beech on permanent research plots (PRPs) with annual precipitation sum (Pre), mean annual temperature (Tem) and mean annual sunspot area (sun) for the whole year, in growing season (Veg), in non-growing season (Non-Veg) from June to July (6–7) and from January to March (1–3) of current (Act) and previous year (Las) in third period (1985–2017); code ◇ stands for tree-ring width index (RWI) on PRP 27–32

appropriate relationship between the sunspot area and precipitation during the maximum solar activities in 1920–2004 is reported whereby the sunspot area had a larger effect on tree growth (Rigozo et al. 2002). The sunspot area seems to have significant effect on the tree-ring width of beech on all the sample plots. Similar findings for other tree species in different countries are also reported, for example, Smith fir (*Abies georgei* var. *smithii*) in Tibet (Wang and Bin 2011) and white spruce (*Picea glauca*/Moench/Voss) in Canada (Sinclair et al. 1993).

There is an important fact that the atmospheric circulation at around 1000 m from the lower part of troposphere is associated with the sunspot cycle above the northern hemisphere of the Atlantic ocean when this effect significantly influences Europe (Brugnara et al. 2013). The studied sample plots are situated in the mountain area at an altitude between 740 and 1030 m a.s.l., and at this altitude, the impact of the sunspot activity on temperatures might be higher while the influence of the sunspot area on the temperatures was proved to be higher from 1500 m (Kumar et al. 2018). The sunspot cycle also affects the cycle of cosmic rays, when higher sunspot activity implies lower cosmic radiation (Hathaway 2015). The sunspot cycles are closely linked to the cosmic rays that are also connected to precipitation, temperature, and solar irradiance (Chapanov and Gorshkov 2019). The cosmic radiation is associated with the formation of aerosols that influence the properties of clouds and their formation processes, and consequently influence the sun irradiance striking the Earth's surface. These atmospheric processes

associated with aerosols belonging to the most uncertain factors of climate models (Jayaraman et al. 1998; Haywood and Boucher 2000; Maghrabi and Kudela 2019). European beech is also able to respond to CO₂ in a satisfactory way, but under climate change it is affected negatively due to the drought that would decrease tree growth (Tognetti et al. 2014), mainly at sites that are not adequate for this tree species (Peñuelas et al. 2008).

There is a negative correlation between the sunspot area and RWI for the second period (Table 3). It seems that RWI would increase with increasing sunspot area for the first and third period, however, RWI for the second period would decrease with increasing sunspot area because of the severe influence of air pollution (Vacek and Matejka 2010; Vacek et al. 2019b) and other effects that were larger than the effect of the sunspot area. In some other studies (Li et al. 2019) a positive correlation between the tree growth and sunspot area was also found, provided that other influential factors were less effective. The sunspot area may affect not only the radial growth, but also the structure of stands to some extent, as a result of the influence of the sunspot area on atmospheric temperature.

It was suggested in 2008, that the sunspot area might decrease in the next decade (Volobuev and Makarenko 2008). Our finding also supports this, when the sunspot area and its synchronicity to RWI substantially decreased on all the sample plots after 2008. Our results may be useful for the prediction of the radial growth patterns of European beech using the astronomical information about the sunspot area. One-year delay of the response to a change in the climatic conditions was observed in European beech increment in relation to temperatures (Carl et al. 2013), which indicates that beech stands can respond to changes with delay. The predictions based on the present data of the sunspot area suggest that the sunspot area could be lower in the next two cycles, which may lead to a solar minimum (Singh and Bhargawa 2019). Our research is one of the first studies in the Central Europe, and therefore it will be unique and useful for further investigations of the relationships between sunspot area, climate characteristics and tree growth in the context of global climate change.

Conclusions

The influence of the sunspot area on the radial growth of European beech in Central Europe (Krkonos Mountains) was detected from analysis of the long-term tree-ring width data and century-long data on the sunspot area. We can briefly summarize our results as below:

- The sunspot area correlated significantly positively ($p < 0.05$) with the tree-ring width index in the first

period (1900–1963) and third period (1986–2017), but it correlated negatively with the tree-ring width index in the second period (air pollution period, 1963–1985).

- Overall, the correlation between the sunspot area and ring width index varied from 32 to 37%.
- Homogeneous stands responded to the influence of the sunspot area largely significantly, as the sunspot area explained 42–51% of the variations in the tree-ring width index during the third period (1986–2017), but the explained variations varied from 3 to 14% for heterogeneous stands.
- Among the three factors (temperature, precipitation and sunspot area) analysed, the sunspot area appeared as the most influential factor on the radial growth of beech.
- Influence of the sunspot area on the radial growth in the third period (1986–2017: a period with low forest disturbance) appeared more pronounced than in the first period (1900–1963) and second period (1963–1985).
- Effect of the sunspot area in the previous year on the tree-ring width index was more pronounced than that of the current year's sunspot area.

This study can provide a fundamental basis for further investigation on the environmental and meteorological related sciences. The presented results will be important to understand European beech forests in the context of global climate change, and will contribute to the knowledge for predicting potential impact of the sunspot area on the Earth's surface.

Acknowledgements This study was supported by the Czech University of Life Sciences Prague, Faculty of Forestry and Wood Sciences (No. IGA A19/22). We are grateful to the editorial recommendations for improving this article.

References

- Abbott D, Juhl R (2016) ScienceDirect New historical records and relationships among 14 C production rates, abundance and color of low latitude auroras and sunspot abundance q. *Adv Sp Res* 58:2181–2246. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.07.015>
- Baker JCA, Gloor M, Boom A et al (2018) Questioning the influence of sunspots on amazon hydrology: even a broken clock tells the right time twice a day. *Geophys Res Lett* 45:1419–1422. <https://doi.org/10.1002/2017GL076889>
- Beer J, Blinov A, Bonani G et al (1990) Use of ^{10}Be in polar ice to trace the 11-year cycle of solar activity. *Nature* 347:164–166. <https://doi.org/10.1038/347164a0>
- Bonev BP, Penev KM, Sello S (2004) Long-term solar variability and the solar cycle in the 21st century. *Astrophys J* 605:81–84. <https://doi.org/10.1086/420695>
- Brugnara Y, Brönnimann S, Luterbacher J, Rozanov E (2013) Influence of the sunspot cycle on the Northern Hemisphere winter-time circulation from long upper-air data sets. *Atmos Chem Phys* 13:6275–6288. <https://doi.org/10.5194/acp-13-6275-2013>
- Bunn A (2018) An introduction to dplR. 16
- Bunn A, Mikko K (2018a) Chronology Building in dplR. 1–13
- Bunn A, Mikko K (2018b) Time Series Analysis in dplR. 1–14
- Carl G, Doktor D, Koslowsky D (2013) Phase difference analysis of temperature and vegetation phenology for beech forest: a wavelet approach. *Stoch Env Res Risk A* 27:1221–1230. <https://doi.org/10.1007/s00477-012-0658-x>
- Cecchini S, Galli M, Nanni T, Ruggiero L (1996) Solar variability and ring widths in fossil trees. *Nuovo Cim della Soc Ital di Fis C* 19:527–536. <https://doi.org/10.1007/BF02523768>
- Chapanov Y, Gorshkov V (2019) Solar activity and cosmic ray influence on the climate. *Geomagn Aeron* 59:942–949. <https://doi.org/10.1134/S0016793219070090>
- Clark PJ, Evans FC (1954) Distance to nearest neighbour as a measure of spatial relationship in populations. *Ecology* 35:445–453
- Conte E, Lombardi F, Battipaglia G et al (2018) Growth dynamics, climate sensitivity and water use efficiency in pure versus mixed pine and beech stands in Trentino (Italy). *For Ecol Manage* 409:707–718. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.12.011>
- Core Team R (2018) A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna
- Dobrovolný L, Tesář V (2010) Growth and characteristics of old beech (*Fagus sylvatica* L.) trees individually dispersed in spruce monocultures. *J For Sci* 56:406–416
- Dong L, Fu C, Liu J, Zhang P (2018) Combined effects of solar activity and El Niño on hydrologic patterns in the Yoshino River Basin, Japan. *Water Resour Manag* 32:2421–2435. <https://doi.org/10.1007/s11269-018-1937-1>
- Dorotovič I, Louzada JL, Rodrigues JC, Karlovský V (2014) Impact of solar activity on the growth of pine trees: case study. *Eur J For Res* 133:639–648. <https://doi.org/10.1007/s10342-014-0792-8>
- Duan J, Bin ZQ (2014) A 449 year warm season temperature reconstruction in the southeastern Tibetan plateau and its relation to solar activity. *J Geophys Res* 119:11578–11592. <https://doi.org/10.1002/2014JD022422>
- Easterbrook DJ (2016) Cause of global climate changes: Correlation of global temperature, sunspots, solar irradiance, cosmic rays, and radiocarbon and beryllium production rates. *Evidence-Based Clim Sci Data Opposing CO₂ Emiss as Prim Source Glob Warm Second Ed* 245–262. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804588-6.00014-8>
- Farahat E, Linderholm HW (2018) Growth–climate relationship of European beech at its northern distribution limit. *Eur J For Res* 137:619–629. <https://doi.org/10.1007/s10342-018-1129-9>
- Fritts HC (1976) *Tree Rings and Climate*. Academic Press Inc., Tucson
- Füldner K (1995) *Strukturbeschreibung in Mischbeständen*. Forstarchiv 66:235–606
- Gebler A, Keitel C, Matyssek R et al (2007) Potential risks for European beech (*Fagus sylvatica* L.) in a changing climate Potential risks for European beech (*Fagus sylvatica* L.). *Trees* 21:1–11. <https://doi.org/10.1007/s00468-006-0107-x>
- González E, Juan DA, Hsin Y, Federico L (2019) PRIMARY RESEARCH ARTICLE ENSO and NAO affect long-term leaf litter dynamics and stoichiometry of Scots pine and European beech mixedwoods. *Glob Chang Biol* 25:3070–3090. <https://doi.org/10.1111/gcb.14672>
- Granier A, Reichstein M, Bréda N et al (2007) Evidence for soil water control on carbon and water dynamics in European forests during the extremely dry year: 2003. *Agric For Meteorol* 143:123–145
- Gupta R, Gil-Alana LA, Yaya OS (2015) Do sunspot numbers cause global temperatures? Evidence from a frequency domain causality test. *Appl Econ* 47:798–808. <https://doi.org/10.1080/00036846.2014.980575>
- Hackett-Pain AJ, Lageard JGA, Thomas PA (2017) Drought and reproductive effort interact to control growth of a temperate broad-leaved tree species (*Fagus sylvatica*). *Tree Physiol* 37:744–754. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpx025>

- Hartl-Meier C, Dittmar C, Zang C, Rothe A (2014) Mountain forest growth response to climate change in the Northern Limestone Alps. *Trees* 28:819–829. <https://doi.org/10.1007/s00468-014-0994-1>
- Hathaway DH (2015) The solar cycle. *Living Rev Sol Phys* 12:83. <https://doi.org/10.1007/lrsp-2015-4>
- Hathaway DH, Adams M, Weber R (2017) Royal Observatory, Greenwich—USAF/NOAA Sunspot Data. In: NASA. <https://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch.shtml>
- Haywood J, Boucher O (2000) Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: a review. *Rev Geophys* 38:513–543. <https://doi.org/10.1029/1999RG000078>
- Hůnová I, Kurfürst P, Baláková L (2019) Areas under high ozone and nitrogen loads are spatially disjunct in Czech forests. *Sci Total Environ* 656:567–575. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.371>
- Jaehne SC, Dohrenbusch A (1997) Ein Verfahren zur Beurteilung der Bestandesdiversität. *Forstwissenschaftliches Cent* 116:333–345
- Jayaraman A, Lubin D, Ramachandran S et al (1998) during the January-February 1996 pre-INDOEX cruise Z 10-. *J Geophys Res* 103:827–836
- Kasatkina EA, Shumilov OI, Timonen M (2019) Solar activity imprints in tree ring-data from northwestern Russia. *J Atmos Solar-Terrestrial Phys* 193:105075. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.105075>
- Koch J, Clague JJ, Osborn GD (2007) Glacier fluctuations during the past millennium in Garibaldi Provincial Park, southern Coast Mountains, British Columbia. *Can J Earth Sci* 44:1215–1233. <https://doi.org/10.1139/e07-019>
- Kolář T, Čermák P, Oulehle F et al (2015) Pollution control enhanced spruce growth in the “Black Triangle” near the Czech-Polish border. *Sci Total Environ* 538:703–711. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.105>
- Kooijman AM, Emmer IM, Fanta J, Sevink J (2000) Natural regeneration potential of the degraded Krkonoše forests. *L Degrad Dev* 11:459–473
- Köse N, Güner HT (2012) The effect of temperature and precipitation on the intra-annual radial growth of *Fagus orientalis* Lipsky in Artvin, Turkey. *Turkish J Agric For* 36:501–509. <https://doi.org/10.3906/tar-1109-4>
- Kováč D, Veselovská P, Klem K et al (2018) Potential of photochemical reflectance index for indicating photochemistry and light use efficiency in leaves of European beech and Norway spruce trees. *Remote Sens* 10:1202. <https://doi.org/10.3390/rs10081202>
- Král J, Vacek S, Vacek Z et al (2015) Structure, development and health status of spruce forests affected by air pollution in the western Krkonoše Mts. in 1979–2014. *For J* 61:175–187. <https://doi.org/10.1515/forj-2015-0026>
- Králíček I, Vacek Z, Vacek S et al (2017) Dynamics and structure of mountain autochthonous spruce-beech forests: impact of hilltop phenomenon, air pollutants and climate. *Dendrobiology* 77:119–137. <https://doi.org/10.12657/denbio.077.010>
- Kumar V, Dhaka SK, Panwar V et al (2018) Detection of solar cycle signal in the tropospheric temperature using COSMIC data. *Curr Sci* 115:2232–2239
- Kusiak MA, Williams IS, Dunkley DJ et al (2014) Monazite to the rescue: u-Th-Pb dating of the intrusive history of the composite Karkonosze pluton, Bohemian Massif. *Chem Geol* 364:76–92. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.11.016>
- Le Mouél JL, Lopes F, Courtillot V (2019) A solar signature in many climate indices. *J Geophys Res Atmos* 124:2600–2619. <https://doi.org/10.1029/2018JD028939>
- Leavitt SW, Bannister B (2009) Dendrochronology and radiocarbon dating: the laboratory of tree-ring research connection. *Radio-carbon* 51:373–384. <https://doi.org/10.1017/S0033822200033889>
- Li G, Zheng M, Yang H (2019) Cycle analysis method of tree ring and solar activity based on variational mode decomposition and hilbert transform. *Adv Meteorol* 2019:1–8. <https://doi.org/10.1155/2019/1715673>
- Lindner M, Maroschek M, Netherer S et al (2010) Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *For Ecol Manage* 259:698–709. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.023>
- Maes SL, Perring MP, Vanhellemont M et al (2019) Environmental drivers interactively affect individual tree growth across temperate European forests. *Glob Chang Biol* 25:201–217. <https://doi.org/10.1111/gcb.14493>
- Maghrabi A, Kudela K (2019) Relationship between time series cosmic ray data and aerosol optical properties: 1999–2015. *J Atmos Solar-Terrestrial Phys* 190:36–44. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.04.014>
- Matějka K, Vacek S, Podrázský V (2010) Development of forest soils in the Krkonoše Mts. in the period 1980–2009. *J For Sci* 56:485–504. <https://doi.org/10.17221/79/2010-JFS>
- Matisons R, Puriņa L, Adamovičs A et al (2017) European beech in its northeasternmost stands in Europe: varying climate-growth relationships among generations and diameter classes. *Dendrochronologia* 45:123–131. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.08.004>
- Mauas PJD, Buccino AP, Flamenco E (2016) Solar activity forcing of terrestrial hydrological phenomena. *Proc Int Astron Union* 12:180–191. <https://doi.org/10.1017/S1743921317003933>
- Mausolf K, Wilm P, Härdtle W et al (2018) Higher drought sensitivity of radial growth of European beech in managed than in unmanaged forests. *Sci Total Environ* 642:1201–1208. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.065>
- Mölder I, Leuschner C (2014) European beech grows better and is less drought sensitive in mixed than in pure stands: tree neighbourhood effects on radial increment. *Trees Struct Funct* 28:777–792. <https://doi.org/10.1007/s00468-014-0991-4>
- Moseley EL (1941) Sun-spots and tree rings. *J R Astron Soc Canada* 35:376
- Nováková S (2007) Structure and dynamics of the algal flora in subalpine mires in the Krkonoše Mountains (Giant Mountains; Czech Republic). *Nov Hedwigia* 84:441–458. <https://doi.org/10.1127/0029-5035/2007/0084-0441>
- Peñuelas J, Hunt JM, Ogaya R, Jump AS (2008) Twentieth century changes of tree-ring $\delta^{13}C$ at the southern range-edge of *Fagus sylvatica*: increasing water-use efficiency does not avoid the growth decline induced by warming at low altitudes. *Glob Chang Biol* 14:1076–1088. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01563.x>
- Perone A, Lombardi F, Marchetti M et al (2016) Evidence of solar activity and El Niño signals in tree rings of *Araucaria araucana* and *A. angustifolia* in South America. *Glob Planet Change* 145:1–10. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.08.004>
- Putalová T, Vacek Z, Vacek S et al (2019) Tree-ring widths as an indicator of air pollution stress and climate conditions in different Norway spruce forest stands in the Krkonoše Mts. *Cent Eur For J* 65:21–33. <https://doi.org/10.2478/forj-2019-0004>
- Remeš J, Bílek L, Novák J et al (2015) Diameter increment of beech in relation to social position of trees, climate characteristics and thinning intensity. *J For Sci* 61:456–464. <https://doi.org/10.17221/75/2015-JFS>
- Rezaie N, D’Andrea E, Bräuning A et al (2018) Do atmospheric CO₂ concentration increase, climate and forest management affect iWUE of common beech? Evidences from carbon isotope analyses in tree rings. *Tree Physiol* 38:1110–1126. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpy025>
- Rigozo NR, Nordemann DJR, Echer E et al (2002) Solar variability effects studied by tree-ring data wavelet analysis. *Adv Sp Res* 29:1985–1988. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(02\)00245-4](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00245-4)

- Rinntech (2010) TSAP-WINTM: Time series analysis and presentation for dendrochronology and related applications
- Sedmáková D, Sedmák R, Bosela M et al (2019) Growth-climate responses indicate shifts in the competitive ability of European beech and Norway spruce under recent climate warming in East-Central Europe. *Dendrochronologia* 54:37–48. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2019.02.001>
- Shumilov OI, Kasatkina EA, Mielikainen K et al (2011) Palaeovolcanos, Solar activity and pine tree-rings from the Kola Peninsula (northwestern Russia) over the last 560 years Palaeovolcanos. *Int J Environ Res* 5:855–864
- Šimůnek V, Vacek Z, Vacek S et al (2019) Growth variability of European beech (*Fagus sylvatica* L.) natural forests: dendroclimatic study from Krkonoše National Park. *Cent Eur For J* 65:3–11. <https://doi.org/10.2478/forj-2019-0010>
- Sinclair ARE, Gosline JM, Holdsworth G et al (1993) Can the solar cycle and climate synchronize the snowshoe hare cycle in Canada? Evidence from tree rings and ice cores. *Am Nat* 141:173–198. <https://doi.org/10.2307/2462664>
- Singh AK, Bhargawa A (2019) Prediction of declining solar activity trends during solar cycles 25 and 26 and indication of other solar minimum. *Astrophys Space Sci* 364:1–7. <https://doi.org/10.1007/s10509-019-3500-9>
- Šmilauer P, Lepš J (2014) Multivariate analysis of ecological data using CANOCO 5. Cambridge University Press, New York
- Špulák O, Souček J (2010) The Sibyla model and development of beech forests affected by air pollution. *Cent Eur J Biol* 5:317–383. <https://doi.org/10.2478/s11535-010-0024-2>
- Štefančík I, Vacek Z, Sharma RP et al (2018) Effect of thinning regimes on growth and development of crop trees in *Fagus sylvatica* stands of Central Europe over fifty years. *Dendrobiology* 79:141–155. <https://doi.org/10.12657/denbio.079.013>
- Stjepanović S, Matović B, Stojanović D et al (2018) The impact of adverse weather and climate on the Width of European Beech (*Fagus sylvatica* L.) tree rings in Southeastern Europe. *Atmosphere (Basel)* 9:451. <https://doi.org/10.3390/atmos9110451>
- Stuiver M, Grootes PM (1980) Trees and the ancient record of heliomagnetic cosmic ray flux modulation. In: *The Ancient Sun: Fossil Record in the Earth, Moon and Meteorites*, pp 165–173
- Sun D, Zhang H, Guo Z (2018) Complexity analysis of precipitation and runoff series based on approximate entropy and extreme-point symmetric mode decomposition. *Water (Switzerland)* 10:1–16. <https://doi.org/10.3390/w10101388>
- Sunkara SL, Tiwari RK (2016) Wavelet analysis of the singular spectral reconstructed time series to study the imprints of solar-ENSO-geomagnetic activity on Indian climate. *Nonlinear Process Geophys* 23:361–374. <https://doi.org/10.5194/npg-23-361-2016>
- Surovy P, Dorotovic I, Karlovsky V et al (2010) Impact of solar activity on the growth of pine trees (*Pinus cembra*: 1610–1970; *Pinus pinaster*: 1910–1989). In: *Proceedings of the 20th Slovak National Solar Physics Meeting*, pp 184–188
- Surový P, Ribeiro NA, Evora U De, et al (2002) Influence of solar activity cycles on cork growth—a hypothesis. In: *Proceedings of the 19th National solar physics meeting, Papradno*, pp 67–72
- Tognetti R, Lombardi F, Lasserre B et al (2014) Tree-ring stable isotopes reveal twentieth-century increases in water-use efficiency of *Fagus sylvatica* and *Nothofagus* spp. in Italian and Chilean Mountains. *PLoS ONE* 9:1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0113136>
- Tognetti R, Lasserre B, Di Febbraro M, Marchetti M (2019) Modeling regional drought-stress indices for beech forests in Mediterranean mountains based on tree-ring data. *Agric For Meteorol* 265:110–120. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.11.015>
- Tolazs R (2007) Atlas podnebí Česka. Český hydrometeorologický ústav, Praha
- Usoskin IG (2017) A history of solar activity over millennia. *Living Rev Sol Phys* 14:1–97. <https://doi.org/10.1007/s41116-017-0006-9>
- Vacek S, Hejcman M (2012) Natural layering, foliation, fertility and plant species composition of a *Fagus sylvatica* stand above the alpine timberline in the Giant (Krkonoše) Mts. Czech Republic. *Eur J For Res* 131:799–810. <https://doi.org/10.1007/s10342-011-0553-x>
- Vacek S, Matějka K (2010) Health status of forest stands on permanent research plots in the Krkonoše Mts. *J For Sci* 56:555–569. <https://doi.org/10.17221/128/2010-JFS>
- Vacek S, Nosková I, Bílek L et al (2010) Regeneration of forest stands on permanent research plots in the Krkonoše Mts. *J For Sci* 56:541–554. <https://doi.org/10.17221/65/2010-JFS>
- Vacek S, Bílek L, Schwarz O et al (2013) Effect of air pollution on the health status of spruce stands effect of air pollution on the health status of spruce stands. *Mt Res Dev* 33:40–50. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-12-00028.1>
- Vacek S, Hůnová I, Vacek Z et al (2015a) Effects of air pollution and climatic factors on Norway spruce forests in the Orlické hory Mts. (Czech Republic), 1979–2014. *Eur J For Res* 134:1127–1142. <https://doi.org/10.1007/s10342-015-0915-x>
- Vacek Z, Vacek S, Bílek L et al (2015b) Changes in horizontal structure of natural beech forests on an altitudinal gradient in the Sudetes. *Dendrobiology* 73:33–45. <https://doi.org/10.12657/denbio.073.004>
- Vacek S, Prokúpková A, Vacek Z et al (2019a) Growth response of mixed beech forests to climate change, various management and game pressure in Central Europe. *J For Sci* 65:331–345. <https://doi.org/10.17221/82/2019-JFS>
- Vacek Z, Vacek S, Slanař J et al (2019b) Adaption of Norway spruce and European beech forests under climate change: from resistance to close-to-nature silviculture. *Cent Eur For J* 65:129–144. <https://doi.org/10.2478/forj-2019-0013>
- Viewegh J, Kusbach A, Mikeska M (2003) Czech forest ecosystem classification. *J For Sci* 49:85–93
- Volobuev DM, Makarenko NG (2008) Forecast of the decadal average sunspot number. *Sol Phys* 249:121–133. <https://doi.org/10.1007/s11207-008-9167-y>
- Wang X, Bin Zhang Q (2011) Evidence of solar signals in tree rings of Smith fir from Sygera Mountain in southeast Tibet. *J Atmos Solar-Terrestrial Phys* 73:1959–1966. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2011.06.001>
- Westfall RD, Bunn AG, Baldwin J et al (2013) Using simulations and data to evaluate mean sensitivity (ζ) as a useful statistic in dendrochronology. *Dendrochronologia* 31:250–254. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2013.01.004>
- Zang C, Hartl-Meier C, Dittmar C et al (2014) Patterns of drought tolerance in major European temperate forest trees: climatic drivers and levels of variability. *Glob Chang Biol* 20:3767–3779. <https://doi.org/10.1111/gcb.12637>
- Zang C, Buras A, Cecile J, et al (2018) Package ‘dplR’ R, Dendrochronology Program Library in R Version, 134

5.1.3. Sluneční cykly jako základní faktor ovlivňující přirozenou dynamiku porostů

Tento příspěvek na konferenci shrnuje téma vlivu klimatických faktorů a slunečního cyklu na strukturu homogenních a heterogenních bukových porostů. V tomto příspěvku je popisován průběh radiálního růstu buku lesního ve východních Krkonoších na Rýchorách. Jsou zde analyzována data radiálního přírůstu buku vůči srážkám, teplotám vzduchu a roční ploše slunečních skvrn. Pro analýzu byla použita lineární regresní analýza a korelační tabulka. Nástrojem této studie je dendrochronologická analýza porostů buku lesního ve východních Krkonoších na Rýchorách. Vzorky pro dendrochronologickou analýzu byly odebrány v homogenních bučinách procházejících přírodním vývojem od roku 1963, přičemž dle malého vývojového cyklu se jedná o stádium optima a v heterogenních bučinách o stádium dorůstání/rozpadu.

Výsledky příspěvku ukazují, že sluneční skvrny mají signifikantní korelaci s homogenními bukovými porosty (51 %) a následně s heterogenními porosty (28 %). Také bylo zjištěno, že heterogenní porosty buku vykazují lepší odolnost vůči mrazům a imisní zátěži (Šimůnek et al. 2019a).

Citace příspěvku:

ŠIMŮNEK, V., VACEK, Z., SHARMA, R.P., VACEK, S. (2019): Sluneční cykly jako základní faktor ovlivňující přirozenou dynamiku porostů buku lesního. [Sunspot cycles as the underlying factor of European beech natural development]. In: Houšková K., David. J. (eds.), Pěstování lesů ve střední Evropě. Proceedings of Central European Silviculture. Vol. 9, Sborník původních vědeckých prací u příležitosti 20. vědecké konference pěstitelů lesa. Brno, 4.–5. 9. 2019, Mendelova univerzita v Brně: 267–277 s. ISBN 978-80-7509-669-2.

SLUNEČNÍ CYKLY JAKO ZÁKLADNÍ FAKTOR OVLIVŇUJÍCÍ PŘIROZENOU DYNAMIKU POROSTŮ BUKU LESNÍHO

SUNSPOT CYCLES AS THE UNDERLAYING FACTOR OF EUROPEAN BEECH NATURAL DEVELOPMENT

Václav Šimůnek*, Zdeněk Vacek, Ram Sharma, Stanislav Vacek

Česká zemědělská univerzita, Fakulta lesnická a dřevařská, Kamýcká 129, 165 21 Praha 6 – Suchdol, ČR

*corresponding author: simunek@fld.czu.cz

Abstract

*The growth dynamics of beech forests are becoming a key chapter in forest research during the time of global climate change, while the new findings from other disciplines can benefit forest-scientific activity. One of the neglected chapters are the sunspot activity and their influence on the Earth's surface and forest stands, which can be examined by dendrochronological analysis. The subject of this study deals with the growth dynamics and development of European beech stands in the eastern part of Giant Mountains (Krkonoše) in the area of Rýchory. The dendrochronological analysis is the main tool for this study of autochthonous European beech (*Fagus sylvatica* L.) in which the 66 dendrochronological samples were analysed for this work. The samples were taken in naturally developed beech stands that had been without influence of forest management since 1963. The research plots are going true a small natural developmental cycle in which the half of the investigated stands goes true stage of optimum (homogeneous) and other part true stage of destruction/regeneration (heterogeneous). The results show that the sunspot area has a significant effect on the tree-ring growth of the European beech stands, while the homogeneous beech stands are more affected (51%) than heterogeneous beech stands (28%), in which the heterogeneous beech stands has better resistance to frost and air pollution load.*

Keywords: sunspot area, tree-ring growth, dendrochronology, Central Europe, *Fagus sylvatica* L.

Abstrakt

*Růstová dynamika porostů buku lesního se v době klimatické změny stává klíčovou kapitolou lesnického výzkumu, přičemž nové poznatky i z jiných oborů a disciplín mohou obohatit tuto lesnicko-vědeckou činnost. Jednou z opomíjených kapitol jsou sluneční skvrny a jejich vliv na zemský povrch a lesní porosty, které mohou být zkoumány dendrochronologickou analýzou. Tato práce se zabývá studiem dynamiky a vývoje porostů buku lesního ve východních Krkonoších v oblasti Rýchor. Nástrojem této studie je dendrochronologická analýza autochtonního buku lesního (*Fagus sylvatica* L.). Pro tuto práci bylo použito celkem 66 analyzovaných dendrochronologických vývrťů. Vzorky byly odebrány v homogenních bučinách procházejících přírodním vývojem od roku 1963, přičemž dle malého vývojového cyklu se jedná o stádium optima a v heterogenních bučinách o stádium dorůstání/rozpadu. Výsledky ukazují, že sluneční skvrny mají signifikantní efekt na dynamiku porostů buku lesního a přitom nejlépe reagují homogenní porosty (51 %) a následně heterogenní porosty (28 %), které vykazují lepší odolnost vůči mrazům a imisní zátěži.*

Klíčová slova: plocha slunečních skvrn, radiální růst, dendrochronologie, centrální Evropa, *Fagus sylvatica* L.

Úvod a problematika

Sluneční skvrna je definována jako tmavá oblast na slunečním povrchu, kde dochází ke smyčkovému výboji magnetického pole z nitra slunce (HATHAWAY, 2015) a je také dokázáno, že periodický výskyt slunečních skvrn má vliv na atmosféru zemského povrchu (ABBOTT et JUHL, 2016). Sluneční cykly probíhají v 11 letých intervalech a jsou přímo propojené s výskytem slunečních skvrn, které ovlivňují aktivitu slunečního ozáření zemské magnetické mřížky (BONEV et al., 2004). Výskyt slunečních skvrn je spojen s vývojem klimatu, což bylo dokázáno již od středověku (CECCHINI et al., 1996; KOCH et al., 2007; PAULSEN et al., 2003). Sluneční skvrny jsou

také propojeny s fluktuacemi ledovců během holocénu (BERGER, 2010; KOCH et al., 2007) a mají také vliv na průtok řeky Amazonky (BAKER et al., 2018), což úzce souvisí s EL Nino efektem (Dong et al., 2018; Perone et al., 2016). Aktivita slunečních skvrn je také spojena s teplotami zemského povrchu (SUNKARA a TIWARI, 2016) a atmosféry ve větších nadmořských výškách (>1500m) – (KUMAR et al., 2018). Mnoho prací dokazuje reálný vliv aktivity slunečních skvrn na srážky a teploty (BAKER et al., 2018; MALINIEMI et al., 2018; MAUAS et al., 2016), což se přímo odráží na změně globálního klimatu, přičemž toto působení může být také rozptýleno dalšími vlivy (GUPTA et al., 2015). Sluneční skvrny též v atmosféře ovlivňují radioisotopy ^{14}C a ^{10}Be , které chemickou reakcí oxidují přes ^{14}N a ^{16}O na CO_2 , který může být zpracován rostlinami (BEER et al., 1990; HATHAWAY, 2015; STUIVER et GROOTES, 1980). V souvislosti s přírůstem dřevin byly v minulosti provedeny výzkumy, které potvrzují jak negativní (SUROVY et al., 2010; SUROVÝ et al., 2002), tak i pozitivní spojitost výskytu slunečních skvrn a radiálního růstu (LEAVITT et BANNISTER, 2009; MOSELEY, 1941; WANG a ZHANG, 2011).

U buku lesního dosud nebyla žádná podobná studie publikována a celkově se o spojitosti slunečních skvrn a přírůstu lesních dřevin mnoho neví. Ve spojitosti s bukem lesním jsou známé fakty, že buk lesní je ovlivněn nejvíce průměrnými teplotami a poté srážkami (KRÁLÍČEK et al., 2017; ŠIMŮNEK et al., 2019; SLANAŘ et al., 2017). Dalším důležitým faktem pro tuto práci je větší citlivost buku lesního vůči CO_2 než je tomu u jiných dřevin, což potvrzují i další výzkumy (CONTE et al., 2018; KOVÁČ et al., 2018). Dále byla naše zkoumaná oblast ovlivněna imisní kalamitou (například oxidy síry a dusíku) v letech 1965 až 1986 (KRÁL et al., 2015; MATĚJKA et al., 2010). Díky přírodním podmínkám a dobře doložitelnému vlivu člověka na lesní dřeviny v námi zkoumané oblasti vznikly přirozeně se vyvíjející bučiny, které prochází všemi stádii malého vývojového cyklu, což zde bylo dobře zdokumentováno (ŠIMŮNEK et al., 2019; VACEK et al., 2010; VACEK et al., 2016).

Tato studie by měla zjistit spojitost mezi slunečními skvrnami, srážkami, teplotami a přírůstem buku lesního v různých stádiích vývoje lesa od založení Krkonošského národního parku v roce 1963. Hlavním cílem této práce je porovnání již zmíněné sluneční aktivity a klimatických faktorů u homogenních (stádium optima) a heterogenních bučin (stádia rozpadu a dorůstání) od roku 1986, kdy autochtonní bukové porosty ve zkoumané oblasti byly ponechány samovolnému vývoji.

Materiál a metodika

Charakteristika zájmového území

Zkoumané území je umístěno ve východních Krkonoších v oblasti zvané Rýchory. Výzkumné plochy se nacházejí v I. zóně ochrany přírody Krkonošského národního parku nedaleko města Žacléř, a to poblíž hranic s Polskem. Do této práce jsou zahrnuté 4 výzkumné plochy: dvě z Boberské stráně a dvě z Dvorského lesa. Výzkumné plochy z Boberské stráně mají homogenní strukturu porostu a procházejí dle malého vývojového cyklu stádium optima. Nachází se v nadmořské výšce od 940 do 960 m na svahu s jihovýchodní expozicí o sklonu 29°. Na těchto plochách je hlavní dřevinou buk lesní (*Fagus Silvatica* L., 97 %), dále je vtroušen javor klen (*Acer psedoplatanus* L., 2 %) a jeřáb ptačí (*Sorbus aucuparia* L., 1 %). Výzkumné plochy z Dvorského lesa mají opět hlavní dřevinou buk lesní (98 %) a vtroušený smrk ztepilý (*Picea abies* /L./ Karst., 2%) a nachází se ve výšce od 740 do 760 m na svahu s jihovýchodní expozicí o sklonu 9°. Průměrné roční teploty se pohybují okolo 5,2 °C a průměrný roční úhrn srážek je 870 mm. Počet dní vegetačního období se pohybuje okolo 120 dní s průměrnou teplotou 11,9 °C a úhrnem srážek 640 mm.

Fytocenologicky jsou výzkumné plochy řazeny od květnatých bučin (*Fagion* Luquet 1926, podsvazu *Eu-Fagenion* Oberdorfer 1957) po acidofilní horské bučiny (*Luzulo-Fagenion* Oberdorfer 1957). Bukové porosty jsou autochtonního původu a jsou ponechány bez zásahů již od roku 1963. Výzkumné plochy jsou o velikosti 50 × 50 m a byly založeny v roce 1980. Tyto výzkumné plochy byly již dříve hodnoceny v publikacích (ŠIMŮNEK et al., 2019; S. VACEK et al., 2013, 2015). Další charakteristiky jsou uvedeny v Tab. 1.

Tab. 1: Základní charakteristiky výzkumných ploch

Tab. 1: Basic research plots characteristics

Research plots	Development cycle	GPS	Altitude (m)	Exposure	Tree species	Mean height (m)	Mean thickness (cm)	Forest type	Stand stocking
Výzkumné plochy	Vývojové stádium	Souřadnice	Nadmoř. výška (m)	Expozice	Druh dřeviny	Průměrná výška (m)	Průměrná tloušťka (cm)	Lesní typ	Zakmenění
	Rozpad Dorůstání								
Heterogenní Heterogeneous	Destruction Recovery	50°38'47.5"N 15°52'15.2"E	940 - 960	SE JV	FS PA	24 28	41 45	6Z	0.8
Homogenní Homogeneous	Optimal Optimum	50°40'07.6"N 15°52'58.1"E	740 - 760	NE SV	FS PA SA	27 31 26	28 40 27	6K	0.9

Vysvětlivky/Notes: 6S - *Piceeto-Fagetum mesotrophicum* (Nutrient-medium Spruce-Beech); 6B - *Piceeto-Fagetum eutrophicum* (Nutrient-rich spruce-beech) Dřeviny/Species²: FS – *Fagus sylvatica* L., PA – *Picea abies* (L.) Karst., AP – *Acer pseudoplatanus* L.

Sběr dat

Pro dendrochronologickou analýzu byl na čtyřech výzkumných plochách o velikosti 50×50 m (0,25 ha) proveden sběr dendrochronologických vzorků. Všechny vzorky byly odebrány presslerovým nebozezem kolmo na tečnou rovinu stromu ve směru vrstevnice, tak aby byl odebrán dendrochronologický vývrt ke středu kmene. Pro odběr vzorků byly vybrány zdravé stromy silnější >25 cm ve výčetní výšce. Stromy pro odběr byly vybrány náhodným výběrem pomocí RNG výběru z programu MS Excel. Vývrty byly měřeny mikroskopem Olympus za použití měřického stolu LINTAB (Rinntech, 2010). Ukládání dendrochronologických dat bylo provedeno v softwaru TSAP-Win (Rinntech, 2010) a následné krosdatování bylo provedeno v softwaru Cdendro (Cybis Elektronik & Data, b.r.), tak aby index CC>35, kdy bylo nakonec využito pro zpracování dat 66 vzorků z 82 odebraných vzorků, které splňovaly hranici indexu CC. Více popisných informací struktury porostů a vzorků se nachází v Tab. 1, která byla odvozena ze šetření z roku 2018 technologií Field map (IFER-Monitoring and Mapping Solutions Ltd.). Základní popisné informace dendrochronologie vzorků jsou zobrazeny v Tab. 2.

Klimatická data (srážky a teploty) byla použita z nejbližší meteorologické stanice Českého hydrometeorologického ústavu z Pece pod Sněžkou, která se nachází 14 km od výzkumných ploch v nadmořské výšce 656 m (GPS 50°18'24"N, 16°21'07"E). Rozmezí zkoumaných klimatických dat bylo stanoveno od roku 1976 do 2017. Data o aktivitě slunečních skvrn byla použita z webových stránek NASA/NOAA (National Aeronautics and Space Administration/ National Oceanic Atmospheric Administration) (HATHAWAY et al., 2017).

Tab. 2: Základní charakteristiky dendrochronologické analýzy pro vzorky z výzkumných ploch
Tab. 2: Basic dendrochronological characteristics for samples of research plots

Research plots	Number of cores	Age range of sampled trees (year)	Range height of sampled trees (m)	Mean growth (mm)	Median of tree rings	Standard deviation
Výzkumné plochy	Počet vzorků	Věkové rozpětí vzorků (roky)	Rozpětí vzorkovaných stromů (m)	Průměrný přírůst (mm)	Medián přírůstu	Směrodatná odchylka
Heterogenní Heterogeneous	33	80 - 230	17 - 28	1.02	0.95	0.53
Homogenní Homogeneous	33	150 - 230	23 - 32	1.04	0.97	0.53

Analýza dat

Zpracování dat dendrochronologické analýzy bylo provedeno v programu R (R Core Team, 2018), za použití balíčku „dplr“ a „signal“, díky kterým byla provedena negativně exponenciální detrendace s proloženým splinem 1/3 věku ke každému vzorku, čímž došlo k odstranění věkového trendu (BUNN a MIKKO, 2018a) se zachováním krátkodobých nízkofrekvenčních klimatických vlivů (SHUMILOV et al., 2011). Následně jednotlivé zdetrendované křivky stromů byly zprůměrovány, tyto křivky byly poté vyhlazeny pomocí vloženého osmiletého „splinu“ pro odstranění krátkodobých vlivů do 8 let (BUNN a MIKKO, 2018b). Pearsonova korelace mezi srážkami, teplotami a slunečními skvrnami byla provedena v programu Statistica 12 (StatSoft, Tulsa, OK, USA).

Výsledky a diskuze

Aktivita slunečních skvrn a klimatické údaje, které jsou spojeny s radiálním růstem buku lesního, nevykazují podobnost, což popisují obrázky 1, 2 a tabulka 3. Klimatické údaje v jiných publikacích, ale dokládají, že aktivita slunečních skvrn je propojena například se srážkami přes monzunové deště (WANG a ZHANG, 2011), ale toto naše údaje vizuálně ani korelačně neprokazují. Aktivita slunečních skvrn může sledované plochy ovlivnit, protože bylo v minulosti dokázáno, že od výšky 1500 m n. m. jsou teploty propojené se slunečními skvrnami (KUMAR et al., 2018), ale opět získaná data tuto souvislost neukazují. Získané údaje se tedy zdají být navzájem odlišné.

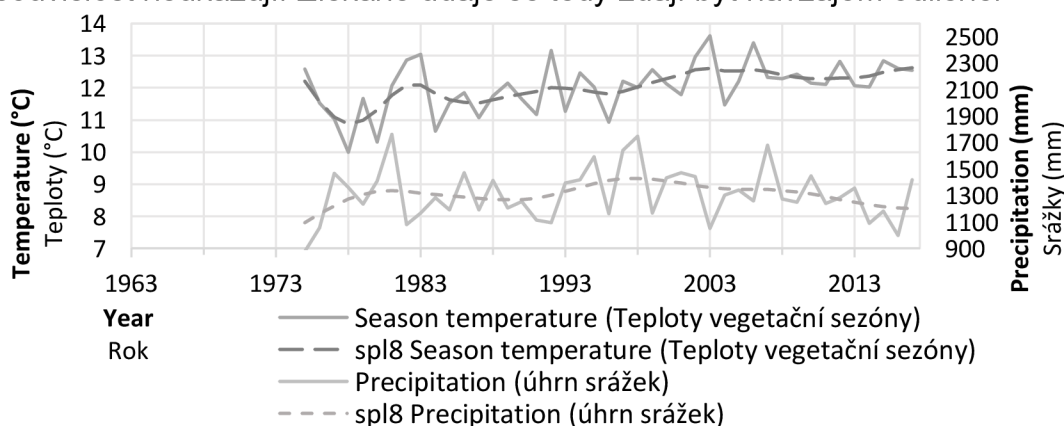
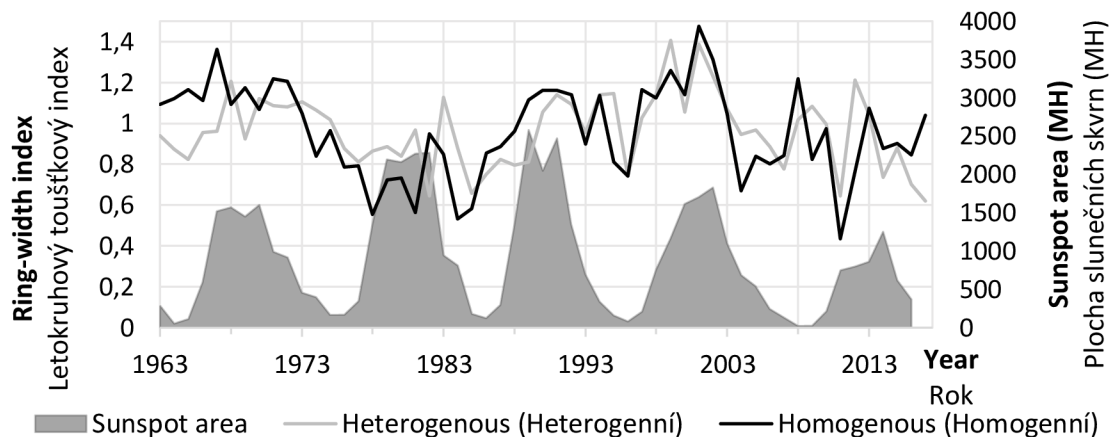
**Obr. 1:** Teploty ve vegetační sezóně a celkový úhrn srážek; spl8 – 8 letý spline proložený datovou křivkou

Fig. 1: Season temperature and year precipitation; spl8 – 8 year spline added from data curve

Přírůst buku lesního převedený na index bez věkového trendu zobrazují obr. 2 a 3, kde jsou přírůsty heterogenních a homogenních bučin ve vztahu k průměrné roční velikosti slunečních skvrn. Na první pohled je patrné, že sluneční skvrny ovlivňují

heterogenní i homogenní bukové porosty, což doposud nebylo zjištěno, ale v minulosti byly provedeny výzkumy, které potvrzují vztah slunečních skvrn a tloušťkového přírůstu dřevin (MOSELEY, 1941; SINCLAIR et al., 1993), ale doposud nebylo zjištěno, v jakém měřítku jsou sluneční skvrny propojeny s růstem stromů. V posledních letech na našich výzkumných plochách docházelo k pozdním mrazům (rok 2011), které rozptylovaly efekt slunečních skvrn na homogenní i heterogenní porosty, což souhlasí i s literaturou (Králiček et al., 2017). Další důležitý faktor, který ovlivnil lesní porosty, byl vliv imisní kalamity, což je patrné v letech 1975 až 1986, kdy toto bylo zkoumáno v minulosti (MATĚJKA et al., 2010; SLANAŘ et al., 2017; ŠPULÁK a SOUČEK, 2010; S. VACEK et LEPŠ, 2006).

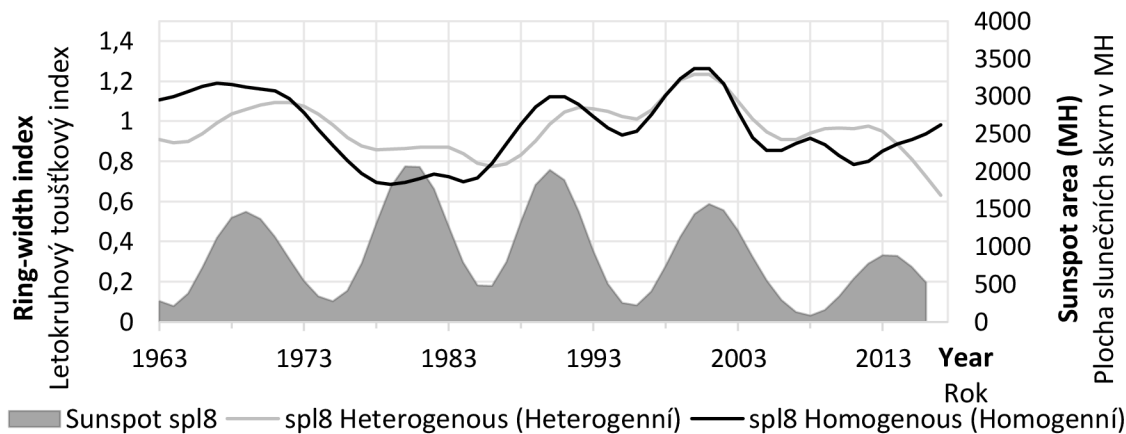


Obr. 2: Letokruhový tloušťkový index buku lesního a průměrná roční plocha slunečních skvrn v MH (miliontinach sluneční hemisféry) od roku 1963 do 2017

Fig. 2: Ring-width index of European beech and mean year sunspot area in MH (millionth of hemisphere) from 1963 to 2017

V případě odstranění a vyhlazení krátkodobých vlivů osmiletým splinem (obr. 3) vidíme, že přírůstová křivka heterogenních i homogenních bučin více reaguje na 11 letou cyklicitu slunečních skvrn. Krátce od založení Krkonošského národního parku v roce 1963 vidíme, že došlo k velkému negativnímu zásahu do přírůstu buku lesního, ale i v této době si můžeme všimnout malé reakce na sluneční aktivitu, což je patrné v letech od roku 1980 do 1984. Největší reakce na sluneční skvrny je patrná od roku 1986, kdy na zkoumaných plochách přestala úplná činnost člověka a porosty se začaly samovolně vyvíjet. Na sluneční skvrny nejlépe reagují homogenní porosty buku lesního, ale zároveň také trpí největším poškozením mrazy, což potvrzuje i literatura (ŠIMŮNEK et al., 2019). Heterogenní porosty buku reagují na sluneční skvrny s menšími výkyvy a také dochází k menším odezvám na negativní vlivy, což je zřejmé zejména v období imisní kalamity nebo v letech s pozdními mrazy (rok 2011).

Nejmarkantnější číselná ukázka aktivity slunečních skvrn je uvedena v tab. 3, kdy dochází k velkému 20 % rozdílu mezi heterogenními ($r = 0,51$) a homogenními bučinami ($r = 0,28$). V případě dalších klimatických faktorů, které mají vliv na přírůst buku lesního, jsou teploty druhým hlavním činitelem v růstu buku, což bylo zkoumáno také v minulosti (S. VACEK a HEJCMAN, 2012), ale bez zmínek o slunečních skvrnách. V rámci klimatických faktorů více reagují na teploty i srážky heterogenní porosty, ale u homogenních porostů dochází k většímu vlivu slunečních skvrn.



Obr. 3: Letokruhový tloušťkový index buku lesního a průměrná roční plocha slunečních skvrn v MH (miliontinách sluneční hemisféry) proložené 8 letým splinem (spl8) od roku 1963 do 2017

Fig. 3: Ring-width index of European beech and mean year sunspot area in MH (millionth of hemisphere) splined by 8 year (spl8) from 1963 to 2017

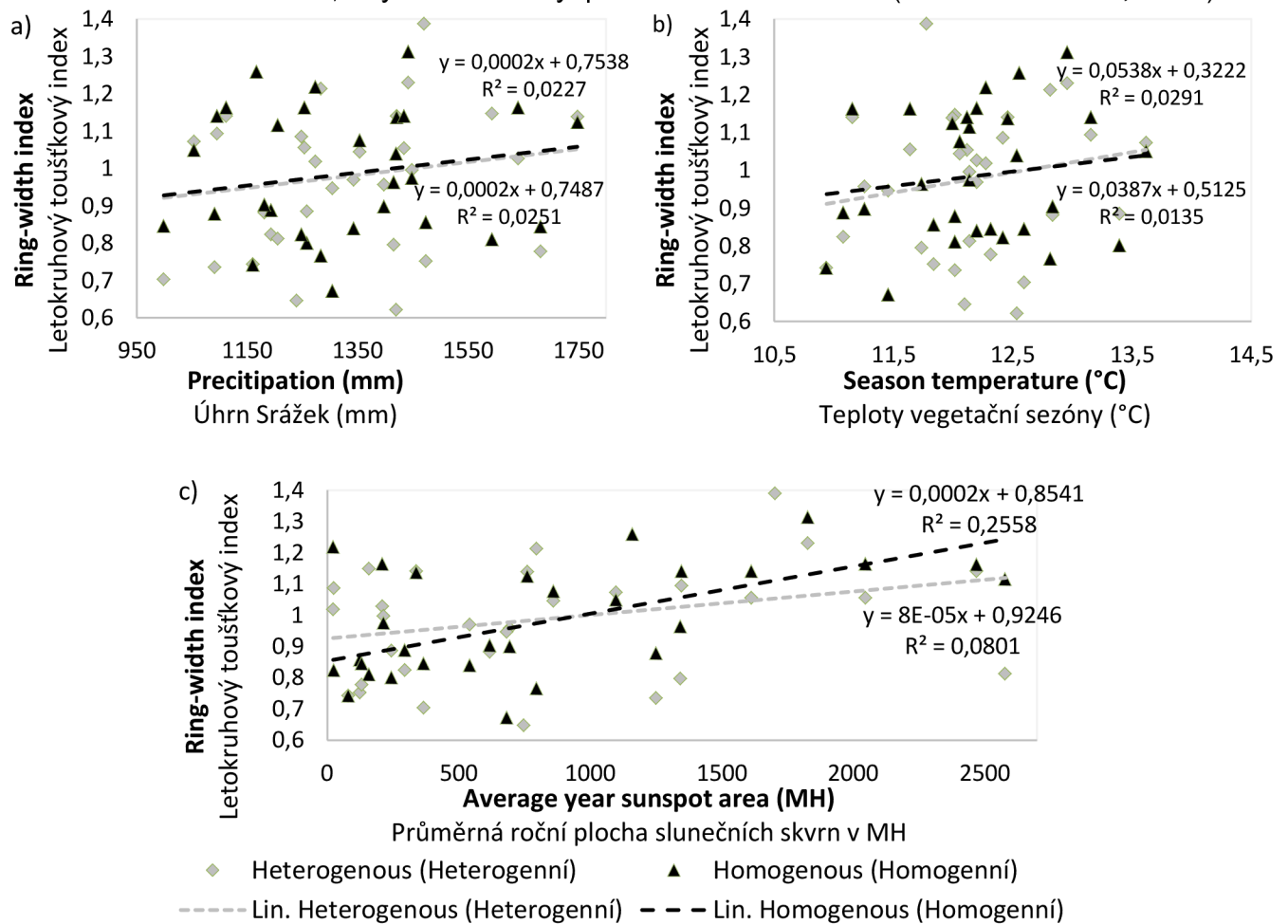
Tab. 3: Pearsonova korelační tabulka vztahů mezi tloušťkovým přírůstem, sezónními teplotami, srážkami a slunečními plochami od 1986 do 2017 (signifikantní údaje ($p < 0.05$) jsou tučně)

Tab. 3: Pearson's correlation table between tree-ring growth, season temperature, precipitation and sunspot area from 1986 to 2017 (significant values ($p < 0.05$) are in bold)

	Letokruhový tloušťkový index homogenní bučiny <i>Ring-width index homogenous beech stand</i>	Letokruhový tloušťkový index heterogenní bučiny <i>Ring-width index heterogeneous beech stand</i>	Plocha slunečních skvrn <i>Sunspot area</i>	Úhrn srážek <i>Precipitation</i>
Plocha slunečních skvrn <i>Sunspot area</i>	0.51	0.28		
Úhrn srážek <i>Precipitation</i>	0.15	0.16	-0.34	
Teploty <i>Temperature</i>	0.16	0.18	-0.02	-0.11

Klimatické faktory, které ovlivňují růst buku lesního v letech od 1986 do 2017, jsou patrné z obr. 4. Teploty a srážky vykazují podobné hodnoty regresního modelu R^2 , což značí vztah k přírůstu obou hodnot. V případě aktivity slunečních skvrn vidíme odlišnost mezi reakcemi heterogenních a homogenních bučin, kdy více reagují stejnorodé bučiny ve vztahu ke zvyšujícím se slunečním skvrnám. Lineární regresní model slunečních skvrn vůči přírůstu značí rozdílný koeficient determinace, kdy homogenní bučiny ($R^2 = 0,26$) vykazují nižší R^2 než heterogenní bučiny ($R^2 = 0,08$). Celková reakce buku lesního na sluneční skvrny je v této práci přisuzována citlivosti na CO_2 , což bylo dokázáno (KOVÁČ et al., 2018) i ve vztahu ke změně klimatu (REZAIÉ et al., 2018). Samotné sluneční skvrny ovlivňují radioisotopy ^{14}C a ^{10}Be , které komplikovaným procesem oxidují na CO_2 , který může být zpracován rostlinami (BEER et al., 1990; HATHAWAY, 2015; STUIVER a GROOTES, 1980). Možné využití těchto poznatků se nabízí v kombinaci s vědeckými pracemi z astronomie, kdy v roce 2008 byla publikována práce, která předpokládala snížení aktivity slunečních skvrn (VOLOBUEV a MAKARENKO, 2008) a tato předpověď se také vyplnila, přičemž od té doby došlo shodou okolností ke snížení přírůstu bukových porostů na Rýchorách ve východních Krkonoších. Během nižší sluneční aktivity od roku 2008 došlo také

k jarním mrazům, což může souviset s předpokládaným snížením teplot během slunečního minima, kdy tento fakt byl publikován v minulosti (LOCKWOOD et al., 2017).



