

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra ekologie lesa



Diplomová práce

**Dynamika růstu horských smrků**

Autor: Bc. Jan Ziegler

Vedoucí práce: Ing. Vojtěch Čada, Ph.D.

© 2022 ČZU v Praze

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jan Ziegler

Lesní inženýrství

Lesní inženýrství

Název práce

**Dynamika růstu horských smrků**

Název anglicky

**Growth dynamics of mountain spruce trees**

### Cíle práce

Cílem práce bude stanovit trend růstu horských smrků ztepilých na úrovni jednotlivců na několika studijních plochách v ČR. Na základě letokruhové, dendrometrické a chemické analýzy a alometrických rovnic budou získány křivky růstu stromů zobrazující trendy v tloušťkovém, objemovém a hmotnostním přírůstu, případně v množství poutaného uhlíku. Získané trendy těchto parametrů přírůstu budou srovnány mezi sebou, případně budou srovnány s průběhem počasí. Výsledky budou dány do kontextu poznatků z aktuální vědecké literatury.

### Metodika

Student se v rámci své práce zapojí do týmu na Katedře ekologie lesa FLD. Bude se podílet na měření a odběru vzorků v terénu a zpracování vzorků v laboratoři. Data budou pocházet z několika lokalit horských smrčín v ČR. Terénní práce budou sestávat z odběru vzorků pro letokruhové analýzy a z měření výšky, tloušťky a objemu koruny stromů. Na základě laboratorních analýz budou získány šířky letokruhů, trend hustoty dřeva, a případně průměrný obsah uhlíku ve dřevě. Hlavním úkolem studenta v rámci diplomové práce bude smysluplně zpracovat naměřená data a provést analýzy, které povedou ke splnění výše zmíněných cílů. Tloušťkový přírůst se stanoví přímo pomocí šířek letokruhů, objemový pomocí kombinace šířek letokruhů a alometrických rovnic, hmotnostní pomocí kombinace šířek letokruhů, alometrických rovnic a hustoty dřeva.

Harmonogram zpracování:

Květen 2020 — Zadání DP

Léto 2020 — Studium literatury, terénní a laboratorní práce, příprava dat a výpočtů

Podzim 2020 — Provedení analýz a výpočtů, zpracování výsledků

Léto – podzim 2018 — Příprava vzorků a měření v laboratoři

Listopad/prosinec 2020 — Konzultace výsledků analýz, osnovy práce a kostry literárních zdrojů se školitelem

Zima 2020/2021 — Příprava textu BP

Březen 2021 — Konzultace finální podoby práce se školitelem

Duben 2021 — Předložení práce



**Doporučený rozsah práce**

40 – 50 stran

**Klíčová slova**

Letokruhová analýza, produkce, dendrochronologie, Picea abies.

---

**Doporučené zdroje informací**

- Bakker, J.D., 2005. A new, proportional method for reconstructing historical tree diameters. *Canadian Journal of Forest Research*, 35(10), pp.2515-2520.
- Bascietto, M., Cherubini, P. and Scarascia-Mugnozza, G., 2004. Tree rings from a European beech forest chronosequence are useful for detecting growth trends and carbon sequestration. *Canadian Journal of Forest Research*, 34(2), pp.481-492.
- Čada, V., Šantrůčková, H., Šantrůček, J., Kubištová, L., Seedre, M. and Svoboda, M., 2016. Complex physiological response of Norway Spruce to atmospheric pollution—Decreased carbon isotope discrimination and unchanged tree biomass increment. *Frontiers in plant science*, 7, p.805.
- Dobbertin, M., 2005. Tree growth as indicator of tree vitality and of tree reaction to environmental stress: a review. *Eur. J. For. Res.* 124, 319–333.
- Fang, O., Wang, Y. and Shao, X., 2016. The effect of climate on the net primary productivity (NPP) of *Pinus koraiensis* in the Changbai Mountains over the past 50 years. *Trees*, 30(1), pp.281-294.
- Hember, R.A., Kurz, W.A. and Girardin, M.P., 2019. Tree Ring Reconstructions of Stemwood Biomass Indicate Increases in the Growth Rate of Black Spruce Trees Across Boreal Forests of Canada. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 124(8), pp.2460-2480.
- Smith, F.W. and Long, J.N., 2001. Age-related decline in forest growth: an emergent property. *Forest Ecology and Management*, 144(1-3), pp.175-181.
- Speer, J.H., 2010. *Fundamentals of Tree-ring Research*. University of Arizona Press,
- Wirth, C., Schumacher, J. and Schulze, E.D., 2004. Generic biomass functions for Norway spruce in Central Europe—a meta-analysis approach toward prediction and uncertainty estimation. *Tree physiology*, 24(2), pp.121-139.
- Xiang, W., Leitch, M., Auty, D., Duchateau, E. and Achim, A., 2014. Radial trends in black spruce wood density can show an age-and growth-related decline. *Annals of forest science*, 71(5), pp.603-615.
- 

**Předběžný termín obhajoby**

2019/20 LS – FLD

**Vedoucí práce**

Ing. Vojtěch Čada, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra ekologie lesa

**Konzultant**

RNDr. Jan Tumajer, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 22. 2. 2021

**prof. Ing. Miroslav Svoboda, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 17. 3. 2021

**prof. Ing. Róbert Marušák, Ph.D.**

Děkan

V Praze dne 29. 03. 2022

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci „Dynamika růstu horských smrků“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Vojtěcha Čady, Ph.D. a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že zveřejněním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Ve Smetanově Lhotě dne 10.4.2022

---

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé práce Ing. Vojtěchu Čadovi, Ph.D. za jeho čas a odborné rady. Také bych rád poděkoval mé rodině za psychickou podporu v průběhu celého studia a jazykovou korekturu této práce.

# Dynamika růstu horských smrků

## Abstrakt

Reakce růstu dřevin na probíhající klimatickou změnu je v dnešní době jeden z hlavních zájmů lesních ekologů. Tato práce se zaměřuje na interpretaci výsledků letokruhové analýzy 224 vývrtů získaných ze smrků ztepilých (*Picea abies* L.) na celkem 5 plochách, kde byly dvě v Krkonoších a po jedné v Jeseníkách, Krušných horách a na Šumavě. Cílem práce je kvantifikace přírůstu horských smrčů pomocí tloušťkového, objemového a hmotnostního přírůstu, přírůstu na kruhové základně, hustoty a množství vázaného uhlíku. Dalším cílem je srovnání jednotlivých, již zmíněných, typů přírůstu mezi sebou.

V práci byla převážně sledována 2 stanovená období (1960–1984 a 1985–2009) před a po největším znečištění ovzduší průmyslem na severu Čech a přilehlých částí NDR a Polska. V prvním období bylo na všech plochách pozorováno snížení u všech typů přírůstu. Toto snížení bylo výraznější u ploch v Krkonoších a Krušných horách, u ploch více vzdálených od hlavních zdrojů emisí, tj. Jeseníky a Šumava, bylo snížení podstatně méně markantní. Také bylo v tomto období sledováno mírné zvýšení průměrné hustoty dřeva na všech plochách. Ve druhém období bylo naopak zjištěno zvýšení všech typů přírůstu na všech plochách. Toto zvýšení bylo nápadnější u ploch, které v minulém období zaznamenaly největší pokles hodnot. Změna hustoty dřeva byla v tomto období minimální.

U porovnání jednotlivých typů přírůstu mezi sebou byla zjištěna nejvyšší hodnota korelačního koeficientu při srovnání objemového a hmotnostního přírůstu, což bylo vysvětleno podobností zjištění těchto přírůstů a s tím související podobností jejich trendů. U srovnání přírůstu na kruhové základně s objemovým a hmotnostním přírůstem byly také zjištěny vysoké hodnoty  $r$  vysvětlené podobnou reakcí jejich trendů na různé fáze růstu porostu. U korelace tloušťkového přírůstu s ostatními typy přírůstu byly zjištěny podstatně nižší (některé také statisticky nesignifikantní) hodnoty  $r$  z důvodu podstatných rozdílností dynamiky trendu tloušťkového přírůstu v porovnání s ostatními typy přírůstu.

**Klíčová slova:** Letokruhová analýza, produkce, dendrochronologie, *Picea abies*.

# Growth dynamics of mountain spruce trees

## Abstract

In recent years, the growth reaction of trees to the ongoing climate change has been one of the main interests of forestry ecologists. This thesis aims to interpret the outcomes of tree-ring analysis performed on 224 cores obtained from Norway spruce trees in a total of 5 plots, two of which in Krkonoše and one in Jeseníky, Krušné hory, and Šumava. This thesis aims to quantify the increment of mountain spruce stands using radial, volume, stem biomass, and basal area increments, wood average density, and the amount of fixed carbon. The thesis also deals with a mutual comparison of individual above-mentioned increment types.

The thesis mainly compares two time periods (1960–1984 and 1985–2009), i.e. before and after the biggest air pollution caused by industrial activities in the northern part of Bohemia and the adjacent parts of East Germany and Poland. In the first period, there was a decline in all increment types in all plots. This decline was more significant in Krkonoše and Krušné hory sites, in sites further away from main sources of emissions the decline was less serious. Also, a small increase in average wood density was observed in this period in all plots. On the contrary, the second period brings an increase in all increment types in all plots. This increase was more striking in plots that showed the biggest decline in the previous period. The change in average wood density was minimal in this period.

When comparing individual increment types, the highest correlation coefficient was found between volume and biomass increments. It was explained by the similarity in the establishment of those two increment types and related similarities in their trends. In a comparison between basal area, volume, and biomass increments, high  $r$ -values were also found explained by a similar reaction of trends on different stages of stand growth. In a correlation between radial increment and other increment types much lower (and some of them statistically insignificant)  $r$ -values were found due to fundamental differences in dynamics of radial and other increment types.

**Keywords:** Tree rings analysis, production, dendrochronology, Norway spruce



# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b> .....	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Cíl práce</b> .....	<b>12</b>
<b>3</b>	<b>Rozbor problematiky</b> .....	<b>13</b>
3.1	Dynamika přírůstu a souvislost s prostředím.....	13
3.1.1	Faktory ovlivňující přírůst.....	14
3.1.1.1	Biotické faktory .....	14
3.1.1.2	Abiotické faktory .....	16
3.2	Smrk ztepilý .....	18
3.2.1	Determinační znaky .....	18
3.2.2	Kořenový systém .....	19
3.2.3	Využití .....	20
3.2.4	Ekologie.....	20
3.2.5	Areál .....	21
3.2.6	Současné problémy.....	21
<b>4</b>	<b>Metodika</b> .....	<b>23</b>
4.1	Studovaná oblast .....	23
4.1.1	Jeseníky .....	23
4.1.2	Krkonoše.....	24
4.1.3	Krušné hory .....	25
4.1.4	Šumava .....	25
4.2	Metodika získání dat .....	26
4.2.1	Práce v terénu .....	26
4.2.2	Práce v laboratoři.....	27
<b>5</b>	<b>Výsledky</b> .....	<b>31</b>
5.1	Trendy přírůstu .....	31
5.2	Porovnání způsobů zjištění přírůstu.....	37
<b>6</b>	<b>Diskuse</b> .....	<b>39</b>
<b>7</b>	<b>Závěr</b> .....	<b>43</b>
<b>8</b>	<b>Seznam použitých zdrojů</b> .....	<b>44</b>

## Seznam obrázků

Obr. 1 – Umístění ploch v rámci ČR (zdroj: autor, ArcGIS Online).....	23
Obr. 2 – Průměrný tloušťkový přírůst kmenů za rok (zdroj: autor, MS Excel).....	31
Obr. 3 – Průměrný přírůst kmenů na kruhové základně za rok (zdroj: autor, MS Excel). ...	32
Obr. 4 – Průměrný objemový přírůst kmenů za rok (zdroj: autor, MS Excel). ....	33
Obr. 5 – Průměrná hustota dřeva v jednotlivých letech (zdroj: autor, MS Excel).....	34
Obr. 6 – Průměrný hmotnostní přírůst kmenů za rok (zdroj: autor, MS Excel). ....	35
Obr. 7 – Průměrné vázání uhlíku kmeny za rok (zdroj: autor, MS Excel). ....	36

## Seznam tabulek

Tabulka 1 - Parametry jednotlivých ploch pro výpočet výšky. ....	29
Tabulka 2 – Hodnocení korelace mezi jednotlivými typy přírůstu na jednotlivých plochách (tučné označení, * = $p < 0,05$ ). ....	37

# 1 Úvod

V současné době je schopnost lesů vázat uhlík vyzdvihována jako potenciální šance ke zmírnění klimatické změny a jejích dopadů na naši planetu a lidstvo samotné (Lagergren 2019). Ačkoliv pokrývají přibližně třetinu povrchu zemské pevniny, lesy váží přibližně 45 % pozemního uhlíku a zodpovídají za 80 – 90 % uhlíku vázaného v tělech rostlin (Panthi 2019). Pokud mají naše lesy takový vliv na koloběh uhlíku na Zemi, je důležité co nejlepší porozumění vlivu probíhající změny klimatu a zvyšující se koncentraci CO<sub>2</sub> na fyziologii a přírůst jednotlivých dřevin a zjištění vhodnosti různých druhů na daných stanovištích (Reed 2018). Má se za to, že postupné zvyšování koncentrace CO<sub>2</sub> v atmosféře probíhající od průmyslové revoluce má kladné účinky na přírůst dřevin (Hember 2019). Danou problematiku je však potřeba dále prozkoumat, protože podle některých vědců tomu tak není (Wang 2019).

Předpokládá se, že v rámci klimatických změn bude docházet k častějšímu výskytu klimatických extrémů, což způsobí výraznější výkyvy v přírůstu stromů a produkci lesů (Babst 2013). Tyto změny lesních podmínek prověří lesníky v hledání vhodných alternativ v oblasti hospodářské úpravy lesa, založené na znalostech reakce jednotlivých druhů na průběh změny klimatu. Proto je nezbytné, aby lesníci dobře rozuměli tomu, jaké faktory přírůst stromů ovlivňují a jakým způsobem je co možná nejúčinněji eliminovat.

Svojí diplomovou prací bych chtěl přispět k lepšímu poznání tématu dynamiky přírůstu a různých způsobů jejího hodnocení u horských porostů smrku ztepilého. Zabývat se tématem přírůstu dřevin je v dnešní době velmi důležité obzvláště proto, že je to jedna z hlavních složek produkce dřeva, tedy hlavním motorem pohánějícím ekonomiku v lesním hospodářství. Pochopení a eliminace faktorů negativně ovlivňujících přírůst může vést k sestavení doporučení pro pěstování hospodářských dřevin, ke zvýšení produkce a výnosnosti našich lesů a vyšší míře vázání uhlíku z atmosféry.

## **2 Cíl práce**

Cílem této práce je kvantifikace intenzity tloušťkového, objemového a hmotnostního přírůstu, hustoty dřeva a vázání uhlíku na zkoumaných plochách, vzájemné srovnání těchto trendů a podání do kontextu s vědeckou literaturou.

