

Česká zemědělská univerzita

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů



Disertační práce

**Vliv obnovního postupu na vybrané fyzikální a mechanické
vlastnosti dřeva borovice lesní ze vzorových lokalit České
republiky**

Autor práce: Ing. Ondřej Schönfelder

Vedoucí práce: doc. Ing. Aleš Zeidler, Ph.D.

Konzultant: doc. Ing. Vlastimil Borůvka, Ph.D., Dipl. Mgmt.

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Ondřej Schönfelder

Lesní inženýrství

Zpracování dřeva a technika v lesním hospodářství

Název práce

Vliv obnovního postupu na vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva borovice lesní ze vzorových lokalit České republiky

Název anglicky

Effect of regeneration method on selected physical and mechanical properties of Scots pine from model localities in the Czech Republic

Cíle práce

- Posoudit vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva borovice lesní z charakteristických lokalit České republiky.
- Zhodnotit vliv clonného a holosečného způsobu obnovy na hodnocené vlastnosti dřeva.
- Porovnat variabilitu vlastností v rámci kmene.
- Analyzovat další možné zdroje variability vlastností, jako je orientace světových stran a vliv šířky letokruhu.

Metodika

Na vzorových lokalitách, reprezentujících holosečný a clonný postup obnovy borovice lesní, odebrat vzorové kmeny. Ze vzorníků odebrat reprezentativní sekce. Pořez sekcí a výroba zkušebních těles musí umožnit posouzení horizontální variability. Standardizovanými postupy vyhodnotit vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva, především hustotu, sesychání, pevnost a modul pružnosti v ohybu, pevnost v tlaku a rázovou houževnatost. Při hodnocení vybraných vlastností využít i nedestruktivní metody. Statistickými metodami posoudit vliv způsobu obnovy a vliv pozice v kmeni.

harmonogram řešení:

1. rok – odběr zkušebního materiálu z první lokality, příprava zkušebních těles, provedení zkoušek, zpracování literární rešerše na dané téma.
2. rok – odběr zkušebního materiálu z dalších reprezentativních lokalit, příprava zkušebních těles, provedení zkoušek, statistické analýzy dat.
3. rok – dokončení experimentů, statistické analýzy dat, první publikace výsledků.
4. rok – publikace výsledků, dokončení a obhajoba disertační práce.

Doporučený rozsah práce

140–160 stran

Klíčová slova

borovice lesní, obnovný způsob, stanoviště, vlastnosti dřeva, variabilita

Doporučené zdroje informací

- BARNETT, J. R., JERONIMIDIS, G. (2003) Wood Quality and its Biological Basis. Oxford: Blackwell Publishing. 226 s. ISBN1-84127-319-8
- DINWOODIE, J. M. (2000) Timber: Its Nature and Behaviour, 2nd ed. New York: Taylor & Francis. 257 s. ISBN 0-419-25550-8
- JOZSA, L.A., MIDDLETON, G.R. (1994) A discussion of wood quality attributes and their practical implications. Vancouver, Forintek Canada Corp. 42 s.
- NIEMZ, P. (1993) Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. Weinbrenner: DRW- Verlag. 243 s. ISBN 3-87181-324-9
- POŽGAJ, A., CHOVANEC, D, KURJATKO, S., BABIAK, M. (1997) Štruktúra a vlastnosti dreva. 2. vydání. Bratislava: Príroda. 485 s. ISBN 80-07-00960-4
- TSOUMIS, G. (1991) Science and technology of wood – structure, properties, utilization. New York: Chapman and Hall. 497 s. ISBN 0-412-07851-1
- WAGENFÜHR, R. (2007) Holzatlas. Leipzig: Fachbuchverlag. 816 s. ISBN 978-3-446-40649-0
- ZOBEL, B. J., VAN BUIJTENEN, J. P. (1989) Wood Variation: Its Causes and Control, 1st ed. Springer: Berlin / Heidelberg, Germany. 363 s. ISBN 978-3-642-74071-8.
-

Předběžný termín

2020/21 ZS – FLD – SDZ

Vedoucí práce

doc. Ing. Aleš Zeidler, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Konzultant

Ing. Vlastimil Borůvka, PhD.

Elektronicky schváleno dne 22. 1. 2021

Ing. Radek Rinn

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 31. 1. 2021

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Předseda oborové rady

Elektronicky schváleno dne 3. 2. 2021

prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.

Děkan

V Praze dne 21. 11. 2022

"Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma „Vliv obnovního postupu na vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva borovice lesní ze vzorových lokalit České republiky“ vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací a doporučení školitele a konzultanta. 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 2.1. 2023

Podpis autora

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval doc. Ing. Aleši Zeidlerovi, Ph.D. za vedení mé disertační práce. Rád bych také poděkoval doc. Ing. Vlastimilu Borůvkovi, PhD., Dipl. Mgmt. za konzultace a hodnotné připomínky. V neposlední řadě bych také rád poděkoval mé rodině za podporu během psaní práce i během studia. Vypracování disertační práce bylo umožněno díky finanční podpoře Interní grantové agentury Fakulty lesnické a dřevařské a projektu NAZV „Zvyšování adaptability borového hospodářství v podmínkách České republiky“.

Abstrakt

Ve střední Evropě je clonný způsob obnovy dřevin považován za přístup splňující kritéria přírodě blízkého pěstování lesa. Tato práce se zabývá vlivem clonné obnovy na vlastnosti dřeva borovice lesní, která v ČR reprezentuje druhou nejvýznamnější jehličnatou dřevinu. Zkušební materiál byl vybrán ze čtyř lokalit, které jsou charakteristické pro růst borovice lesní. Z každé lokality byly vybrány dva porosty, které reprezentují odlišné způsoby obnovy, a to holosečný a clonný. Vzorníky stromů byly zkáceny a následně vyhodnoceny z hlediska dopadu obnovní metody na vlastnosti dřeva. Jako ukazatele kvality byly použity mechanické a fyzikální vlastnosti dřeva. Většina zkoumaných vlastností dosahuje vyšších hodnot u porostů obnovených clonným způsobem, i když významný rozdíl ve vlastnostech dřeva nebyl nalezen a nelze tedy konstatovat, že clonný způsob obnovy produkuje dřevo jiné kvality. Mnohem významněji se vliv obnovního způsobu projevil na rozložení vlastností po šířce kmene, kde clonný způsob obnovy vykazuje homogenější rozložení vlastností a pro finální zpracování dřeva není tedy podstatné, ze které části kmene dřevo pochází. Naproti tomu, holosečný způsob obnovy se projevuje zvyšováním hodnot vlastností dřeva od dřeně ke kambiu. Variabilitu vlastností lze pozorovat i po výšce kmene. Bylo zjištěno, že nejkvalitnější dřevo se nachází v bazální části kmene a směrem do koruny dochází k poklesu hodnot vlastností.

Klíčová slova: *Pinus sylvestris* L., clonná seč, vlastnosti dřeva, hustota, variabilita

Abstract

In Central Europe, the shelterwood regeneration method is regarded as an approach that meets the criteria of close-to-nature silviculture. This thesis deals with an effect of the shelterwood regeneration method on wood properties of Scots pine, which represents the second most important coniferous tree species in the Czech Republic. The test material for this study was selected from four localities, typical by occurrence of Scots pine. Two stands from each locality were selected, representing two different regeneration methods, namely the clear-cutting and shelterwood method. Sample trees were cut down and subsequently evaluated in terms of the impact of the regeneration method on the properties of the wood. The mechanical and physical properties of wood were used as qualitative parameters. Most of the investigated properties achieves higher values in stands regenerated by the shelterwood method, even though a diametrically significant difference in the properties of the wood was not found and it cannot therefore be stated, that the shelterwood regeneration method produces wood of a different quality. Most significant was the impact of the regeneration method on the distribution of properties along the trunk radius, where the shelterwood method shows more uniform properties distribution and for the final wood processing it is therefore not important from which part of the trunk the wood comes from. On the other hand, the clear-cutting regeneration method is manifested by an increase in wood properties from the pith to the cambium. Variability of properties can also be observed in relation to the height of the trunk, it was found that the best quality wood is located in the basal part of the trunk and towards the crown there is a decrease in the property values.

Keywords: *Pinus sylvestris* L., shelterwood regeneration method, wood properties, density, variability

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Cíle a hypotézy práce.....	10
3	Literární rešerše.....	11
3.1	Obecná charakteristika borovice lesní (<i>Pinus sylvestris</i> L.).....	11
3.1.1	Využití dřeva borovice lesní	12
3.1.2	Makroskopická stavba dřeva.....	12
3.1.3	Mikroskopická stavba dřeva.....	13
3.2	Vybrané vlastnosti dřeva	14
3.2.1	Hustota dřeva.....	14
3.2.2	Sesychání dřeva.....	16
3.2.3	Pevnost v ohybu a modul pružnosti v ohybu	16
3.2.4	Pevnost v tlaku a rázová houževnatost.....	18
3.3	Faktory ovlivňující vlastnosti dřeva	18
3.3.1	Vliv prostředí na tvorbu dřeva borovice lesní	19
3.3.2	Variabilita mezi stromy	19
3.3.3	Vliv šířky letokruhu na vlastnosti dřeva.....	20
3.3.4	Vertikální a horizontální variabilita	21
3.3.5	Stanoviště	22
3.3.6	Sociální postavení jedince v zápoji	23
3.3.7	Pěstební opatření	23
3.3.8	Prořezávání.....	24
3.3.9	Vyvětňování	25
3.3.10	Juvenilní a zralé dřevo.....	26
3.3.11	Hnojení	28
4	Metodika a materiál	28
4.1	Odběr zkušebního materiálu	28
4.2	Příprava zkušebních vzorků.....	30
4.3	Statistické vyhodnocení	32
5	Syntéza výsledků	32
5.1	Seznam příloh	40
6	Diskuze	112
7	Závěry	115
8	Přínos pro vědu a praxi	116

9	Seznam literatury	117
---	-------------------------	-----

Seznam obrázků

Obrázek 1: Rozšíření borovice lesní na území České republiky	11
Obrázek 2: Makroskopické znaky borovice lesní: příčný, tangenciální a radiální řez dřevem	13
Obrázek 3: Mikroskopické znaky dřeva borovice lesní příčný, radiální a tangenciální řez	13
Obrázek 4: Změna hustoty dřeva po výšce kmene	15
Obrázek 5: Vliv šířky letokruhu na hustotu dřeva	15
Obrázek 6: Schematické zobrazení zóny juvenilního dřeva v kmeni stromu	27
Obrázek 7: Lokality odběru zkušebních vzorníků	29
Obrázek 8: Schéma výroby zkušebních těles	31
Obrázek 9: Závislost pevnostních charakteristik na hustotě dřeva	36
Obrázek 10: Rozložení tloušťky letokruhu a hustoty po šířce kmene	37
Obrázek 11: Vliv pěstebních opatření na podíl letního dřeva v letokruhu	38
Obrázek 12: Rozložení hustoty dřeva v horizontální rovině kmene	38

Seznam tabulek

Tabulka 1: Základní charakteristika lokality a porostu (souhrnná charakteristika porostu dle lesního hospodářského plánu)	40
Tabulka 2: Vliv pěstebních opatření na hustotu dřeva	40
Tabulka 3: Vliv pěstebních opatření na sesychání dřeva	40
Tabulka 4: Průměrné hodnoty mechanických vlastností	40
Tabulka 5: Vliv pěstebních opatření na rozložení hustoty dřeva v kmeni	40
Tabulka 6: Vliv pěstebních opatření na rozložení mechanických vlastností v kmeni	41

1 Úvod

Borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) je druhou nevýznamnější dřevinou České republiky, ihned po smrku. Postupným poklesem zastoupení smrku, jako naší nejdůležitější domácí dřeviny, význam borovice roste a zjišťujeme, že o vlastnostech této dřeviny víme v našich podmínkách velmi málo. V lesních porostech borovice lesní zaujímá 16,6 % z celkové plochy, přičemž její přirozené zastoupení v druhové skladbě lesa bylo pouze 3,4 %. Doporučené zastoupení borovice v lesních porostech je dokonce vyšší než současný stav (MZe 2016).

Dřevo je heterogenní materiál a vykazuje vysokou proměnlivost vlastností. Variabilitu vlastností borovice lesní je možné sledovat mezi jednotlivými lokalitami, stromy a dokonce i v rámci jednoho stromu (Tomczak *et al.* 2007, Kask 2015). Vlastnosti dřeva jsou do značné míry ovlivněné přes genotyp stromu, nadmořskou výškou, klimatickými faktory, okolním prostředím a pěstebními zásahy (Tsoumis 1991, Peltola *et al.* 2007). Variabilita vlastností dřeva v rámci kmene je určující pro výsledné zpracování dřeva.

Lesní hospodáři, kteří chtějí získat ze svých lesů maximální zisk, musí rozumět nejenom podstatě růstu a obnovy lesních porostů, ale musí mít představu o kvalitě jejich dřeva (Jozsa a Middleton 1994). Kvalita dřeva je do jisté míry subjektivní pojem a musí být chápána vždy v příslušném kontextu (Macdonald *et al.* 2010). Většinou ji chápeme z pohledu vlastností, které jsou přínosné pro finální využití dřeva.

Hlavním ukazatelem kvality dřeva je hustota, která do značné míry ovlivňuje fyzikální i pevnostní charakteristiky dřeva. Obecně platí, že se vzrůstající hustotou se pevnost dřeva zvyšuje (Kollmann 1951). Hustota dřeva se vzrůstající výškou stromu klesá a zároveň v horizontálním směru stoupá (Požgaj *et al.* 1997). Jedna z příčin variability vlastností dřeva v horizontálním směru je juvenilní dřevo. Juvenilní dřevo je obecně definována jako zóna dřeva ve středu kmene, která zaujímá přibližně 5 až 20 letokruhů. V této zóně struktura dřeva podstupuje rychlým a progresivním změnám, a proto má odlišné vlastnosti v porovnání s vyzrálým dřevem (Kretschmann *et al.* 1993). Dalším určujícím kritériem, které ovlivňuje vlastnosti dřeva v horizontálním směru, je šířka letokruhu. U dřeva borovice platí, že s rostoucí šířkou letokruhu se podíl letního dřeva snižuje a v důsledku toho i pevnost dřeva klesá (Kask 2015).

Faktory, které přispívají k vertikální variabilitě vlastností, jsou struktura dřeva, šířka letokruhu a opět hustota, která směrem od bazální části kmene klesá. Dále podíl juvenilního

dřeva, který se s výškou kmene zvyšuje a negativně ovlivňuje kvalitu dřeva (Tsoumis 1991). Neméně významnými faktory, které ovlivňují vlastnosti dřeva je reakční dřevo, velikost jádra a bělí, přítomnost a rozsah vad (Tsoumis 1991). Variabilita pevnostních charakteristik úzce koreluje s variabilitou hustoty, a proto se dá předpokládat stejný trend vlastností jako u hustoty.

Pěstování lesa a kvalita dřeva jsou v České republice chápány jako oddělené, samostatně stojící problematiky. V zahraničí je však situace naprosto odlišná. Problematika hodnocení vlivu pěstebních opatření na vlastnosti dřeva je v Evropě stále aktuální, a to i v lesnický vyspělých zemích jako je např. Německo, Polsko, nebo Finsko (Beck 2000, Peltola *et al.* 2007, Jelonek *et al.* 2009). Studie, které by nějakým způsobem hodnotily dopad pěstování lesa na kvalitu dřeva z České republiky, mají lokální charakter, komplexní pojetí problematiky pro borovici v našich přírodních podmínkách chybí.

2 Cíle a hypotézy práce

Hypotézy:

- 1) Clonná obnova borovice lesní poskytuje dřevo lepší kvality než holosečný způsob.
- 2) Existuje významný rozdíl ve variabilitě vlastností v rámci kmene u clonného a holosečného způsobu obnovy lesa.

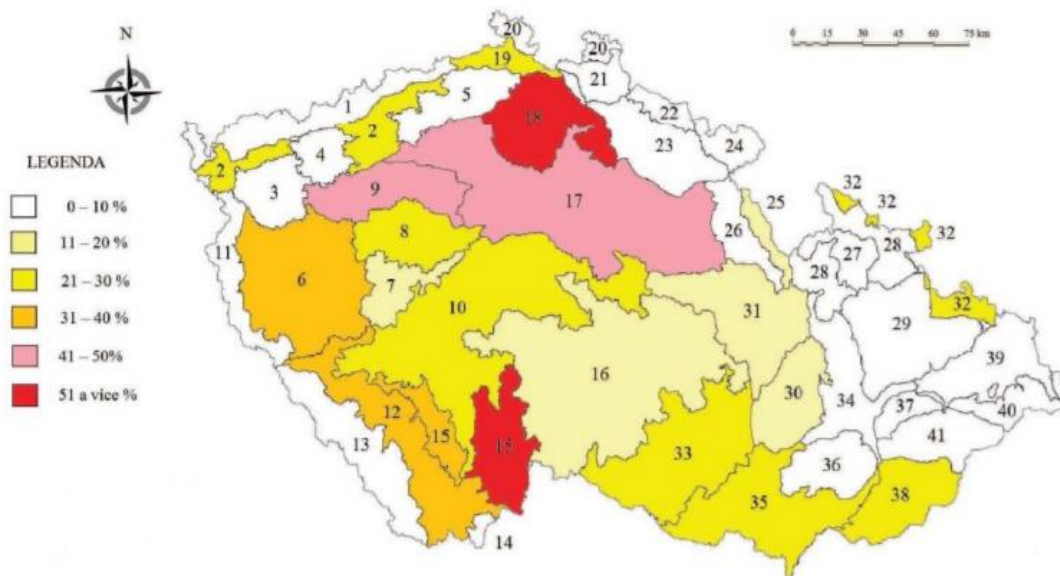
Cíle práce:

1. Posoudit vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva borovice lesní z charakteristických lokalit České republiky.
2. Zhodnotit vliv clonného a holosečného způsobu obnovy na hodnocené vlastnosti dřeva.
3. Porovnat variabilitu vlastností v rámci kmene.
4. Analyzovat další možné zdroje variability vlastnosti, jako je orientace světových stran a vliv šířky letokruhu.

3 Literární rešerše

3.1 Obecná charakteristika borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.)

Borovice lesní má mezi dřevinami nejrozšířenější areál výskytu na světě. Zabírá téměř celou Evropu a podstatnou lesnatou část Asie. Celková oblast rozšíření je 123° délkových a 30° šířkových, což odpovídá 1/3 severní polokoule. Jako původní dřevina chybí v Dánsku, severozápadní Francii, na Britských ostrovech se vyskytuje pouze ve Skotsku. Ve střední Evropě nemá zastoupení v maďarské nížině. Ostrůvkovité zastoupení má na Pyrenejském poloostrově, na Balkáně a v horstvech Malé Asie. Na východ zasahuje daleko na Sibiř. V lesním hospodářství České republiky zaujímá 16,6 % z celkové plochy, přičemž její přirozené zastoupení v druhové skladbě lesa bylo k roku 2016 pouze 3,4 %. Doporučené zastoupení borovice v lesních porostech je dokonce vyšší než současný stav (MZe 2016, Kask 2015). Obr. 1 zobrazuje rozšíření borovice lesní na území naší republiky.