Obr. 4: Souvislost slunečních skvrn, sezónních teplot a ročního úhrnu srážek na přírůst buku lesního od roku 1986 do 2017 přičemž: a) vliv srážek na letokruhový přírůst; b) vliv teplot na letokruhový přírůst; c) vliv slunečních skvrn na přírůst v MH (miliontínách sluneční hemisféry)

Fig. 4: Relationship of sunspot activity, season temperature and year precipitation to ring-width index of European beech from 1986 to 2017 in which: a) Influence of year precipitation to ring-width index; b) Influence of season temperature to ring-width index; c) Influence of mean year sunspot area in MH (millionth of hemisphere)

Závěr

Aktivity slunečních skvrn významně ovlivňují autochtonní bukové porosty ve východních Krkonoších. Ze získaných dat vyplývá, že vliv slunečních skvrn na bukové porosty je větší, než je tomu u sezónních teplot nebo úhrnu ročních srážek. Homogenní porosty jsou ovlivněny slunečními skvrnami více než heterogenní porosty, ale zároveň porosty, které procházejí stádiem dorůstání a rozpadu jsou méně citlivé na negativní účinky imisní zátěže a jarních mrazů. Tato práce doplňuje nové poznatky o globální změně klimatu, kdy tyto informace mohou být také využity pro budoucí predikování radiálního růstu a produkce lesních dřevin.

Literatura

ABBOTT, D., JUHL, R. ScienceDirect New historical records and relationships among 14 C production rates, abundance and color of low latitude auroras and sunspot abundance q. *Advances in Space Research*, 2016. 58 (11): s. 2181–2246.

- BAKER, J. C. A., GLOOR, M., BOOM, A., NEILL, D. A., CINTRA, B. B. L., CLERICI, S. J., BRIENEN, R. J. W. Questioning the Influence of Sunspots on Amazon Hydrology: Even a Broken Clock Tells the Right Time Twice a Day. *Geophysical Research Letters*, 2018. 45 (3): s. 1419–1422.
- BEER, J., BLINOV, A., BONANI, G., FINKEL, R. C., HOFMANN, H. J., LEHMANN, B., OESCHGER, H., SIGG, A., SCHWANDER, J., STAFFELBACH, T., STAUFFER, B., SUTER, M., WÖTFLI, W. Use of ^{10}Be in polar ice to trace the 11-year cycle of solar activity. *Nature*, 1990. 347 (6289): s. 164–166.
- BERGER, W. H. On glacier retreat and drought cycles in the Rocky Mountains of Montana and Canada. *Quaternary International*, 2010 215 (1–2): s. 27–33.
- BONEV, B. P., PENEV, K. M., SELLO, S. Long-Term Solar Variability and the Solar Cycle in the 21st Century. *The Astrophysical Journal*, 2004. 605 (1): s. 81–84.
- BUNN, A., MIKKO, K. Chronology Building in dplR, 2018a .
- BUNN, A., MIKKO, K. Time Series Analysis in dplR, 2018b.
- CECCHINI, S., GALLI, M., NANNI, T., RUGGIERO, L. Solar variability and ring widths in fossil trees. *Nuovo Cimento della Societa Italiana di Fisica C.*, 1996. 19 (4): s. 527–536.
- CONTE, E., LOMBARDI, F., BATTIPAGLIA, G., PALOMBO, C., ALTIERI, S., LA PORTA, N., MARCHETTI, M., TOGNETTI, R. Growth dynamics, climate sensitivity and water use efficiency in pure vs. mixed pine and beech stands in Trentino (Italy). *Forest Ecology and Management*, 2018. 409 (September 2017): s. 707–718.
- Cybis Elektronik & Data, S. (b.r.) Cybis CDendro & CooRecorder. . Saltsjobaden.
- DONG, L., FU, C., LIU, J., ZHANG, P. Combined Effects of Solar Activity and El Niño on Hydrologic Patterns in the Yoshino River Basin, Japan. *Water Resources Management*, 2018. 32 (7): s. 2421–2435.
- GUPTA, R., GIL-ALANA, L. A., YAYA, O. S. Do sunspot numbers cause global temperatures? Evidence from a frequency domain causality test. *Applied Economics*, 2015. 47 (8): s. 798–808.
- HATHAWAY, D. H. 2015. The solar cycle. *Living Reviews in Solar Physics*. 12 (1).
HATHAWAY, D. H., ADAMS, M., WEBER, R. 2017. Royal Observatory, Greenwich - USAF/NOAA Sunspot Data. Získáno z <https://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch.shtml>
- KOCH, J., CLAGUE, J. J., OSBORN, G. D. Glacier fluctuations during the past millennium in Garibaldi Provincial Park, southern Coast Mountains, British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 2007. 44 (9): s. 1215–1233.
- KOVÁČ, D., VESELOVSKÁ, P., KLEM, K., VEČEŘOVÁ, K., AČ, A., PEÑUELAS, J., URBAN, O. Potential of photochemical reflectance index for indicating photochemistry and light use efficiency in leaves of European beech and Norway spruce trees. *Remote Sensing*, 2018. 10 (8).
- KRÁL, J., VACEK, S., VACEK, Z., PUTALOVÁ, T., BULUŠEK, D., ŠTEFANČÍK, I. Structure, development and health status of spruce forests affected by air pollution in the western Krkonoše Mts. in 1979–2014. *Forestry Journal*, 2015. 61 (3): s. 175–187.
- KRÁLÍČEK, I., VACEK, Z., VACEK, S., REMEŠ, J., BULUŠEK, D., KRÁL, J., ŠTEFANČÍK, I., PUTALOVÁ, T. 2017. Dynamics and structure of mountain autochthonous spruce-beech forests: Impact of hilltop phenomenon, air pollutants and climate. *Dendrobiology*, 2017. 77: s. 119–137.
- KUMAR, V., DHAKA, S. K., PANWAR, V., SINGH, N., RAO, A. S., MALIK, S., YODEN, S. Detection of solar cycle signal in the tropospheric temperature using COSMIC data, 2018. 115 (12).
- LEAVITT, S. W., BANNISTER, B. Dendrochronology and radiocarbon dating: The

- laboratory of tree-ring research connection. *Radiocarbon*, 2009. 51 (1): s. 373–384.
- LOCKWOOD, M., OWENS, M., HAWKINS, E., JONES, G. S., USOSKIN, I. Frost fairs, sunspots and the Little Ice Age SOLAR ASTRONOMY: LITTLE ICE AGE. *Astronomy & Geophysics*, 2017. 58 (2): s. 217–223.
- MALINIEMI, V., ASIKAINEN, T., MURSULA, K. Decadal variability in the Northern Hemisphere winter circulation: Effects of different solar and terrestrial drivers. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2018. 179 (February): 40–54.
- MATĚJKA, K., VACEK, S., PODRÁZSKÝ, V. Development of forest soils in the Krkonoše Mts. in the period 1980–2009. *Journal of Forest Science*, 2010. 56 (11): s. 485–504.
- MAUAS, P. J. D., BUCCINO, A. P., FLAMENCO, E. 2016. Solar activity forcing of terrestrial hydrological phenomena. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 2016. 12 (328): s. 180–191.
- MOSELEY, E. L. Sun-spots and Tree Rings. *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, 1941. 35: s. 376.
- PAULSEN, D. E., LI, H. C., KU, T. L. Climate variability in central China over the last 1270 years revealed by high-resolution stalagmite records. *Quaternary Science Reviews*, 2003. 22 (5–7): s. 691–701.
- PERONE, A., LOMBARDI, F., MARCHETTI, M., TOGNETTI, R., LASSERRE, B. Evidence of solar activity and El Niño signals in tree rings of *Araucaria araucana* and *A. angustifolia* in South America. *Global and Planetary Change*, 2016. 145: s. 1–10.
- REZAIE, N., D'ANDREA, E., BRÄUNING, A., MATTEUCCI, G., BOMBI, P., LAUTERI, M. Do atmospheric CO₂ concentration increase, climate and forest management affect iWUE of common beech? Evidences from carbon isotope analyses in tree rings. *Tree Physiology*, 2018. 38 (8). s. 1110–1126.
- Rinntech 2010. TSAP-WINTM: Time series analysis and presentation for dendrochronology and related applications. . Heidelberg, Germany. Získáno z <http://www.rinntech.com>
- SHUMILOV, O., TIMONEN, M., KANATJEV, A. G. Palaeovolcanos , Solar activity and pine tree-rings from the Kola Peninsula (northwestern Russia) over the last 560 years Palaeovolcanos. *International Journal of Environmental Research*, 2011. 5 (4): s. 855–864.
- ŠIMŮNEK, V., VACEK, Z., VACEK, S., KRÁLÍČEK, I., VANČURA, K. Growth variability of European beech (*Fagus sylvatica* L.) natural forests : Dendroclimatic study from Krkonoše National Park. *Central European Forestry Journal*, 2019. 65. s. 3–11.
- SINCLAIR, A. R. E., GOSLINE, J. M., HOLDSWORTH, G., KREBS, C. J., BOUTIN, S., SMITH, J. N. M., BOONSTRA, R., DALE, M. Can the solar cycle and climate synchronize the snowshoe hare cycle in Canada? Evidence from tree rings and ice cores. *The American Naturalist*. 1993, 141 (2): s. 173–198.
- SLANAŘ, J., VACEK, Z., VACEK, S., BULUŠEK, D., CUKOR, J., ŠTEFANČÍK, I., BÍLEK, L., KRL, J. Long-term transformation of submontane spruce-beech forests in the Jizerské hory Mts.: Dynamics of natural regeneration. *Central European Forestry Journal*, 2017. 63 (4): s. 212–224.
- ŠPULÁK, O., SOUČEK, J. The Sibyla model and development of beech forests affected by air pollution. *Central European Journal of Biology*. 2010 5 (3): s. 317–383.
- STUIVER, M., GROOTES, P. M. Trees and the ancient record of heliomagnetic cosmic ray flux modulation, 1980: s. 165–173.
- SUNKARA, S. L., TIWARI, R. K. Wavelet analysis of the singular spectral reconstructed

- time series to study the imprints of solar-ENSO-geomagnetic activity on Indian climate. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2016. 23 (5): s. 361–374.
- SUROVY, P., DOROTOVIC, I., KARLOVSKY, V., LOUSADA, J. L., RODRIGUES, J. C., RYBANSKY, M., FLEISCHER, P. Impact of solar activity on the growth of pine trees (Pinus cembra: 1610 - 1970; Pinus pinaster: 1910 - 1989). In: *Proceedings of the 20th Slovak National Solar Physics Meeting*, 2010: s.184–188.
- SUROVÝ, P., RIBEIRO, N. A., EVORA, U. DE, PEREIRA, J. S., SUPERIOR, I., LISBON, D. A. Influence of solar activity cycles on cork growth – a hypothesis. 2002: s. 67–72.
- Team R Core 2018. A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria.
- VACEK, S., BÍLEK, L., SCHWARZ, O., HEJCMANOVÁ, P., MIKESKA, M. Effect of Air Pollution on the Health Status of Spruce Stands Effect of Air Pollution on the Health Status of Spruce Stands. *Mountain Research and Development*, 2013. 33 (1): s. 40–50.
- VACEK, S., HEJCMAN, M. Natural layering, foliation, fertility and plant species composition of a Fagus sylvatica stand above the alpine timberline in the Giant (Krkonosé) Mts., Czech Republic. *European Journal of Forest Research*, 2012. 131 (3): s. 799–810.
- VACEK, S., HŮNOVÁ, I., VACEK, Z., HEJCMANOVÁ, P., PODRÁZSKÝ, V., KRÁL, J., PUTALOVÁ, T., MOSER, W. K. Effects of air pollution and climatic factors on Norway spruce forests in the Orlické hory Mts. (Czech Republic), 1979–2014. *European Journal of Forest Research*, 2015. 134 (6): s. 1127–1142.
- VACEK, S., LEPŠ, J. Spatial dynamics of forest decline: the role of neighbouring trees. *Journal of Vegetation Science*, 2006- 7 (6): s. 789–798.
- VACEK, S., NOSKOVÁ, I., BÍLEK, L., VACEK, Z., SCHWARZ, O. Regeneration of forest stands on permanent research plots in the Krkonosé Mts . *Journal of Forest Science*, 2010. 56 (11): s. 541–554.
- VACEK, Z., VACEK, S., PODRÁZSKÝ, V., KRÁL, J., BULUŠEK, D., PUTALOVÁ, T., BALÁŠ, M., KALOUSKOVÁ, I., SCHWARZ, O. Structural diversity and production of alder stands on former agricultural land at high altitudes. *Dendrobiology*, 2016. 75: s. 31–44.
- VOLOBUEV, D. M., MAKARENKO, N. G. Forecast of the decadal average sunspot number. *Solar Physics*, 2008. 249 (1): s. 121–133.
- WANG, X., ZHANG, Q. BIN. Evidence of solar signals in tree rings of Smith fir from Sygera Mountain in southeast Tibet. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 201173 (13): s. 1959–1966.

Poděkování

České zemědělské univerzity v Praze, Fakulty lesnické a dřevařské (IGA č. A19/22).

Summary

This study describes the influence of sunspot area and climatic factors (temperatures, precipitation) on the tree-ring growth of naturally developed beech stands in the eastern part of Giant Mountains (Krkonosé). The researched area under is located in the first protection zone of Krkonosé National Park, which was founded in 1963 in which the air pollution load started affecting the forests in the area which culminated in the years 1975 to 1985. The beech stands were left without forest management, after the air pollution load which lead to natural development of European beech stands in the area from 1986 until nowadays. This study used dendrochronological analysis from 4 research plots of European beech stands in which the 66 samples from the level and above-ground trees were used. Every

measured tree of the dendrochronological sample from analysis had index larger than $CC > 35$. This study focused on two naturally developed stages of European beech forests. Homogeneous beech stands at the stage of optima and heterogeneous beech stands at the stage of regeneration and destruction. The results show that climatic data are not similar to each other, which indicating that there is no link between climatic data and sunspot area. All beech stands correlate significantly to the sunspot area and then to the season temperature and subsequently to precipitation. The homogenous beech stands significantly correlate with sunspots up to 51% between years 1986 and 2017. The season temperature and precipitation show less significant correlation on homogeneous beech stands. However, the homogenous stands are more influenced by negative effects such as spring frosts and air pollution load. The heterogeneous beech stands indicate the less response to spring frosts and air pollution calamity, and also the less significantly correlate with sunspot area activity between 1986 and 2017, however the sunspot area (28%) shows a higher correlation than season temperature (18%) and precipitation (16%) on the tree-ring growth. The global climate change is closely connected to sunspot area activity and it belongs to the one of the most important factors that indicate the influence of the sun to the earth's surface. This study can be helpful in research of forestry, forest ecology and it can even support in astronomy studies.

5.1.4. Letokruhy buku lesního naznačují souvislosti s průběhem slunečních cyklů během klimatické změny ve střední a jižní Evropě

V této publikaci jsou hodnoceny výzkumné plochy v Krkonoších a v jižní Itálii. Záměrem tohoto článku bylo přinést větší povědomí o průběhu růstu buku lesního napříč Evropou, ale také lépe popsat klimatické faktory a vliv slunečního cyklu na buk lesní. Pro analýzu byly vybrány homogenní bukové porosty. Tato publikace hodnotí radiální růst buku lesního a klimatické faktory, které ho ovlivňují. Zkoumanými faktory jsou roční srážky a teploty vzduchu, ale také srážky a teploty během vegetační sezony, také je zde hodnocen vliv čísla slunečních skvrn, které charakterizuje sluneční cyklus. V článku jsou použity korelační tabulky, kros-korelace (ukazující posun korelace v čase), spektrální analýzy a waveletové analýzy.


Výsledky této práce ukazují, že sluneční cyklus je signifikantně obsažen v letokruhovém přírůstu na všech výzkumných plochách alespoň v jedné z hodnocených časových period. Z hodnocených úhrnů srážek, sezonních teplot a slunečních cyklů byl nejvíce významný vliv slunečních cyklů. Vztah mezi slunečními cykly a letokruhovým přírůstem v jižní Itálii a centrální Evropě se zrcadlově liší od roku 1970 do 2019. Zároveň zde byl čitelný výskyt 11letých slunečních cyklů jak v Krkonoších, tak i v Itálii alespoň v jedné ze zkoumaných časových period (Šimůnek et al. 2021c).

Citace článku:

ŠIMŮNEK, V., VACEK, Z., VACEK, S., RIPULLONE, F., HÁJEK, V., D'ANDREA, G. 2021. Tree rings of European beech (*Fagus sylvatica* L.) indicate the relationship with solar cycles during climate change in central and southern Europe. *Forests*. 12 (3). 1–22. doi: 10.3390/f12030259.

Article

Tree Rings of European Beech (*Fagus sylvatica* L.) Indicate the Relationship with Solar Cycles during Climate Change in Central and Southern Europe

Václav Šimůnek ^{1,*} , Zdeněk Vacek ¹, Stanislav Vacek ¹, Francesco Ripullone ², Vojtěch Hájek ¹ and Giuseppe D'Andrea ¹

¹ Faculty of Forestry and Wood Sciences, Czech University of Life Sciences Prague, Kamýčká 129, 16500 Praha 6-Suchbát, Czech Republic; vacekz@fld.czu.cz (Z.V.); vacekstanislav@fld.czu.cz (S.V.); vhajek@fld.czu.cz (V.H.); dandrea@fld.czu.cz (G.D.)

² School of Agricultural, Forestry and Environmental Sciences, University of Basilicata, Viale dell'Ateneo Lucano 10, I-85100 Potenza, Italy; francesco.ripullone@unibas.it

* Correspondence: simunekv@fld.czu.cz

Abstract: The impact of solar cycles on forest stands, while important in the development of the forest environment during climate change, has not yet been sufficiently researched. This work evaluates the radial growth of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in the mountain areas of southern Italy and central Europe (Czech Republic, Poland) in correlation to solar cycles (sunspot number), extreme climatic events, air temperatures and precipitation totals. This research is focused on the evaluation of the radial growth of beech (140 dendrochronological samples with 90–247 years of age) from 1900 to 2019. The time span was divided into the following three periods: (1) a period of regular harvesting (1900–1969), (2) a period of air pollution crisis (1970–1985) and (3) a period of forest protection (1986–2019). The results indicate that the solar cycle was significantly involved in radial growth on all research plots. With regard to the evaluated precipitation totals, seasonal temperatures and the sunspot number, the latter was the most significant. Temperatures had a positive effect and precipitation had a negative effect on the radial increment of beech in central Europe, while in southern Italy, the effect of temperature and precipitation on the increment is reversed. In general, the limiting factor for beech growth is the lack of precipitation during the vegetation season. The number of negative pointer years (NPY) with an extremely low increment rose in relation to the decreasing southward latitude and the increasing influence of climate change over time, while a higher number of NPY was found in nutrient-rich habitats compared to nutrient-poorer ones. Precipitation and temperature were also reflected in the cyclical radial growth of European beech. The relationship between solar cycles and the tree ring increment was reversed in southern Italy and central Europe in the second and third (1970–2019) time periods. In the first time period (1900–1969), there was a positive relationship of the increment to solar cycles on all research plots. In the tree rings of European beech from southern Italy and central Europe, a relationship to the 11-year solar cycle has been documented. This study will attempt to describe the differences in beech growth within Europe, and also to educate forest managers about the relevant influence of solar cycles. Solar activity can play an important role in the growth of European beech in central and southern Europe, especially during the recent years of global climate change.

Keywords: tree-ring data; cyclical dynamics; growth adaptation; temperature; precipitation; sunspot number



Citation: Šimůnek, V.; Vacek, Z.; Vacek, S.; Ripullone, F.; Hájek, V.; D'Andrea, G. Tree Rings of European Beech (*Fagus sylvatica* L.) Indicate the Relationship with Solar Cycles during Climate Change in Central and Southern Europe. *Forests* **2021**, *12*, 259. <https://doi.org/10.3390/f12030259>

Academic Editor: Kalliopi M. Radoglou

Received: 14 January 2021
Accepted: 19 February 2021
Published: 24 February 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

European beech (*Fagus sylvatica* L.) is distributed over a large number of environmental zones throughout Europe [1]. A lack of precipitation, associated with drought, limits European beech in its distribution in southern Europe [2–4], while low temperatures and

spring frosts curb the beech in the north [5,6]. European beech thrives in the optimal conditions of central Europe, and at the same time, we are witnessing its retreat from the southern parts of Europe [7]. Lately, due to climate change, this tree species has also been expanding into more northern areas within its distribution range [8–10]. The occurrence of beech forests is limited by late frosts and droughts [11]. In the past few decades, European beech has been showing better results in locations towards the north, such as southern Sweden [12], as well as in mountainous locations, e.g., in the Czech Republic [13–15]. In recent years, however, beech forests have been showing a greater sensitivity to drought [16], yet this tree species can adapt accommodatingly to drought in central Europe under the conditions of global climate change [6,13,17].

Concerning radial growth, European beech adapts better to climatic fluctuations at lower altitudes and in nutrient-rich habitats [18,19]. By contrast, at higher altitudes, there have been greater fluctuations in beech growth since 1975 [20]. Climatic fluctuations in the mountainous areas of central Europe are most frequently caused by lower temperatures, with annual temperatures affecting the radial growth of European beech more than precipitation totals [13,21,22]. Fluctuations in the radial growth of European beech, caused by various biotic and abiotic influences, can lead to cyclic periods [21]. For example, in the 1970s and 1980s, there was a significant negative effect of air pollution on the radial growth of European beech in the mountains of the Czech Republic, which also led to a weakening or even dying of forest stands [23,24]. Notable incremental fluctuations of European beech are also induced by frost, which can affect the increment of the entire vegetation period [21,25].

European beech stands in the Czech Republic and Italy differ in their life cycles as well as their life span. In the Krkonoše Mountains (both in the Czech Republic and Poland), generations of European beech stands are replaced after 230 to 250 years on average [26]. In contrast, old stands of European beech in Italy may live to be around 300 years or more [27,28]. The age of beech stands in Italy will shorten in response to global climate change, especially increasing average temperatures and droughts [28]. However, the radial growth of beech stands in Italy is more affected by the negative effects of drought, which limits the distribution of this tree species in the Apennines [29]. Beech stands in Italy are profoundly more vulnerable and frequently stressed by drought, and this can reduce beech increment over time [27]. In the Mediterranean forests of higher altitudes, there are also spring droughts, which negatively affect the tree rings of European beech [30].

Solar cycles affect the climate of our planet, as was cited by the theory of “solar forcing”, to name one. The theory documents that solar irradiance and geomagnetic activities are important drivers of the Earth’s atmosphere [31]. Some works also describe that solar activity, in the long run, affects the temperature of the Earth’s atmosphere, which can be accompanied by the occurrence of colder winter periods [32]. Solar activity is sometimes a stronger inducer of climate change than anthropogenic influences, also affecting other factors such as precipitation or temperature [33]. Sunspot cycles are also associated with the cycle of the Amazon River flow [34] and are directly related to flood or drought seasons in the Songhua river basin in China [35]. On the other hand, the solar cycles may be associated with drought periods and extreme weather fluctuations, for example in Kuwait [36]. The effects of 11-year solar cycles on climate patterns in Europe have been observed over the last 250 years, while the impact of sunspot activity on the climate increased during the 19th century [37].

Global climate is affected by solar cycles [38,39]; however, the imprint of this cycle might not be the same everywhere. The imprint of solar activity is different in the Indian, Pacific and Atlantic Oceans [40]. There is a large number of factors that react to solar variability differently within terrestrial climate parameters [41]. One important parameter is that solar activity affects the properties and formation of clouds in our atmosphere, which is caused by the ionization of cosmic rays that mirrors 11-year cycles of solar activity [42–44]. Some studies even found a link between tree ring radiocarbon production and sunspots [45,46]. The production rate of radiocarbon isotope is an indicator of cosmic

radiation in the upper atmosphere, which is also connected to the solar cycle [39]. Solar cycles also affect the average monthly temperatures in Europe [47], as well as, indirectly, the North Atlantic Oscillation (NAO) and the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) [48]. Solar cycles throughout the NAO are also partly associated with precipitation occurrence in Europe [49]. Solar activity may also be reflected in many other climatic cycles [50]. Tree rings of beech in the Apennines are associated with the NAO [51], and even the NAO is influenced by the solar cycle [37,49]. It is also important to mention that there is a link between fluctuations in the radial growth of European beech in the mountains of the northeast Czech Republic and solar activity [52,53]. Some research in the field of dendrochronology proves the influence of solar cycles on the radial growth of trees, which is well described by research from northwestern Russia [54,55], Chile [56] and the Tibetan Plateau [57]. The impact of solar cycles can also be negatively reflected in tree rings, which has also been investigated in cork oak (*Quercus suber* L.) [58].

This study focuses on the radial growth of European beech at higher altitudes of the Krkonoše Mountains in Poland and the Czech Republic and in the southern Apennines in Italy. The main objective of this study was to evaluate the initial effect of the temperature, precipitation and sunspot number on the radial growth of European beech during three time periods that cover 119 years of growth history. The time periods were chosen deliberately due to various and important differences in the development of beech stands over time. The first time period (1st period) indicates the phase of man-managed stands of European beech. The second time period (2nd period) indicates the air pollution calamity on research plots in the Czech Republic [23,52], and the same time period was also marked out for Italian research plots in order to maintain comparability of time periods. The third time period (3rd period) denotes the phase without human harvesting interventions, when the beech stands developed naturally and spontaneously. The sunspot number was chosen intentionally to find a possible relationship between the radial growth of European beech and the 11-year solar cycle, which has properties and intensities other than precipitation or temperature. Another aim of this research was to assess the cycles of radial growth of European beech using the Fourier analysis and cross-correlation in relation to the factors examined. This is a very underexplored topical issue regarding the growth process of one of the most important and promising central European tree species during global climate change.

2. Methodology

2.1. Study Area

The studied area is located in the national parks of the Krkonoše Mountains, both in the Czech Republic and in Poland, i.e., in the Krkonoše/Karkonosze Transboundary Biosphere Reserve. Italian research plots are located in the southern Apennines within the Appennino Lucano National Park, near a place called Sellata. A total of 4 permanent research plots were evaluated, of which the first is in the Polish portion of the Krkonoše Mountains in a place called Chojnik, not far from the town of Sobieszów. The second research plot is in Eastern Krkonoše, in Rýchory, near the town of Žacléř. The third and fourth research plots are in the southern Apennines near Sellata. The plots in Krkonoše were established and selected in 1980 for long-term research. All research plots were selected in accordance with the major representation of beech, altitude and homogeneous stand structure of European beech. Samples were taken from forest stands with a 100% share of European beech. All research plots are located in non-intervention areas, where no harvesting operations had been carried out since 1985.

The basic site and stand characteristics are given in Table 1. The worldwide Köppen classification was used for climate categorization in Table 1 [59]. Precipitation and temperature conditions differ for the Czech Republic/Poland and for Italy, as described in Figure 1. The Bedřichov meteorological station for Krkonoše (Chojnik 1 and Rýchory 2) was selected for its data availability, as it has the longest time series for precipitation and temperatures available to the Krkonoše montane region at the altitude of 780 m a.s.l. The

mean annual temperature for Chojnik 1 and Rýchory 2 is 3.7 °C, and the annual total precipitation is 1300 mm. The mean number of vegetation days for Czech and Polish plots is around 120 days and the number of days with snow cover reaches 117 [21]. The mean annual temperature for the Italian plots is 13.7 °C and the mean annual precipitation is 1032 mm according to the Abriola meteorological station (1050 m a.s.l.). The mean number of vegetation days for Italian plots is 135 days (same period for snow cover) [60]. In Figure 1, a descriptive map of research plots is also displayed.

2.2. Data Collection

For dendrochronological analysis of samples from the Czech Republic, Poland and Italy, increment cores were taken from European beech using a Pressler auger, perpendicular to the trunk axis at a height of 1.3 m above the ground. Structurally homogeneous beech stands with stocking of 0.8–1 were selected for sampling. Samples were taken from randomly selected (RNG function) healthy co-dominant and dominant trees, whose average tree diameter at breast height had to be $dbh > 30$ cm. The height of all sampled trees was measured with a Laser Vertex hypsometer (Haglöf, Långsele, Västernorrland, Sweden). The Vertex hypsometer shows the measurement accuracy (instrumental resolution) to 0.1 m according to the manufacturer. The diameter at breast height was also measured for all trees using a Mantax Blue metal caliper (Haglöf, Långsele, Västernorrland, Sweden). This caliper provides an accuracy (instrumental resolution) of 1 mm according to the manufacturer. These research plots were monitored annually, and their detailed structural analysis was performed every 5 years. A total of 140 samples were taken for dendrochronological analysis; Table 2 offers more detailed information. Increment cores were measured using a LINTAB measuring table [61] with an Olympus microscope. The measuring table provides an accuracy (instrumental resolution) of 0.01 mm, and the TSAP-Win software [61] was used to record the cores. Measurements were made from the bark towards the heartwood, perpendicular to the center of the trunk, so that each tree ring was measured perpendicular to the trunk axis. The subsequent cross-dating of the increment cores was performed with the Cdendro program so that the cross-correlation index was $CC > 25$ for each sample [62].

Monthly temperature and precipitation data for Krkonoše were provided by the Czech Hydrometeorological Institute, Prague [63]. The mean monthly climatic data for the research plots in the Czech Republic and Poland were supplied by the meteorological station of Bedřichov (50°47'30.7'' N 15°08'31.7'' E) at an altitude of 780 m a.s.l.; the station is 35.5/54.3 km away from the research plots in the Czech Republic and Poland, respectively. Monthly temperature and precipitation data for the research plots in Italy were provided by the Italian Civil Protection Authority, Basilicata Region [64]. Characteristics of the Italian research plots were provided by the meteorological station in Abriola (40°30'28.0'' N 15°48'46.6'' E), at an altitude of 1050 m a.s.l. The distance from the Sellata 3 and La Lama 4 research plots to the meteorological station is 3.2/5.1 km, respectively. Annual sunspot number data were taken from the Royal Observatory of Belgium, Brussels [65].

Table 1. Overview of basic site and stand characteristics of research plots in 2019.

Name of Plot	GPS	Altitude (m)	Exposure *	Slope (°)	Height (m)	Diameter (cm)	Volume (m ³ ha ⁻¹)	Soil Type	Köppen Classification
Chojnik 1	50°50'12.1" N 15°38'27.8" E	510	NW	16	23	39	380	Modal Cambisol	Dfb
Rýchory 2	50°39'57.7" N 15°53'05.2" E	760	NE	27	29	44	540	Eutrophic Cambisols	Dfb
Sellata 3	40°32'21.5" N 15°47'39.9" E	1275	E	26	33	60	720	Epileptic Phaeozems	Csa
La Lama 4	40°28'22.5" N 15°45'35.2" E	1340	SE	7	29	52	560	Haplic Phaeozems	Csa

Notes: * NW—northwest; NE—northeast; E—east; SE—southeast; Dfb—warm summer humid continental climate with large seasonal temperature differences, with warm to hot summers and cold winters; Csa—hot summer Mediterranean climate with dry summers and mild, wet winters.

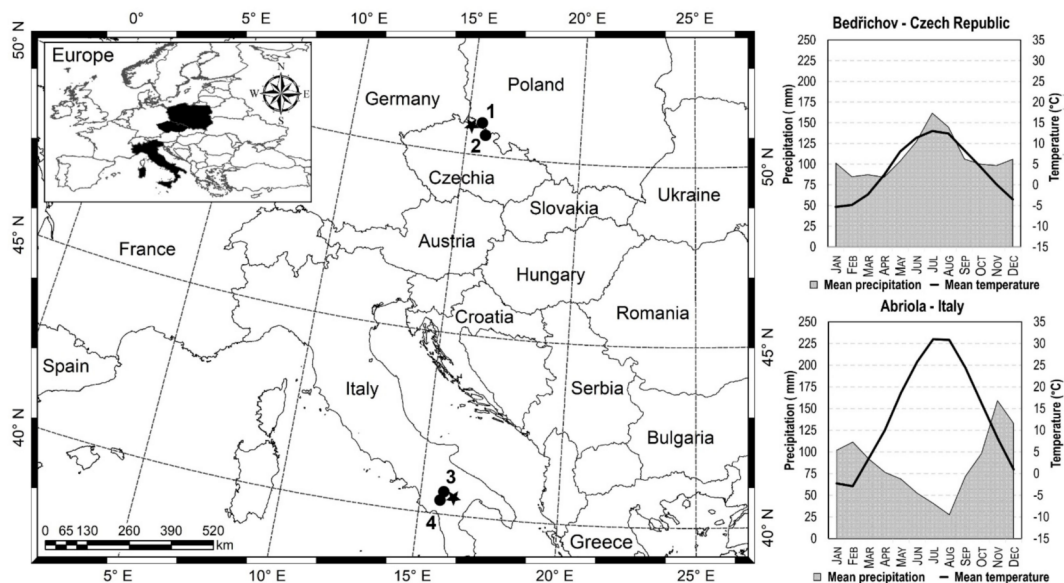


Figure 1. Location of permanent research plots (black dots) with monthly climatic characteristics of the mean precipitation and mean temperature in the meteorological stations (black stars) in Bedřichov, the Czech Republic, and Abriola, Italy, over the whole time period of 1900–2019.

Table 2. Characteristics of tree-ring chronologies for European beech in research plots for 1900–2019.

Plot Name	No. Trees (Samples)	Age (Min/Max)	Mean RW (mm)	Std. (mm)	R-bar	ESP	SNR	NPY
Chojnik 1	29	90/123	1.99	0.78	0.41	0.94	17	—
Rýchory 2	33	103/182	1.05	0.53	0.26	0.92	11	1913, 1953, 2011, 2016
Sellata 3	40	94/152	2.33	0.69	0.25	0.95	19	1962, 1970, 1988, 1994, 2012, 2013, 2016, 2017
La Lama 4	38	125/247	1.73	0.58	0.34	0.92	12	1933, 1970, 1971, 1981, 2013, 2017

Notes: No. trees—number of trees; Age—age of youngest and oldest sample tree; Mean RW—mean ring width in mm, Std.—standard deviation in mm; R-bar—inter-series correlation; EPS—expressed population signal; SNR—signal-to-noise ratio; NPY—negative pointer years with significantly extreme low radial growth.

2.3. Data Analysis

Dendrochronological data were processed in R software [66] using the “dplr” package [67]. Detrending of each tree was performed by negative exponential detrending with an inserted spline of 1/3 of the age of each tree using “dplr” instructions [68]. Such detrending removes the age trend while maintaining low-frequency climate signals [55,69]. The expressed population signal (EPS) was calculated for the detrended data. The EPS represents the reliability of a chronology as a fraction of the joint variance of the theoretical infinite tree population. The limit for using the data for comparison in relation to the climatic data was a significant EPS threshold so that $EPS > 0.85$ [68]. We also calculated the signal-to-noise ratio (SNR) that represents the signal strength of the chronology and R-bar (inter-series correlations) [70]. The analysis of negative pointer years was carried out [71]. For each tree, the pointer year was tested as an extremely narrow tree ring that did not reach 40% of the increment average from the four preceding years [71]. The occurrence of the negative year was proved if a strong reduction in increment occurred in at least 20% of the trees in the plot.

Spectral analyses for indexed (detrended) radial increments were created with Statistica 13 software [72]. The calculation was performed with the “Single Fourier (Spectral)

Analysis" function, using the output "Periodogram" plot by "Period". Furthermore, this software was used to calculate correlation coefficients and cross-correlations for lag –15 years (in relation to the sunspot number, vegetation season temperature and annual precipitation). With Statistica 13 software (Statsoft, Tulsa), we created cross-periodograms (real), used to study a multivariate spatial process [73]. We also used the "signal" and "dplr" wavelet plot for Krkonoše and Italy for the period 1900–2019 to make the dendrochronological signal more apparent for up to 32 periods/cycles [74,75]. For the next statistical analysis, the time span was divided into the following 3 periods: (1) a period of active forest management and regular harvesting (1900–1969), (2) a period of air pollution crisis characterized by extremely high SO₂ concentrations and acid rains (1970–1985), and (3) a period of forest protection without human harvesting interventions (1986–2019).

3. Results

3.1. Tree-Ring Characteristics and Extreme Climatic Events

Dendrochronological characteristics are described in Table 2 and include the mean tree ring increment at a plot (Mean), age of the youngest and the oldest sample trees (Age), standard deviation (Std.), inter-series correlations (R-bar), expressed population signal (EPS) and signal-to-noise ratio (SNR). The research plots in Italy (Sellata 3 and La Lama 4) show a larger mean increment, on average 25% larger than the research plots in central Europe (Chojnik 1 and Rýchory 2). The age of the research plots indicates that Sellata 3 and La Lama 4 were generally older than Chojnik 1 and Rýchory 2. Even the research plot of La Lama 4 reached up to 247 years. The range between maximum and minimum age was due to age variability in the forest stands; however, all research areas showed a visually homogeneous forest structure. A greater variability of radial growth was found in both locations with lower altitude compared to a higher one, while a higher number of negative pointer years (NPY) characterized by an extremely low increment was found on richer soils compared to poorer ones.

The number of NPY ranged from 0–4 for central Europe and from 6–8 in southern Italy. A climatically significant year common for Rýchory 2 and Sellata 3 was 2016, when the share of precipitation, lower by 26% (compared to the average), was documented in the vegetation season. Another common NPY was recorded in 2013 for the Italian research plots Sellata 3 and La Lama 4, where a higher annual precipitation of 1204 mm (compared to 1024 mm per year on average) and lower seasonal temperatures of 28.3 °C (29.6 °C) were recorded in both plots. One more common NPY for the research areas in Italy was 1970, with the seasonal precipitation totals lower by 15% (240 mm, 280 mm). The year 2017 was also significant for the Italian research plots Sellata 3 and La Lama 4, with the total precipitation during the vegetation season lower by 41% (204 mm, compared to an average of 289 mm), the lowest in 20 years. Similarly, the NPY of 2011 in Krkonoše was negatively affected by an unbalanced frequency of precipitation during the year (monthly variability was higher by 46%). Overall, the NPY show that the Apennines plots (Sellata 3, La Lama 4) have a higher frequency of NPY than central Europe, while the Chojnik 1 research plot, for example, has not recorded a single NPY. Additionally, 15 of the 18 NPY were found in the second half of the solar cycle.

3.2. European Beech Tree-Ring Growth, Sunspot Number and Climate Variations

Figure 2 shows a clear difference between radial growth (a) in the Krkonoše Mountains in central Europe (Poland, Czech Republic) and (b) in the southern Apennines in Italy. The radial growth of beech differentiates itself in each time period. A positive relationship of radial growth in all research plots with the sunspot number is characteristic for the first time period. This fact is also confirmed in Table 3. A change in the trend of radial growth of European beech and the nature of its connection with sunspots occurred in the second time period on the Italian research plots. Another interesting feature of the second time period is a unique low or negative correlation with sunspots on almost all research plots, which is also confirmed in Figure 2 and Table 3. In the second period, there was also a

significant decrease in radial growth on all research plots. In the last, or third, time period, the concurrence of sunspots and radial growth of beech in Italy was the opposite of that on research plots in the Czech Republic and Poland. A typical interconnection with the solar cycle (sunspot number) and the radial growth of European beech is shown in Figure 2. These are, for example, parallel cycles of radial growth with the solar cycle in the first time period, but the solar cycle is also reflected in the third time period (positively and negatively). In Figure 2, a significant reduction in radial growth can also be seen, often during the solar minimum, which can be reported for almost all time periods, except for the Italian research plots, where in the second and third periods, this process was reversed.

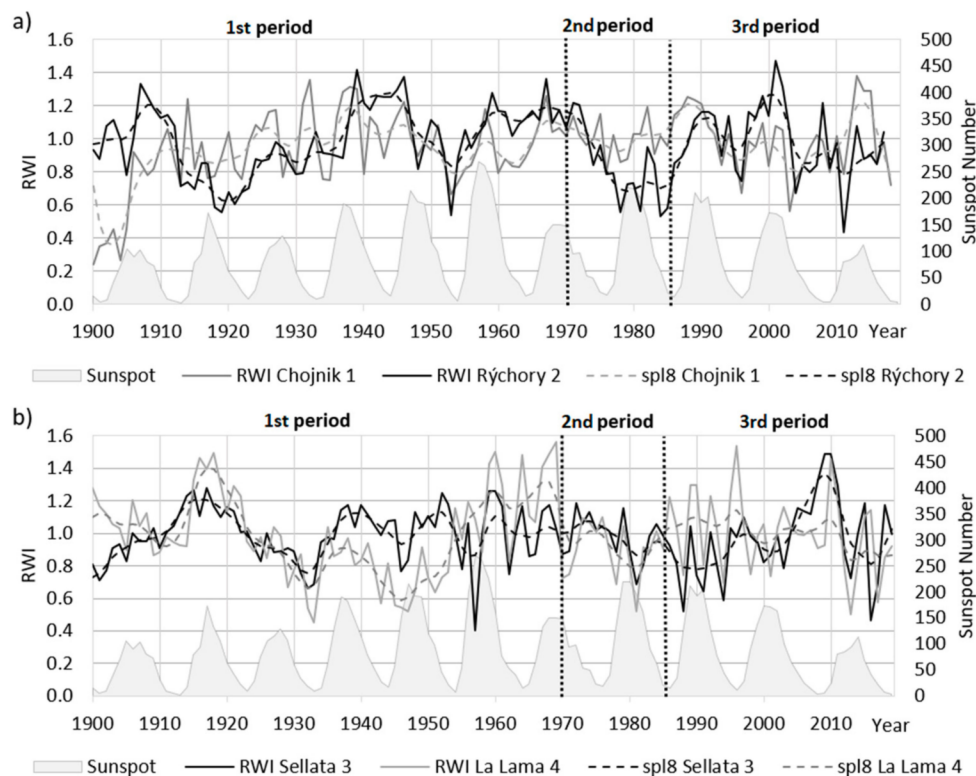


Figure 2. Standardized ring width chronologies of European beech on research plots in the Czech Republic/Poland (a) and in Italy (b). RWI: ring width index; spl8: eight-year spline. The periods described in the time window are as follows: 1st period: 1900–1969 (regular harvesting period); 2nd period: 1970–1985 (air pollution crisis period); 3rd period: 1986–2019 (forest protection period).

Table 3 describes the relationship between the radial growth of European beech in the research plots and the sunspot number, annual temperature, vegetation season temperature, annual precipitation and vegetation season precipitation in different time periods. Radial growth of beech reacts to sunspots, temperatures or precipitation differently in every time period. The most significant values were correlated with the sunspot number, then with annual precipitation, and subsequently with seasonal temperatures. Mean annual temperatures and seasonal precipitation totals did not show high correlation values to radial growth, but they also did not show significant results. According to Table 3, solar cycles correlated most significantly with the whole period, and subsequently, with the third time period. The tree ring width index (RWI) showed the most significant positive correlation with solar cycles in Poland and the Czech Republic (RWI Chojnik 1 and Rýchory 2) both for the whole period and the third period. For the Italian plots Sellata 3 and La Lama 4, the correlation results were different, with both plots having negative correlations with the sunspot number. The Sellata 3 plot showed a significant negative correlation over the whole period ($r = -0.25$) and in the third period ($r = -0.37$). La Lama 4 had a significant correlation in the second time period ($r = -0.51$), so all plots

significantly correlated with the sunspot number, depending on the time period. All plots were positively correlated with solar cycles in the first time period, but only the RWI Chojnik 1 plot was significantly positive ($r = 0.31$) in the first period.

Table 3. Correlation coefficients for the tree-ring width index (RWI) of research plots in different time periods to the sunspot number, annual temperature, vegetation season temperature, annual precipitation and vegetation season precipitation. Significant correlation values are in bold; the correlations are significant at $p < 0.05$.

Years	1900–2019	1986–2019	1970–1985	1900–1969
Time Period	Whole Period	3rd Period	2nd Period	1st Period
Sunspot number				
RWI Chojnik 1	0.26	0.37	0.07	0.31
RWI Rýchory 2	0.23	0.54	−0.12	0.19
RWI Sellata 3	− 0.25	− 0.37	−0.43	0.11
RWI La Lama 4	−0.07	−0.02	− 0.51	0.11
Annual temperature				
RWI Chojnik 1	0.14	0.18	0.37	0.10
RWI Rýchory 2	0.05	0.28	0.37	0.07
RWI Sellata 3	−0.04	0.02	−0.07	−0.02
RWI La Lama 4	0.08	−0.23	0.12	−0.08
Vegetation season temperature				
RWI Chojnik 1	0.09	0.09	0.39	0.11
RWI Rýchory 2	0.08	0.28	0.32	0.15
RWI Sellata 3	−0.06	0.04	−0.21	−0.02
RWI La Lama 4	−0.12	− 0.39	0.12	−0.14
Annual precipitation				
RWI Chojnik 1	−0.10	0.00	−0.28	−0.06
RWI Rýchory 2	− 0.18	−0.10	−0.48	−0.19
RWI Sellata 3	0.10	0.05	0.32	0.06
RWI La Lama 4	0.15	0.02	0.11	0.24
Vegetation season precipitation				
RWI Chojnik 1	−0.08	0.04	−0.21	−0.07
RWI Rýchory 2	−0.15	−0.16	−0.45	−0.17
RWI Sellata 3	0.11	−0.01	0.45	0.13
RWI La Lama 4	0.12	0.06	0.20	0.14

Seasonal temperatures had only one significant correlation with radial growth for the La Lama 4 plot in the third time period ($r = -0.39$). In the case of seasonal temperatures, positive correlations were found for the Czech and Polish research plots, while for the Italian ones, the values were mostly negative.

The annual precipitation totals had two significant values: for the Rýchory 2 plot for the whole time period ($r = -0.18$) and for the La Lama 4 plot in the first time period. Annual precipitation totals correlated differently to radial increment than seasonal temperatures or sunspot number. Thus, annual precipitation totals correlated negatively with radial growth in the Czech Republic and Poland in practically all the time periods. The Italian research plots Sellata 3 and La Lama 4 correlated positively with the annual total precipitation in all the time periods.

3.3. Cross-Correlation up to Fifteen Years Back in Relation to Tree Ring Growth

Cross-correlations in Figure 3 show the relationship of the sunspot number, annual precipitation and seasonal temperatures to the radial growth from up to 15 preceding seasons in different time periods. The cross-correlations of this research describe the relationship of radial growth to the studied factors up to 15 years into the past. Cross-

correlations show that the most significant values are found in the sunspot number, while the number of significant values in precipitation and temperature are almost identical. In relation to the radial growth of European beech, the sunspot number correlates in waves. The most concurrent correlations with sunspots on all research plots are found in the first time period. By contrast, in the second and third time periods, the correlations turn completely against each other when the Chojnik 1 and Rýchory 2 plots are positively correlated to the sunspot number, while the Sellata 3 and La Lama 4 plots are negatively correlated to the solar cycle. The most common and highest significant correlation to sunspots in terms of relative lag years is in lag 0 to -1 years for Rýchory 2 and Chojnik 1 in both the whole and first time periods. Nevertheless, the La Lama 4 plot is significant to sunspots in lag -7 to -8 relative years in the third time period. In the second time period, the plots of Sellata 3 and La Lama 4 correlated significantly to the sunspots in lag 0 to -1 relative years. The cross-correlations of radial growth to sunspots show that all time periods contained significant values for almost all research plots.

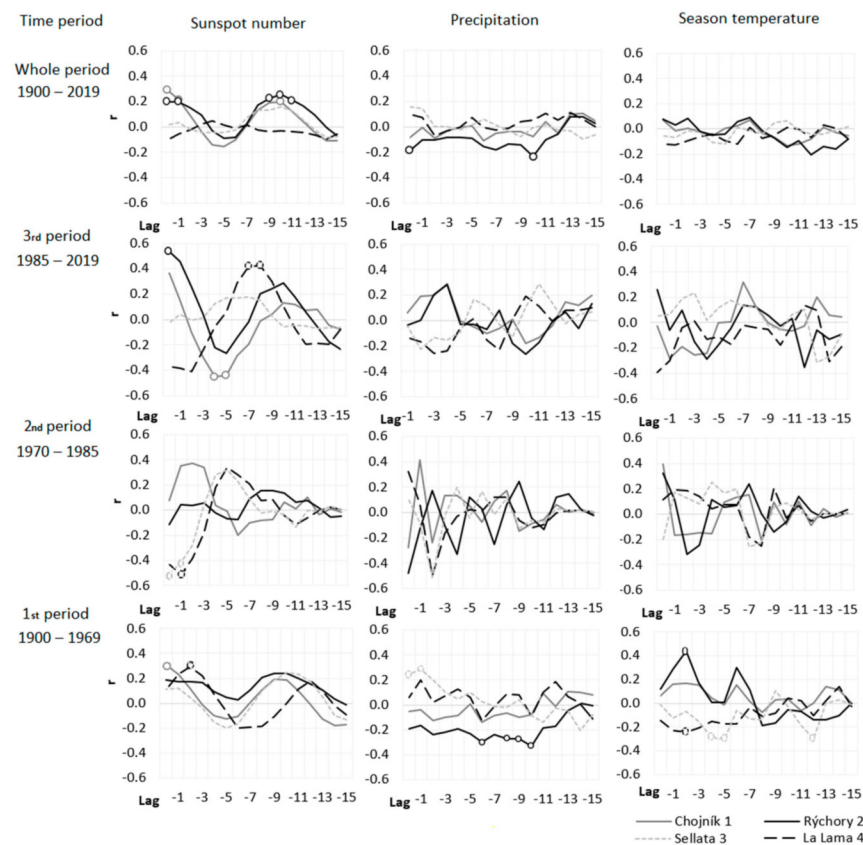


Figure 3. Cross-correlation of ring width index with sunspot number, precipitation and temperature in the three time periods and the whole time period. Values are significant at $p < 0.05$ and marked with a circle. Lag: year (Lag -1 is the correlation of the 1 preceding year).

Annual precipitation totals and seasonal temperatures cross-correlate less than the sunspot number, which is apparent in Figure 3. In the case of precipitation and temperature, it is also true that the research plots correlate conversely between the plots in Krkonoše and in Italy. For precipitation, the whole time period and the first time period correlate best, which are also the longest monitored time periods. Significant values for precipitation are found in the whole time period for the relative years 0 and -10 . Another important period for precipitation is the first time period, where the values significantly correlate back from lag -6 to -10 relative years. The cross-correlation of radial beech growth and seasonal temperatures only shows significant values in the first time period. The results for precipitation in the first period show a significant value for the research plot Rýchory 2 (lag

−2 relative years), La Lama 4 (lag −2 relative years) and Sellata 3 (lag −4 to −5 relative years and also −12 years).

3.4. Spectral Analysis

Cross-periodograms show common cycles between the radial growth data series in relation to the sunspot number, annual precipitation and seasonal temperatures. Cross-periodograms describe both a negative and positive cyclical relationship between our examined data. Figure 4 describes the whole time period, with an assessment of the influence of “SUNSPOT” (sunspot number), “Total prec.” (annual precipitation) and “Season temp.” (season temperature) on radial growth from all research plots in the period 1900–2019.

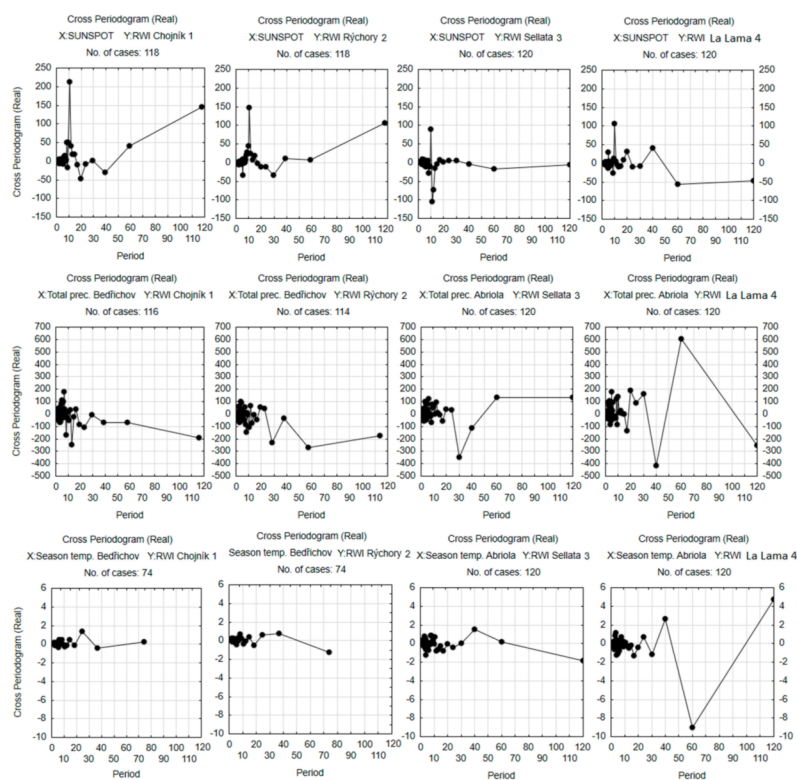


Figure 4. Cross-periodogram of ring width index (RWI) with sunspot number (SUNSPOT), annual precipitation (Total prec.) and seasonal temperature (Season temp.) in the whole time period, 1900–2019.