## 3 Rozbor problematiky

### 3.1 Dynamika přírůstu a souvislost s prostředím

Činností sekundárních meristémů kambia a felogenu vznikají sekundární neboli druhotná pletiva, která jsou zodpovědná za tvorbu dřeva, lýka a kůry, a tedy tloušťkového přírůstu stromu.

*Kambium* svou dělivou činností vytváří sekundární vodivá a zpevňující pletiva uspořádaná do souvislého kruhu, která oddělují dovnitř druhotné dřevo a vně druhotné lýko. V temperátní oblasti je činnost kambia vázána na vegetační období. Na jaře svou činnost zahajuje a během podzimu před nástupem dormance činnost ukončuje. Je tedy ovlivňována jak teplotou, tak měnící se fotoperiodou (délkou denního světla za 24 hodin, po jehož dobu je rostlina schopna provádět fotosyntézu). V našich zeměpisných šířkách se činnost kambia projevuje tvorbou letokruhů, na kterých je viditelná hranice mezi tenkostěnným jarním dřevem s velkými buňkami a tlustostěnným letním dřevem s malými buňkami. Tento anatomický předěl je určován dostupností vody a velkou metabolickou aktivitou na jaře oproti nižší aktivitě v letním období a na konci vegetační sezóny. Kambium může v případech extrémního sucha či defoliace v důsledku žíru listožravého hmyzu vytvořit během jednoho roku dva nebo naopak žádný letokruh.

*Felogen* produkuje sekundární krycí pletiva a u sekundárně tloustnoucích rostlin tak nahrazuje funkci pokožky. Směrem ven odděluje buňky korku a směrem dovnitř buňky felodermu, který je také nazýván zelenou kůrou. Pokožka postupně odumírá a je přirůstající sekundární pokožkou potrhána. Felogen nemusí mít kruhový tvar, protože se u různých druhů rostlin zakládá v různých vrstvách. Buněčná stěna je neprostupná pro vodu a částečně i pro vzduch, a to díky impregnaci buněk korku suberinem a ligninem. Dospělé buňky jsou obvykle odumřelé a vyplněné vzduchem (Tomášková 2016).

Přístup a důležitost zdrojů řídicích přírůst dřevin závisí na stanovišti, dimenzích stromu, jeho umístění v porostu a růstových vlastnostech dané dřeviny (Cienciala 2018). Na jeden strom působí zpravidla více stresorů najednou v podobě konkurence sousedních stromů, nedostatku vláhy či živin atd. Pokud míra jednoho stresoru či jejich kombinace přesáhne určitou hranici, začne se strom soustředit pouze na zajištění životně důležitých a obranných funkcí a ty méně důležité omezí nebo zcela zastaví. Jako první tedy zpravidla

omezuje dělení buněk a růst. Ušetřená energie se začne využívat na zajištění fotosyntézy, respirace, růstu kořenů nebo na syntézu specifické stresové bílkoviny chránící strukturu makromolekul. Pokud je stresový faktor překonán, začne strom opět tvořit větší tloušťkový přírůst, pokud však přetrvává, může tlumení růstu pokračovat až do úhynu (Dobbertin 2005; Tomášková 2016).

V posledních letech přírůst a mortalitu stromů ovlivňují častěji se vyskytující extrémní počasí, změny srážkových úhrnů a zvyšující se teploty (Bošeľa 2014). Jedním z nejvíce efektivních přístupů k regulování škod na přírůstu je zvýšení diverzity lesního ekosystému, kde zpestření dřevinné skladby zvyšuje stabilitu porostu. Použitím směsi dřevin s různě hlubokým kořenovým systémem se zvýší efektivnost využití půdního profilu, kde mohou být čerpány živiny z celé jeho hloubky (Mikulenka 2020). Zvýšením diverzity dřevinné skladby se také snižuje počet stromů v porostu, na které se specializuje určitý škůdce a zároveň navyšuje pravděpodobnost výskytu jeho přirozených nepřátel – patogenů, predátorů nebo parazitů (de Groot 2018).

### **3.1.1 Faktory ovlivňující přírůst**

#### **3.1.1.1 Biotické faktory**

##### **3.1.1.1.1 Vliv stáří stromu na jeho přírůst**

Cienciala (2018) ve svém výzkumu prokázal rozdíl v tloušťkovém přírůstu mezi mladými a staršími smrky. Stromy do 40 let vykazují průměrný roční tloušťkový přírůst o 0,38 mm větší než stromy rostoucí na podobných stanovištních podmínkách ve věku 60 let, což bylo ověřeno párovým t-testem. Mladší stromy mají tedy vyšší přírůst o 23–28 %. Je tomu tak nejspíše proto, že si strom snaží vytvořit dominantní postavení v porostu. K tomu potřebuje co nejrychleji narůstat nejen do výšky, ale také do šířky, aby měl vysoký strom podporu a stabilitu. Tloušťkový přírůst se snižující se tendencí však neznamená nutně snižování produkce stromu. Na kmeni s vyšší kruhovou základnou totiž při stejné šířce letokruhu přiroste více dřeva než na kmeni s nižší kruhovou základnou. Silnější stromy tedy nepotřebují tak velký tloušťkový přírůst, aby jim za rok přirostl stejný nebo dokonce větší objem hmoty než u stromů slabších.

### 3.1.1.1.2 Rostlinná konkurence

Druhým biotickým faktorem ovlivňujícím dynamiku přírůstu je konkurence ostatních rostlinných organismů. Již od vyklíčení působí na dřeviny stres v podobě konkurence sousedních rostlin. Tento stres vzniká omezením přísunu světla, živin a vody, které semenáček může přijmout. Některé expanzivní trávy, vyskytující se především na větších odlesněných plochách, mohou dokonce svým růstem úplně zabránit přirozené obnově dřevin (Kovář 2013; Tomášková 2016). Po překonání tohoto stresoru přichází další v podobě přítomnosti ostatních stromů porostu. Míra stresu, kterou na sebe stromy vzájemně působí omezením přísunu světla, záleží na velikosti jejich korun a jejich vzdálenosti od sebe (Saulnier 2020). Jednotlivé stromy si navzájem působí stres nejen omezením dopadu slunečního záření, ale také omezením přístupu kořenů k vodě. Ty stromy, které mají kořenový systém při povrchu půdy mají dříve k dispozici prosakující vodu, zatímco hluboko kořenící dřeviny jsou schopny získat vláhu a živiny z větších hloubek půdního profilu (Fraver 2014).

V chladných a vlhkých horských lesích ČR mají konkurenční výhodu ty dřeviny, které jsou schopny překonat dlouhá období v zástínu dospělého porostu. Po rozpadu tohoto porostu se stanou jedinci již rostoucí v podrostu hlavní úrovní nově vznikajícího zápoje. Zatímco dřeviny netolerující zástin začínají svůj růst až po rozpadu dospělé nadúrovně a mají tak nevýhodu v nastoupení růstu o jednotky až desítky let později nebo kvůli velkému zastínění půdy nemusí k růstu semenáčku dojít vůbec (Saulnier 2020).

V hospodářských lesích se lesníci snaží u většiny dřevin výchovnými zásahy snížit počet stromů v porostu a tím pádem i stres, který mezi sebou stromy vytvářejí, a tak podpořit tloušťkový přírůst (Fraver 2014). Kvůli dosažení kvalitních a co nejlépe zpeněžitelných sortimentů však nemohou konkurenci mezi jedinci v porostu vyloučit zcela – jednotlivé stromy, které by měly kolem sebe příliš prostoru, by se totiž začaly zavětřovat a tím vytvořily neatraktivní sortimenty (Kovář 2013). Prořezávky a probírky mají také vliv na příjem vody, se kterým by se při jejich provádění mělo počítat. Z krátkodobého hlediska je sice v porostu po provedení výchovného zásahu méně jedinců, a tím pádem na ně připadá větší podíl srážkové vody, z dlouhodobého hlediska to ale vede ke zvětšování kořenového systému u jedinců, kteří v porostu zbyly a zvyšování jejich nároků na vodu (Rehschuh 2017).

### 3.1.1.1.3 Efekt smíšení

Na základě analýzy rozsáhlého souboru dat z celé Evropy bylo dokázáno, že porostní směsi mají kladný vliv na produkci lesů, zároveň ale nebylo dokázáno zvýšení tloušťkového ani výškového přírůstu jednotlivých stromů směsi na rozdíl od monokultur. To je dáno lepším využitím celé hloubky půdních horizontů díky rozdílné hloubce a typu kořenových systémů jednotlivých dřevin a také vyšší hustotou smíšených porostů. Zvýšení produkce těchto porostů je tedy dosaženo efektivnějším čerpáním živin z většího rozsahu hloubky půdního horizontu a lepším využitím porostní plochy. Další pozitivní aspekt efektu smíšení je pozorován zejména na chudých půdách. Listnaté dřeviny zde svým opadem zvyšují kvalitu stanoviště a kompenzují tak růstová omezení vytvořená v důsledku nedostatku živin u stanovišť pod jehličnatými monokulturami (Vejpustková 2018).

### 3.1.1.2 Abiotické faktory

#### 3.1.1.2.1 Klima

Letní teploty v aktuální vegetační sezóně a letní a podzimní teploty předešlého roku jsou nejběžnější klimatické faktory ovlivňující přírůst smrku ztepilého napříč Evropou (Bošeľa 2014). Ve vyšších nadmořských výškách platí, že zvyšující se teploty prodlužují vegetační období. Díky vyššímu úhrnu srážek, který pro naše pohoří platí téměř univerzálně, zde není limitující faktor přísun vody, ale teplota, jejíž zvýšení umožňuje růst stromů po delší část roku (Tremel 2012). To by mohlo způsobit tlak na horské smrčiny od konkurenčně silnějších dřevin rozšiřujících se z nižších nadmořských výšek. Pokud by toto vytlačování probíhalo rychleji, než je zjištěný postup horní hranice lesa (0,23–2,00 m/rok) došlo by ke zmenšení areálu těchto horských porostů (Correa-Díaz 2019; Davis 2020). V nižších nadmořských výškách tvrzení o prodlužování vegetačního období vlivem oteplování neplatí, protože zde není limitujícím faktorem teplota, ale množství srážkové vody, jejíž přístupnost se v posledních letech, narozdíl od teploty, spíše snižuje (Čihák 2018).

Zvýšení přírůstu vlivem změny klimatických poměrů v naší krajině zaznamenal ve své studii i Cienciala (2018). Ten prostřednictvím letokruhové analýzy 1246 sledovaných jedinců smrku ztepilého z celé České republiky zjistil, že vlivem zvýšené depozice dusíku a jeho dostupnosti v půdě, zvyšující se koncentrace CO<sub>2</sub>, společně s lepší úrovní managementu v lesích se od šedesátých let minulého století zvýšil tloušťkový přírůst až o



28 %. V práci také konstatoval, že se za toto sledované období také zvýšil výškový přírůst o přibližně stejnou hodnotu. Na téma kladného vlivu změny klimatu, převážně zvyšování teploty a koncentrace CO<sub>2</sub> na přírůst dřevin se ale stále vedou debaty a existují výzkumy rozporující toto tvrzení (Wang 2019).

Dále byl stanoven předpoklad, že pokud se bude nadále zvyšovat frekvence suchých roků, přírůst našich hlavních hospodářských dřevin by se naopak mohl začít snižovat. To by bylo způsobeno nízkým úhrnem srážek a následným poklesem hladiny spodní vody a jejím zneprístupnění i pro hluboko kořenicí dřeviny, které na její nedostatek nejsou adaptovány (Babst 2013). Srážky jsou také důležitým nástrojem na vyrovnávání teplotních extrémů, kdy letní srážky částečně zmírňují dopady vysokých teplot. Na druhou stranu sněhová pokrývka funguje jako izolant a zmírňuje dopady extrémně nízkých teplot v zimních měsících a při tání zajišťuje přísun vody na počátku vegetační sezóny (Davis 2020).

#### 3.1.1.2.2 Znečištění ovzduší

Zdravotní stav jehličnatých porostů byl ve střední Evropě od šedesátých let minulého století výrazně narušován, a to převážně vlivem oxidu siřičitého, který produkovaly uhelné elektrárny. Ty nejvíce znečišťující ovzduší stály v místě zvaném „černý trojúhelník“ na rozmezí Krušných hor a přilehlých oblastí bývalé NDR a Polska, kde tvořily jeden z největších zdrojů znečištění ovzduší na světě (Putalová 2018). Produkovaný oxid siřičitý nejenže znečišťoval ovzduší, ale kyselými spady způsoboval také acidifikaci půdy a podzemní vody. Kyselost mohla být částečně neutralizována ještě před vstupem do půdy polétavým prachem nebo popílkem produkovaným elektrárnami. Toho ale ubylo kvůli snižování emisí probíhajícího mezi léty 1986 a 1998. Výsledkem tohoto snižování tedy bylo snížení produkce oxidu siřičitého o 90 %, ale také odstranění možnosti jeho neutralizace před vstupem do ekosystému. Toto snížení emisí však ke zotavení porostů stále nestačilo a vyústilo v další žloutnutí, řídnutí korun a zhoršení zdravotního stavu porostů především stálezelených dřevin, které vedlo ke snížení produkce a odumírání velkých ploch v řádu desítek tisíc hektarů (Bošeřa 2014; Cienciala 2018; Godek 2015; Krejčí 2001).

Za to, že se rozpadaly především stálezelené porosty a těch opadavých se tato problematika příliš netýkala, může fakt, že listnaté dřeviny mají v době, kdy se tvoří námraza, již opadané asimilační orgány. Bylo totiž zjištěno, že je námraza s pH nižším než 3 poškozují nejvíce. Jehličnaté porosty tedy byly poškozovány jak námrazou, jejíž kyselost

klesla v roce 1995 až na hodnotu pH 2,33, tak kyselými dešti v průběhu jarních, letních a podzimních měsíců. Tyto kyselé srážky naruší voskovou vrstvu na povrchu jehlic, z níž se poté vylouhují živiny, zejména vápník, draslík a hořčík. V těsné blízkosti velkých zdrojů znečištění mohou být stromy poškozovány i přímým kontaktem asimilačních orgánů s oxidem siřičitým, který ničí chlorofyl a jehličí uschne (Krejčí 2001). Jedním z nejvíce zasažených pohoří v České republice byly Jizerské hory, kde byl v období extrémní acidifikace mezi léty 1977 a 1995 přírůst místních smrčín redukován až na 60 % hodnot předchozích desetiletí (Vrtiška 2018).

## 3.2 Smrk ztepilý

Smrk ztepilý (*Picea abies* L.) je jehličnatá dřevina z čeledi jedlovitých, také zvaná borovicovitě – (*Pinaceae*), rodu smrk – (*Picea*) A. Dietr (Holkup 2013).