Obrázek 1: Rozšíření borovice lesní na území České republiky (Slávik a Bažant 2012)

V optimálních podmínkách dorůstá 40 m výšky a okolo 1 m výčetní tloušťky. Nízkého nebo keřovitého vzrůstu dosahuje na extrémních stanovištích. Kmen bývá přímý, válcový a náhle ukončený. Roste na suchých i vlhčích chudých vápenitých půdách a na lehkých písčitých půdách, preferuje slunná stanoviště, díky rozvinutému kulovému kořenovému systému dovede čerpat vodu z poměrně velkých hloubek. Z původních míst výskytu na borových doubravách byla dubem postupně vytlačena na chudší písčité půdy, kde vytváří bory. Je nenáročná na půdní podmínky, avšak hůře snáší zasolení půdy a ve městech i větší

znečištění. Kořenový systém dobře ukotvuje nadzemní část stromu, netrpí vývraty, a proto je považována za zpevňovací dřevinu, odolává nízkým a vysokým teplotám v letním období. V zimě však často dochází ke zlomení vrcholu koruny pod tíhou sněhu (Pokorný *et al.* 1990, Kremer 1995, Čvančara *et al.* 1997, Gross a Roček 2000).

3.1.1 Využití dřeva borovice lesní

Po smrku je naší hospodářsky nejvyužívanější dřevinou, kterou lze používat rozmanitým způsobem, jako je stavební a konstrukční dřevo, vlákninu, k výrobě pražců a v neposlední řadě slouží truhlářům pro vybavení interiérů, pro výrobu nábytku a i pro výrobu dřevěných desek, lze z něj lepit stavební díly. Pro barevné rozdíly mezi jádrem a bělí, které se postupně s věkem zvětšují, a pro velký počet zarostlých suků se v interiérech používá pro navození rustikálního stylu. Silice, jež obsahuje borovice, se využívají v medicíně, získávají se z pupenů a jehlic. Macerováním jehlic se v minulosti připravovalo tkanivo „sosnovka“, používané na výrobu pokrývek a kobereců. Nevýhodou borovice je dlouhodobé ronění pryskyřice u hotových výrobků. Impregnované dřevo borovice se často používá na stavbu dětských hřišť a výrobu sloupů. V podobě štěpek slouží jako energetické dřevo. Piliny a hobliny se zpracovávají v podobě briket a pelet jako palivo. Na extrémních stanovištích zaujímá protierozní funkci. V sadovnictví se původní borovice vysazuje omezeně, a to jen ve vyšlechtěných ozdobných kultivarech (Novák 1970, Fellner *et al.* 2007).

3.1.2 Makroskopická stavba dřeva

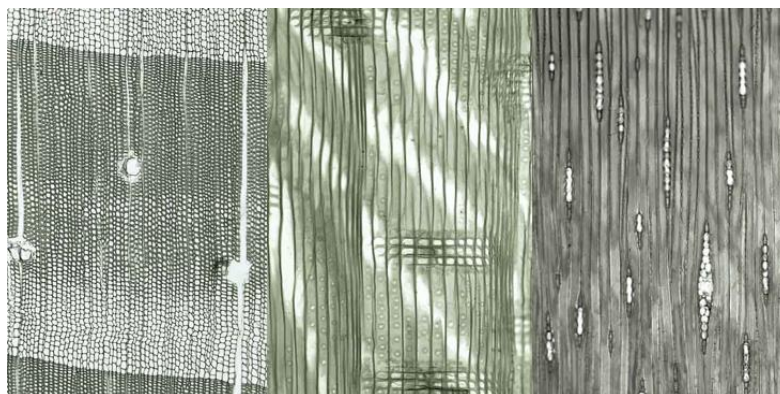
Borovice lesní patří do skupiny dřevin jádrových. Na příčném řezu je jasně vidět světle žlutá běl (5–10 cm široká), která se střídá se žlutočerveným až červenohnědým jádrem, které na světle silně tmavne. Na příčném řezu kmene jsou jasně znatelné letokruhy a přechod mezi jarním a letním dřevem je postupný až náhlý obr. 2. Jarní dřevo tvoří světlejší část letokruhu a je výrazně měkčí. Letní dřevo, které tvoří tmavší část letokruhu, je výrazně tvrdší a má dvakrát až třikrát větší hustotu. Pryskyřičné kanálky jsou znatelné v podobě bílých teček (větší než u smrku a modřínu). Na radiálním řezu je dřevo borovice výrazně pruhované a pryskyřičné kanálky jsou zde vidět jako jemné čárky. Tangenciální řez borovice se vyznačuje dekorativním fládrem a pryskyřičné kanálky jsou zde znázorněny též v podobě tenkých čárek (Wagenführ 2000, Fellner *et al.* 2007).



Obrázek 2: Makroskopické znaky borovice lesní: příčný, tangenciální a radiální řez dřevem (Zeidler 2012)

3.1.3 Mikroskopická stavba dřeva

Borovice lesní vykazuje v rámci svého letokruhu ostrý přechod mezi jarním a letním dřevem, který se na mikroskopické úrovni projevuje zvětšením nebo zmenšením tloušťek buněčných stěn v přechodu z letních na jarní tracheiny (obr. 3). Velikost tracheid borovice se pohybuje v rozmezí 1600–3100 μm , tloušťka jarních a letních tracheid se pohybuje v rozmezí 40–70 μm a tloušťka buněčné stěny se pohybuje 3–10 μm . Borovice lesní má heterocelulární dřeňové paprsky, které obsahují ležaté tracheidy se zubatě ztloustlými buněčnými stěnami. Parenchymatické buňky dřeňových paprsků obsahují v buněčných stěnách oknový typ jednoduchých ztenčení ve styku s axiálními tracheidami. Pryskeřičné kanálky borovice lesní mají po obvodu tenkostěnné epitelové buňky (4-6). Axiální parenchym u borovice chybí (Wagenfür 2000, Mamoňová 2013, Fajstavr 2018).

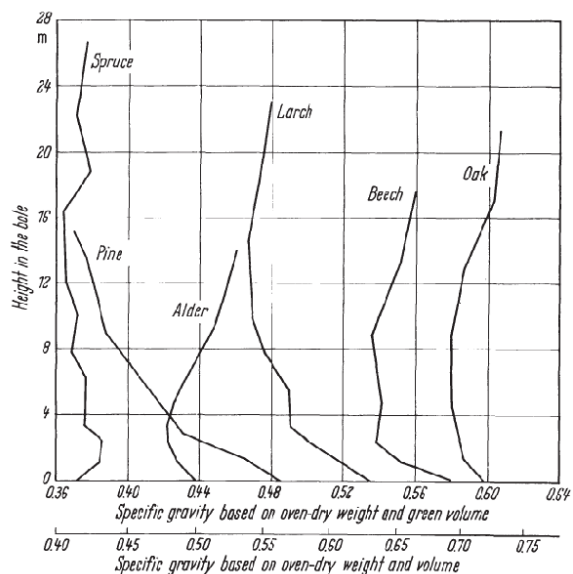


Obrázek 3: Mikroskopické znaky dřeva borovice lesní: příčný, radiální a tangenciální řez (<http://www.woodanatomy.cz>)

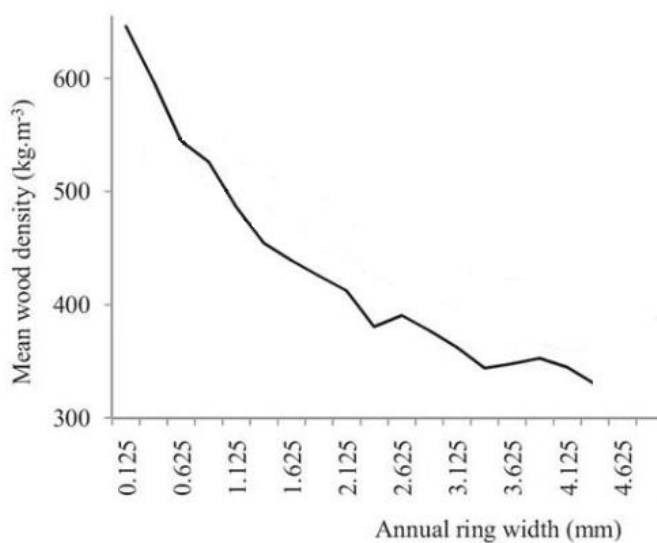
3.2 Vybrané vlastnosti dřeva

3.2.1 Hustota dřeva

Hustota dřeva se využívá jako hlavní ukazatel kvality dřeva, který se vztahuje i k jiným vlastnostem, jako jsou fyzikální, pevnostní charakteristiky dřeva a samozřejmě souvisí i s výtěží vlákniny (Kollmann 1951, Auty *et al.* 2014). Hustota dřeva je nejvíce ovlivňována především tempem růstu stromu, stanovištěm, sociálním postavením jedince v zápoji, věkem kambia a genotypem sadebního materiálu (Raškila *et al.* 2006, Tomczak *et al.* 2007). Obecně platí, že se vzrůstající hustotou se pevnost dřeva zvyšuje (Kollmann 1951). Pro jehličnany se udává, že hustota dřeva dosahuje nejnižších hodnot v zóně juvenilního dřeva. Juvenilní dřevo je definováno jako zóna dřeva ve středu kmene zaujímající přibližně 5 až 20 letokruhů. Vykazuje odlišnou strukturu, a tedy i odlišnou hustotu v porovnání s vyzrálým dřevem (Kretschmann *et al.* 1993). Následně směrem od dřeně hustota dřeva strmě roste, poté pomaleji až se v oblasti zralého dřeva stává téměř konstantní. Po dosažení určitého věku začne opět klesat (Krahmer 1986, Mörling 2002, Raškila *et al.* 2006, Gryc *et al.* 2011, Kask 2015). Podle Tsoumise (1991), hustota dřeva borovice klesá směrem od bazální části kmene ke koruně stromu obr. 4. Vertikální změna hustoty dřeva u jehličnatých dřevin byla pozorována mnoha autory (Požgaj *et al.* 1997, Repola 2006, Muñoz 2008). Snížení hustoty ve vrcholové části lze přičítat zvýšení podílu juvenilního dřeva v kmeni (Benson 1957). Naproti tomu Fischer *et al.* (2016) zjistil u smrku ztepilého, že hustota dřeva se výškou kmene vzrůstá na bohatých stanovištích, ale na chudých je efekt opačný. Repola (2006) zjistil mírný pokles hustoty dřeva až do poloviny kmene, následovaný nárůstem v horní polovině kmene.



Obrázek 4: Změna hustoty dřeva po výšce kmene (Kollmann 1951)



Obrázek 5: Vliv šířky letokruhu na hustotu dřeva (Tsoumis 1991)

Významný vliv stanovištních podmínek na hustotu dřeva borovice lesní zjistil Jelonek *et al.* (2005), který zkoumal rozdíl hustoty dřeva mezi lesní půdou a zalesněnou zemědělskou orníci. Přičemž vyšší hodnoty hustoty zjistil u stromů pěstovaných na zalesněné zemědělské půdě. Rozdíly vlastností na zalesněné zemědělské a lesní půdě zkoumal i Tomczak a Jelonek (2013), který vyšší hodnoty hustoty dřeva našel na lesní půdě. Hautamäki *et al.* (2014)

zkoumal vliv stanoviště na stromech borovice lesní z Finska a Ruska. Mezi těmito stanovišti našel významný rozdíl v hustotě dřeva. Vliv stanoviště potvrzuje i Tsoumis (1991) který uvádí, že hustotu dřeva významně ovlivňují stanovištní podmínky.

Variabilita hustoty dřeva může být ovlivněna i pěstebními zásahy, které jsou podstatné z hlediska růstu stromu. Erikson *et al.* (2006), Mederski *et al.* (2015) i Fischer *et al.* (2016) porovnávali hustotu dřeva z vysemeněných a vysazovaných borových porostů. Nižší hodnoty hustoty byly nalezeny ve vysazovaných porostech v porostech. Eriksson *et al.* (2006) uvádí, že porosty obnovené přirozeným způsobem vykazují nízké přírůsty v raných stádiích růstu a až po uvolnění mateřského porostu dochází k výraznému zvětšení tloušťky letokruhu. Fischer *et al.* (2016) našel negativní korelaci mezi rychlým růstem stromu hustotou dřeva obr. 5, což vedlo k nižší hustotě dřeva dominantnějších stromů ve stejnověkém porostu.

3.2.2 Sesychání dřeva

K základním fyzikálním vlastnostem kromě hustoty patří především sesychání. Rozměrové změny, způsobené sesycháním, jsou spojené s kolísáním vlhkosti dřeva a tyto rozměrové změny jsou důležitou informací pro dřevozpracující průmysl. Zásadním způsobem ovlivňují zpracování, využití jednotlivých druhů dřevin, a dokonce i vlastnosti dřevařských výrobků (Zeidler 2013). Rozsah sesychání se liší pro tři základní směry, jmenovitě pro podélný, radiální a tangenciální. Dřevo bez růstových vad sesychá nejvíce v tangenciálním směru a nejméně v podélném směru (Tsoumis 1991, Požgaj *et al.* 1997, Pang 2002). Rozsáhlými studii bylo prokázáno, že existuje několik primárních faktorů, které ovlivňují sesychání dřeva. Ty zahrnují především hustotu dřeva, pozici dřeva v kmeni po šířce i výšce, obsah extraktivních látek, rozdíl mezi jádrem a bělí, šířku letokruhu, a tím i související podíl letního dřeva, a rozdíl mezi juvenilním a vyzrálým dřevem (Gryc and Holan 2004, Raikila *et al.* 2006,). Hustotu dřeva, jako významného faktoru, který ovlivňuje sesychání dřeva, potvrzuje několik autorů (Koubaa *et al.* 1998, Shmulsky a Jones 2011, Farsi *et al.* 2013).

3.2.3 Pevnost v ohybu a modul pružnosti v ohybu

Pevnost v ohybu kolmo na vlákna (MOR) a modul pružnosti dřeva (MOE) jsou dvě hlavní charakteristiky dřeva, které ovlivňují využití dřeva v konstrukcích. MOR popisuje únosnost konstrukce bez porušení, zatímco MOE vyjadřuje schopnost materiálu udržet svůj

tvár pod zatížením (Hautamäki *et al.* 2014). Variabilita MOR a MOE byla nalezena jak mezi jednotlivými lokalitami, tak i v rámci lokality, tak i mezi jednotlivými stromy (Zobel a van Buijtenen 1989, Vestøl *et al.* 2012).

Stromy rostoucí širších sponech jsou charakteristické hustějšími a silnějšími větvemi, přičemž právě sukovitost je jedním z významnějších faktorů ovlivňujících MOR a MOE (Fischer *et al.* 2016). U smrku ztepilého se velikost suků úměrně zvyšuje se zvyšujícím se průměrem kmene, což vede ke snížení ohybových vlastností dřeva (Fischer *et al.* 2016). Fischer *et al.* (2016) zjistil, že velikost suků se zvyšuje se vzdáleností od země, avšak od jisté vzdálenosti směrem k vrcholu začíná opět klesat. Tento vzorec byl zjištěn uborovice lesní (Mäkinen a Colin 1998), smrku sitka (Macdonald a Hubert 2002) a smrku ztepilého (Auty *et al.* 2012).

Vzhledem k tomu, že konstrukční dřevo musí splňovat normované hodnoty MOE a MOR je důležité mít povědomí o vztahu mezi jednotlivých vlastností dřeva, resp. hustotou a pevnostními charakteristikami (Hautamäki *et al.* 2014). Vztah mezi hustotou dřeva na ohybové vlastnosti dřeva se značně liší jak mezi stromy, porosty ale také i mezi oblastmi, nicméně konstrukční požadavky na ohybové vlastnosti se liší s finálním využitím (Fischer *et al.* 2016). Stromy rostoucí v teplejších oblastech, s vyšším procentem oslunění, dosahují vyšší tloušťky letokruhů, které má negativní vliv na hustotu a lze očekávat i pokles MOE a MOR. Naproti tomu Vestøl *et al.* (2012) zjistil, že vliv hustoty na MOR je malý a MOR je více závislá na sukovitosti dřeva než na jeho hustotě. Høibø a Vestøl (2010) vyvinuly model pro predikci pevnosti dřeva borovice lesní na základě charakteristik stromu. Fischer *et al.* (2016) zjistil, že sbíhavost kmene, průměr kmene v prsní výšce a délka koruny jsou mnohem důležitější ukazatele MOE a MOR než stanoviště. Liu *et al.* (2007) prokázal, že charakteristiku vlastností kmene, které nejlépe predikovaly ohybové vlastnosti přirozeně pěstovaného smrku černého je tloušťka kmene v prsní výšce, sbíhavost kmene a hustota porostu. Hautamäki *et al.* (2013) zjišťoval závislost MOE na MOR, tloušťkou letokruhu a hustotou dřeva na borovici lesní z Finska a Ruska. Zjistil, že nejlépe se dá MOR předikovat na základě MOE, následovanou tloušťkou letokruhu a hustotou dřeva, naproti tomu je MOE nejlépe predikovatelná na základě hustoty dřeva a až poté tloušťkou letokruhu. Hautamäki *et al.* (2014) našel negativní korelaci zvyšující se tloušťky letokruhu na MOE a MOR, tato závislost byla slabší pro MOE než pro MOR.

3.2.4 Pevnost v tlaku a rázová houževnatost

Pevnost dřeva, udávaná pevností v tlaku a rázovou houževnatostí jsou významnými faktory pro finální využití (Raymond 2002). Pevnostní charakteristiky mohou být ovlivněny pěstebními opatřeními, jako je pěstební spon stromu, hnojení, prořezávání, vyvětňování a další (Zobel 1992). Vyšší konkurence mezi stromy vede sice ke snížení objemu kmene, ale konkurence mezi nimi zlepšuje tvar kmene a snížení plochy koruny, která snižuje počet větví, čím se zvyšují pevnostní charakteristiky dřeva (Alcorn *et al.* 2007). Pěstební spon významně ovlivňuje kvalitu dřeva. Zvětšení rozestup stromů nepříznivě ovlivňuje pevnost v tlaku, tak i rázovou houževnatost. Tento negativní pokles pevnostních charakteristik se projevují ve zvýšené tloušťce letokruhu, vyšší přítomnosti juvenilního dřeva a nadměrnou přítomností větví (Zobel 1992, Hapla *et al.* 2000). Velikost a přítomnost suků v kmeni negativně ovlivňuje vlastnosti dřeva a eliminují výsledné zpracování dřeva (Tsoumis 1991). Tloušťka letokruhu významně koreluje s hustotou dřeva, která významně ovlivňuje mechanické vlastnosti dřeva. Bylo prokázáno, že s rostoucí hustotou dřeva se hodnoty pevnosti v tlaku a rázové houževnatosti zvyšují (Požgaj 1997).

3.3 Faktory ovlivňující vlastnosti dřeva

Rozsah ovlivnění kvality stromů se mění s věkem porostu a je nejvýraznější ve fázi založení (Liziniewicz 2014). V této fázi může kvalitu dřeva nejvíce ovlivnit způsob založení porostu, sadební spon, příprava místa a správný výběr sadebního materiálu (Tsoumis 1991, Peltola *et al.* 2007). Růst stromu je silně ovlivněn hustotou porostu, půdními podmínkami na stanovišti, tak i klimatickými podmínkami, které ovlivňují konkurenci mezi stromy. Probírky působí na kvalitu dřeva přímo i nepřímo, prostřednictvím jejich účinků na mikroprostředí stanoviště (Zobel a van Buitenen 1989) a výběrem jedinců požadované kvality (Fahlvik 2005). Výběrové operace jako jsou probírky a prořezávky ovlivňují hustotu porostu a jsou to důležité nástroje pro lesní hospodáře k ovlivnění růstových a kvalitativních parametrů po založení porostu (Fahlvik 2005).