Solar cycles (sunspot number) are reflected in the observed positive radial growth of European beech by 11-year cycles on all research plots. The La Lama 4 research plot, where the 11-year cycle correlated both positively and negatively with the indexed radial growth and the sunspot number, shows 20- and 40-year cycles. On the Chojnik 1 research plot, there was a negative cross-period of radial growth and sunspots in 20- and 40-year cycles. The Rýchory 2 research plot formed negative cross-periods of radial growth and sunspots in 6- and 30-year cycles.

Important cycles of the cross-periodogram for all research plots in relation to precipitation and increment show that on the Italian plots (Sellata 3 and La Lama 4), there were negative values for 30- and 40-year cycles. On the research plots in Krkonoše (Chojnik 1, Rýchory 2), there were various periodic responses of radial growth of European beech to the total precipitation, but it is possible to say that the 30- to 40-year periods were not as significant as in Italy. The cross-periodogram shows that precipitation cycles were negatively correlated with radial beech growth on the Chojnik 1 and Rýchory 2 research

plots. On the Sellata 3 and La Lama 4 plots, positive 60-year precipitation cycles in radial growth have occurred.

The seasonal temperature cross-periodogram shows minor differences. The Chojnik 1 and Rýchory 2 plots had the most legible 25-year positive cycles of seasonal temperatures with radial growth in the periodogram. The cross-periodogram also shows that the research plots in Italy (Sellata 3 and La Lama 4) have had 40-year positive cycles in relation to seasonal temperatures and radial growth. Furthermore, the La Lama 4 plot has had negative 60-year cycles of increment as related to temperature, on the cross-periodogram.

The Fourier analysis in Figure 5 shows the difference between the 1st and third time periods. As in the graph in Figure 5, the Chojnik 1 research plot showed 4-, 7-, 11- and 18-year cycles in the first time period. In the third time period, there were 7- to 12-year cycles on the Chojnik 1 research plot. In the first period, the Rýchory 2 research plots showed 4-, 18- and 35-year cycles in radial growth. In the third period, there were 3-, 33- and 7- to 11-year cycles in radial growth on the research plot of Rýchory 2. The Sellata 3 research plot showed 8-, 12- and 24-year cycles in the first period. In the third time period on the Sellata 3 research plot, there were 4- and 12-year cycles in radial increment. The La Lama 4 research plot in the first time period showed 5-, 10-, and 18- to 35-year cycles in relation to the radial growth of beech. In the third period on the La Lama 4 research plot, there were 4-, 5- and 7-year cycles in the radial growth of European beech.

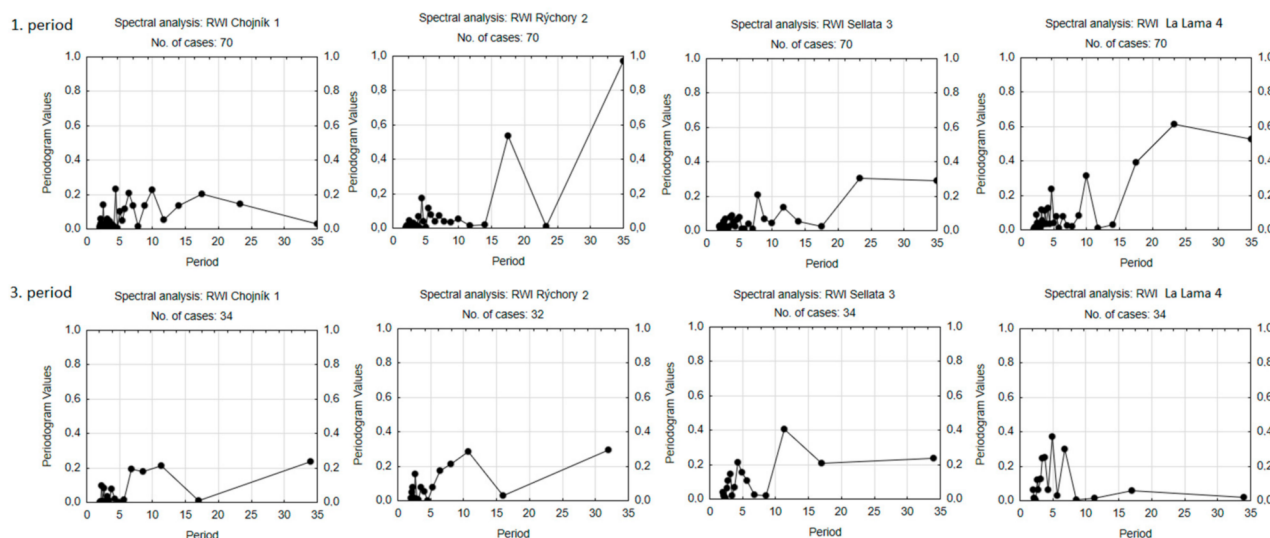


Figure 5. Single spectral analysis of the indexed ring-width chronology for European beech in the first and third periods.

It is evident from Figure 5 that 7- to 12-year cycles most commonly occur in radial growth, but these results are time-period-dependent. Furthermore, each research plot apparently has 9- to 12-year cycles in at least one time period.

The wavelet plot in Figure 6 describes the occurrence of cycles (periods in the graph) in time between the Apennines and the Krkonoše Mountains. It documents that 24- to 32-year cycles during the period 1900–1990 were the most important in Krkonoše. There were also less significant cycles in the period (dark gray color) from 1910 to 1960 in Krkonoše, with approximately 6- and 20-year cycles reported. However, the darkest gray color on the Krkonoše research plots shows that from 1985 to 2018, cycles of around 4 and 12 years were also important. Research plots in Italy revealed significant 16- to 22-year cycles for the period 1900–1940, and also 4-year cycles for the period 2010–2015. Periods from 1920 to 1940 with cycles of about 12 years were less significant on the Italian plots. In addition, there were less significant 3- to 8-year cycles in the period of 1960–2015. The wavelet plot in Figure 6 shows 9- to 13-year cycles, which are the most common for Krkonoše and Italy in the 1990–2019 period, but the results from Figure 6 are below the statistical significance limit.

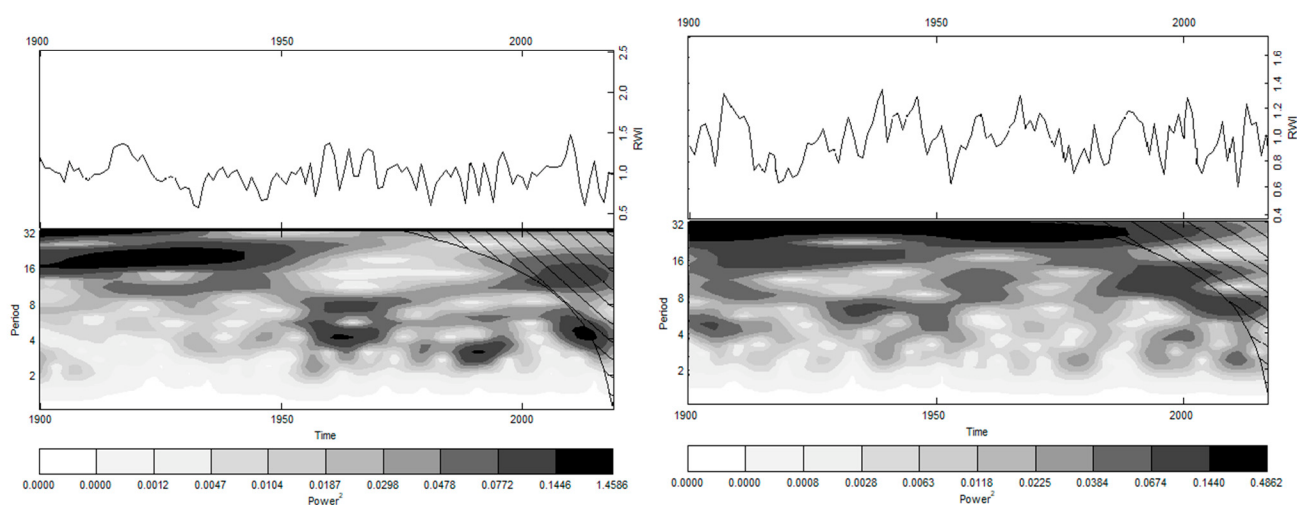


Figure 6. Wavelet plot calculated from mean RWI (ring width index) of European beech stands in the Krkonosze mountains in Poland and the Czech Republic (**left**) and plots in Italy in the Apennines mountains (**right**). Black color represents the 90% significance level against the dark gray noise level.

4. Discussion

4.1. Different Growth Conditions of European Beech in Central Europe and the Southern Apennines

Beech stands in central Europe have fewer vegetation days than in the Mediterranean, which is reflected in the size of the mean radial growth. Increment on the research plots in Krkonosze is smaller by an order of magnitude (approximately by 25%) than on the research plots in the southern Apennines (Table 2). Beech stands in Krkonosze belong to a European beech provenance more sensitive to drought, which may be related to its earlier fall of the assimilation apparatus. In contrast, beech stands in the Mediterranean are more drought-resistant and defoliate later [28,76]. In the Krkonosze Mountains, temperatures were proven to have a greater effect on the radial growth of European beech than precipitation totals [21,77]. On the Chojnik 1 research plot, our results in Table 3 confirm that temperatures had a higher correlation with radial growth than with the total precipitation, while on the Rychory 2 research plot, this fact is validated in the third time period. The total precipitation had a negative effect on the radial increment in central Europe. Similar negative responses to precipitation were also confirmed by reference sources [22,78]. For beech in Krkonosze, it is also true that with a higher altitude, the temperatures play a greater role in radial increment [79], which is verified by our results. It is evident from Table 3 that in the 1st and third time periods, the temperatures correlated more at Rychory (760 m a.s.l.), which is located higher than the research plot of Chojnik 1 (510 m a.s.l.). Altitude also influenced growth consistency at both locations, while higher incremental variability was found in lower-situated areas compared to those with higher altitude. In general, beech stands have faced increasing drought stress in recent years [11], but in the montane areas of Krkonosze, spring frosts have more significant negative effects [21].

Beech forests in the Mediterranean are also affected by drought and spring frosts, as evidenced, for example, in the Pyrenees [80] and the Apennines [81]. Drought is a limiting factor in the European beech growth in the Apennines [29], as is confirmed by the negatively significant years (NPY) in Italy, where the impact of drought on radial growth was recorded on our plots Sellata 3 and La Lama 4 several times, e.g., in 1970 and 2017. In general, more NPY were detected in central and southern Europe in nutrient-richer habitats compared to the poor ones. On productive sites, climate change can hamper tree growth and forest productivity [82]. Also, other studies have shown that trees were more sensitive to climate on the more productive sites compared to poor ones due to differing proportions of latewood to earlywood [83,84]. Assessing tree responses to climate change without simultaneously considering soil properties and climate may be misleading, since soil nutrients can influence the growth response of trees to drought [85]. Our results also

showed that 15 of the 18 NPY were observed in the second half of the second part of the studied period. An increasing number of NPY during the time may be caused by an increasing number of extreme climatic events in ongoing climate change [80,86,87].

Beech stands in the southern Apennines (Sellata 3 and La Lama 4) were negatively correlated with temperatures and positively correlated with precipitation (Table 3 and Figure 3), which is exactly the opposite from the research plots in Krkonoše. Scientific literature also confirms that these correlations of precipitation and temperature to radial beech growth in the Apennines may be due to winter accumulation of precipitation in the soil [51]. The negative correlation of the beech radial growth to the temperatures on the Sellata 3 and La Lama 4 plots could be explained by the effect of higher temperatures during dry periods [88].

4.2. Solar Cycles, Climate Change and the Possible Link to European Beech

Solar activity affects the climate on our planet [50], which is also reflected in the NAO [37,49]. Many other studies have also shown that the effect of solar activity has an impact on precipitation and temperature [33,34]. Temperatures on the European continent correlate with the NAO mainly during the winter and spring periods [47]. Precipitation totals are also linked to solar activity, but it is important to mention that precipitation is also affected by solar activity during July in Italy and during May, June and July in the Czech Republic [49]. As in Figure 1, there is also a noticeable difference between monthly precipitation totals and temperatures during the year, when precipitation totals differ significantly—in Krkonoše, the main precipitation occurs over the vegetation season, while in Italy, it occurs during the vegetation off-season.

Wind currents high in the atmosphere, or “jet streaming”, are associated with solar cycles, where these wind currents are blocked during the solar minimum [89,90], leading to a colder winter season [91]. In contrast, the solar maximum leads to an acceleration of wind currents [92], which, through “Ferrel cells” [93], increases the pressure of winds affecting the European continent. This may be confirmed by research in Spain, where the solar cycle has been found to be associated with precipitation and wind anomalies [94]. The solar cycle is associated with the occurrence of large forest fires and dry weather seasons during the solar minimum, which has been proven in Turkey [95]. Our research plots in the mountainous areas of the Mediterranean, Sellata 3 and La Lama 4 (Figure 2), have recorded higher increments in recent years (third period) during solar minimums. This fact can be supported by better conditions for growth at higher altitudes, which is confirmed by correlations presented in Table 3, showing the relationship between temperatures and radial growth as being predominantly negative.

Solar cycles are linked to climate change and temperature differences on the planet’s surface. There is a study that describes a possible association of low sunspot activity with climatically cold periods on the Earth [32]. Solar cycles do not affect temperatures and precipitation directly, and it has been shown that solar activity is not imprinted on these factors entirely [86,96]. The total contribution of solar activity to variations in the Earth’s global temperature and climate is insignificant but not negligible [97]. Other studies describe the link between cosmic rays and solar cycles [98]. It is the cosmic rays that are associated with cloud formation, and this also affects the amount of light falling on the planet’s surface, where low solar activity (low sunspots) leads to a higher amount of cosmic rays, creating a thicker cloud cover and cooling the planet [38,39]. Our results may be related to the decreasing activity of sunspots [99] due to the fact that there has been a lower radial growth in Krkonoše since around 1990 (Figure 2a), and a decrease in the radial growth of beech in the southern Apennines since 2010 (Figure 2b). In the central Apennines, there has also been a long-term reduction in the radial growth of European beech due to drought since 1970 [27], while concurrently, sunspot number has been lower since 1980 (Figure 2). Our results show the response of radial growth to solar cycles in Figures 2 and 3 and Table 2, when the research areas in Krkonoše correlated positively and the areas in southern Italy correlated negatively in the third time period. The opposite reactions of the

radial growth to the solar cycle were observed in our results after 1960. Simultaneously, global temperature was affected due to increasing CO₂ since 1960, which disturbed the natural process of solar cycles [100]. This fact of opposite correlations could be attributed to solar activity or climate change, where both factors are accompanied by changes in the NAO [47]. This is because changes in air temperatures on the surface of the Earth can also be related to the changes in low and high pressures above Europe [91,101].

4.3. Feedback and the Relationship of Radial Growth to the Sunspot Number Across the Time Frame

Solar cycles play a role in the radial growth of European beech in Krkonoše, which has been proven in the vicinity of research plots in Rýchory [52]. Our results confirm that not only Rýchory 2, but also the northern part of Krkonoše (Chojník 1), are associated by positive correlations (Table 3) with the solar cycle during the first and third time periods (Figures 2–5). A positive relationship of Scots pine growth has also been found in northwestern Russia [55]. It was also confirmed in Krkonoše in the 1980s, when an air pollution calamity (high SO₂ concentrations) occurred, reducing the radial growth of European beech [21,24,102]. Our results from the research plots in Chojník 1 and Rýchory 2 in the second time period also describe this event. In the second period, there was also a decrease in radial growth on the Italian research plots of Sellata 3 and La Lama 4, while Figure 3 shows a significant result of the negative cross-correlation with solar activity for both Italian plots. In the third time period, the negative relationship between the plots in the Apennines (Sellata 3 and La Lama 4) also continued, while the first and second periods could be compared to the research of solar cycles and their relation to cork oaks in the Mediterranean in Portugal, where a negative relation between tree bark increment and the solar cycle was confirmed [58]. Other studies have also confirmed a negative correlation of solar cycles with the radial growth of *Pinus pinaster* in northern Portugal. The same study found a minor negative correlation of radial growth and solar cycles in southern Slovakia [103].

Cross-correlations in Figure 3 show the feedback of the radial growth of European beech and solar cycles on the Italian research plots in the third time period, where Sellata 3 showed significant correlations in the 7 to 8 preceding years. This could indicate a possible shift in the effect of solar activity in the Apennines. We can even find regression correlations of increment and solar cycles in the first and second time periods for the Italian plots, which are 1- to 2-year shifts in the significant correlation coefficients. The effect of cross-correlations with solar cycles could be attributed to the effect of the NAO, while for European beech, the influence of the NAO on the radial growth in central Italy was confirmed [51]. Changes in the radial growth of European beech in Italy in the second and third time periods may have been due to the influences of the NAO over Europe, which may have caused different responses of cross-correlations between Krkonoše and the Apennines [104,105].

4.4. Recorded Cycles in Beech Tree Rings

In terms of radial growth, our results in Figures 5 and 6 show 9- to 12-year cycles most frequently recorded for each research plot in at least one of the time periods. These periods are associated with solar activity, which has 8- to 12-year cycles. These cycles have been recorded in the radial growth of various tree species, e.g., in Europe [103], Russia [55], South America [106] and Asia [57]. Furthermore, 4- to 7-year cycles have been reported for radial growth, which can be classified as the “Schwabe cycle”, the second harmonic cycle of the sun associated with the aforementioned cosmic rays [107]. The high-frequency oscillations for about three years might be associated with the frequent changing in global temperatures [108,109]. In addition, Figure 4 shows a minor share of 4- to 7-year cycles in a cross-periodogram with temperatures and precipitation, where, e.g., 8-year cycles have been recorded in Germany as being most synchronous with the vegetation phenology of beech [110]. Short (3- to 4-year) cycles can also be found in the cross-periodogram of radial growth and precipitation, and again, they may be linked

to the NAO [49]. Longer (17- to 35-year) cycles could be assigned to the 22-year Hale cycle, which repeats through meteorological indicators such as temperature and ozone concentration [40] or precipitation [49]. This 22-year cycle has even been found in tree rings in Tibet [57] and northwestern Russia [55]. Our results also partly include the occurrence of 33- to 36-year cycles, which might indicate the dynamics of droughts [108]. Multi-year cycles in the cross-periodogram are among the influences of the Gleissberg cycle, which takes 80–90 years [40]; this cycle is linked to global temperature changes [97].

5. Conclusions

Solar cycles were recorded in the tree rings of European beech both in Krkonoše and in the southern Apennines. A higher number of negative significant years, characterized by extremely low radial increments, were recorded in southern compared to central Europe, while a lower number of NPY was found at nutrient-poorer sites. The frequency of NPY also increased over time with increasing frequency of extreme climatic events in response to climate change, especially droughts in vegetation periods. Radial growth on individual research plots correlated differently within each time period. The most significant values were recorded for the sunspot number (compared to temperature and precipitation), which correlated profoundly with the radial growth of beech. Each research plot correlated at least once with the sunspot number. Research plots in Krkonoše responded positively to the sunspot number, seasonal temperatures and annual precipitation totals, while the research plots in the southern Apennines correlated in exactly the opposite way than those research areas in central Europe. In the first time period (1900–1969), there were positive correlations with the sunspot number on all research plots. In the second time period (1970–1985), there was a decrease in radial growth both in the Apennines and Krkonoše. In the last, third period, time period (1986–2019), there were the most significant correlations between the radial growth of beech and the sunspot number, while precipitation and temperature correlated less significantly. In total, 4- to 7-year, 9- to 12-year and 17- to 35-year cycles were found in the radial growth of beech. Cross-periodograms of beech radial growth confirmed mainly 11-year cycles of solar activity and 30-year cycles for annual precipitation totals. This research demonstrates that solar cycles manifest differently in central and southern Europe. Research of the intensity and repetition of solar cycles can be helpful in uncovering new and unexplored processes that affect radial growth across Europe. Our findings could help in understanding the adaptation of forest management to climate change. Moreover, the solar cycles might be observed in radial growth even without radiocarbon analysis. This study should improve the forestry and climatological research understanding of natural cycles and their effect on the radial growth of European beech during global climate change.

Author Contributions: V.Š. designed the research with its methodology, collected samples, measured, analyzed the data, wrote the first draft of the manuscript and made review & editing. Z.V. collaborated on manuscript, wrote the first draft and made review & editing of the manuscript. S.V. made substantial contribution with design manuscript and wrote the first draft. F.R. sourced data collection in terrain. V.H. measured data. G.D. collected samples in terrain. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by the Czech University of Life Sciences Prague, Faculty of Forestry and Wood Sciences (No. IGA A19/22).

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Monthly temperature and precipitation data for Krkonoše Mountains are available from the Czech Hydrometeorological Institute, Prague (www.chmi.cz (accessed on 10 January 2021)). Monthly climatic data for Italy are available from the Italian Civil Protection Authority, Basilicata Region (<http://www.centrofunzionalebasilicata.it/> (accessed on 10 January 2021)). Annual sunspot number data are available from the Royal Observatory of Belgium, Brussels (www.astro.oma.be (accessed on 10 January 2021)). The tree ring data presented in this study are available on request from the corresponding author.

Acknowledgments: Acknowledgement goes to the Czech Hydrometeorological Institute, to Italian Civil Protection Authority and to Royal Observatory of Belgium, for providing the data sets. We would also like to thank both Richard Lee Manore, a native speaker, and Jitka Šišáková, an expert in the field, for checking the English. Finally, we thank two anonymous reviewers for their constructive comments and suggestions that helped improve the article.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. EUFORGEN. *Fagus sylvatica*, European Beech. Available online: <http://www.euforgen.org/species/fagus-sylvatica/> (accessed on 10 January 2021).
2. Dorado-Liñán, I.; Piovesan, G.; Martínez-Sancho, E.; Gea-Izquierdo, G.; Zang, C.; Cañellas, I.; Castagneri, D.; Di Filippo, A.; Gutiérrez, E.; Ewald, J.; et al. Geographical adaptation prevails over species-specific determinism in trees' vulnerability to climate change at Mediterranean rear-edge forests. *Glob. Chang. Biol.* **2019**, *25*, 1296–1314. [[CrossRef](#)]
3. Geßler, A.; Keitel, C.; Matyssek, R.; Seiler, W.; Rennenberg, H. Potential risks for European beech (*Fagus sylvatica* L.) in a changing climate Potential risks for European beech (*Fagus sylvatica* L.). *Trees* **2007**, *21*, 1–11. [[CrossRef](#)]
4. Tegel, W.; Seim, A.; Hakelberg, D.; Hoffmann, S.; Panev, M.; Westphal, T.; Büntgen, U. A recent growth increase of European beech (*Fagus sylvatica* L.) at its Mediterranean distribution limit contradicts drought stress. *Eur. J. For. Res.* **2014**, *133*, 61–71. [[CrossRef](#)]
5. Eilmann, B.; Sterck, F.; Wegner, L.; De Vries, S.M.G.; Von Arx, G.; Mohren, G.M.J.; Den Ouden, J. Wood structural differences between northern and southern beech provenances growing at a moderate site. *Tree Physiol.* **2014**, *34*, 882–893. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
6. Lenz, A.; Hoch, G.; Vitasse, Y. Fast acclimation of freezing resistance suggests no influence of winter minimum temperature on the range limit of European beech. *Tree Physiol.* **2016**, *36*, 490–501. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
7. Magri, D. Patterns of post-glacial spread and the extent of glacial refugia of European beech (*Fagus sylvatica*). *J. Biogeogr.* **2008**, *35*, 450–463. [[CrossRef](#)]
8. Kramer, K.; Degen, B.; Buschbom, J.; Hickler, T.; Thuiller, W.; Sykes, M.T.; de Winter, W. Modelling exploration of the future of European beech (*Fagus sylvatica* L.) under climate change-Range, abundance, genetic diversity and adaptive response. *For. Ecol. Manag.* **2010**, *259*, 2213–2222. [[CrossRef](#)]
9. Penuelas, J.; Boada, M. A global change-induced biome shift in the Montseny mountains (NE Spain). *Glob. Chang. Biol.* **2003**, *9*, 131–140. [[CrossRef](#)]
10. Kolář, T.; Čermák, P.; Trnka, M.; Žid, T.; Rybníček, M. Temporal changes in the climate sensitivity of Norway spruce and European beech along an elevation gradient in Central Europe. *Agric. For. Meteorol.* **2017**, *239*, 24–33. [[CrossRef](#)]
11. Muffler, L.; Weigel, R.; Hackett-Pain, A.J.; Klisz, M.; van der Maaten, E.; Wilmking, M.; Kreyling, J.; van der Maaten-Theunissen, M. Lowest drought sensitivity and decreasing growth synchrony towards the dry distribution margin of European beech. *J. Biogeogr.* **2020**, *47*, 1910–1921. [[CrossRef](#)]
12. Bolte, A.; Hilbrigg, L.; Grundmann, B.; Kampf, F.; Brunet, J.; Roloff, A. Climate change impacts on stand structure and competitive interactions in a southern Swedish spruce-beech forest. *Eur. J. For. Res.* **2010**, *129*, 261–276. [[CrossRef](#)]
13. Vacek, Z.; Vacek, S.; Slanař, J.; Bílek, L.; Bulušek, D.; Štefančík, I.; Králíček, I.; Vančura, K. Adaption of Norway spruce and European beech forests under climate change: From resistance to close-to-nature silviculture. *Cent. Eur. For. J.* **2019**, *65*, 129–144. [[CrossRef](#)]
14. Tumajer, J.; Altman, J.; Štěpánek, P.; Tremel, V.; Doležal, J.; Cienciala, E. Increasing moisture limitation of Norway spruce in Central Europe revealed by forward modelling of tree growth in tree-ring network. *Agric. For. Meteorol.* **2017**, *247*, 56–64. [[CrossRef](#)]
15. Vacek, S.; Moucha, P.; Bílek, L.; Mikeska, M.; Remeš, J.; Simon, J.; Hynek, V.; Šrůtka, P.; Schwarz, O.; Mánek, J.; et al. *Péče o lesní ekosystémy v chráněných územích ČR. [Management of Forest Ecosystems in the Protected Areas of the Czech Republic]*; Ministry of the Environment of the Czech Republic: Prague, Czech Republic, 2012.
16. Conte, E.; Lombardi, F.; Battipaglia, G.; Palombo, C.; Altieri, S.; La Porta, N.; Marchetti, M.; Tognetti, R. Growth dynamics, climate sensitivity and water use efficiency in pure vs. mixed pine and beech stands in Trentino (Italy). *For. Ecol. Manag.* **2018**, *409*, 707–718. [[CrossRef](#)]
17. Etzold, S.; Ziemińska, K.; Rohner, B.; Bottero, A.; Bose, A.K.; Ruehr, N.K.; Zingg, A.; Rigling, A. One Century of Forest Monitoring Data in Switzerland Reveals Species- and Site-Specific Trends of Climate-Induced Tree Mortality. *Front. Plant Sci.* **2019**, *10*, 307. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

18. Aertsens, W.; Janssen, E.; Kint, V.; Bontemps, J.D.; Van Orshoven, J.; Muys, B. Long-term growth changes of common beech (*Fagus sylvatica* L.) are less pronounced on highly productive sites. *For. Ecol. Manag.* **2014**, *312*, 252–259. [[CrossRef](#)]
19. Vacek, S.; Prokúpková, A.; Vacek, Z.; Bulušek, D.; Šimůnek, V.; Králíček, I.; Prausová, R.; Hájek, V. Growth response of mixed beech forests to climate change, various management and game pressure in Central Europe. *J. For. Sci.* **2019**, *65*, 331–345. [[CrossRef](#)]
20. Dittmar, C.; Zech, W.; Elling, W. Growth variations of Common beech (*Fagus sylvatica* L.) under different climatic and environmental conditions in Europe—A dendroecological study. *For. Ecol. Manag.* **2003**, *173*, 63–78. [[CrossRef](#)]
21. Šimůnek, V.; Vacek, Z.; Vacek, S.; Králíček, I.; Vančura, K. Growth variability of European beech (*Fagus sylvatica* L.) natural forests: Dendroclimatic study from Krkonoše National Park. *Cent. Eur. For. J.* **2019**, *65*, 3–11. [[CrossRef](#)]
22. Králíček, I.; Vacek, Z.; Vacek, S.; Remeš, J.; Bulušek, D.; Král, J.; Štefančík, I.; Putalová, T. Dynamics and structure of mountain autochthonous spruce-beech forests: Impact of hilltop phenomenon, air pollutants and climate. *Dendrobiology* **2017**, *77*, 119–137. [[CrossRef](#)]
23. Vacek, S.; Hůnová, I.; Vacek, Z.; Hejmanová, P.; Podrázský, V.; Král, J.; Putalová, T.; Moser, W.K. Effects of air pollution and climatic factors on Norway spruce forests in the Orlické hory Mts. (Czech Republic), 1979–2014. *Eur. J. For. Res.* **2015**, *134*, 1127–1142. [[CrossRef](#)]
24. Špulák, O.; Souček, J. The Sibyla model and development of beech forests affected by air pollution. *Cent. Eur. J. Biol.* **2010**, *5*, 317–383. [[CrossRef](#)]
25. Kooijman, A.M.; Emmer, I.M.; Fanta, J.; Sevink, J. Natural regeneration potential of the degraded Krkonoše forests. *Land Degrad. Dev.* **2000**, *11*, 459–473. [[CrossRef](#)]
26. Vacek, S.; Vacek, Z.; Bílek, L.; Nosková, I.; Schwarz, O. Structure and development of forest stands on permanent research plots in the Krkonoše Mts. *J. For. Sci.* **2010**, *56*, 518–530. [[CrossRef](#)]
27. Piovesan, G.; Biondi, F.; Di Filippo, A.; Alessandrini, A.; Maugeri, M. Drought-driven growth reduction in old beech (*Fagus sylvatica* L.) forests of the central Apennines, Italy. *Glob. Chang. Biol.* **2008**, *14*, 1265–1281. [[CrossRef](#)]
28. Filippo, A.D.I.; Biondi, F.; Maugeri, M. Bioclimate and growth history affect beech lifespan in the Italian Alps and Apennines. *Glob. Chang. Biol.* **2012**, 960–972. [[CrossRef](#)]
29. Tognetti, R.; Lasserre, B.; Di Febbraro, M.; Marchetti, M. Modeling regional drought-stress indices for beech forests in Mediterranean mountains based on tree-ring data. *Agric. For. Meteorol.* **2019**, *265*, 110–120. [[CrossRef](#)]
30. Di Filippo, A.; Biondi, F.; Čufar, K.; De Luis, M.; Grabner, M.; Maugeri, M.; Presutti Saba, E.; Schirone, B.; Piovesan, G. Bioclimatology of beech (*Fagus sylvatica* L.) in the Eastern Alps: Spatial and altitudinal climatic signals identified through a tree-ring network. *J. Biogeogr.* **2007**, *34*, 1873–1892. [[CrossRef](#)]
31. Tartaglione, N.; Toniazzi, T.; Orsolini, Y.; Otterå, O.H. Impact of solar irradiance and geomagnetic activity on polar NO_x, ozone and temperature in WACCM simulations. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* **2020**, *209*, 105398. [[CrossRef](#)]
32. Lockwood, M.; Owens, M.; Hawkins, E.; Jones, G.S.; Usoskin, I. Frost fairs, sunspots and the Little Ice Age. *Astron. Geophys.* **2017**, *58*, 2.17–2.23. [[CrossRef](#)]
33. Mauas, P.J.D.; Buccino, A.P.; Flamenco, E. Solar activity forcing of terrestrial hydrological phenomena. *Proc. Int. Astron. Union* **2016**, *12*, 180–191. [[CrossRef](#)]
34. Antico, A.; Torres, M.E. Evidence of a decadal solar signal in the Amazon River: 1903 to 2013. *Geophys. Res. Lett.* **2016**, *42*, 10–782. [[CrossRef](#)]
35. Li, H.Y.; Xue, L.J.; Wang, X.J. Relationship between solar activity and flood/drought disasters of the Second Songhua river basin. *J. Water Clim. Chang.* **2015**, *6*, 578–585. [[CrossRef](#)]
36. Almedeij, J. Long-term periodic drought modeling. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.* **2016**, *30*, 901–910. [[CrossRef](#)]
37. Brugnara, Y.; Brönnimann, S.; Luterbacher, J.; Rozanov, E. Influence of the sunspot cycle on the Northern Hemisphere wintertime circulation from long upper-air data sets. *Atmos. Chem. Phys.* **2013**, *13*, 6275–6288. [[CrossRef](#)]
38. Ormes, J.F. Cosmic rays and climate. *Adv. Sp. Res.* **2018**, *62*, 2880–2891. [[CrossRef](#)]
39. Easterbrook, D.J. Cause of global climate changes: Correlation of global temperature, sunspots, solar irradiance, cosmic rays, and radiocarbon and beryllium production rates. In *Evidence-Based Climate Science Data Opposing CO₂ Emissions as the Primary Source of Global Warming*, 2nd ed.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2016; pp. 245–262. [[CrossRef](#)]
40. Tsiropoula, G. Signatures of solar activity variability in meteorological parameters. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* **2003**, *65*, 469–482. [[CrossRef](#)]
41. Singh, A.K.; Bhargawa, A. Delineation of possible influence of solar variability and galactic cosmic rays on terrestrial climate parameters. *Adv. Sp. Res.* **2020**, *65*, 1831–1842. [[CrossRef](#)]
42. Haywood, J.; Boucher, O. Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: A review. *Rev. Geophys.* **2000**, *38*, 513–543. [[CrossRef](#)]
43. Jayaraman, A.; Lubin, D.; Ramachandran, S.; Ramanathan, V.; Woodbridge, E. Direct observations of aerosol radiative forcing over the tropical Indian Ocean during the January–February 1996 pre-INDOEX cruise Z 10-. *J. Geophys. Res.* **1998**, *103*, 827–836. [[CrossRef](#)]
44. Maghrabi, A.; Kudela, K. Relationship between time series cosmic ray data and aerosol optical properties: 1999–2015. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* **2019**, *190*, 36–44. [[CrossRef](#)]

45. Cecchini, S.; Galli, M.; Nanni, T.; Ruggiero, L. Solar variability and ring widths in fossil trees. *Il Nuovo Cim. C* **1996**, *19*, 527–536. [[CrossRef](#)]
46. Muraki, Y.; Nakamura, T.; Kitagawa, H.; Masuda, K.; Nagaya, K.; Miyahara, H. Transition of solar cycle length in association with the occurrence of grand solar minima indicated by radiocarbon content in tree-rings. *Quat. Geochronol.* **2008**, *3*, 208–212. [[CrossRef](#)]
47. Lüdecke, H.J.; Cina, R.; Dammschneider, H.J.; Lüning, S. Decadal and multidecadal natural variability in European temperature. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* **2020**, *205*, 105294. [[CrossRef](#)]
48. Bice, D.; Montanari, A.; Vučetić, V.; Vučetić, M. The influence of regional and global climatic oscillations on Croatian climate. *Int. J. Climatol.* **2012**, *32*, 1537–1557. [[CrossRef](#)]
49. Laurenz, L.; Lüdecke, H.J.; Lüning, S. Influence of solar activity changes on European rainfall. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* **2019**, *185*, 29–42. [[CrossRef](#)]
50. Le Mouél, J.L.; Lopes, F.; Courtillot, V. A Solar Signature in Many Climate Indices. *J. Geophys. Res. Atmos.* **2019**, *124*, 2600–2619. [[CrossRef](#)]
51. Piovesan, G.; Schirone, B. Winter North Atlantic oscillation effects on the tree rings of the Italian beech (*Fagus sylvatica* L.). *Int. J. Biometeorol.* **2000**, *44*, 121–127. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
52. Šimůnek, V.; Sharma, R.P.; Vacek, Z.; Vacek, S.; Hůnová, I. Sunspot area as unexplored trend inside radial growth of European beech in Krkonoše Mountains: A forest science from different perspective. *Eur. J. For. Res.* **2020**. [[CrossRef](#)]
53. Šimůnek, V.; Vacek, Z.; Sharma, R.; Vacek, S. Sunspot Cycles as the Underlying Factor of European Beech Natural Development. In *Proceedings of Central European Silviculture*; Houšková, K., Černý, J., Eds.; Mendel University: Brno, Czech Republic, 2019; pp. 267–277.
54. Kasatkina, E.A.; Shumilov, O.I.; Timonen, M. Solar activity imprints in tree ring-data from northwestern Russia. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* **2019**, *193*, 105075. [[CrossRef](#)]
55. Shumilov, O.I.; Kasatkina, E.A.; Mielikainen, K.; Timonen, M.; Kanatjev, A.G. Palaeovolcanos, Solar activity and pine tree-rings from the Kola Peninsula (northwestern Russia) over the last 560 years Palaeovolcanos. *Int. J. Environ. Res.* **2011**, *5*, 855–864.
56. Rigozo, N.R.; Nordemann, D.J.R.; Echer, E.; Zandreda, A.; Gonzalez, W.D. Solar variability effects studied by tree-ring data wavelet analysis. *Adv. Sp. Res.* **2002**, *29*, 1985–1988. [[CrossRef](#)]
57. Wang, X.; Zhang, Q. Bin Evidence of solar signals in tree rings of Smith fir from Sygera Mountain in southeast Tibet. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* **2011**, *73*, 1959–1966. [[CrossRef](#)]
58. Surový, P.; Ribeiro, N.A.; De Evora, U.; Pereira, J.S.; Superior, I.; Lisbon, D.A. Influence of solar activity cycles on cork growth—A hypothesis. In *Proceedings of the 19th National Solar Physics Meeting Papradno*; Dorotovič, I., Ed.; SÚH: Hurbanovo, Slovakia, 2008; pp. 67–72.
59. Tolazs, R. *Atlas Podnebí Česka*; Český Hydrometeorologický Ústav: Praha, Czech Republic, 2007.
60. Piovesan, G.; Bernabei, M.; Di Filippo, A.; Romagnoli, M. A long-term tree ring beech chronology from a high-elevation old-growth forest of Central Italy. *Dendrochronologia* **2003**. [[CrossRef](#)]
61. Rinntech. *TSAP-Win: Time Series Analysis and Presentation for Dendrochronology and Related Applications*; Rinntech: Heidelberg, Germany, 2003; Available online: <http://www.rimatech.com> (accessed on 20 June 2019).
62. Larsson, L.-A. Cybis Elektronik & Data AB, Saltsjöbaden, Sweden. 2010. Available online: <http://www.cybis.se/> (accessed on 20 June 2019).
63. ČHMÚ Czech Hydrometeorological Institute. Available online: <http://portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/uzemni-srazky> (accessed on 25 June 2020).
64. Protezione Civile—Regione Basilicata Abriola a Sellata Pierfaone. Available online: <http://www.centrofunzionalebasilicata.it/it/> (accessed on 10 October 2020).
65. WDC-SILSO Sunspot Data from the World Data Center SILSO, Royal Observatory of Belgium, Brussels. Available online: <http://www.sidc.be/silso/datafiles> (accessed on 20 October 2020).
66. Team R Core. *A Language and Environment for Statistical Computing*; R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria, 2018.
67. Zang, C.; Buras, A.; Cecile, J.; Mudelsee, M.; Schulz, M.; Pucha-cofrep, D. Package ‘dplr’ R, Dendrochronology Program Library in R Version 2018. Available online: <https://r-forge.r-project.org/projects/dplr/> (accessed on 25 June 2020).
68. Bunn, A.; Mikko, K. *Chronology Building in dplr*; R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria, 2018; pp. 1–13.
69. Cook, E.R.; Shiyatov, S.G.; Mazepa, V.S.; Ecology, A.; Branch, U. *Methods of Dendrochronology Applications*; Cook, E.R., Kairiukstis, L.A., Eds.; Tree-Ring Laboratory, Lamont-Ooherty Geological Observatory, Columbia University: New York, NY, USA, 1990; ISBN 9789048140602.
70. Fritts, H.C. *Tree Rings and Climate*; Academic Press Inc.: Tucson, AZ, USA, 1976.
71. Schweingrub, F.H.; Eckstein, D.; Serre-Bachet, F.; Braker, O.U. Identification, Presentation and Interpretation of Event Years and Pointer Years in Dendrochronology. *Dendrochronologia* **1990**, *8*, 9–38.
72. StatSoft. *Statistica Electronic Manual*; StatSoft: Tulsa, OK, USA, 2013.
73. Lim, C.Y.; Stein, M. Properties of spatial cross-periodograms using fixed-domain asymptotics. *J. Multivar. Anal.* **2008**, *99*, 1962–1984. [[CrossRef](#)]
74. Bunn, A.; Mikko, K.; Biondi, F.; Campelo, F.; Merian, P.; Qeadan, F.; Zang, C.; Pucha-Cofrep, D.; Wernicke, J. Dendrochronology Program Library in R. R package version 1.6.8. *Dendrochronologia* **2018**, *26*, 115–124. [[CrossRef](#)]

75. Ligges, U.; Short, T.; Kienzle, P.; Schnackenberg, S.; Billingham, D.; Borchers, H.-W.; Carezia, A.; Dupuis, P.; Eaton, J.W.; Farhi, E.; et al. Package 'Signal' 2015. Available online: <http://r-forge.r-project.org/projects/signal/> (accessed on 25 June 2020).
76. Robson, T.M.; Rasztoivits, E.; Aphalo, P.J.; Alia, R.; Aranda, I. Flushing phenology and fitness of European beech (*Fagus sylvatica* L.) provenances from a trial in La Rioja, Spain, segregate according to their climate of origin. *Agric. For. Meteorol.* **2013**, *180*, 76–85. [[CrossRef](#)]
77. Vacek, S.; Hejmanová, P.; Hejman, M.; Vacek, Z. Growth, healthy status and seed production of differently aged allochthonous and autochthonous *Pinus mugo* stands in the Giant Mts. over 30 years. *Eur. J. For. Res.* **2013**, *132*, 801–813. [[CrossRef](#)]
78. Putalová, T.; Vacek, Z.; Vacek, S.; Štefančík, I.; Bulušek, D.; Král, J. Tree-ring widths as an indicator of air pollution stress and climate conditions in different Norway spruce forest stands in the Krkonoše Mts. *Cent. Eur. For. J.* **2019**, *65*, 21–33. [[CrossRef](#)]
79. Dulamsuren, C.; Hauck, M.; Kopp, G.; Ruff, M.; Leuschner, C. European beech responds to climate change with growth decline at lower, and growth increase at higher elevations in the center of its distribution range (SW Germany). *Trees Struct. Funct.* **2017**, *31*, 673–686. [[CrossRef](#)]
80. Gazol, A.; Camarero, J.J.; Colangelo, M.; de Luis, M.; Martínez del Castillo, E.; Serra-Maluquer, X. Summer drought and spring frost, but not their interaction, constrain European beech and Silver fir growth in their southern distribution limits. *Agric. For. Meteorol.* **2019**, *278*, 107695. [[CrossRef](#)]
81. Nolè, A.; Rita, A.; Ferrara, A.M.S.; Borghetti, M. Effects of a large-scale late spring frost on a beech (*Fagus sylvatica* L.) dominated Mediterranean mountain forest derived from the spatio-temporal variations of NDVI. *Ann. For. Sci.* **2018**, *75*, 1–11. [[CrossRef](#)]
82. Weemstra, M.; Eilmann, B.; Sass-Klaassen, U.G.W.; Sterck, F.J. Summer droughts limit tree growth across 10 temperate species on a productive forest site. *For. Ecol. Manag.* **2013**, *306*, 142–149. [[CrossRef](#)]
83. Leonelli, G.; Denneler, B.; Bergeron, Y. Climate sensitivity of trembling aspen radial growth along a productivity gradient in northeastern British Columbia, Canada. *Can. J. For. Res.* **2008**, *38*, 1211–1222. [[CrossRef](#)]
84. Urban, J.; Holušová, K.; Menšík, L.; Čermák, J.; Kantor, P. Tree allometry of Douglas fir and Norway spruce on a nutrient-poor and a nutrient-rich site. *Trees Struct. Funct.* **2013**, *27*, 97–110. [[CrossRef](#)]
85. Lévesque, M.; Walthert, L.; Weber, P. Soil nutrients influence growth response of temperate tree species to drought. *J. Ecol.* **2016**, *104*, 377–387. [[CrossRef](#)]
86. Šimůnek, V.; Vacek, Z.; Vacek, S. Solar cycles in salvage logging: National data from the Czech Republic confirm significant correlation. *Forests* **2020**, *11*, 973. [[CrossRef](#)]
87. Seidl, R.; Thom, D.; Kautz, M.; Martin-Benito, D.; Peltoniemi, M.; Vacchiano, G.; Wild, J.; Ascoli, D.; Petr, M.; Honkaniemi, J.; et al. Forest disturbances under climate change. *Nat. Clim. Chang.* **2017**, *7*, 395–402. [[CrossRef](#)]
88. Ferrara, C.; Marchi, M.; Fabbio, G.; Fares, S.; Bertini, G.; Piovosi, M.; Salvati, L. Exploring nonlinear intra-annual growth dynamics in *Fagus sylvatica* L. trees at the Italian ICP-forests level II network. *Forests* **2019**, *10*, 584. [[CrossRef](#)]
89. Gray, L.J.; Woollings, T.J.; Andrews, M.; Knight, J. Eleven-year solar cycle signal in the NAO and Atlantic/European blocking. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **2016**, *142*, 1890–1903. [[CrossRef](#)]
90. Adolphi, F.; Muscheler, R.; Svensson, A.; Aldahan, A.; Matthes, K. Persistent link between solar activity and Greenland climate during the Last Glacial Maximum. *Nat. Geosci.* **2014**, *7*, 662–666. [[CrossRef](#)]
91. Ma, H.; Chen, H.; Gray, L.; Zhou, L.; Li, X.; Wang, R.; Zhu, S. Changing response of the North Atlantic/European winter climate to the 11 year solar cycle. *Environ. Res. Lett.* **2018**, *13*. [[CrossRef](#)]
92. Kodera, K.; Kuroda, Y. Dynamical response to the solar cycle. *J. Geophys. Res. Atmos.* **2002**, *107*, ACL 5-1–ACL 5-12. [[CrossRef](#)]
93. Brönnimann, S.; Ewen, T.; Griesser, T.; Jenne, R. Multidecadal signal of solar variability in the upper troposphere during the 20th century. *Space Sci. Rev.* **2006**, *125*, 305–317. [[CrossRef](#)]
94. Lopez-Bustins, J.A.; Esteban, P.; Labitzke, K.; Langematz, U. The role of the stratosphere in Iberian Peninsula rainfall: A preliminary approach in February. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* **2007**, *69*, 1471–1484. [[CrossRef](#)]
95. Uğur, B.; Feriha, Y. Forecasting risky years for forest fires depending on sunspot cycle. *J. For. Res.* **2017**, *4*, 133–142.
96. Kumar, V.; Dhaka, S.K.; Panwar, V.; Singh, N.; Rao, A.S.; Malik, S.; Yoden, S. Detection of solar cycle signal in the tropospheric temperature using COSMIC data. *Curr. Sci.* **2018**, *115*, 2232–2239. [[CrossRef](#)]
97. Nagovitsyn, Y.A. Specific features in the effect of solar activity on the Earth's climate changes. *Geomagn. Aeron.* **2014**, *54*, 1010–1013. [[CrossRef](#)]
98. Hathaway, D.H. The solar cycle. *Living Rev. Sol. Phys.* **2015**, *12*, 83. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
99. Singh, A.K.; Bhargawa, A. Prediction of declining solar activity trends during solar cycles 25 and 26 and indication of other solar minimum. *Astrophys. Space Sci.* **2019**, *364*, 12. [[CrossRef](#)]
100. Kristoufek, L. Has global warming modified the relationship between sunspot numbers and global temperatures? *Phys. A Stat. Mech. Appl.* **2017**, *468*, 351–358. [[CrossRef](#)]
101. Ding, Z.; Wu, R. Quantifying the internal variability in multi-decadal trends of spring surface air temperature over mid-to-high latitudes of Eurasia. *Clim. Dyn.* **2020**, *55*, 2013–2030. [[CrossRef](#)]
102. Vacek, S.; Bílek, L.; Schwarz, O.; Hejmanová, P.; Mikeska, M. Effect of Air Pollution on the Health Status of Spruce Stands Effect of Air Pollution on the Health Status of Spruce Stands. *Mt. Res. Dev.* **2013**, *33*, 40–50. [[CrossRef](#)]
103. Dorotovič, I.; Louzada, J.L.; Rodrigues, J.C.; Karlovský, V. Impact of Solar Activity on the Growth of Pine Trees: Case Study. *Eur. J. For. Res.* **2014**, *133*, 639–648. [[CrossRef](#)]

104. Kotsias, G.; Lolis, C.J.; Hatzianastassiou, N.; Levizzani, V.; Bartzokas, A. On the connection between large-scale atmospheric circulation and winter GPCP precipitation over the Mediterranean region for the period 1980–2017. *Atmos. Res.* **2020**, *233*, 104714. [[CrossRef](#)]
105. Wibig, J.; Piotrowski, P. Impact of the air temperature and atmospheric circulation on extreme precipitation in Poland. *Int. J. Climatol.* **2018**, *38*, 4533–4549. [[CrossRef](#)]
106. Jean, D.; Nordemann, R.; Echer, E.; Evangelista, H.; Pereira, M.; Echer, D.S. Solar activity imprints in tree ring width from Chile (1610–1991). *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* **2007**, *69*, 1049–1056.
107. McCracken, K.G.; Beer, J.; McDonald, F.B. A five-year variability in the modulation of the galactic cosmic radiation over epochs of low solar activity. *Geophys. Res. Lett.* **2002**, *29*, 3–6. [[CrossRef](#)]
108. Matveev, S.M.; Chendev, Y.G.; Lupo, A.R.; Hubbart, J.A.; Timashchuk, D.A. Climatic Changes in the East-European Forest-Steppe and Effects on Scots Pine Productivity. *Pure Appl. Geophys.* **2017**, *174*, 427–443. [[CrossRef](#)]
109. Tsonis, A.A.; Swanson, K.; Kravtsov, S. A new dynamical mechanism for major climate shifts. *Geophys. Res. Lett.* **2007**, *34*, 1–5. [[CrossRef](#)]
110. Carl, G.; Doktor, D.; Koslowsky, D. Phase difference analysis of temperature and vegetation phenology for beech forest: A wavelet approach. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.* **2013**, *27*, 1221–1230. [[CrossRef](#)]

5.1.5. Otisky slunečních a klimatických cyklů v letokruzích buku lesního

Tento vědecký článek se zabývá dendrochronologií buku lesního na lokalitě Broumovské stěny. Buk v této lokalitě prochází stádiem počátečního rozpadu porostu a skládá se ze dvou etází, kdy v tomto článku je hodnocena reakce hlavní etáže v úrovni a nad úrovní. Tento článek posuzuje radiální přírůst buku lesního vůči klimatickým faktorům jako jsou srážky, teploty vzduchu a vliv slunečního cyklu, ale také je radiální přírůst porovnán s imisním znečištěním SO₂. Tento článek dokládá z velké míry cyklické výkyvy v radiálním růstu buku lesního. Pro analýzu výsledků bylo použito korelačních a hlavně spektrálních analýz, které popisují statistickou významnost jednotlivých cyklů a faktorů ve sledovaných datech všech zkoumaných faktorů.

Výsledky článku ukazují, že nejvyšší korelační koeficient byl zaznamenán mezi radiálním přírůstem buku lesního a číslem slunečních skvrn, poté to byly teploty ve vegetačním období a nejmenší korelace byla zaznamenána vůči úhrnu srážek. Nejvyšší negativní korelace byla zaznamenána hlavně ve vztahu radiálního růstu a imisí SO₂. Radiální přírůst, úhrn srážek a teploty ve vegetačním období byly zpracovány spektrální analýzou pro zhodnocení periodických cyklů. V radiálním růstu buku se nachází 7,5 až 11letý cyklus, který je kombinací mezi periodami slunečních cyklů a mezi periodou teplot ve vegetačním období. Studie přírůstu buku lesního v době klimatické změny tak přináší nové poznatky, které mohou být využity jako podklad pro tvorbu přírodě blízkého a udržitelného lesního hospodářství na exaktních základech (Šimůnek et al. 2021a).

Citace článku:

ŠIMŮNEK, V., HÁJEK, V., PROKŮPKOVÁ, A., GALLO, J., 2021. Finding an imprint of solar and climatic cycles in tree rings of European beech (*Fagus sylvatica* L.). *Journal of Forest Science*. 67: 409–419. doi.org/10.17221/94/2020-JFS

Finding an imprint of solar and climatic cycles in tree rings of European beech (*Fagus sylvatica* L.)

VÁCLAV ŠIMŮNEK*, VOJTĚCH HÁJEK, ANNA PROKŮPKOVÁ, JOSEF GALLO

Department of Silviculture, Faculty of Forestry and Wood Sciences, Czech University of Life Sciences Prague, Prague, Czech Republic

*Corresponding author: simunekv@fd.czu.cz

Citation: Šimůnek V., Hájek V., Prokúpková A., Gallo J. (2021): Finding an imprint of solar and climatic cycles in tree rings of European beech (*Fagus sylvatica* L.). J. For. Sci..

Abstract: The present study is focused on European beech (*Fagus sylvatica* L.) growth in eastern Bohemia in the Broumovské stěny National Nature Reserve, Czech Republic. The objective of this research was to develop an evaluation of European beech radial growth in relation to solar activity (number of sunspots), air temperature in the growing season, annual precipitation and air pollution (SO₂ depositions). The highest positive significant correlation coefficient was found between radial growth of European beech and number of sunspots, followed by the correlation with air temperature in the growing season. The radial growth showed a negative significant correlation with SO₂ depositions. The correlation of the radial growth indicates that precipitation and sunspots have a lower correlation coefficient with beech growth than seasonal temperature during an air pollution disaster in the 21st solar cycle. Radial growth, precipitation total and air temperature in the growing season were processed by spectral analysis for the evaluation of periodic cycles. The 7.5- to 11-year cycles were observed in air temperature and in sunspot cycles. Precipitation and air temperature in the growing season indicate a higher frequency at 3.7-year cycles. The long-term periodicity of radial growth was influenced by both solar activity and fluctuations of growing-season air temperature.

Keywords: sunspot area; solar activity; cyclicity; radial growth; Central Europe; air pollution load

European beech (*Fagus sylvatica* L.) is the most widespread deciduous tree species in Central Europe (Pretzsch et al. 2013; Sharma et al. 2016; Štefančík et al. 2018b). This tree species is very important, both from an economic point of view and for ecological aspects (Podrázský et al. 2014; Bulušek et al. 2016; Štefančík et al. 2018a). In addition, the importance of European beech is increasing as a replacement for Norway spruce due to the ongoing climate change (Vacek et al. 2019a), as there are large-scale declines and disturbances of sensitive spruce stands (Toth et al. 2020). The growth of European beech forests can be influenced by several factors, such as temperature and precipitation (Remeš et al. 2015; Gallo et al.