### 3.2.1 Determinační znaky

Kůra je červenohnědá až šedá, i ve vyšším věku poměrně slabá, odlupuje se v tenkých šupinách. Mladí jedinci mají kůru hladkou, s postupem času podélně praská (Slávik 2016). Jehlice jsou čtyřhranného průřezu, leskle zelené, zašpičatělé, dlouhé 1–3 cm (Úřadníček 2001). Na letorostu zůstávají po opadu jehlic výstupky, na zdravých jedincích vydrží jehlice až 10 let. Samčí květy jsou ve formě červených, později žlutých šištic rozmístěny po celém stromě, samičí květy jsou v horní části koruny jako zelené nebo červené šištice. Plod je žluto-hnědé kapkovité semeno, které je ve lžičce svíráno křídélkem. Je uloženo v hnědé válcovité šišce, která bývá velmi proměnlivá jak délkou (8–20 cm), tak tvarem semenných šupin. Koruna je většinou pravidelná, kuželovitá (Holkup 2013).

Bez zásahu člověka, abiotických či biotických činitelů se dožívá 350–400 let (Úřadníček 2001), v České republice měl nejstarší smrk 632 let. Rostl v I. zóně Národního parku Šumava u Plešného jezera, první měřený letokruh vytvořil v roce 1372, ten poslední v roce 1994, kdy k jeho skonání nejspíše došlo po napadení kůrovcem (Hochmanová 2016). Smrk je relativně vysoký strom, jehož střední výška na nejhorší a nejlepší bonitě v ČR ve 100 letech je 16 m a 36 m, resp. (Musil 2003). Nejvyšší jedinec nazývaný Želnavský smrk, pokácený poblíž obce Želnavá na Šumavě roku 1864 pro účely vystavení na světových

výstavách, dosahoval výšky 68,9 m. Jedná se tak o nejvyšší zdokumentovaný smrk ztepilý v Evropě (Čížek 2011).

Maximální tloušťky v 1,3 m (DBH) se pohybují v rozmezí od 100 do 150 cm, avšak i v tomto případě byl na Šumavě, konkrétně poblíž Boubína, nalezen jedinec, který toto běžné rozpětí překonal. Jednalo se o strom zvaný Wunderfichte pokácený roku 1882, který měl  $d_{1,3}$  182 cm a objem 45 m<sup>3</sup>, což z něj dělá největší zjištěný exemplář v obou veličinách (Musil 2003).

### 3.2.2 Kořenový systém

Kořenový systém je plochý, také nazývaný talířový. Je nedostatečně zakotvený v půdě a vytváří ze smrku z našich dřevin druh nejnanežněji podléhající bořivým větrům. Nejlabilnější jsou SM monokultury na podmáčených půdách, kde mělký kořenový systém není schopen zajistit potřebnou podporu (Musil 2003). Tento kořenový systém se u smrku mohl vytvořit z toho důvodu, že se jeho předchůdce vyvíjel v místech s chladným až arktickým klimatem, kde byla trvale zamrznutá spodní vrstva půdního profilu a kořeny se do větší hloubky nedostaly (Slávik 2016). Kořenový systém smrku je značně variabilní, největší vliv na jeho tvorbu má z půdních podmínek převážně obsah kyslíku v půdním vzduchu a s tím související vodní poměry. Kořinky smrku se vyhýbají půdním vrstvám chudým na kyslík. Pokud je tedy vysoká hladina podzemní vody (tj. voda rovněž chudá na O<sub>2</sub>), vytvoří se velmi mělký kořenový systém s krátkými svislými kořeny, které jsou u hladiny podzemní vody jakoby vodorovně zastřižené. Naproti tomu v příznivých půdních podmínkách, jako jsou hluboké hlinité písky, mohou svislé kořeny zasahovat až 6 m hluboko.

Charakteristika kořenového systému je také ovlivňována obsahem živin v půdě. Na bohatých stanovištích strom kořeny nepotřebuje pro živiny sahát daleko, kořenový systém je tedy více subtilní a hustý. Naopak na půdách chudých či suchých je kořenový systém méně hustý, avšak plošně větší. Také se zde vyskytují provazovité vyhledávací kořeny o délce až 10 m. Nej hustěji prokořeněné bývají svrchní humusové vrstvy půdy v místě zvaném okap (obvod průmětu koruny odkud stéká srážková voda). Pokud se jedná o dostatečně bohaté stanoviště, může být největší koncentrace kořenů do 10 cm hloubky, což vrchní vrstvy půdy nadměrně vyčerpává (Musil 2003).

### 3.2.3 Využití

Smrkové dřevo je žlutobílé, bezjaderné a stejnorodé. Používá se jako dřevo stavební, truhlářské, nástrojářské nebo rezonanční, využívá se také na výrobu papíru nebo jako palivo (Úředníček 2001). Dále se pěstují na plantážích jako vánoční stromky nebo lze pro tento účel využít vhodné jedince z prořezávek či prostřihávek. Výběr jedinců při provádění výchovného zásahu by se však neměl řídit jeho vhodností k prodeji, nýbrž nutností jeho odstranění. V minulosti se smrková pryskyřice zpracovávala na smůlu, kalafunu a terpentýn, z kůry se vyrábělo koželužské tříslo (Musil 2003).

### 3.2.4 Ekologie

Smrk se hodnotí jako polostinná dřevina, avšak v mladém věku (do výšky okolo 1 m) je více tolerantní k zástínu, což umožňuje zmlazení v porostu, který je pouze mírně prosvětlený. Následně je vhodné postupné uvolňování nově vzniklého porostu, náhlé osvětlení dospělých jedinců totiž způsobuje korní spálu (Holkup 2013). Díky jeho původu v horských oblastech není náročný na půdu ani klima s výjimkou vysoké citlivosti na nedostatek jak vertikálních, tak horizontálních srážek. To způsobuje obavy o ovlivnění produkčního potenciálu smrku v ohledu na klimatickou změnu (Rehschuh 2017) a odolnosti vůči větru a imisím (Tumajer 2017; Úředníček 2001). Porosty s převahou smrku silně ovlivňují půdotvorný proces svým kyselým opadem, který vytváří silné vrstvy surového humusu. Jeho ukládání v půdě se při nedostatku vláhy a vápníku stupňuje a může vést až k podzolizaci. To výrazně omezuje přísun živin všem dřevinám na daném stanovišti a vede ke snížení produkce jak těchto dřevin, tak i smrku, způsobující tuto změnu. Tato nevýhoda ve snížení produkčního potenciálu stanoviště mu ale dává velkou konkurenční výhodu nad dřevinami, které takový pokles přístupu živin nejsou schopny přežít (Slávik 2016).

Smrk netvoří výmladky a jen obtížně kořenuje z řízků, avšak v příhodných podmínkách se dokáže rozmnožovat vegetativně a to tzv. hřížením. Pokud se spodní zelené větve přirozeně dotýkají země nebo jsou zatíženy vlhkým opadem, sesuvem kamenů či obdobným způsobem přitlačeny k zemi, dochází k jejich zakořenění. To probíhá nezávisle na nadmořské výšce, avšak u jedinců u horní hranice lesa a na kamenitých sutích je tento jev pozorován častěji, pravděpodobně z důvodu obtížnějšího generativního rozmnožování.

Tímto způsobem se mohou vytvořit i kolonie hříženců, které mají na rozdíl od generativně vytvořených skupin výhodu neexistující kořenové konkurence (Musil 2003).

### 3.2.5 Areál

Smrk je považován za naši morfologicky nejvíce variabilní jehličnatou dřevinu. To je dáno především jeho původním rozšířením od střední Evropy až po východní Asii a růstem od půd s velmi malým podílem minerálních horizontů (edafická kategorie Y), přes rašeliniště či podmáčená stanoviště až po bohatá hlinitá stanoviště. Zde se jevil jako konkurenčně silnější naší původně nejvíce rozšířené dřevině – buku lesnímu (*Fagus sylvatica* L.) Všechna tato stanoviště, na kterých smrk převládal, leží v šestém a vyšším vegetačním stupni. Strop jeho výskytu je u nás pozorován ve 1350 m n.m. Pokud se měl smrk rozšířit do pátého vegetačního stupně a níže, čelil silnému konkurenčnímu tlaku právě buku, který ho většinou dokázal překonat nebo alespoň potlačit do formy porostní příměsi, ve které byl schopný žít i ve 300 m n.m. (Lagercrantz 1990; Úředníček 2001). Při pohledu do zahraničí je však možné zjistit, že je smrk schopný růst od 0 až po 2450 m n. m. Od hladiny moře roste ve středu Skandinávie, kde je kvůli velmi krátké vegetační sezóně horní hranice lesa jen několik málo desítek metrů nad mořem, do nejvyšších poloh dosahuje na jihu svého přirozeného areálu v Italských alpách (Musil 2003).

V rámci České republiky je nejrozšířenější hospodářskou dřevinou, v roce 2019 bylo jeho zastoupení 49,54 % z celkové plochy porostní půdy. Z klesajícího trendu plošného zastoupení smrku ztepilého (např. v roce 2000 bylo jeho zastoupení 54,1 %) a zároveň rostoucího podílu dřevin listnatých je vidět snaha o přiblížení se doporučeným hodnotám druhové skladby lesů. Dále trvale rostoucí poměr smíšení jednotlivých druhů ve prospěch smíšených porostů s převahou listnatých dřevin poukazuje na rostoucí biodiverzitu našich lesů a zvyšování jejich stability (MZe ČR 2020).

### 3.2.6 Současné problémy

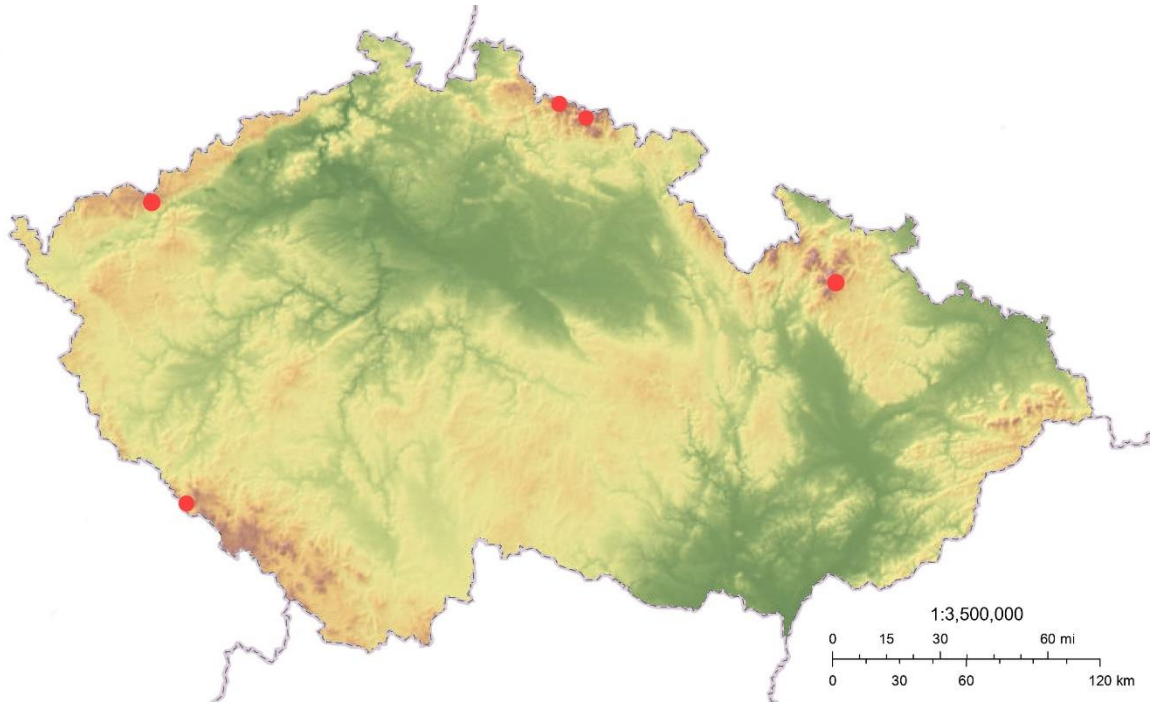
Díky zpeněžitelnosti jeho dřeva a relativně snadnému vypěstování se ze smrku stala ekonomicky nejdůležitější dřevina v Evropě. Kvůli tomu jej lidé začali pěstovat i na nevhodných stanovištích, což vedlo ke snížené stabilitě těchto porostů a jejich narušování suchem, větrem a následně dřevokazným hmyzem (Rehschuh 2017). K tomu se dále přidaly teplotně nadprůměrné a srážkově podprůměrné roky 2014, 2015 a 2018, které zapříčinily

vznik ideálních podmínek k šíření podkorního hmyzu v čele s lýkožroutem smrkovým (*Ips typographus* L.), kterého se stále nepodařilo zastavit v šíření. To v České republice způsobilo téměř desetinásobné zvýšení objemu hmyzové nahodilé těžby za pětileté období mezi léty 2015 a 2019 z 2,31 mil. m<sup>3</sup> na 22,78 mil. m<sup>3</sup> resp. (MZe ČR 2020).

## 4 Metodika

### 4.1 Studovaná oblast

Pro účely této práce byla využita data z pěti kruhových zkusných ploch nacházejících se ve čtyřech pohorích České republiky, konkrétně v Jeseníkách, Krkonoších, Krušných horách a na Šumavě.



Obr. 1 – Umístění ploch v rámci ČR (zdroj: autor, ArcGIS Online).

#### 4.1.1 Jeseníky

V Chráněné krajinné oblasti Jeseníky proběhlo měření v roce 2013, plocha byla změřena v blízkosti vrcholu Temná v nadmořské výšce 1214 m n.m. Na této ploše bylo změřeno 59 jedinců.

CHKO Jeseníky se nachází na hranici atlantické a kontinentální klimatické oblasti. Tento přechod se vyznačuje vysokou relativní vlhkostí, převládajícím západním větrným prouděním a velkým množstvím srážek.

Jeseníky se, díky značným rozdílům v nadmořské výšce, vyznačují velkými klimatickými rozdíly na poměrně krátkých vzdálenostech. Často se tak stává, že je na obou stranách jednoho hřebene zcela odlišné počasí. Ve vrcholových oblastech Hrubého Jeseníku

je po celý rok možnost teplot pod bodem mrazu, na druhou stranu se zde nevyskytují dny s maximální teplotou nad 25 °C.

Z pedologického hlediska zde převládají především kryptopodzolové a podzolové půdy, dále kambizemě a rankery. V nižších polohách a na náhorních plošinách se vyskytují kambizemě. Na bohatých stanovištích to jsou kambizemě mezotrofní, na kyselých stanovištích se vytvořily kambizemě oligotrofní a dystrické, v místech s větším množstvím skeletu poté kambizemě rankerové. V 6. a částečně 7. lesním vegetačním stupni (LVS) převládají kryptopodzoly, také zvané horské hnědé půdy. Dle bohatosti podloží se dále rozdělují na kryptopodzoly mezotrofní a oligotrofní. Nezanedbatelné množství půdy zde představuje kryptopodzol rankerový vyskytující se na příkrých svazích a kryptopodzol pseudoglejový, který je především na vlhkých stanovištích v úžlabinách a prohlubních. Ve vyšších polohách se vyskytují humusové podzoly, což jsou silně kyselé půdy s mocnou vrstvou humusu (AOPK ČR 2022).