3.3.1 Vliv prostředí na tvorbu dřeva borovice lesní

Nejvýznamnější faktory prostředí, ovlivňující variabilitu vlastností dřeva borovice lesní, jsou klimatické faktory, jako je průběh teplot a srážek nejen v aktuální vegetační sezóně (Biondi 2000), ale růst stromu mohou ovlivňovat podmínky počasí předcházejícího roku (Holmsgaard 1956). Sociální postavení jedince v zápoji, pěstební zásahy v průběhu růstu stromu (Peltola *et al.* 2007) a lokalita v závislosti na pedologických podmínkách a nadmořskou výškou (Tsoumis 1991) určují výsledné vlastnosti dřeva borovice pro finální zpracování.

Mnohé studie potvrzují korelaci tloušťky letokruhu mezi nadmořskou výškou, srážkami a teplotou v průběhu roku (Lindholm *et al.* 2000, Mörling 2002, Koprowski *et al.* 2012). Nadmořská výška souvisí s typickým průběhem počasí ve vyšších polohách (krátká vegetační sezóna a negativní vliv pozdních mrazů). Některé práce potvrzují delší životnost těchto stromů ve vyšších polohách (Di Filippo *et al.* 2007). Je zřejmé, že prostředí se nebude lišit jen s nadmořskou výškou, kontinenty, ale i lokální mikroklimatické podmínky mohou být ovlivněny topografií (expozicí), severem a jihem, převládajícím směrem větru, výskytem mrazových kotlin apod. (Schindler 2008).

Neméně důležitým faktorem je složení pedologického podloží stanoviště (zásobení živin, dostupnost vody, typu půdy apod.) či vlivu okolního prostředí. Nezanedbatelnou roli v růstu stromu také hraje složení atmosféry (CO₂, ozón, imise). Negativní vliv na růst stromu může být považován i nízký podíl zelené koruny, a to z důvodu snížení asimilační plochy (Bytnerowicz *et al.* 2005, Stenberg *et al.* 2014). Tento hendikep může být kompenzován dostatečným osluněním (Trocha *et al.* 2016).

3.3.2 Variabilita mezi stromy

Variabilitu ve struktuře dřeva, lze nalézt i u dřevin stejného druhu, protože pedologické podmínky jsou na každém stanovišti odlišné (Tsoumis 1991) a proto rozdíly ve struktuře dřeva mohou být nalezeny i na stejném stanovišti, tak jako na geograficky odlišné lokalitě. Hodnocení variability mezi stromy je obtížné, jelikož výsledky několika studií přisuzují variabilitu dědičnému genetickému složení stromu (Raikila *et al.* 2006) nebo může být způsobena rozsáhlou variabilitou uvnitř kmene (Jelonek *et al.* 2009, Zeidler a Šedivka 2015).

Stromy rostoucí na stejném stanovišti vykazují vysokou variabilitu ve struktuře dřeva, obvykle je tato variabilita vyšší, než mezi rozdílnými stanovišti (Larson 1969). Stanovištní podmínky lze měnit pěstebními zásahy (prořezávání, hnojení, vzdálenost vysazování stromů atd.). Důsledkem toho se roční přírůst mezi stromy bude lišit ve své struktuře (Agestam *et al.* 1998, Macdonald a Hubert 2002, Ulvcrona a Ulvcrona 2011, Vincent *et al.* 2011). Vliv stanoviště se nejvíce projevuje na tvorbě letního dřeva, kdy rychleji rostoucí stromy mají v průměru vyšší délku vláken, než je tomu u pomalu rostoucích stromů (Tsoumis 1991).

Dle některých autorů, stanoviště není určující pro tvorbu letního dřeva. Výzkumy ukazují, že bonitně bohatá stanoviště a chudá stanoviště mohou snižovat i zvyšovat podíl letního dřeva (Kollman, 1951, Macdonald a Hubert 2002). Rozdílné poměry letního dřeva v letokruhu a délce vláken byly nalezeny mezi stromy rostoucích jak v odlišné nadmořské výšce, tak i na odlišných geografických lokalitách (Di Filippo *et al.* 2007). Kromě environmentálních faktorů, které významně ovlivňují mezi-stromovou variabilitu, se stromy mohou lišit i v genetické konstrukci (Pretzsch *et al.* 2016). Bylo prokázáno, že určitá charakteristická struktura dřeva je dědičná, avšak rozlišení vlivu genetických a environmentálních faktorů na strukturu dřeva je velmi obtížné (Tsoumis 1991).

3.3.3 Vliv šířky letokruhu na vlastnosti dřeva

Mezi nejvýznamnější makroskopické znaky, pozorovatelné na dřevě, jsou letokruhy. Letokruhy jsou obvykle definovány a jako roční přírůstkové vrstvy stromu, které jsou tvořené kambiem (Gryc a Holan 2004). V naší oblasti, tedy oblasti mírného pásma se letokruh tvoří během jednoho vegetačního období. Nejlépe jsou letokruhy zřetelné na příčném řezu. Z pohledu morfologického a fyziologického je letokruh tvořen různými strukturami pletiva (Punches 2004). Na začátku vegetačního období je tvořeno jarní dřevo, které v živém stromu má vodivou funkci. Z makroskopického pohledu se jedná o světlejší a řidší část letokruhu. V druhé polovině vegetačního období je důsledkem kambiální činnosti vytvářeno letní dřevo (Lebourgeois 2000). Zatímco letní dřevo se tvoří na konci léta nebo na podzim a ve dřevě plní mechanickou funkci a makroskopicky se projevuje tmavší barvou, vyšší hustotou a vyšší pevností (Wang *et al.* 2001, Sattler *et al.* 2015). Tak jako hustota dřeva i šířka letokruhu je dobrým indikátorem mechanických a fyzikálních vlastností dřeva. Tloušťka letokruhu tak i podíl letního dřeva v letokruhu jsou charakteristiky úzce spojené s vlastnostmi dřeva. Obecně se udává trend snižující se šířky letokruhu směrem od dřeně ke kambiu, který byl popsán v

mnoha studiích (Požgaj *et al.* 1997, Tomczak *et al.* 2013). Některé práce zaznamenávají zvyšování šířky letokruhu do 20. roku stromu. Dřevo v této zóně je nazýváno jako juvenilní (Kretschmann *et al.* 1993). Následně je vykazován trvalý pokles šířky letokruhu, až se stává téměř konstantní (Adamopoulos 2010). Nepříznivě se na šířku letokruhu projevuje i zvýšení vliv imisí (Wimmer 1991). Naopak lesnická opatření vedoucí k rozvoji koruny významně zvyšují šířku letokruhu (Zobel 1992, Jiang *et al.* 2007). Se snižující šířkou letokruhu se zvyšuje procentický podíl letního dřeva v letokruhu a naopak (Kollman 1951). Šířku letokruhu lze využít k hodnocení fyzikálních a mechanických vlastností dřeva. Šířka letokruhu koreluje s podílem letního dřeva v letokruhu, kde s klesající šířkou letokruhu se podíl letního dřeva zvyšuje. Především mechanické vlastnosti dřeva jsou vázány na podíl letního dřeva v letokruhu, kde se zvyšujícím se podílem letního dřeva v letokruhu se zvětšují i mechanické vlastnosti dřeva (Tsoumis 1991, Peltola *et al.* 2007, Linderholm 2015, Torbenson *et al.* 2016).

3.3.4 Vertikální a horizontální variabilita

Při hodnocení variability uvnitř stromu lze pozorovat, že určitá vlastnost dřeva následuje určitý trend. Variabilita závisí na vertikální poloze uvnitř kmene a na vzdálenosti od středu kmene (Zobel a van Buitenen 1989, Zeidler a Šedivka 2015). Vertikální variabilita vlastností dřeva jehličnatých dřevin byla pozorována mnoha autory (Požgaj *et al.* 1997, Repola 2006, Muñoz 2008). Variabilita vlastností v horizontálním směru kmene byla potvrzena mnoha autory (Raiskila *et al.* 2006, Jelonek *et al.* 2009, Kask 2015). Pro jehličnaté stromy bylo doloženo, že vlastnosti dřeva klesají směrem ke koruně stromu a roste s rostoucí vzdáleností od dřevě (Nicholls and Brown 1973, Repola 2006, Ivković *et al.* 2013). Mezi faktory, které přispívají k vertikální proměnlivosti, patří především šířka letokruhů, struktura dřeva a rozdílný podíl juvenilního dřeva v kmeni (Zobel a van Buitenen 1989, Zeidler a Šedivka 2015). Přítomnost juvenilního dřeva je citována jako jedna z hlavních příčin horizontální variability, zejména u jehličnatých stromů (Zobel a Van Buitenen 1989, Kretschmann *et al.* 1993, Macdonald a Hubert 2002). Juvenilní dřevo najdeme především v centrální části kmene a v koruně stromů také po obvodu kmene. Rozsah juvenilního dřeva je obvykle definován jako určitý počet letokruhů. Většina autorů uvádí prvních 20 letokruhů jako juvenilní dřevo (Kretschmann *et al.* 1993, Gryc *et al.* 2011). Vykazuje odlišnou strukturu, a tudíž různé vlastnosti dřeva ve srovnání se zralým dřevem (Zobel a van Buitenen

1989). Dalšími příčinami proměnlivosti vlastností dřeva v horizontálním směru je tloušťka letokruhu a s tím i související poměr letního dřeva (Kolmann 1951, Požgaj *et al.* 1997). Pro jehličnany platí, že se vzrůstající tloušťkou letokruhů se výsledné vlastnosti dřeva snižují. Předpokládá se, že zvyšující se šířka letokruhů vede k nižšímu poměru letního dřeva a tím ke snížení výsledných vlastností dřeva (Zeidler a Šedivka 2015).

3.3.5 Stanoviště

Faktorem, který výrazně ovlivňuje růst stromu je stanoviště. Zobel a van Buijtenen (1989) uvádějí stanoviště, jako jeden z nejhůře určitelných faktorů, který se vztahuje k vlastnostem dřeva, protože je měřítkem kvality zeminy a podnebí, který se souhrnně označuje jako kvalita (bonita) stanoviště. V některých studiích se jako indikátor stanoviště označuje vliv teploty a větru (Worrell a Malcolm 1990). Bonita půdy ukazuje potenciál růstu stromu za ideálních podmínek a obvykle se měří jako potenciál biomasy v určitém věku dřeviny (Amuakwa-Mensah 2017).

Rozdíly v rychlosti růstu způsobené změnami klimatu povedou k rozdílům v kvalitě dřeva, vzhledem ke známému vztahu mezi rychlostí růstu a vlastnostmi dřeva. Kromě přímých účinků na růst stromu je režim vlhkosti půdy jedním z faktorů stability stromu, a proto (v závislosti na větru) je ovlivňován použitým pěstebním režimem. Tyto faktory, jsou navzájem v určité interakci a mají významný vliv na kvalitu dřeva (Macdonald a Hubert 2002). Vzhledem k tomu, že faktory, které společně určují stanoviště, se v různých oblastech liší, se faktor stanoviště, hodnotící kvalitu dřeva využívá jen v omezené míře (Zobel a van Buijtenen 1989).

Rozdíly mezi lokalitami související s geografickými změnami mají významný vliv na vlastnosti dřeva. Ve většině případů se rozdíly mezi stanovišti projevují na tvorbě letního dřeva. To je zapříčiněno dostupností vlhkosti, teplotou a délkou dne, z nichž každá určuje délku, po kterou strom produkuje letní dřevo (Zobel a van Buijtenen 1989, Moore *et al.* 2009).

Obecně platí, že stromy pěstované na místech s vysokou nadmořskou výškou obvykle produkují dřevo s nižší hustotou a mají kratší tracheidy než dřevo borovic rostoucí v oblastech s nízkou nadmořskou výškou. Tento trend potvrdili mnohé studie (Kollman, 1951, Tsoumis 1991, Macdonald a Hubert 2002). Na chudých a bonitě slabších stanovištích vykazuje hustota jehličnatých dřevin rostoucí tendenci (Zobel a van Buijtenen 1989).

3.3.6 Sociální postavení jedince v zápoji

Ačkoliv je obnova nebo zakládání nových porostů výsadbou sazenic standardní metodou pěstování borovice lesní, zájem o přirozenou obnovu porostů se zvyšuje. To lze do jisté míry vysvětlit nižší kvalitou dřeva vysazovaných porostů (Agestam *et al.* 1998). Přirozená regenerace borových porostů nebo porosty s malým sadebním sponem jsou nezbytné pro produkci dřeva s vysokou kvalitou dřevní hmoty. Přirozená regenerace borových porostů se v současné době nejvíce využívá ve Skandinávii, respektive ve Švédsku (Liziniewicz 2014). Vysoká kvalita dřeva vznikající přirozenou obnovou je způsobena především vysokým počtem jedinců (> 5000 jedinců na hektar) na obnovené ploše, což vytváří vysoké konkurenční podmínky pro růst – pěstování, které snižují průměr větví a zejména stromy vyrůstající pod porostem vykazují nízké roční přírůsty, které vysoce korelují s výslednou hustotou dřeva. Mnohé studie potvrzují, že stromy vyrůstající po úrovni mateřského porostu vykazují pozitivní korelaci s kvalitou dřeva (Herman 1962, Ekö a Agestam, 1994, Béland *et al.* 2000, Auty a Achim 2008). Agestam *et al.* (1998) uvádí nižší hodnoty objemového růstu borovic vychovávaných pod zástínem o 20 % než je tomu u porostů obnovených výsadbou. V našich podmínkách se borové porosty nejčastěji zakládají a obnovují výsadbou nebo přímým výsevem. Zobel a van Buijtenen (1989) provedli studii, kde pracovali s rozestupy borovice lesní 0,75x0,75 m do 3,00 x 3,00 m. Bylo zjištěno, že s rostoucím rozestupem pěstovaných borovic dochází ke snížení hustoty dřeva, zatímco sukovitost stromů se rapidně zvýšila. Dále byl zaznamenán i zvýšený podíl juvenilního dřeva u řídce vysazovaných borovic. Stejných výsledků jako Zobel a van Buijtenen (1989) u borovice lesní zjistil Persson (1975) u smrku ztepilého. Větší rozestupy vysazených stromů vede k nižší kvalitě produkovaného dřeva ve srovnání s přirozeně obnovenými porosty. Jedním z indikátorů kvality dřeva v raném věku u borovic, lze považovat průměr větví (Haapanen a Poykko 1993). Borovice vysazované v širokých rozestupech mají obvykle větší průměr kmene, ale tlustší větve, které snižují mechanické vlastnosti dřeva než stromy vysazované v úzkých rozestupech nebo přirozeně obnovených porostech (Zobel a van Buijtenen 1989).

3.3.7 Pěstební opatření

Hlavní účinky pěstebních opatření a výběr správného sadebního materiálu je považováno za důsledek vlivu radiálního růstu. U borovice lesní, stejně tak jako u dalších

druhů jehličnanů se vlivem pěstebních zásahů stimuluje rychlost růstu stromu (Larson 1969 b, Zobel a van Buijtenen 1989), ve většině případů se zvýšení rychlosti růstu stromu projevuje negativně na zkoumané vlastnosti dřeva (Carson *et al.* 2014). Avšak Zobel a van Buijtenen (1989) poukazuje, že interakce mezi tempem růstu a vlastnostmi dřeva není zcela jasná a nelze ji vždy předvídat, protože hodnocení toho, co může lesní hospodář udělat pro ovlivnění dřeva, nemůže být založeno na stanovení vlivu pěstebního zásahu na růst, protože do růstu stromu je zapojeno mnoho další faktorů.

Pěstební opatření ovlivňující rychlost růstu stromu a výsledné vlastnosti dřeva jsou: prořezávání, hnojení a vyvětvování (Macdonald *et al.* 2010, Liziniewicz 2014, Moilanen *et al.* 2015). Veškerá výše uvedená lesnická opatření jsou do jisté míry vzájemně propojena. Larson (1963 a) poukazuje, jak pěstební opatření vede k pěstování stromů za velmi rozdílných podmínek, které vedou ke změně velikosti koruny. Zobel a van Buijtenen (1989) uvádí velikost koruny jako zdroj růstu dřeva, které ovlivňuje dřevní meristém, který se dále odráží v délce buněk a tloušťce buněčné stěny.

Výrazné změny ve formování dřeva se projevují i u porostů pěstovaných přirozeným způsobem nebo uměle vysazované porosty. Stromy rostoucí v širších rozestupech mají obecně horší hodnoty vlastností než jedinci, kteří rostou s menšími rozestupy (Jiang *et al.* 2007, Liziniewicz 2014). Variabilita vlastností dřeva borovice z hlediska genetiky byla málo studována, ale ve většině případů byla prokázána dědičná vysoká proměnlivost vlastností (Pretzsch *et al.* 2016). Z hlediska lesnického managementu kombinace využívající rychleji rostoucí geneticky upravený materiál má vliv na výslednou kvalitu jádrového dřeva, jelikož stromy pěstované za těchto podmínek budou mít vyšší podíl juvenilního dřeva (Carson *et al.* 2014). Dopad pěstebních opatření na kvalitu dřeva je v současné době velmi diskutujícím tématem. Porozuměním vlivu pěstebních opatření na vlastnosti dřeva je možné rozvinout pěstební režim na konkrétní výslednou kvalitu dřeva pro různé lokality (Zobel a van Buijtenen 1989).

3.3.8 Prořezávání

Snížením počtu stromů v porostu je v lesnictví základní metodou vedoucí ke snížení konkurence mezi jednotlivými stromy, avšak v porostu je ponechán dostatek stromů k dosažení vysoké produktivity dřevní hmoty (Rojo *et al.* 2005, Ulvcróna a Ulvcróna 2011, Vincent *et al.* 2011). Jak uvádí Larson (1969 b), hustota stromů v porostu má zásadní vliv na

kvalitu rostlého dřeva. Rozestup stromů ovlivňuje rychlost růstu, která významně ovlivňuje vlastnosti dřeva. Hustota stromů v porostu může být ovlivněna dvěma způsoby: (1) počáteční výsadbou, (2) prořezáváním. Tyto metody vedou ke kontrole zakmenění porostu a mají významný vliv na tvorbu dřeva (Zobel a van Buijtenen 1989). Prořezávání ovlivňuje vlastnosti dřeva tím, že má vliv na rychlost růstu stromu a odstraňuje stromy s nežádoucími vlastnostmi (Liziniewicz 2014). U jehličnanů obvykle dochází zrychlením růstu stromu ke snížení hustoty dřeva Peltola *et al.* (2007). Tento stav je vyvolaný v důsledku zvyšujícím se zastoupení jarního dřeva v letokruhu. Rychlý růst stromu způsobený vlivem prořezávání také vede k širším a kratším tracheidám s tenčími buněčnými stěnami (Mäkinen a Hynynen 2014). Kärenlampi a Riekkinen (2004) však naznačují, že zrychlený růst nemá žádný vliv na hustotu dřeva. Naproti tomu, rychlý rozvoj koruny vlivem prořezávání podporuje růst stromu a obecně umožňuje vyprodukovat velké množství dřevní hmoty v relativně krátkém časovém období. Na druhou stranu vlivem rychlého růstu a veliké koruny dochází vývoji tlustých větví a vysokému podílu juvenilního dřeva, které negativně ovlivňuje kvalitu dřeva (Cameron *et al.* 1995). Dále platí, že zvýšením tempa růstu větví a mohutností koruny je způsobena vyšší produkce tlakového dřeva (Hart 2010). Z pohledu kvality dřeva Mäkinen a Isomaki (2004) zjistili, že velké prořezávání, které vede k odstranění více než 40 % jedinců má negativní vliv na kvalitu dřeva a zároveň zvyšuje riziko vzniku abiotických poškození. Negativní vliv silného prořezávání potvrzuje i Macdonald *et al.* (2010), který prokázal vyšší sbíhavost kmenů, kvůli širším rozestupům. Výsledkem bylo zvýšení zatížení větrem zbývajících stromů, které mají tendenci produkovat více reakčního dřeva a deformovaných kmenů. Savina (1956) prokázal zvětšení délky tracheid o 25 %, než tomu bylo u neprořezaných porostů.