2017; Vacek et al. 2019b), air pollution (Breckle, Kahle 1992; Králíček et al. 2017), game damage (Slanař et al. 2017; Vacek 2017), habitat conditions (Dittmar et al. 2003; Vacek et al. 2015b; Hájek et al. 2020) including weed competition in the initial stage of growth (Gallo et al. 2018a, b), silvicultural interventions (Sharma et al. 2019; Vacek et al. 2020a) and previous land use (Rozas 2003; Cukor et al. 2017). One of the important factors affecting radial growth of European beech is also solar activity and its cycles (Komitov, Kaftan 2019).

Eleven-year solar cycles are defined by the sunspot area on the Sun's surface. Many indicators of solar activity (Hathaway 2015) are associated with these solar cycles that are part of natural

variability of the Earth's climate (Kadonaga et al. 1999). In the past, it was proved that solar cycles influence the water cycle of the planet Earth (Al-Tameemi, Chukin 2016). Solar cycles also influence the atmospheric circulation in higher parts of the atmosphere of the northern hemisphere, which is manifested in so called North Atlantic atmospheric circulation (Brugnara et al. 2013). With increasing altitude above sea level, the influence of solar cycles on the air temperature is increasing (from 1 500 to 8 000 m) (Kumar et al. 2018). There are also studies showing that the solar activity has a long-term impact on the temperature of the Earth's atmosphere, which is accompanied by the occurrence of colder winter seasons (Lockwood et al. 2017). Other research works have proved that the effect of solar activity also influences precipitation and temperature (Mauas et al. 2016; Baker et al. 2018). The solar activity even impacts on the properties and formation of clouds in the atmosphere, which is caused by cosmic-ray ionization that reflects 11-year cycles of solar activity in a reverse way (Jayaraman et al. 1998; Haywood, Boucher 2000; Maghrabi, Kudela 2019). Consequently, fluctuations in the Earth's surface irradiance occur. Researches in the field of dendrochronology document the effect of solar cycles on tree ring radial growth, which was described by studies conducted in north-western Russia (Shumilov et al. 2011; Kasatkina et al. 2019), Tibetan Plateau (Wang, Zhang 2011) or Chile (Rigozo et al. 2002).

The growth dynamics of European beech is responding to 11-year solar cycles in the Krkonoše Mountains (Šimůnek et al. 2021). The solar cycles were found also in the radial growth of other tree species across Europe (Dorotovič et al. 2014) and Russia (Shumilov et al. 2011). Scientific studies also documented that the main commercial tree species (European beech, Norway spruce, Scots pine, European larch and sycamore maple) in the studied Sudetes mountain range respond very well to seasonal temperature and subsequently to precipitation (Vacek et al. 2017; Putalová et al. 2019; Cukor et al. 2019, 2020). The action of the above-mentioned climate factors is cyclical in various intervals, and therefore more detailed research may be very useful for the forestry sector. Another example of beech's growth being influenced by cyclical events is for example the natural regeneration of beech stands regenerating after fire in 5–12 years (Maringer et al. 2020). The productivity cycle of Eu-

ropean beech is repeated within 2–20 years (Müller-Haubold et al. 2015). The productivity of European beech stands was found to be associated with precipitation and temperature factors at a given site (Drobyshev et al. 2010; Bogdziewicz et al. 2019). These facts suggest a conclusion that the cyclical growth of European beech stands is related with cycles of mast years (Drobyshev et al. 2010).

The present study demonstrates the theoretical cyclicity of radial growth by means of a spectral analysis of European beech in eastern Bohemia (Broumovské stěny National Nature Reservation) in relation to air temperature, precipitation and solar activity. The main objective was to determine the cyclic nature of European beech radial growth by a dendrochronological analysis. The study evaluates correlations and spectral analysis of radial growth, sunspot number, air pollution (SO₂ depositions), air temperature and precipitation. The outcomes of this study could be used as background material for a more exact definition of the cyclicity of natural influences on European beech growth under the conditions of climate change.

MATERIAL AND METHODS

Study site. The study site is located near the town of Broumov in the Broumovské stěny National Nature Reserve (NNR) within the Broumovsko Protected Landscape Area in the eastern part of the Czech Republic (Figure 1). The NNR was established in 1956 due to a unique pseudokarst relief in Upper Cretaceous block sandstones occurring in the form of extensive rock walls and is made up by acidophilic and herb-rich European beech forests and scree forests. The study area is situated at an altitude of 610–640 m a.s.l. on the slope with eastern aspect and gradient of 28–43° on GPS 50°34'31.7"N 16°15'42.2"E. Modal Cambisol and Cambic Rankers are the prevailing soil types. Average annual air temperature was 7.3 °C and average precipitation total was 744 mm in 1961–2018.

Studied stands have been left to spontaneous development in this area and are in the initial break-up stage according to Korpel (1995). The stand structure is mostly composed of two storeys: an old-growth European beech forest (150–210 years of age) is in the overstorey and predominantly European beech undergrowth (5–30 years of age) is in the lower storey. Stand volume on average reaches 550 m³·ha⁻¹ with mean stocking of 0.7, tree height

<https://doi.org/10.17221/94/2020-JFS>

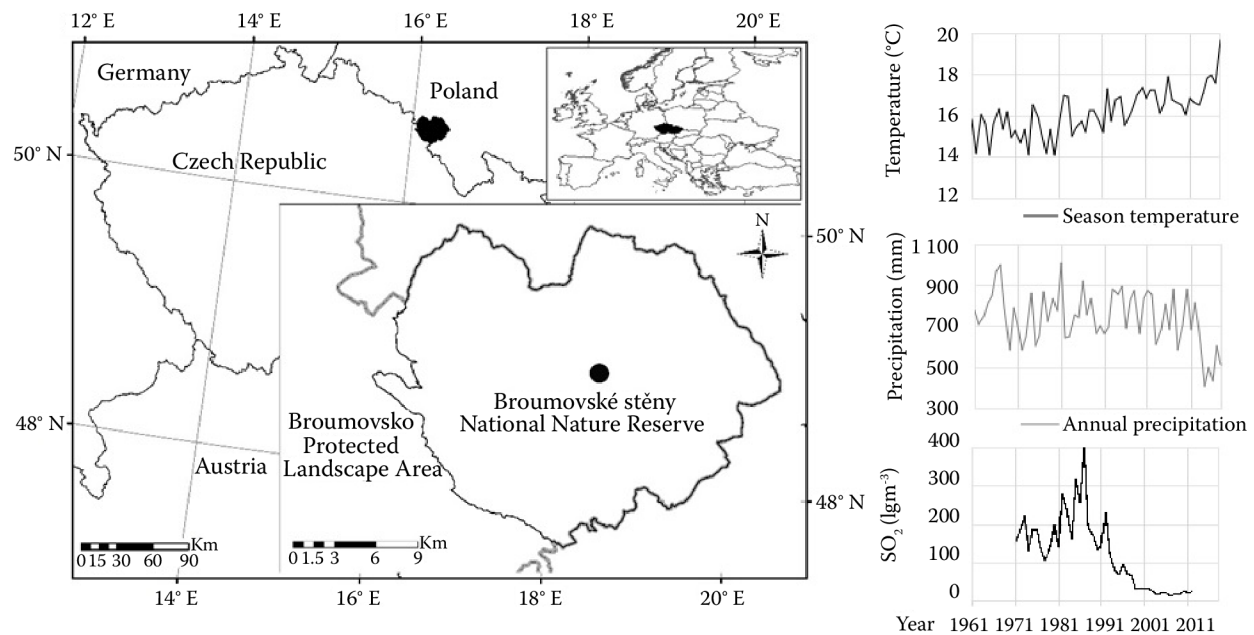


Figure 1. Localization of studied European beech forest stands in the Broumovské stěny National Nature Reserve in the Broumovsko Protected Landscape Area (left) and a demonstration of temperatures, precipitation and SO₂ concentrations (right)

of 36 m and diameter at breast height of 53 cm (Vacek et al. 2015a). European beech (*Fagus sylvatica* L.) is the main overstorey species in the forest stands with the admixture of Norway spruce (*Picea abies* /L./ Karst.), sycamore maple (*Acer pseudoplatanus* L.) and rowan (*Sorbus aucuparia* L.). From the point of view of typology, research plots are classified as 5A, i.e. *Acereto-Fagetum lapidosum* (enriched stony sycamore-beech stands) (Viewegh et al. 2003). Information on the stand structure was computed from the field measurement of dendrometry variables using the Field-Map technology (IFER-Monitoring and Mapping solutions Ltd., Czech Republic). More detailed characteristics of the area of interest and permanent research plots were published by Vacek et al. (2015a). The vegetation season lasts for 150 days, which corresponds to the period from May to September (Šimůnek et al. 2019, 2021). The vegetation season was considered to be the mean from May to September for air temperature (Šimůnek et al. 2020). The precipitation was used as the annual sum of precipitation. We decided to use annual precipitation on the basis of a study from the nearby Krkonoše Mts., where the main significant correlation between monthly precipitation and tree ring growth was revealed by the Dendroclim software

(2002) outside the growing season (from January to March) (Šimůnek et al. 2019).

Data collection. Dendrochronological samples were taken with a Pressler borer in a perpendicular direction to the centre of the tree trunk. Thirty samples (one bore per tree) were taken from codominant and dominant trees at breast height of 1.3 m above the ground according to Kraft (1884). The collected dendrochronological cores were measured with an Olympus microscope using a LINTAB measurement table (Rinntech 2010). The cross-dating of the increment cores was performed with the Cdendro software (Cybis Elektronik & Data AB, Version 7.7, 2020) so that the cross-correlation index (CC) was > 25 for each sample.

Data on precipitation and temperature were used from the Trutnov meteorological station of the Czech Hydrometeorological Institute. The weather station located in the town of Trutnov was used for this study. This meteorological station is 24 km from the studied area with an altitude of 460 m a.s.l. (50°34'10.9"N, 15°54'42.0"E). The analysed period was intentionally chosen as the years from 1961 to 2018 because of the availability of climate data (precipitation, temperature). Data on maximum SO₂ depositions were represented by the arithmetic mean of data from 5 mea-

suring stations (Hony, Souš, Jizerka, Bedřichov, Šerlich) situated in the Sudetes Mountains nearby. Data sets of SO₂ maximum of each included station were incomplete due to short periods of recording. The stations were located 1 (the closest station Hony) to 68 km from the research plot and in an altitudinal range of 510–905 m. The station Hony recorded SO₂ measurements during the period 1970–2012. Solar activity data used originated from the World Data Center SILSO (WDC-SILSO 2020), Royal Observatory of Belgium, Brussels.

Data analysis. All data were processed by the R software (Version 3.6.0, 2019) using dplR (Zang et al. 2018), signal (Ligges et al. 2015) and waweslim packages (Whitcher 2020). Two steps in detrending were used. Detrending of samples was calculated by the negative exponential function in the first step. In the second step of detrending a spline evaluated as 2/3 of the age for each tree sample was used. The spline for the second step of detrending was evaluated for each tree individually based on the age of the sample and the values of the spline ranged from 113.3 to 140.0. The mean dendrochronological curve was calculated as the mean from each detrended tree sample. The used detrending maintained low-frequency variability and removed the age trend at the same time (Shumilov et al. 2011). Detrended tree-ring series of individual trees were averaged. The 8-year spline was calculated from the mean detrended data curve to remove yearly short-time fluctuations. Detrended data series were used for the spectral analysis by the “redfit” function or Schulz’s REDFIT (version 3.8e, 2002) program when this function estimates the red-noise spectrum of a time series (Schulz, Mudelsee 2002) with an optimum testing spectrum against the red-noise background using the analysis of Monte Carlo simulations. This computation was done following the instructions for R according to Bunn and Korpela (2018b).

Basic dendrochronological indicators were computed according to the procedure for dplR (Bunn, Korpela 2018a). For detrended tree ring growth data the basic dendrochronological indicators were computed like the expressed population signal

(EPS). The EPS is a confidence of dendrochronological data in relation to testing reliability against climate data. The inter-series correlations (R-bar) were computed. The R-bar is a correlation between dendrochronological series/samples (Fritts 1976). These indicators were computed for the used period 1961–2018. The EPS in our study is larger than 0.85, which is a significant level for the climate calculations (Wigley et al. 1984).

Correlations between radial growth, air temperature, precipitation, sunspots and maximum SO₂ depositions were computed in Statistica 13 software (Version 13.5.0.17, 2018). A situation map was made in ArcGIS 10 software (Version 10.8, 2020).

Since 1961 there have been five sunspot cycles on the Sun’s surface that are chronologically numbered as solar cycles 20 to 24. All used data series were divided according to the time span of solar cycles into five sections. Each solar cycle was divided according to the years determined from the World Data Center SILSO (WDC-SILSO 2020). The sunspot cycles in this study are defined by the sunspot number and year window which are as follows: cycle 20 in 1964–1976; 21 in 1976–1986; 22 in 1986–1996; 23 in 1996–2008; 24 in 2008–2018.

RESULTS

The basic dendrochronological description of European beech chronology indicates that the EPS indicator (0.91) is sufficiently significant for a climate analysis (Table 1). The mean tree-ring width of European beech in Broumovské stěny NNR reached 1.87 mm with growth variability (standard deviation) 0.7 mm. The inter-correlation (R-bar) value, describing the similarity of tree samples to each other, was 0.26.

Figure 2 documents that the solar cycles impact on radial growth of European beech. The influence of solar cycles on European beech growth is evident almost in every solar cycle. Radial growth of European beech in Figure 2 copies rises and falls of solar activity but there are also exceptions when this phenomenon was dispelled. This phenomenon

Table 1. Overview of the basic research plot characteristics and dendrochronological description

Plot name	Exposure	Altitude (m)	Tree height (m)	Diameter (cm)	Forest type	Stand stocking	Age range	No. of samples	Mean tree-ring (mm)	St. dev.	R-bar	EPS
Broumov	East	620	36	53	5A2	0.8	150–210	30	1.87	0.7	0.26	0.91

St. dev – standard deviation; R-bar – inter-correlation; EPS – expression population signal

<https://doi.org/10.17221/94/2020-JFS>

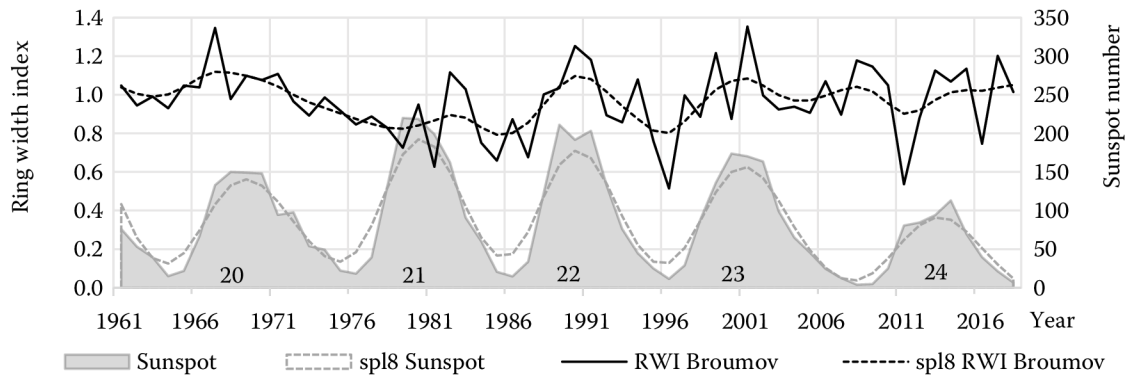


Figure 2. Tree-ring width index of European beech growth and annual number of sunspots in the period from 1961 to 2018 spl8 – eight-year spline; RWI – tree-ring width index; numbers 20, 21, 22, 23 and 24 – solar cycle numbers

was dispelled by the impact of air-pollution load (high SO₂ concentration) lasting from 1970 to 1987 and by heavy spring frosts in 2011. Since 2000, the impacts of global climate change that disturbs the parallelism of European beech radial growth to solar cycles have been increasing. Figure 2 illustrates a long-term effect of solar activity on European beech radial growth, which is well described by eight-year splines where short-term fluctuations in studied data have been removed. The splines demonstrate the parallelism of radial growth and solar activity. Three solar cycles 20, 22 and 23 are almost clearly reflected in European beech radial growth by a higher increment during solar maximum (Figure 2).

Figure 3 illustrates the correlation coefficients of radial growth with annual precipitation and with growing-season temperatures (May–September). Figure 3A documents that the correlations of solar activity, seasonal temperatures and annual precipitation vary during each solar cycle. The air pollution disaster had a negative impact on European beech radial growth in the 70s to the 80s of the 20th century, i.e. during solar cycle 21, but the increment response to precipitation was negative during that cycle (Figure 3). However, the correlation of SO₂ with radial growth during solar cycle 21 is not significant and it even shows positive values. This positive correlation can be caused by the short-term synchronization of data before the culmination

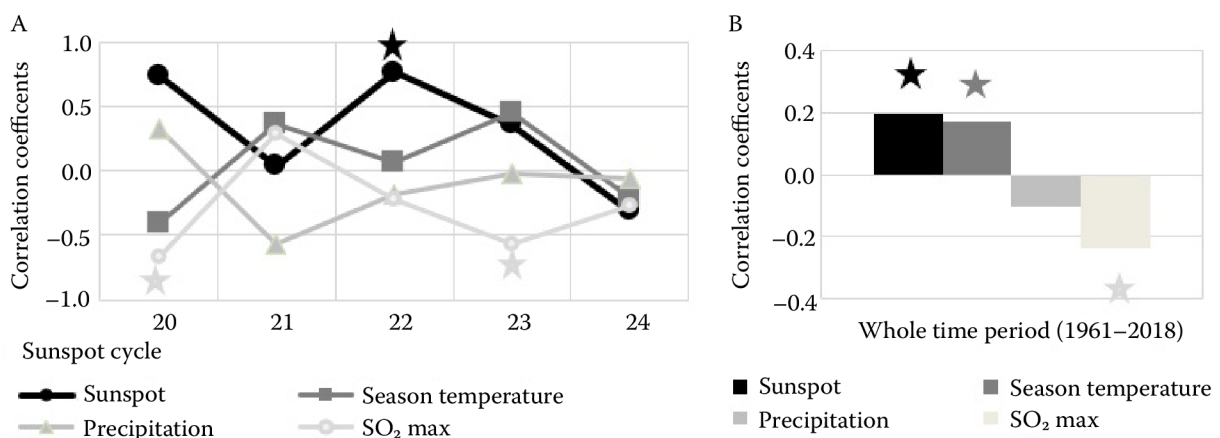


Figure 3. Correlation coefficients (r) of the tree-ring width index with precipitation, seasonal air temperature in the vegetation period, sunspot number and maximum SO₂ concentration; (A) correlation coefficients of the evaluated factors in individual solar cycles; (B) correlation coefficients for the entire time period 1961–2018; the sunspot cycles are defined by the number and year window: 20, 1964–1976; 21, 1976–1986; 22, 1986–1996; 23, 1996–2008; 24, 2008–2018 (statistically significant values are marked with asterisk for A at $P < 0.05$ and for B at $P < 0.20$)

of SO₂ air pollution in 1987, and even at the same time the correlation with temperatures increased. The correlations of solar activity with radial growth indicate the culmination of coefficients in solar cycle 22. The total correlations demonstrate that the solar activity has the highest correlation coefficient (Figure 3B), but these results indicate a statistically significant result at $P < 0.20$. Our results also confirm the high significant correlation of the SO₂ air pollution load with beech radial growth. The evidence of negative correlation between tree growth and SO₂ concentrations was recorded in Figure 2 (in the years from 1970 to 1987) and Figure 3B, where we recorded the highest negative significant correlation ($r = -0.2386$; $P < 0.20$) with the maximum SO₂ values during the entire time period. Our results also show significant correlations with the maximum values of SO₂ concentrations in Figure 3 during solar cycle 20 and 23. Additionally, we found a significant correlation ($r = 0.315$) of ra-

dial growth with maximum values of SO₂ and there was even the significant cross-correlation, where Lag reaches up to -2 years.

The spectral analysis of data (Figure 4) from 1961 to 2018 indicates that every investigated factor repeats statistically significant cycles. Tree-ring width index in Figure 4A contains 3.7- and 7.5–11-year cycles. The results also describe the influence of 11-year and 22-year solar cycles in the data for the number of sunspots (Figure 4B) while the periods from 9- to 13-years are also statistically significant. The seasonal temperature (Figure 4C) contains 3.2- and 6–8-year cycles. Precipitation total in the growing season (from May to September) in Figure 4D repeats cycles after 2.3 and 3.3 years. At the same time, the tree-ring width index of European beech shows a cyclical interrelation between temperatures and solar cycles. Precipitation total in the growing season does not have a directly significant period consistent with the tree-ring width index of European beech.

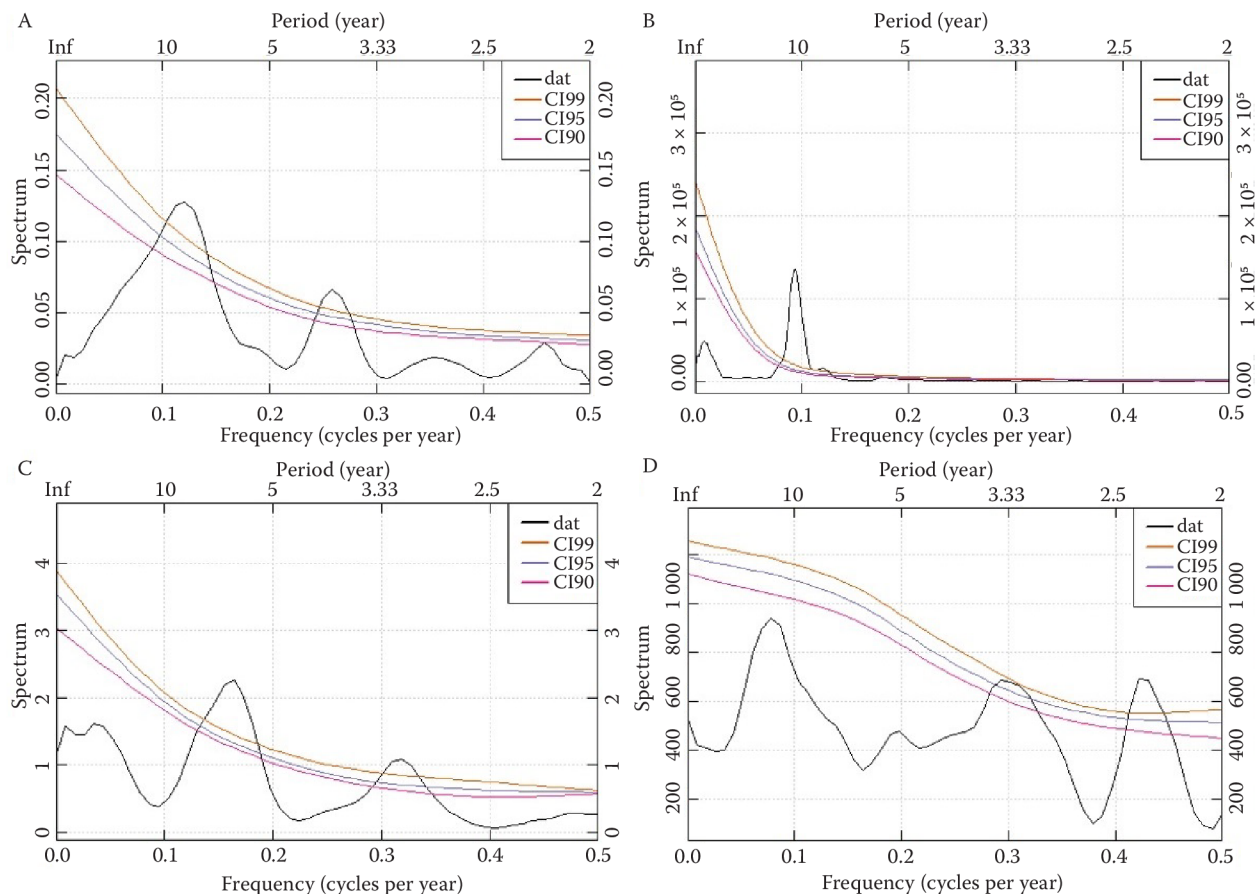


Figure 4. Spectral analysis of data sets in the time period 1961–2018; (A) tree-ring width index of European beech; (B) annual number of sunspots; (C) average seasonal temperature; (D) seasonal precipitation

The lower parabolic line – significant at 90%; the middle line – significant at 95%; the upper line – significant at 99%; inf. – infinity

<https://doi.org/10.17221/94/2020-JFS>

DISCUSSION

Solar cycles are associated to climate change and temperature differences on the planet Earth's surface. Solar cycles are assumed to influence temperatures and precipitation indirectly (Šimůnek et al. 2020, 2021). Some studies describe a possible association of low sunspot activity with climatically cold periods on the Earth (Easterbrook, 2016; Lockwood et al. 2017). Other studies even show the link between climate, cosmic rays and solar cycles (Kniveton 2004; Hathaway 2015; Ormes 2018). The influence of solar cycles on European beech radial growth is recorded in 3 of the 5 cycles (20, 22 and 23) (Figure 2), when the tree ring increment rises or falls together with the sunspot number during the approximately 11-year period, which is the sunspot cycle (Hathaway 2015). Our results indicate (Figure 3b) that there is a positive correlation of temperatures and sunspot number with radial growth. Nevertheless, the solar activity need not always be directly contained in tree ring analyses because other natural conditions disturb the parallelism of radial growth to solar cycles.

Radial growth in the period from 1970 to 1987 was influenced by an air-pollution load described by many authors from the Sudetes mountain range (Král et al. 2015; Putalová et al. 2019; Vacek et al. 2019b). The large influence of the SO₂ air pollution load is also evident from Figure 2 (in the years from 1970 to 1987) and Figure 3B, where we recorded the highest negative correlation ($r = -0.2386$) with the maximum SO₂ values. Our results recorded significant correlations with the maximum annual values of SO₂ concentrations in Figure 3 during solar cycle 20 and 23. This period of extremely high mean SO₂ concentrations was characterized by values reaching 57.4 µg·m⁻³ (maximum daily concentration 1 000 µg·m⁻³) (Vacek et al. 2020b), while the limit of vegetation damage according to the Czech Air Protection Act is 20 µg·m⁻³. Similarly, in the study area of Broumovsko PLA, diameter increment of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) was significantly negatively correlated with SO₂ concentrations in the growing season, especially in June-August and on more exposed sites in the 1980s and 1990s (Vacek et al. 2017). In general, it was proved that in the Orlické hory Mts. not far from here there was a decrease in European beech radial growth during the air-pollution load (Králíček et al. 2017). This paper showed a significant negative effect of maximum daily SO₂

concentration on radial growth of European beech, especially in the growing season.

Late frosts, which are a significant issue in cultivating forests all over Central Europe, are another important factor that disturbs the parallelism of the tree ring curve to solar activity (Gallo et al. 2014). Late frosts can reduce radial growth of European beech by more than 90% and the frequency of frost-related growth minima increases with altitude (Dittmar et al. 2003). The effect of low temperatures at the beginning of the growing season in 2011 was documented (Šimůnek et al. 2019, 2021). The research from European beech forests in Germany also documented the strong negative effects of a severe late spring frost event in early May 2011, following after warm April (Príncipe et al. 2017).

Another significant element diminishing the correlations between solar cycles (Figure 3A) and European beech radial growth in the last two solar cycles (23 and 24) may be the increasing CO₂ concentration in atmosphere that causes an increase in European beech radial growth, which was proved in southern and Central Europe (Rezaie et al. 2018). Simultaneously, global temperature was affected due to increasing CO₂, which disturbed the natural process of solar cycles in relation to climate (Kristoufek 2017). A decreasing correlation could be linked to the effect of solar activity on climate change, where both factors are associated with the changes in the North Atlantic Oscillation (NAO) (Lüdecke et al. 2020). Many studies have also described that the effect of solar activity has an impact on precipitation and temperature (Mauas et al. 2016; Baker et al. 2018). Temperatures on the European continent correlate with NAO mainly during the winter and spring seasons (Lüdecke et al. 2020). Even the wind currents in the highest parts of the atmosphere (jet streams) are linked with solar cycles, where these wind currents are blocked during solar minimum (Adolphi et al. 2014; Gray et al. 2016), which leads to colder winter seasons (Ma et al. 2018).

However, the total correlation (Figure 3B) with radial growth documents that solar activity has the highest positive significant ($P < 0.20$) correlation coefficient. Our results of positive correlations are supported by the latest research on the beech radial growth from the Krkonoše Mountains, where a high significant correlation with solar cycles was revealed (Šimůnek et al. 2020). This current research is also supported by the results from

southern Italy that also reported the high correlation levels with solar cycle; however, this effect was significantly negative on radial growth in that area (Šimůnek et al. 2021). A long-term influence of solar cycles on the radial growth of Scots pine was investigated in the East European Plain (Matveev et al. 2017) or northwestern Russia, where the sunspot cycles may be imprinted through the spectral composition of solar radiation along with other factors such as cosmic rays or aa index (aa index – summary of the geomagnetic field variations) (Kasatkina et al. 2019).

The spectral analyses of results (Figure 4B) indicate the best known 11-year cycle of solar activity when also the 22-year solar magnetic cycle is important (Livingston, Penn 2009). The spectral analyses of this study suggest similar conclusions like those from northwestern Russia, where the 11-year influence of solar cycles on tree-ring increment of Scots pine was proved (Shumilov et al. 2011; Kasatkina et al. 2019). Our results document that 3.7-year periods are reflected in diameter increment of European beech. Air temperature in the growing season has a higher correlation with the radial growth of European beech (Figure 3) than precipitation total. The prevailing significant positive effect of temperatures from April to August in mountainous areas was confirmed by other studies from the Czech Republic (Šimůnek et al. 2019), Germany (Dulamsuren et al. 2017) or Italy (Skomarkova et al. 2006). A study from Sweden demonstrated a 2- to 3-year delay of seed production behind radial growth and documented a great influence of seasonal temperatures on the seed production of European beech (Drobyshev et al. 2010), which may evoke a theoretical question whether 3-year sunspot cycles are associated with the seed production cycles of European beech. At the same time, the radial growth of European beech (Figure 4) shows a cyclical interrelation between temperature and solar cycles.

CONCLUSION

The analysis of dendrochronological time series from the Broumovské stěny National Nature Reserve indicates an association between radial growth of European beech and sunspot number. Among the studied factors influencing European beech radial growth the highest positive significant total correlation was found out for sunspot number and then for seasonal air temperature. The maxi-

mal SO₂ depositions indicate the higher negative correlation coefficient than sunspot number during the entire time period in 1961–2018. Individually correlated solar cycles respond to precipitation total, growing-season air temperatures and sunspot number in a different way. The spectral analysis demonstrates that the radial growth of European beech shows 3.7-year and 7.5- to 11-year cycles when the 7.5–11-year period reflects the interrelation between the cycles of seasonal temperatures and solar activity. In conclusion, this study confirms that radial growth is influenced by solar activity and growing-season temperatures. More studies from different localities are needed to generalize the results. Studies of this type can help forest managers better understand cyclical regularities of forest tree species growth.

REFERENCES

- Adolphi F., Muscheler R., Svensson A., Aldahan A., Posnert G., Beer J., Sjolte J., Björck S., Matthes K., Thiéblemont R. (2014): Persistent link between solar activity and Greenland climate during the Last Glacial Maximum. *Nature Geoscience*, 7: 662–666.
- Al-Tameemi M.A., Chukin V.V. (2016): Global water cycle and solar activity variations. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 142: 55–59.
- Baker J.C.A., Gloor M., Boom A., Neill D.A., Cintra B.B.L., Clerici S.J., Brienen R.J.W. (2018): Questioning the influence of sunspots on Amazon hydrology: Even a broken clock tells the right time twice a day. *Geophysical Research Letters*, 45: 1419–1422.
- Bogdziewicz M., Szymkowiak J., Fernández-Martínez M., Peñuelas J., Espelta J.M. (2019): The effects of local climate on the correlation between weather and seed production differ in two species with contrasting masting habit. *Agricultural and Forest Meteorology*, 268: 109–115.
- Breckle S.W., Kahle H. (1992): Effects of toxic heavy metals (Cd, Pb) on growth and mineral nutrition of beech (*Fagus sylvatica* L.). *Vegetatio*, 101: 43–53.
- Brugnara Y., Brönnimann S., Luterbacher J., Rozanov E. (2013): Influence of the sunspot cycle on the Northern Hemisphere wintertime circulation from long upper-air data sets. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13: 6275–6288.
- Bulušek D., Vacek Z., Vacek S., Král J., Bílek L., Králíček I. (2016): Spatial pattern of relict beech (*Fagus sylvatica* L.) forests in the Sudetes of the Czech Republic and Poland. *Journal of Forest Science*, 62: 293–305.
- Bunn A., Korpela M. (2018a): Chronology building in dplR. Available at: <https://cran.r-project.org/web/packages/dplR/vignettes/chron-dplR.pdf>

<https://doi.org/10.17221/94/2020-JFS>

- Bunn A., Korpela M. (2018b): Time series analysis in dplR. Available at: <http://cran.nexr.com/web/packages/dplR/vignettes/timeseries-dplR.pdf>
- Cukor J., Vacek Z., Linda R., Bílek L. (2017): Carbon sequestration in soil following afforestation of former agricultural land in the Czech Republic. *Central European Forestry Journal*, 63: 97–104.
- Cukor J., Vacek Z., Linda R., Vacek S., Marada P., Šimůnek V., Havránek F. (2019): Effects of bark stripping on timber production and structure of Norway spruce forests in relation to climatic factors. *Forests*, 10: 320.
- Cukor J., Zeidler A., Vacek Z., Vacek S., Šimůnek V., Gallo J. (2020): Comparison of growth and wood quality of Norway spruce and European larch: effect of previous land use. *European Journal of Forest Research*, 139: 459–472.
- Dittmar C., Zech W., Elling W. (2003): Growth variations of common beech (*Fagus sylvatica* L.) under different climatic and environmental conditions in Europe – A dendroecological study. *Forest Ecology and Management*, 173: 63–78.
- Dorotovič I., Louzada J.L., Rodrigues J.C., Karlovský V. (2014): Impact of solar activity on the growth of pine trees: Case study. *European Journal of Forest Research*, 133: 639–648.
- Drobyshev I., Övergaard R., Saygin I., Niklasson M., Hickler T., Karlsson M., Sykes M.T. (2010): Masting behaviour and dendrochronology of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in southern Sweden. *Forest Ecology and Management*, 259: 2160–2171.
- Dulamsuren C., Hauck M., Kopp G., Ruff M., Leuschner C. (2017): European beech responds to climate change with growth decline at lower, and growth increase at higher elevations in the center of its distribution range (SW Germany). *Trees*, 31: 673–686.
- Easterbrook D.J. (2016): Cause of global climate changes: Correlation of global temperature, sunspots, solar irradiance, cosmic rays, and radiocarbon and beryllium production rates. In: Easterbrook D.J. (ed): *Evidence-Based Climate Science: Data Opposing CO₂ Emissions as Primary Source of Global Warming*. 2nd Ed. Amsterdam, Elsevier: 245–262.
- Fritts H.C. (1976): *Tree Rings and Climate*. London, Academic Press: 567.
- Gallo J., Kuneš I., Baláš M., Nováková O., Drury M.L. (2014): Occurrence of frost episodes and their dynamics in height gradient above the ground in the Jizerské hory Mts. *Journal of Forest Science*, 60: 35–41.
- Gallo J., Baláš M., Linda R., Kuneš I. (2017): Growth performance and resistance to near-ground late frosts of *Fagus sylvatica* L. plantation treated by a brassinosteroid compound. *Journal of Forest Science* 63: 117–125.
- Gallo J., Baláš M., Linda R., Cukor J., Kuneš I. (2018a): Iničiální zhodnocení experimentální výsadby s bukovými poloodrostky nové generace na živném a vysýchavém stanovišti v lokalitě Vintířov-Sedlec. In: Baláš M., Podrázský V., Gallo J. (eds): *Proceedings of Central European Silviculture*. Volume 8: *Silviculture in Central Europe*, Doksy, Sept 4–5, 2018: 39–46. (in Czech)
- Gallo J., Kuneš I., Baláš M. (2018b): Contribution of reforestation using saplings to conservation of forest ecosystems. *Wildlanka*, 6: 100–107.
- Gray L.J., Woollings T.J., Andrews M., Knight J. (2016): Eleven-year solar cycle signal in the NAO and Atlantic/European blocking. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 142: 1890–1903.
- Hájek V., Vacek Z., Vacek S., Bílek L., Prausová R., Linda R., Bulušek D., Králíček I. (2020): Changes in diversity of protected scree and herb-rich beech forest ecosystems over 55 years. *Central European Forestry Journal*, 66: 202–217.
- Hathaway D.H. (2015): The solar cycle. *Living Reviews in Solar Physics*, 12: 4.
- Haywood J., Boucher O. (2000): Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: A review. *Reviews of Geophysics*, 38: 513–543.
- Jayaraman A., Lubin D., Ramachandran S., Ramanathan V., Woodbridge E., Collins W.D., Zalpuri K.S. (1998): Direct observations of aerosol radiative forcing over the tropical Indian Ocean during the January-February 1996 pre-INDOEX cruise. *Journal of Geophysical Research*, 103: 13827–13836.
- Kadonaga L.K., Podlaha O., Whiticar M.J. (1999): Time series analyses of tree ring chronologies from Pacific North America: Evidence for sub-century climate oscillations. *Chemical Geology*, 161: 339–363.
- Kasatkina E.A., Shumilov O.I., Timonen M. (2019): Solar activity imprints in tree ring-data from northwestern Russia. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 193: 105075.
- Kniveton D.R. (2004): Precipitation, cloud cover and Forbush decreases in galactic cosmic rays. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 66: 1135–1142.
- Komitov B., Kaftan V. (2019): Annual beech (*Fagus sylvatica*) growth rings and solar-related climate variations in the Central and Western Balkans in the 18th–21st centuries. *Geomagnetism and Aeronomy*, 59: 926–934.
- Korpeř Š. (1995): *Die Urwälder der Westkarpaten*. Stuttgart, Gustav Fischer Verlag: 310. (in German)
- Kraft G. (1884): *Beiträge zur Lehre von den Durchforstungen, Schlagstellungen und Lichtungshieben*. Hannover, Klindworth: 147. (in German)
- Král J., Vacek S., Vacek Z., Putalová T., Bulušek D., Štefančík I. (2015): Structure, development and health status of spruce forests affected by air pollution in the western Krkonoše Mts. in 1979–2014. *Lesnícky časopis – Forestry Journal*, 61: 175–187.
- Králíček I., Vacek Z., Vacek S., Remeš J., Bulušek D., Král J., Štefančík I., Putalová T. (2017): Dynamics and structure of mountain autochthonous spruce-beech forests: impact

- of hilltop phenomenon, air pollutants and climate. *Dendrobiology*, 77: 119–137.
- Kristoufek L. (2017): Has global warming modified the relationship between sunspot numbers and global temperatures? *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 468: 351–358.
- Kumar V., Dhaka S.K., Panwar V., Singh N., Rao A.S., Malik S., Yoden S. (2018): Detection of solar cycle signal in the tropospheric temperature using COSMIC data. *Current Science*, 115: 2232–2239.
- Ligges U., Short T., Kienzle P., Schnackenberg S., Billinghurst D., Borchers H.-W., Carezia A., Dupuis P., Eaton J.W., Farhi E., Habel K., Hornik K., Krey S., Lash B., Leisch F., Mersmann O., Neis P., Ruohio J., Smith III J.O., Stewart D., Weingessel A. (2015): Package 'signal'. Available at: <https://cran.r-project.org/web/packages/signal/index.html>
- Livingston W., Penn M. (2009): Are sunspots different during this solar minimum? *Eos*, 90: 257–258.
- Lockwood M., Owens M., Hawkins E., Jones G.S., Usoskin I. (2017): Frost fairs, sunspots and the Little Ice Age. *Astronomy & Geophysics*, 58: 2.17–2.23.
- Lüdecke H.J., Cina R., Dammshneider H.J., Lüning S. (2020): Decadal and multidecadal natural variability in European temperature. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 205: 105294.
- Ma H., Chen H., Gray L., Zhou L., Li X., Wang R., Zhu S. (2018): Changing response of the North Atlantic/European winter climate to the 11 year solar cycle. *Environmental Research Letters*, 13: 034007.
- Maghrabi A., Kudela K. (2019): Relationship between time series cosmic ray data and aerosol optical properties: 1999–2015. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 190: 36–44.
- Maringer J., Wohlgemuth T., Hacket-Pain A., Ascoli D., Berretti R., Conedera M. (2020): Drivers of persistent post-fire recruitment in European beech forests. *Science of The Total Environment*, 699: 134006.
- Matveev S.M., Chendev Y.G., Lupo A.R., Hubbard J.A., Timashchuk D.A. (2017): Climatic changes in the East-European forest-steppe and effects on Scots pine productivity. *Pure and Applied Geophysics*, 174: 427–443.
- Mauas P.J.D., Buccino A.P., Flamenco E. (2016): Solar activity forcing of terrestrial hydrological phenomena. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 12: 180–191.
- Müller-Haubold H., Hertel D., Leuschner C. (2015): Climatic drivers of mast fruiting in European beech and resulting C and N allocation shifts. *Ecosystems*, 18: 1083–1100.
- Ormes J.F. (2018): Cosmic rays and climate. *Advances in Space Research*, 62: 2880–2891.
- Podrázský V., Zahradník D., Remeš J. (2014): Potential consequences of tree species and age structure changes of forests in the Czech Republic – review of forest inventory data. *Wood Research*, 59: 483–490.
- Pretzsch H., Bielak K., Block J., Bruchwald A., Dieler J., Ehrhart H.-P., Kohnle U., Nagel J., Spellmann H., Zasada M., Zingg A. (2013): Productivity of mixed versus pure stands of oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl. and *Quercus robur* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) along an ecological gradient. *European Journal of Forest Research*, 132: 263–280.
- Príncipe A., van der Maaten E., van der Maaten-Theunissen M., Struwe T., Wilmking M., Kreyling J. (2017): Low resistance but high resilience in growth of a major deciduous forest tree (*Fagus sylvatica* L.) in response to late spring frost in southern Germany. *Trees*, 31: 743–751.
- Putalová T., Vacek Z., Vacek S., Štefančík I., Bulušek D., Král J. (2019): Tree-ring widths as an indicator of air pollution stress and climate conditions in different Norway spruce forest stands in the Krkonoše Mts. *Central European Forestry Journal*, 65: 21–33.
- Remeš J., Bílek L., Novák J., Vacek Z., Vacek S., Putalová T., Koubek L. (2015): Diameter increment of beech in relation to social position of trees, climate characteristics and thinning intensity. *Journal of Forest Science*, 61: 456–464.
- Rezaie N., D'Andrea E., Bräuning A., Matteucci G., Bombi P., Lauteri M. (2018): Do atmospheric CO₂ concentration increase, climate and forest management affect iWUE of common beech? Evidences from carbon isotope analyses in tree rings. *Tree Physiology*, 38: 1110–1126.
- Rigozo N.R., Nordemann D.J.R., Echer E., Zanandrea A., Gonzalez W.D. (2002): Solar variability effects studied by tree-ring data wavelet analysis. *Advances in Space Research*, 29: 1985–1988.
- Rinntech (2010): TSAP-WINTM: Time series analysis and presentation for dendrochronology and related applications. Available at: <http://www.rinntech.com>
- Rozas V. (2003): Regeneration patterns, dendroecology, and forest-use history in an old-growth beech–oak lowland forest in Northern Spain. *Forest Ecology and Management*, 182: 175–194.
- Schulz M., Mudelsee M. (2002): REDFIT: Estimating red-noise spectra directly from unevenly spaced paleoclimatic time series. *Computers and Geosciences*, 28: 421–426.
- Sharma R.P., Vacek Z., Vacek S. (2016): Modelling individual tree height to diameter ratio for Norway spruce and European beech in Czech Republic. *Trees*, 30: 1669–1682.
- Sharma R.P., Štefančík I., Vacek Z., Vacek S. (2019): Generalized nonlinear mixed-effects individual tree diameter increment models for beech forests in Slovakia. *Forests*, 10: 451.
- Shumilov O.I., Kasatkina E.A., Mielikainen K., Timonen M., Kanatjev A.G. (2011): Palaeovolcanos, solar activity and pine tree-rings from the Kola Peninsula (northwestern Rus-

<https://doi.org/10.17221/94/2020-JFS>

- sia) over the last 560 years Palaeovolcanos. *International Journal of Environmental Research*, 5: 855–864.
- Šimůnek V., Vacek Z., Vacek S., Králíček I., Vančura K. (2019): Growth variability of European beech (*Fagus sylvatica* L.) natural forests: Dendroclimatic study from Krkonoše National Park. *Central European Forestry Journal*, 65: 3–11.
- Šimůnek V., Sharma R.P., Vacek Z., Vacek S., Hůnová I. (2020): Sunspot area as unexplored trend inside radial growth of European beech in Krkonoše Mountains: a forest science from different perspective. *European Journal of Forest Research*, 139: 999–1013.
- Šimůnek V., Vacek Z., Vacek S., Ripullone F., Hájek V., D'Andrea G. (2021): Tree rings of European beech (*Fagus sylvatica* L.) indicate the relationship with solar cycles during climate change in central and southern Europe. *Forests*, 12: 259.
- Skomarkova M.V., Vaganov E.A., Mund M., Knohl A., Linke P., Boerner A., Schulze E.D. (2006): Inter-annual and seasonal variability of radial growth, wood density and carbon isotope ratios in tree rings of beech (*Fagus sylvatica*) growing in Germany and Italy. *Trees*, 20: 571–586.
- Slanař J., Vacek Z., Vacek S., Bulušek D., Cukor J., Štefančík I., Bílek L., Král J. (2017): Long-term transformation of submontane spruce-beech forests in the Jizerské hory Mts.: dynamics of natural regeneration. *Central European Forestry Journal*, 63: 212–224.
- Štefančík I., Bošela M., Petráš R. (2018a): Effect of different management on quality and value production of pure beech stands in Slovakia. *Central European Forestry Journal*, 64: 24–32.
- Štefančík I., Vacek Z., Sharma R.P., Vacek S., Rösslová M. (2018b): Effect of thinning regimes on growth and development of crop trees in *Fagus sylvatica* stands of Central Europe over fifty years. *Dendrobiology*, 79: 141–155.
- Toth D., Maitah M., Maitah K., Jarolínová V. (2020): The impacts of calamity logging on the development of spruce wood prices in Czech forestry. *Forests*, 11: 283.
- Vacek S., Vacek Z., Remeš J., Bílek L., Hůnová I., Bulušek D., Putalová T., Král J., Simon J. (2017): Sensitivity of unmanaged relict pine forest in the Czech Republic to climate change and air pollution. *Trees*, 31: 1599–1617.
- Vacek S., Prokúpková A., Vacek Z., Bulušek D., Šimůnek V., Králíček I., Prausová R., Hájek V. (2019a): Growth response of mixed beech forests to climate change, various management and game pressure in Central Europe. *Journal of Forest Science*, 65: 331–345.
- Vacek Z. (2017): Structure and dynamics of spruce-beech-fir forests in Nature Reserves of the Orlické hory Mts. in relation to ungulate game. *Central European Forestry Journal*, 63: 23–34.
- Vacek Z., Vacek S., Bílek L., Remeš J., Štefančík I. (2015a): Changes in horizontal structure of natural beech forests on an altitudinal gradient in the Sudetes. *Dendrobiology*, 73: 33–45.
- Vacek Z., Vacek S., Podrázský V., Bílek L., Štefančík I., Moser W.K., Bulušek D., Král J., Remeš J., Králíček I. (2015b): Effect of tree layer and microsite on the variability of natural regeneration in autochthonous beech forests. *Polish Journal of Ecology*, 63: 233–246.
- Vacek Z., Vacek S., Slanař J., Bílek L., Bulušek D., Štefančík I., Králíček I., Vančura K. (2019b): Adaptation of Norway spruce and European beech forests under climate change: from resistance to close-to-nature silviculture. *Central European Forestry Journal*, 65: 129–144.
- Vacek Z., Prokúpková A., Vacek S., Cukor J., Bílek L., Gallo J., Bulušek D. (2020a): Silviculture as a tool to support stability and diversity of forests under climate change: study from Krkonoše Mountains. *Central European Forestry Journal*, 66: 116–129.
- Vacek Z., Vacek S., Prokúpková A., Bulušek D., Podrázský V., Hůnová I., Putalová T., Král J. (2020b): Long-term effect of climate and air pollution on health status and growth of *Picea abies* (L.) Karst. peaty forests in the Black Triangle region. *Dendrobiology*, 83: 1–19.
- Viewegh J., Kusbach A., Mikeska M. (2003): Czech forest ecosystem classification. *Journal of Forest Science*, 49: 85–93.
- Wang X., Zhang Q.B. (2011): Evidence of solar signals in tree rings of Smith fir from Sygera Mountain in southeast Tibet. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 73: 1959–1966.
- WDC-SILSO (2020): Sunspot data from the World Data Center SILSO, Royal Observatory of Belgium, Brussels. Available at: <http://www.sidc.be/silso/datafiles>
- Whitcher A.B. (2020): Package 'waveslim'. Available at: <https://cran.r-project.org/web/packages/waveslim/index.html>
- Wigley T.M.L., Briffa K.R., Jones P.D. (1984): On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 23: 201–213.
- Zang C., Buras A., Cecile, J., Mudelsee M., Schulz M., Puchacofrep D. (2018): Package 'dplr' R, Dendrochronology Program Library in R Version. Available at: <https://r-forge.r-project.org/projects/dplr/>

Received: June 21, 2020

Accepted: July 2, 2021

5.2. Tematický okruh 2: Lesnický management pod vlivem klimatických vlivů

5.2.1. Sluneční cykly v nahodilé těžbě: Data z České republiky potvrzují statisticky významnou korelaci

Probíhající kalamita urychluje proces změny druhové skladby a tím se i posouvá lesnický management do pěstování listnatých dřevin, ze kterých je téměř polovina složená buku lesního. Tento článek popisuje průběh nahodilých a celkových těžeb v celé České republice. Pro porovnání lesnického managementu a klimatických faktorů byla použita data o těžbě dříví z České republiky a klimatické faktory zastupovala data o teplotách vzduchu, srážkách a roční ploše slunečních skvrn nebo dokonce i kosmickém záření. Pro zpracování dat byly použity lineární regresní analýzy, korelační analýzy, 3D modely a spektrální analýzy všech zkoumaných faktorů.

Výsledky ukazují signifikantní vliv průměrných ročních teplot na celkové a nahodilé těžby v ČR po celou dobu sledování od roku 1961. Signifikantní reakce je zaznamenána u nahodilých těžeb vůči ploše slunečních skvrn a kosmickému záření. Reakce nahodilých těžeb vůči slunečním skvrnám a kosmickému záření podporuje spektrální analýza, kdy od roku 1973 dochází k signifikantnímu 11letému cyklu. Při spektrální analýze se ukazuje, že hlavně v posledních letech dochází k největšímu otisku slunečního cyklu do těžeb dříví v České republice. Výsledky z této studie jsou zaměřeny i na ostatní vlivy cyklických událostí jako například teplot a srážek, které se ale do nahodilých těžeb cyklicky neprojeví. Studie ukazuje, že na celkové výši těžeb se podílí významná role roční teploty vzduchu a nedostatku srážek. Pro nahodilé těžby se nejvýznamnějším faktorem jeví sluneční cyklus, který vykazuje nejvyšší signifikantní výsledky (Šimůnek et al. 2020b).

Citace článku:

ŠIMŮNEK, V., VACEK, Z., VACEK, S. (2020): Solar Cycles in Salvage Logging: National Data from the Czech Republic Confirm Significant Correlation. *Forests*, 11, 973. doi:10.3390/f11090973.

Article

Solar Cycles in Salvage Logging: National Data from the Czech Republic Confirm Significant Correlation

Václav Šimůnek, Zdeněk Vacek * and Stanislav Vacek

Faculty of Forestry and Wood Sciences, Czech University of Life Sciences Prague, Kamýčká 129, 165 00 Prague, Czech Republic; simunekv@fld.czu.cz (V.Š.); vacekstanislav@fld.czu.cz (S.V.)

* Correspondence: vacekz@fld.czu.cz; Tel.: +420-724-273-683

Received: 10 August 2020; Accepted: 4 September 2020; Published: 8 September 2020



Abstract: Forest ecosystems in Europe undergo cyclic fluctuations with alternating periods of forest prosperity and disturbances. Forest disturbances are caused by large-scale calamities (climate-induced and unforeseen events) resulting in an increased volume of salvage logging. In recent decades, climate change (warming, long-term droughts, more frequent storms, bark beetle outbreaks) has contributed to an increased frequency of salvage logging. However, until now, it has not been revealed what triggers national-scale forest calamities. All of the above-mentioned natural disturbances are connected to solar activity, which is the driver of climate change. This research relates the total volume of harvested timber and salvage logging to the climate and cosmic factors in the Czech Republic, Central Europe. Data of total and salvage logging are compared with air temperatures, precipitation, extreme climatic events, sunspot areas, and cosmic ray intensities. The results document a significant effect of average annual temperatures on the total and salvage logging for the entire period of observations since 1961. A significant correlation of salvage logging to the sunspot area and cosmic ray intensity was observed. The link between salvage logging and sunspots and cosmic ray intensity is supported by spectral analysis in which a significant 11-year cycle was observed since 1973. The results also show an increasing significant effect of sunspots and cosmic ray intensity on logging in recent years in connection with synergism of extreme climate events and the subsequent bark beetle outbreaks. Space and cosmic effects are factors that substantially influence forest ecosystems. Therefore, this paper provides new knowledge about, and possible predictions of, the forest response under climate change.

Keywords: solar cosmic rays; sunspot area; climate change; disturbance cyclicality; Central Europe

1. Introduction

Forest ecosystems play a crucial role in climate stabilization and in the mitigation of global climate changes on the earth [1–3]. Better comprehension of how and to what extent different cultural practices in forests can affect their ecological stability under ongoing global climate change will lead to mitigation of climate change [4,5]. Climate change increasingly influences the capacity of forests to provide ecosystem services essential for humans, such as biomass production, regulation of the air quality, and the water regime in the catchment [6,7]. Particularly important effects include so-called indirect impacts of climate change that may increase the frequency of abiotic disturbances (e.g., windstorms, drought, floods, forest fires) and the occurrence and population dynamics of insect pests and fungal diseases [8,9]. Forest disturbances caused by climate changes are progressing over time [10–12]. In the period 1950–2000 in Europe, 35 million m³ of timber per year was damaged and subsequently harvested, accounting for ca. 8% of total logging [13]. In the Czech Republic during the same period, harvesting of damaged timber accounted for 37% [14], and in the period 2007–2018, because of forest disturbances (salvage logging), 8.9 million m³ of timber were harvested per year on average, i.e., 51%

of total logging [15]. In 2019, salvage logging reached 92% (25.5 million m³) of total harvested timber and the losses in the forestry sector were around EUR 1.12 billion in the Czech Republic [16].