#### **4.1.2 Krkonoše**

V Krkonošském národním parku byly v roce 2015 změřeny dvě plochy, ta první v nadmořské výšce 1199 m n.m. se nacházela v povodí horské řeky Mumlavy 1350 m jihozápadně od vrcholu Sokolník ležící na hranicích s Polskem. Zde bylo změřeno 33 jedinců. Druhá plocha, na které byla získána data 50 jedinců, se nacházela u pramene Jeleního potoka na Liščí hoře ve výšce 1150 m n.m.

Klima Krkonoš má oceánický charakter, kromě výrazného střídání ročních období je pro počasí v Krkonoších také charakteristická silná proměnlivost v krátkých časových úsecích a nízkými teplotami. Další, pro toto pohoří význačný klimatický jev, je velké množství srážek, kde v celoročním úhrnu převládají srážky v pevné formě jako sníh, kroupy či námraza. Největší množství srážek (až 1400 mm/rok) spadne na hřebenech a v údolních polohách. Dešťové srážky jsou zde spíše výjimečné, jejich výskyt má ale spíše charakter živelných pohrom. To z toho důvodu, že při deštích zde může spadnout i více než 200 mm srážek za den, což způsobuje povodňové vlny a sesuvy zemních lavin.

Kvalitu půd v Krkonoších ovlivňuje zejména minerálně chudé podloží a chladné a velmi vlhké klima. V nižších polohách mají převahu silně kyselé kambizemě spolu s typickými a rankerovými kryptopodzoly. Ve vyšší nadmořské výšce to jsou humusové a



rašelinné podzoly a podzolové rankery. V nejvyšších polohách se vyskytují půdy pro Českou republiku výjimečné, a to alpínské půdy charakteristické svojí mělkostí a minerální chudostí. V blízkosti četných vodních toků a trvale zamokřených oblastí se vytvořily pseudogleje a gleje, větší toky lemují typické a glejové fluvizemě. Na vrcholových plošinách se na malých plochách vyskytují i organozemě a organozemní gleje (Hollý 2004; KRNAP 2022).

#### **4.1.3 Krušné hory**

Data z pohoří Krušné hory byla změřena u Pytlácké rokly pod Klínovcem v nadmořské výšce 1095 m n.m. Měřením se v roce 2013 získala data k 35 stromům.

Oblast Krušných hor je charakteristická studenou zimou, dlouhým jarem a podzimem a krátkým, několikátýdenním létem. Sníh zde padá až 100 dní v roce, na vrcholcích hor, kde může sněhová pokrývka dosáhnout až 4 m, to může být až 214 dní. Kromě nejteplejších měsíců července a srpna zde může mrznout po celý rok.

V Krušných horách mají převahu kyselá stanoviště s oligotrofní a podzolovou kambizemí vyskytující se v pahorkatinách a vrchovinách. Ve vyšších nadmořských výškách je ve velké míře zastoupený kryptopodzol. Na chudých stanovištích se vytváří kryptopodzol oligotrofní, na těch bohatších kryptopodzol mezotrofní. V nejvyšších oblastech 8. a částečně 7. LVS se vyskytuje humusoželezitý až rašelinný podzol. V menší míře jsou zde zastoupeny gleje, pseudogleje, organozemě a rankery (Chaloupka 2008; ÚHÚL 1999).

#### **4.1.4 Šumava**

Na Šumavě probíhala měření v Národní přírodní rezervaci Černé a Čertovo jezero v nadmořské výšce 1243 m n.m. V blízkosti vrcholu Jezerní hory zde v roce 2014 proběhla měření 47 jedinců.

Šumava se nachází na rozhraní mezi oceánickým a kontinentálním klimatem, což se projevuje malými výkyvy teplot a rovnoměrným rozložením srážek v průběhu roku. Průměrně zde za rok spadne kolem 900 mm srážek, maximálně to ale může být až 1600 mm. Sněhová pokrývka se zde drží až 150 dní v roce. Specifickým jevem na Šumavě jsou ledovcová jezera, vyskytující se v nadmořské výšce kolem 1000 m n. m. Na České straně pohoří se jich vytvořilo 5, na té Německé 3.

Z pedologického hlediska se zde v nejnižších polohách 5. LVS vyskytují kambizemě, především oligotrofní a mezotrofní, v 6. a 7. LVS se nacházejí oligotrofní, mezotrofní a rankerové kryptopodzoly, které mají na Šumavě zdaleka největší podíl ze všech půdních typů. Dále ve vyšší nadmořské výšce 7. a 8. LVS jsou humusové podzoly. Na exponovaných hřebtech a svazích se vyskytuje ranker a v terénních depresích, místech s pravidelnou stagnací vody či na trvale podmáčených půdách se tvoří glejové či pseudoglejové půdy. Nezanedbatelným a pro Šumavu typickým půdním typem je organozem vytvářející vrchoviště a rašeliniště (NP Šumava 2022; ÚHÚL 2001).

## **4.2 Metodika získání dat**

### **4.2.1 Práce v terénu**

Zkusné plochy, jejichž poloha byla náhodně vygenerována ve smrkových porostech starších 80 let, měly velikost 1000 m<sup>2</sup>. Do středu každé plochy byla zatlučena krátká kovová trubka, která po většinu času sloužila jako bod, ze kterého bylo prováděno měření pomocí technologie Field-Map. Tato technologie se skládá z hardwaru (odolný tablet, laserový dálkoměr a sklonoměr, elektronický úhloměr a stojan) a softwaru, specializovaného převážně na sběr venkovních dat pro účely lesnického mapování či inventarizace lesů (<https://www.fieldmap.cz>).

Poloha jednotlivých stromů s DBH > 10 cm byla do tohoto systému zadávána pomocí odrazek připevněných na výtyčky ve výšce 1,3 m. Ty byly umístěny před kmen stromu v místě okulárně určeném jako jeho střed při pohledu od místa měření. Po zaregistrování odrazky bylo stromu systémem přiřazeno pořadové číslo, které bylo pro potřebu následné orientace připnuto na kůru stromu na předtištěných cedulkách. Následně byla stromu změřena výška laserovým výškoměrem, DBH obvodovým pásmem a bylo určeno o jakou dřevinu se jedná. Pokud se jednalo o dvoják s rozdělením do 1,3 m výšky, považoval se každý kmen za samostatný strom. V případě rozdělení výš se počítalo s oběma kmeny jako s jedním stromem.

Dále byl proveden odběr vzorků pro letokruhovou analýzu. To se provádí nebozezem, což je dutý manuální vrták ve tvaru T, který umožňuje získání vývrtů kmenů stromů o síle přibližně 5 mm. Z každého stromu byly odebrány dva vývrty – jeden pro měření šířky letokruhů, druhý pro zjištění hustoty. Vývrty byly prováděny ve výšce 0,5 m nad zemí, na

svahu ve směru vrstevnice, na rovinatém terénu přednostně na straně s nejširší korunou. V případě výskytu očividné vady na kmeni, jako je suk, prasklina či rakovina, se vyhledalo jiné místo vhodné na provedení vývrtu převážně z opačné strany kmene či o potřebnou vzdálenost výše od země. Při vrtání byl kladen důraz na co nejpřesnější směřování na předpokládané místo výskytu dřene, aby se minimalizoval případný počet následných pokusů o dosažení fyziologického středu stromu. Pokud se při vývrtu nedosáhlo středu nebo pokud byla na vzorku nedokonalost místního charakteru (zarostlý suk, hniloba), vývrt se opakoval o několik centimetrů výše. Na všech 5 plochách byla k výzkumu tímto způsobem získána data z 224 stromů, u 113 stromů byla změřena výška výškoměrem.

Dalším krokem je zajištění bezpečné přepravy získaných vzorků do laboratoře. To bylo prováděno vkládáním vývrtů do plastových brček a jejich zajištění kancelářskou sešívačkou z obou stran. Pořadová čísla jednotlivých vývrtů byla na brčko poznačena společně s označením zkoumané plochy slabým permanentním popisovačem. Všechny získané vzorky z dané plochy byly poté k sobě zajištěny lepící páskou a pro snazší přepravu vloženy do uzavíratelného plastového tubusu.

#### **4.2.2 Práce v laboratoři**

Po vyjmutí z brček byly vývrty v laboratoři přilepeny na dřevěné držáky a obroušeny smirkovým papírem se snižující se hrubostí. Tím bylo docíleno hladkého povrchu vývrtu připraveného na měření tloušťky jednotlivých letokruhů. To bylo prováděno s přesností 0,01 mm pomocí binolupy Olympus, posuvného stolu Lintab propojeného s počítačem a software Tsap-Win (<http://www.rinntech.de>).

U vývrtů, které neprocházely dřemí, byla pomocí šablon z průhledného plastu zjištěna vzdálenost a počet letokruhů od fyziologického středu stromu. Dále bylo provedeno křížové datování, a to jak okulárně, tak pomocí softwaru PAST 4. Tímto způsobem zjištěná data byla poté převedena do MS Excel, kde k nim byly přidány informace o výšce změřených stromů, DBH a hustotě jednotlivých letokruhů.

V Institute of Wood Technology and Renewable Materials BOKU, Vienna, Austria byla změřena hustota dřeva. Zde byly z každého vývrtu získány dvoukotoučovou pilou přibližně 1,4 mm tenké sekce, které byly položeny na mikrofilmy a na 25 minut vystaveny 10 kV (24 mA) rentgenovému záření. Mikrofilmy byly analyzovány softwarem WinDendro

2009, z měření byla získána data v g\*cm<sup>-3</sup>. Měřením se nepodařilo získat hodnoty hustoty dřeva pro všechny stromy vstupující do tohoto výzkumu, proto se počet jedinců vstupujících do výpočtů s použitím údajů hustoty dřeva snížil z původních 224 na 176. Konkrétně do výpočtů vstupovalo 53 vzorků u plochy v Jeseníkách, 30 v Krkonoších Mumlavě, 24 v Krkonoších Liščí hoře, 35 v Krušných horách a 34 na Šumavě.

Následující operace byly prováděny v tabulkovém procesoru Microsoft Excel.

Pro nadcházející operaci bylo nutno odečíst tloušťku kůry z tlouštěk jednotlivých stromů změřených v porostu. To bylo provedeno výpočtem převzatým od Wojnara (2007):

$$DBH_{b.k.} = DBH_{s.k.} - (0,57723 + 0,006897 DBH_{s.k.}^{1,3123})$$

[1]

kde DBH<sub>b.k.</sub> = průměr stromu bez kůry; DBH<sub>s.k.</sub> = změřený průměr stromu s kůrou.

Protože je dřeň fyziologický střed stromu, nikoliv ten geometrický, bylo provedeno přepočtení každého změřeného přírůstu podílem změřené tloušťky stromu bez kůry a dvojnásobku sumy přírůstů daného stromu, tj podílem skutečné tloušťky stromu a té získané součtem přírůstů dle Bakker (2005):

$$Q = \frac{DBH_{b.k.}}{2I_p}$$

[2]

Q = koeficient, kterým se vynásobí každý změřený přírůst; I<sub>p</sub> = poloměr získaný sumarizací jednotlivých přírůstů daného stromu. Tímto krokem byla získána hodnota, kterou by jednotlivé přírůsty měly, kdyby strom přirůstal rovnoměrně.

Jako vstup do pozdějších výpočtů bylo potřeba získat celkovou tloušťku daných stromů s kůrou v každém roce. To bylo docílené sumarizací předchozích přírůstů v jednotlivých letech a použitím opačné operace k bodu [1]. Tím byla získána tloušťka jednotlivých stromů v jednotlivých letech.

Pro výpočet přírůstu na kruhové základně byl použit vzorec pro výpočet výčetní kruhové základny dle Sequense (2006):

$$G = \frac{\pi}{4} * d^2$$

[3]

G = kruhová základna; d = průměr stromu v daném roce. Pro větší přehlednost byl výsledek vydělen 100, výsledný přírůst na kruhové základně vyšel tedy v cm<sup>2</sup>/rok.

Pro každou plochu byla modelována závislost výšky na tloušťce na základě aktuálních dat. Vztah byl vyjádřen pomocí polynommické funkce a následně použit pro odhad výšky pro každý kalendářní rok. Pro tento výzkum byly v porostu měřeny pouze stromy s DBH > 10 cm, a protože se vypočítaná výška interpolovala z hodnot takto změřených, musely být do následujících kroků použity pouze data, která měla DBH > 10 cm. Následující vzorec pro výpočet výšky byl převzatý od Čady (2016):

$$[4] \quad h = a + b * DBH_{s.k.} + c * DBH_{s.k.}^2$$

h = výška stromu; a, b, c = parametry podle následující tabulky

Tabulka 1 - Parametry jednotlivých ploch pro výpočet výšky.

	Jeseníky	Krkonoše Mumlava	Krkonoše Liščí hora	Krušné hory	Šumava
a	-2,77484	-4,454725	-2,77181	7,432141	-7,53202
b	0,07838822	0,09017126	0,08082184	0,05044017	0,1113483
c	-4,48E-05	-6,89E-05	-4,24E-05	-2,76E-05	-7,41E-05

Dalším zkoumaným přírůstem byl přírůst objemový dle Gömöryho (2012):

$$[5] \quad V = 4,013841 * 10^{-5} (DBH_{s.k.} + 1)^{1,821816} * h^{1,132062}$$

V = objem stromu; DBH<sub>s.k.</sub> = průměr stromu s kůrou; h = výška stromu. Výsledná hodnota byla následně pro lepší přehlednost vynásobena 1000, vznikly tak hodnoty objemového přírůstu v dm<sup>3</sup>/rok.

Hmotnostní přírůst v kg/rok byl zjištěn vynásobením objemovým přírůstem v daném roce průměrnou hustotou letokruhu.