3.3.9 Vyvěttování

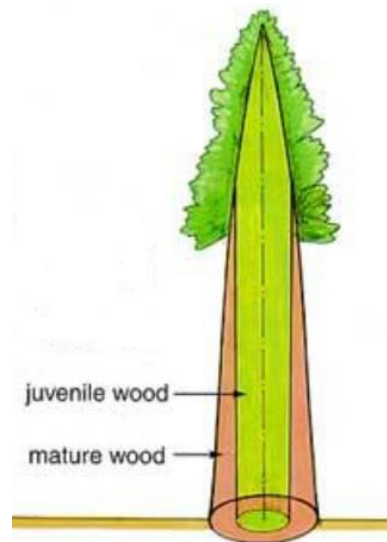
Požadovaným účinkem vyvěttování je zlepšit kvalitu dřeva odstraněním živých nebo odumřelých větví z určité části kmene. Výsledkem vyvěttování je produkce bezsukého dřeva o vysoké kvalitě s nízkým podílem jádrového dřeva (Erkan *et al.* 2016). Vyvěttování má také za následek posunutí korunní recese, přičemž dřevo v prořezané části kmene je méně pod vlivem živé koruny (Macdonald *et al.* 2010). Bylo zjištěno, že vyvěttování urychluje přechod mezi juvenilním a vyzrálým dřevem, a tím snižuje objem produkovaného juvenilního dřeva (Macdonald a Hubert 2002). Zobel a van Buijtenen (1989) uvádí, že vyvěttování má za následek zvýšení letního dřeva ze 14 na 26 % a zvýšení hustoty dřeva ze 0.480 na 0.590 g.cm⁻³

³ a zvýšení délky tracheid o 3 až 4 mm. Efekt zvýšení podílu letního dřeva u borovice montereyské (*Pinus radiata*) byl nalezen 2 až 3 roky po aplikování vyvětvení (Zobel a van Buijtenen 1989). Zvýšení hustoty dřeva o 18 % po vyvětvení u douglasky tisolisté nalezl (Gartner *et al.* 2010). Gartner *et al.* (2010) potvrzuje u douglasky tisolisté zvýšení podílu letního dřeva i průměrné zvýšení délky tracheid. Naproti tomu Zobel a Sprague (1998) zjistil u *Pinus radiata* sice zvýšení hustoty dřeva, ale na délku vláken se vliv vyvětvení neprojevil. Zobel a van Buijtenen (1989) poukazuje na to, že prořezávání snižuje tempo růstu stromu, avšak produkce kvalitnější dřevní hmoty by měla vynahradit ztrátu objemu. Macdonald a Hubert (2002) zjistil snížení růstu u borovice lesní při odstranění 1/3 koruny stromu. Při mírném vyvětvení bylo zjištěno, že tloušťka letokruhů se ve vyvětvené bazální části kmene snižuje, avšak ve vrcholové části kmene se tloušťka letokruhů zvyšuje (Fielding 1965). Macdonald *et al.* (2010) zjistil, že vyvětvení snižuje sbíhavost kmene.

3.3.10 Juvenilní a zralé dřevo

Juvenilní dřevo je jedním z nejdůležitějších zdrojů variability vlastností dřeva u jehličnatých dřevin. Jelikož je dopad juvenilního dřeva na finální kvalitu dřeva nemalý, je nutné definovat, jak velký podíl juvenilní dřevo v kmeni zaujímá (Barnett a Jeronimidis 2003).

To umožňuje separaci juvenilního dřeva od dřeva vyztřalého, čímž se minimalizuje negativní vliv na finální produkty. Podíl juvenilního dřeva v kmeni je diskutováno v mnoha odborných publikacích (Macdonald a Hubert 2002, Bembenek *et al.* 2015). Pojem juvenilní dřevo může být zavádějící, protože mnoho lesních hospodářů vedlo k závěru, že se jedná o dřevo pouze mladých stromu (Zobel a Sprague 1998). Juvenilní dřevo tvoří centrální zónu kolem dřeně a nachází i v blízkosti korun starých stromů obr. 6. Juvenilní dřevo je méně kvalitní v porovnání s vyztřalým dřevem. Postupně juvenilní dřevo přechází do podoby vyztřalého dřeva. Velikost juvenilního dřeva je dána především genetickými faktory a velikostí ročních přírůstů. U douglasky a smrku ztepilého byla prokázána korelace mezi velikostí koruny stromu a velikostí juvenilního dřeva (Barnett a Jeronimidis 2003).



Obrázek 6: Schematické zobrazení zóny juvenilního dřeva v kmeni stromu (Jozsa a Middleton 1994)

Velikost juvenilního dřeva se mění podle druhu dřeviny a může být ovlivněno podmínkami environmentálního prostředí. Juvenilní dřevo je charakteristické nízkou hustotou dřeva, nižším podílem letního dřeva, vyšším zastoupením ligninu a hemicelulózy, nízkým zastoupením celulózy, tenkou buněčnou stěnou, krátkými tracheidami s širokými lumeny, vysokým úhlem natočení vláken a mikrofibril. Výsledkem těchto faktorů jsou nízké pevnostní a pružnostní charakteristiky juvenilního dřeva a nízká rozměrová stabilita, než je tomu u dřeva vyzrálého (Kučera 1992, Macdonald a Hubert 2002).

Zónu juvenilního dřeva není od vyzrálého dřeva snadné určit a mnoho autorů uvádí rozdílnou velikost zóny juvenilního dřeva (Mutz *et al.* 2005). Pikk a Kask (2004) uvádí, že se juvenilní dřevo tvoří mezi 5–25 letokruhem, ke stejnému závěru došel i Lindström (2002). Saarmann (1998) našel zónu juvenilního dřeva mezi 10-20 letokruhem. Paul (1960) uvádí, že juvenilní dřevo je definováno širokými letokruhy s nízkou hustotou, které je tvořeno v blízkosti dřeně kmene. Juvenilní dřevo je následováno zónou dřeva s výrazně se snižujícími šířkami letokruhů, které již odpovídají dřevu vyzrálému. Kučera (1992) došel k závěru, že tvorba juvenilního dřeva se zastavuje dosažením maximální výšky stromu. Významný vliv na tvorbu juvenilního dřeva mají environmentální podmínky růstu stromu (Bembenek *et al.* 2015). Jehličnaté dřeviny pěstované na otevřené ploše s vysokými rozestupy stromů vykazují rychlý nárůst dřevní hmoty v relativně mladém věku, to je důvod proč tyto stromy obsahují vysoký podíl juvenilního dřeva po průřezu kmene (Kučera 1992).

3.3.11 Hnojení

Hnojení může být aplikováno pro zmírnění nutričního deficitu nebo pro zvýšení intenzity růstu stromu (Moilanen *et al.* 2015). Efekt aplikace hnojení na vlastnosti dřeva závisí především na typu aplikace hnojení, věku a kondici stromu v době aplikace. Nejvíce zřejmý účinek přidávání hnojiv na místa s omezeným obsahem živin je zvýšení tempa růstu (Macdonald a Hubert 2002). Zvýšení rychlosti růstu je spojeno i s vyšším obvodovým a výškovým přírůstkem stromu (Bergstedt 2013). V důsledku aplikace hnojiv a tím i zrychlení růstu byla prokázána vyšší produkce juvenilního a jarního dřeva bez odpovídajícího zvýšení podílu letního dřeva, čímž dochází ke snížení hustoty (Kärkkäinen 1976) a pevnostních charakteristik dřeva (Jaakkola *et al.* 2006). Zobel a van Buijtenen (1989) zjistil bezprostředně po aplikování dusíkatých hnojiv u *Pinus taeda* snížení hustoty dřeva z 0,480 na 0,390 g.cm⁻³. Po 6 letech od aplikace hnojiva se hustota dřeva vrátila na hodnotu před aplikací. Bergstedt (2013) udává vliv dusíkatých hnojiv již po prvním roce aplikace, kdežto jiní autoři (Macdonald a Hubert 2002) zjistili výrazný účinek hnojení až po 5 roku aplikace. Naproti tomu Mörling (2002) nezjistil vliv hnojení na hustotu dřeva borovice lesní. Zobel a Van Buijtenen (1989) po aplikaci hnojiv zjistil snížení délky tracheid o 12 % bezprostředně po aplikaci hnojiva a snížení délky o 6 % po 6 letech působení hnojiva. Bylo zjištěno, že rychlejší účinek hnojiva byl zaznamenán u mladých stromů, kdežto delší účinek hnojiva byl zjištěn u starších stromů. Aplikace hnojiv může mít zásadní vliv na výslednou kvalitu dřeva, náhlou změnou tloušťky letokruhu, která je spojena s nárůstem heterogenity dřeva. Výsledná heterogenita materiálu může mít pro finální zpracování větší negativní vliv, než je snížená hustota nebo pevnostní charakteristiky dřeva (Ozolinčius *et al.* 2007).

4 Metodika a materiál

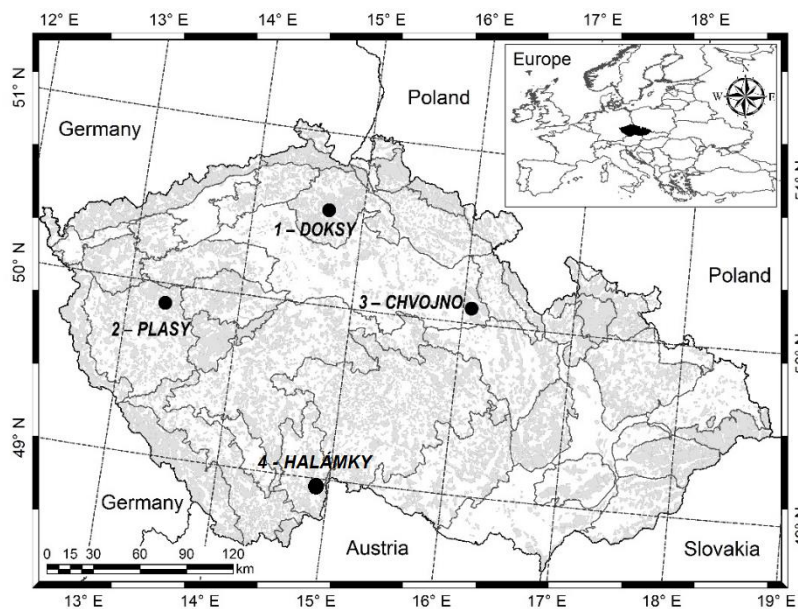
4.1 Odběr zkušebního materiálu

Výzkum probíhal na čtyřech lokalitách, které jsou typické pro růst borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) na území České republiky. Výzkumné lokality pokrývají oblast severních (lokalita 1 – Doksy), západních (lokalita 2 – Plasy), východních (lokalita 3 – Chvojno) a jižních (lokalita 4 – Halámky) Čech (obr. 7). Tabulka 1 zobrazuje základní informace o stanovišti a o aplikovaných pěstebních postupech. Na každé lokalitě byly vybrány dva

porosty, z nichž první porost představuje clonný způsob pěstební obnovy (porost 1), a druhý porost představuje holosečně obnovený porost (porost 2).

Holosečný způsob obnovy je v podmínkách ČR realizován zpravidla v blocích o velikosti převážně 0,2 ha až 1,5 ha. Než nově zakládané porosty dosáhnou vrcholové výšky 15 m, provádějí se obvykle dvě probírky za účelem snížení hustoty na 3 500 – 4 000 jedinců na ha. Vzorníky z holosečně obnovovaných porostů rostou od samého počátku v jednovrstvém stejnoletém porostu.

V druhém případě je aplikován přírodě blízký lesnický přístup s cílem vytvořit komplexní lesní strukturu, podpořit přirozené procesy a snížit náklady na probírku. Zde je náhlé uvolnění krytu obecně odmítnuto. Doba probíhající regenerace se pohybuje od 30 do 50 let (počáteční hustoty ve výškové třídě 0,25 m – 4,0 m se obvykle pohybují od 5000 do 20 000 jedinců na ha). Po provedeném uvolňovacím řezu se zkoumané lesní porosty skládají z horní vrstvy (hustota 30–50 %) a spodní vrstvy porostu. Vzorníky představují tyto podrostové jedince. Z každého porostu bylo vybráno sedm vzorníků, ze kterých byl vyroben zkušební materiál pro mechanické a fyzikální zkoušky. Významným kritériem pro výběr vzorníků bylo zastoupení charakteristických jedinců pro daný porost, jejich vitalita a nepřítomnost růstových nepravidelností a vad.



Obrázek 7: Lokality odběru zkušebních vzorníků (Zeidler et al. 2021)

Tabulka 1: Základní charakteristika lokality a porostu (souhrnná charakteristika porostu dle lesního hospodářského plánu)

Lokalita	Pěstební postup	PLO	GPS (WGS-84)	Výška* (m)	Dbh* (cm)	Soubor lesních typů**
Lokalita 1	clonný	18	50°34'20.035"N, 14°41'2.803"E	13	14	OK
	holosečný		50°33'58.668"N, 14°40'17.575"E	18,1	187	OK
Lokalita 2	clonný	6	49°55'35.827"N, 13°14'2.424"E	11	12	4Q
	holosečný		49°55'13.846"N, 13°14'42.748"E	12	13	4Q
Lokalita 3	clonný	17	50°3'18.602"N, 16°8'59.047"E	10	12	2I
	holosečný		50°3'21.354"N, 16°8'52.095"E	21	22	2I
Lokalita 4	clonný	15b	48°50'13.280"N 14°56'22.976"E	11	10	OK
	holosečný		48°50'10.268"N 14°56'33.539"E	12	11	OK

* výčetní průměr

** soubor lesních typů podle českého typologického systému (Viewegh *et al.* 2003)

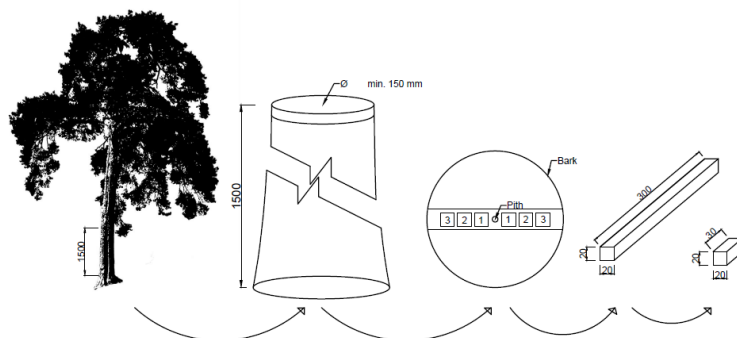
PLO – přírodní lesní oblast

GPS (Global Positioning System) - Globální polohový systém

4.2 Příprava zkušebních vzorků

Pro zjištění variability vlastností ve vertikálním směru bylo z jednotlivých kmenů odebráno několik výřezů. Oddenkový výřez byl vždy odebrán z oblasti výčetního průměru, středový výřez byl odebrán v 1/3 výšky kmene a vrcholový výřez byl odebrán ve 2/3 výšky stromu v případě, že čepová část měla mít odpovídající průměr. Současně se sekci byl v místě odběru odříznut i kotouč za účelem provedení letokruhových analýz, případně denzitometrických měření. Sekce byly z lesních porostů odvezeny na následný požez na pásové pile, získané fošny uskladněny a ponechány přirozenému vysychání. Předmětem dalšího zpracování byla středová fošna, která umožňuje posouzení rozložení vlastností po průměru kmene, která byla následně použita na výrobu zkušebních těles. Zkušební materiál sloužil pro výrobu zkušebních těles na mechanické a fyzikální zkoušky. Zkušební tělesa pro fyzikální zkoušky měla rozměry 20 x 20 x 30 mm (hustota dřeva a sesychání). Tělesa pro zjištění mechanických vlastností dřeva měla rozměry 20 x 20 x 30 mm (pevnost dřeva v tlaku)

a 20 x 20 x 300 mm (rázová houževnatost a pevnost dřeva v ohybu) (obr. 8). Zkušební tělesa určená pro fyzikální a mechanické zkoušky byla v klimatizační komoře stabilizována na rovnovážnou vlhkost 12 % v podmínkách s teplotou vzduchu 20 °C (± 2 °C) a relativní vlhkosti vzduchu 65 % (± 5 °C). Veškeré vzorky svojí kvalitou splňují normu ČSN 49 0101 a neobsahují nepravidelnosti růstových vad a tlakové dřevo.



Obrázek 8: Schéma výroby zkušebních těles (Schönfelder *et al.* 2018)

Testování mechanických a fyzikálních vlastností

Normalizovanými postupy byly testovány mechanické vlastnosti:

- pevnost v ohybu,
- statický modul pružnosti,
- dynamický modul pružnosti,
- pevnost v tlaku,
- rázová houževnatost.

Normalizovaným postupem byly zkoumány následující fyzikální vlastnosti:

- hustota dřeva,
- sesychání.

Hustota dřeva byla stanovena i denzitometrickou metodou, která slouží pro vysvětlení horizontálního trendu rozložení hustoty dřeva. Po provedení letokruhových analýz byly z kotoučů vyříznuty pásky s radiálním průběhem letokruhů o tloušťce 0,8 mm a výšce 18 mm. Vzorky byly vyříznuty směrem od dřeně ke kambiu. Vzorky byly umístěny do denzitometru QTRS-01X (QMS Data Analyzer and Scanner, USA Tennessee) směrem kolmo k rentgenovému paprsku. Doba expozice záření jednoho centimetru vzorku odpovídá

přibližně dvou minutám. Intenzita rentgenového záření je 18 mA a napětí 12 V. Data z denzitometrického měření byla použita pro posouzení průběhu trendu hustoty v horizontálním směru kmene.

Letokruhová analýza

Kotouče byly vybroušeny a naskenovány na stolním skeneru formátu A3 při rozlišení 800 DPI. Pomocí měřící funkce v programu pro obrazovou analýzu NIS Elements AR 4.11 (Laboratory Imaging, Czech Republic) byly změřeny hodnoty šířek letokruhů v milimetrech.

4.3 Statistické vyhodnocení

Pro vyhodnocení statistického významu jednotlivých vlivů byly použity vícefaktorové testy ANOVA (Fisherův F – test) a Duncanovy testy mnohonásobného porovnání. Dále byly stanoveny regresní modely. Hladina významnosti $\alpha = 0,05 \%$ byla použita pro všechny statistické analýzy. Hodnocenými faktory byly pěstební opatření, vertikální poloha v kmeni, horizontální poloha v kmeni (vzdálenost od dřeně). Statistické analýzy byly provedeny za použití programu STATISTICA 12 (Statsoft Inc., USA).