Active silvicultural practices can mitigate the impact of climate change [17,18]. The so-called mitigation measures include an increase in the amount of carbon accumulated in the forest (including the soil), an increase in the carbon amount bound in products made from wood, and biomass production for energy purposes, which can be used to partly replace fossil fuels [19–22]. By contrast, adaptation measures contribute to changes in management that alleviate the adverse impacts of climate change and utilize them in a positive way [6,13,23]. The key instruments are a change in the tree species composition, including the introduction of new tree species, an increase in biodiversity, a reduction in the rotation period of less tolerant tree species, and the use of uneven-aged forest management [24–26].

In Europe, climate change has the greatest impact on the forest sector in relation to the silviculture of coniferous tree species that have recently suffered damage by periodically recurring drought. This is most obvious in the widespread Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst) [27–30]. Norway spruce, as the dominant tree species (50.5%) in Czech forests, experienced large-scale damage in recent years due to climate change [15]. The poor condition of spruce stands is also accompanied by mass outbreaks of bark beetles that occur in parallel with dry years and increase the forests' disintegration [31,32]. Spruce stands in the Czech Republic have been stressed by fluctuations caused by changes in climatic conditions over the last two to three decades [33]. These climatic fluctuations harm coniferous tree species, therefore, more resistant deciduous tree species are promoted more by forest management [34]. The negative stress factors causing the decline of spruce forests are reflected in large-scale salvage logging [35], which leads to the adjustment of silviculture procedures in forest management to favor the ecological stability of forest stands [36,37].

Solar cycles affect the earth's climatic conditions at approximately eleven-year intervals. In addition, the influence of CO₂ has also increased recently, exacerbated by global climate change [38,39]. An important role of the sun's influence on climate change is exerted by the solar radiation in the invisible part of the spectrum that distinctly and strongly fluctuates within periodic changes of the sun [40,41]. Direct physical effects of high-energy solar radiation, particularly during solar flares, have a global impact on the planet's climate [42–44]. Climate change is associated with the activity of sunspots, darker regions on the surface of the sun that have a lower temperature than the surrounding regions (less than 5000 K) [45,46]. The activity of sunspot formation influences the electromagnetic activity of the sun [47,48], which also impacts the natural variability of the planet's climate [49]. Sunspots affect the temperature of the earth's surface both in the northern and southern hemisphere [50]. In the southern hemisphere, sunspots influence the water cycle through the El Niño impact [51,52]. In the northern hemisphere, it has been proven that solar cycles can initiate pronounced long-term temperature fluctuations on the surface of the planet [40,53]. Solar cycles were found to manifest their activity in the air temperature at altitudes of 1.5 to 8 km. [54]. Drought periods are also characteristic of climate change when precipitation is lower. This phenomenon is influenced by solar activity, e.g., in the forests of the Rocky Mts. in Montana and in Canada [55]. Furthermore, the activity of sunspots can be linked to the occurrence of forest fires, volcanic eruptions, and earthquakes [56–58].

Air circulation at around 1000 m from the lower part of the troposphere is linked with the sunspot cycle above the northern hemisphere of the Atlantic Ocean, and this effect influences Europe [59]. The cyclic formation of sunspots is also obvious in the cycle of cosmic rays [60,61]. Sunspots reflect cosmic rays due to their magnetic activity, and the larger the sunspot area, the smaller the impact of cosmic rays on the planet's atmosphere [47]. Through ionization, cosmic rays influence the formation of aerosols that change properties of the cloud cover in the atmosphere, affecting their formation processes [62]. Subsequently, the solar radiation impinging on the planet's surface is altered. Atmospheric aerosols belong to the most variable factors influencing climate models [63,64]. Cosmic rays are also associated with the periodicity of winds, storms events, and rainy seasons [65,66], and thus form an integral part of the formation of the water cycle [67].

In this paper, unique climate factors, particularly sunspots, cosmic rays, air temperatures, and precipitation, are evaluated in relation to the development of salvage logging and total harvested timber in the Czech Republic. The total and salvage logging volumes are interrelated in the Czech Republic because the volume of planned logging and that of salvage logging make up the total volume of harvested timber. In this relationship, the volume of planned logging might be reduced in the case of a greater volume of salvage logging caused by negative climate fluctuations such as drought, air pollution, or damage by windstorms to forest stands. Thus, if salvage logging is higher, it is caused particularly by extreme climate fluctuations. Therefore, it is very important to know whether and how climate changes influence the growth and development of forest stands and whether different scenarios of forest management can increase their ecological stability and reduce the amount of salvage logging [68,69].

No study on solar cycles and their possible impact on forestry has been published yet. There is a large number of factors that affect salvage and total logging, and this work is mainly focused on the simplifying of the issue to clarify the natural cyclical phenomena that affect logging in the Czech Republic. Precipitation, air temperatures, sunspot area, and cosmic ray intensity were selected as the main climatic effects in this study. The main purpose of our study is to determine whether there is a relationship between salvage and total logging to the sunspot area, cosmic ray intensity, and climatic factors (precipitation, air temperatures, extreme climatic events). This work evaluates the aforementioned natural and climatic factors in relation to salvage and total logging in the Czech Republic. Particular time periods during the historical development of salvage and total logging are also evaluated. Our study deals with the important issues of forestry in Central Europe, and its unusual approach might contribute to the understanding of climate change and its impact on forestry.

2. Materials and Methods

2.1. Study Area

The area of interest covers the whole territory of the Czech Republic, which has a forest cover of 34.1% (2.67 million ha). The area of forests has been steadily increasing since the 1950s. Coniferous forests account for 71.6% and deciduous for 27.2% of the tree species composition. The main tree species is Norway spruce with a share of 50.0% (Figure 1a), while it comprised only 11.2% in the original tree species composition. Commercial forests make up 74.3% of forests. The majority of forest is owned by the state (56.0%), followed by private owners (19.2%), and municipalities and cities (17.1%). The predominant form of forest management in the Czech Republic is the clear-felling method, followed by the shelterwood and the selection felling methods. Artificial forest regeneration dominates (81.7%) over natural regeneration (18.3%). In terms of the age structure of forests, there is a higher proportion of over-mature stands to normal-aged stands (Figure 1b). The mean age of forest stands increased by 9.0 years (from 52 to 61 years) and the mean rotation age by 11.7 years (from 101.2 to 112.9 years) in 1960–2018 (Figure 2a). The total stand volume of timber in the Czech Republic reached 703 million m³ in 2018. The mean stand volume per 1 ha of forest land is 269 m³. The total stand volume is constantly increasing. Compared to 1960, the total stand volume has more than doubled. Similarly, there is an increase in the mean annual timber increment, which currently reaches 4.9 m³ ha⁻¹ year⁻¹ (Figure 2b) [15].

The climate in the Czech Republic is mild, characterized by continental influences. According to Koppen's climate classification, most of the territory of the Czech Republic belongs to the Dfb climatic region—a humid continental climate, characterized by hot summers and cold winters. Annual air temperature ranges from +9.5 to −0.4 °C (mean 7.9 °C) and the annual sum of precipitation from 410 to 1705 mm (mean 650 mm) in relation to the altitude (115–1603 m a.s.l.). The average altitude of the Czech Republic is 430 m a.s.l. The lowest mean temperature in January is −2.0 °C, the highest in July 17.8 °C. Similarly, the precipitation minimum is in January (40 mm) and maximum in July (85 mm). The average number of days with snow cover in most areas (depending on altitude) is

40–100 days. The average wind speed is in the range of 10–18 km h⁻¹. The average time of sunshine is 1200–1720 h year⁻¹ [70].

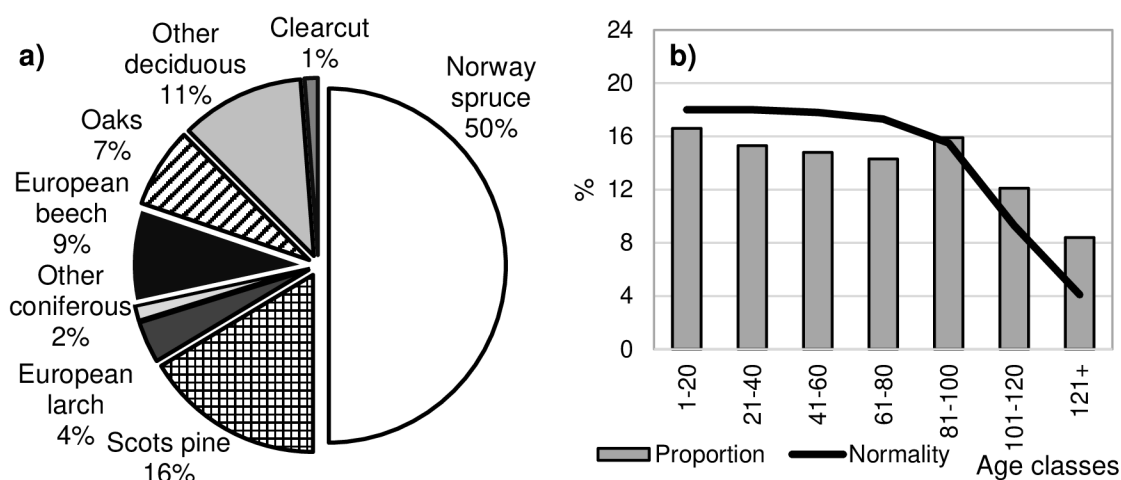


Figure 1. Current status (2018) of (a) tree species composition and (b) proportion of age classes to normality in the Czech Republic.

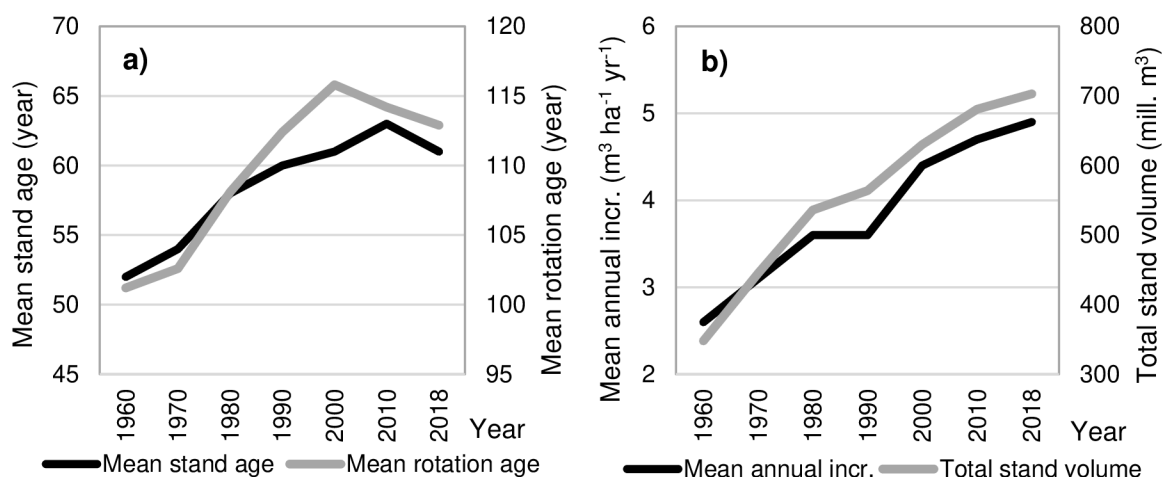


Figure 2. Development of (a) mean stand age and mean rotation age of forests and (b) mean annual timber increment and total stand volume in the Czech Republic.

2.2. Data Source and Collection

The data on the total volume of harvested timber and on groups of salvage logging (elemental disturbances, air pollution, insects), differentiated by particular tree species and their groups were taken (unchanged) from the Forest Management Institute (ÚHÚL) in Brandýs nad Labem, Czech Republic and the Czech Statistical Office (ČSÚ) in Prague, Czech Republic. These logging data cover the whole territory of the Czech Republic for the period 1961–2018. The total logging (total harvested timber) is the volume of large timber (logging residues are not included) and include self-production. Large timber is the timber volume of the aboveground part of a tree with a minimum diameter of 7 cm over bark. The timber from logging or silvicultural operations is counted including the salvage logging. Salvage logging includes the data for all kinds of salvage logging and calamities caused by abiotic and biotic factors. It includes also dead standing trees, isolated breaks, uprootings, all of the volume of trap trees felled for trapping bark beetles, and individual trees in which harmful insects (bark beetles, etc.) spend winter. Salvage logging (processed) comprises the volume of timber processed within salvage logging [71].

The annual air temperature, annual sum of precipitation, and storm event data were taken directly without changes from the Czech Hydrometeorological Institute (ČHMÚ) in Prague and cover the whole state area. The values of territorial temperatures and precipitation were recalculated for the whole period from 1961 to 2018 to obtain a time series calculated by a uniform interpolation method [70].

The data on the sunspot area were acquired from the National Oceanic Atmospheric Administration (NOAA, Silver Spring, MD, USA) [72]. The data on the sunspot area were expressed as arithmetic means from the average monthly data from NOAA. The data on cosmic rays were obtained from the Lomnický štít measuring station in Slovakia affiliated to the Institute of Experimental Physics SAS [73]. Data on cosmic rays were corrected for pressure when the year 1969 was added as the arithmetic mean between the previous and the next year.

2.3. Data Processing

Using the R software, an eight-year spline was fitted to all data to remove short-time influences. The computations of Pearson's correlations and 3D charts were performed in the Statistica 13 software (Statsoft, Tulsa, OK, USA) to analyze salvage logging, air temperature, precipitation, cosmic ray intensity, and sunspot area. The computation of spectral analysis was done as a Fourier transform in the R software [74], when the redfit function or Schulz's REDFIT (version 3.8c) was used; this function estimates the red-noise spectrum of a time series [75] with an optimum test spectrum against the red-noise background using a Monte Carlo simulation. This computation was conducted according to the instructions for R according to Bunn and Miko [76].

Overall, annual data on the total and salvage logging throughout the Czech Republic were compared with average annual temperatures, total annual precipitation, average annual sunspot areas, and average annual cosmic ray intensity. In addition, the volume of logging was compared with the ten driest years (lowest annual precipitation), the warmest years (years with the highest average annual temperature), and the years with the strongest occurrence of storm events in the period 1961–2018. Storm events were sorted and selected according to the WEI index Storm (Weather Extremity Index) [77]. Logging volumes were also compared with large outbreaks of pests (bark beetle, larch tortrix) and the periods of air pollution (high SO₂ concentrations). Salvage logging was further divided into elemental disturbance (drought, storm, fire, etc.) logging, insect logging, and air pollution logging.

3. Results

3.1. Development of Timber Harvest in the Czech Republic and Studied Factors

In the period 1961–1969, the mean total amount of logging was around 8.9 million m³ of timber, with salvage logging accounting for 24% on average (Figure 3). In 1970–1989, when clear-felling systems were mostly used, and exterior and interior spatial forest planning was rather neglected, the total average annual logging was around 12.7 million m³ and salvage logging 5.0 million m³ (i.e., 39% of total logging). In 1976, after the Cappela windstorm, 5.6 million m³ had to be logged. In the second half of this period, the air pollution load culminated, being characterized by high concentrations of SO₂ (3× larger concentrations than the limit value). In 1990–2005, when transformation and renewal of close-to-nature forest management were gradually introduced, the total average annual logging was around 13.3 million m³ and salvage logging amounted to 5.7 million m³ (i.e., 43% of salvage logging). In 1990, windstorms Vivian and Wiebke caused salvage logging in the amount of 8.7 million m³. The years 2006–2014 experienced frequent severe windstorms, when total average annual logging was around 16.5 million m³ and salvage logging 9.0 million m³ (i.e., 55% of salvage logging). After the historically largest windstorm Kyrill in 2007 (in which the wind speed exceeded 40 m s⁻¹), salvage logging reached 80% and, in the following year of 2008, total logging reached the maximum volume to date—19.19 million m³. Pronounced climate changes with serious drought periods in the growing season were typical of the years 2015–2018, when the total average annual logging was around

19.7 million m³ and salvage logging amounted to 13.1 million m³ (i.e., 66% of salvage logging). The last two years were the most critical, with a total annual harvest of around 27.0 million m³ and salvage logging of 23.0 million m³ (i.e., 90% of salvage logging) in 2018, and 95% of salvage logging in 2019 (30.9 million m³).

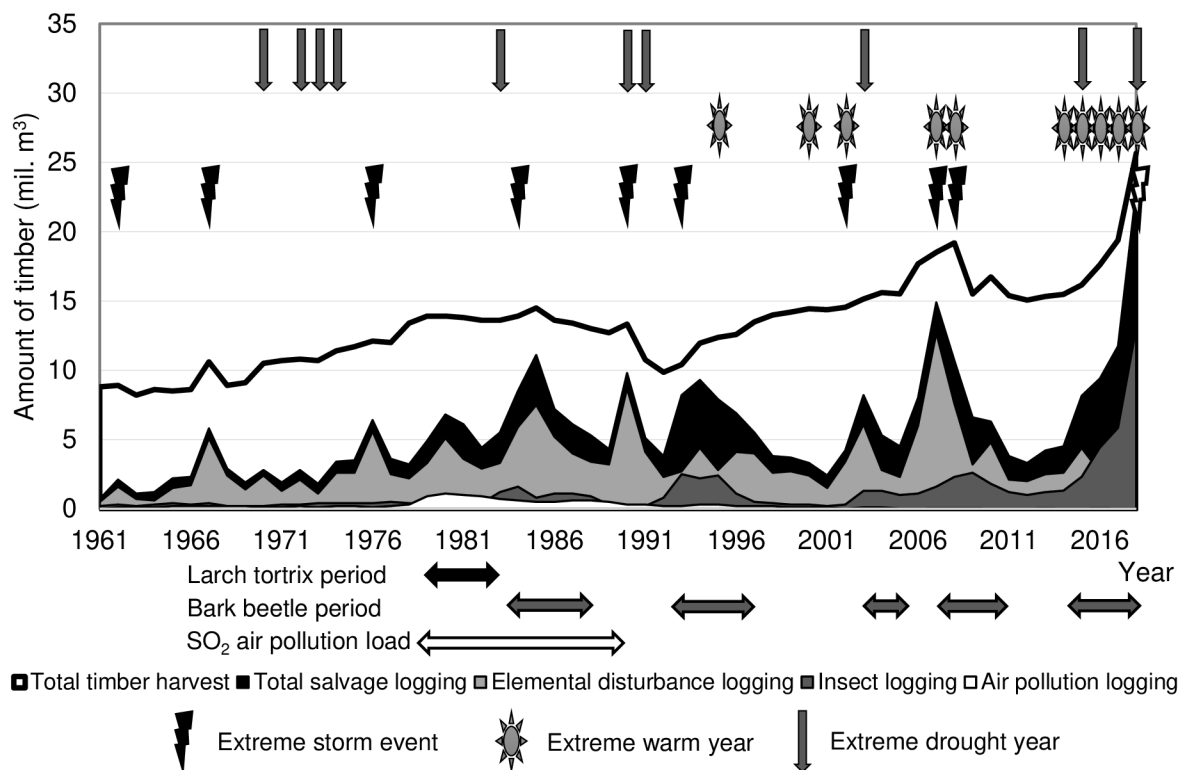


Figure 3. Dynamics of total timber harvest and salvage logging (elemental disturbance logging, insect logging, air pollution logging) in relation to extreme events in the Czech Republic.

During the observed period (1961–2018), extreme storm events most often reappeared in cycles of 8–11 years (Figure 3). These wind calamities were frequently followed by bark beetle outbreaks, especially of the spruce bark beetle (*Ips typographus*), because the amounts of windthrown timber were too large to allow timely processing. The first significant bark beetle outbreak occurred in 1983–1988 (5.8 million m³ of timber), and others followed in 1993–1996 (8.2 million m³), 2003–2004 (2.6 million m³), 2007–2010 (8.3 million m³), and 2015–2018 (23.3 million m³). The largest amount of salvage logging in 2018 was caused by a single year in which there was a synergism of the effects of the storm Friederike, extreme drought (22% less precipitation), above-average warm weather (historically warmest year: 9.6 °C, average 7.8 °C), and the associated outbreak of bark beetle. There was no cyclicity in extremely dry years, unlike in the case of extreme storm events. Extremely warm years occurred only in the second half of the observed period, i.e., during the last 5 years. Overall, the largest share of salvage logging was found in the occurrence of extreme storm events, followed by an extremely warm year, and the smallest effect was found in an extremely dry year.

Correlations between the studied factors are simply summarized in a simple table of correlation coefficients (Table 1). The table shows that the correlations of all studied factors with salvage logging and total timber harvested in the Czech Republic significantly increased in a shorter time period. Thus, in the latter period (2000–2018), the correlation of salvage logging with sunspot area and cosmic ray intensity was strong. Another important result is a significant correlation between average annual temperatures and the volume of salvage logging in all periods. Table 1 also shows that the correlations between temperature and precipitation in relation to sunspot area and cosmic ray intensity are not statistically significant.

Table 1. Correlation coefficients of salvage logging and total volume of harvested timber with sunspot area, cosmic ray intensity, average air temperatures, and average precipitation total; data are divided into time periods; significant results at $p < 0.05$ are in bold.

	Time Period 1961–2018	Time Period 1973–2018	Time Period 2000–2018
		Sunspot area	
Salvage logging	−0.0932	−0.3263	−0.7800
Total timber harvest	−0.2045	−0.2224	−0.6550
		Cosmic ray	
Salvage logging	−0.1221	0.3620	0.7575
Total timber harvest	0.0608	0.1519	0.6307
		Temperature	
Salvage logging	0.5269	0.0994	0.4374
Total timber harvest	0.3122	0.3650	0.5080
Sunspot area	0.0610	0.0005	0.1048
Cosmic ray	−0.1895	−0.0263	0.2399
		Precipitation	
Salvage logging	0.1099	0.1541	−0.3885
Total timber harvest	0.0135	−0.0434	−0.4438
Sunspot area	−0.1450	−0.1549	0.1315
Cosmic ray	−0.0240	0.0395	−0.2816

3.2. Effect of Annual Precipitation and Annual Air Temperatures on Development of Timber Harvest

Measurements of the annual sum of precipitation and average annual air temperatures have previously been compared with the development of forest stands in the Czech Republic. Therefore, these two climate factors should be mentioned in this study. The combination of these two factors creates a clearer picture of the relationship of the salvage and total logging to the climate in the Czech Republic, which is illustrated in Figure 4a,b. When annual precipitation decreases, a water balance deficit occurs which, in combination with higher average temperatures, leads to an increase in salvage logging and, at the same time, a reduction in planned logging, which is reflected in the total volume of timber harvested. These relations are evident in Figure 4a, e.g., in the period from 2011 to 2018, but the situation might differ in other periods. For example, in 1982–1989 salvage logging increased with an increase in total precipitation according to Figure 4a, while this period was characterized by high air pollution, particularly of SO₂. In Figure 4b, where an eight-year spline is fitted to the data, precipitation does not obviously correlate with the data on salvage or total logging. On the contrary, average temperatures are rising in line with total and salvage logging when the maturation of forest stands should be taken into account, which is caused by forest aging in the Czech Republic.

A scatter plot (Figure 5) illustrates the relationship between the data on the volume of harvested timber and the climate data (average annual temperatures and annual sum of precipitation). At a glance it can be noted that average annual temperatures in Figure 5a,b show a positive relationship with harvested timber, whereas they have a negative relationship with the annual precipitation total Figure 5c,d. It should also be accentuated that the correlation with R² has increased in the recent years, evidenced by an increase in R² in the time period 2000–2018 (Figure 5b,d). It is also true that temperatures show a higher R² than precipitation, and so they are in closer correlation with salvage and total logging. A comparison of salvage and total logging indicates that the R² of salvage logging with temperatures and precipitation is higher in most cases (Figure 5b–d), suggesting that salvage logging better reflects climate fluctuations.

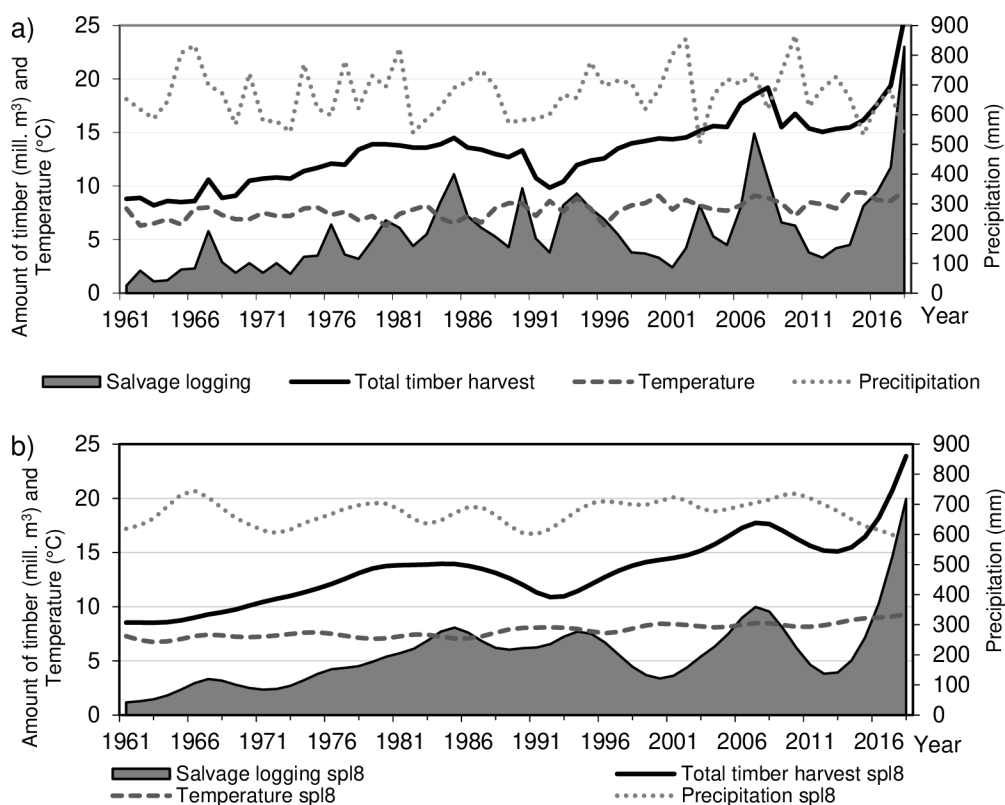


Figure 4. Average annual air temperatures and annual precipitation total in relation to the volume of timber harvested in the Czech Republic: (a) The trend of total timber harvest and salvage logging; (b) an eight-year spline (spl8) fitted to harvested timber and climate data.

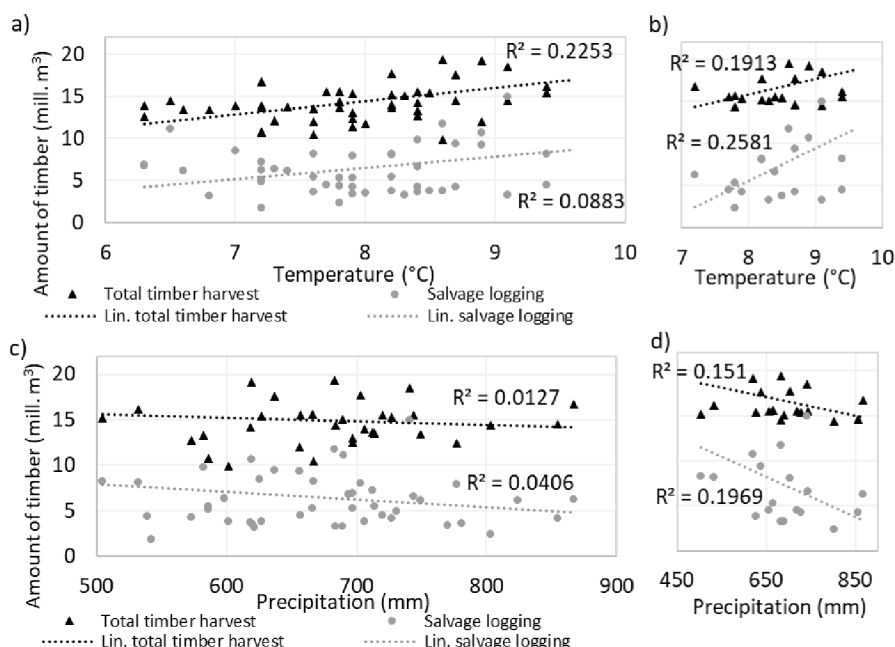


Figure 5. Scatter plot; average annual air temperatures in relation to salvage logging and total timber harvested in the Czech Republic in the periods (a) 1973–2018 and (b) 2000–2018; the annual sum of precipitation in relation to the volume of salvage logging and timber harvested in the Czech Republic in the periods (c) 1973–2018 and (d) 2000–2018; explanatory notes: Lin.—linear regression model; mill. m³—million cubic meters of harvested timber.

3.3. Sunspots as an Inversion Factor to Total Harvested Timber and Salvage Logging

The sunspot area shows interesting results in relation to salvage and total logging in the Czech Republic. During the solar minimum, salvage logging increased as shown in Figure 6a,b. This implies that during the solar minimum, when minimum sunspot areas occur on the Sun, there is an increase in salvage logging. Higher volumes of salvage logging occur in approx. ten-year intervals from the particular calamities that coincide with the solar minima, which is illustrated in Figure 6b.

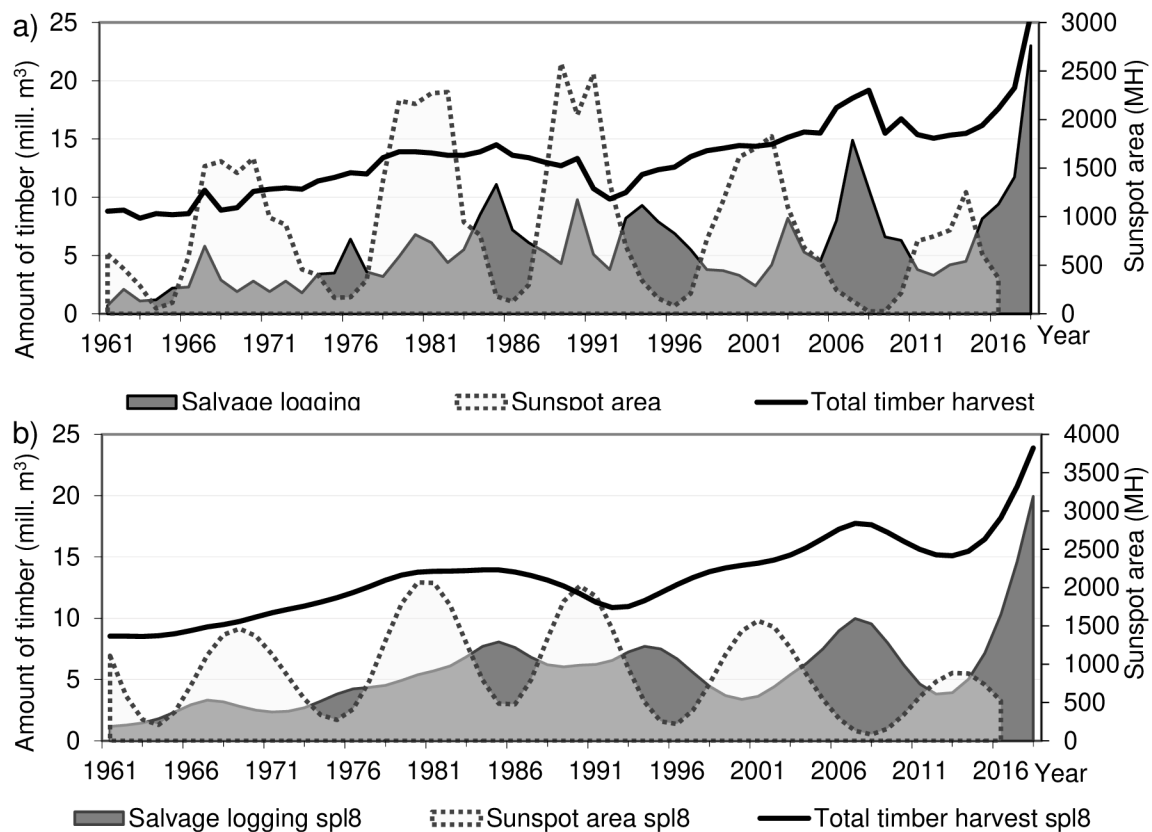


Figure 6. The average annual area of sunspots in relation to the volume of timber harvested in the Czech Republic: (a) The trend of total harvested timber and salvage logging according to their causes in relation to the sunspot area; (b) an eight-year spline (spl8) fitted to harvested timber and sunspot area; MH—millionths of a hemisphere; mill. m³—million cubic meters of harvested timber.

The scatter plot in Figure 7a,b illustrates a negative correlation between the sunspot area and the volume of salvage logging and total harvested timber. It also documents that R^2 was higher in the time period 2000–2018 (Figure 7b) than in the period 1973–2018 (Figure 7a), suggesting a closer correlation between these factors. Another important factor is that the data on the sunspot area in relation to salvage logging document a much higher coefficient R^2 than in precipitation in Figure 5c,d or in temperatures in Figure 5a,b. The overall relationship between harvested timber and sunspot area is negative, which means if the sunspot area is small, the totals of harvested timber and salvage logging are higher.

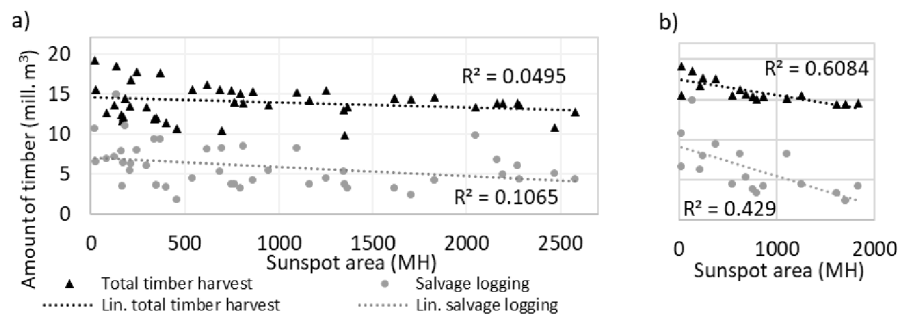


Figure 7. Scatter plot: Average annual sunspot area in relation to salvage logging and the total volume of timber harvested in the Czech Republic in the periods (a) 1973–2018 and (b) 2000–2018; explanatory notes: Lin.—linear regression model; MH—millionths of a hemisphere; mill. m³—million cubic meters of harvested timber.

3.4. Cosmic Ray Intensity and Its Pronounced Effect on Timber Harvested

The relationship of cosmic rays to salvage logging and the total timber harvested in the Czech Republic can be described by parallel curves, mainly in the case of salvage logging, that were almost identical since 1982, as presented in Figure 8a,b. Since 1982, the values of cosmic ray intensity have increased and decreased in line with salvage logging, as documented in Figure 8a. Salvage logging and cosmic ray intensities developed almost simultaneously in recent years, which is confirmed by the high significant value ($r = 0.3620$) for the period 1973–2018. The data confirm that with an increasing cosmic ray intensity, there is also an increase in salvage logging. The total logging corresponds to the cosmic ray intensity to a smaller extent due to the efforts of forest managers to balance the volume of loggings during disturbances, which was obvious in the period 2006–2018. The data on cosmic ray intensity and salvage logging fitted with a spline show higher similarity without the short-term fluctuations that can be seen in Figure 8b.

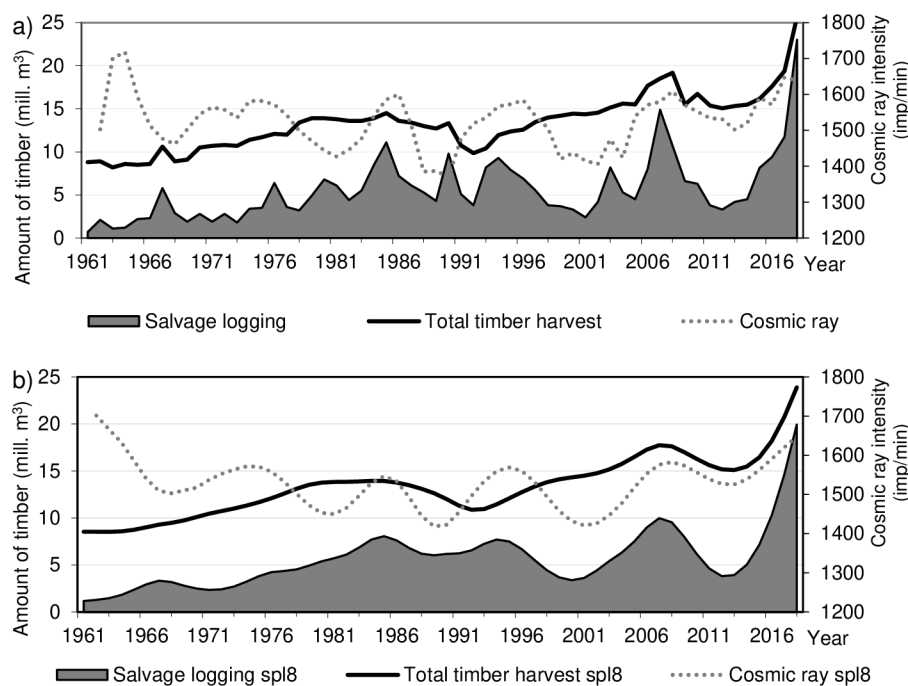


Figure 8. Average annual data on cosmic ray intensity in relation to the volume of timber harvested in the Czech Republic; (a) The trend of total and salvage logging according to their causes in relation to cosmic ray intensity; (b) an eight-year spline (spl8) fitted to harvested timber and cosmic ray intensity; imp/min—impulses/minute; mill. m³—million cubic meters of harvested timber.

The scatter plot in Figure 9a,b documents the highest values of R^2 of all four factors studied in this research, especially in relation to salvage logging in the time period 1973–2018, which is illustrated in Figure 9a. The graphs in Figure 9a,b also show that with an increase in cosmic ray intensity impinging on the atmosphere, the volume of salvage logging increased while the growth of values was almost linear in all cases. These scatter plots show that there is a strong linear relationship between logging and cosmic ray intensity, which is useful information for the future.

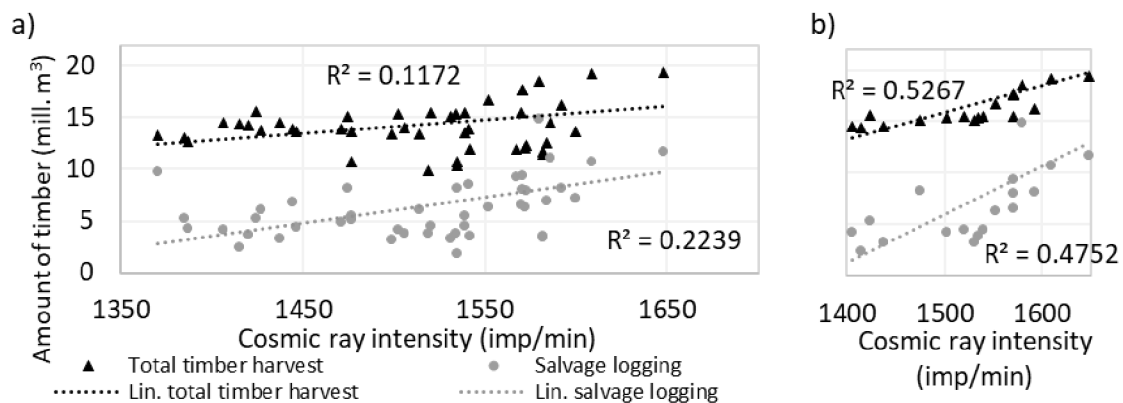


Figure 9. Scatter plot; average annual data on the cosmic ray intensity in relation to salvage logging and the total timber harvested in the Czech Republic in the periods (a) 1973–2018 and (b) 2000–2018; explanatory notes: Lin.—linear regression model; imp/min—impulses/minute; mill. m³—million cubic meters of harvested timber.

3.5. Studied Factors in 3D Charts and Spectral Analysis

Three-dimensional line charts of salvage logging (Figure 10) document the relationships between relevant variants of all of the data used. Based on the correlation table (Table 1), four variants were created that work with the most significant options. The response of sunspot area (Figure 10a,b) to salvage logging is lower than that to cosmic ray intensity (Figure 10c,d). Nevertheless, the data on salvage logging and cosmic ray intensity are opposite to each other, but the correlation (Table 1) in the period 1973–2018 allows us to state that the response of the volume of harvested timber is negative and larger for cosmic ray intensity than for the positive response of sunspots. This is also confirmed by a visual difference between the sunspot area and the cosmic ray intensity, when the cosmic ray intensity creates a greater inclination of the 3D line chart than the sunspots. This is evident from the scale of 3D line charts when the sunspots are in the range from four to seven and the cosmic ray intensity is from 1 to 12. Furthermore, a greater inclination of the 3D chart is caused by temperatures than by precipitation when temperatures positively correlate with salvage logging while the correlation with precipitation is negative. In general, the most distinctive variant is the cosmic ray intensity in relation to average temperatures, which is well illustrated in Figure 10b. Cosmic rays are the most distinctive in all represented results (Figures 8–10). Average annual temperatures also correlate well across all time periods, which can be seen in Figure 4a and in Table 1.

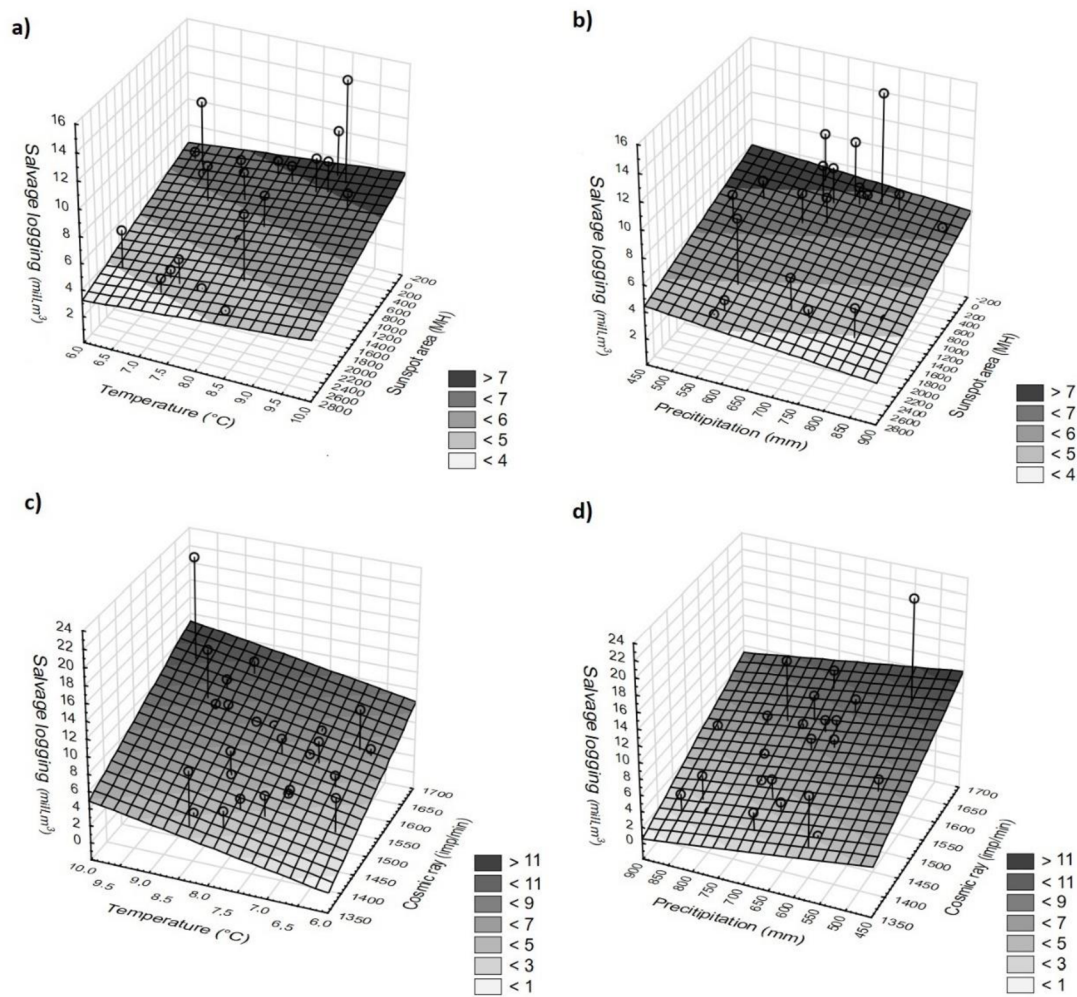


Figure 10. Three-dimensional line chart of salvage logging in relation to the particular factors in the period 1973–2018; (a) salvage logging in relation to average annual air temperatures and average annual sunspot area; (b) salvage logging in relation to the sum of precipitation and sunspot area; (c) salvage logging in relation to average annual air temperatures and average cosmic ray intensity; (d) salvage logging in relation to the sum of precipitation and average cosmic ray intensity; explanatory notes: mill. m³—million cubic meters of harvested timber; imp/min—impulses/minute; MH—millionths of a hemisphere.

Spectral analyses in Figure 11 illustrate the periodic behavior of the data. This type of analysis accurately demonstrates the occurrence of periodic events in the used data series. Average precipitation in the Czech Republic Figure 11a was significant (at a level of 90%) in 4-year periodic cycles. Average annual temperatures Figure 11b show significant (at 95%) results in a cycle once per 8 years. Cosmic rays and sunspot areas Figure 11c,d show significant (at 99%) results in an 11-year cycle. Salvage logging in the period 1961–2018 Figure 11e had significant results in the recurrence of 4-year cycles (at 99%) and 11-year cycles (at 90%) but if the data series is reduced to the period from 1973 to 2018, only 11-year cycles are significant. Hence salvage logging is significantly consistent with the 11-year periodic recurrence of sunspot area and cosmic ray intensity.

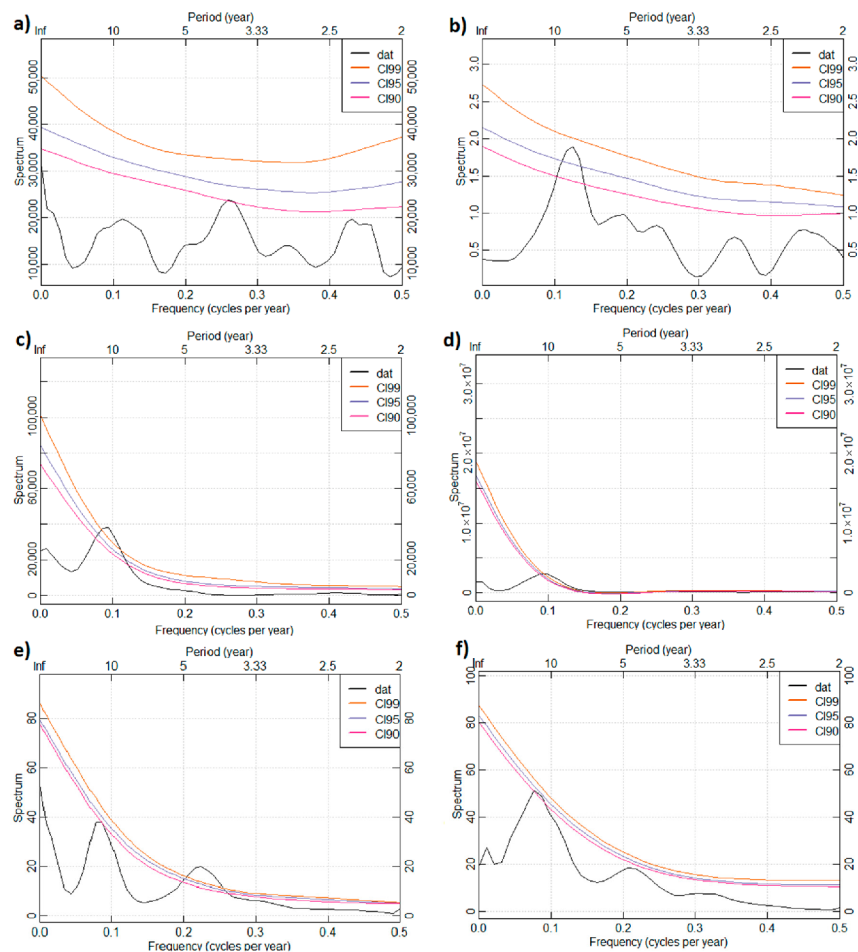


Figure 11. Spectral analyses of the used data in the period 1961–2018: (a) Annual precipitation total; (b) average annual temperatures; (c) cosmic ray intensity; (d) sunspot area; (e) salvage logging; (f) salvage logging in the period 1973–2018. Explanatory notes: the data used are represented by the black curve (dat); the lower, medium and upper parabolic line is significant at a level of 90% (CI90), 95% (CI95) and 99% (CI99), respectively; the period (year) shown on the upper x-axis ranges from 2 years to infinity (Inf).

4. Discussion

4.1. Anthropic Impacts and Climate Fluctuations Influencing Salvage Logging

Forest stands are influenced by a higher occurrence of extreme weather events during climate change. Such fluctuations include, e.g., severe storms, wind, drought, floods, or forest fires [13,78–80]. The greatest negative effects on the volume of salvage logging and also of timber harvested in the Czech Republic are imposed by wind, bark beetle, and air pollution disturbances [81–85]. In the Czech Republic, most prominent negative anthropic impacts on the environment resulting in salvage logging occurred during the air pollution calamity from the late 1970s to the late 1980s (see Figure 1) when, on average, 6.2 million m³ of timber were annually harvested. As a consequence of the air pollution calamity, 47,300 m³ of timber, i.e., 2% of the forest area, was harvested in the mountain areas of the Czech Republic, mainly in the Krušné hory Mts. and in the mountain ranges of the Sudetes system (Lužické hory, Jizerské hory, Krkonoše and Orlické hory Mts.) [14]. When the air pollution calamity culminated, average annual SO₂ concentrations in these mountain areas were in the range of 60–210 µg m⁻³ and maximum daily SO₂ concentrations reached 2500 µg m⁻³ [14]. In the course of the air pollution calamity, the declining spruce forests were often attacked by bark beetles, particularly by the eight-toothed spruce bark beetle [86–89].

In Europe, the Norway spruce decline was observed during climate change, e.g., in Germany [90], Austria [91], Poland [92], the Czech Republic, and Slovakia [15,93]. These forests are vulnerable to a number of secondary diseases and pests, and they are particularly sensitive to the warmer and drier climate [94,95]. Our data indicate that temperatures have a significant effect on the trend of salvage logging during the entire period 1961–2018, which is documented in Table 1, where $r = 0.5269$. The precipitation deficit is not significant in any variant in Table 1, but Figure 5b clearly shows that the precipitation deficit reduces the Norway spruce ability to resist bark beetle outbreaks, which was confirmed in previous research [96,97].

Such situations are well illustrated by typical examples of drought in 2003, when the precipitation total decreased to a below-average 504 mm, or in 2018, with only 522 mm of precipitation (Figure 1). A typical drought-induced outbreak of *Ips typographus* occurs when healthy trees are attacked [98,99] and there appear extensive foci of infested trees that fail to be cut in time [100]. In addition, the situation is made more complicated by mandatory tenders for logging operations performed by timber processing companies in the forest sector. The tenders considerably delay salvage logging, which contributes to the gradation of secondary pests. In 2019 the volume of salvage logging was 30.9 million m^3 (i.e., 95% of the total volume of harvested timber), mainly as a consequence of the enormous spread of bark beetles in Moravia and the Czech-Moravian Highlands [15].

4.2. Salvage Logging Versus Solar and Cosmic Factors

Forest disturbances in the Czech Republic are triggered by windstorms that initiate outbreaks of bark beetles. They subsequently start to destroy coniferous stands during the drought years [32,82]. This happened, e.g., in January 2007, when the windstorm Kyrill caused substantial damage to forest stands [101], triggering a domino effect of forest stand destruction, resulting in an increase in salvage logging of up to 15 million m^3 as shown in Figure 1, Figure 3, and Figure 5. The aforementioned drought periods belong to extreme weather fluctuations, again associated with the sunspot cycle. This was confirmed, e.g., in Kuwait [102] and China, where the solar cycles are associated not only with drought but also with floods [103]. An increase in the amount of precipitation is linked with the occurrence of high winds that also coincide with the occurrence of solar cycles, documented, e.g., in Spain [80]. Our data confirm that in the course of severe storms there is an increase in salvage logging (Figure 1), which occurred at the beginning of 2018 when, in the aftermath of the storm Friederike (with winds of up to 205 $km\ h^{-1}$), salvage logging increased to 23.01 million m^3 . Impacts of 11-year solar cycles on the climate pattern in Europe have been proven for the last 250 years while the sunspot effect on climate increased during the 19th century [59]. This is also confirmed by our data in Table 1, which illustrate that salvage logging was higher during the solar minimum in recent years. Salvage logging amounted to 15 million m^3 of timber in 2007, but increased to almost 23 million m^3 in 2018, which also coincided with the solar minimum, i.e., the small or nearly zero sunspot area (Figure 6). In 2010–2012 (during the solar minimum) the occurrence of subcortical insects was successfully reduced in spruce monocultures to the level of the years 2004–2006 (Figure 1), which resulted in a decrease in salvage logging (on average 5.2 million m^3 salvage logging timber).

Salvage loggings are caused by climatic triggers. Furthermore, there are significant correlations with the sunspot area, which is evident from our significant correlations, e.g., in the period 2000–2018 (Table 1). Solar cycles can be linked with salvage logging through the North Atlantic Oscillation (NAO), which is closely associated, e.g., with the precipitation occurrence in Europe while precipitation is linked with the solar cycle [104]. However, our data (Table 1) did not show a significant correlation of sunspot numbers and solar cosmic ray intensity in relation to precipitation and temperature. An important fact completing our research is that the quantity of cosmic rays impinging on the Earth's atmosphere is influenced by the solar cycle, which also impacts the water cycle [105,106]. An inversion relationship between the sunspot area and cosmic ray intensity has been studied previously [47,107], and is also evident from Figures 6–9, when the response of salvage logging to cosmic ray intensity is the highest (Table 1). The relationship between salvage logging, sunspot area, and cosmic ray intensity is seen

in Figure 11, which shows that an 11-year solar cycle is projected in salvage logging and cosmic ray intensity. Cosmic rays are influenced by solar magnetism [108,109] but until now this effect has not been identified in relation with their real impacts on the forest environment and forest sector.

Our data illustrate a substantial effect of cosmic rays on the volume of salvage logging as shown in Table 1 and Figure 8 when the correlation with the time period 1973–2018 is significant. This fact is related with the formation of aerosols that are the basic component of cloud formation [63,65]. The solar cycle also influences radial increment of trees, which was suggested by dendrochronological researches in Siberia [110,111], Portugal [112], and China [113].

4.3. Relevant Context and Potentials

It is important to mention that logging operations in the course of salvage logging damage trees (log depots, abrasions, subsequent rot), disturb the soil (erosion), etc. [89]. Negative events and disturbances appear to show an increasing long-term trend which, in the future, will lead to a change in the species composition of forests in the Czech Republic, depending on the response of forest management. Proper management might reduce the impact of disturbance on forests [114,115].