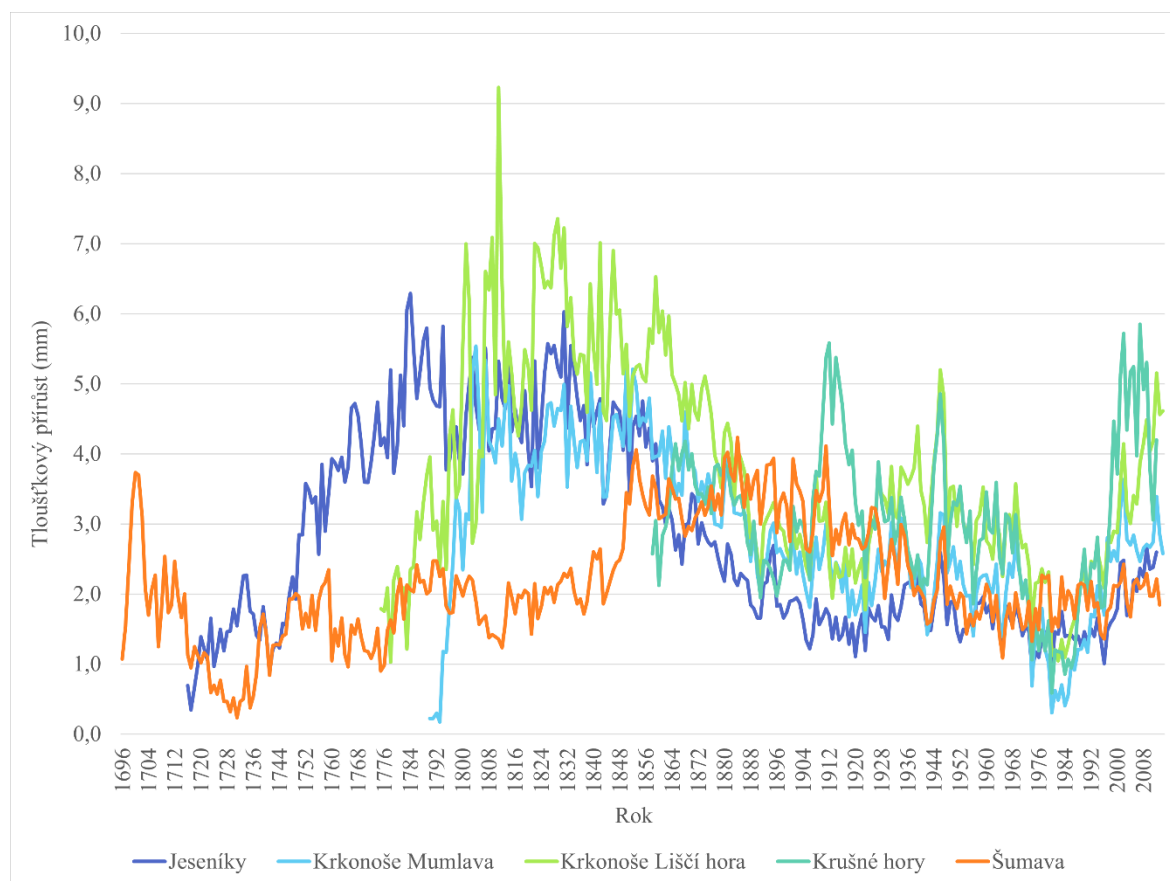
U stromů zkoumaných ploch v Jeseníkách a na Šumavě byl u 67 stromů změřen obsah uhlíku. Z těchto jednotlivých hodnot byl poté udělán průměrný obsah uhlíku ve dřevě zkoumaných stromů, který vyšel 50,3918 %, což koresponduje s obsahem uhlíku ve smrkovém dřevě změřený ve výzkumu Joostena (2002) (50,42 %) a Bossharda (1984) (50,3 %). Po vynásobení hmotnostního přírůstu tímto procentem obsahu uhlíku ve dřevě vyšla hodnota množství vázaného uhlíku v kmenech stromů v kg/rok.

Ve výsledcích objemového a hmotnostního přírůstu a vázání uhlíku bylo počítáno s objemem, hmotností a vázáním uhlíku kmenem stromů, biomasa větví a asimilačních orgánů zde nebyla brána v potaz.

Pro lepší kvantifikaci předpokládaného poklesu a následného stoupaní dat v období zvýšené koncentrace především SO<sub>2</sub> budou u všech grafů přírůstu, hustoty a vázání uhlíku mimo jiné popsána a porovnána dvě pětadvacetiletá období před a po největší emisní zátěži: 1960–1984 a 1985–2009.

## 5 Výsledky

### 5.1 Trendy přírůstu



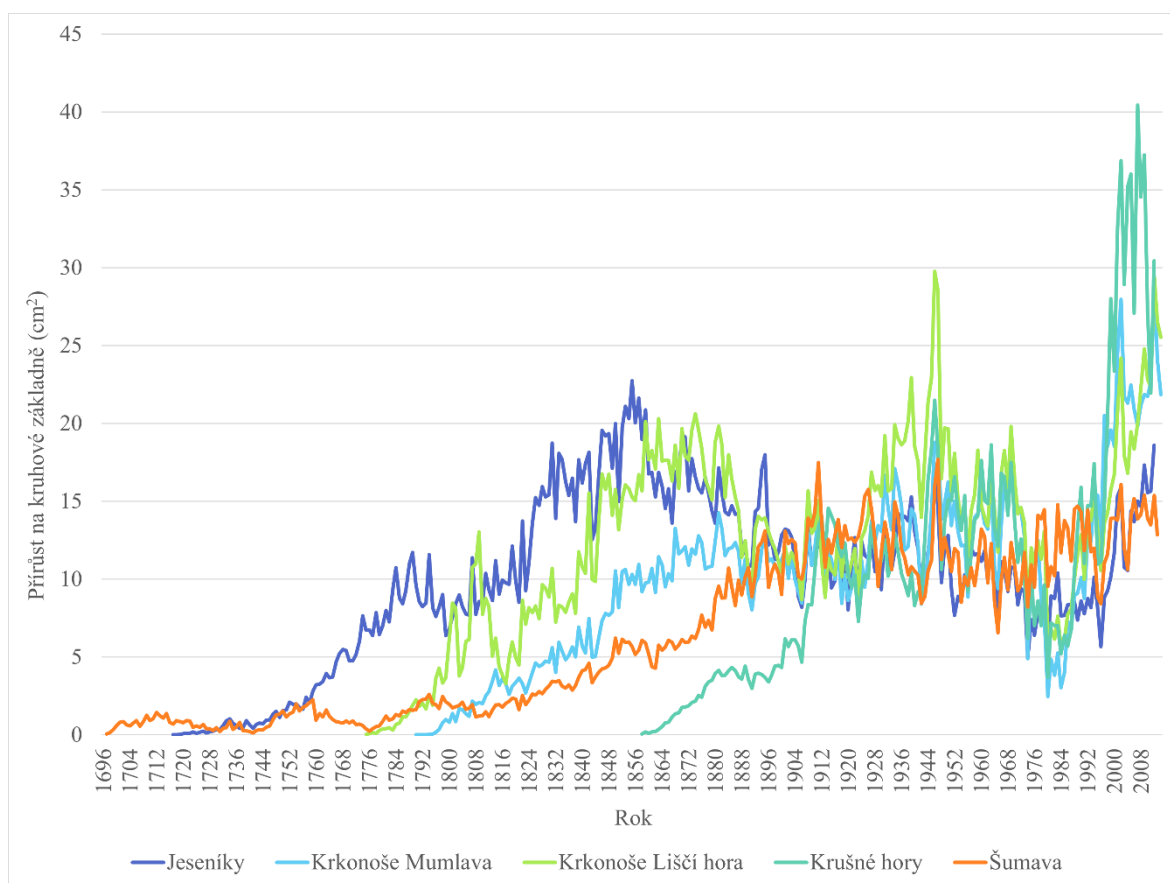
Obr. 2 – Průměrný tloušťkový přírůst kmenů za rok (zdroj: autor, MS Excel).

Průběh trendů u průměrného tloušťkového přírůstu je u všech ploch kromě Šumavy charakteristický strmým stoupáním, které se na přelomu 19. století mění ve stagnaci a o půl století později v následné klesání, které dosahuje svého nejnižšího bodu na začátku 80. let 20. století. Od tohoto období se křivky opět vrací ke stoupání. Na Šumavě bylo původní stoupání méně strmého charakteru a vrcholilo později, v druhé polovině 19. století, kdy docházelo ke stagnaci a postupnému klesání. U již zmíněné šumavské plochy a plochy Jeseníky také nedošlo k tak znatelnému propadu hodnot v první polovině 80. let 20. století. Na druhou stranu u těchto dvou ploch byl podstatně více znatelný krátkodobý pokles v letech 1995 a 1996.

Mezi léty 1960 a 1984 byl průměrný tloušťkový přírůst výrazně klesající. Na ploše v Jeseníkách klesl o 20 %, v Krkonoších Mumlavě o 82 %, v Krkonoších Liščí hoře o 60 %, v Krušných horách o 75 % a na Šumavě o 17 %.

Na druhou stranu v období 1985–2009 došlo ke zvýšení průměrného tloušťkového přírůstu. Na ploše v Jeseníkách došlo ke zvýšení přírůstu o 89 %, plocha v Krkonoších Mumlavě vykazovala zvýšení o 389 %, v Krkonoších Liščí hora o 252 %, v Krušných horách o 397 % a na Šumavě bylo zjištěno zvýšení přírůstu o pouhých 12 %.

U Obr. 2 byl zjištěn nejvyšší průměrný tloušťkový přírůst v roce 1811 na ploše v Krkonoších Liščí hoře s hodnotou 9,2 mm. Celkově nejvyšší hodnota přírůstu byla změřena u stromu 44 na ploše v Jeseníkách, který v roce 1807 přirostl o 19,33 mm.



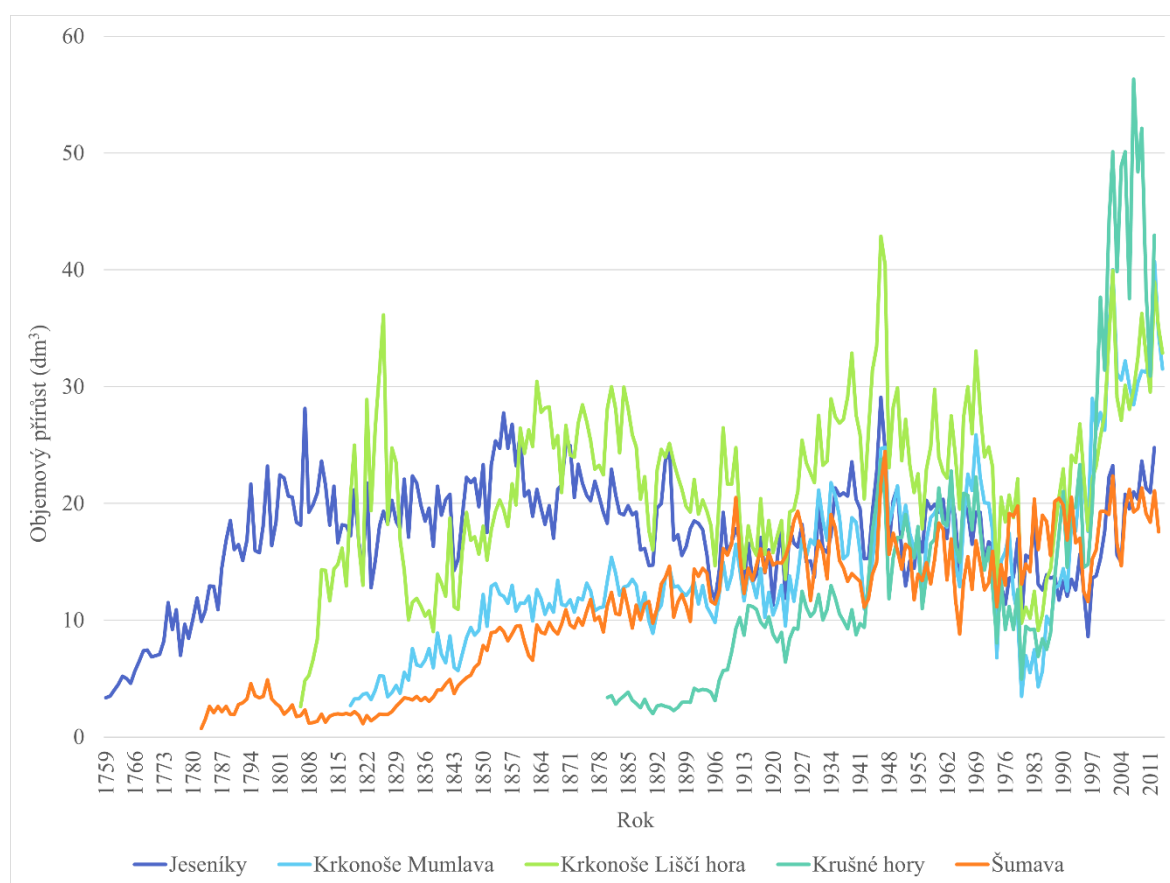
Obr. 3 – Průměrný přírůst kmenů na kruhové základně za rok (zdroj: autor, MS Excel).

U trendů průměrného přírůstu na kruhové základně tohoto výzkumu je charakteristický velmi pozvolný růst hodnot, který přechází ve stagnaci až v průběhu druhé poloviny 19. století nebo, v případě ploch na Šumavě a v Krušných horách, na začátku století 20. Kromě krátkodobého vrcholu přírůstu v letech 1944–1947 stagnace pokračovala až do počátku 80.



let, kde je vidět strmý propad hodnot (nejméně znatelný na Šumavě). V období 1960–1984 došlo ke snížení průměrného přírůstu na kruhové základně na plochách v Jeseníkách o 31 %, Krkonoších Mumlavě o 79 %, Krkonoších Liščí hoře o 61 %, Krušných horách o 71 % a na Šumavě o 12 %. Mezi léty 1985 a 2009 bylo zjištěno zvýšení průměrného přírůstu na kruhové základně v Jeseníkách o 126 %, Krkonoších Mumlavě o 445 %, Krkonoších Liščí hoře o 305 %, Krušných horách o 482 % a na Šumavě o 12 %. Tento růst je zakončený stagnací v posledním desetiletí.

Nejvyšší průměrný přírůst na průměrné kruhové základně je z roku 2007 z Krušných hor s hodnotou 40,43 cm<sup>2</sup>. Nejvyšší přírůst jednoho stromu byl zjištěn 120,37 cm<sup>2</sup> u stromu M07 na Šumavě v roce 1947.