5 Syntéza výsledků

Tato kapitola představuje syntézu výsledků disertační práce zjištěné za studijní období. Výsledky práce byly publikovány v časopisech evidovaných v databázi WOS nebo Scopus. Separáty článků za studijní období jsou uvedeny v kapitole 5.

Vliv pěstebních opatření na vlastnosti dřeva

Veškeré zkoumané lokality jsou typické pro růst borovice lesní na území České republiky (Západočeská pahorkatina, Severočeská pískovcová plošina a Český ráj, Jihočeské pánve a Polabí). Jako hlavním ukazatelem vlastností dřeva byla stanovena hustota dřeva. Množství hmoty soustředěné v jednotce objemu se velice často v dřevařském průmyslu považuje za významný indikátor kvality dřeva, a to díky skutečnosti, že významně ovlivňuje

jak fyzikální, tak i mechanické vlastnosti dřeva. Rozdíly v hustotě dřeva rozdílných obnovních postupů ve všech zjišťovaných oblastech jsou zobrazeny v tab. 2.

Tabulka 2: Vliv pěstebních opatření na hustotu dřeva

		Lokalita 1	Lokalita 2	Lokalita 3	Lokalita 4
Porost 1	průměr (g.cm ⁻³)	0,541	0,500	0,521	0,535
	median (g.cm ⁻³)	0,534	0,499	0,520	0,531
	var (%)	7,9	9,0	11,3	12,9
	sd (g.cm ⁻³)	0,043	0,045	0,059	0,069
Porost 2	průměr (g.cm ⁻³)	0,529	0,490	0,525	0,528
	median (g.cm ⁻³)	0,528	0,478	0,525	0,522
	var (%)	10,9	13,1	13,6	16,5
	sd (g.cm ⁻³)	0,058	0,064	0,071	0,087

Je patrné, že clonný způsob obnovy vykazuje vyšší hodnoty hustoty, avšak zjištěné hodnoty nejsou diametrálně odlišné a nelze tedy konstatovat, že clonný způsob obnovy produkuje dřevo o vyšší hustotě. Publikovaný odborný článek zabývající se problematikou dopadu pěstebních opatření na hustotu dřeva je uveden v příloze č. 1.

Tak jako u hustoty dřeva i u sesychání dřeva byly nalezeny lepší parametry kvality dřeva u clonného způsobu obnovy lesa tab. 3. Avšak i zde zjištěné rozdíly hodnot nejsou diametrálně odlišné a nelze tedy říct, že oba obnovní postupy produkují dřevo odlišné kvality. Publikace zabývající se dopadem pěstebních opatření na sesychání dřeva je uvedena v příloze 2.

Tabulka 3: Vliv pěstebních opatření na sesychání dřeva

		Lokalita 1	Lokalita 2	Lokalita 3	Lokalita 4	
Porost 1	β_r (%)	průměr	5,1	4,2	5,6	5,3
		median	5,1	4,2	5,5	5,5
		var	1,5	0,9	1,6	1,5
		sd	30,0	22,5	28,5	28,3
	β_t (%)	průměr	7,7	8,3	8,3	8,7
		median	7,8	8,3	8,5	8,8
		var	1,8	2,1	1,9	1,9
		sd	22,8	25,0	22,8	21,8
	β_v (%)	průměr	13,7	13,3	15,3	14,7
		median	13,9	13,5	15,2	14,8
		var	2,8	2,3	2,9	2,9
		sd	20,1	17,3	19,1	19,8
Porost 2	β_r (%)	průměr	5,3	4,5	5,7	4,7
		median	5,3	4,3	5,4	4,7
		var	1,0	1,4	2,1	1,3
		sd	18,9	30,3	37,2	27,0
	β_t (%)	průměr	8,8	8,6	8,3	8,7
		median	9,0	9,0	8,6	8,8
		var	1,8	2,0	2,3	2,0
		sd	20,9	23,7	27,2	23,5
	β_v (%)	průměr	15,1	13,4	15,6	16,2
		median	15,2	13,6	15,6	14,3
		var	2,3	3,2	4,0	30,8
		sd	15,3	23,9	25,9	18,9

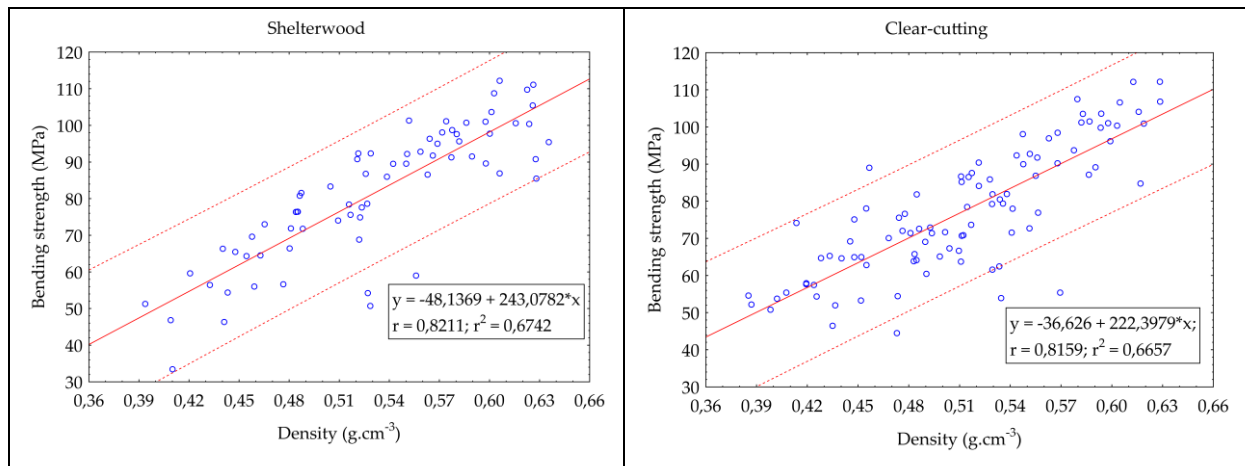
Z hlediska využití dřeva pro konstrukční účely a ve stavebním průmyslu jsou důležité pružnostní a pevnostní vlastnosti dřeva. Ve výzkumu byla z mechanických vlastností zkoumána pevnost dřeva v ohybu, tlaku a rázovou houževnatost dřeva, z pružnostních charakteristik byl stanoven dynamický a statický modul pružnosti (tab. 4).

Tabulka 4: Průměrné hodnoty mechanických vlastností

		Lokalita 1	Lokalita 2	Lokalita 3	Lokalita 4	
Pevnost v tlaku (MPa)	Porost 1	průměr (MPa)	49	43	49	36
		median (MPa)	49	44	49	35
		var (%)	11,7	16,5	12,5	22,8
		sd (MPa)	5,8	7,1	6,6	8,2
	Porost 2	průměr (MPa)	46	46	49	34
		Median (MPa)	45	45	48	33
		var (%)	22,0	18,2	20,6	23,7
		Sd (MPa)	10,2	8,3	10,0	8,1
Pevnost v ohybu (MPa)	Porost 1	průměr (MPa)	76	73	81	81
		median (MPa)	74	73	83	86
		var (%)	12,9	13,5	17,3	23,0
		sd (MPa)	9,8	9,9	13,9	18,7
	Porost 2	průměr (MPa)	77	71	78	77
		median (MPa)	76	70	76	75
		var (%)	15,6	17,4	25,3	21,9
		sd (MPa)	12,1	12,3	19,7	16,7
Statický modul pružnosti (MPa)	Porost 1	průměr (MPa)	9814	9490	10381	9133
		median (MPa)	9570	9278	10170	9516
		var (%)	21,7	23,1	22,5	25,2
		sd (MPa)	2133	2192	2331	2297
	Porost 2	průměr (MPa)	9999	9062	10379	8610
		median (MPa)	10261	8926	10341	8450
		var (%)	24,5	26,0	27,7	26,1
		sd (MPa)	2453	2352	2871	2244
Dynamický modul pružnosti (MPa)	Porost 1	průměr (MPa)	11471	10563	12615	13832
		median (MPa)	11187	10399	12548	12893
		var (%)	26,4	28,9	20,1	43,8
		sd (MPa)	3021	3057	2540	6053
	Porost 2	průměr (MPa)	12535	11563	14034	10375
		median (MPa)	12187	11202	13938	9466
		var (%)	27,3	25,9	15,5	49,2
		sd (MPa)	3425	2995	2179	517
Rázová houževnatost (J·cm ⁻²)	Porost 1	průměr (J·cm⁻²)	4,4	4,0	3,3	3,6
		median (J·cm ⁻²)	4,5	4,0	3,2	3,5
		var (%)	28,5	34,5	41,4	49,6
		sd (J·cm ⁻²)	1,3	1,4	1,4	1,8
	Porost 2	průměr (J·cm⁻²)	3,9	3,3	3,3	3,5
		median (J·cm ⁻²)	3,8	3,1	2,9	3,3
		var (%)	38,7	43,2	58,6	47,4
		sd (J·cm ⁻²)	1,5	1,4	1,9	1,7

Tak jako u hustoty dřeva, byla ve většině případů nalezena vyšší hodnota vlastností zkoumaných mechanických vlastností u porostů obnovených clonným způsobem obnovy. U zkoumaných vlastností dřeva nebyl nalezen diametrálně odlišný rozdíl hodnot vlastností a

nelze tedy konstatovat, že clonný způsob obnovy dřeva produkuje dřevo vyšších hodnot mechanických vlastností. Bez ohledu na hodnocené vlastnosti, nebyl zjištěn významný rozdíl mezi obnovními postupy. Dále byl hodnocen vliv hustoty dřeva na mechanických vlastnostech. Z obr. 9 je patrné, že se vzrůstající hustotou dřeva hodnoty mechanických vlastností stoupají. Ilustrativní výsledky mechanických vlastností je v publikovaných článcích přiložených v příloze 3, 4 a 5.



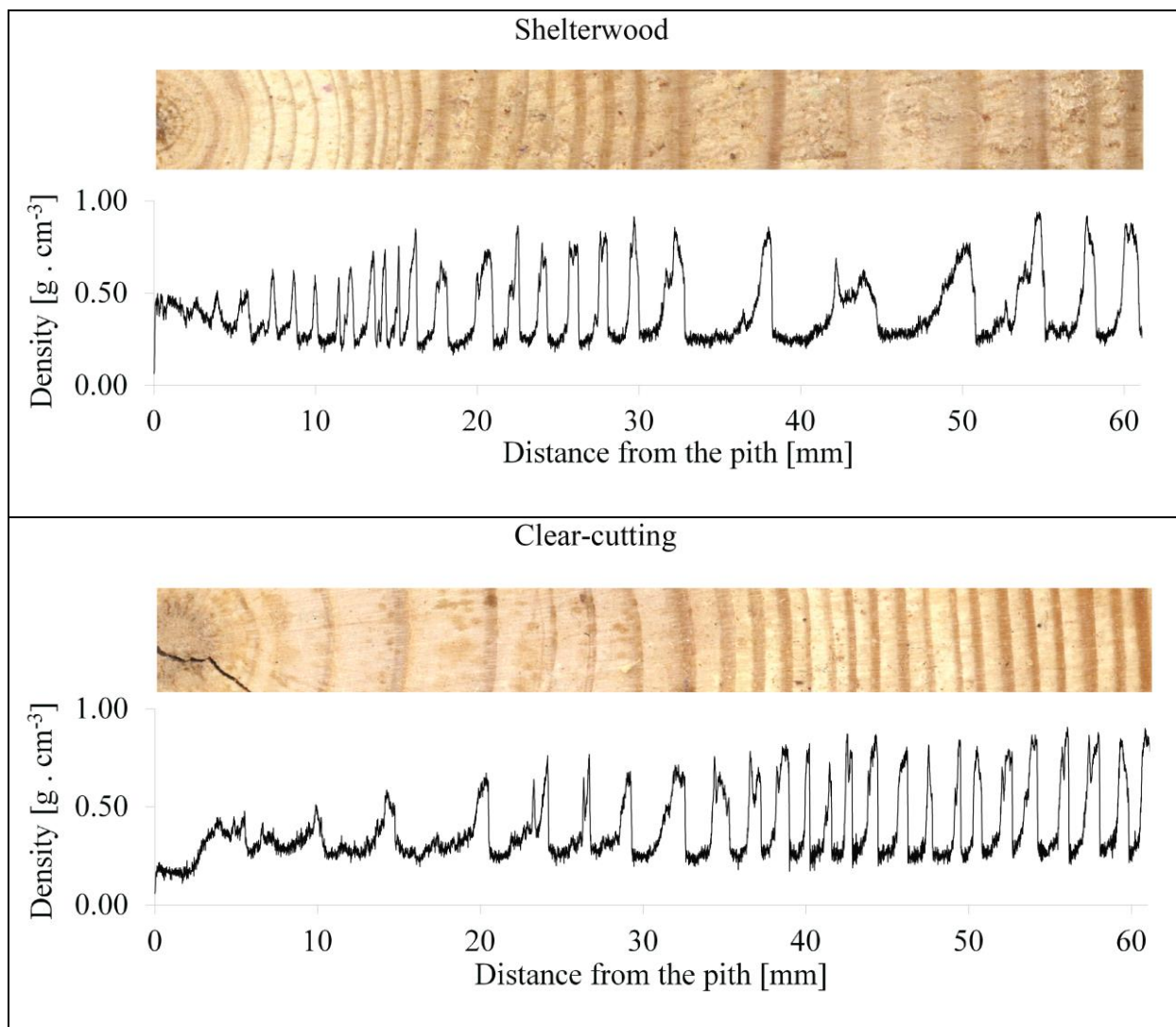
Obrázek 9: Závislost pevnostních charakteristik na hustotě dřeva

Z hlediska výsledných hodnot mechanických vlastností a hustoty je při volbě clonného způsobu obnovy nutné věnovat značnou pozornost době uvolnění mateřského porostu. Z výsledků je patrné, brzké uvolnění mateřského porostu vede ke snížení fyzikálních a mechanických vlastností dřeva a pozitivní efekt clonného způsobu na vlastnosti dřeva se snižuje nebo se úplně vytrácí.

Vliv pěstebních opatření na rozložení vlastností dřeva v kmeni

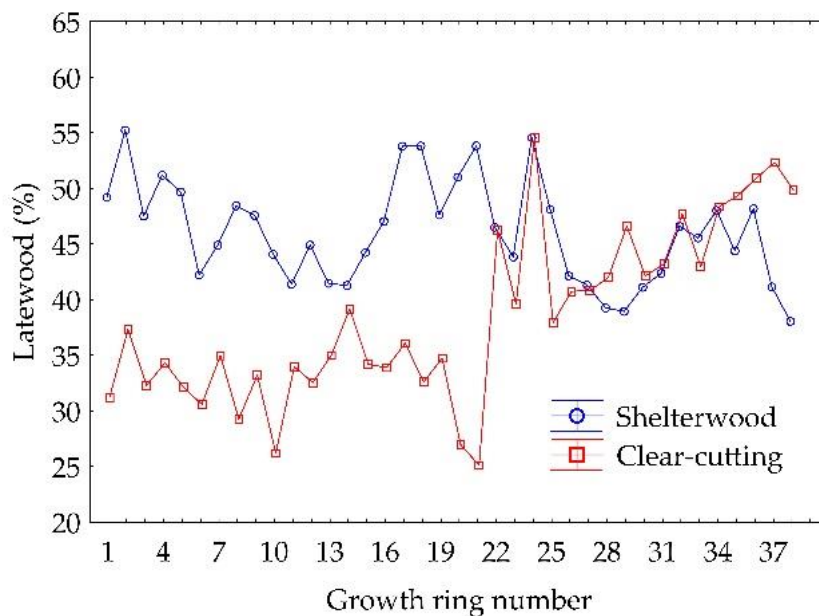
Dopad pěstebních opatření na vlastnosti dřeva se z hlediska zpracování a využití dřeva mnohem významněji projevil v rozlišení vlastností v horizontální rovině v kmeni, tj. od dřene ke kambiu. Pro lepší pochopení trendu rozložení vlastností dřeva po šířce kmene byla stanovena letokruhová analýza, která do jisté míry vysvětluje rozložení vlastností dřeva. Pro potvrzení letokruhové analýzy bylo provedeno i denzitometrické šetření, které detailněji vypovídá o rozložení vlastností v kmeni. Z denzitometrického šetření je patrné, že šířka letokruhu u holosečného způsobu obnovy má na všech lokalitách stejný trend, a to snižující se směrem ke kambiu. Clonný způsob vykazuje zcela opačný trend, kde nejnižší tloušťka

letokruhu je zjištěna u dřene a po uvolnění mateřského porostu dochází k nárůstu tloušťky letokruhu (obr. 10).



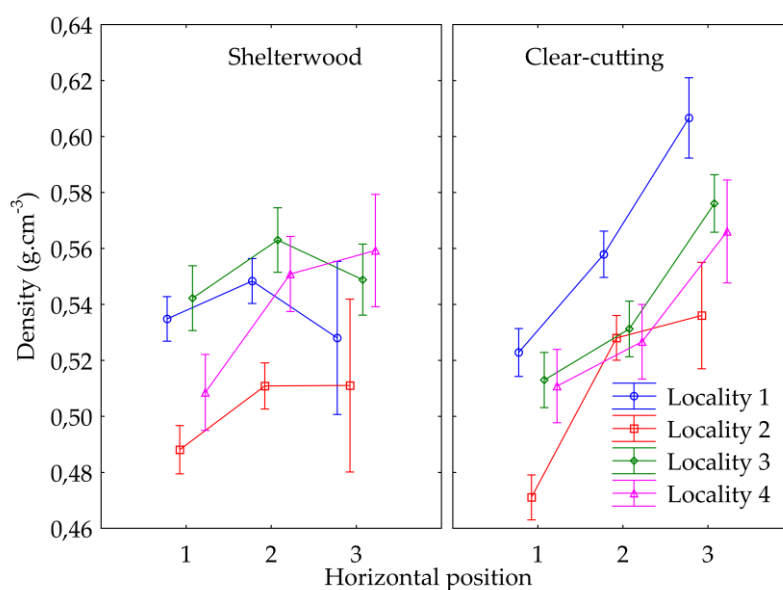
Obrázek 10: Rozložení tloušťky letokruhu a hustoty po šířce kmene

Tloušťka letokruhu vysoce koreluje se zastoupením letního dřeva a zcela logicky v návaznosti na předchozí, holosečný způsob vykazuje nižší podíl letního dřeva v letokruhu u dřene a směrem ke kambiu se zvyšuje. Clonný způsob vykazuje opačný trend, kde je vyšší podíl letního dřeva u dřene a směrem ke kambiu se snižuje (obr. 11). Podíl letního dřeva v letokruhu významně ovlivňuje výsledné vlastnosti. Výsledky denzitometrického měření jsou zobrazeny v příloze 6.



Obrázek 11: Vliv pěstebních opatření na podíl letního dřeva v letokruhu

Bylo zjištěno, že clonný způsob obnovy vykazuje mnohem rovnoměrnější rozložení vlastností dřeva po šířce kmene a z hlediska zpracovatelského průmyslu není tedy podstatné, ze které části kmene dřevo pochází. Oproti tomu holosečný způsob obnovy vykazuje jasně rostoucí trend vlastností dřeva od dřeně ke kambiu. Z hlediska kvalitativního je středová zóna dřeva chápána jako méně hodnotná. V případě clonného způsobu nemá vzdálenost od dřeně na kvalitu dřeva žádný vliv (obr. 12).