Salvage logging largely comprises Norway spruce, which is negatively affected by disturbances such as higher temperatures and dry summers [35], and the coinciding influence of wind storms [11] places forest management under strong pressure (Figure 3—e.g., year 2018). The forestry sector must process a large amount of timber in a short period of time and this leads to financial losses. Timber loses value and is sold below cost [15]. The overall logical conclusion is that the fluctuations in the price of timber follow the fluctuations in total logging, and our study confirms that there is a significant correlation (Table 1) of logging with the solar 11-year cycle (Figure 11).

It is also worth noting that the highest significant correlation between sunspot number and total logging (Table 1) was recorded in the 21st century, and is associated with higher maturation of the forest stands to rotation age in the Czech Republic (Figure 2); therefore, total logging is undergoing an increasing trend. In contrast, solar activity significantly decreased in the 21st century, which is evident in the highest negative significant correlation against the increasing trend of total logging. Moreover, forest stands in the rotation age are more sensitive to negative climatic fluctuations [116], which is also connected with salvage logging. In the long run, salvage logging has not risen as significantly as total logging because in recent years there has been an increase in protected areas in which salvage logging is generally not carried out due to ecological concerns [117,118]. In addition, the economic factor affects salvage logging because it is not worthwhile to carry out salvage logging due to cheap timber prices, which in many cases leads to leaving the timber in the forest without rather than logging [119]. In recent years, there has been a significant relative decrease in the amount of salvage logging due to environmental and economic decisions [15,120], which is the reason for the reduction in the correlation between solar activity and salvage logging in the 21st century.

Carbon sequestration by forest ecosystems can be smoother if forest management succeeds in reducing salvage logging [121]. A study of the carbon stock in Europe also shows that forest disturbances in relation to salvage logging are part of the carbon cycle [122].

This study could provide forest management with a new concept of origin related to disturbances in salvage and total logging in forestry due to solar activity. The predictability of the solar cycles is associated with an 11-year solar period [123] and our results confirm that the 11-year period occurs even during salvage logging (Figure 11e,f). The next important note is that the next 11-year solar cycle can be lower or equal to the previous cycle in terms of solar activity [124]. Thus, the interesting observation of solar activity in parallel with the development of salvage logging can be beneficial for foresters. The total solar irradiance index (TSI), which includes climatic and solar effects [125,126], can also be used for future research of solar activity and its impact on forestry. This may lead to further in-depth research into the impact of the sun and climate change on forestry. Numerous factors influence forests and forest management, but salvage logging is a complex indicator of climate change which substantially restricts forest management.

5. Conclusions

Salvage logging and the total volume of harvested timber indicate the overall condition of the forest sector. These two factors respond to climatic, anthropic, and political impacts. Salvage logging and the total volume of harvested timber are in significant correlation with average annual temperatures, storm events, cosmic ray intensity, and sunspot area. The annual precipitation total does not significantly correlate with timber harvested. Among all of the studied variants, the response of salvage logging to cosmic ray intensity and average annual temperatures is the most evident. The response of salvage logging to the sunspot area is also highly distinct. Furthermore, there has been an increasing projection of the 11-year solar cycle in the volume of salvage logging, mostly in the last two decades in relation to the synergism of climatic extreme events. Salvage logging also significantly responded to average annual temperatures during the studied period. The results of this research are an important initiator of understanding particular natural fluctuations influencing the forest sector during climate change. However, further in-depth research is needed and should provide a link to a greater number of factors influencing salvage logging that play a role in forest silviculture and management (tree species composition, stand structure, etc.). This research should contribute to a profound knowledge and possible predictions of not only theoretical forest science but also practical principles of modern forestry.

Author Contributions: V.Š. designed the research, analyzed the data and wrote the first draft of the manuscript. Z.V. collaborated on manuscript and developed component of the results. S.V. made substantial contribution with design, manuscript and its methodology. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by the Czech University of Life Sciences Prague, Faculty of Forestry and Wood Sciences (No. IGA A19/22).

Acknowledgments: We are grateful to the Forest Management Institute in Brandýs nad Labem, the Czech Hydrometeorological Institute, the National Oceanic Atmospheric Administration and the Institute of Experimental Physics SAS for provided data. We are also grateful to three anonymous reviewers and editors for their constructive comments and valuable suggestions that helped improve the manuscript.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Meyfroidt, P.; Lambin, E. Global Forest transition: Prospects for end to deforestation. *Annu. Rev. Environ. Resour.* **2011**, *36*, 343–371.
2. Murdiyarsa, D.; Purbopuspito, J.; Kauffman, J.B.; Warren, M.W.; Sasmito, S.D.; Donato, D.C.; Manuri, S.; Krisnawati, H.; Taberima, S.; Kurnianto, S. The potential of Indonesian mangrove forests for global climate change mitigation. *Nat. Clim. Chang.* **2015**, *5*, 1089–1092. [[CrossRef](#)]
3. Moomaw, W.R.; Law, B.E.; Goetz, S.J. Focus on the role of forests and soils in meeting climate change mitigation goals: Summary. *Environ. Res. Lett.* **2020**, 1–5. [[CrossRef](#)]
4. Collalti, A.; Trotta, C.; Keenan, T.F.; Ibrom, A.; Bond-Lamberty, B.; Grote, R.; Vicca, S.; Reyer, C.P.O.; Migliavacca, M.; Veroustraete, F.; et al. Thinning Can Reduce Losses in Carbon Use Efficiency and Carbon Stocks in Managed Forests Under Warmer Climate. *J. Adv. Model. Earth Syst.* **2018**, *10*, 2427–2452. [[CrossRef](#)]
5. Naudts, K.; Chen, Y.; McGrath, M.J.; Ryder, J.; Valade, A.; Otto, J.; Luyssaert, S. Mitigate Climate Warming. *Science* **2016**, *351*, 597–601. [[CrossRef](#)]
6. Bellassen, V.; Luyssaert, S. Carbon sequestration: Managing forests in uncertain times. *Nature* **2014**, *506*, 153–155. [[CrossRef](#)]
7. Riedl, M.; Šišák, L. Analysis of the perceived condition of forests in the Czech Republic. *J. For. Sci.* **2013**, *59*, 514–519.
8. Hlásny, T.; Barka, I.; Kulla, L.; Bucha, T.; Sedmák, R.; Trombik, J. Sustainable forest management in a mountain region in the Central Western Carpathians, northeastern Slovakia: The role of climate change. *Reg. Environ. Chang.* **2017**, *17*, 65–77. [[CrossRef](#)]

9. Mikulenka, P.; Prokůpková, A.; Vacek, Z.; Vacek, S.; Bulušek, D.; Simon, J.; Šimůnek, V.; Hájek, V. Effect of climate and air pollution on radial growth of mixed forests: *Abies alba* Mill. vs. *Picea abies* (L.) Karst. *Cent. Eur. For. J.* **2020**, *66*, 23–36. [[CrossRef](#)]
10. Härt, F.H.; Barka, I.; Hahn, W.A.; Hlásny, T.; Irauschek, F.; Knoke, T.; Lexer, M.J.; Griess, V.C. Multifunctionality in European mountain forests—An optimization under changing climatic conditions. *Can. J. For. Res.* **2015**, *46*, 163–171. [[CrossRef](#)]
11. Gregow, H.; Laaksonen, A.; Alper, M.E. Increasing large scale windstorm damage in Western, Central and Northern European forests, 1951–2010. *Sci. Rep.* **2017**, *7*, 1–7. [[CrossRef](#)]
12. Kulakowski, D.; Seidl, R.; Holeksa, J.; Kuuluvainen, T.; Nagel, T.A.; Panayotov, M.; Svoboda, M.; Thorn, S.; Vacchiano, G.; Whitlock, C.; et al. A walk on the wild side: Dismal disturbance dynamics and the conservation and management of European mountain forest ecosystems. *For. Ecol. Manag.* **2017**, *388*, 120–131. [[CrossRef](#)]
13. Lindner, M.; Maroschek, M.; Netherer, S.; Kremer, A.; Barbati, A.; Garcia-Gonzalo, J.; Seidl, R.; Delzon, S.; Corona, P.; Kolström, M.; et al. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *For. Ecol. Manag.* **2010**, *259*, 698–709. [[CrossRef](#)]
14. Vacek, S.; Zingari, P.C.; Jeník, J.; Simon, J.; Smejkal, J.; Vančura, K. *Mountain Forests of the Czech Republic*; Ministry of Agriculture of the Czech Republic: Prague, Czech Republic, 2003.
15. *MAF Report about Forest and Forestry Conditions in the Czech Republic 2017 (Green Report)*; Ministry of Agriculture: Prague, Czech Republic, 2018.
16. Toth, D.; Maitah, M.; Maitah, K.; Jarolínová, V. The impacts of calamity logging on the development of spruce wood prices in czech forestry. *Forests* **2020**, *11*, 283. [[CrossRef](#)]
17. D’Amato, A.W.; Bradford, J.B.; Fraver, S.; Palik, B.J. Forest management for mitigation and adaptation to climate change: Insights from long-term silviculture experiments. *For. Ecol. Manag.* **2011**, *262*, 803–816. [[CrossRef](#)]
18. Cosofret, C.; Bouriaud, L. Which silvicultural measures are recommended to adapt forests to climate change? A literature review. *Bull. Transilv. Univ. Brasov Ser. II For. Wood Ind. Agric. Food Eng.* **2019**, *12*, 13–34. [[CrossRef](#)]
19. Bošela, M.; Štefančík, I.; Petráš, R.; Vacek, S. The effects of climate warming on the growth of European beech forests depend critically on thinning strategy and site productivity. *e. Agric. For. Meteorol.* **2016**, *222*, 21–31.
20. Gömöry, D.; Longauer, R.; Hlásny, T.; Pacalaj, M.; Strmeň, S.; Krajmerová, D. Adaptation to common optimum in different populations of Norway spruce (*Picea abies* Karst.). *Eur. J. For. Res.* **2012**, *131*, 401–411. [[CrossRef](#)]
21. Keenan, T.F.; Prentice, I.C.; Canadell, J.G.; Williams, C.A.; Wang, H.; Raupach, M.; Collatz, G.J. Recent pause in the growth rate of atmospheric CO₂ due to enhanced terrestrial carbon uptake. *Nat. Commun.* **2016**, *7*, 1–9. [[CrossRef](#)]
22. Zhu, Z.; Piao, S.; Myneni, R.B.; Huang, M.; Zeng, Z.; Canadell, J.G.; Ciais, P.; Sitch, S.; Friedlingstein, P.; Arneeth, A.; et al. Greening of the Earth and its drivers. *Nat. Clim. Chang.* **2016**, *6*, 791–795. [[CrossRef](#)]
23. Hember, R.A.; Kurz, W.A.; Metsaranta, J.M.; Black, T.A.; Guy, R.D.; Coops, N.C. Accelerating regrowth of temperate-maritime forests due to environmental change. *Glob. Chang. Biol.* **2012**, *18*, 2026–2040. [[CrossRef](#)]
24. Aertsens, W.; Janssen, E.; Kint, V.; Bontemps, J.D.; Van Orshoven, J.; Muys, B. Long-term growth changes of common beech (*Fagus sylvatica* L.) are less pronounced on highly productive sites. *For. Ecol. Manag.* **2014**, *312*, 252–259. [[CrossRef](#)]
25. Hanewinkel, M.; Hummel, S.; Cullmann, D.A. Modelling and economic evaluation of forest biome shifts under climate change in Southwest Germany. *For. Ecol. Manag.* **2010**, *259*, 710–719. [[CrossRef](#)]
26. Piovesan, G.; Biondi, F.; Di Filippo, A.; Alessandrini, A.; Maugeri, M. Drought-driven growth reduction in old beech (*Fagus sylvatica* L.) forests of the central Apennines, Italy. *Glob. Chang. Biol.* **2008**, *14*, 1265–1281. [[CrossRef](#)]
27. Alvarez, S.; Ortiz, C.; Díaz-Pinés, E.; Rubio, A. Influence of tree species composition, thinning intensity and climate change on carbon sequestration in Mediterranean mountain forests: A case study using the CO₂Fix model. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Chang.* **2016**, *21*, 1045–1058. [[CrossRef](#)]
28. Ashraf, M.I.; Bourque, C.P.A.; MacLean, D.A.; Erdle, T.; Meng, F.R. Estimation of potential impacts of climate change on growth and yield of temperate tree species. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Chang.* **2015**, *20*, 159–178. [[CrossRef](#)]

29. Noce, S.; Collalti, A.; Valentini, R.; Santini, M. Hot spot maps of forest presence in the Mediterranean basin. *IForest* **2016**, *9*, 766–774. [[CrossRef](#)]
30. Tumajer, J.; Altman, J.; Štěpánek, P.; Tremel, V.; Doležal, J.; Cienciala, E. Increasing moisture limitation of Norway spruce in Central Europe revealed by forward modelling of tree growth in tree-ring network. *Agric. For. Meteorol.* **2017**, *247*, 56–64. [[CrossRef](#)]
31. Kopáček, J.; Cudlín, P.; Fluksová, H.; Kaňa, J.; Pícek, T.; Šantrůčková, H.; Svoboda, M.; Vaněk, D. Dynamics and composition of litterfall in an unmanaged Norway spruce (*Picea abies*) forest after bark-beetle outbreak. *Boreal Environ. Res.* **2015**, *20*, 305–323.
32. Nováková, M.H.; Edwards-Jonášová, M. Restoration of central-european mountain norway spruce forest 15 years after natural and anthropogenic disturbance. *For. Ecol. Manag.* **2015**, *344*, 120–130. [[CrossRef](#)]
33. Čermák, P.; Kolář, T.; Žid, T.; Trnka, M.; Rybníček, M. Norway spruce responses to drought forcing in areas affected by forest decline. *For. Syst.* **2019**, *28*. [[CrossRef](#)]
34. Milad, M.; Schaich, H.; Bürgi, M.; Konold, W. Climate change and nature conservation in Central European forests: A review of consequences, concepts and challenges. *For. Ecol. Manag.* **2011**, *261*, 829–843. [[CrossRef](#)]
35. Kolář, T.; Čermák, P.; Trnka, M.; Žid, T.; Rybníček, M. Temporal changes in the climate sensitivity of Norway spruce and European beech along an elevation gradient in Central Europe. *Agric. For. Meteorol.* **2017**, *239*, 24–33. [[CrossRef](#)]
36. Vacek, Z.; Prokúpková, A.; Vacek, S.; Cukor, J.; Bílek, L. Silviculture as a tool to support stability and diversity of forests under climate change: Study from Krkonoše Mountains. *Cent. Eur. For. J.* **2020**. [[CrossRef](#)]
37. Versteegh, G.J.M. Solar forcing of climate. 2: Evidence from the past. *Space Sci. Rev.* **2005**, *120*, 243–286. [[CrossRef](#)]
38. Naumann, G.; Alfieri, L.; Wyser, K.; Mentaschi, L.; Betts, R.A.; Carrao, H.; Spinoni, J.; Vogt, J.; Feyen, L. Global Changes in Drought Conditions Under Different Levels of Warming. *Geophys. Res. Lett.* **2018**, *45*, 3285–3296. [[CrossRef](#)]
39. Murphy-Mariscal, M.; Grodsky, S.M.; Hernandez, R.R. Solar Energy Development and the Biosphere. *A Compr. Guid. to Sol. Energy Syst.* **2018**, 391–405. [[CrossRef](#)]
40. Stefani, F.; Giesecke, A.; Weier, T. A Model of a Tidally Synchronized Solar Dynamo. *Sol. Phys.* **2019**, *294*. [[CrossRef](#)]
41. Balogh, A.; Hudson, H.S.; Petrovay, K.; von Steiger, R. Introduction to the Solar Activity Cycle: Overview of Causes and Consequences. *Space Sci. Rev.* **2014**, *186*, 1–15. [[CrossRef](#)]
42. Beer, J.; McCracken, K.; Steiger, R. *Cosmogenic Radionuclides. Theory and Applications in the Terrestrial and Space Environments*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2012.
43. Reiter, R.V. Bio-Meteorologie auf physikalischer Basis. *Z. Angew. Meteorol.* **1953**, *1*, 453–464.
44. Solanki, S.K.; Usoskin, I.G.; Kromer, B.; Schüssler, M.; Beer, J. Unusual activity of the Sun during recent decades compared to the previous 11,000 years. *Nature* **2004**, *431*, 1084–1087. [[CrossRef](#)]
45. Bard, E.; Raisbeck, G.M.; Yiou, F.; Jouzel, J. Comment on “Solar activity during the last 1000 yr inferred from radionuclide records” by Muscheler et al. *Quat. Sci. Rev.* **2007**, *26*, 2301–2304. [[CrossRef](#)]
46. Muscheler, R.; Joos, F.; Beer, J.; Müller, S.A.; Vonmoos, M.; Snowball, I. Solar activity during the last 1000 yr inferred from radionuclide records. *Quat. Sci. Rev.* **2007**, *26*, 82–97. [[CrossRef](#)]
47. Hathaway, D.H. The solar cycle. *Living Rev. Sol. Phys.* **2015**, *12*, 83. [[CrossRef](#)]
48. Lockwood, M.; Owens, M.; Hawkins, E.; Jones, G.S.; Usoskin, I. Frost fairs, sunspots and the Little Ice Age. *Astron. Geophys.* **2017**, *58*, 2.17–2.23. [[CrossRef](#)]
49. Kadonaga, L.K.; Podlaha, O.; Whiticar, M.J. Time series analyses of tree ring chronologies from Pacific North America: Evidence for sub-century climate oscillations. *Chem. Geol.* **1999**, *161*, 339–363. [[CrossRef](#)]
50. Maliniemi, V.; Asikainen, T.; Mursula, K. Decadal variability in the Northern Hemisphere winter circulation: Effects of different solar and terrestrial drivers. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* **2018**, *179*, 40–54. [[CrossRef](#)]
51. Dong, J.; Ochsner, T.E. Soil Texture Often Exerts a Stronger Influence Than Precipitation on Mesoscale Soil Moisture Patterns. *Water Resour. Res.* **2018**, *54*, 2199–2211. [[CrossRef](#)]
52. Mauas, P.J.D.; Buccino, A.P.; Flamenco, E. Solar activity forcing of terrestrial hydrological phenomena. *Proc. Int. Astron. Union* **2016**, *12*, 180–191. [[CrossRef](#)]

53. Duan, J.; Zhang, Q. Bin a 449 year warm season temperature reconstruction in the southeastern Tibetan plateau and its relation to solar activity. *J. Geophys. Res.* **2014**, *119*, 11578–11592. [[CrossRef](#)]
54. Kumar, V.; Dhaka, S.K.; Panwar, V.; Singh, N.; Rao, A.S.; Malik, S.; Yoden, S. Detection of solar cycle signal in the tropospheric temperature using COSMIC data. *Curr. Sci.* **2018**, *115*, 2232–2239.
55. Berger, W.H. On glacier retreat and drought cycles in the Rocky Mountains of Montana and Canada. *Quat. Int.* **2010**, *215*, 27–33. [[CrossRef](#)]
56. Latta, G.; Temesgen, H.; Adams, D.; Barrett, T. Analysis of potential impacts of climate change on forests of the United States Pacific Northwest. *For. Ecol. Manag.* **2010**, *259*, 720–729. [[CrossRef](#)]
57. Uğur, B.; Feriha, Y. Forecasting risky years for forest fires depending on sunspot cycle. *J. For. Res.* **2017**, *4*, 133–142.
58. Kim, T.-J. Predictions of Galapagos Volcanic Eruption, El Niño, Ecuadorian Earthquake, Global Volcanic Eruption and Forest Fire by Sunspot Number. *Nat. Sci.* **2020**, *12*, 12–27. [[CrossRef](#)]
59. Brugnara, Y.; Brönnimann, S.; Luterbacher, J.; Rozanov, E. Influence of the sunspot cycle on the Northern Hemisphere wintertime circulation from long upper-air data sets. *Atmos. Chem. Phys.* **2013**, *13*, 6275–6288. [[CrossRef](#)]
60. Oh, S.; Yi, Y. Variations in Solar Parameters and Cosmic Rays with Solar Magnetic Polarity. *Astrophys. J.* **2017**, *840*, 14. [[CrossRef](#)]
61. Oloketuyi, J.; Liu, Y.; Amanambu, A.C.; Zhao, M. Responses and Periodic Variations of Cosmic Ray Intensity and Solar Wind Speed to Sunspot Numbers. *Adv. Astron.* **2020**, *2020*. [[CrossRef](#)]
62. Easterbrook, D.J. Cause of global climate changes: Correlation of global temperature, sunspots, solar irradiance, cosmic rays, and radiocarbon and beryllium production rates. In *Evidence-Based Climate Science: Data Opposing CO₂ Emissions as the Primary Source of Global Warming*, 2nd ed.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2016; pp. 245–262. [[CrossRef](#)]
63. Haywood, J.; Boucher, O. Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: A review. *Rev. Geophys.* **2000**, *38*, 513–543. [[CrossRef](#)]
64. Maghrabi, A.; Kudela, K. Relationship between time series cosmic ray data and aerosol optical properties: 1999–2015. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* **2019**, *190*, 36–44. [[CrossRef](#)]
65. Tsiropoula, G. Signatures of solar activity variability in meteorological parameters. *Atmos. Sol. Terr. Phys.* **2003**, *65*, 469–482. [[CrossRef](#)]
66. Gusev, A.A.; Martin, I.M. Possible evidence of the resonant influence of solar forcing on the climate system. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* **2012**, *80*, 173–178. [[CrossRef](#)]
67. Ormes, J.F. Cosmic rays and climate. *Adv. Space Res.* **2018**, *62*, 2880–2891. [[CrossRef](#)]
68. Schelhaas, M.J.; Nabuurs, G.J.; Schuck, A. Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries. *Glob. Chang. Biol.* **2003**, *9*, 1620–1633. [[CrossRef](#)]
69. Raza, M.; Aslam, N.; Le-Minh, H.; Hussain, S.; Cao, Y.; Khan, N.M. A Critical Analysis of Research Potential, Challenges, and Future Directives in Industrial Wireless Sensor Networks. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* **2018**, *20*, 39–95. [[CrossRef](#)]
70. ČHMÚ Czech Hydrometeorological Institute. Available online: <http://portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/> (accessed on 5 August 2019).
71. Nownes, A.J. Methodological Notes, Czech Statistical Office. In *Total Lobbying*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2012; pp. 225–232.
72. Hathaway, D.H.; Adams, M.; Weber, R. Royal Observatory, Greenwich—USAF/NOAA Sunspot Data. Available online: <https://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch.shtml> (accessed on 7 October 2019).
73. Kudela, K. Institute of Experimental Physics SAS. Available online: <http://neutronmonitor.ta3.sk/> (accessed on 7 October 2019).
74. *Team R Core A Language and Environment for Statistical Computing*; R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria, 2018.
75. Schulz, M.; Mudelsee, M. REDFIT: Estimating red-noise spectra directly from unevenly spaced paleoclimatic time series. *Comput. Geosci.* **2002**, *28*, 421–426. [[CrossRef](#)]
76. Bunn, A.; Mikko, K. *Chronology Building in dplR*; R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria, 2018; pp. 1–13.
77. Kašpar, M.; Müller, M.; Crhová, L.; Holtanová, E.; Poláček, J.F.; Pop, L.; Valeriánová, A. Relationship between Czech windstorms and air temperature. *Int. J. Climatol.* **2017**, *37*, 11–24. [[CrossRef](#)]

78. Whitman, E.; Parisien, M.A.; Thompson, D.K.; Flannigan, M.D. Short-interval wildfire and drought overwhelm boreal forest resilience. *Sci. Rep.* **2019**, *9*, 1–12. [[CrossRef](#)]
79. Young, D.J.N.; Stevens, J.T.; Earles, J.M.; Moore, J.; Ellis, A.; Jirka, A.L.; Latimer, A.M. Long-term climate and competition explain forest mortality patterns under extreme drought. *Ecol. Lett.* **2017**, *20*, 78–86. [[CrossRef](#)]
80. Lopez-Bustins, J.A.; Esteban, P.; Labitzke, K.; Langematz, U. The role of the stratosphere in Iberian Peninsula rainfall: A preliminary approach in February. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* **2007**, *69*, 1471–1484. [[CrossRef](#)]
81. Sitková, Z.; Nalevanková, P.; Střelcová, K.; Fleischer, P., Jr.; Ježík, M.; Sitko, R.; Pavlenda, P.; Hlásny, T. How does soil water potential limit the seasonal dynamics of sap flow and circumference changes in European beech? Ako vodný potenciál pôdy limituje sezónnu dynamiku transpiračného prúdu a zmien obvodov kmeňa u buka lesného? *Cent. Eur. For. J.* **2014**, *60*, 19–30. [[CrossRef](#)]
82. Hlásny, T.; Turčáni, M. Persisting bark beetle outbreak indicates the unsustainability of secondary Norway spruce forests: Case study from Central Europe. *Ann. For. Sci.* **2013**, *70*, 481–491. [[CrossRef](#)]
83. Mitchell, S.J. Wind as a natural disturbance agent in forests: A synthesis. *Forestry* **2013**, *86*, 147–157. [[CrossRef](#)]
84. Vacek, S.; Bílek, L.; Schwarz, O.; Hejčmanová, P.; Mikeska, M. Effect of Air Pollution on the Health Status of Spruce Stands Effect of Air Pollution on the Health Status of Spruce Stands. *Mt. Res. Dev.* **2013**, *33*, 40–50.
85. Putalová, T.; Vacek, Z.; Vacek, S.; Štefančík, I.; Bulušek, D.; Král, J. Tree-ring widths as an indicator of air pollution stress and climate conditions in different Norway spruce forest stands in the Krkonoše Mts. *Cent. Eur. For. J.* **2019**, *65*, 21–33. [[CrossRef](#)]
86. Král, J.; Vacek, S.; Vacek, Z.; Putalová, T.; Bulušek, D.; Štefančík, I. Structure, development and health status of spruce forests affected by air pollution in the western Krkonoše Mts. in 1979–2014. *For. J.* **2015**, *61*, 175–187. [[CrossRef](#)]
87. Vacek, Z.; Vacek, S.; Bílek, L.; Remeš, J.; Štefančík, I. Changes in horizontal structure of natural beech forests on an altitudinal gradient in the Sudetes. *Dendrobiology* **2015**, *73*, 33–45. [[CrossRef](#)]
88. Vacek, S.; Lepš, J. Changes in the horizontal structure in a spruce forest over a 9-year period of pollutant exposure in the Krkonoše mountains, Czechoslovakia. *For. Ecol. Manag.* **1987**, *22*, 291–295. [[CrossRef](#)]
89. Bottero, A.; Garbarino, M.; Long, J.N.; Motta, R. The interacting ecological effects of large-scale disturbances and salvage logging on montane spruce forest regeneration in the western European Alps. *For. Ecol. Manag.* **2013**, *292*, 19–28. [[CrossRef](#)]
90. Siefertmann-Harms, D.; Boxler-Baldoma, C.; Von Wilpert, K.; Heumann, H.G. The rapid yellowing of spruce at a mountain site in the Central Black Forest (Germany). Combined effects of Mg deficiency and ozone on biochemical, physiological and structural properties of the chloroplasts. *J. Plant Physiol.* **2004**, *161*, 423–437. [[CrossRef](#)]
91. Tomiczek, C. Nutrient Deficiency of Spruce Needles Caused By Root and Butt Rots—A Factor in Forest Decline. *J. Arboric.* **1995**, *21*, 113–117.
92. Grodzki, W. The decline of Norway spruce *Picea abies* (L.) Karst. stands in Beskid Śląski and Żywiecki: Theoretical concept and reality. *Beskydy* **2010**, *3*, 19–26.
93. Hlásny, T.; Sitková, Z. *Spruce Forests Decline in the Beskids*; Forestry and Game Management Research Institute Jíloviště: Strnady, Czech Republic, 2010; ISBN 9788080931278.
94. Seidl, R.; Rammer, W.; Lasch, P.; Badeck, F.W.; Lexer, M.J. Does conversion of even-aged, secondary coniferous forests affect carbon sequestration? A simulation study under changing environmental conditions. *Silva Fenn.* **2008**, *42*, 369–386. [[CrossRef](#)]
95. Vacek, S.; Prokupková, A.; Vacek, Z.; Buluek, D.; Simunek, V.; Králíček, I.; Prausová, R.; Hájek, V. Growth response of mixed beech forests to climate change, various management and game pressure in Central Europe. *J. For. Sci.* **2019**, *65*, 331–345. [[CrossRef](#)]
96. Matthews, B.; Netherer, S.; Katzensteiner, K.; Pennerstorfer, J.; Blackwell, E.; Henschke, P.; Hietz, P.; Rosner, S.; Jansson, P.E.; Schume, H.; et al. Transpiration deficits increase host susceptibility to bark beetle attack: Experimental observations and practical outcomes for *Ips typographus* hazard assessment. *Agric. For. Meteorol.* **2018**, *263*, 69–89. [[CrossRef](#)]
97. Marini, L.; Økland, B.; Jönsson, A.M.; Bentz, B.; Carroll, A.; Forster, B.; Grégoire, J.C.; Hurling, R.; Nageleisen, L.M.; Netherer, S.; et al. Climate drivers of bark beetle outbreak dynamics in Norway spruce forests. *Ecography* **2017**, *40*, 1426–1435. [[CrossRef](#)]

98. Schroeder, L.M.; Lindelöw, Å. Attacks on living spruce trees by the bark beetle *Ips typographus* (Col. Scolytidae) following a storm-felling: A comparison between stands with and without removal of wind-felled trees. *Agric. For. Entomol.* **2002**, *4*, 47–56. [[CrossRef](#)]
99. Turčáni, M.; Hlásny, T. Spatial distribution of four spruce bark beetles in north-western Slovakia. *J. For. Sci.* **2007**, *53*, 45–52. [[CrossRef](#)]
100. Økland, B.; Berryman, A. Resource dynamic plays a key role in regional fluctuations of the spruce bark beetles *Ips typographus*. *Agric. For. Entomol.* **2004**, *6*, 141–146. [[CrossRef](#)]
101. Ludwig, P.; Pinto, J.G.; Hoeppe, S.A.; Fink, A.H.; Gray, S.L. Secondary cyclogenesis along an occluded front leading to damaging wind gusts: Windstorm Kyrill, January 2007. *Mon. Weather Rev.* **2015**, *143*, 1417–1437. [[CrossRef](#)]
102. Almedeij, J. Long-term periodic drought modeling. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.* **2016**, *30*, 901–910. [[CrossRef](#)]
103. Li, H.Y.; Xue, L.J.; Wang, X.J. Relationship between solar activity and flood/drought disasters of the Second Songhua river basin. *J. Water Clim. Chang.* **2015**, *6*, 578–585. [[CrossRef](#)]
104. Laurenz, L.; Lüdecke, H.J.; Lüning, S. Influence of solar activity changes on European rainfall. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* **2019**, *185*, 29–42. [[CrossRef](#)]
105. Al-Tameemi, M.A.; Chukin, V.V. Global water cycle and solar activity variations. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* **2016**, *142*, 55–59. [[CrossRef](#)]
106. Tinsley, B.A. A working hypothesis for connections between electrically-induced changes in cloud microphysics and storm vorticity, with possible effects on circulation. *Adv. Space Res.* **2012**, *50*, 791–805. [[CrossRef](#)]
107. Mishra, V.K.; Mishra, A.P. Study of solar activity and cosmic ray modulation during solar cycle 24 in comparison to previous solar cycle. *Indian J. Phys.* **2016**, *90*, 1333–1339. [[CrossRef](#)]
108. Laurenza, M.; Vecchio, A.; Storini, M.; Carbone, V. Quasi-biennial modulation of galactic cosmic rays. *Astrophys. J.* **2012**, *749*. [[CrossRef](#)]
109. Sarp, V.; Kilcik, A.; Yurchyshyn, V.; Ozguc, A.; Rozelot, J.P. Cosmic Ray Modulation with the Maximum CME Speed Index During Solar Cycles 23 and 24. *Sol. Phys.* **2019**, *294*, 1–11. [[CrossRef](#)]
110. Kasatkina, E.A.; Shumilov, O.I.; Timonen, M. Solar activity imprints in tree ring-data from northwestern Russia. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* **2019**, *193*, 105075. [[CrossRef](#)]
111. Shumilov, O.I.; Kasatkina, E.A.; Mielikainen, K.; Timonen, M.; Kanatjev, A.G. Palaeovolcanos, Solar activity and pine tree-rings from the Kola Peninsula (Northwestern Russia) over the last 560 years Palaeovolcanos. *Int. J. Environ. Res.* **2011**, *5*, 855–864.
112. Dorotovič, I.; Louzada, J.L.; Rodrigues, J.C.; Karlovský, V. *Impact of Solar Activity on the Growth of Pine Trees: Case Study*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2014; Volume 133, pp. 639–648.
113. Wang, X.; Zhang, Q. Bin Evidence of solar signals in tree rings of Smith fir from Sygera Mountain in southeast Tibet. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* **2011**, *73*, 1959–1966. [[CrossRef](#)]
114. Hlásny, T.; Barka, I.; Roessiger, J.; Kulla, L.; Trombik, J.; Sarvašová, Z.; Bucha, T.; Kovalčík, M.; Čihák, T. Conversion of Norway spruce forests in the face of climate change: A case study in Central Europe. *Eur. J. For. Res.* **2017**, *136*, 1013–1028. [[CrossRef](#)]
115. Müller, J.; Noss, R.F.; Thorn, S.; Bäessler, C.; Leverkus, A.B.; Lindenmayer, D. Increasing disturbance demands new policies to conserve intact forest. *Conserv. Lett.* **2019**, *12*, 1–7. [[CrossRef](#)]
116. Nascimbene, J.; Thor, G.; Nimis, P.L. Effects of forest management on epiphytic lichens in temperate deciduous forests of Europe—A review. *For. Ecol. Manag.* **2013**, *298*, 27–38. [[CrossRef](#)]
117. Vacek, S.; Moucha, P.; Bílek, L.; Mikeska, M.; Remeš, J.; Simon, J.; Hynek, V.; Šrůtka, P.; Schwarz, O.; Mánek, J.; et al. *Pěče o Lesní Ekosystémy v Chráněných Územích ČR. [Management of Forest Ecosystems in the Protected Areas of the Czech Republic]*; Ministry of the Environment of the Czech Republic: Prague, Czech Republic, 2012.
118. Krejčí, F.; Vacek, S.; Bílek, L.; Mikeska, M.; Hejčmanová, P.; Vacek, Z. The effects of climatic conditions and forest site types on disintegration rates in *Picea abies* occurring at the Modrava Peat Bogs in the Šumava National Park. *Dendrobiology* **2013**, *70*, 35–44. [[CrossRef](#)]

119. Remeš, J.; Pulkrab, K.; Bílek, L.; Podrázský, V. Economic and production effect of tree species change as a result of adaptation to climate change. *Forests* **2020**, *11*, 431. [[CrossRef](#)]
120. Vacek, S.; Vacek, Z.; Bílek, L.; Hejčmanová, P.; Štícha, V.; Remeš, J. The dynamics and structure of dead wood in natural spruce-beech forest stand—A 40 year case study in the Krkonoše national park. *Dendrobiology* **2015**, *73*, 21–32. [[CrossRef](#)]
121. Dobor, L.; Hlásny, T.; Rammer, W.; Zimová, S.; Barka, I.; Seidl, R. Is salvage logging effectively dampening bark beetle outbreaks and preserving forest carbon stocks? *J. Appl. Ecol.* **2020**, *57*, 67–76. [[CrossRef](#)]
122. Pilli, R.; Grassi, G.; Kurz, W.A.; Moris, J.V.; Viñas, R.A. Modelling forest carbon stock changes as affected by harvest and natural disturbances. II. EU-level analysis. *Carbon Balance Manag.* **2016**, *11*. [[CrossRef](#)]
123. Petrovay, K. *Solar Cycle Prediction*; Eötvös Loránd University: Budapest, Hungary, 2020; Volume 17, ISBN 0123456789.
124. Dani, T.; Sulistiani, S. Prediction of maximum amplitude of solar cycle 25 using machine learning Prediction of maximum amplitude of solar cycle 25 using machine learning. *J. Phys. Conf. Ser.* **2019**. [[CrossRef](#)]
125. Wu, C.J.; Krivova, N.A.; Solanki, S.K.; Usoskin, I.G. Solar total and spectral irradiance reconstruction over the last 9000 years. *Astron. Astrophys.* **2018**, *620*, 1–12. [[CrossRef](#)]
126. Shapiro, A.V.; Shapiro, A.I.; Gizon, L.; Krivova, N.A.; Solanki, S.K. Solar-cycle irradiance variations over the last four billion years. *Astron. Astrophys.* **2020**, *636*, 1–8. [[CrossRef](#)]



© 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

5.2.2. Vztahy těžby listnatých a jehličnatých dřevin dle slunečních cyklů

Tento příspěvek na mezinárodní konferenci doplňuje popis vztahu klimatických faktorů vůči celkovým a nahodilým těžbám v České republice. Tato práce také rozvíjí znalosti o vztahu listnatých a jehličnatých těžeb, které navzájem také probíhají v cyklech dle velkých celorepublikových kalamit. Tento příspěvek pracuje s celkovými těžbami listnatých a jehličnatých dřevin, s těžbou celkovou a nahodilou, s průměrnými ročními teplotami vzduchu, s průměrnými ročními úhrny srážek a s číslem slunečních skvrn. Pro statistickou analýzu byla použita korelační tabulka a spektrální analýzy všech zkoumaných datových křivek.

Výsledky této práce ukazují, že nahodilé a listnaté těžby probíhají v 11letých cyklech dle aktivity slunečních cyklů. Také procentuální střídání jehličnaté a listnaté těžby probíhá v 11letých cyklech. Roční teploty vzduchu nejlépe korelují s celkovými a jehličnatými těžbami (Šimůnek et al. 2021b).

Citace příspěvku:

ŠIMŮNEK, V., VACEK, S., VACEK, Z., D'ANDREA, G, 2021. Vztahy těžby listnatých a jehličnatých dřevin dle slunečních cyklů [Harvesting fluctuations of deciduous and coniferous tree species according to solar cycles] In: Proceedings of Central European Silviculture – 21st International Conference. 101–108.

VZTAHY TĚŽBY LISTNATÝCH A JEHLIČNATÝCH DŘEVIN DLE SLUNEČNÍCH CYKLŮ

HARVESTING FLUCTUATIONS OF DECIDUOUS AND CONIFEROUS TREE SPECIES ACCORDING TO SOLAR CYCLES

VÁCLAV ŠIMŮNEK V., STANISLAV VACEK, ZDENĚK VACEK,
GIUSEPPE D'ANDREA, JOSEF GALLO

Česká zemědělská univerzita, Fakulta lesnická a dřevařská, Kamýcká 129, 165 21 Praha 6 – Suchdol, Česká republika

ABSTRACT

This study deals with statistical data of timber harvest in the Czech Republic and compares them with climatic data and solar cycles. The total, salvage, deciduous and coniferous logging are used. The timber harvest of mentioned types is compared with annual temperatures, annual precipitation and the sunspot number. The sunspot number characterizes solar cycles and their intensity. The results of this study show that the salvage and deciduous logging taking place in 11-year cycles according to solar activity. The alternation of coniferous and deciduous logging is carried out in 11-year cycles. This work should help forestry to understand the cyclical relationships that take place in conjunction with cycles of solar activity.

Keywords: salvage logging, timber harvest, sunspot cycles

ABSTRAKT

Tato studie se zabývá statistickými údaji o těžbách v České republice a porovnává je s klimatickými údaji a slunečními cykly. V této studii jsou použity celkové, nahodilé, listnaté a jehličnaté těžby, které jsou porovnány s ročními teplotami, ročním úhrnem srážek a s číslem slunečních skvrn, které charakterizují sluneční cykly a jejich intenzitu. Výsledky této studie ukazují, že nahodilé a listnaté těžby probíhají v 11letých cyklech dle sluneční aktivity. Také střídání jehličnaté a listnaté těžby probíhá v 11letých cyklech. Tato práce by měla pomoci lesnímu hospodářství v pochopení cyklických vztahů, a to zejména cyklů sluneční aktivity.

Klíčová slova: nahodilé těžby, těžba dřeva, cykly slunečních skvrn

Úvod

V lesnictví České republiky dochází k cyklickým kalamitám, které výrazně a krátkodobě zvyšují množství nahodilých těžeb (MZE 2020). Velké kalamity jsou spouštěny bořivými větry, nedostatkem srážek a vyššími teplotami, což vede právě k přemnožení sekundárních škůdců, kteří prohlubují lesnické katastrofy (HLÁSNÝ, TURČÁNI 2013). Sucho tvoří podmínky pro velké kalamity pře-

vážně v porostech jehličnatých dřevin, kde jsou nejvíce zasaženy smrkové monokultury, které v ČR zaujímají 49,5 % (MZe 2020). Právě vysoké teploty a suchá období v posledních letech vedou k vyšší citlivosti smrkových [*Picea abies* (L.) Karsten] porostů na negativní klimatické události (ČERMÁK et al. 2019). Smrkové monokultury jsou náchylné k řadě sekundárních chorob, škůdců a jsou obzvláště citlivé na teplejší a sušší klima (SEIDL et al. 2014). Vyšší teploty proto často vedou ke zvyšování nahodilých a celkových těžeb, což se přímo projevuje na snižování ceny dříví (REMEŠ et al. 2020; TOTH et al. 2020). Navíc velké odlesněné plochy po těžbách jsou další zvýšenou nákladovou položkou z hlediska zalesnění a zajištění kultur (MZe 2020).

Lesnictví je tedy přímo provázané s klimatickými a ekonomickými aspekty následků velkých kalamit. V posledních letech byla nalezena možná spojitost mezi výraznými celostátními kalamitami a slunečními cykly, které probíhají souběžně s cykly nahodilých těžeb (ŠIMŮNEK et al. 2020). Za zmínku stojí například období nahodilých těžeb 2006–2011, které kulminovalo v roce 2007, kde došlo k těžbě 15,4 mil. m³ dříví. Součástí lesních kalamit v ČR jsou větrné bouře, které vedou k přemnožení kůrovce a ten následně začne likvidovat jehličnaté porosty během suchých let (HLÁSNÝ, TURČÁNI 2013; NOVÁKOVÁ, EDWARDS-JONÁŠOVÁ 2015). Právě v lednu roku 2007 vznikly velké škody na lesních porostech, které způsobil orkán Kyrill, který výrazně zvýšil destrukci lesních porostů, a tím i nahodilé těžby.

V podmínkách České republiky bylo také zjištěno, že sluneční cyklus má vztah k radiálnímu růstu buku lesního (*Fagus sylvatica* L.) a i bučiny v jižní Itálii jsou ovlivněny solárními cykly (ŠIMŮNEK et al. 2021). Další dřevinou, která je ovlivněna slunečními cykly je i borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) v západním Rusku (MATVEEV et al. 2017; KASATKINA et al. 2019). Vliv slunečních cyklů je provázan s teplotami, srážkami a dokonce i se změnou klimatu (EASTERBROOK 2016).

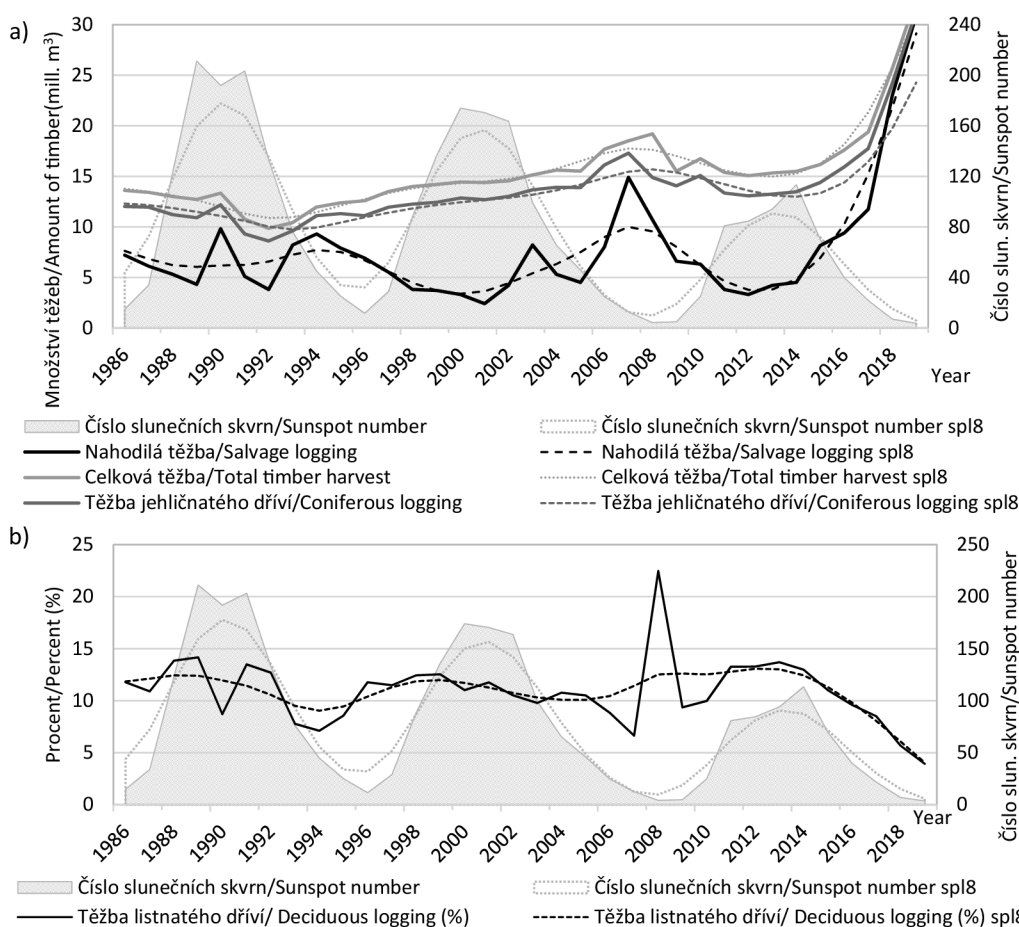
Cílem této studie je porovnání klimatických faktorů s různými typy těžeb po roce 1986, kdy již nebyl výrazný vliv imisní kalamity na lesní hospodářství. Těžby nahodilé, celkové, listnaté, jehličnaté a procentuální střídání listnaté a jehličnaté těžby jsou porovnány mezi sebou navzájem, ale také jsou k analýze použity průměrné roční teploty, roční úhrny srážek a sluneční cykly zastoupené číslem slunečních skvrn. Tato práce popisuje cyklické výkyvy v těžbách listnatých a jehličnatých dřevin. Těžby listnatých dřevin jsou zastoupeny ve výrazně menší míře než jehličnaté, a proto bližší analýza střídání těchto těžeb by mohla lépe vysvětlit jejich proměnlivé trendy. Výsledky jsou popsány korelacemi a spektrální analýzou všech datových řad.

MATERIÁL A METODIKA

Data o celkových, nahodilých, listnatých nebo jehličnatých těžbách byla získána od Ústavu hospodářské úpravy lesů v Brandýse nad Labem a Českého statistického úřadu v Praze. Data o průměrných ročních teplotách a ročním úhrnu srážek pro celou Českou republiku pochází z Českého hydrometeorologického ústavu v Praze (ČHMÚ 2020). Data o ročním relativním slunečním čísle (sunspot number) byla použita z Royal Observatory of Belgium, Brussels (WDC-SILSO 2020).

Všechna data byla pro názornost doplněna osmiletým kubickým splinem pro odstranění krátkodobých vlivů pomocí softwaru R (TEAM R CORE 2018) a platí, že vypočtené spliny nevstupují do žádných analýz ani výpočtů. Výpočty korelací a spektrální analýzy byly vytvořeny softwarem Statistica 13 (Statsoft, Tulsa). Výpočet spektrální analýzy byl proveden k datovým řadám pro číslo slunečních skvrn, průměrné roční teploty, roční úhrn srážek, celkové těžby, nahodilá těžby, listnaté těžby, jehličnaté těžby a pro procentuální střídání listnaté a jehličnaté těžby. Spektrální analýza byla provedena funkcí „Single Furier (Spectral) Analysis“, přičemž byl použit výstup „Periodogram“ plot by „Period“.

Datový základ jehličnatých a listnatých těžeb byl rozšířen o procentuální podíl z celkových těžeb. Symbol (%) představuje procenta těžeb, kdy platí, že součet listnatých a jehličnatých těžeb se rovná 100 %, tj. celkovým těžbám jednoho roku. Procentuální zastoupení listnatých a jehličnatých těžeb (%) bylo vypočteno pro



Obr. 1: Vývoj čísla slunečních skvrn a a) výši těžeb v České republice a b) procentuálního zastoupení listnatých těžeb; (%) datový základ jehličnatých a listnatých těžeb vypočítán jako procentuální podíl z celkových těžeb; spl8 představuje osmiletý spline

Fig. 1: Dynamics of sunspot number and a) the volume of timber harvested in the Czech Republic and b) percentage of deciduous logging; (%) deciduous logging data base was calculated as a percentage from total timber harvest; spl8 represents an eight-year spline

roky 1986–2019. Na Obr. 1 jsou zobrazena všechna použitá data těžeb v této studii. Nahodilé těžby v ČR představují těžební zásahy způsobené suchem, větrem nebo ostatními škodlivými činiteli (Obr. 1a). Naproti tomu celková těžba dřeva (Obr. 1a) představuje veškeré těžební zásahy v lesním hospodářství a vyjadřuje se jako suma všech nahodilých a úmyslných těžeb.

VÝSLEDKY

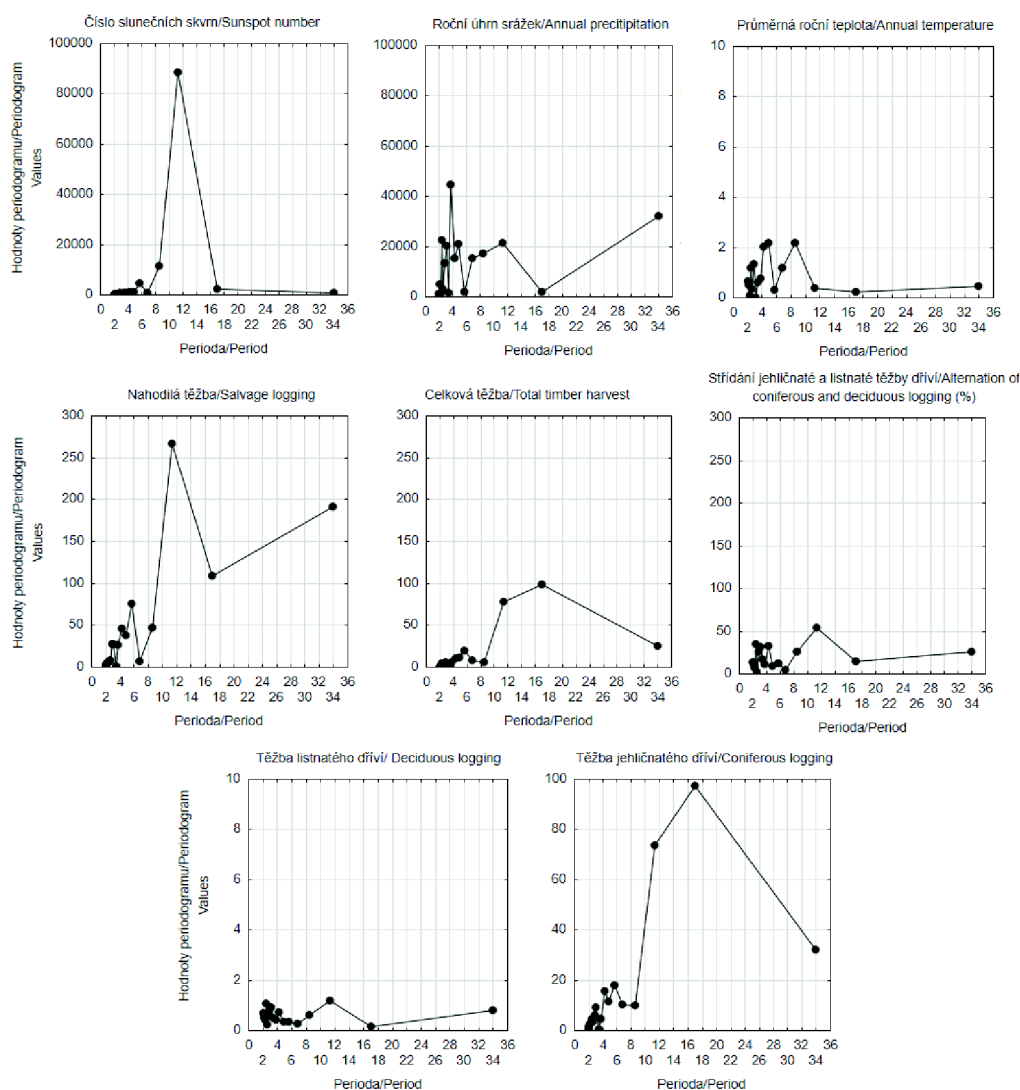
V poslední době přehlíženou součástí těžeb jsou listnaté těžby, které jsou zastoupeny v průměru 13,8 % z celkové těžby od roku 1986 (Obr. 1b) a zbývajících 86,2 % jsou těžby jehličnaté. Trend celkových těžeb (Obr. 1a) je vzestupný, což logicky potvrzuje vysoká signifikantní korelace ($r = 0,99$) jehličnatých těžeb k celkovým těžbám (Tab. 1). Naše výsledky v Tab. 1 ukazují signifikantní korelace průměrných teplot k celkovým, jehličnatým a nahodilým těžbám ($r = 0,52$, $0,51$ a $0,44$). Postupné zvyšování jehličnatých a celkových těžeb je doloženo na Obr. 1a. Extrémním obdobím nahodilých těžeb jsou například roky 2016–2019, kdy bylo nahodilými těžbami vytěženo 30,95 mil. m³.