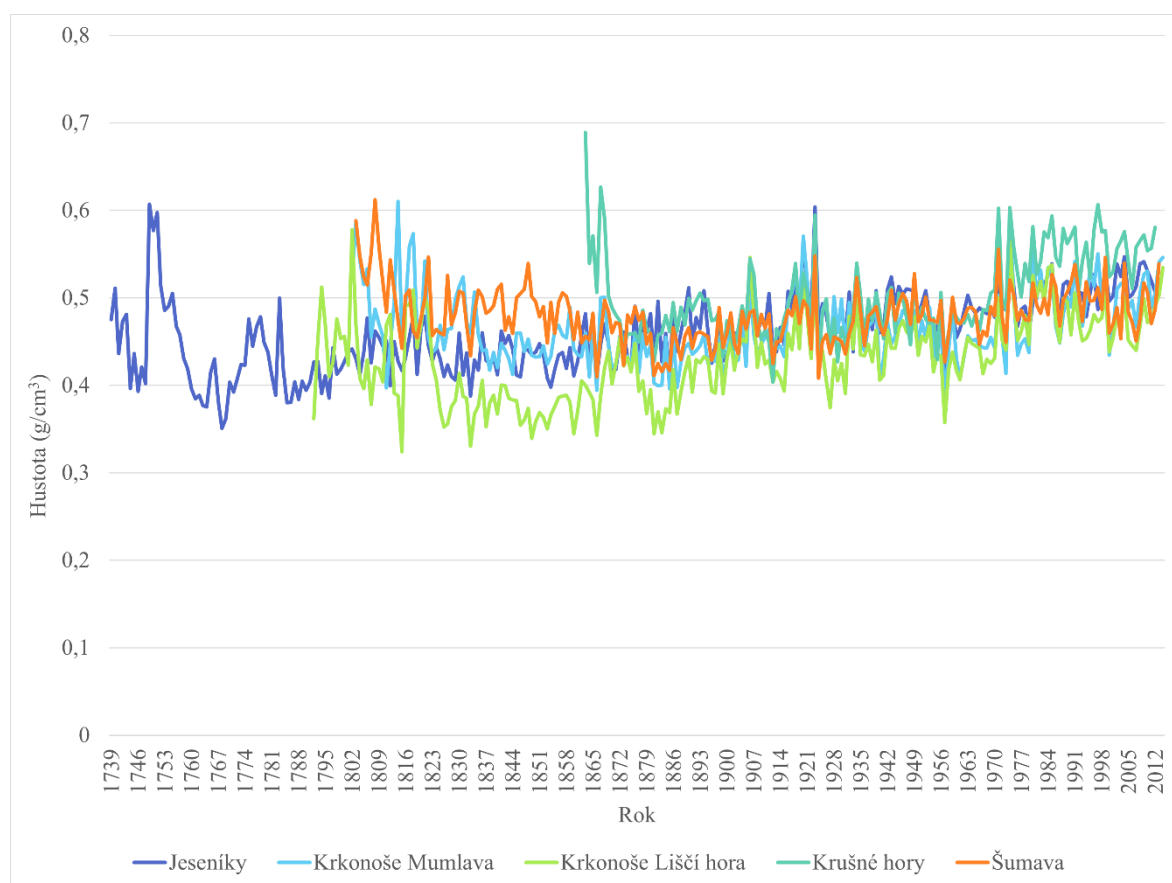


Obr. 4 – Průměrný objemový přírůst kmenů za rok (zdroj: autor, MS Excel).

Dle Obr. 4 je u ploch na Šumavě a v Krušných horách patrná stagnace již od prvních let sledování průměrného objemového přírůstu, která se až po několika desetiletích mění ve více či méně strmý růst. Po období stagnace přichází u všech sledovaných ploch propad objemového přírůstu v polovině 80. let. Při porovnání období 1960–1984 došlo k velmi

podobnému snížení průměrného objemového přírůstu jako u předchozího grafu. V Jeseníkách o 32 %, Krkonoších Mumlavě o 78 %, Krkonoších Liščí hoře o 62 %, Krušných horách o 68 % a na Šumavě o 12 %. Mezi léty 1985 a 2009 následovalo zvýšení objemového přírůstu na plochách v Jeseníkách o 88 %, Krkonoších Mumlavě o 454 %, Krkonoších Liščí hoře o 245 %, Krušných horách o 518 % a na Šumavě o 12 %.

Maximum průměrného objemového přírůstu na Obr. 4 pochází z roku 2007 z Krušných hor a má  $56,35 \text{ dm}^3$ . Nejvyšší objemový přírůst kmene za rok byl zjištěn v roce 1947 u stromu M07 na Šumavě s hodnotou  $178,61 \text{ dm}^3$ . Největšího kumulativního objemu dosáhl jedinec 08 z Krkonoš Liščí hory, který za 157 let života vytvořil  $8123,49 \text{ dm}^3 = 8,12 \text{ m}^3$  dřevní hmoty.

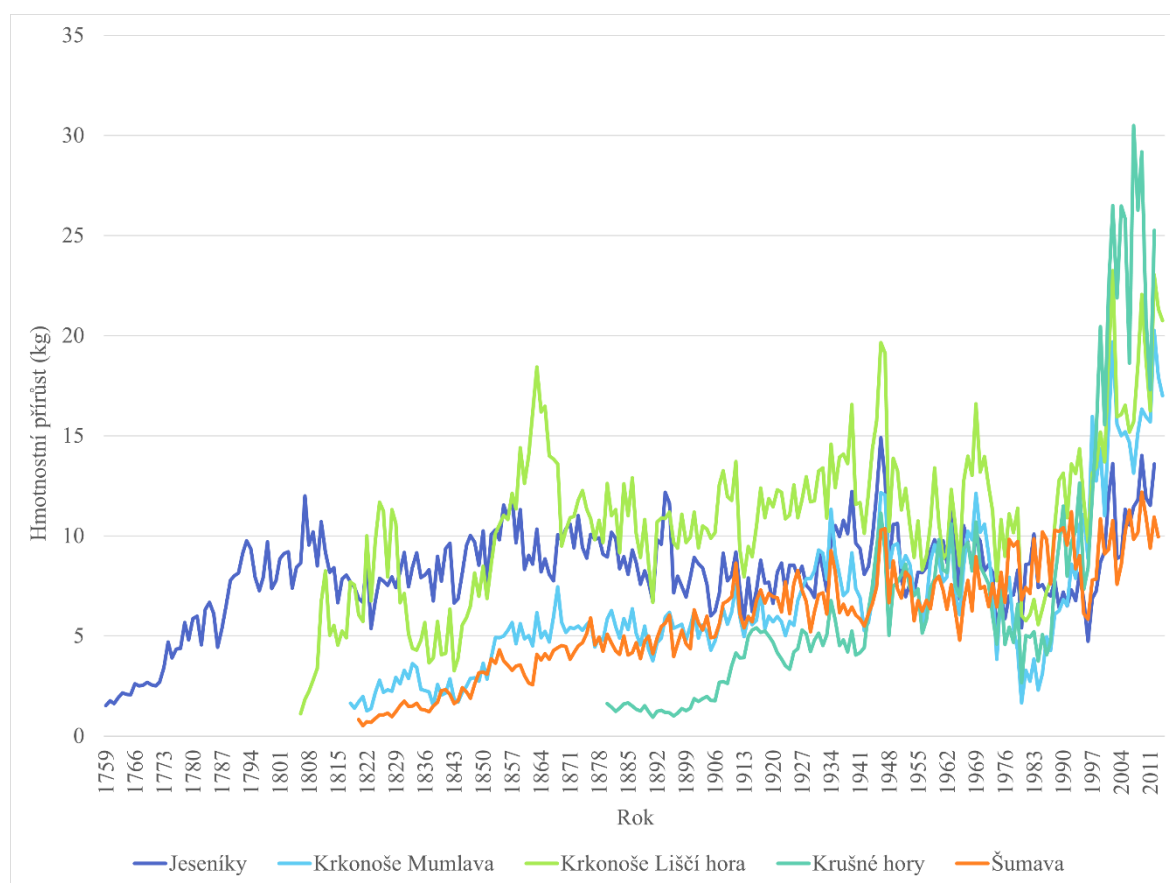


Obr. 5 – Průměrná hustota dřeva v jednotlivých letech (zdroj: autor, MS Excel).

Průběh trendů průměrné hustoty je velmi vyrovnaný s výrazně menšími odlišnostmi než trendy předchozí a následující. Na začátku každé křivky je znatelná fluktuace trvající od několika málo let (Krušné hory, Šumava) až po několik desetiletí (Jeseníky, Krkonoše Mumlava, Krkonoše Liščí hora). Ke konci 19. století pak dochází k vyrovnaní dat, která mají

podobné hodnoty až po období 1960–1984, kdy bylo zjištěno zvýšení průměrné hustoty na plochách v Jeseníkách o 16 %, Krkonoších Mumlavě o 24 %, Krkonoších Liščí hoře o 28 %, Krušných horách o 19 % a na Šumavě o 2 %. V období 1985–2009 byly změny na průměrné hustotě podstatně menší – v Jeseníkách nebyla zjištěna žádná změna hustoty, u plochy v Krkonoších Mumlavě došlo ke zvýšení o 1 % a u ploch v Krkonoších Liščí hoře, Krušných horách a na Šumavě došlo naopak ke snížení průměrné hustoty o 7, 4 a 2 %, resp.

Dle Obr. 5 byla nejnižší průměrná hustota ( $0,324 \text{ g/cm}^3$ ) zjištěna v Krkonoších Liščí hoře v roce 1815, naopak nejvyšší hodnota ( $0,689 \text{ g/cm}^3$ ) byla zjištěna na ploše v Krušných horách v roce 1863.

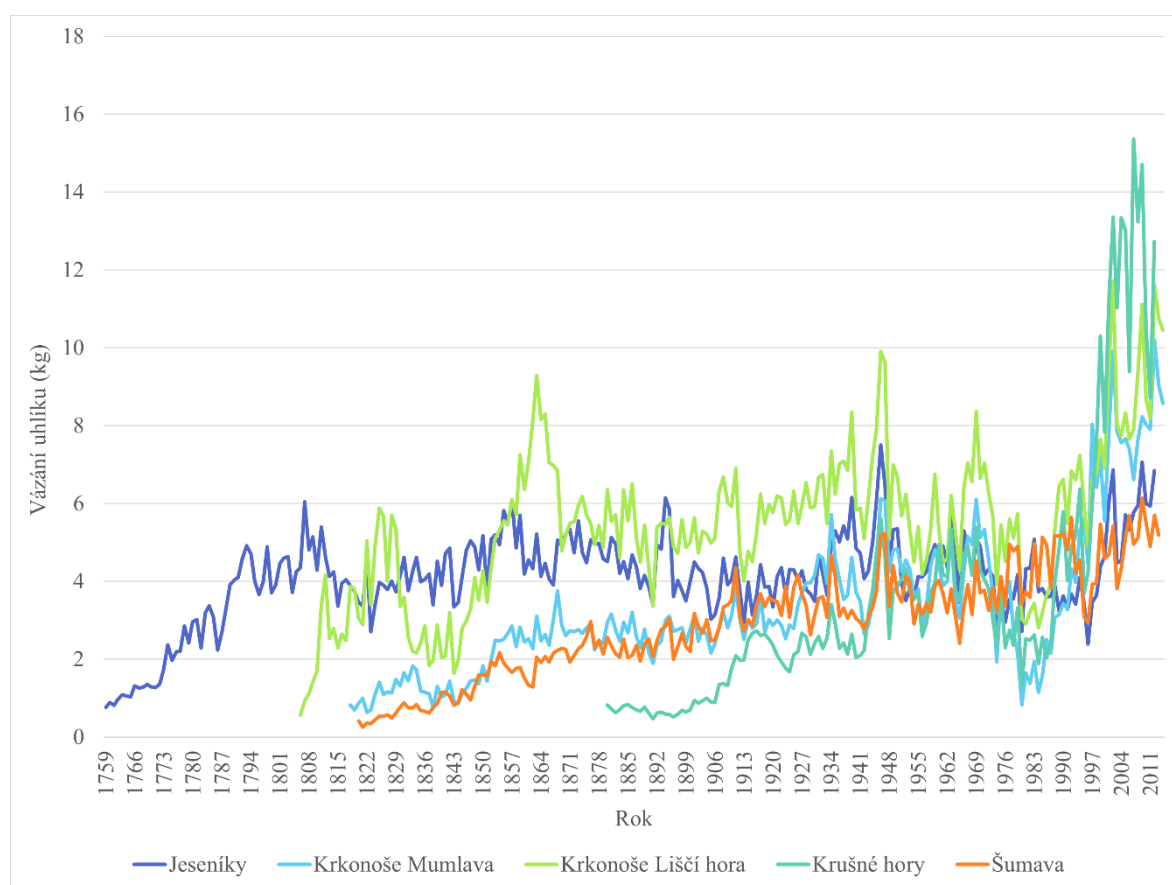


Obr. 6 – Průměrný hmotnostní přírůst kmenů za rok (zdroj: autor, MS Excel).

Dle Obr. 6 je stagnace na počátku trendu zřejmá pouze v Krušných horách, kde se po dvou dekádách mění v růst. U ploch v Krkonoších Mumlavě a na Šumavě je růst od začátku stoupající, ale narozdíl od Jeseníků a Krkonoš Liščí hory velmi pozvolný. Po období růstu následuje stagnace až po časový úsek mezi léty 1960 a 1984, kdy všechny plochy vykazují hodnoty snížení průměrného hmotnostního přírůstu. U plochy v Jeseníkách se jednalo o

snížení o 19 %, Krkonoších Mumlavě o 74 %, Krkonoších Liščí hoře o 48 %, Krušných horách o 62 % a na Šumavě o 3 %. V období 1985–2009 bylo zjištěno zvýšení průměrného hmotnostního přírůstu v Jeseníkách o 85 %, Krkonoších Mumlavě o 422 %, Krkonoších Liščí hoře o 247 %, Krušných horách o 475 % a na Šumavě o 19 %.

Nejvyšší hodnota na Obr. 6 byla zjištěna v Krušných horách, kde byl v roce 2007 průměrný hmotnostní přírůst 30,45 kg. V tom samém roce se také na ploše v Krušných horách vyskytl i absolutně nejvyšší hmotnostní přírůst, kdy strom M01 přirostl o 80,25 kg. Nejvyšší hmotnost kmene měl jedinec 08 z plochy v Krkonoších Liščí hoře, což je zároveň nejobjemnější strom výzkumu, který dokázal vytvořit 3332,11 kg dřevní hmoty.



Obr. 7 – Průměrné vázání uhlíku kmeny za rok (zdroj: autor, MS Excel).

Z důvodu způsobu výpočtu hodnot průměrného vázání uhlíku je jejich průběh totožný s průběhem hodnot průměrného hmotnostního přírůstu.

Graf průměrného vázání uhlíku zobrazuje nejvyšší hodnotu vázání C na ploše v Krušných horách a to 15,36 kg v roce 2007. Ve stejném roce na stejné ploše jedinec M01 navázal 40,44 kg uhlíku, což je nejvyšší hodnota vázaného C jedním stromem za jeden rok

v tomto výzkumu. Největší množství uhlíku byl za svůj život schopen navázat jedinec 08 z plochy Krkonoše Liščí hora, a to 1679,11 kg. V případě pohledu na celkové množství vázaného uhlíku všemi stromy vstupujícími do tohoto výzkumu ( $n = 176$ ) se jednalo o navázání 95129,14 kg. To je v průměru 540,51 kg navázaného uhlíku na jednoho jedince.

## 5.2 Porovnání způsobů zjištění přírůstu

Tabulka 2 – Hodnocení korelace mezi jednotlivými typy přírůstu na jednotlivých plochách (tučné označení,  $* = p < 0,05$ ).