Obrázek 12: Rozložení hustoty dřeva v horizontální rovině kmene

Vlastnosti dřeva v kmeni jsou rozdílné i po výšce kmene. V tomto výzkumu jsme z důvodů omezenosti průměrů kmenů hodnotili pozici v 1/3 výšky kmene a bazální část kmene. Bylo potvrzeno, že s rostoucí výškou kmene vlastnosti dřeva klesají a lze tedy konstatovat, že nejkvalitnější dříví se nalézá v bazální části kmene. Způsob roložení vlastností po výšce kmene je u obou pěstebních postupů shodný. Půvměrné hodnoty hustoty dřeva po šířce a výšce kmene jsou zobrazeny v tab 5.

Tabulka 5: Vliv pěstebních opatření na rozložení hustoty dřeva v kmeni

			hustota			
			vertikální ± sd	horizontální		
				1 pozice	2 pozice	3pozice
Lokalita 1	bazální část kmene	porost 1	0,541 ±0,043	0,535	0,548	0,528
		porost 2	0,551 ±0,058	0,523	0,558	0,607
	1/3 výšky kmene	porost 1	-	-	-	-
		porost 2	0,495 ±0,052	0,457	0,517	0,584
Lokalita 2	bazální část kmene	porost 1	0,500 ± 0,045	0,488	0,511	0,511
		porost 2	0,503 ±0,064	0,471	0,528	0,536
	1/3 výšky kmene	porost 1	-	-	-	-
		porost 2	0,440 ± 0,03	0,414	0,446	0,464
Lokalita 3	bazální část kmene	porost 1	0,550 ± 0,049	0,542	0,563	0,549
		porost 2	0,550 ± 0,068	0,513	0,531	0,576
	1/3 výšky kmene	porost 1	0,481 ± 0,047	0,481	0,497	0,485
		porost 2	0,480 ± 0,052	0,45	0,491	0,513
Lokalita 4	bazální část kmene	porost 1	0,536 ± 0,069	0,511	0,549	0,57
		porost 2	0,533 ± 0,077	0,521	0,527	0,565
	1/3 výšky kmene	porost 1	0,517 ± 0,056	0,491	0,492	0,583
		porost 2	0,515 ± 0,112	0,516	0,504	0,525

Tabulka 6 zobrazuje hodnoty rozložení pevnostních charakteristik ve vertikálním směru kmene. Z výsledků je patrné, že ve většině případů bylo vyšších hodnot mechanických vlastností dřeva v bazální části kmene u porostů obnovených clonným způsobem. Tak jako u hustoty dřeva bylo zjištěno, že s rostoucí výškou kmene dochází k poklesu hodnot mechanických vlastností.

Tabulka 6: Vliv pěstebních opatření na rozložení mechanických vlastností v kmeni

			Pevnost v tlaku ± sd	Rázová houževnatost ± sd	Statický modul pružnosti ± sd	Dynamický modul pružnosti ± sd	Pevnost v ohybu ± sd
Lokalita 1	bazal	porost 1	49,3 ± 5,8	4,4 ± 1,3	9814 ± 2133	11471 ± 3021	75,5 ± 9,8
		porost 2	44,6 ± 11,1	4,1 ± 1,6	10040 ± 2704	12224 ± 3854	78,5 ± 13,4
	middle	porost 1	-	-	-	-	-
		porost 2	48,9 ± 7,8	3,2 ± 1,0	9926 ± 1949	13103 ± 2403	75,2 ± 8,9
Lokalita 2	bazal	porost 1	43,2 ± 7,1	4,0 ± 1,4	9490 ± 2192	10563 ± 3057	72,9 ± 9,9
		porost 2	47,0 ± 8,8	3,6 ± 1,5	9346 ± 2447	11844 ± 3271	73,0 ± 12,7
	middle	porost 1	-	-	-	-	-
		porost 2	41,6 ± 4,2	2,6 ± 0,8	8233 ± 1859	10746 ± 1810	64,7 ± 8,9
Lokalita 3	bazal	porost 1	50,2 ± 6,7	3,3 ± 1,2	10088 ± 2023	13825 ± 2743	83,8 ± 13,3
		porost 2	50,8 ± 9,9	3,4 ± 2,0	9854 ± 2699	14901 ± 2294	80,0 ± 21,7
	middle	porost 1	46,5 ± 5,9	3,2 ± 1,6	10744 ± 2651	11406 ± 1743	76,8 ± 13,9
		porost 2	45,2 ± 8,4	2,9 ± 1,7	11029 ± 2962	12880 ± 1476	75,3 ± 16,7
Lokalita 4	bazal	porost 1	36,1 ± 8,2	3,7 ± 1,8	9157 ± 2329	14173 ± 6147	81,3 ± 19,0
		porost 2	35,1 ± 8,3	3,6 ± 1,7	8818 ± 2356	9710 ± 4648	79,1 ± 17,5
	middle	porost 1	34,3 ± 9,2	3,4 ± 2,4	8822 ± 2014	10151 ± 3471	77,4 ± 14,6
		porost 2	30,6 ± 6,5	3,1 ± 1,6	8020 ± 1803	13166 ± 6218	72,3 ± 14,3

5.1 Seznam příloh

Příloha 1: Influence of site conditions and silvicultural practice on the wood density of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) – a case study from the Doksy locality, Czech Republic

Influence of site conditions and silvicultural practice on the wood density of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) – a case study from the Doksy locality, Czech Republic

ONDŘEJ SCHÖNFELDER¹, ALEŠ ZEIDLER^{1*}, VLASTIMIL BORŮVKA¹, LUKÁŠ BÍLEK²

¹Department of Wood Processing, Faculty of Forestry and Wood Sciences, Czech University of Life Sciences Prague, Prague, Czech Republic

²Department of Silviculture, Faculty of Forestry and Wood Sciences, Czech University of Life Sciences Prague, Prague, Czech Republic

*Corresponding author: zeidler@fld.czu.cz

Abstract

Schönfelder O., Zeidler A., Borůvka V., Bílek L. (2017): Influence of site conditions and silvicultural practice on the wood density of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) – a case study from the Doksy locality, Czech Republic. J. For. Sci., 63: 457–462.

After spruce, the Scots pine (*Pinus sylvestris* Linnaeus) is the second most important commercial coniferous tree species in the Czech Republic. However, we are finding out that awareness of the variability of properties, and possibilities to affect them, are noticeably small for this type of tree species in our conditions. The goal of this study is to primarily evaluate the importance of site conditions, silvicultural measures and other factors for the density of Scots pine wood in the Doksy locality in the Czech Republic. The Doksy locality is represented by three forest stands with different silvicultural history. Samples were taken from each stand, the basal and central parts of which were subsequently processed for test samples with dimensions of 20 × 20 × 30 mm. Wood density at 12% moisture content was ascertained in the test samples. The highest density value of 0.541 g·cm⁻³ was reached in a stand that is regenerated using the shelterwood method with long regeneration period, and the lowest density value of 0.488 g·cm⁻³ was recorded in a stand that was regenerated using the clear-cutting method. From a forestry perspective, it can be further stated that the wood density of Scots pine is also affected by the site conditions and position of samples in the trunk.

Keywords: shelterwood regeneration; clearcut; forest site; softwoods; physical properties; variability

After Norway spruce (*Picea abies* (Linnaeus) H. Karsten), the Scots pine (*Pinus sylvestris* Linnaeus) is the second most important commercial coniferous tree species in the Czech Republic. With the increasing biotic and abiotic damage to spruce forests, the importance of the pine will be increasing; however, we are finding out that we know very little about the properties of this tree species in the conditions of Central Europe. In terms of forest management, the pine currently covers 16.6% of the to-

tal area, whilst its natural representation in the tree species composition of the forest was 3.4%. The recommended representation of the pine in forest stands is in fact higher than the current state (Ministry of Agriculture of the Czech Republic 2016).

Forest owners and managers who want to acquire maximum profits from their forests need to understand not only the essence of growth and regeneration of forest stands, but also they must have the information about the quality of their wood (JOZSA,

Supported by the Czech University of Life Sciences Prague, Project No. A28/17, and by the Ministry of Agriculture of the Czech Republic, Project No. QJ1520037.

MIDDLETON 1994). The quality of wood is a subjective concept to a certain extent, and it must always be understood in the relevant context (MACDONALD et al. 2010). We usually understand it from the perspective of properties that are beneficial for the final use of wood.

Wood is a heterogeneous material and exhibits high variability of properties. The variability of pine properties can be observed between individual localities and trees, and even within a single tree (TOMCZAK et al. 2007; KASK 2015). Through the tree genotype, wood properties are largely influenced by altitude, climatic factors, by the surrounding environment and by silvicultural measures (TSOUMIS 1991; PELTOLA et al. 2007; JELONEK et al. 2008, 2012; TOMCZAK et al. 2013; ROSZYK et al. 2016). The variability of wood properties within a trunk is crucial for the final processing of wood.

The main indicator of wood quality is density, which largely affects other physical, and of course strength characteristics of wood (KOLLMANN 1951; AUTY et al. 2014). It generally applies that the strength of wood increases with increasing density (KIMBERLEY et al. 2015). Wood density decreases with the increasing height of the tree, and it increases in the horizontal direction from the pith to the periphery of the trunk (POŽGAJ et al. 1997). One of the causes of variability of wood properties in the horizontal direction is juvenile wood. Juvenile wood is generally defined as the wood zone in the middle of the trunk which takes up approximately 5 to 20 tree rings. In this zone, rapid and progressive changes occur in the structure of the wood, and it therefore has different properties compared to mature wood (KRETSCHMANN et al. 1993). Another determining criterion that influences properties in the horizontal direction is the width of the tree ring. In pine wood, it is assumed that with increasing ring width, the proportion of late wood decreases, and consequently its density also decreases (KASK 2015).

The aim of this study was to assess the impact of silvicultural measures and site conditions on the wood density value of Scots pine from the Doksy

region in the Czech Republic. The variability of density in the horizontal and vertical position of the trunk was also analysed. The influence of the tree ring width on wood density was also evaluated.

METHODS

The research was conducted in the Doksy study locality, of which the natural occurrence of Scots pine in the Czech Republic is typical. Extraction took place in three forest stands that are characteristic of the Doksy region and represent different silvicultural practices or site conditions (Table 1). Forest stands are owned by the Municipal Forests of the town of Doksy and are located in the Natural Forest Region PLO 18 (Severočeská pískovcová plošina and Český ráj), where average precipitation is 550 mm, the average temperature is between 7 and 8°C, according to the data from the nearest meteorological station, and the altitude reaches up to 450 m a.s.l. Seven sample trees were selected from each stand, from which test material was made. An important criterion for the selection of sample trees was the representation of characteristic individuals of the relevant stand, their vitality and absence of growth irregularities and defects. Stand 1 is characterized by the advanced understorey of pine that grows in the shade of parent trees. Sampled trees represent these individuals growing under the canopy of parent stand tended by regeneration fellings. Stands 2 and 3 were established on a clear-cut area, i.e. sampled trees have grown without the shelter of parent trees in a single-layered even-aged stand since the very beginning.

A total of 21 sample trees were felled in winter to assess wood density from the Doksy locality. To assess the vertical variability of wood density, two logs were cut out from individual sample trees in the direction from the base to the crown. A basal log was always cut out from the breast-height diameter area (in the middle of the section), and the central log was cut out at 1/3 of the height of the trunk only if the trunk had a diameter greater than 15 cm. The length of each section was 150 cm. In stand 1 the trunk did not have the required dimensions, and therefore the central log was not cut. A disc was cut out from each log so that a tree ring analysis could be carried out. In order to assess the variability in the horizontal plane of the trunk, a central plank was cut out from each log whose width allowed for test materials to be produced. The timber prepared in this way was interleaved and stored in a covered space with free air flow. When the wood moisture content dropped below 15%, the individual planks

Table 1. Average values of sample trees from selected stands

Doksy region	Forest site type*	Silvicultural practice	DBH (mm)	Tree height (m)
Stand 1	0K	shelterwood	169	13.0
Stand 2	0K	clear-cutting	187	18.1
Stand 3	2K	clear-cutting	204	21.6

*group of forest site types according to the Czech typological system (VIEWEGH et al. 2003)

were cut lengthwise in the direction from the pith toward the cambium making laths of 20 × 20 mm in cross-section (Fig. 1). The material prepared in this way served as a basis for the preparation of test specimens. After final modifications, the test specimens had dimensions of 20 × 20 × 30 mm for physical tests. The examined physical property was the basic variable, i.e. density at 12% moisture content. The test specimens were stabilized in a conditioning chamber at 12% equilibrium moisture content in the environment with an air temperature of 20 ± 2°C and relative humidity of 65 ± 5%. A total of 1,636 specimens were tested for density. The quality of all the samples complied with the standard ČSN 49 0101 and they were free of irregular growth defects and compression wood.

The standard ČSN 49 0108 was used to evaluate density. Density was evaluated at 12% moisture content (ρ_{12}) according to Eq. 1:

$$\rho_{12} = \frac{m_{12}}{V_{12}} \text{ (g}\cdot\text{cm}^{-3}\text{)} \quad (1)$$

where:

m_{12} – mass of the specimens at 12% moisture content (g),
 V_{12} – volume of the specimens at 12% moisture content (cm³).

We used an A3 Epson GT-15000 scanner (Epson, Japan) and resolution of 800 dpi to scan the disk for tree ring width analysis. The NIS-Elements AR Image Analysis Software (Version 4.11, 2014) was employed to measure the width of tree rings.

To assess the statistical significance of individual impacts, the multifactor ANOVA tests (Fisher *F*-test) and Duncan's multiple comparison tests were used. The level of significance $\alpha = 0.05\%$ was used for all statistical analyses. The evaluated factors were vertical position (along the height of the trunk), horizontal position (distance from the pith), and silvicultural measures and site conditions. Statistical analyses were carried out using the STATISTICA program (Version 13, 2016).

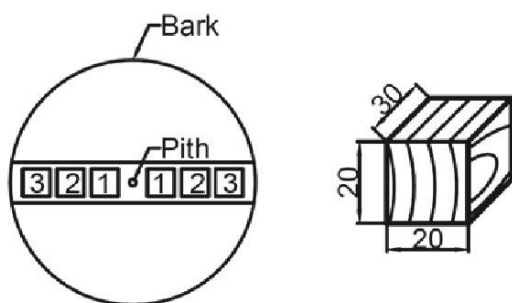


Fig. 1. Tree sampling and the test sample description (dimensions in mm)

Table 2. Descriptive statistics – comparison of density in individual stands

	Stand 1	Stand 2	Stand 3
Mean (g·cm ⁻³)	0.541	0.529	0.488
Median (g·cm ⁻³)	0.534	0.528	0.477
Coefficient of variation (%)	7.9	10.9	17.1
Standard deviation (g·cm ⁻³)	0.0428	0.0581	0.0836
Number of specimens	342	556	738

RESULTS AND DISCUSSION

A difference in density on different sites (forest type groups 0K and 2K) was observed between stands 2 and 3, which were regenerated on a clear-cut area. The descriptive statistics of individual stands are shown in Table 2. Table 2 shows that the average value of pine wood density at 12% moisture content reaches 0.529 g·cm⁻³ for stand 2, and 0.488 g·cm⁻³ for stand 3. An analysis of variance of the examined stands revealed that the wood density of Scots pine differs significantly, $P < 0.05$ (Fig. 2). Stand 2 shows higher density values than those indicated by many authors (LEXA et al. 1952; POŽGAJ et al. 1997; WAGENFÜHR 2002; FELLNER 2007). Conversely, the wood density of stand 3 is comparable with literature (NOVÁK 1970; ŠIMŮNKOVÁ, KUČEROVÁ 2000), but the variability of density is high. JELONEK et al. (2005), TOMCZAK and JELONEK (2013), and HAUTAMÄKI et al. (2014) reported dif-

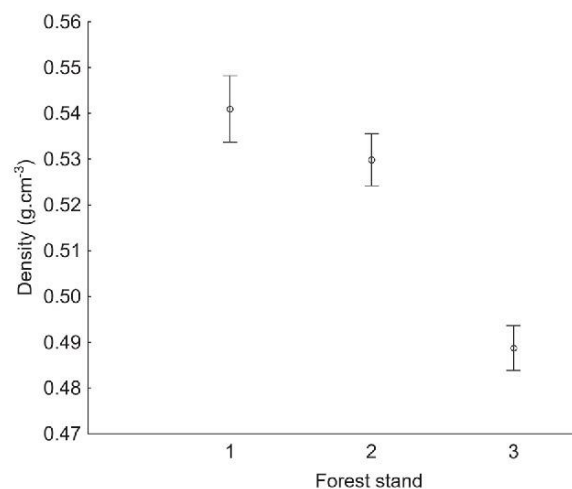


Fig. 2. Impact of site and silvicultural practice on wood density

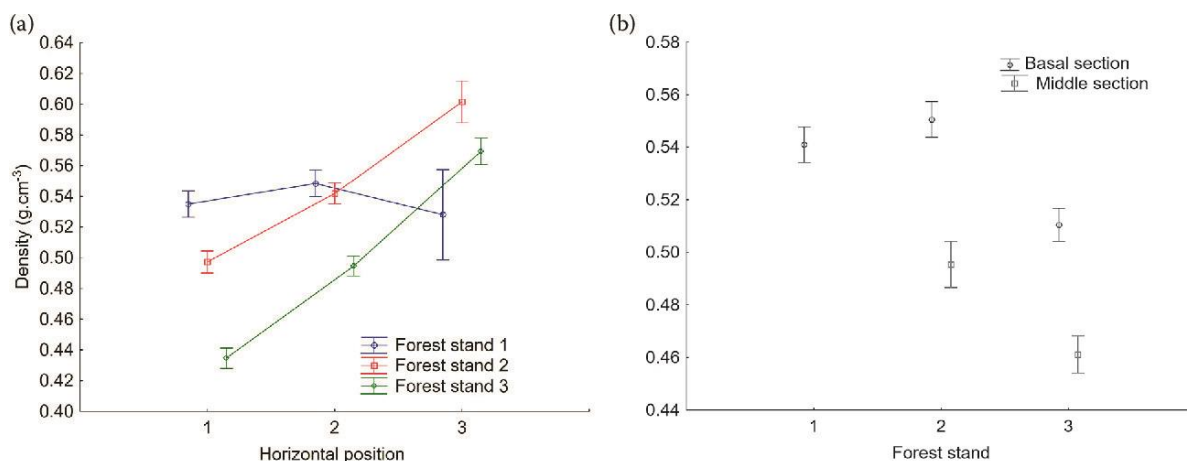


Fig. 3. Impact of the horizontal (a), vertical (b) position on the wood density of individual stands

ferent results of pine density in various sites. This phenomenon was confirmed by TSOUMIS (1991), who stated that site conditions may significantly affect density.

The monitored differences in density depending on silvicultural measures were observed between stand 1 and stand 2. These stands are found in the same site conditions (forest type group OK), and it is therefore possible to monitor differences in properties caused by different regeneration methods used. A statistically significant difference ($P < 0.05$) in density values was confirmed between the investigated stands. Higher average density values of $0.541 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ were obtained in stand 1, which is regenerated using the shelterwood method, and conversely, lower values of $0.529 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ were shown in stand 3, which was regenerated using the clear-cutting method. Low values of wood density for planted pines were also reported for example by ERIKSSON et al. (2006) and MEDERSKI et al. (2015).