Tab. 1: Korelační koeficienty mezi těžbami a klimatem od 1986 do 2019; statisticky významné výsledky ($p < 0,05$) jsou označeny tučně; (%) datový základ jehličnatých a listnatých těžeb vypočítán jako procentuální podíl z celkových těžeb

Table 1: Correlation coefficients between logging and climate from 1986 to 2019; significant results ($p < 0.05$) are marked in bold; (%) data source of coniferous and deciduous logging calculated as a percentage of total logging

	Korelace těžeb s klimatem <i>Correlation of logging with climate</i>			Vzájemná korelace těžeb <i>Mutual logging correlations</i>	
	Číslo slunečních skvrn <i>Sunspot number</i>	Průměrná roční teplota <i>Annual temperature</i>	Roční úhrn srážek <i>Annual precipitation</i>	Celková těžba <i>Total timber harvest</i>	Nahodilá těžba <i>Salvage logging</i>
Nahodilá těžba <i>Salvage logging</i>	-0.49	0.44	-0.28	0.85	1.00
Celková těžba <i>Total timber harvest</i>	-0.47	0.52	-0.14	1.00	0.85
Těžba jehličnatého dříví <i>Coniferous logging</i>	-0.46	0.51	-0.13	0.99	0.88
Těžba listnatého dříví <i>Deciduous logging</i>	-0.07	0.14	-0.09	0.17	-0.13
Těžba jehličnatého dříví (%) <i>Coniferous logging (%)</i>	-0.28	0.19	0.05	0.38	0.57
Těžba listnatého dříví (%) <i>Deciduous logging (%)</i>	0.28	-0.19	-0.05	-0.38	-0.57

Z hlediska vztahu těžeb a slunečních cyklů, nahodilé těžby vykazují maximální hodnoty zrcadlově převrácené k číslům slunečních skvrn. Během slunečního minima dochází ke zvyšování nahodilých těžeb, což proběhlo v obdobích 1994–1997, 2006–2011 a 2016–2019. Střídání cyklů těžeb a slunečních cyklů charakterizuje Obr. 1a Tab. 1, která udává nejvyšší signifikantní korelaci nahodilých těžeb s číslem slunečních skvrn ($r = -0,49$) a poté s ročními teplotami ($r = 0,44$). Naproti tomu střídání těžby listnatých dřevin (%) probíhá společně se slunečními cykly, což ukazuje Obr. 1b a číselně potvrzuje Tab. 1 kladnou korelaci ($r = 0,28$). Zároveň dochází u střídání těžby listnatých dřevin (%) k 11,3letému cyklu ve spektrální analýze. Nicméně reálná těžba listnatých dřevin (v mil. m³) je naprosto potlačena těžbou jehličnatou, což potvrzují i nízké korelace těžby listnatých dřevin v Tab. 1.



Obr. 2: Spektrální analýzy těžeb a klimatických ukazatelů od 1986 do 2019; (%) datový základ jehličnatých a listnatých těžeb vypočítán jako procentuální podíl z celkových těžeb

Fig. 2: Spectral analysis of logging and climate from 1986 to 2019; (%) data source of coniferous and deciduous logging calculated like a percentage of total logging

Z hlediska spektrální analýzy na Obr. 2 se 11letý cyklus vyskytuje v našich datech u čísla slunečních skvrn, u nahodilých těžeb, u procentuálního střídání jehličnatých a listnatých těžeb (%), u listnatých těžeb a částečně také u ročních úhrnů srážek. Dále se v našich datech objevují 4–5leté a 9leté cykly u průměrných teplot, kdy je nutné také zmínit menší i kratší méně výrazný 6letý cyklus u nahodilých.

DISKUSE

Průběh nahodilých těžeb společně se slunečními cykly byl již v ČR popsán (ŠIMŮNEK et al. 2020), ale i letokruhové záznamy potvrzují vliv slunečních cyklů na růst lesních dřevin napříč v Evropou (SHUMILOV et al. 2011; ŠIMŮNEK et al. 2021). Naše výsledky v Tab. 1 ukazují, že korelace těžeb a ročních úhrnů srážek nejsou statisticky signifikantní. Nicméně sluneční cykly mohou být propojeny s cyklem těžeb přes North Atlantic Oscillation (NAO), které úzce souvisí například s cyklickým výskytem srážek v Evropě. Srážkové úhrny jsou provázané se slunečním cyklem hlavně během února a března (LAURENZ et al. 2019), což částečně potvrzují i výsledky zachycené ve spektrální analýze, kde jsou 11,3leté cykly u ročních srážek. Významnějším faktorem pro těžby dříví jsou vyšší teploty než srážky, což potvrzují naše korelační koeficienty uvedené v Tab. 1. Teploty jsou na našem území korelovány se slunečním cyklem v únoru, březnu a srpnu (LÜDECKE et al. 2020) a dle našeho názoru, může hrát roli sluneční cyklus v prodlužování doby žíru kůrovců (MARINI et al. 2017). Kratší 6letý cyklus v naší spektrální analýze přirovnáváme k efektu bořivých větrů, které jsou hlavním původcem lesních kalamit v Evropě za posledních několik let (SEIDL et al. 2014).

Sluneční 11letý cyklus slunečních skvrn je spojen s elektro-magnetickou aktivitou slunce (HATHAWAY 2015). Vysvětlením vlivu slunečního cyklu na klima může být spojeno s kosmickými paprsky (kosmickým zářením) dopadajícími do atmosféry země, což vede k vyvolání tvorby aerosolů, které jsou základem tvorby mrakového pokryvu (HAYWOOD a BOUCHER 2000; MAGHRABI a KUDELA 2019), čímž je ovlivňováno klima planety od teplot po vodní cyklus (TINSLEY 2012; AL-TAMEEMI AND CHUKIN 2016; LAURENZ et al. 2019; LÜDECKE et al. 2020)

ZÁVĚR

Těžby v České republice jsou ovlivněny mnoha faktory antropogenními, ale i přírodními, které se projevují na výsledném množství těžeb dříví. Celková těžba je nejvíce složena z jehličnatých těžeb, které nejlépe korelují s průměrnými ročními teplotami. Spektrální analýza nepotvrdila 11leté cykly u průměrných ročních teplot. Nahodilá těžba dříví nejvíce koreluje se slunečními cykly. Spektrální analýzy dat ukazují, že sluneční 11letý cyklus se nejvíce projevuje u nahodilých a listnatých těžeb, nicméně se také projevuje i u procentuálního střídání jehličnatých a listnatých těžeb.

PODĚKOVÁNÍ

Poděkování patří Českému Hydrometeorologickému ústavu za poskytnutí dat o srážkách a teplotách v České republice. Děkujeme Royal Observatory v Belgii za poskytnutí dat o slunečních skvrnách. Děkujeme Ústavu hospodářské úpravy lesů v Brandýse nad Labem a Českému statistickému úřadu v Praze za poskytnutí dat o těžbách v České republice.

LITERATURA

- AL-TAMEEMI M.A., CHUKIN V.V. 2016. Global water cycle and solar activity variations. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 142: 55–59. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.02.023>
- ČERMÁK P., KOLÁŘ T., ŽID T., TRNKA M., RYBNÍČEK M. 2019. Norway spruce responses to drought forcing in areas affected by forest decline. *Forest Systems*, 28, 3: e016. <https://doi.org/10.5424/fs/2019283-14868>
- ČHMÚ 2020. Český hydrometeorologický ústav. Územní srážky [online; cit. 2021-06-02]. Dostupné na: <http://portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/uzemni-srazky>
- EASTERBROOK D.J. 2016. Cause of global climate changes: Correlation of global temperature, sunspots, solar irradiance, cosmic rays, and radiocarbon and beryllium production rates. In: *Evidence-Based Climate Science*. 2nd ed. Elsevier: 245–262. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804588-6.00014-8>
- HATHAWAY D.H. 2015. The solar cycle. *Living Reviews in Solar Physics*, 12: 4. <https://doi.org/10.1007/lrsp-2015-4>
- HAYWOOD J., BOUCHER O. 2000. Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: A review. *Reviews Geophysics*, 38: 513–543. <https://doi.org/10.1029/1999RG000078>
- HLÁSNY T., TURČÁNI M. 2013. Persisting bark beetle outbreak indicates the unsustainability of secondary Norway spruce forests: Case study from Central Europe. *Annals of Forest Science*, 70: 481–491. <https://doi.org/10.1007/s13595-013-0279-7>
- KASATKINA E.A., SHUMILOV O.I., TIMONEN M. 2019. Solar activity imprints in tree ring-data from northwestern Russia. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 193: 105075. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.105075>
- LAURENZ L., LÜDECKE H.J., LÜNING S. 2019. Influence of solar activity changes on European rainfall. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 185: 29–42. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.01.012>
- LÜDECKE H.J., CINA R., DAMMSCHNEIDER H.J., LÜNING S. 2020. Decadal and multidecadal natural variability in European temperature. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 205: 105294. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105294>
- MAGHRABI A., KUDELA K. 2019. Relationship between time series cosmic ray data and aerosol optical properties: 1999–2015. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 190: 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.04.014>
- MARINI, L., ØKLAND B., JÖNSSON, A.M., BENTZ B., CARROLL A., FORSTER B., GRÉGOIRE J.-C., HURLING R., NAGELEISEN L.M., NETHERER S., RAVN H.P.,

- WEED A., SCHROEDER M. 2017. Climate drivers of bark beetle outbreak dynamics in Norway spruce forests. *Ecography*, 40: 1426–1435. <https://doi.org/10.1111/ecog.02769>
- MATVEEV S.M., CHENDEV Y.G., LUPO A.R., Hubbart J.A., Timashchuk D.A 2017. Climatic changes in the East-European forest-steppe and effects on Scots pine productivity. *Pure and Applied Geophysics*, 174: 427–443. <https://doi.org/10.1007/s00024-016-1420-y>
- MZe ČR 2020. Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství v České republice v roce 2019. Praha, Ministerstvo zemědělství: 124 s.
- NOVÁKOVÁ M.H., EDWARDS-JONÁŠOVÁ M. 2015. Restoration of Central-European mountain Norway spruce forest 15 years after natural and anthropogenic disturbance. *Forest Ecology and Management*, 344: 120–130. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.02.010>
- REMEŠ J., PULKRAB K., BÍLEK L., PODRÁZSKÝ V. 2020. Economic and production effect of tree species change as a result of adaptation to climate change. *Forests*, 11, 4: 431. <https://doi.org/10.3390/F11040431>
- SEIDL R., SCHELHAAS M., RAMMER W., VERKERK P.J. 2014. Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. *Nature Climate Change*, 4: 806–810. <https://doi.org/10.1038/nclimate2318>
- SHUMILOV O.I., KASATKINA E.A., MIELIKAINEN K., TIMONEN M., KANATJEV A.G. 2011. Palaeovolcanos, Solar activity and pine tree-rings from the Kola Peninsula (northwestern Russia) over the last 560 years. *International Journal of Environmental Research*, 5: 855–864.
- ŠIMŮNEK V., VACEK Z., VACEK S. 2020. Solar cycles in salvage logging: National data from the Czech Republic confirm significant correlation. *Forests*, 11, 9: 973. <https://doi.org/10.3390/f11090973>
- ŠIMŮNEK V., VACEK Z., VACEK S., RIPULLONE F., HÁJEK V., D'ANDREA G. 2021. Tree rings of European beech (*Fagus sylvatica* L.) indicate the relationship with solar cycles during climate change in central and southern Europe. *Forests*, 12: 259. <https://doi.org/10.3390/f12030259>
- TEAM R CORE 2018. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. [online; cit. 2021-06-02]. Dostupné na: <https://www.R-project.org/>
- TINSLEY B.A. 2012. A working hypothesis for connections between electrically-induced changes in cloud microphysics and storm vorticity, with possible effects on circulation. *Advances in Space Research*, 50: 791–805. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.04.008>
- TOTH D., MAITAH M., MAITAH K., JAROLÍNOVÁ V. 2020. The impacts of calamity logging on the development of spruce wood prices in Czech forestry. *Forests*, 11: 283. <https://doi.org/10.3390/f11030283>
- WDC-SILSO 2020. Sunspot data from the World Data Center SILSO, Royal Observatory of Belgium, Brussels. [online; cit. 2021-06-02]. Dostupné na: <http://www.sidc.be/silso/datafiles>

6. Diskuse

6.1. Reakce bukových porostů na klimatické podmínky srážek a teplot

Z výsledků všech studií buku lesního této disertační práce vyplývá, že teploty mají pozitivní vliv na růst buku lesního ve studovaných oblastech Krkonoš a na Broumovsku. V ojedinělých případech dochází k extrémním pozdním jarním mrazům jako například v letech 1996, 2011 nebo 2016. Negativní vliv jarních mrazů na buk lesní byl zaznamenán i jinými autory například v Krkonoších (Vacek & Hejcman 2012) nebo i v nedalekých Orlických horách (Králíček et al. 2017), ale celkový trend teplot vzduchu a radiálního růstu buku je pozitivní. Negativní korelace teplot a radiálního růstu byla zaznamenána našimi výsledky v Itálii, kde může docházet k významným problémům se suchem v horských polohách a tím může být vliv teplot na růst buku negativní. V budoucnu lze tak přepokládat, že s postupující klimatickou změnou a menšími úhrny srážek může dojít k expanzi buku lesního do vyšších horských poloh (Vacek et al. 2015c, Dulamsuren et al. 2017).

Celkově je třeba zmínit, že úhrn srážek může vykazovat negativní nebo až nulové korelace s radiálním přírůstem v Krkonoších nebo na Broumovsku, kdy podobné negativní reakce vůči srážkám potvrzují i jiní autoři (Králíček et al. 2017, Putalová et al. 2019). U buku lesního v Krkonoších také platí, že s vyšší nadmořskou výškou hrají teploty větší roli vůči radiálnímu přírůstu (Dulamsuren et al. 2017), což také potvrzují i naše výsledky (Šimůnek et al. 2020a). V posledních letech se navíc zvyšuje nátlak sucha na bukové porosty (Muffler et al. 2020), ale v horských polohách Krkonoš jsou významnější negativní vlivy jarních mrazů než sucha (Šimůnek et al. 2019b).

Bukové porosty v Krkonoších patří do citlivější provenience buku lesního na sucha, což může být spojeno s jeho dřívějším opadem listů a naproti tomu bukové porosty v mediteránu jsou více odolné vůči suchu a opadávají později (Robson et al. 2013). Porosty buku lesního v centrální Evropě mají navíc méně vegetačních dní než bukové lesy v mediteránu, což se projevuje i na velikosti průměrného letokruhového přírůstu, kdy výzkumné plochy v Krkonoších přirůstají řádově méně než výzkumné plochy v jižních Apeninách (Šimůnek et al. 2021c). Bukové lesy v mediteránu jsou také ovlivněny suchem a jarními mrazy, což bylo doloženo například v Pyrenejích (Gazol et al. 2019) nebo v Apeninách (Nolè et al. 2018), ale sucha je limitujícím faktorem růstu buku lesního v Apeninách (Tognetti et al. 2019). Bukové porosty v jižních Apeninách jsou negativně korelované s teplotami a pozitivně korelované se srážkami, což tvoří přesný opak k výsledkům z výzkumných ploch v Krkonoších (Šimůnek et al. 2021c). Korelační vztahy ke srážkám a teplotám vůči přírůstu buku v Apeninách mohou být způsobeny zimní akumulací srážek do půdy (Piovesan & Schirone 2000). Negativní korelace přírůstu buku k teplotám na plochách v jižní Itálii by mohly být právě vysvětleny vlivem vyšších teplot na suchá období (Ferrara et al. 2019).

6.1.2. Struktura bukových porostů a jejich reakce na srážky a teploty

Výsledky z našich studií popisují, že variabilita struktury bukových porostů má vliv na dendrochronologické charakteristiky (Matisons et al. 2017). Rozdílná variabilita ve struktuře bukových porostů může být způsobena mnoha faktory jako například: rozdílným sklonem, nadmořskou výškou, stářím porostu, vývojem porostu a kvalitou stanoviště. Bukové porosty na Rýchorách se vyznačují strukturální složitostí a diverzitou, což bylo prokázáno již v minulosti (Vacek et al. 2010c, Vacek et al. 2015b). Heterogenní porosty buku lesního jsou stabilnější vůči klimatickým výkyvům (Mölder & Leuschner 2014). Naše výsledky tento fakt podporují a lze to vidět i na vyšších korelacích homogenních porostů buku s pravidelně se opakujícím slunečním cyklem, ale heterogenní porosty buku lesního lépe reagují se zkoumanými faktory teplot nebo srážek (Šimůnek et al. 2019a). Také je třeba zmínit, že struktura porostů buku lesního hraje roli v reakci na klima, kdy heterogenní porosty buku indikují i menší výkyvy v radiálním růstu buku (Šimůnek et al. 2019a, Šimůnek et al. 2020a). Tento fakt by mohl také přispět k lepší adaptabilitě lesních porostů na klimatickou změnu, kdy smíšené a rozrůzněné porosty reagují méně na klimatické výkyvy (Vacek et al. 2021). Příkladem tohoto tvrzení může být i fakt, že heterogenní porosty buku na Rýchorách v roce 2011 zaznamenaly menší výkyv vůči jarním mrazům (Šimůnek et al. 2019a, Šimůnek et al. 2020a).

6.2. Sluneční cyklus v radiálním růstu buku lesního

Sluneční cykly hrají roli v přírůstu buku lesního v Krkonoších, což popisují i publikace v této disertační práci. Naše výsledky potvrzují, že nejen Rýchory, ale i severní část Krkonoš jsou spojeny pozitivními korelacemi se slunečním cyklem (Šimůnek et al. 2020a, Šimůnek et al. 2021c). Sluneční cyklus byl také nalezen v radiálním růstu buku lesního i na výzkumné ploše na Broumovsku (Šimůnek et al. 2021a). Dokonce i výzkumné plochy z jižní Itálie zaznamenaly vliv slunečního cyklu na radiální růst, nicméně korelace byly zrcadlově záporné (Šimůnek et al. 2021c). Teoreticky lze rozdělit vliv slunečních cyklů na pozitivní a negativní vzhledem k radiálnímu růstu buku lesního. Například pozitivní vztah přírůstu borovice lesní byl také nalezen v severozápadním Rusku (Shumilov et al. 2011) i v Bulharsku (Komitov 2021). Naproti tomu v mediteránu v Portugalsku byl potvrzen negativní vztah přírůstu kůry dubu korkového vůči slunečnímu cyklu (Surový et al. 2008), kde například i borovice přímořská vykazuje negativní vztah růstu ke slunečnímu cyklu v severním Portugalsku (Dorotovič et al. 2014).

Různou reakci slunečního cyklu lze vyčíst z kros-korelací v této disertační práci (kapitola 5.1.3.), kde jsou zobrazeny různé korelace přírůstu a slunečních cyklů s posunem let v čase (Šimůnek et al. 2021c). Efekt kros-korelací se slunečními cykly lze přiřadit právě vlivu NAO, přičemž i u buku lesního v Itálii byl potvrzen vliv NAO na přírůst buku lesního (Piovesan & Schirone 2000). Ke změnám v přírůstu buku lesního v Itálii mohlo dojít díky vlivům proměnlivého NAO nad Evropou, což mohly způsobit rozdílné reakce kros korelací mezi

Krkonošemi a Apeninami (Wibig & Piotrowski 2018, Kotsias et al. 2020). Zajímavostí je, že během 80. let minulého století došlo k imisní kalamitě, která snížila radiální přírůst buku lesního (Špulák & Souček 2010, Vacek et al. 2013b, Šimůnek et al. 2019b) a zároveň výzkumné plochy v Itálii zaznamenaly také pokles radiálního růstu s časovým odstupem i když v jižní Itálii imisní kalamita nebyla. Lze tedy vznést teoretickou hypotézu, že imisní kalamita mohla být navíc ovlivněna negativními vlivy v souběhu se slunečním cyklem (Vacek & Matejka 2010, Vacek et al. 2013a), který se odráží ve výkyvech radiálního růstu buku lesního během slunečního minima (Šimůnek et al. 2021c).

6.2.1. Sluneční aktivita a její klimatická vazba na buk

Sluneční aktivita ovlivňuje klima na naší planetě (Le Mouél et al. 2019), což se také projevuje na severoatlantickém proudění (NOA) (Brugnara et al. 2013, Laurenz et al. 2019). V mnoha dalších výzkumech bylo též prokázáno, že efekt sluneční aktivity má též vliv na srážky i teploty (Mauas et al. 2016, Baker et al. 2018). Teploty na evropském kontinentu korelují s NAO převážně během zimního a jarního období (Lüdecke et al. 2020). Úhrny srážek jsou také propojeny se sluneční aktivitou, ale je důležité zmínit, že srážky jsou v průběhu roku ovlivněny sluneční aktivitou během července v Itálii a v České republice během měsíců května, června a července (Laurenz et al. 2019).

Větrné proudy vysoko v atmosféře tzv. „Jet streamy“ jsou spojeny se solárními cykly, kdy dochází během slunečního minima k blokaci těchto větrných proudů (Adolphi et al. 2014, Gray et al. 2016), což vede i k chladnějším zimním obdobím (Ma et al. 2018). Naproti tomu sluneční maximum vede ke zrychlení větrných proudů (Kodera & Kuroda 2002), které přes „Ferrel cells“ (Brönnimann et al. 2006) zvyšují tlak větrů působících na evropský kontinent. Toto může potvrdit i výzkum ve Španělsku, kde bylo zjištěno, že sluneční cyklus je spojen se srážkami a větrnými anomáliemi (Lopez-Bustins et al. 2007). Právě i větrné bouře mohou způsobit významné škody na porostech buku lesního, ale stále je to v menším měřítku než u smrkových porostů (Schütz et al. 2006). Větrné bouře tedy patří k hlavním činitelům, které poškozují bukové porosty a to se projevuje i v nahodilých těžbách buku lesního (Priewasser et al. 2013).

Sluneční cykly jsou spojeny s klimatickou změnou a teplotními rozdíly na povrchu planety a existuje i studie, která popisuje možné spojení nízké aktivity slunečních skvrn s klimaticky chladnými obdobími na naší planetě (Lockwood et al. 2017). Sluneční cykly ve spojení s kosmickým zářením (Hathaway 2015) jsou spojené i s formováním oblačnosti, která ovlivňuje množství světla dopadajícího na povrch planety. Malá sluneční aktivita tak vede k vyššímu množství kosmického záření, což vytvoří větší množství oblačnosti a tím se planeta ochlazuje (Easterbrook 2016, Ormes 2018). Dokonce i celková ozáření zemského povrchu kolísá dle slunečního cyklu zhruba o 0,1 % během 11 letého cyklu a právě i sluneční záření je vyšší během slunečního maxima. Celé světelné spektrum také vykazuje silné spojení s vlnovou délkou slunečního záření během slunečního cyklu (Tsiropoula 2003). S výsledky této disertační práce

může také souviset i fakt, že aktivita slunečních cyklů v posledních letech klesá (Singh & Bhargawa 2019) a s tím souběžně dochází od roku 1990 v Krkonoších k nižšímu radiálnímu růstu. V jižních Apeninách se také snižuje radiální růst buku od roku 2010 (Šimůnek et al. 2021c).

6.3. Přírozené cykly radiálního růstu buku lesního

Ve výsledcích spektrálních analýz radiálního růstu buku lesního v této disertaci se nachází nejčastěji 9 až 12leté cykly, které jsou zaznamenány u každé výzkumné plochy nebo alespoň je tento cyklus obsažen minimálně v jedné z časových period růstu buku lesního (Šimůnek et al. 2021c). Sluneční cyklus dokonce osciluje v 9 až 14leté periodě, která má různou intenzitu velikosti slunečních skvrn (Hathaway 2015). Některé faktory však mohou narušovat radiální přírůst buku lesního v průběhu slunečního cyklu. Například vliv nízkých teplot na začátku vegetačního období v roce 2011 může způsobit výrazné poškození rašícího asimilačního aparátu buku lesního (Šimůnek et al. 2019b).

Výsledky dokonce zaznamenaly další rozptýlení slunečního cyklu radiálního přírůstu buku, které probíhalo během imisní kalamity od roku 1970 až do 1987 (Vacek et al. 2015b, Vacek et al. 2019a). V této době došlo ke krátkodobému zvýšení radiálního přírůstu, které proběhlo od roku 1982 až do 1983, kdy došlo k ukončování slunečního maxima. Lze tedy teoreticky zmínit, že imisní kalamitu v 70. letech (Hlásny & Sitková 2010) mohl prohloubit právě i námi sledovaný sluneční cyklus. Dalším významným elementem, který snižuje korelace mezi slunečními cykly a přírůstem buku lesního v posledních letech, může být i zvyšující se koncentrace CO₂, která způsobuje celkové zvýšení přírůstu buku lesního, což bylo dokázáno například v jižní a střední Evropě (Rezaie et al. 2018).

Nicméně i přes rozptylující faktory je celková korelace radiálního přírůstu buku lesního ve střední Evropě se sluneční aktivitou nejvyšší (Šimůnek et al. 2020a, Šimůnek et al. 2021c, Šimůnek et al. 2021a). Vliv slunečních cyklů na přírůst borovice lesní byl zkoumán v severozápadním Rusku, kde dle autorů mohlo také dojít i ke změnám spektrálního složení záření Slunce společně s dalšími vlivy jako jsou cosmic rays nebo index aa (Kasatkina et al. 2019) a právě i sluneční záření osciluje během slunečního cyklu (Wu et al. 2018).

V našich datech jsou také nalezeny i krátkodobé 2 nebo 3leté cykly radiálního růstu buku lesního, které souvisí i s opakováním úhrnů srážek nebo se změnami teplot vzduchu (Šimůnek et al. 2020a, Šimůnek et al. 2021a). Tyto krátkodobé cykly by mohly být v radiálním růstu buku lesního spojené i se semennou produkcí, která se dle studie ze Švédska projevuje v 2 až 3letém opoždění semenné produkce od přírůstu. Tento vliv na semennou produkci buku lesního by mohl být spojen právě se sezonními teplotami (Drobyshev et al. 2010), což může vést k otázce, zda tyto cykly nejsou spojeny s produkcí semenných cyklů buku. Navíc také tyto kratší cykly mohou být spojeny i s cirkulací NAO (Laurenz et al. 2019)

Výsledky spektrálních analýz například z Broumovských stěn ukazují, že buk lesní cyklicky prochází kombinací 7 až 11letých cyklů. Tyto cykly jsou spojeny se 7letými teplotními cykly a 11 letými slunečními cykly (Šimůnek et al. 2021a), které se projevují v radiálním růstu buku lesního. Tyto informace doplňuje například i německá studie zabývající se fenologií buku lesního ze satelitních snímků ve vztahu k teplotám, která uvádí, že 8leté cykly teplot jsou obsaženy v rytmu růstu buku lesního (Carl et al. 2013). Delší 17 až 35leté cykly bychom mohli přiřadit k Hale cyklu (22letý cyklus), který se opakuje skrz meteorologické ukazatele jako je teplota nebo koncentrace ozonu (Tsiropoula 2003). Právě i 22 letý cyklus může být nalezen dokonce i v letokruzích stromů v Tibetu (Wang & Zhang 2011b) nebo v severozápadním Rusku (Shumilov et al. 2011).

6.4. Klimatické výkyvy a změna druhové skladby ve prospěch buku?

Všechny lesní porosty jsou ovlivňovány větším výskytem extrémních vlivů počasí během klimatické změny. Tyto extrémní výkyvy jsou například silné bouře, vítr, sucho, záplavy nebo lesní požáry (Lopez-Bustins et al. 2007, Lindner et al. 2010, Young et al. 2017, Whitman et al. 2019). Klimatické výkyvy se dají v České republice shrnout v lesnickém managementu pod nahodilé těžby, které jsou způsobeny nejrůznějšími škodlivými činiteli jako například větrnými bouřemi, kůrovcem, imisními disturbancemi, suchem atd. (Hlásny & Turčáni 2013, Mitchell 2013, Vacek et al. 2013c, Hlásny et al. 2014). Navíc v roce 2019 byl podíl těžeb jehličnatého dříví na celkových těžbách 96 %. Celková těžba dříví v České republice je nyní složena hlavně z jehličnatého dříví, což je dáno především zpracováním nahodilých těžeb. Při nynějším tempu změny druhové skladby dochází k rapidnímu nárůstu podílu listnatých dřevin, kdy od roku 2000 do 2019 došlo k nárůstu skladby listnatých dřevin o 5,5 % , přičemž buk lesní za toto období tvořil téměř polovinu, tedy 2,8 % (MZe 2020).

Celkově zaznamenaly jehličnaté dřeviny v Evropě výrazný pokles, který nejlépe charakterizuje odumírání smrku ztepilého během klimatické změny, což bylo zaznamenáno v Německu (Siefertmann-Harms et al. 2004), v Rakousku (Tomiczek 1995), v Polsku (Grodzki 2010), v České republice a na Slovensku (Hlásny & Sitková 2010, MZe 2020). Tyto lesy jsou náchylné k řadě sekundárních chorob a škůdců a jsou obzvláště citlivé na teplejší a sušší klima (Seidl et al. 2008). Naproti tomu buk lesní lépe odolává výkyvům nedostatku srážek, lépe snáší i větrné bouře než smrk ztepilý (Schütz et al. 2006, Kacálek et al. 2017). Nejen, že tato dřevina dobře odolává klimatickým výkyvům, ale také navíc tvoří buk agresivnější přirozenou obnovu než smrk ztepilý (Slanař et al. 2017). Buk lesní se také jeví jako nejlepší varianta za smrk díky svým podobným růstovým nárokům a dokonce i ve směsi má tato dřevina velmi pozitivní vliv na smrkové porosty (Kacálek et al. 2017, Vacek et al. 2021).

Z našich výsledků vyplývá, že teploty vzduchu mají signifikantní vliv na vývoj bukových porostů, ale i nahodilých těžeb od roku 1961 do roku 2018, ale úhrn srážek již korelaci na nahodilé těžby statisticky významnou nemá (Šimůnek et al. 2019b, Šimůnek et al. 2020b).

Vysoké roční teploty často vedou i k suchým obdobím, které ovlivňují právě i celkové těžby dříví, což je příklad roku 2003, kdy se také snížil i úhrn srážek na podprůměrných 504 mm nebo období roku 2018, kdy spadlo pouze 522 mm za předpokladu, že v průměru spadne 620 mm (ČHMÚ 2020). Během sucha dochází k přemnožení mnoha škůdců jako například *Ips typographus*, který napadá i stromy zdravé, což má dopad na lesnický management (Schroeder & Lindelöw 2002, Turčáni & Hlásny 2007). Sucho a větrné orkány například v roce 2018 vedly ke zvýšení nahodilých těžeb, kdy bylo vytěženo téměř 23,0 mil. m³ (tj. 90 % celkových těžeb) a to zejména v důsledku enormního šíření kůrovce na Moravě a na Českomoravské vrchovině (MZe 2020). Při ústupu jehličnatých lesů dochází právě ke zmíněnému prosazování buku lesního (*Fagus sylvatica* L.) a ostatních listnatých dřevin při obnově lesa, což se jeví jako lepší varianta k adaptaci na klimatické výkyvy než smrk ztepilý (Kolář et al. 2017, Vacek et al. 2019a, Vacek et al. 2021).

6.3.1. Dopad nahodilých těžeb na management pěstování listnatých dřevin v souběhu se slunečním cyklem

Lesní kalamity v České republice většinou začínají větrnými bouřemi, které vedou k oslabení stromů, což následně přejde v přemnožení kůrovce, který poté začne likvidovat jehličnaté porosty během suchých let (Hlásny & Turčáni 2013, Nováková & Edwards-Jonášová 2015). Tento scénář se stal například v lednu roku 2007, kdy velké škody na lesních porostech způsobil orkán Kirill (Ludwig et al. 2015), který spustil dominový efekt destrukce lesních porostů a tím se v lesním hospodářství zvýšily nahodilé těžby až na 15 mil. m³ (MZe 2020). Suchá období mohou souviset na některých místech na planetě i s cyklem slunečních skvrn, což popisuje studie z Kuvajtu (Almedej 2016) nebo z Číny, kde dokonce střídání sucha a záplav probíhá se slunečním cyklem (Li et al. 2015). Na zvýšení množství spadlých srážek také navazuje i výskyt většího množství abnormálních větrů, které doprovází opět výskyt slunečních cyklů, což bylo popsáno například ve Španělsku (Lopez-Bustins et al. 2007).

Naše výsledky ukazují, že nahodilé těžby kulminují v souběhu se slunečním cyklem, který se v posledních letech projevuje v těžbách dříví čím dál intenzivněji. Naše výsledky dokládají, že v průběhu posledních let dochází k vyšším nahodilým těžbám během slunečního minima. Takovým příkladem může být rok 2007 nebo rok 2018, kdy došlo ke kulminacím nahodilých těžeb během slunečního minima. Naopak v období let 2010 až 2012 nebo v období let 2004 až 2006 se podařilo nahodilé těžby snížit právě během slunečního maxima (Šimůnek et al. 2020b). Přírodní podmínky a rozložení úhrnů srážek během ročního období nejsou rovnoměrné v rámci jednoho roku a také se může měnit i jejich intenzita s nadmořskou výškou (Brázdil et al. 2021). Sluneční cykly byly detekovány dokonce i v průměrných teplotách vzduchu ve výšce 2 km a výše (Kumar et al. 2018). Další studie popisuje, že dokonce sluneční cykly významně ovlivňují srážky v Evropě během měsíce února (Laurenz et al. 2019), což dokonce zaregistrovaly naše analýzy ze softwaru Dendroclim, které ukazují signifikantní korelaci

radiálního růstu buku na Rýchorách v měsících lednu a únoru (Šimůnek et al. 2019b). Dokonce i teploty vzduchu v Evropě jsou ovlivňovány slunečním cyklem společně s cirkulací NAO, kdy je tento efekt odlišný v rámci ročního období (Lüdecke et al. 2020). Sluneční cykly mohou být propojeny s nahodilými těžbami právě přes NAO.

Důležitým faktem, který doplňuje výzkum vlivu klimatických faktorů na lesnický management této disertace je, že během slunečního cyklu dochází k fluktuacím množství kosmických paprsků dopadajících do atmosféry Země, čímž může být ovlivňován vodní cyklus (Tinsley 2012, Al-Tameemi & Chukin 2016). Inverzní vztah mezi plochou slunečních skvrn a kosmickým zářením je známým faktem (Hathaway 2015). Možný vztah mezi nahodilými těžbami, slunečním cyklem a kosmickým zářením byl popsán našimi korelacemi. Z našich dat také vyplývá, že kosmické paprsky mají vysoké korelace s množstvím nahodilých těžeb v časové periodě 1973–2018 (Šimůnek et al. 2020b). Tento fakt může být spojen s tvorbou aerosolů, které tvoří základní složku při tvorbě mrakového pokryvu (Haywood & Boucher 2000, Maghrabi & Kudela 2019) a dokonce by tento úkaz mohla doplnit i funkční hypotéza pracující s teorií blokování větrných proudů během slunečního minima (Tinsley 2012). Výkyvy slunečního cyklu vedou i k variabilitě slunečního záření, které osciluje o 0,1% v 11ti letém cyklu a právě sluneční záření je vyšší během slunečního maxima a světelné spektrum vykazuje silné spojení s vlnovou délkou slunečního záření během slunečního cyklu (Tsiropoula 2003).

Korelace slunečního cyklu s cyklem nahodilých těžeb by mohla pomoci lesníkům lépe reagovat na klimatické výkyvy a tím lépe připravovat zdroje pro likvidaci kalamit. Cyklické fluktuační těžeb navíc vytváří ekonomický tlak na lesnický sektor, který je nucen prodávat vysoké objemy dříví v krátkém čase, což vede k fluktuacím cen dříví na trhu (Jandl 2020, Hlásny et al. 2021).

Všechny typy těžeb také vykazují i ve spektrální analýze 11 letý cyklus, který je nejvíce patrný na nahodilých těžbách, a právě nahodilé těžby probíhají souběžně se solárním cyklem (Šimůnek et al. 2020b), na což navazují i fluktuační těžby mezi těžbou jehličnatých a listnatých dřevin (Šimůnek et al. 2021b). Celkové těžby dříví navíc probíhají i v dlouhodobějším 60letém cyklu, který prochází přirozenými cyklickými disturbancemi (Mikol et al. 2020, Vacek et al. 2021). Podobné cyklické výsledky na dřevinách byly zaznamenány i v radiálním růstu borovice lesní v západní ruské stepi, kde byly zaznamenány 10–12leté, 22leté, 32–36leté cykly a dokonce zde byly i 70–90leté fluktuační dle střídání režimu vlhkosti (Matveev et al. 2017). Procentuální střídání listnatých a jehličnatých těžeb prochází také 11letým cyklem, což je způsobeno hlavně větším množstvím jehličnatých těžeb, které jsou silně cyklicky zvyšovány nahodilými těžbami (MZe 2020, Šimůnek et al. 2021b). Jehličnaté porosty mají horší zdravotní stav a dokonce tyto porosty i hůře regenerují než listnaté a proto listnaté porosty lépe odolávají klimatickým výkyvům (MZe 2020).

Sluneční aktivita, která je spjatá i s větrným prouděním „Jet streams“ se může podílet i na tvorbě silných větrů, které jsou během slunečního minima blokovány (Hall et al. 2015, Ma et al. 2018). Naproti tomu sluneční maximum vede ke zrychlení větrných proudů (Kodera & Kuroda 2002), které nejsou blokovány (Brönnimann et al. 2006). Proměnlivé větrné proudění může ovlivnit i počasí během zimního období a tím například může dojít i ke krátkodobým změnám srážkového režimu (Laurenz et al. 2019, Ahmed et al. 2020), což zaznamenaly i naše výsledky z dendrochronologických analýz buku lesního, který snížil svůj radiální přírůst během slunečního minima díky nižším teplotám vzduchu (Šimůnek et al. 2020a). V opačném případě bylo dokonce popsáno v Turecku, že právě nepříznivé větrné proudění „Jet streamů“ může být zodpovědné i za tvorbu podmínek a šíření velkých lesních požárů (Uğur & Feriha 2017, Jain & Flannigan 2021).

Výzkum tohoto tématu solárních cyklů v radiálním přírůstu mnoha druhů lesních dřevin je sice znám (Shumilov et al. 2011, Wang & Zhang 2011b, Dorotovič et al. 2014, Šimůnek et al. 2020a), ale v lesnictví stále chybí ucelený pohled na solární cykly a jejich vliv na evropský lesnický management. Cyklický efekt střídání listnatých a jehličnatých těžeb by také mohl lépe doplnit fakt, že migrace buku lesního probíhá i do severovýchodních oblastí v rámci Evropy (Kramer et al. 2010), kdy jehličnaté dřeviny ustupují klimatické změně a uvolněný prostor místo nich je nahrazován listnatými dřevinami (Hahn & Fanta 2001, Priewasser et al. 2013), které u nás zaujímá hlavně buk lesní (MZe 2020).

7. Závěr a doporučení pro praxi

Disertační práce se zabývá bukem lesním ve východních Krkonoších ve vztahu ke klimatickým podmínkám srážek a teplot. Hodnocena je také struktura bukových porostů, vliv imisní zátěže a souběh radiálního růstu buku se slunečním cyklem. Tato práce obsahuje studie z Broumovských stěn a z jižní Itálie a porovnává růstové podmínky s východními Krkonošemi. Využité poznatky z výzkumu bukových porostů byly použity pro zjištění vlivu klimatických změn na lesnický management, který je zastoupen v podobě ročních objemů celkové, nahodilé, listnaté nebo jehličnaté těžby dříví v České republice.

Bukové porosty ve východních Krkonoších patří ke stabilním klimaxovým porostům, které dokážou reagovat na nepříznivé klimatické podmínky, ale zároveň se dobře adaptují na antropogenní vlivy člověka v podobě imisní zátěže. Výzkum v Krkonoších dokládá, že bukové porosty lépe reagují na klimatické výkyvy, pokud mají rozrůzněnou a nepravidelnou heterogenní strukturu porostů. Naproti tomu homogenní bukové porosty reagují na výkyvy klimatických podmínek výrazněji. Bučiny na Rýchorách nejvíce reagují na teploty a následně na úhrny srážek. Ze zkoumaných faktorů v posledních letech bučiny nejvíce reagují na sluneční cyklus. V našich výsledcích jsme také zaznamenali vliv imisní zátěže (SO₂, NO_x a O₃) na radiální růst buku lesního v letech 1975–1989. Také jsme doložili výrazné poškození asimilačního aparátu mrazem v roce 2011.

Radiální růst buku lesního reaguje významně na 11letý sluneční cyklus, který byl nalezen v letokruzích na výzkumných plochách v Krkonoších, na Broumovských stěnách, ale i v jižní Itálii. Homogenní porosty buku lesního více reagovaly na sluneční cyklus než heterogenní porosty. Výzkumné plochy v Krkonoších reagují pozitivně na sluneční cyklus, sezonní teploty a roční úhrny srážek, naproti tomu výzkumné plochy v jižní Itálii korelují přesně obráceně než výzkumné plochy v centrální Evropě. Z hlediska spektrálních analýz jsou letokruhy buku lesního kombinací teplot a slunečního cyklu, kdy byly nalezeny 4 až 7leté dále 9 až 12leté a 17 až 35leté cykly, přičemž 7,5 až 11leté cykly let tvoří průnik mezi cykly sezonních teplot a sluneční aktivity.

Z hlediska reakce lesnického managementu na klimatické podmínky jsou hodnoceny nahodilé těžby, celkové těžby, listnaté těžby a jehličnaté těžby dříví, kdy se předpokládá, že tyto těžby vyjadřují celkový stav lesního hospodářství. Těžba dříví reaguje na klimatické, antropogenní a politické vlivy. Celková těžba se nejvíce skládá z jehličnatých těžeb, které nejlépe korelují s průměrnými ročními teplotami a naproti tomu nahodilé těžby nejvíce korelují se slunečními cykly. Zároveň v posledních letech dochází k zesilujícímu efektu 11letého slunečního cyklu na rozsah nahodilých těžeb hlavně v posledních dvou desetiletích. Nahodilé těžby také signifikantně reagují na průměrné roční teploty během celého sledovaného období.

Spektrální analýzy dat ukazují, že sluneční 11letý cyklus se nejvíce projevuje u nahodilých těžeb i listnatých těžeb a tento cyklický jev se projevuje i u procentuálního střídání jehličnatých a listnatých těžeb.

Lesnický management by prakticky mohl využít poznatky z této disertační práce v pěstování lesa a v plánování lesního hospodářství. Na nepříznivých stanovištích náchylnějších ke klimatickým výkyvům by homogenní bukové porosty měly být více prosvětlovány za účelem podrostního hospodaření s větší porostní diferenciací. Zároveň by při tomto prosvětlování došlo ke zlepšení rezistence bukových porostů vůči klimatickým výkyvům. Bukové porosty jsou nejvíce významně ovlivněné 7letým až 11letým růstovým cyklem, a proto doporučujeme tuto vlastnost využít v semenářství, kdy by tyto poznatky mohly být v budoucnu využity například při sběru osiva během semenných let. Také by tyto znalosti mohly lesníkům pomoci v podrostním hospodaření, tak aby dokázali vypozařovat blížící se oslabení bukových porostů a přitom teoreticky odvodit výskyt semenného roku. Nicméně poznatky v kombinaci se semennými roky jsou třeba více prověřit budoucím výzkumem.

Samotný lesnický management by mohl využít poznatky z našich výsledků, kde je popsána kauzalita mezi 11letým slunečním cyklem a cyklem nahodilých těžeb. Znalosti této kauzality by mohly lesnickému managementu pomoci v adaptaci na klimatické výkyvy, které krátkodobě trápí přebytky nebo nedostatky různých služeb, dříví i sadebního materiálu. Znalost opakování negativních událostí v pravidelných cyklech by mohla pomoci včas vytvořit rezervy pro zvládnutí náhlých kalamit. Poznatky z této disertační práce mohou být interpretovány mnoha způsoby, ale pro budoucí využití do praktického lesnického managementu bude nezbytný další výzkum. Do použitých analýz vstupuje i velké množství dalších faktorů, které by mohly některé souvislosti detailněji popsat. Nicméně, cyklické jevy zmíněné v této disertaci mohou pomoci v pochopení dlouhodobějších klimatických výkyvů, které se promítají ve všech sférách lesnického managementu.

Tato disertační práce tvoří první krok k ucelenějšímu pochopení cyklických vztahů v bukových porostech a v lesnickém managementu. Novou lesnickou filozofií budoucnosti by mělo být předání znalostí cyklických událostí, které se vracejí v různých intervalech a intenzitách. Pokud by lesnický sektor dokázal do svého plánování zanést potenciální extrémní budoucí události, tak by bylo možné lépe se připravit na klimatické výkyvy. Tyto znalosti by tak mohly zlepšit trvalou udržitelnost lesnické výroby a zároveň by mohly snížit dopady v důsledku klimatických změn.

8. Seznam literatury a použitých zdrojů

- Abbott D, Juhl R (2016). ScienceDirect New historical records and relationships among 14 C production rates , abundance and color of low latitude auroras and sunspot abundance q. *Advances in Space Research*. 58: 2181–2246. - doi: 10.1016/j.asr.2016.07.015
- Adolphi F, Muscheler R, Svensson A, Aldahan A, Matthes K (2014). Persistent link between solar activity and Greenland climate during the Last Glacial Maximum. *Nature Geoscience*. 7: 662–666. - doi: 10.1038/NGEO2225
- Aertsen W, Janssen E, Kint V, Bontemps JD, Van Orshoven J, Muys B (2014). Long-term growth changes of common beech (*Fagus sylvatica* L.) are less pronounced on highly productive sites. *Forest Ecology and Management*. 312: 252–259. - doi: 10.1016/j.foreco.2013.09.034
- Ahmed F, Adnan S, Latif M (2020). Impact of jet stream and associated mechanisms on winter precipitation in Pakistan. *Meteorology and Atmospheric Physics*. 132: 225–238. - doi: 10.1007/s00703-019-00683-8
- Al-Tameemi MA, Chukin V V. (2016). Global water cycle and solar activity variations. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 142: 55–59. - doi: 10.1016/j.jastp.2016.02.023
- Almedeij J (2016). Long-term periodic drought modeling. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 30: 901–910. - doi: 10.1007/s00477-015-1065-x
- Alvarez S, Ortiz C, Díaz-Pinés E, Rubio A (2016). Influence of tree species composition, thinning intensity and climate change on carbon sequestration in Mediterranean mountain forests: a case study using the CO2Fix model. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 21: 1045–1058. - doi: 10.1007/s11027-014-9565-4
- Aosaar J, Drenkhan T, Adamson K, Aun K, Becker H, Buht M, Drenkhan R, Fjodorov M, Jürimaa K, Morozov G, Pihlak L, Piiskop K, Riit T, Varik M, Väär R, Uri M, Uri V (2020). The effect of stump harvesting on tree growth and the infection of root rot in young Norway spruce stands in hemiboreal Estonia. *Forest Ecology and Management*. 475: 118425. - doi: 10.1016/j.foreco.2020.118425
- Ashraf MI, Bourque CPA, MacLean DA, Erdle T, Meng FR (2015). Estimation of potential impacts of climate change on growth and yield of temperate tree species. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 20: 159–178. - doi: 10.1007/s11027-013-9484-9
- Assmann E (1950). Die Buchen-Hochdurchforstungsversuche der ehemaligen Preußischen Versuchsanstalt. *Fw. Cbl*. 69: 373–421.
- Baker JCA, Gloor M, Boom A, Neill DA, Cintra BBL, Clerici SJ, Brienen RJW (2018). Questioning the Influence of Sunspots on Amazon Hydrology: Even a Broken Clock Tells the Right Time Twice a Day. *Geophysical Research Letters*. 45: 1419–1422. - doi: 10.1002/2017GL076889
- Barna M (2001). Production of biomass of beech (*Fagus sylvatica* L.) leaves and buds after cutting of various intensity. *Journal of Forest Science*. 47: 164–173.
- Barna M, Ježík M, Sedmák R (2011a). Rast , produkcia a vývoj dospelých bukových porastov. Growth , production and yield of mature beech stands. (M. Barna, J. Kulfan, & E. Bublinec, Eds.). Veda, Bratislava.
- Barna M, Kulfan J, Bublinec E (2011b). Buk a bukové ekosystémy Slovenska. Bratislava, pp. 636.
- Beer J, Blinov A, Bonani G, Finkel RC, Hofmann HJ, Lehmann B, Oeschger H, Sigg A, Schwander J, Staffelbach T, Stauffer B, Suter M, Wötflü W (1990). Use of ¹⁰Be in polar ice to trace the 11-

- year cycle of solar activity. *Nature*. 347: 164–166. - doi: 10.1038/347164a0
- Bellassen V, Luysaert S (2014). Carbon sequestration: managing forests in uncertain times. *Nature*. 506: 153–155. - doi: 10.1038/506153a
- Berger WH (2010). On glacier retreat and drought cycles in the Rocky Mountains of Montana and Canada. *Quaternary International*. 215: 27–33. - doi: 10.1016/j.quaint.2009.01.003
- Bice D, Montanari A, Vučetić V, Vučetić M (2012). The influence of regional and global climatic oscillations on Croatian climate. *International Journal of Climatology*. 32: 1537–1557. - doi: 10.1002/joc.2372
- Biondi F, Waikul K (2004). DENDROCLIM2002 : A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers & Geosciences*. 30: 303–311. - doi: 10.1016/j.cageo.2003.11.004
- Blackmon ML (1976). A climatological spectral study of the 500 mb geopotential height of the Northern Hemisphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*. - doi: 10.1175/1520-0469(1976)033<1607:ACSSOT>2.0.CO;2
- Blomquist M, Larsson Herrera S, Hofmann J, Beram RC, Cleary M, Rönnerberg J (2020). Size matters but is big always better? Effectiveness of urea and Phlebiopsis gigantea as treatment against Heterobasidion on Picea abies stumps of variable size. *Forest Ecology and Management*. 462: 117998. - doi: 10.1016/j.foreco.2020.117998
- Bolte A, Hilbrig L, Grundmann B, Kampf F, Brunet J, Roloff A (2010). Climate change impacts on stand structure and competitive interactions in a southern Swedish spruce-beech forest. *European Journal of Forest Research*. 129: 261–276. - doi: 10.1007/s10342-009-0323-1
- Bonev BP, Penev KM, Sello S (2004). Long-Term Solar Variability and the Solar Cycle in the 21st Century. *The Astrophysical Journal*. 605: 81–84. - doi: 10.1086/420695
- Bosela M, Štefančík I, Petráš R, Vacek S (2016). The effects of climate warming on the growth of European beech forests depend critically on thinning strategy and site productivity. *Agricultural and Forest Meteorology*. 222: 21–31. - doi: 10.1016/j.agrformet.2016.03.005
- Bošela M, Štefančík I, Petráš R, Vacek S (2016). The effects of climate warming on the growth of European beechforests depend critically on thinning strategy and site productivity.e. *Agricultural and Forest Meteorology*. 222: 21–31.
- Brázdil R, Zahradníček P, Dobrovolný P, Štěpánek P, Trnka M (2021). Observed changes in precipitation during recent warming: The Czech Republic, 1961–2019. *International Journal of Climatology*. 41: 3881–3902. - doi: 10.1002/joc.7048
- Brönnimann S, Ewen T, Griesser T, Jenne R (2006). Multidecadal signal of solar variability in the upper troposphere during the 20th century. *Space Science Reviews*. 125: 305–317. - doi: 10.1007/s11214-006-9065-2
- Brugnara Y, Brönnimann S, Luterbacher J, Rozanov E (2013). Influence of the sunspot cycle on the Northern Hemisphere wintertime circulation from long upper-air data sets. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 13: 6275–6288. - doi: 10.5194/acp-13-6275-2013
- Bunn A, Korpela M, Biondi F, Campelo F, Mérian P, Qeadan F, Zang C, Pucha-Cofrep D, Wernicke J (2018a). An introduction to dplR. Retrieved from <https://r-forge.r-project.org/projects/dplr/>
- Bunn A, Mikko K, Biondi F, Campelo F, Merian P, Qeadan F, Zang C, Pucha-Cofrep D, Wernicke J (2018b). Dendrochronology Program Library in R. R package version 1.6.8. *Dendrochronologia*. - doi: doi: 10.1016/j.dendro.2008.01.002

- Bunn AG (2008). A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*. 26: 115–124. - doi: 10.1016/j.dendro.2008.01.002
- Bytnerowicz A, Omasa K, Paoletti E (2007). Integrated effects of air pollution and climate change on forests: A northern hemisphere perspective. *Environmental Pollution*. 147: 438–445. - doi: 10.1016/j.envpol.2006.08.028
- Carl G, Doktor D, Koslowsky D (2013). Phase difference analysis of temperature and vegetation phenology for beech forest : a wavelet approach. 1221–1230. - doi: 10.1007/s00477-012-0658-x
- Cecchini S, Galli M, Nanni T, Ruggiero L (1996). Solar variability and ring widths in fossil trees. *Nuovo Cimento Della Societa Italiana Di Fisica C*. 19: 527–536. - doi: 10.1007/BF02523768
- Čermák P, Kolář T, Žid T, Trmka M, Rybniček M (2019). Norway spruce responses to drought forcing in areas affected by forest decline. *Forest Systems*. 28. - doi: 10.5424/fs/2019283-14868
- ČHMÚ (2020). Czech Hydrometeorological Institute. Retrieved from <http://portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/uzemni-srazky>
- Christensen M, Hahn K, Mountford EP, Ódor P, Standovár T, Rozenberger DJ, Diaci Wijdeven S, Meyer P, WINTER S, VRSKA E (2005). Dead wood in European beech (*Fagus sylvatica*) forest reserves. *Ecology and Management*. 210: 267–282.
- Chytrý M, Kučera T, Kočí M, Grulich V, Lustyk P (2010). Katalog biotopů České republiky. Druhé vydání. Agentura ochrany přírody a krajiny ČR, Praha, pp. 450.
- Cicák A, Mihál I, Tsakov C, Petkov P (2006). Actual status of the beech bark necrotic disease in North Western Bulgaria. - doi: 10.17221/4505-JFS
- Clark PJ, Evans FC (1954). Distance to nearest neighbour as a measure of spatial relationship in populations. *Ecology*. 35: 445–453.
- Comps B, Gömöry D, Letouzey J, Thiébaud B, Petit RJ (2001). Diverging trends between heterozygosity and allelic richness during postglacial colonization in the European beech. *Genetics*. 157: 389–397. - doi: 10.1093/genetics/157.1.389
- Conte E, Lombardi F, Battipaglia G, Palombo C, Altieri S, La Porta N, Marchetti M, Tognetti R (2018). Growth dynamics, climate sensitivity and water use efficiency in pure vs. mixed pine and beech stands in Trentino (Italy). *Forest Ecology and Management*. 409: 707–718. - doi: 10.1016/j.foreco.2017.12.011
- Cook ER, Shiyatov SG, Mazepa VS, Ecology A, Branch U (1990). *Methods of Dendrochronology Applications*. (E. R. Cook & L. A. Kairiukstis, Eds.). Tree-Ring Laboratory, Lamont-Ooherty Geological Observatory, Columbia University, New York, pp. 393. - doi: DOI 10.1007/978-94-015-7879-0
- Di Filippo A, Biondi F, Čufar K, De Luis M, Grabner M, Maugeri M, Presutti Saba E, Schirone B, Piovesan G (2007). Bioclimatology of beech (*Fagus sylvatica* L.) in the Eastern Alps: Spatial and altitudinal climatic signals identified through a tree-ring network. *Journal of Biogeography*. 34: 1873–1892. - doi: 10.1111/j.1365-2699.2007.01747.x
- Dittmar C, Zech W, Elling W (2003a). Growth variations of Common beech (*Fagus sylvatica* L.) under different climatic and environmental conditions in Europe—a dendroecological study. *Forest Ecology and Management*. 173: 63–78. - doi: 10.1016/S0378-1127(01)00816-7
- Dittmar C, Zech W, Elling W (2003b). Growth variations of Common beech (*Fagus sylvatica* L.) under different climatic and environmental conditions in Europe - A dendroecological study. *Forest Ecology and Management*. 173: 63–78. - doi: 10.1016/S0378-1127(01)00816-7

- Dobor L, Hlásný T, Rammer W, Zimová S, Barka I, Seidl R (2020). Is salvage logging effectively dampening bark beetle outbreaks and preserving forest carbon stocks? *Journal of Applied Ecology*. 57: 67–76. - doi: 10.1111/1365-2664.13518
- Dobrovolný L, Tesař V (2010). Growth and characteristics of old beech (*Fagus sylvatica* L.) trees individually dispersed in spruce monocultures. 2010: 406–416.
- Dong L, Fu C, Liu J, Zhang P (2018). Combined Effects of Solar Activity and El Niño on Hydrologic Patterns in the Yoshino River Basin, Japan. *Water Resources Management*. 32: 2421–2435. - doi: 10.1007/s11269-018-1937-1
- Dorado-Liñán I, Piovesan G, Martínez-Sancho E, Gea-Izquierdo G, Zang C, Cañellas I, Castagneri D, Di Filippo A, Gutiérrez E, Ewald J, Fernández-de-Uña L, Hornstein D, Jantsch MC, Levanič T, Mellert KH, Vacchiano G, Zlatanov T, Menzel A (2019). Geographical adaptation prevails over species-specific determinism in trees' vulnerability to climate change at Mediterranean rear-edge forests. *Global Change Biology*. 25: 1296–1314. - doi: 10.1111/gcb.14544
- Dorotovič I, Louzada JL, Rodrigues JC, Karlovský V Impact of solar activity on the growth of pine trees: Case study., 133 *European Journal of Forest Research* 639–648 (2014). - doi: 10.1007/s10342-014-0792-8
- Drobyshev I, Övergaard R, Saygin I, Niklasson M, Hickler T, Karlsson M, Sykes MT (2010). Masting behaviour and dendrochronology of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in southern Sweden. *Forest Ecology and Management*. 259: 2160–2171. - doi: 10.1016/j.foreco.2010.01.037
- Drößler L (2006). Struktur und Dynamik von zwei Buchenurwäldern in der Slowakei. In: Dissertation, Universität Göttingen, Fakultät der Forstwissenschaften und Waldökologie.
- Dulamsuren C, Hauck M, Kopp G, Ruff M, Leuschner C (2017). European beech responds to climate change with growth decline at lower, and growth increase at higher elevations in the center of its distribution range (SW Germany). *Trees - Structure and Function*. 31: 673–686. - doi: 10.1007/s00468-016-1499-x
- Easterbrook DJ (2016). Cause of global climate changes: Correlation of global temperature, sunspots, solar irradiance, cosmic rays, and radiocarbon and beryllium production rates. *Evidence-Based Climate Science: Data Opposing CO2 Emissions as the Primary Source of Global Warming: Second Edition*. 245–262. - doi: 10.1016/B978-0-12-804588-6.00014-8
- Eilmann B, Sterck F, Wegner L, Vries SMG De, Arx G Von, Mohren GMJ, Ouden J Den (2014). Wood structural differences between northern and southern beech provenances growing at a moderate site. *Tree Physiology*. 34: 882–893. - doi: 10.1093/treephys/tpu069
- Etzold S, Ziemińska K, Rohner B, Bottero A, Bose AK, Ruehr NK, Zingg A, Rigling A (2019). One Century of Forest Monitoring Data in Switzerland Reveals Species- and Site-Specific Trends of Climate-Induced Tree Mortality. *Frontiers in Plant Science*. 10. - doi: 10.3389/fpls.2019.00307
- EUFORGEN (2020). *Fagus sylvatica*, European beech. Retrieved from <http://www.euforgen.org/species/fagus-sylvatica/>
- Fabrika M, Ďurský J (2005). Algorithms and software solution of thinning models for SIBYLA growth simulator. *Journal of Forest Science*. 51: 431–445. - doi: 10.17221/4577-jfs
- Ferrara C, Marchi M, Fabbio G, Fares S, Bertini G, Piovosi M, Salvati L (2019). Exploring nonlinear intra-annual growth dynamics in *Fagus sylvatica* L. trees at the Italian ICP-forests level II network. *Forests*. 10: 1–15. - doi: 10.3390/f10070584
- Filippo ADI, Biondi F, Maugeri M (2012a). Bioclimate and growth history affect beech lifespan in the

Italian Alps and Apennines. *Global Change Biology*. 18: 960–972. - doi: 10.1111/j.1365-2486.2011.02617.x

Filippo ADI, Biondi F, Maugeri M (2012b). Bioclimate and growth history affect beech lifespan in the Italian Alps and Apennines. 960–972. - doi: 10.1111/j.1365-2486.2011.02617.x

Fritts HC (1976). *Tree Rings and Climate*. (London, Ed.). Academic Press Inc., Tucson, Arizona, U.S.A., pp. 582.