Korelace typů přírůstu	Plocha				
	Jeseníky	Krkonoše Mumlava	Krkonoše Liščí hora	Krušné hory	Šumava
Tloušťkový přírůst, přírůst na kruhové základně	<b>0,30*</b>	0,10	<b>0,21*</b>	<b>0,49*</b>	<b>0,46*</b>
Tloušťkový přírůst, objemový přírůst	<b>0,12*</b>	<b>0,18*</b>	0,03	<b>0,53*</b>	<b>0,16*</b>
Tloušťkový přírůst, hmotnostní přírůst	0,12	<b>0,21*</b>	<b>0,14*</b>	<b>0,51*</b>	<b>0,19*</b>
Přírůst na kruhové základně, objemový přírůst	<b>0,83*</b>	<b>0,98*</b>	<b>0,81*</b>	<b>0,98*</b>	<b>0,98*</b>
Přírůst na kruhové základně, hmotnostní přírůst	<b>0,73*</b>	<b>0,96*</b>	<b>0,80*</b>	<b>0,97*</b>	<b>0,91*</b>
Objemový přírůst, hmotnostní přírůst	<b>0,92*</b>	<b>0,98*</b>	<b>0,88*</b>	<b>0,99*</b>	<b>0,97*</b>

U korelace tloušťkového přírůstu a přírůstu na kruhové základně dosahovala nejvyšších hodnot plocha v Krušných horách ( $r = 0,49$ ), na Šumavě ( $r = 0,46$ ), dále v Jeseníkách ( $r = 0,30$ ) a Krkonoších Liščí hoře ( $r = 0,21$ ). U plochy v Krkonoších Mumlavě nebyl korelační koeficient ( $r = 0,10$ ) statisticky signifikantní. U korelace tloušťkového a objemového přírůstu měla nejvyšší  $r$  opět plocha v Krušných horách ( $r = 0,53$ ), dále v Krkonoších Mumlavě ( $r = 0,18$ ), na Šumavě ( $r = 0,16$ ), a v Jeseníkách ( $r = 0,12$ ). Plocha v Krkonoších Liščí hoře neměla hodnotu korelace ( $r = 0,03$ ) statisticky signifikantní. U srovnání tloušťkového a hmotnostního přírůstu byla zjištěna nejvyšší hodnota v Krušných horách ( $r = 0,51$ ), dále v Krkonoších Mumlavě ( $r = 0,21$ ), na Šumavě ( $r = 0,19$ ) a v Krkonoších Liščí hoře ( $r = 0,14$ ). Korelace u plochy v Jeseníkách ( $r = 0,12$ ) nebyla statisticky signifikantní.

Při srovnání objemového a hmotnostního přírůstu, přírůstu na kruhové základně a hmotnostního přírůstu a u přírůstu na kruhové základně a objemového přírůstu byly všechny

hodnoty korelace statisticky signifikantní a podstatně vyšší než u korelací tloušťkového přírůstu. U srovnání přírůstu na kruhové základně a objemového přírůstu byla u ploch v Krkonoších Mumlavě, Krušných horách a na Šumavě zjištěna shodná hodnota korelačního koeficientu 0,98, v Jeseníkách  $r = 0,83$  a u plochy v Krkonoších Liščí hoře  $r = 0,81$ . Při porovnání přírůstu na kruhové základně a hmotnostního přírůstu vyšlo u plochy v Jeseníkách  $r = 0,73$ , Krkonoších Mumlavě  $r = 0,96$ , Krkonoších Liščí hoře  $r = 0,80$ , Krušných horách  $r = 0,97$  a na Šumavě  $r = 0,91$ . U korelace objemového a hmotnostního přírůstu bylo u plochy v Jeseníkách  $r = 0,92$ , Krkonoších Mumlavě  $r = 0,98$ , Krkonoších Liščí hoře  $r = 0,88$ , Krušných horách  $r = 0,99$  a na Šumavě  $r = 0,97$ .

## 6 Diskuse

U všech způsobů zjištění přírůstu bylo v období 1960–1984 potvrzeno snížení přírůstu na všech sledovaných plochách. Toto snížení je přisuzováno vysokou mírou znečištění ovzduší převážně oxidem siřičitým (Putalová 2018, Vrtiška 2018). To, že přírůsty klesly nejméně na Šumavě a v Jeseníkách, by se dalo vysvětlit větší vzdáleností těchto pohoří od oblasti největšího znečištění v porovnání s ostatními pohořími.

Od začátku 90. let je na výsledcích patrné opětovné zvyšování přírůstu a množství vázaného uhlíku. V období 1985–2009 bylo pozorováno zvýšení přírůstu u všech jeho typů na všech sledovaných plochách. Největší zvýšení přírůstu bylo zaznamenáno na plochách, které vykazovaly největší snížení v předchozím období. Toto by mohlo být důsledkem snižování emisí, především SO<sub>2</sub> a NO<sub>x</sub>, zvyšující se teploty a také stále se zvyšující koncentrace CO<sub>2</sub> v ovzduší, který stromy využívají při fotosyntéze a který je zodpovědný za postupné zvyšování přírůstu (Cienciala 2018, Kolář 2015). Kladný vliv zvyšující se koncentrace CO<sub>2</sub> a teploty ovzduší na přírůst dřevin nebyl sledován pouze v ČR na smrku ztepilém, ale také například na smrku černém (*Picea mariana* Mill.) v boreálních lesích napříč Kanadou (Hember 2019), horských porostech smrku červeného (*Picea rubens* Sarg.) v Severní Karolíně, USA (Soulé 2011) nebo také v uzavřeném komorovém systému ve Finsku, ve kterém byla vybraným borovicím lesním (*Pinus sylvestris* L.) uměle zvyšována koncentrace CO<sub>2</sub> (Kilpeläinen 2005). Dalšími faktory, které by mohly hrát roli v postupném zvyšování přírůstu v období od největšího znečištění ovzduší po současnost, je snížení konkurence stromů odumřelých při období nejvyšší emisní zátěže, jejich postupné rozkládání a s tím související obohacování půdního substrátu (Čada 2016).

Na průběhu grafu průměrného tloušťkového přírůstu je přibližně od poloviny 19. století (u Šumavy později) znatelné postupné snižování přírůstu, které na ostatních grafech není. To je z toho důvodu, že mladé stromy mají vyšší hodnoty tloušťkového přírůstu než stromy starší (Tremml 2012). To bylo potvrzeno ve výzkumu Ciencialy (2018), který zjistil, že rozdíl v průměrném tloušťkovém přírůstu 40 a 60 let starých stromů může být až 28 % ve prospěch mladších jedinců. Toto postupné snižování se do ostatních způsobů zjištění přírůstu nepromítá, protože strom s malou tloušťkou má nižší přírůst na kruhové základně, objemu či hmotnosti než strom většího průměru přirůstající o stejné hodnoty.

Snížení tloušťkového přírůstu o více než 50 % v období největší zátěže znečištěním ovzduší v pohořích na severu Čech bylo sledováno jak v tomto, tak i v ostatních výzkumech (Kolář 2015, Král 2015, Putalová 2018). Ty se také shodují s opětovným zvyšováním přírůstu, které začalo v polovině 90. let a trvá do současnosti.

U průměrného přírůstu na kruhové základně je znatelný pozvolnější nástup hodnot, který je, v porovnání s průměrným tloušťkovým přírůstem, daný pomalejším růstem kruhové základny na počátku růstu stromu. V tu dobu má strom malý průměr a obvod kmene a přírůsty na kruhové základně tedy nedosahují tak vysokých hodnot jako v pozdějším věku. Na počátku trendu plochy na Šumavě a po prvních dvou desetiletích v Krušných horách je vidět období stagnace, které by mohlo být zapříčiněno vysokou mírou konkurence, kdy se strom snaží odrůst konkurentům a přesunuje sílu do výškového přírůstu raději než do přírůstu na kruhové základně (Bascietto 2004). Na průběhu přírůstu na kruhové základně také již není tak znatelné postupné klesání dat v průběhu 19. a začátku 20. století jako u tloušťkového přírůstu. To kvůli již zmiňovanému faktu, že čím je strom starší a má větší průměr, tím méně mu stačí přirůst do tloušťky, aby měl stejný nebo větší přírůst na kruhové základně. Takže zatímco průměrný tloušťkový přírůst postupně klesal, průměrný přírůst na kruhové základně měl podobné či stoupající hodnoty.

Průběh trendu průměrného přírůstu na kruhové základně v Krušných horách popsal Sequens (2006) jako stagnaci mezi léty 1972 a 1977, kdy začalo docházet k poklesu přírůstu trvajícimu až do roku 1987. Dále byl do roku 1990 zaznamenán růst trendu spojený s klesajícím množstvím  $\text{SO}_2$  v ovzduší následován stagnací a výrazným poklesem přírůstu v letech 1995 a 1996 způsobený opětovným krátkodobým nárůstem koncentrace  $\text{SO}_2$ . Tento momentální propad je znatelný i na trendech přírůstu nejen na průměrné kruhové základně předložených v této práci, kde je následován opětovným zvyšováním přírůstu.

Průběh počátku trendu průměrného objemového přírůstu ukazuje výrazně nižší intenzitu stoupání především u plochy Šumava a v prvních několika desetiletích trendu plochy v Krušných horách v porovnání s ostatními plochami. To by mohlo být vysvětleno již zmíněnou vyšší konkurencí převážně úroveňných stromů na daných plochách a s tím související pomalejší zajištění místa v hlavní úrovni porostu u sledovaných stromů, které v té době mohli být nižšího věku. Data průměrného objemového přírůstu také potvrzují, že pokud má strom vhodné podmínky k růstu, může si v relativně krátkém časovém úseku



zajistit dominantní postavení v porostu a vytvořit velké množství dřevní hmoty. Příkladem by mohl být nejobjemnější strom výzkumu 08 z plochy Krkonoše Liščí hora, který dokázal za 157 let svého života vytvořit více než 8 m<sup>3</sup> dřevní hmoty.

U průběhu průměrné hustoty dřeva sledovaných stromů není vidět taková variace dat jako u ostatních výsledků. Velká proměnlivost dat na počátku křivek je dána tím, že jsou zde data vždy jen několika málo nejstarších jedinců, ke kterým se s postupem času přidávají další a rozptýl dat tak snižují. Průměrná hustota dřeva se mezi léty 1960 a 1984 zvýšila na všech plochách o 2 až 28 %, v období 1985–2009 došlo k téměř nulové změně průměrné hustoty. Tato zjištění jsou v rozporu s výzkumy Sandera (1995), který uvádí postupné snižování maximální hustoty v Krkonoších v periodě největšího znečištění ovzduší od 60. do poloviny 90. let o téměř 30 % a Rybníčka (2012), který pozoroval zvýšení průměrné hustoty dřeva o přibližně 17 % v období od první poloviny 80. let po rok 2011.

Čada (2016) ve svém výzkumu provedeném na Šumavě zjistil nevýraznou změnu na hmotnostním přírůstu v období nejvyššího znečištění vzduchu a poukázal na mírné zvýšení přírůstu v současné době o až 26 %. V této práci byl na Šumavě zjištěn velmi podobný průběh průměrného hmotnostního přírůstu, a to jeho nevýrazné snížení v období největšího znečištění následované zvýšením o 19 % v následujícím sledovaném období. Zde se naskytuje vysvětlení, že přírůst stromů na Šumavě nebyl tolik ovlivňován emisemi SO<sub>2</sub>, které působily odumírání především v severních Čechách a postupně se zvyšující obsah CO<sub>2</sub> v ovzduší napomáhá zvýšení hmotnostního přírůstu.

Ve výzkumu Černého (2020) byla popsána důležitost pěstování smrku ztepilého na místech jeho přirozeného výskytu ve vztahu k vázání uhlíku. Smrkové porosty, které jsou stále ve velké míře vysazovány v nižších nadmořských výškách než je jejich optimum, totiž s klesající mírou srážek a zvyšující se průměrnou teplotou ve vegetační sezóně vykazují nižší hodnoty vázaného uhlíku do biomasy stromů. Bylo také zjištěno, že vliv produkčního potenciálu stanoviště je mnohem nižší než již zmíněné vysoké srážky a nízká teplota. To poukazuje na nevhodnost pěstování smrku na stanovištích v nižších nadmořských výškách, než je jeho přirozený výskyt a důležitost hledání co nejvhodnějších dřevin pro pěstování v těchto pro smrk nepřilíš vhodných podmínkách. Nalezení vhodných dřevin by mohlo pomoci zmírnit probíhající klimatickou změnu. V tomto výzkumu potvrzuje důležitost pěstování smrků na vhodných stanovištích vysoké množství celkového vázaného uhlíku

všemi 176 stromy vstupujícími do výpočtu s hodnotou převyšující 95 tun, což v průměru činí 541 kg C na jeden strom. Dalším příkladem vhodnosti pěstování smrku na přirozených stanovištích by mohl být strom M01 z plochy Krušné hory, který byl schopen za jeden rok navázat až 44 kg C či strom 08 z plochy Krkonoše Liščí hora, který za svůj život navázal 1679,11 kg C. To je v dnešní době obzvláště důležité při množství CO<sub>2</sub>, které je lidstvem neustále vypouštěné do ovzduší.

V tabulce korelace jednotlivých způsobů zjištění přírůstu u srovnání tloušťkového přírůstu s přírůstem na kruhové základně, objemovým a hmotnostním přírůstem vyšly poměrně nízké hodnoty korelačního koeficientu. Tloušťkový přírůst má na rozdíl od těch ostatních obecně strmý trend hodnot hned na počátku a po dosažení maxima začíná postupně klesat. To je dáno již zmiňovaným rychlejším přirůstáním mladých stromů a pozdějším snižováním přírůstu. Přírůst na kruhové základně, objemový a hmotnostní přírůst mají pozvolnější růst hodnot, který následně již znatelně neklesá. V konkrétním případě tohoto výzkumu tyto typy přírůstu klesaly až v průběhu 70. let 20. století vlivem lidské činnosti následované strmým růstem.

U srovnání přírůstu na kruhové základně, objemového a hmotnostního přírůstu byly zjištěny podstatně vyšší hodnoty korelačního koeficientu. U všech srovnávaných typů přírůstu potřebuje strom napřed dosáhnout určitých dimenzí, aby byly jeho přírůsty u daného typu přírůstu znatelné. Ve chvíli, kdy strom těchto dimenzí doroste, jeho přírůsty se stabilizují. Na všech zmíněných typech přírůstu je také pozorovatelná podobná reakce na silné znečištění ovzduší v 70. a 80. letech 20. století. Zde méně dotčené plochy (Jeseníky a Šumava) snížily svůj přírůst o 3–32 %, více dotčené plochy (Krkonoše Mumlava, Krkonoše Liščí hora a Krušné hory) o 48–79 % a po klesající tendenci trendu následoval prudký růst, který se u méně dotčených ploch zvýšil o 12–126 % a u více dotčených ploch o 245–518 %.

V tabulce korelace jednotlivých typů přírůstu byly zjištěny nejvyšší hodnoty korelačního koeficientu u srovnání objemového a hmotnostního přírůstu. To by se dalo vysvětlit metodickým faktem, že hmotnostní přírůst se vypočítal z toho objemového vynásobením hustotou v jednotlivých letech. Jak bylo již zmíněno, graf hustoty nevykazoval přílišnou fluktuaci dat, a tak byla vysoká podobnost trendů nasnadě.