The density variability in the horizontal direction is shown in Fig. 3a and Table 3 with the average density values in individual sections. The density variability in the horizontal direction for stands 2 and 3 demonstrated a clear trend of increasing the value in the direction from the pith to the bark, similarly to what was stated by NICHOLLS and BROWN (1973), FRITTS et al. (1991), and IVKOVIĆ et al. (2013). A statistically significant difference

($P < 0.05$) was demonstrated between these stands in individual positions. Sample trees from stand 1 grew in the shade. For this reason they show low annual increments at the early stages of growth. After the regeneration felling in 2008, there was a sudden significant increase in the thickness of the tree ring of the understorey individuals. This trend was described by ERIKSSON et al. (2006).

In order to assess the variability of wood properties, it is necessary to take into consideration in which part of the trunk the wood is located. It is evident from Fig. 3b and Table 3 that wood density in the basal part of the tree shows higher density values than those in the middle part. A statistically significant difference ($P < 0.05$) was found between individual sections. No significant difference in density ($P = 0.066$) was found between stands 1 and 2 at the base part. Stand 3 indicates a lower density value in all sections than the other stands. Higher density values in the basal part of the trunk were described for example by TSOUMIS (1991), POŽGAJ et al. (1997), REPOLA (2006), and RIESCO MUÑOZ et al. (2008).

The tree ring analysis is shown in Fig. 4. It is evident from the image that stands 2 and 3 have the widest tree rings in the part closest to the pith. With increasing distance from the pith, the width of the tree rings shows a decreasing tendency until it essentially stabilizes (TOMCZAK et al. 2007).

Table 3. Mean density variability within a trunk

	Density variability ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)				
	vertical		horizontal		
	basal section	middle section	1 st position	2 nd position	3 rd position
Stand 1	0.541	–	0.535	0.548	0.528
Stand 2	0.551	0.495	0.497	0.542	0.602
Stand 3	0.511	0.458	0.435	0.495	0.569

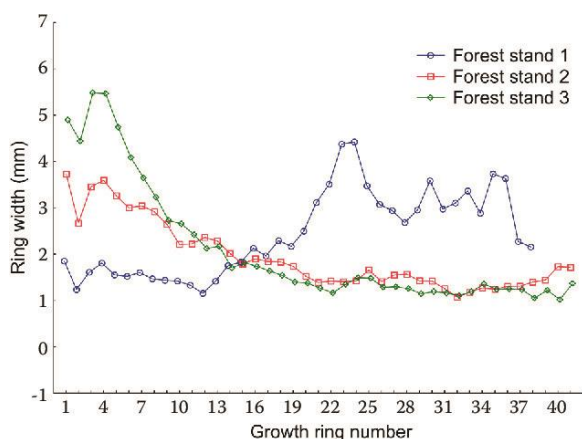


Fig. 4. Tree ring analysis of the basal section

Stand 1 indicates a completely opposite trend. This trend largely copies the horizontal course of density, wherein the density decreases with the increasing width of the tree rings, similarly to what was stated by MÖRLING (2002) or IVKOVIĆ et al. (2013), as mentioned earlier.

Table 4 shows a comparison of our results with those of the authors who investigated the density of Scots pine wood in the region of Central Europe. In most cases, the investigated pine wood density from the Doksy region shows higher density values when compared to these authors.

CONCLUSIONS

The aim of this study was to primarily evaluate the impact of silvicultural measures and site conditions on the wood density of Scots pine from the Doksy region in the Czech Republic. In most cases, the investigated pine wood density from the Doksy region reaches higher density values when compared to the results of other authors (LEXA et al. 1952; NOVÁK 1970; WAGENFÜHR 2002), who investigated the density of Scots pine in neighbouring territories. Given the fact that wood density significantly affects the mechanical properties of wood, it can be presumed that pine, which grows on natural pine sites in the study locality, achieves high wood qualities for final use. Forest site was proven to be a significant factor that affected wood density. Silvicultural practice was also proven to have an impact on wood density; the shelterwood method with long regeneration period

indicates a more even distribution of density along the radius of the trunk. With regard to the final processing of wood, it is necessary to take into consideration which part of the tree the wood comes from – wood with greater density is found more in the basal part of the tree than in the middle part. Pine wood plays an important role in the wood processing industry in the Czech Republic, and it will be increasing in the Czech Republic the more it is planted.

References

- Auty D., Achim A., Macdonald E., Cameron A.D., Gardiner B.A. (2014): Models for predicting wood density variation in Scots pine. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 87: 449–458.
- Eriksson D., Lindber H., Bergsten U. (2006): Influence of silvicultural regime on wood structure characteristics and mechanical properties of clear wood in *Pinus sylvestris*. *Silva Fennica*, 40: 743–762.
- Fellner J., Teischinger A., Zschokke W. (2007): Spektrum dřevin: vyobrazení, popis a srovnávací údaje. Vienna, proHolz Austria: 111.
- Fritts H.C., Vaganov E.A., Sviderskaya I.V., Shashkin A.V. (1991): Climatic variation and tree-ring structure in conifers: Empirical and mechanistic models of tree-ring width, number of cells, cell size, cell-wall, thickness and wood density. *Climate Research*, 1: 97–116.
- Hautamäki S., Kilpeläinen H., Verkasalo E. (2014): Factors and models for the bending properties of sawn timber from Finland and north-western Russia. Part II: Scots pine. *Baltic Forestry*, 20: 142–156.
- Ivković M., Gapare W., Wu H., Espinoza S., Rozenberg P. (2013): Influence of cambial age and climate on ring width and wood density in *Pinus radiata* families. *Annals of Forest Science*, 70: 525–534.
- Jelonek T., Pazdrowski W., Tomczak A., Grzywiński W. (2012): Biomechanical stability of pines growing on former farmland in northern Poland. *Wood Research*, 57: 31–44.
- Jelonek T., Pazdrowski W., Tomczak A., Szaban J. (2008): The effect of social position of a tree in the stand and site on wood quality of scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities*, 11: 10.
- Jelonek T., Tomczak A., Jakubowski M., Pazdrowski W. (2005): Properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) timber growing on former arable and forest land. *Acta Scientiarum Polonorum Silvarum Colendarum Ratio et Industria Lignaria*, 4: 35–47.

Table 4. Comparison of the wood density of Scots pine with various authors

	Measured values	WAGENFÜHR (2002)	NOVÁK (1970)	LEXA et al. (1952)
Density (g·cm ⁻³)	0.488–0.541	0.510	0.470	0.510

- Jozsa L.A., Middleton G.R. (1994): A Discussion of Wood Quality Attributes and Their Practical Implications. Vancouver, Forintek Canada Corporation: 42.
- Kask R. (2015): The influence of growth conditions on physico-mechanical properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood in Estonia. [Ph.D. Thesis.] Tartu, Institute of Forestry and Rural Engineering: 164.
- Kimberley M.O., Cown D.J., McKinley R.B., Moore J.R., Dowling L.J. (2015): Modelling variation in wood density within and among trees in stands of New Zealand-grown radiata pine. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 45: 22.
- Kollmann F. (1951): Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag: 1050.
- Kretschmann D.E., Moody R.C., Pellerin R.F., Bendtsen B.A., Cahill J.M., McAlister R.H., Sharp D.W. (1993): Effect of Various Proportions of Juvenile Wood on Laminated Veneer Lumber. Madison, USDA Forest Service, Forest Products Laboratory: 31.
- Lexa J., Nečesaný V., Paclt J., Tesařová M., Štofko J. (1952): Technológia dreva I. Mechanické a fyzikálne vlastnosti dreva. Bratislava, Práca: 436.
- MacDonald E., Moore J., Connolly T., Gardiner B. (2010): Assessing timber quality of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). In: Ridley-Ellis D.J., Moore J.R. (eds): *The Future of Quality Control for Wood and Wood Products*, Edinburgh, May 4–7, 2010: 180–190.
- Mederski P.S., Bembenek M., Karaszewski Z., Giefing D.F., Sulima-Olejniczak E., Rosińska M., Łacka A. (2015): Density and mechanical properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood from a seedling seed orchard. *Drewno*, 58: 117–124.
- Ministry of Agriculture of the Czech Republic (2016): Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2015. Available at <http://www.uhul.cz/ke-stazeni/informace-o-lese/zelene-zpravy-mze> (accessed Dec 17, 2016).
- Mörling T. (2002): Evaluation of annual ring width and ring density development following fertilisation and thinning of Scots pine. *Annals of Forest Science*, 59: 29–40.
- Nicholls J.W.P., Brown A.G. (1973): The relationship between ring width and wood characteristics in double-stemmed trees of radiata pine. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 4: 105–111.
- Novák V. (1970): Dřevařská technická příručka. Prague, Státní nakladatelství technické literatury: 748.
- Peltola H., Kilpeläinen A., Sauvala K., Räsänen T., Ikonen V. (2007): Effects of early thinning regime and tree status on the radial growth and wood density of Scots pine. *Silva Fennica*, 41: 489–505.
- Požgaj A., Chovanec D., Kurjatko S., Babiak M. (1997): Štruktúra a vlastnosti dreva. Bratislava, Príroda: 485.
- Repola J. (2006): Models for vertical wood density of Scots pine, Norway spruce and birch stems, and their application to determine average wood density. *Silva Fennica*, 40: 673–685.
- Riesco Muñoz G.R., Soilán Cañas M.A., Rodríguez Soalleiro R. (2008): Physical properties of wood in thinned Scots pines (*Pinus sylvestris* L.) from plantations in northern Spain. *Annals of Forest Science*, 65: 507–507.
- Roszyk E., Moliński W., Kusiak W., Prądyński W., Zborowska M. (2016): Physical properties of Scots pine wood from the Notecka Forest. *Sylvan*, 160: 547–555.
- Šimůnková E., Kučerová I. (2000): Dřevo. Prague, Stop: 134.
- Tomczak A., Jelonek T. (2013): Radial variation in the wood properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) grown on former agricultural soil. *Leśne Prace Badawcze (Forest Research Papers)*, 74: 171–177.
- Tomczak A., Jelonek T., Jakubowski M. (2013): Density of scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood as an indicator of tree resistance to strong winds. *Sylvan*, 157: 539–545.
- Tomczak A., Pazdrowski W., Jelonek T., Stypuła I. (2007): Vertical variability of selected macrostructural properties of juvenile wood organization in trunks of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) trees. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 76: 27–33.
- Tsoumis G. (1991): Science and Technology of Wood: Structure, Properties, Utilization. New York, Chapman and Hall: 494.
- Viewegh J., Kusbach A., Mikeska M. (2003): Czech forest ecosystem classification. *Journal of Forest Science*, 49: 74–82.
- Wagenführ R. (2002): Dřevo – obrázkový lexikon. Prague, Grada Publishing, a.s.: 348.

Received for publication April 24, 2017

Accepted after corrections September 1, 2017

Příloha 2: Shrinkage of Scots pine wood as an effect of different tree growth rates, a comparison of regeneration methods

Shrinkage of Scots pine wood as an effect of different tree growth rates, a comparison of regeneration methods

ONDŘEJ SCHÖNFELDER¹, ALEŠ ZEIDLER^{1*}, VLASTIMIL BORŮVKA¹, LUKÁŠ BÍLEK²,
MARTIN LEXA¹

¹*Department of Wood Processing, Faculty of Forestry and Wood Sciences,
Czech University of Life Sciences Prague, Prague, Czech Republic*

²*Department of Silviculture, Faculty of Forestry and Wood Sciences,
Czech University of Life Sciences Prague, Prague, Czech Republic*

*Corresponding author: zeidler@fld.czu.cz

Abstract

Schönfelder O., Zeidler A., Borůvka V., Bílek L., Lexa M. (2018): Shrinkage of Scots pine wood as an effect of different tree growth rates, a comparison of regeneration methods. *J. For. Sci.*, 64: 271–278.

The Scots pine (*Pinus sylvestris* Linnaeus) is one of the most important commercial tree species in Central Europe, yet we know very little about the variability of its wood properties. The aim of this study is to primarily analyse the impact of different tree growth rates and site characteristics on the shrinkage of Scots pine wood. The investigated forest stands are located at two sites of the Czech Republic that are characteristic for Scots pine silviculture. At each site, sample trees were selected from two stands representing two variants of the silvicultural treatment, i.e. a clear-cutting and shelterwood system with long regeneration period. Wood shrinkage in radial and tangential directions and volumetric shrinkage were determined in accordance with Czech standards. Lower values of shrinkage were found out in forest stands regenerated by the shelterwood method. The wood in the central part of the trunk shows lower shrinkage values than in the basal part in both stands. The unambiguous effect of the horizontal position in the trunk stem was demonstrated in forest stands regenerated by the clear-cutting method, whilst stands regenerated by the shelterwood method showed a more even distribution of shrinkage along the trunk width. Furthermore, it was found that the shrinkage of the Scots pine has a medium dependence on wood density.

Keywords: *Pinus sylvestris* L.; wood physical properties; dimensional changes; management system; stand structure

The Scots pine (*Pinus sylvestris* Linnaeus) is the second most important coniferous tree species in the Czech Republic. The annual production volume of this species is about 1.4 million m³, and its wood has a wide range of uses with application primarily in the construction industry for carpentry. The high resin content is limiting for cabinetmaking work. Scots pine wood is also used for the production of plywood, sleepers, poles and hop pillars, mining struts, packaging, wood pulp, fibre, and in

the paper industry (FELLNER et al. 2007; Czech Statistical Office 2017). Despite the high utilization of pine in the Czech Republic, awareness of the quality of its wood and the factors that affect it is relatively small.

In assessing the wood quality, in addition to density, shrinkage is primarily one of the basic physical properties. These dimensional changes, associated with wood moisture fluctuations constitute important information for the wood-processing industry;

Supported by the Czech University of Life Sciences Prague, Project No. A03/18, and by the Ministry of Agriculture of the Czech Republic, Project No. QJ1520037.

they fundamentally affect the processing and use of individual types of wood, and even the properties of wood products (ZEIDLER 2013). The range of shrinkage differs for the three basic directions, namely the longitudinal, radial and tangential directions. Wood without growth defects shrinks most in the tangential direction and least in the longitudinal direction (TSOUMIS 1991; POŽGAJ et al. 1997; PANG 2002). Extensive studies have shown that there are several primary factors that affect wood shrinkage. These include, in particular, wood density, wood position in the stem along the width and height, content of the extractives, the difference between heartwood and sapwood, tree-ring width, and thereby also the related proportion of late wood and the difference between juvenile and mature wood (GRYC, HOLAN 2004; RAISKILA et al. 2006). External factors affecting the resulting physical properties include climatic changes, altitude, site conditions and silvicultural treatments (MACDONALD, HUBERT 2002; LIZINIEWICZ 2014). An important factor, already mentioned above, is the site. ZOBEL and VAN BUIJTENEN (1989) identified the habitat as one of the factors that relates to wood properties that is most difficult to identify because it is a criterion of soil and climate quality, collectively referred to as the quality (value) of site (WORRELL, MALCOLM 1990). In addition to direct growth effects, the soil moisture regime is one of the factors of tree stability that is influenced by the used silvicultural method (MACDONALD, HUBERT 2002). In the Czech Republic, pine stands are most often regenerated artificially. Many studies attribute the tree spacing as having the greatest impact on the resulting wood quality. The faster growth of pine trees with greater spacing results in higher production of wood mass in a stand, but also in larger tree-ring width and higher amount of knots (HAAPANEN, PÖYKKÖ 1993). The effect of fast tree growth, reflected in tree-ring width and higher share of early wood composed of thin-walled cells,

adversely affects the wood density and consequently the resulting wood properties. In the Scots pine, large spacing as a result of artificial regeneration leads to lower wood quality compared to naturally regenerated stands (HAAPANEN, PÖYKKÖ 1993). Even less information about wood quality is available for highly structured stands managed according to the principles of close-to-nature silviculture (VACEK et al. 2016).

Silviculture and wood quality are understood as separate stand-alone issues in the Czech Republic. Abroad, however, the situation is quite different. The issue of assessing the influence of silvicultural treatment and site on wood properties is still a current topic in Europe, even in countries with advanced forestry such as Germany, Poland or Finland (BECK 2000; PELTOLA et al. 2007; JELONEK et al. 2008). The aim of this work is to determine the shrinkage of Scots pine wood from forest stands with different silvicultural treatments from the locations characterised by pine silviculture in the Czech Republic, to evaluate the variability of shrinkage depending on the horizontal and vertical position in the stem, and to assess the extent to which it is influenced by wood density.

METHODS

The research was carried out at the Doksy and Chvojno sample sites, both of which are characterized by an important representation of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in cultural stands. The harvest took place in stands that are typical of these sites with regard to site conditions, and they represent different silvicultural practices (Table 1). The forest stands in the Doksy site are owned by the Doksy Municipal Forests and are located in Natural Forest Area PLO 18 – Severočeská pískovcová plošina and Český ráj (North Bohemian Sandstone Plateau and Bohemian Paradise), where the average rainfall is

Table 1. Average sample values from the selected forest stands

Region		Forest stand 1	Forest stand 2
Doksy	forest site type	OK	OK
	silvicultural treatment	shelterwood	clear-cutting
	DBH (mm)	169	187
	tree height (m)	13.0	18.1
Chvojno	forest site type	2I	2I
	silvicultural treatment	shelterwood	clear-cutting
	DBH (mm)	205	224
	tree height (m)	15.2	21.7

OK – (*Querceto-Fagi-*) *Pinetum acidophilum*, 2I – *Fageto-Quercetum illimerosum acidophilum* (PLÍVA 1971)

550 mm, the average temperature is between 7 and 8°C and the altitude is 450 m a.s.l. The forest stands from the Chvojno site are owned by Lesy České republiky, s. p. (Forests of the Czech Republic) and are located in Natural Forest Area PLO 17 – Polabí (Labe River basin), where the average annual precipitation is 680 mm, the average temperature is around 8°C and the altitude is 362 m a.s.l.

Forest stand 1 is characterized by a two-aged two-storeyed structure. Sample trees represent individuals growing under the canopy of parent trees. Forest stand 2 was established after a clear-cut, thus sample trees are represented by individuals growing in an even-aged single-storeyed stand without the suppression of parent trees. Seven sample trees were selected from each stand from which the test material was made. An important criterion for sample selection was the representation of characteristic individuals for the relevant stand, their vitality and the absence of growth irregularities and defects.

A total of 28 sample trees were selected, which were felled during the winter period to minimise injuries on forest stands, in order to assess the wood shrinkage from both sites. To evaluate the vertical variability of the assessed properties, two sections were taken from each tree in the direction from the base to the crown. The section length was 1.5 m, and the diameter of the section was not smaller than 150 mm. The basal section was taken from the area of the DBH, and the central section was taken at 1/3 of the tree height (Fig. 1). The trees raised under the shelter on the Doksy site did not reach the required dimensions in the 1/3 trunk length and were not therefore taken from the crown region. A disk for tree-ring analysis was taken from each section. From the individual sections, central planks of approximately 4 cm in thickness were cut out using a band saw. The lumber thus prepared was placed in a sheltered space with free access to the air. The purpose of this operation was to reduce wood moisture to a value that allows for the production of test specimens. The central planks were further longitudinally cut into 20 × 20 mm prisms

with marking of the direction from the pith to the cambium. The prepared material served as the basis for the preparation of 20 × 20 × 30 mm test specimens. This production process enabled monitoring of the variability of wood properties across the radii of the trunk, i.e. in the horizontal direction (Fig. 1).