Gärtner S, Reif A (2004). The impact of forest transformation on stand structure and ground vegetation in the southern Black Forest, Germany. *Plant and Soil*. 264: 35–51. - doi: 10.1023/B:PLSO.0000047751.25915.77

Gazol A, Camarero JJ, Colangelo M, de Luis M, Martínez del Castillo E, Serra-Maluquer X (2019). Summer drought and spring frost, but not their interaction, constrain European beech and Silver fir growth in their southern distribution limits. *Agricultural and Forest Meteorology*. 278: 107695. - doi: 10.1016/j.agrformet.2019.107695

Geßler A, Keitel C, Matyssek R, Seiler W, Rennenberg H (2007). Potential risks for European beech (*Fagus sylvatica* L.) in a changing climate Potential risks for European beech (*Fagus sylvatica* L.). *Trees*. 21: 1–11. - doi: 10.1007/s00468-006-0107-x

Gömöry D, Longauer R, Hlásny T, Pacalaj M, Strmeň S, Krajmerová D (2012). Adaptation to common optimum in different populations of Norway spruce (*Picea abies* Karst.). *European Journal of Forest Research*. 131: 401–411. - doi: 10.1007/s10342-011-0512-6

Granier A, Reichstein M, Bréda N, Janssens IA, Falge E, Ciais P (2007). Evidence for soil water control on carbon and water dynamics in European forests during the extremely dry year: 2003. *Agricultural and Forest Meteorology*. 143: 123–145.

Gray LJ, Woollings TJ, Andrews M, Knight J (2016). Eleven-year solar cycle signal in the NAO and Atlantic/European blocking. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 142: 1890–1903. - doi: 10.1002/qj.2782

Gregow H, Laaksonen A, Alper ME (2017). Increasing large scale windstorm damage in Western, Central and Northern European forests, 1951–2010. *Scientific Reports*. 7: 1–7. - doi: 10.1038/srep46397

Grodzki W (2010). The decline of Norway spruce *Picea abies* (L.) Karst. stands in Beskid Śląski and Żywiecki: theoretical concept and reality. *Beskydy*. 3: 19–26.

Gupta R, Gil-Alana LA, Yaya OS (2015). Do sunspot numbers cause global temperatures? Evidence from a frequency domain causality test. *Applied Economics*. 47: 798–808. - doi: 10.1080/00036846.2014.980575

Hahn K, Fanta J (2001). Contemporary beech forest management in Europe: Working Report 1., pp. 175.

Hall R, Erdélyi R, Hanna E, Jones JM, Scaife AA (2015). Drivers of North Atlantic Polar Front jet stream variability. *International Journal of Climatology*. 35: 1697–1720. - doi: 10.1002/joc.4121

Hanewinkel M, Cullmann DA, Schelhaas MJ, Nabuurs GJ, Zimmermann NE (2013). Climate change may cause severe loss in the economic value of European forest land. *Nature Climate Change*. 3: 203–207. - doi: 10.1038/nclimate1687

Hanewinkel M, Hummel S, Cullmann DA (2010). Modelling and economic evaluation of forest biome shifts under climate change in Southwest Germany. *Forest Ecology and Management*. 259: 710–719. - doi: 10.1016/j.foreco.2009.08.021

- Härt FH, Barka I, Hahn WA, Hlásny T, Irauschek F, Knoke T, Lexer MJ, Griess VC (2015). Multifunctionality in European mountain forests — An optimization under changing climatic conditions. *Canadian Journal of Forest Research*. 46: 163–171. - doi: 10.1139/cjfr-2015-0264
- Hartl-Meier C, Dittmar C, Zang C, Rothe A (2014). Mountain forest growth response to climate change in the Northern Limestone Alps. *Trees*. 28: 819–829. - doi: 10.1007/s00468-014-0994-1
- Hartl-meier C, Zang C, Büntgen U, Esper J, Rothe A, Göttelein A, Dirnböck T, Treydte K (2018). Uniform climate sensitivity in tree-ring stable isotopes across species and sites in a mid-latitude temperate forest. *Tree Physiology*. 35,: 4–15. - doi: 10.1093/treephys/tpu096
- Hathaway DH (2015). The solar cycle. *Living Reviews in Solar Physics*. 12: 83. - doi: 10.1007/lrsp-2015-4
- Hathaway DH, Adams M, Weber R (2017). Royal Observatory, Greenwich - USAF/NOAA Sunspot Data. Retrieved from <https://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch.shtml>
- Haywood J, Boucher O (2000). Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: A review. *Reviews of Geophysics*. 38: 513–543. - doi: 10.1029/1999RG000078
- Hember RA, Kurz WA, Metsaranta JM, Black TA, Guy RD, Coops NC (2012). Accelerating regrowth of temperate-maritime forests due to environmental change. *Global Change Biology*. 18: 2026–2040. - doi: 10.1111/j.1365-2486.2012.02669.x
- Hlásny T, Barcza Z, Barka I, Merganičová K, Sedmák R, Kern A, Pajtík J, Balázs B, Fabrika M, Churkina G (2014). Future carbon cycle in mountain spruce forests of Central Europe: Modelling framework and ecological inferences. *Forest Ecology and Management*. 328: 55–68. - doi: 10.1016/j.foreco.2014.04.038
- Hlásny T, Barka I, Kulla L, Bucha T, Sedmák R, Trombik J (2017a). Sustainable forest management in a mountain region in the Central Western Carpathians, northeastern Slovakia: the role of climate change. *Regional Environmental Change*. 17: 65–77. - doi: 10.1007/s10113-015-0894-y
- Hlásny T, Barka I, Roessiger J, Kulla L, Trombik J, Sarvašová Z, Bucha T, Kovalčík M, Čihák T (2017b). Conversion of Norway spruce forests in the face of climate change: a case study in Central Europe. *European Journal of Forest Research*. 136: 1013–1028. - doi: 10.1007/s10342-017-1028-5
- Hlásny T, Sitková Z (2010). Spruce forests decline in the Beskids., pp. 184.
- Hlásny T, Turčáni M (2013). Persisting bark beetle outbreak indicates the unsustainability of secondary Norway spruce forests: Case study from Central Europe. *Annals of Forest Science*. 70: 481–491. - doi: 10.1007/s13595-013-0279-7
- Hlásny T, Zimová S, Merganičová K, Štěpánek P, Modlinger R, Turčáni M (2021). Devastating outbreak of bark beetles in the Czech Republic: Drivers, impacts, and management implications. *Forest Ecology and Management*. 490. - doi: 10.1016/j.foreco.2021.119075
- Hůnová I, Schreiberová M (2012). Ambient ozone phytotoxic potential over the Czech forests as assessed by AOT40. *IForest*. 5: 153–162. - doi: 10.3832/ifer0617-005
- Jaehne S, Dohrenbusch A (1997). A method to evaluate forest stand diversity. *Forstwis Centralblatt*. 333–345.
- Jain P, Flannigan M (2021). The relationship between the polar jet stream and extreme wildfire events in North America. *Journal of Climate*. 34: 6247–6265. - doi: 10.1175/JCLI-D-20-0863.1

- Jandl R (2020). Climate-induced challenges of Norway spruce in Northern Austria. *Trees, Forests and People*. 1: 100008. - doi: 10.1016/j.tfp.2020.100008
- Janík T, Romportl D (2018). Recent land cover change after the Kyrill windstorm in the Šumava NP. *Applied Geography*. 97: 196–211. - doi: 10.1016/j.apgeog.2018.06.006
- Jaworski A, Kołodziej Z (2004). Beech (*Fagus sylvatica* L.) forests of a selection structure in the Bieszczady mountains (Southeastern Poland). *Journal of Forest Science*. 50: 301–312.
- Jayaraman A, Lubin D, Ramachandran S, Ramanathan V, Woodbridge E (1998). Direct observations of aerosol radiative forcing over the tropical Indian Ocean during the January-February 1996 pre-INDOEX cruise Z 10-. *Journal of Geophysical Research*. 103: 827–836.
- Jean D, Nordemann R, Echer E, Evangelista H, Pereira M, Echer DS (2007). Solar activity imprints in tree ring width from Chile (1610–1991). *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 69: 1049–1056.
- Jurko A, Kubiček F (1974). Bučiny v centrálnej časti Kremnických vrchov. In: *Biologia*. Bratislava.
- Kacálek D, Mauer O, Podrázský V, Slodičák M (2017). Meliorační a zpevňující funkce lesních dřevin. *Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v. v. i., Strnady*, pp. 300.
- Kasatkina EA, Shumilov OI, Timonen M (2019). Solar activity imprints in tree ring-data from northwestern Russia. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 193: 105075. - doi: 10.1016/j.jastp.2019.105075
- Keenan TF, Prentice IC, Canadell JG, Williams CA, Wang H, Raupach M, Collatz GJ (2016). Recent pause in the growth rate of atmospheric CO₂ due to enhanced terrestrial carbon uptake. *Nature Communications*. 7: 1–9. - doi: 10.1038/ncomms13428
- Kim T-J (2020). Predictions of Galapagos Volcanic Eruption, El Niño, Ecuadorian Earthquake, Global Volcanic Eruption and Forest Fire by Sunspot Number. *Natural Science*. 12: 12–27. - doi: 10.4236/ns.2020.121003
- Koch J, Clague JJ, Osborn GD (2007). Glacier fluctuations during the past millennium in Garibaldi Provincial Park, southern Coast Mountains, British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences*. 44: 1215–1233. - doi: 10.1139/e07-019
- Kodera K, Kuroda Y (2002). Dynamical response to the solar cycle. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 107: ACL 5-1-ACL 5-12. - doi: 10.1029/2002JD002224
- Kolář T, Čermák P, Trnka M, Žid T, Rybníček M (2017). Temporal changes in the climate sensitivity of Norway spruce and European beech along an elevation gradient in Central Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*. 239: 24–33. - doi: 10.1016/j.agrformet.2017.02.028
- Komitov B (2021). The European Beech Annual Tree Ring Widths Time Series , Solar – Climatic Relationships and Solar Dynamo Regime Changes. *Atmosphere*. 12: 1–26. - doi: <https://doi.org/10.3390/atmos12070829>
- Kooijman AM, Emmer IM, Fanta J, Sevink J (2000). Natural regeneration potential of the degraded Krkonoše forests. *Land Degradation and Development*. 11: 459–473.
- Koop H (1989). *Forest Dynamics*. Springer Verlag, Heidelberg, pp. 91.
- Kopáček J, Cudlín P, Fluksová H, Kaňa J, Pícek T, Šantrůčková H, Svoboda M, Vaněk D (2015). Dynamics and composition of litterfall in an unmanaged Norway spruce (. *Boreal Environment Research*. 6095: 305–323.

- Korpeľ Š (1991). *Pestovanie lesa*. Príroda, Bratislava, pp. 475.
- Kotsias G, Lolis CJ, Hatzianastassiou N, Levizzani V, Bartzokas A (2020). On the connection between large-scale atmospheric circulation and winter GPCP precipitation over the Mediterranean region for the period 1980-2017. *Atmospheric Research*. 233: 104714. - doi: 10.1016/j.atmosres.2019.104714
- Kozak I, Parpan T (2019). Forecasting drying up of spruce forests in Transcarpathia (Ukraine) using the FORKOME model. *Journal of Forest Science*. 65: 209–217. - doi: 10.17221/30/2019-JFS
- Králíček I, Vacek Z, Vacek S, Remeš J, Bulušek D, Král J, Štefančík I, Putalová T (2017). Dynamics and structure of mountain autochthonous spruce-beech forests: Impact of hilltop phenomenon, air pollutants and climate. *Dendrobiology*. 77: 119–137. - doi: 10.12657/denbio.077.010
- Kramer K, Degen B, Buschbom J, Hickler T, Thuiller W, Sykes MT, de Winter W (2010). Modelling exploration of the future of European beech (*Fagus sylvatica* L.) under climate change-Range, abundance, genetic diversity and adaptive response. *Forest Ecology and Management*. 259: 2213–2222. - doi: 10.1016/j.foreco.2009.12.023
- Kudela K (2019). Institute of Experimental Physics SAS. Retrieved from <http://neutronmonitor.ta3.sk/>
- Kukumägi M, Ostonen I, Uri V, Helmisaari HS, Kanal A, Kull O, Lõhmus K (2017). Variation of soil respiration and its components in hemiboreal Norway spruce stands of different ages. *Plant and Soil*. 414: 265–280. - doi: 10.1007/s11104-016-3133-5
- Kumar V, Dhaka SK, Panwar V, Singh N, Rao AS, Malik S, Yoden S (2018). Detection of solar cycle signal in the tropospheric temperature using COSMIC data. *Current Science*. 115: 2232–2239.
- Larsson LA (2013). Cybis Elektronik & Data AB. Saltsjöbaden, Sweden. Retrieved from <http://www.cybis.se/>
- Laurenz L, Lüdecke HJ, Lüning S (2019). Influence of solar activity changes on European rainfall. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 185: 29–42. - doi: 10.1016/j.jastp.2019.01.012
- Le Mouél JL, Lopes F, Courtillot V (2019). A Solar Signature in Many Climate Indices. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 124: 2600–2619. - doi: 10.1029/2018JD028939
- Leavitt SW, Bannister B (2009). Dendrochronology and radiocarbon dating: The laboratory of tree-ring research connection. *Radiocarbon*. 51: 373–384. - doi: 10.1017/S0033822200033889
- Lenz A, Hoch G, Vitasse Y (2016). Fast acclimation of freezing resistance suggests no influence of winter minimum temperature on the range limit of European beech. *Tree Physiology*. 36: 490–501. - doi: 10.1093/treephys/tpv147
- Li HY, Xue LJ, Wang XJ (2015). Relationship between solar activity and flood/drought disasters of the Second Songhua river basin. *Journal of Water and Climate Change*. 6: 578–585. - doi: 10.2166/wcc.2014.053
- Ligges U, Short T, Kienzle P, Schnackenberg S, Billingham D, Borchers H-W, Carezia A, Dupuis P, Eaton JW, Farhi E, Habel K, Hornik K, Krey S, Lash B, Leisch F, Mersmann O, Neis P, Ruohio J, Smith III JO, Stewart D, Weingessel A (2015). Signal Processing Version package ‘signal’. Retrieved from <http://r-forge.r-project.org/projects/signal/>
- Lindner M, Maroschek M, Netherer S, Kremer A, Barbati A, Garcia-Gonzalo J, Seidl R, Delzon S, Corona P, Kolström M, Lexer MJ, Marchetti M (2010). Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*. 259: 698–709. - doi: 10.1016/j.foreco.2009.09.023

- Lockwood M, Owens M, Hawkins E, Jones GS, Usoskin I (2017). Frost fairs, sunspots and the Little Ice Age. *Astronomy and Geophysics*. 58: 2.17-2.23. - doi: 10.1093/astrogeo/atx057
- Lopez-Bustins JA, Esteban P, Labitzke K, Langematz U (2007). The role of the stratosphere in Iberian Peninsula rainfall: A preliminary approach in February. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 69: 1471–1484. - doi: 10.1016/j.jastp.2007.05.015
- Lüdecke HJ, Cina R, Dammschneider HJ, Lüning S (2020). Decadal and multidecadal natural variability in European temperature. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 205: 105294. - doi: 10.1016/j.jastp.2020.105294
- Ludwig P, Pinto JG, Hoeppe SA, Fink AH, Gray SL (2015). Secondary cyclogenesis along an occluded front leading to damaging wind gusts: Windstorm Kyrill, January 2007. *Monthly Weather Review*. 143: 1417–1437. - doi: 10.1175/MWR-D-14-00304.1
- Ma H, Chen H, Gray L, Zhou L, Li X, Wang R, Zhu S (2018). Changing response of the North Atlantic/European winter climate to the 11 year solar cycle. *Environmental Research Letters*. 13. - doi: 10.1088/1748-9326/aa9e94
- Maghrabi A, Kudela K (2019). Relationship between time series cosmic ray data and aerosol optical properties: 1999–2015. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 190: 36–44. - doi: 10.1016/j.jastp.2019.04.014
- Magri D (2008). Patterns of post-glacial spread and the extent of glacial refugia of European beech (*Fagus sylvatica*). *Journal of Biogeography*. 35: 450–463. - doi: 10.1111/j.1365-2699.2007.01803.x
- Maliniemi V, Asikainen T, Mursula K (2018). Decadal variability in the Northern Hemisphere winter circulation: Effects of different solar and terrestrial drivers. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 179: 40–54. - doi: 10.1016/j.jastp.2018.06.012
- Marini L, Økland B, Jönsson AM, Bentz B, Carroll A, Forster B, Grégoire JC, Hurling R, Nageleisen LM, Netherer S, Ravn HP, Weed A, Schroeder M (2017). Climate drivers of bark beetle outbreak dynamics in Norway spruce forests. *Ecography*. 40: 1426–1435. - doi: 10.1111/ecog.02769
- Materna J (1989). Air pollution and forestry in Czechoslovakia. *Environmental Monitoring and Assessment*. 12: 227–239.
- Matisons R, Puriņa L, Adamovičs A, Robalte L, Jansons Ā (2017). European beech in its northeasternmost stands in Europe: Varying climate-growth relationships among generations and diameter classes. *Dendrochronologia*. 45: 123–131. - doi: 10.1016/j.dendro.2017.08.004
- Matveev SM, Chendev YG, Lupo AR, Hubbart JA, Timashchuk DA (2017). Climatic Changes in the East-European Forest-Steppe and Effects on Scots Pine Productivity. *Pure and Applied Geophysics*. 174: 427–443. - doi: 10.1007/s00024-016-1420-y
- Mauas PJD, Buccino AP, Flamenco E (2016). Solar activity forcing of terrestrial hydrological phenomena. *Proceedings of the International Astronomical Union*. 12: 180–191. - doi: 10.1017/S1743921317003933
- Mausolf K, Wilm P, Härdtle W, Jansen K, Schuldt B, Sturm K, von Oheimb G, Hertel D, Leuschner C, Fichtner A (2018). Higher drought sensitivity of radial growth of European beech in managed than in unmanaged forests. *Science of the Total Environment*. 642: 1201–1208. - doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.065
- Mikol M, Janda P, Spînu AP, Cat I (2020). Moderate- to High-Severity Disturbances Shaped the Structure of Primary *Picea Abies* (L .) Karst . Forest in the Southern Carpathians. *Forests*. 11. -

doi: doi:10.3390/f11121315

- Mikulenka P, Prokúpková A, Vacek Z, Vacek S, Bulušek D, Simon J, Šimůnek V, Hájek V (2020). Effect of climate and air pollution on radial growth of mixed forests: *Abies alba* Mill. vs. *Picea abies* (L.) Karst. *Central European Forestry Journal*. 66: 23–36. - doi: 10.2478/forj-2019-0026
- Mitchell SJ (2013). Wind as a natural disturbance agent in forests: A synthesis. *Forestry*. 86: 147–157. - doi: 10.1093/forestry/cps058
- Mölder I, Leuschner C (2014). European beech grows better and is less drought sensitive in mixed than in pure stands: Tree neighbourhood effects on radial increment. *Trees - Structure and Function*. 28: 777–792. - doi: 10.1007/s00468-014-0991-4
- Moseley EL (1941). Sun-spots and Tree Rings. *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*. 35: 376.
- Muffler L, Weigel R, Hacket-Pain AJ, Klisz M, van der Maaten E, Wilmking M, Kreyling J, van der Maaten-Theunissen M (2020). Lowest drought sensitivity and decreasing growth synchrony towards the dry distribution margin of European beech. *Journal of Biogeography*. 1–12. - doi: 10.1111/jbi.13884
- MZe (2020). Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2019. (Ministerstvo zemědělství, Ed.). Praha, pp. 112.
- Nascimbene J, Thor G, Nimis PL (2013). Effects of forest management on epiphytic lichens in temperate deciduous forests of Europe - A review. *Forest Ecology and Management*. 298: 27–38. - doi: 10.1016/j.foreco.2013.03.008
- Netherer S, Panassiti B, Pennerstorfer J, Matthews B (2019). Acute Drought Is an Important Driver of Bark Beetle Infestation in Austrian Norway Spruce Stands. *Frontiers in Forests and Global Change*. 2: 1–21. - doi: 10.3389/ffgc.2019.00039
- Noce S, Collalti A, Valentini R, Santini M (2016). Hot spot maps of forest presence in the Mediterranean basin. *IForest*. 9: 766–774. - doi: 10.3832/ifer1802-009
- Nolè A, Rita A, Ferrara AMS, Borghetti M (2018). Effects of a large-scale late spring frost on a beech (*Fagus sylvatica* L.) dominated Mediterranean mountain forest derived from the spatio-temporal variations of NDVI. *Annals of Forest Science*. 75: 1–11. - doi: 10.1007/s13595-018-0763-1
- Nováková MH, Edwards-Jonášová M (2015). Restoration of central-european mountain norway spruce forest 15 years after natural and anthropogenic disturbance. *Forest Ecology and Management*. 344: 120–130. - doi: 10.1016/j.foreco.2015.02.010
- Nožička J (1957). Přehled vývoje našich lesů. Praha. Státní zemědělské nakladatelství, Prague, pp. 463.
- Ormes JF (2018). Cosmic rays and climate. *Advances in Space Research*. 62: 2880–2891. - doi: 10.1016/j.asr.2017.07.028
- Övergaard R (2010). Seed Production and Natural Regeneration of Beech (*Fagus sylvatica* L.) in Southern Sweden. - doi: 10.1021/la049164+
- Paulsen DE, Li HC, Ku TL (2003). Climate variability in central China over the last 1270 years revealed by high-resolution stalagmite records. *Quaternary Science Reviews*. 22: 691–701. - doi: 10.1016/S0277-3791(02)00240-8
- Penuelas J, Boada M (2003). A global change-induced biome shift in the Montseny mountains (NE Spain). *Global Change Biology*. 9: 131–140. - doi: 10.1046/j.1365-2486.2003.00566.x

- Perone A, Lombardi F, Marchetti M, Tognetti R, Lasserre B (2016). Evidence of solar activity and El Niño signals in tree rings of *Araucaria araucana* and *A. angustifolia* in South America. *Global and Planetary Change*. 145: 1–10. - doi: 10.1016/j.gloplacha.2016.08.004
- Peters R (1997). *Beech forests*. Kluwer Academic, Dordrecht, pp. 169.
- Piovesan G, Bernabei M, Filippo A Di, Romagnoli M (2017). Original article A long-term tree ring beech chronology from a high-elevation old-growth forest of Central Italy. - doi: 10.1078/1125-7865-00036
- Piovesan G, Biondi F, Di Filippo A, Alessandrini A, Maugeri M (2008). Drought-driven growth reduction in old beech (*Fagus sylvatica* L.) forests of the central Apennines, Italy. *Global Change Biology*. 14: 1265–1281. - doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01570.x
- Piovesan G, Schirone B (2000). Winter North Atlantic oscillation effects on the tree rings of the Italian beech (*Fagus sylvatica* L.). *International Journal of Biometeorology*. 44: 121–127. - doi: 10.1007/s004840000055
- Poleno Z, Vacek S, Podrázský V, Remeš J, Mikeska M, J. K, Bílek L, Baláš M (2011). Pěstování lesů I. Ekologické základy pěstování lesů. [Silviculture I. Ecological fundamentals of Silviculture]. (s. r. o. Kostelec nad Černými lesy, Lesnická práce, Ed.), pp. 320.
- Poljanec A, Ficko A, Boncina A (2010). Spatiotemporal dynamic of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in Slovenia, 1970-2005. *Forest Ecology and Management*. 259: 2183–2190. - doi: 10.1016/j.foreco.2009.09.022
- Pretzsch H (1992). *Konzeption und Konstruktion von Wachstumsmodellen für Rein- und Mischbestände*. Forstliche Forschungsberichte München. 115: 358.
- Priewasser K, Brang P, Bachofen H, Bugmann H, Wohlgemuth T (2013). Impacts of salvage-logging on the status of deadwood after windthrow in Swiss forests. *European Journal of Forest Research*. 132: 231–240. - doi: 10.1007/s10342-012-0670-1
- Protezione Civile - Regione Basilicata (2020). Abriola a Sellata Pierfaone. Retrieved from <http://www.centrofunzionalebasilicata.it/it/>
- Putalová T, Vacek Z, Vacek S, Štefančík I, Bulušek D, Král J (2019). Tree-ring widths as an indicator of air pollution stress and climate conditions in different Norway spruce forest stands in the Krkonoše Mts. *Central European Forestry Journal*. 65: 21–33. - doi: 10.2478/forj-2019-0004
- Račko V, Saniga M, Čunderlík I (2011). The impact of silvicultural treatments on the structure and red heart formation in beech forests. *Sumarski List*. 135: 437–448.
- Remeš J, Bílek L, Novák J, Vacek Z, Vacek S, Putalová T, Koubek L (2015). Diameter increment of beech in relation to social position of trees, climate characteristics and thinning intensity. *Journal of Forest Science*. 61: 456–464. - doi: 10.17221/75/2015-JFS
- Remeš J, Pulkrab K, Bílek L, Podrázský V (2020). Economic and production effect of tree species change as a result of adaptation to climate change. *Forests*. 11. - doi: 10.3390/F11040431
- Rezaie N, D'Andrea E, Bräuning A, Matteucci G, Bombi P, Lauteri M (2018). Do atmospheric CO₂ concentration increase, climate and forest management affect iWUE of common beech? Evidences from carbon isotope analyses in tree rings. *Tree Physiology*. 38: 1110–1126. - doi: 10.1093/treephys/tpy025
- Riedl M, Šišák L (2013). Analysis of the perceived condition of forests in the Czech Republic. *Journal of Forest Science*. 59: 514–519.

- Rigozo NR, Nordemann DJR, Echer E, Zanandrea A, Gonzalez WD (2002). Solar variability effects studied by tree-ring data wavelet analysis. *Advances in Space Research*. 29: 1985–1988. - doi: 10.1016/S0273-1177(02)00245-4
- Rinntech (2010). TSAP-WIN: Time series analysis and presentation for dendrochronology and related applications. Heidelberg, Germany. Retrieved from <http://www.rinntech.com>
- Robson TM, Rasztoivits E, Aphalo PJ, Alia R, Aranda I (2013). Flushing phenology and fitness of European beech (*Fagus sylvatica* L.) provenances from a trial in La Rioja, Spain, segregate according to their climate of origin. *Agricultural and Forest Meteorology*. 180: 76–85. - doi: 10.1016/j.agrformet.2013.05.008
- Roibu CC, Popa I, Kirchhefer AJ, Palaghianu C (2017). Growth responses to climate in a tree-ring network of European beech (*Fagus sylvatica* L.) from the eastern limit of its natural distribution area. *Dendrochronologia*. 42: 104–116. - doi: 10.1016/j.dendro.2017.02.003
- Šach F, Jurásek A, Lokvenc T, Remešová J, Vokálová A (2001). Výzkumná stanice Opočno 1951 – 2000. Opočno, pp. 147.
- Saltré F, Saint-Amant R, Gritti ES, Brewer S, Gaucherel C, Davis BAS, Chuine I (2013). Climate or migration: What limited European beech post-glacial colonization? *Global Ecology and Biogeography*. 22: 1217–1227. - doi: 10.1111/geb.12085
- Saniga M, Plittner J, Balanda M (2013). Vplyv výberkového rubu na štruktúru a dynamiku prirodzenej obnovy v bukovom výberkovom lese. In: *Proceedings of Central European Silviculture* (M Baláš, V Podrázský, K Barbora eds). Česká zemědělská univerzita v Praze, Kostelec nad Černými lesy.
- Schroeder LM, Lindelöw Å (2002). Attacks on living spruce trees by the bark beetle *ips typographus* (Col. Scolytidae) following a storm-felling: A comparison between stands with and without removal of wind-felled trees. *Agricultural and Forest Entomology*. 4: 47–56. - doi: 10.1046/j.1461-9563.2002.00122.x
- Schulz M, Mudelsee M (2002). REDFIT: Estimating red-noise spectra directly from unevenly spaced paleoclimatic time series. *Computers and Geosciences*. 28: 421–426. - doi: 10.1016/S0098-3004(01)00044-9
- Schütz JP (2001). *Der Plenterwald*. Parey Buch- Verlag, Berlin. 207.
- Schütz JP, Götz M, Schmid W, Mandallaz D (2006). Vulnerability of spruce (*Picea abies*) and beech (*Fagus sylvatica*) forest stands to storms and consequences for silviculture. *European Journal of Forest Research*. 125: 291–302. - doi: 10.1007/s10342-006-0111-0
- Seidl R, Rammer W, Lasch P, Badeck FW, Lexer MJ (2008). Does conversion of even-aged, secondary coniferous forests affect carbon sequestration? A simulation study under changing environmental conditions. *Silva Fennica*. 42: 369–386. - doi: 10.14214/sf.243
- Sharma RP, Štefančík I, Vacek Z, Vacek S (2019). Generalized nonlinear mixed-effects individual tree diameter increment models for beech forests in Slovakia. *Forests*. 10. - doi: 10.3390/f10050451
- Shumilov OI, Kasatkina EA, Mielikainen K, Timonen M, Kanatjev AG (2011). Palaeovolcanos , Solar activity and pine tree-rings from the Kola Peninsula (northwestern Russia) over the last 560 years Palaeovolcanos. *International Journal of Environmental Research*. 5: 855–864.
- Siefermann-Harms D, Boxler-Baldoma C, Von Wilpert K, Heumann HG (2004). The rapid yellowing of spruce at a mountain site in the Central Black Forest (Germany). Combined effects of Mg

- deficiency and ozone on biochemical, physiological and structural properties of the chloroplasts. *Journal of Plant Physiology*. 161: 423–437. - doi: 10.1078/0176-1617-01095
- Šimůnek V, Hájek V, Prokúpková A, Gallo J (2021a). Finding an imprint of solar and climatic cycles in tree rings of European beech (*Fagus sylvatica* L.). *Journal of Forest Science*. 67: 409–419. - doi: <https://doi.org/10.17221/94/2020-JFS>
- Šimůnek V, Sharma RP, Vacek Z, Vacek S, Hůnová I (2020a). Sunspot area as unexplored trend inside radial growth of European beech in Krkonoše Mountains : a forest science from different perspective. *European Journal of Forest Research*. 139: 999–1013. - doi: 10.1007/s10342-020-01302-7
- Šimůnek V, Vacek S, Vacek Z, Andrea GD (2021b). Vztahy těžby listnatých a jehličnatých dřevin dle slunečních cyklů [Harvesting fluctuations of deciduous and coniferous tree species according to solar cycles] HARVESTING FLUCTUATIONS OF DECIDUOUS AND CONIFEROUS TREE SPECIES. In: *Proceedings of Central European Silviculture – 21st International Conference*.
- Šimůnek V, Vacek Z, Sharma R, Vacek S (2019a). Sluneční cykly jako základní faktor ovlivňující přirozenou dynamiku porostů buku lesního [Sunspot cycles as the underlying factor of European beech natural development]. In: *Proceedings of central european silviculture* (K Houšková, J Černý eds). Mendel University in Brno, Brno.
- Šimůnek V, Vacek Z, Vacek S (2020b). Solar cycles in salvage logging: National data from the Czech Republic confirm significant correlation. *Forests*. 11: 1–22. - doi: 10.3390/f11090973
- Šimůnek V, Vacek Z, Vacek S, Králíček I, Vančura K (2019b). Growth variability of European beech (*Fagus sylvatica* L.) natural forests: Dendroclimatic study from Krkonoše National Park. *Central European Forestry Journal*. 65: 92–102. - doi: 10.2478/forj-2019-0010
- Šimůnek V, Vacek Z, Vacek S, Ripullone F, Hájek V, D'andrea G (2021c). Tree rings of european beech (*Fagus sylvatica* l.) indicate the relationship with solar cycles during climate change in central and southern europe. *Forests*. 12: 1–22. - doi: 10.3390/f12030259
- Singh AK, Bhargawa A (2019). Prediction of declining solar activity trends during solar cycles 25 and 26 and indication of other solar minimum. *Astrophysics and Space Science*. 364: 1–7. - doi: 10.1007/s10509-019-3500-9
- Slanař J, Vacek Z, Vacek S, Bulušek D, Cukor J, Štefančík I, Bílek L, Krl J (2017). Long-term transformation of submontane spruce-beech forests in the Jizerské hory Mts.: Dynamics of natural regeneration. *Central European Forestry Journal*. 63: 212–224. - doi: 10.1515/forj-2017-0023
- Speer JH (2010). *Fundamentals of tree-ring research*. James H. Speer. Geoarchaeology. University of Arizona Press, Tuscon, Vol. 26, pp. 453–455. - doi: 10.1002/gea.20357
- Špulák O, Souček J (2010). The Sibyla model and development of beech forests affected by air pollution. *Central European Journal of Biology*. 5: 317–383. - doi: 10.2478/s11535-010-0024-2
- Šrámek V, Hellebrandová KN, Fadrhonsová V (2019). Interception and soil water relation in Norway spruce stands of different age during the contrasting vegetation seasons of 2017 and 2018. *Journal of Forest Science*. 65: 51–60. - doi: 10.17221/135/2018-JFS
- StatSoft I (2013). *Statistica Electronic Manual*. Tulsa.
- Štefančík I (2015). The effect of different tending on stand structure and quantitative production of European beech (*Fagus sylvatica* L.) stand in a selected region of East Slovakia. *Journal of Forest Science*. 61: 98–105. - doi: 10.17221/105/2014-JFS

- Štefančík I, Bošela M, Petráš R (2018a). Effect of different management on quality and value production of pure beech stands in Slovakia. *Central European Forestry Journal*. 64: 24–32. - doi: 10.1515/forj-2017-0012
- Štefančík I, Vacek Z, Sharma RP, Vacek S, Rösslová M (2018b). Effect of thinning regimes on growth and development of crop trees in *Fagus sylvatica* stands of central Europe over fifty years. *Dendrobiology*. 79: 141–155. - doi: 10.12657/denbio.079.013
- Stjepanović S, Matović B, Stojanović D, Lalić B, Levanič T, Orlović S, Gutalj M (2018). The impact of adverse weather and climate on the Width of European Beech (*Fagus sylvatica* L.) tree rings in Southeastern Europe. *Atmosphere*. 9. - doi: 10.3390/atmos9110451
- Stuiver M, Grootes PM (1980). Trees and the ancient record of heliomagnetic cosmic ray flux modulation. 165–173.
- Sunkara SL, Tiwari RK (2016). Wavelet analysis of the singular spectral reconstructed time series to study the imprints of solar-ENSO-geomagnetic activity on Indian climate. *Nonlinear Processes in Geophysics*. 23: 361–374. - doi: 10.5194/npg-23-361-2016
- Surovy P, Dorotovic I, Karlovsky V, Lousada JL, Rodrigues JC, Rybansky M, Fleischer P (2010). Impact of solar activity on the growth of pine trees (*Pinus cembra*: 1610 - 1970; *Pinus pinaster*: 1910 - 1989). In: *Proceedings of the 20th Slovak National Solar Physics Meeting*. Retrieved from <http://stara.suh.sk/obs/slnsem/20css/36w.pdf>
- Surový P, Ribeiro NA, Evora U De, Pereira JS, Superior I, Lisbon DA (2008). Influence of solar activity cycles on cork growth – a hypothesis. In: *Proc. of the 19th National Solar Physics Meeting (I Dorotovič ed)*. Hurbanovo, SÚH, Papradno.
- Šustek Z, Vido J, Škvareninová J, Škvarenina J, Šurda P (2017). Drought impact on ground beetle assemblages (Coleoptera, Carabidae) in Norway spruce forests with different management after windstorm damage - A case study from Tatra Mts. (Slovakia). *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 65: 333–342. - doi: 10.1515/johh-2017-0048
- Tartaglione N, Toniazzo T, Orsolini Y, Otterå OH (2020). Impact of solar irradiance and geomagnetic activity on polar NO_x, ozone and temperature in WACCM simulations. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 209: 105398. - doi: 10.1016/j.jastp.2020.105398
- Team R Core (2018). *A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria.
- Tegel W, Seim A, Hakelberg D, Hoffmann S, Panev M, Westphal T, Büntgen U (2014). A recent growth increase of European beech (*Fagus sylvatica* L.) at its Mediterranean distribution limit contradicts drought stress. *European Journal of Forest Research*. 133: 61–71. - doi: 10.1007/s10342-013-0737-7
- Tinner W, Lotter AF (2006). Holocene expansions of *Fagus sylvatica* and *Abies alba* in Central Europe: Where are we after eight decades of debate? *Quaternary Science Reviews*. 25: 526–549. - doi: 10.1016/j.quascirev.2005.03.017
- Tinsley BA (2012). A working hypothesis for connections between electrically-induced changes in cloud microphysics and storm vorticity, with possible effects on circulation. *Advances in Space Research*. 50: 791–805. - doi: 10.1016/j.asr.2012.04.008
- Tognetti R, Lasserre B, Di Febbraro M, Marchetti M (2019). Modeling regional drought-stress indices for beech forests in Mediterranean mountains based on tree-ring data. *Agricultural and Forest Meteorology*. 265: 110–120. - doi: 10.1016/j.agrformet.2018.11.015

- Tolazs R (2007). Atlas podnebí Česka. Český hydrometeorologický ústav, Praha.
- Tomiczek C (1995). Nutrient Deficiency of Spruce Needles Caused By Root and Butt Rots - a Factor in Forest Decline. 21: 113–117.
- Toth D, Maitah M, Maitah K, Jarolinová V (2020). The impacts of calamity logging on the development of spruce wood prices in czech forestry. *Forests*. 11: 1–13. - doi: 10.3390/f11030283
- Tsiropoula G (2003). Signatures of solar activity variability in meteorological parameters. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 65: 469–482. - doi: 10.1016/S1364-6826(02)00295-X
- Tumajer J, Altman J, Štěpánek P, Tremel V, Doležal J, Cienciala E (2017). Increasing moisture limitation of Norway spruce in Central Europe revealed by forward modelling of tree growth in tree-ring network. *Agricultural and Forest Meteorology*. 247: 56–64. - doi: 10.1016/j.agrformet.2017.07.015
- Turčáni M, Hlásny T (2007). Spatial distribution of four spruce bark beetles in north-western Slovakia. *Journal of Forest Science*. 53: 45–52. - doi: 10.17221/2157-jfs
- Uğur B, Feriha Y (2017). Forecasting risky years for forest fires depending on sunspot cycle. *Journal of Forestry Research*. 4: 133–142.
- Urban J (2000). Beech gall midge (*Mikiola fagi* Htg.) and its natural enemies. *Journal of Forest Science*. 46: 543–568.
- Usoskin IG (2017). A history of solar activity over millennia. *Living Reviews in Solar Physics*. 14: 1–97. - doi: 10.1007/s41116-017-0006-9
- Vacchiano G, Derose RJ, Shaw JD, Svoboda M, Motta R (2013). A density management diagram for Norway spruce in the temperate European montane region. *European Journal of Forest Research*. 132: 535–549. - doi: 10.1007/s10342-013-0694-1
- Vacek S, Bílek L, Schwarz O, Hejcmanová P, Mikeska M (2013a). Effect of Air Pollution on the Health Status of Spruce Stands Effect of Air Pollution on the Health Status of Spruce Stands. 33: 40–50.
- Vacek S, Bílek L, Schwarz O, Hejcmanová P, Mikeska M (2013b). Effect of Air Pollution on the Health Status of Spruce Stands Effect of Air Pollution on the Health Status of Spruce Stands. *Mountain Research and Development*. 33: 40–50.
- Vacek S, Černý T, Vacek Z, Podrázský V, Mikeska M, Králíček I (2017). Long-term changes in vegetation and site conditions in beech and spruce forests of lower mountain ranges of Central Europe. *Forest Ecology and Management*. 398: 75–90. - doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.05.001>
- Vacek S, Hejcman M (2012). Natural layering, foliation, fertility and plant species composition of a *Fagus sylvatica* stand above the alpine timberline in the Giant (Krkonoše) Mts., Czech Republic. *European Journal of Forest Research*. 131: 799–810. - doi: 10.1007/s10342-011-0553-x
- Vacek S, Hejcmanová P, Hejcman M, Vacek Z (2013c). Growth, healthy status and seed production of differently aged allochthonous and autochthonous *Pinus mugo* stands in the Giant Mts. over 30 years. *European Journal of Forest Research*. 132: 801–813. - doi: 10.1007/s10342-013-0721-2
- Vacek S, Hůnová I, Vacek Z, Hejcmanová P, Podrázský V, Král J, Putalová T, Moser WK (2015a). Effects of air pollution and climatic factors on Norway spruce forests in the Orlické hory Mts. (Czech Republic), 1979–2014. *European Journal of Forest Research*. 134: 1127–1142. - doi:

- Vacek S, Matejka K (2010). Health status of forest stands on permanent research plots in the Krkonoše Mts. *Journal of Forest Science*. 56: 555–569.
- Vacek S, Moucha P, Bílek L, Mikeska M, Remeš J, Simon J, Hynek V, Šrůtka P, Schwarz O, Mánek J, Baláš M, Dort M, Podrázský V, Hejcman M, Hejcmanová P, Málková J, Stonawski J, Bednařík J, Vacek Z, Malík K, Štícha V (2012). *Péče o lesní ekosystémy v chráněných územích ČR*. [Management of forest ecosystems in the protected areas of the Czech Republic]. Ministry of the Environment of the Czech Republic, Prague, pp. 896.
- Vacek S, Nosková I, Bílek L, Vacek Z, Schwarz O (2010a). Regeneration of forest stands on permanent research plots in the Krkonoše Mts. *Journal of Forest Science*. 56: 541–554.
- Vacek S, Prokupková A, Vacek Z, Bulušek D, Šimunek V, Králíček I, Prausová R, Hájek V (2019a). Growth response of mixed beech forests to climate change, various management and game pressure in Central Europe. *Journal of Forest Science*. 65: 331–345. - doi: 10.17221/82/2019-JFS
- VACEK S, SIMON J, REMEŠ J (2007). *Obhospodařování bohatě strukturovaných a přírodě blízkých lesů*. Lesnická práce s. r. o., Kostelec nad Černými lesy, pp. 447.
- Vacek S, Vacek Z, Bílek L, Nosková I, Schwarz O (2010b). Structure and development of forest stands on permanent research plots in the Krkonoše Mts. *Journal of Forest Science*. 56: 518–530.
- Vacek S, Vacek Z, Podrázský V, Bílek L, Bulušek D, Štefančík I, Remeš J, Štícha V, Ambrož R (2014a). Structural diversity of autochthonous beech forests in Broumovské stěny National Nature Reserve, Czech Republic. *Austrian Journal of Forest Science*. 131: 191–214.
- Vacek S, Vacek Z, Schwarz O (2010c). *Struktura a vývoj lesních porostů na výzkumných plochách v národních parcích Krkonoš*. Lesnická práce s. r. o., Kostelec nad Černými lesy, pp. 568 s.
- Vacek S, Vašina V, Balcar Z (1988). Analysis of autochthonous spruce stands in NNR Rýchory and Boberská stráň. *Opera Corcontica*. 25: 13–55.
- Vacek Z, Prokupková A, Vacek S, Bulušek D, Šimunek V, Hájek V, Králíček I (2021). Mixed vs. monospecific mountain forests in response to climate change: structural and growth perspectives of Norway spruce and European beech. *Forest Ecology and Management*. 488. - doi: 10.1016/j.foreco.2021.119019
- Vacek Z, Prokupková A, Vacek S, Cukor J, Bílek L (2020). Silviculture as a tool to support stability and diversity of forests under climate change : study from Krkonoše Mountains. *Central European Forestry Journal*. - doi: 10.2478/forj-2020-0009
- Vacek Z, Vacek S, Bílek L, Král J, Remeš J, Bulušek D, Králíček I (2014b). Ungulate impact on natural regeneration in spruce-beech-fir stands in Černý důl nature reserve in the Orlické hory Mountains, case study from central sudetes. *Forests*. 5: 2929–2946. - doi: 10.3390/f5112929
- Vacek Z, Vacek S, Bílek L, Král J, Ulbrichová I, Simon J, Bulušek D (2018). Impact of applied silvicultural systems on spatial pattern of hornbeam-oak forests. *Central European Forestry Journal*. 64: 33–45. - doi: 10.1515/forj-2017-0031
- Vacek Z, Vacek S, Bílek L, Remeš J, Štefančík I (2015b). Changes in horizontal structure of natural beech forests on an altitudinal gradient in the Sudetes. *Dendrobiology*. 73: 33–45. - doi: 10.12657/denbio.073.004
- Vacek Z, Vacek S, Podrázský V, Bílek L, Štefančík I, Moser WK, Bulušek D, Král J, Remeš J, Králíček I (2015c). Effect of tree layer and microsite on the variability of natural regeneration in

- autochthonous beech forests. *Polish Journal of Ecology*. 63: 233–246. - doi: 10.3161/15052249PJE2015.63.2.007
- Vacek Z, Vacek S, Podrázský V, Král J, Bulušek D, Putalová T, Baláš M, Kalousková I, Schwarz O (2016). Structural diversity and production of alder stands on former agricultural land at high altitudes. *Dendrobiology*. 75: 31–44. - doi: 10.12657/denbio.075.004
- Vacek Z, Vacek S, Slanař J, Bílek L, Bulušek D, Štefančík I, Králíček I, Vančura K (2019b). Adaption of Norway spruce and European beech forests under climate change: from resistance to close-to-nature silviculture. *Central European Forestry Journal*. 65: 129–144. - doi: 10.2478/forj-2019-0013
- Vencurik J (2002). Štruktúra a regeneračné procesy výberkových lesov na LHC Mníšek nad Hnilcom. In: *Acta Facultatis Forestalis* 44. Zvolen.
- Wang X, Zhang Q Bin (2011a). Evidence of solar signals in tree rings of Smith fir from Sygera Mountain in southeast Tibet. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 73: 1959–1966. - doi: 10.1016/j.jastp.2011.06.001
- Wang X, Zhang Q Bin (2011b). Evidence of solar signals in tree rings of Smith fir from Sygera Mountain in southeast Tibet. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 73: 1959–1966. - doi: 10.1016/j.jastp.2011.06.001
- WDC-SILSO (2020). Sunspot data from the World Data Center SILSO, Royal Observatory of Belgium, Brussels. Retrieved from <http://www.sidc.be/silso/datafiles>
- Whitcher B (2020). Package ‘waveslim’.
- Whitman E, Parisien MA, Thompson DK, Flannigan MD (2019). Short-interval wildfire and drought overwhelm boreal forest resilience. *Scientific Reports*. 9: 1–12. - doi: 10.1038/s41598-019-55036-7
- Wibig J, Piotrowski P (2018). Impact of the air temperature and atmospheric circulation on extreme precipitation in Poland. *International Journal of Climatology*. 38: 4533–4549. - doi: 10.1002/joc.5685
- Wolfgang W (2002). Syntaxonomische revision der südmitteleuropäischen buchenwälder. *Phytocoenologia*. 32: 337–453. - doi: 10.1127/0340-269X/2002/0032-0337
- Wu CJ, Krivova NA, Solanki SK, Usoskin IG (2018). Solar total and spectral irradiance reconstruction over the last 9000 years. *Astronomy and Astrophysics*. 620: 1–12. - doi: 10.1051/0004-6361/201832956
- Young DJN, Stevens JT, Earles JM, Moore J, Ellis A, Jirka AL, Latimer AM (2017). Long-term climate and competition explain forest mortality patterns under extreme drought. *Ecology Letters*. 20: 78–86. - doi: 10.1111/ele.12711
- Zang C, Buras A, Cecile J, Mudelsee M, Schulz M, Pucha-cofrep D (2018). Package ‘dplR’ R, Dendrochronology Program Library in R Version. Retrieved 25 June 2020, from <https://r-forge.r-project.org/projects/dplr/>
- Zang C, Hartl-Meier C, Dittmar C, Rothe A, Menzel A (2014). Patterns of drought tolerance in major European temperate forest trees: Climatic drivers and levels of variability. *Global Change Biology*. 20: 3767–3779. - doi: 10.1111/gcb.12637
- Zang C, Rothe A, Weis W, Pretzsch H (2011). Zur baumarteneignung bei klimawandel: Ableitung der trockenstress- anfälligkeit wichtiger waldbaumarten aus jahrringbreiten. *Allgemeine Forst- Und Jagdzeitung*. 182: 98–112.

Zhu Z, Piao S, Myneni RB, Huang M, Zeng Z, Canadell JG, Ciais P, Sitch S, Friedlingstein P, Arneeth A, Cao C, Cheng L, Kato E, Koven C, Li Y, Lian X, Liu Y, Liu R, Mao J, Pan Y, Peng S, Peuelas J, Poulter B, Pugh TAM, Stocker BD, Viovy N, Wang X, Wang Y, Xiao Z, Yang H, Zaehle S, Zeng N (2016). Greening of the Earth and its drivers. *Nature Climate Change*. 6: 791–795. - doi: 10.1038/nclimate3004

9. Seznam obrázků

Obr. 1: Malý vývojový cyklus bukových porostů (Koop 1989).	15
Obr. 2: Expanze buku lesního ve střední Evropě dle čtyř časových postupových zón v 10 000, 6 000, 4 000 a 2 000 letech před Kristem. Šedá barva je dnešní rozšíření, tmavě šedá kolečka značí genetická původní refugia a bílá kolečka značí nakřížené porosty z původních refugií (upraveno podle Comps et al. 2000).....	16
Obr. 3: Ukázka vizualizace struktury výzkumných ploch 29 (vpravo) a 32 (vlevo) na Rýchorách ve východních Krkonoších v roce 2017.....	45
Obr. 4: Ukázka letokruhové křivky buku lesního na výzkumných plochách 29 a 32.....	45

10. Seznam tabulek

Tabulka 1: Základní charakteristika ploch pro popis struktury porostů.....	46
--	----

11. Seznam zkratk

Nadm. – Nadmořská

CHKO – Chráněná krajinná oblast

ČR – Česká republika

NAO – North Atlantic oscillation neboli Severo-atlantické proudění

AMO – Atlantic Multidecadal Oscillation neboli Atlantická více dekadní oscilace

MZe – Ministerstvo zemědělství

El Niño Southern Oscillation neboli El Niño – jižní oscilace

TSI – total solar irradiance neboli celkové sluneční záření

NPR – národní přírodní rezervaci

ČHMÚ – Český hydrometeorologický ústav

DBH – tloušťka v d 1,3

EPS – expressed population signal neboli spolehlivost chronologie

SNR – (signal to noise ratio) neboli síla signálu chronologické křivky k dendrochronologickému šumu

R-bar – inter-series correlations neboli meziřadové korelace

Ar1 – first-order autocorrelation neboli autokorelace prvního řádu

PCA – principal component analysis neboli analýza hlavních složek