## 7 Závěr

Předkládaná práce rozšiřuje zatím nepočtené množství výzkumů zabývajících se zjištěním vícero typů přírůstu (konkrétně tloušťkového, objemového a hmotnostního přírůstu a přírůstu na kruhové základně), hustoty a množství vázaného uhlíku u několika pohoří ČR a vzájemným porovnáním jednotlivých typů přírůstů.

Za tímto účelem byly zpracovány grafy zmíněných typů přírůstů na plochách v Jeseníkách, Krkonoších, Krušných horách a na Šumavě a zkoumány jejich trendy. Obzvláště byla zkoumána 2 období: před a po největším znečištění ovzduší vlivem průmyslové činnosti člověka převážně na severu Čech v rozmezí let 1960–1984 a 1985–2009.

V práci bylo zjištěno snížení všech sledovaných typů přírůstu a vázání uhlíku na všech studovaných plochách v období od 60. do poloviny 80. let 20. století. Na plochách na Šumavě a v Jeseníkách, které se od zdrojů znečištění nacházejí nejdále, nebylo zjištěno tak podstatné snížení přírůstu jako u ploch v Krkonoších a Krušných horách, které byly emisemi ovlivněny nejvíce. U tohoto období bylo také sledováno drobné zvýšení průměrné hustoty dřeva stromů. V následujícím období od poloviny 80. let do roku 2009 byl na všech plochách zjištěn naopak nárůst hodnot sledovaných typů přírůstu a vázání uhlíku. Toto stoupání mělo vyšší intenzitu u ploch, které v předchozím období utrpěly největší pokles přírůstu a vázání uhlíku, a naopak nižší intenzitu v Jeseníkách, a především na Šumavě. Změna hustoty dřeva byla v tomto období minimální.

Dále byl v práci pomocí korelace zjištěn rozdíl mezi jednotlivými typy přírůstů. Kvůli rozdílnému průběhu trendů tloušťkového přírůstu vyšel korelační koeficient u všech jeho srovnání podstatně nižší než u srovnání ostatních typů přírůstů mezi sebou. Naopak u srovnání přírůstu na kruhové základně, objemového a hmotnostního přírůstu byla zjištěna velká podobnost daná podobným průběhem trendů těchto přírůstů. Nejvyšší hodnoty korelace byly zjištěny u srovnání přírůstů objemového a hmotnostního, které mají podobný způsob výpočtu, a tak velmi podobný průběh trendů.

## 8 Seznam použitých zdrojů

**AOPK ČR**, 2022. Charakteristika CHKO [online]. Agentura ochrany přírody a krajiny České republiky, Správa CHKO Jeseníky. Dostupné z WWW: <<https://jeseniky.ochranaprirody.cz/charakteristika-CHKO/>>.

**Babst, F., Poulter, B., Trouet, V., Tan, K., Neuwirth, B., Wilson, R., Carrer, M., Grabner, M., Tegel, W., Levanic, T., Panayotov, M., Urbinati, C., Bouriaud, O., Ciais, P., Frank, D.**, 2013. Site- and species-specific responses of forest growth to climate across the European continent. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 22, 706–717.

**Bakker, J.D.**, 2005. A new, proportional method for reconstructing historical tree diameters. *Canadian Journal of Forest Research*, 35(10), 2515-2520.

**Bascietto, M., Cherubini, P. and Scarascia-Mugnozza, G.**, 2004. Tree rings from a European beech forest chronosequence are useful for detecting growth trends and carbon sequestration. *Canadian Journal of Forest Research*, 34(2), 481-492.

**Bošeľa, M., Sedmák, R., Sedmáková, D., Marušák, R., Kulla, L.**, 2014. Temporal shifts of climate-growth relationships of Norway spruce as an indicator of health decline in the Beskids, Slovakia. *Forest Ecology and Management* 325, 108-117.

**Bosshard, H. H.**, 1984, *Holzkunde*, Band 2, Birkhaeuser, Basel, str. 312.

**Cienciala, E., Altman, J., Doležal, J., Kopáček, J., Štěpánek, P., Stáhl, G., Tumajer, J.**, 2018. Increased spruce tree growth in Central Europe since 1960s. *Science of the Total Environment* 619-620, 1637-1647.

**Correa-Díaz, A., Silva, L. C. R., Horwath, W. R., Gómez-Guerrero, A., Vargas-Hernández, J., Villanueva-Díaz, J., Velázquez-Martínez, A., Suárez-Espinoza, J.**, 2019. Linking remote sensing and dendrochronology to quantify climate-induced shifts in high-elevation forests over space and time. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 124, 166–183.

**Čada, V., Šantrůčková, H., Šantrůček, J., Kubišťová, L., Seedre, M. and Svoboda, M.**, 2016. Complex physiological response of Norway Spruce to atmospheric pollution—Decreased carbon isotope discrimination and unchanged tree biomass increment. *Frontiers in plant science*, 7, 805.

**Černý, J., Pokorný, R., Vejpustková, M., Šrámek, V., Bednář, P.**, 2020. Air temperature is the main driving factor of radiation use efficiency and carbon storage of

mature Norway spruce stands under global climate change. *International Journal of Biometeorology* (2020) 64, 1599–1611.

**Čížek, V.**, 2011. Želnavský smrk. Želnavské noviny, číslo 4 zima 2011.

**Davis, E.L., Brown, R., Daniels, L., Kavanagh, T., Geadalof, Z.**, 2020. Regional variability in the response of alpine treelines to climate change. *Climatic Change* (2020) 162, 1365–1384.

**de Groot, M., Diaci, J., Orgis, N.**, 2018. Forest management history is an important factor in bark beetle outbreaks: Lesson for the future. *Forest Ecology and Management* 433, 467-474.

**Dobbertin, M.**, 2005. Tree growth as indicator of tree vitality and of tree reaction to environmental stress: a review. *Eur. J. For. Res.* 124, 319–333.

**Fraver, S., D'Amato, A.W., Bradford, J.B., Jonsson, B.G., Jönsson, M., Esseen, P.-A.**, 2014. Tree growth and competition in an old-growth *Picea abies* forest of boreal Sweden: influence of tree spatial patterning. *J. Veg. Sci.* 25, 374-385.

**Godek, M., Sobik, M., Blaś, M., Polkowska, Ż., Owczarek, P., Bokwa, A.**, 2015. Tree rings as an indicator of atmospheric pollutant deposition to subalpine spruce forests in the Sudetes (Southern Poland). *Atmospheric Research* 151, 259-268.

**Gömöry, D., Longauer, R., Hlásny, T., Pacalaj, M., Strmeň, S., Krajmerová, D.**, 2011. Adaptation to common optimum in different populations of Norway spruce (*Picea abies* Karst.). *Eur J Forest Res* (2012) 131, 401–411.

**Hember, R.A., Kurz, W.A. and Girardin, M.P.**, 2019. Tree Ring Reconstructions of Stemwood Biomass Indicate Increases in the Growth Rate of Black Spruce Trees Across Boreal Forests of Canada. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 124(8), 2460-2480.

**Hochmanová, L., Lehmannová, R.**, 2016. Nejstarší smrk České republiky rostl na Šumavě. Dožil se 632 let [online], *Příroda, iRozhlas.* Dostupné z WWW: <<http://irozhl.as/9R>>.

**Holkup, J., Polanská, L.**, 2013. Učební texty z předmětu Lesnická botanika. Vyšší odborná škola lesnická a Střední lesnická škola Bedřicha Schwarzenberga Písek.

**Hollý, L.**, 2004. Půdy Krkonošského národního parku [online], *Lysá hora.* Dostupné z WWW: <<https://www.lysahora.cz/encyklopedie/objekty1.phtml?id=118478>>.

**Chaloupka, J.**, 2008. Krušné hory. [online], infoglobe. Dostupné z WWW: <<https://www.infoglobe.cz/tip-na-vylet/krusne-hory-clanek/>>.

**Joosten, R., Schulte, A.**, 2002. Possible effects of altered growth behavior of Norway spruce (*Picea abies*) on carbon accounting. *Climatic change*, 55, 115-129.

**Kilpeläinen, A., Peltola, H., Ryyppö, A., Kellomäki, S.**, 2005. Scots pine responses to elevated temperature and carbon dioxide concentration: growth and wood properties. *Tree Physiology*, 25, 75-83.

**Kolář, T., Čermák, P., Oulehle, F., Trnka, M., Štěpánek, P., Cudlín, P., Hruška, J., Büntgen, U., Rybníček, M.**, 2015. Pollution control enhanced spruce growth in the “Black Triangle” near the Czech–Polish border. *Science of the Total Environment*, 538, 703-711.

**Kovář, K., Hrdina, V., Bušina F.**, 2013. Učební texty z předmětu Pěstování lesů. Vyšší odborná škola lesnická a Střední lesnická škola Bedřicha Schwarzenberga Písek.

**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. *Lesn. Cas. For. J.* 61, 175-187.

**Krejčí, R., Černý, J., Havel, M., Hruška, J., Davies, T., Bridges, K., Peters, N., Húnová, I., Zeman, Z.** 2001. Poškození smrkového lesa v Krušných horách: Vliv námrazy a změn ve složení emisí elektráren [online], *Vesmír*. Dostupné z WWW: <<https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/2001/cislo-10/poskozeni-smrkoveho-lesa-krusnych-horach.html>>.

**KRNAP**, 2022. Přírodní poměry: Půdy Krkonoš [online]. Krkonošský národní park. Dostupné z WWW: <<https://www.krnep.cz/pudy-krkonos/>>.

**Lagercrantz, U., Ryman, N.**, 1990. Genetic structure of Norway spruce (*Picea abies*): concordance of morphological and allozymic variation. *Evolution*, 38-53.

**Lagergren, F., Jönsson, A.M., Linderson, H., Lindroth, A.**, 2019. Time shift between net and gross CO<sub>2</sub> uptake and growth derived from tree rings in pine and spruce. *Trees* (2019) 33, 765–776.

**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. *Cent. Eur. For. J.* 66, 23–36.

**Musil, I., Hamerník, J., 2003.** Lesnická dendrologie 1, Jehličnaté dřeviny. Česká zemědělská univerzita v Praze.

**MZe ČR, 2020.** Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2019 [online], Ministerstvo zemědělství. Dostupné z WWW: <[http://www.uhul.cz/images/ke\\_stazeni/zelenazprava/ZZ\\_2019.pdf](http://www.uhul.cz/images/ke_stazeni/zelenazprava/ZZ_2019.pdf)>.

**NP Šumava, 2022.** Přírodní poměry [online]. Národní park Šumava. Dostupné z WWW: <<https://www.npsumava.cz/priroda/prirodni-pomery/>>.

**Panthi, S., Fan, Z. Sleen, P., Zuidema, P.A., 2019.** Long-term physiological and growth responses of Himalayan fir to environmental change are mediated by mean climate. *Glob Change Biol.* 2020;26, 1778–1794.

**Putalová, T., Vacek, Z., Vacek, S., Štefančík, I., Bulušek, D., Král, J., 2018.** 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.* 64 (2018), 21–33.

**Rehseh, R., Mette, T., Menzel, A., Buras, A., 2017.** Soil properties affect the drought susceptibility of Norway spruce. *Dendrochronologia* 45 (2017), 81–89.

**Reed, C.C., Ballantyne, A.P., Cooper, L.A., Sala, A., 2018.** Limited evidence for CO<sub>2</sub>-related growth enhancement in northern Rocky Mountain lodgepole pine populations across climate gradients. *Global Change Biology*, 24(9), 3922-3937.

**Rybníček, M., Koňasová, E., Koňas, P., Kolář, T., 2012.** The decrease in basic density of Spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) on the past thirty years. *Wood Research*, 57 (4), 531-544.

**Sander, C., Eckstein, D., Kyncl, J., Dobrý, J., 1995.** The growth of spruce (*Picea abies* (L) Karst) in the Krkonoše-(Giant) Mountains as indicated by ring width and wood density. *Ann Sci For* 52:401-410.

**Saulnier, M., Schurman, J., Vostarek, O., Rydval, M., Pettit, J., Trotsiuk, V., Janda, P., Bače, R., Björklund, J., Svoboda, M., 2020.** Climatic drivers of *Picea* growth differ during recruitment and interact with disturbance severity to influence rates of canopy replacement. *Agricultural and Forest Meteorology* 287, 107981.

**Sequens, L., Zahradník, D., 2006.** Evaluation of basal area increment on the selected sample trees of the spruce in the district of Krusne hory Mts. in the dependence on precipitation and SO<sub>2</sub> concentration. *Zprávy lesnického výzkumu* 51, 68-71.

**Slávik, M., Bažant, V., 2016.** Dřevařská dendrologie I. Dřeviny nahosemenné - Gymnospermy. Česká zemědělská univerzita v Praze.

**Soulé, P.T., 2011.** Changing Climate, Atmospheric Composition, and Radial Tree Growth in a Spruce-Fir Ecosystem on Grandfather Mountain, North Carolina. *Natural Areas Journal*, 31, 65-74.

**Tomášková, I., Kubásek, J., 2016.** Fyziologie lesních dřevin I.: Fyziologie, produkce a stresy dřevin. Česká zemědělská univerzita v Praze.

**Treml, V., Ponocná, T., Büntgen, U., 2012.** Growth trends and temperature responses of treeline Norway spruce in the Czech-Polish Sudetes Mountains. *Clim Res* 55, 91–103, 2012.

**Tumajer, J., Altman, J., Štěpánek, P., Treml, V., Doležal, J., Cienciala, E., 2017.** Increasing moisture limitation of Norway spruce in Central Europe revealed by forward modeling of tree growth in tree-ring network. *Agricultural and Forest Meteorology* 247, 56-64.

**ÚHÚL, 1999.** Oblastní plán rozvoje lesů: Přírodní lesní oblast 01 Krušné hory. Ústav pro hospodářskou úpravu lesa Brandýs nad Labem.

**ÚHÚL, 2001.** Textová část oblastního plánu rozvoje lesa: Přírodní lesní oblast č.13 Šumava. Ústav pro hospodářskou úpravu lesa Brandýs nad Labem.

**Úřadníček, L., Maděra, P. a kolektiv, 2001.** Dřeviny České republiky. Matice Lesnická, Písek.

**Vejpustková, M., Čihák, T., Šrámek, V., 2018.** Tloušťkový přírůst smrku (*Picea abies* (L.) Karst.) a buku (*Fagus sylvatica* L.) ve stejnorodých a smíšených porostech. *Zprávy lesnického výzkumu* 4, 272-280.

**Vrtiška, J., Křeček, J., Tognetti, R., 2018.** Indication of Environmental Changes in Mountain Catchments by Dendroclimatology. *Soil & Water Res.*, 13, 2018 (4), 208–217.

**Wang, B., Li, M., Fan, W., Yu, Y., Jia, W., 2019.** Impacts of Change in Atmospheric CO<sub>2</sub> Concentration on *Larix gmelinii* Forest Growth in Northeast China from 1950 to 2010. *Forests* 2019, 10, 454.

**Wojnar, T., 2007.** Doporučená pravidla pro měření a třídění dříví v ČR 2008. 2. aktualiz. Vyd. Praha. Lesnická práce.