The examined physical properties included oven-dry density, i.e. the density in an absolute dry state, as well as shrinkage in tangential direction, radial direction and volumetric shrinkage. In total, 2,216 specimens were tested for density at 0% moisture content (MC), and simultaneously for shrinkage. The quality of all the samples complied with the standard ČSN 49 0101 and did not contain any irregularities or growth defects and compression wood.

The standard ČSN 49 0108 was used to assess the density. The density at 0% MC (ρ_0) was evaluated according to Eq. 1:

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0} \text{ (g·cm}^{-3}\text{)} \quad (1)$$

where:

m_0 – mass of the specimen at 0% MC (g),

V_0 – volume of the specimen at 0% MC (cm³).

Wood shrinkage in individual directions (β_i) was ascertained in accordance with the standard ČSN 49 0128 and Eq. 2 was used:

$$\beta_i = \frac{a_{i w_1} - a_{i w_2}}{a_{i w_1}} \times 100 \text{ (}\% \text{)} \quad (2)$$

where:

a – dimension of the specimen in a certain direction (mm),

i – index indicating a certain direction,

w_1 – initial MC of the specimens (%),

w_2 – final MC of the specimens (%).

Instead of dimensional changes at a given MC, volume changes in the specimens were analogously used for volumetric shrinkage. Drying at 103 ± 2°C resulted in the absolute dry state of the examined specimens. The test specimens were soaked in distilled water to achieve the fibre saturation point.

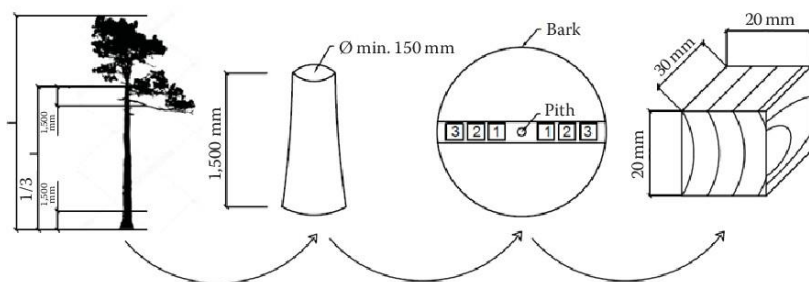


Fig. 1. Tree sampling and preparation of the test specimens

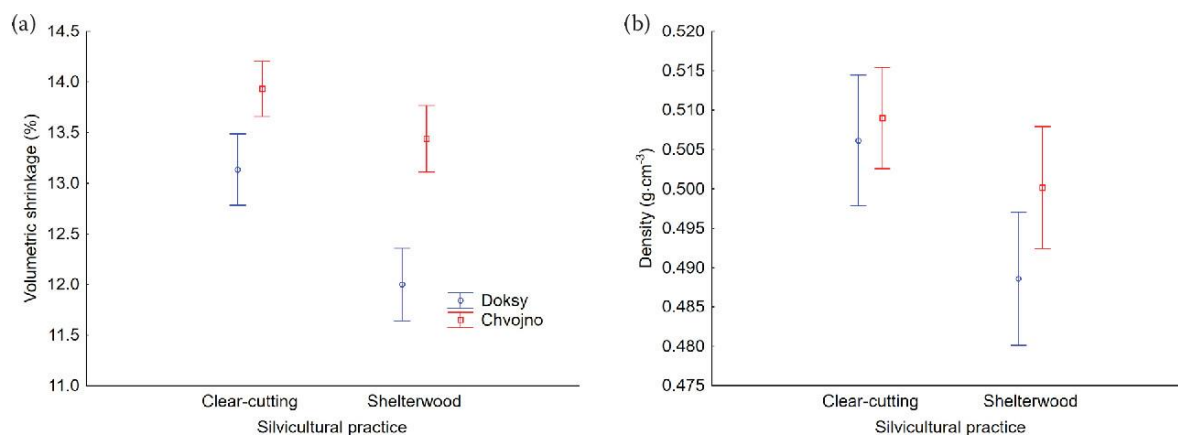


Fig. 2. Comparison of volumetric shrinkage (a) and density (b) at the Doksy and Chvojno sites

Multifactor ANOVA tests (Fisher's *F*-test) and Duncan's multiple range tests were used to evaluate the statistical significance of individual effects. The significance level $\alpha = 0.05\%$ was used for all statistical analyses. The evaluated factors were the vertical position (along the trunk height), horizontal position (position from the pith to the bark), silvicultural treatment and site. A linear regression model was used to assess the effect of density on shrinkage. Statistical analyses were carried out using the STATISTICA program (Version 12, 2013).

RESULTS AND DISCUSSION

The Doksy site shows a statistically significant difference between the examined wood characteristics due to the silvicultural measures; for the Chvojno site the significant influence of the measures on the properties of pine wood was not proved. Fig. 2 illustrates the effect of the management method on density and wood volumetric shrinkage, whose trend corresponds to radial and tangential shrinkage. At the Doksy site, in the stand regenerated by the shelterwood method, the density reached a value of $0.489 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, shrinkage in tangential direction 7.2%, in radial direction 4.9% and volumetric shrinkage 12%. On the contrary, the wood of the forest stand regenerated by the clear-cutting meth-

od showed different shrinkage and density values, i.e. shrinkage in tangential direction 8.0%, in radial direction 5.1% and volumetric shrinkage 13.1%. The wood density in this stand reached $0.506 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. At the Chvojno site, the wood of the stand regenerated by the shelterwood method had a shrinkage value of 7.8% in tangential direction, in radial direction 5.3%, volumetric shrinkage 13.4% and the density of $0.500 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. The wood from the stand regenerated by the clear-cutting method showed shrinkage 8.0% in tangential direction, in radial direction 5.7 and 13.9% volumetric shrinkage. The wood density reached a value of $0.508 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

Table 2 shows the comparison of the observed values with literature. It can be seen from the table that the shrinkage in radial direction, reported by AWOYEMI (2003), was surprisingly high – only 20% lower than the tangential shrinkage, while TSOUNIS (1991), POŽGAJ et al. (1997), DINWOODIE (2000), and WAGENFÜHR (2002) found out lower shrinkage values in radial direction. In tangential direction, TSOUNIS (1991), POŽGAJ et al. (1997), DINWOODIE (2000), and WAGENFÜHR (2002) specified higher shrinkage values. Lower values of volumetric shrinkage and shrinkage in tangential direction than those reported by TSOUNIS (1991) were found in the stand regenerated by the shelterwood method at the Doksy site, while the remaining two stands managed by the clear-cutting

Table 2. Comparison of results obtained by foreign authors

	AWOYEMI (2003)	DINWOODIE (2000)	POŽGAJ et al. (1997)	WAGENFÜHR (2002)	TSOUNIS (1991)	FARSI et al. (2013)	
Density ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	–	0.513	0.407	0.490	0.490	0.457	
Shrinkage (%)	volumetric	–	–	11.2–12.4	12.5	10.7	
	radial	6.01	3	4.1	3.3–4.5	4	–
	tangential	7.53	4.5	8.3	7.5–8.7	7.7	–

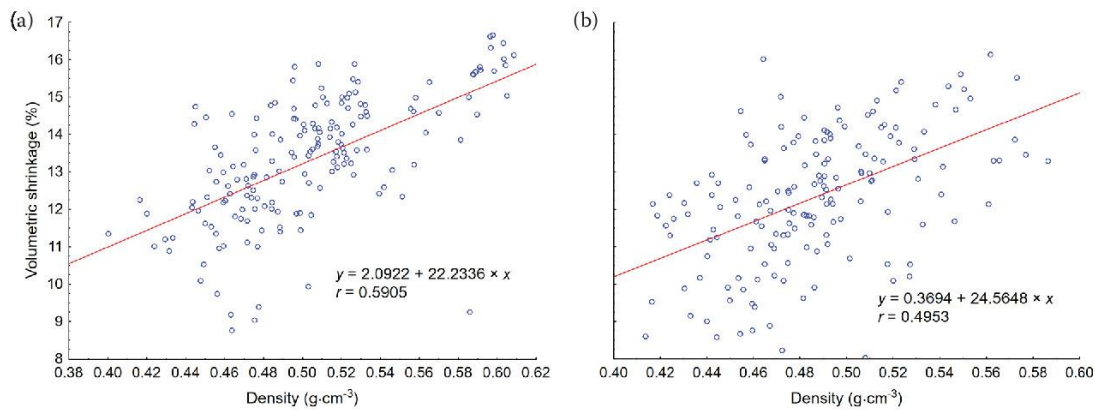


Fig. 3. Correlation between density and shrinkage in relation to silvicultural treatment (Doksy site): clear-cutting (a), shelterwood (b) system

method showed higher shrinkage values. Lower values of tangential shrinkage than those specified by WAGENFÜHR (2002) were determined for such regenerated stands. The remaining two stands managed by the clear-cutting method fall within the tangential shrinkage interval. The stand regenerated by the shelterwood method at the Doksy site reached the same values of volumetric shrinkage as TSOUMIS (1991) and WAGENFÜHR (2002) reported. However, FARSI et al. (2013) found out lower volumetric shrinkage than that ascertained in all the investigated stands. TSOUMIS (1991) and WAGENFÜHR (2002) reported a medium density value of $0.490 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ at 0% moisture content, and the same values were reached for the stands regenerated by the shelterwood method at the Doksy site. The remaining stands showed higher values. A lower density value was found out by POŽGAJ et al. (1997) and FARSI et al. (2013). But higher wood density values than those ascertained in the investigated stands were observed by DINWOODIE (2000).

From the results obtained, it can be stated that higher values of shrinkage and density were found out in the stands regenerated by the clear-cutting method. The higher shrinkage values in each direction for these stands can be explained by the higher wood density. The positive relationship between density and shrinkage is shown in Fig. 3. The influence of density on wood shrinkage was found by SHMULSKY and JONES (2011) and FARSI et al. (2013). The dependence of density on shrinkage was shown to be medium in all the stands (Fig. 3), whilst a low and medium dependence was also found by KOUBAA et al. (1998). The influence of the site on wood shrinkage and density was ascertained at the Doksy and Chvojno sites. The two sites in Doksy and Chvojno show different values of density and shrinkage. The Chvojno site reached higher shrink-

age and density values than the values found at the Doksy site. Different shrinkage and density values at different sites were demonstrated by TOMCZAK and JELONEK (2013), HAUTAMÄKI et al. (2014) and WOOD et al. (2016).

Fig. 4 indicates the distribution of shrinkage and wood density in horizontal direction in the stem

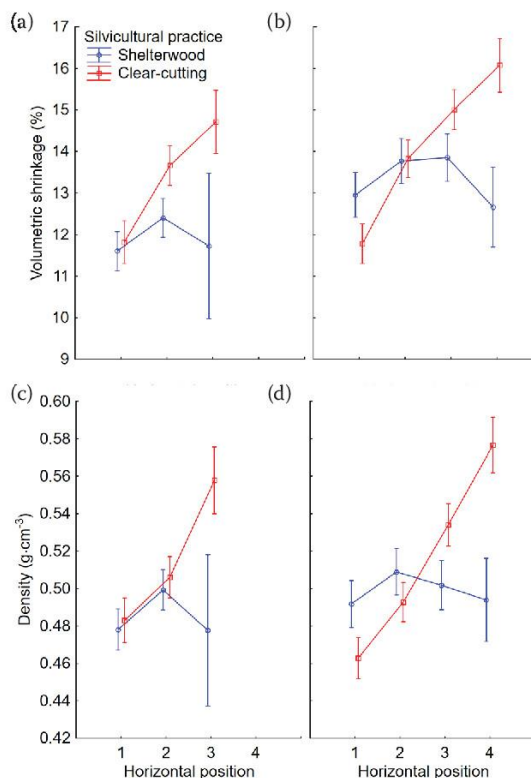


Fig. 4. Effect of the horizontal position on volumetric shrinkage – Doksy (a), Chvojno (b) and density – Doksy (c), Chvojno (d)

1 – position close to the pith, 4 – position close to the bark

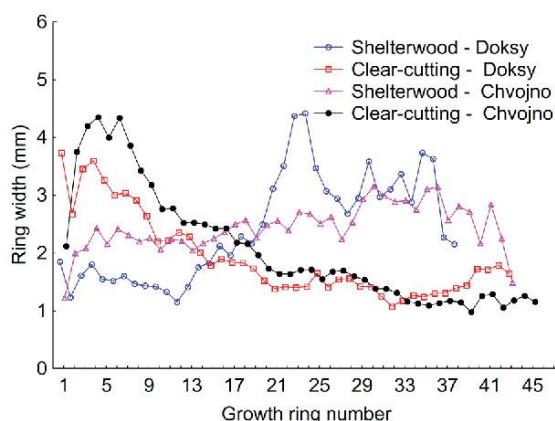


Fig. 5. Tree-ring analysis

according to the applied silvicultural treatment and site. In the shelterwood method, density and shrinkage are evenly distributed over the width of the trunk. A slight decrease in wood density in the shelterwood method is caused by an increase in the tree-ring width after shelterwood felling in the parent stand (Fig. 5). The impact of increasing tree-ring width on shrinkage and wood density was described by ŠKĀLE et al. (2002). The stands regenerated by the clear-cutting method indicate a growing tendency from the pith to the cambium, and there is a significant difference between the different sections compared to the shelterwood method. The trend of increasing density and shrinkage from the pith to the bark due to reduced light and growth conditions in the growing stand was described by many authors (KOLLMAN 1951; KRAHMER 1986; TSOUNIS 1991; KOUBAA et al. 1998; MÖTTÖNEN, LUOSTARINEN 2006; KORD et al. 2010; IVKOVIĆ et al. 2013).

In order to assess the variability of the wood properties, it is necessary to consider in which part of the trunk the wood is located. The influence of the sil-

vicultural treatment on wood shrinkage and density in the basal and central part of the trunk is shown in Table 3. It can be seen from the table that wood shrinkage in the basal part of the tree indicates higher shrinkage values for the stands regenerated by the clear-cutting method. With regard to the shelterwood method, at the Chvojno site, the influence of the vertical position in the stem on shrinkage was not found, and it could not be shown on the Doksy site due to small stem diameters and missing samples. The obtained results indicate a uniform distribution of wood shrinkage along the trunk height of this stand, but the wood density was affected by the vertical position in the stem. The clear-cutting restoration method shows a completely different trend. Higher density and shrinkage values were observed in the basal part of the trunk. Higher density and shrinkage values were also found in the basal part of the trunk by other authors (REPOLA 2006; MUÑOZ et al. 2008; FARSI et al. 2013).

Fig. 5 indicates the pattern of tree-ring widths from the investigated sites. It is clear that stands regenerated by the shelterwood method show a lower tree-ring width at the early stage of growth. After shelterwood felling, the tree-ring width increases from the pith to the bark and then the width decreases again. A similar trend was described by ERIKSSON et al. (2006). Stands regenerated by the clear-cutting regeneration method show the opposite trend. The tree-ring width gradually decreases from the pith to the cambium until it becomes almost constant. The same results were also obtained by NICHOLLS and BROWN (1974) and TOMCZAK et al. (2007). The tree-ring width trend explains the pattern of wood density of the investigated stands, wherein samples with a small tree-ring width have higher wood density. Wood density subsequently decreases with the gradual increase in the tree ring width.

Table 3. Influence of the vertical position on shrinkage (%) and density ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) in stands at the Doksy and Chvojno sites

		Basal section		Middle section	
		shelterwood	clear-cutting	shelterwood	clear-cutting
Doksy					
Shrinkage \pm SD	radial	4.9 \pm 1.39	5.1 \pm 1.02	–	5.0 \pm 0.64
	tangential	7.2 \pm 1.52	8 \pm 1.66	–	8.1 \pm 1.40
	volumetric	12 \pm 2.15	13.1 \pm 1.89	–	13.0 \pm 1.52
Density \pm SD		0.489 \pm 0.04	0.506 \pm 0.05	–	0.456 \pm 0.04
Chvojno					
Shrinkage \pm SD	radial	5.3 \pm 1.38	5.7 \pm 1.82	5.2 \pm 1.44	5.0 \pm 1.75
	tangential	7.8 \pm 1.56	8 \pm 1.96	7.5 \pm 1.69	7.0 \pm 1.79
	volumetric	13.4 \pm 2.23	13.9 \pm 2.88	13.0 \pm 2.12	12.5 \pm 2.85
Density \pm SD		0.500 \pm 0.05	0.508 \pm 0.07	0.434 \pm 0.05	0.436 \pm 0.05

SD – standard deviation

CONCLUSIONS

This paper evaluates selected properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood as a result of the silvicultural treatment at the Doksy and Chvojno sites in the Czech Republic. The Chvojno site has higher values of shrinkage and density compared to the Doksy site. The effect of silvicultural treatment was assessed in stands which were regenerated by the shelterwood and clear-cutting methods. The stands regenerated by the shelterwood method showed lower shrinkage and density values than the stands regenerated by the clear-cutting method. The clear-cutting method indicates a clear trend of shrinkage along the cross-section of the trunk, showing increasing shrinkage values from the pith to the cambium due to decreasing light and growth conditions, resulting probably in a higher latewood share. From the point of view of practice, the differences in both density and shrinkage values are negligible depending on the treatment. Much more significant is the fact that the shelterwood method indicates a uniform distribution of shrinkage and density along the radii of the trunk. The even distribution of wood shrinkage along the trunk height was also demonstrated for these stands. From a qualitative point of view, the position in the trunk the wood comes from is not therefore essential for the final wood processing in the case of shelterwood method.

References

- Awoyemi L. (2003): Reversibility of dimensional changes in birch (*Betula pubescens*) and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood. *Taiwan Journal of Forest Science*, 19: 97–101.
- Beck W. (2000): Silviculture and stand dynamics of Scots pine in Germany. *Forest Systems*, 9: 199–212.
- Czech Statistical Office (2017): Lesnictví – 2017. Tab. 1.8 Těžba dřeva dle krajů. Prague, Czech Statistical Office.
- Dinwoodie J.M. (2000): Structure of timber. In: *Timber: Its Nature and Behaviour*. 2nd Ed. New York, Taylor & Francis Group: 1–35.
- Eriksson D., Lindberg H., Bergsten U. (2006): Influence of silvicultural regime on wood structure characteristics and mechanical properties of clear wood in *Pinus sylvestris*. *Silva Fennica*, 40: 743–762.
- Farsi M., Kiaei M., Miar S., Kiasari S.M. (2013): Effect of seed source on physical properties of Scots pine (a case study in Neka, Iran). *Drvna Industrija*, 64: 183–191.
- Fellner J., Teischinger A., Zschokke W. (2007): Spektrum dřevin: vyobrazení, popis a srovnávací údaje. Wien, pro-Holz Austria: 111.
- Gryc V., Holan J. (2004): Influence of position within the tree stem according to growth-ring width of spruce (*Picea abies* /L./ Karst.) with compression wood. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 4: 59–72.
- Haapanen M., Pöykkö T. (1993): Genetic relationships between growth and quality traits in an 8-year-old half-sib progeny trial of *Pinus sylvestris*. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 8: 305–312.
- Hautamäki S., Kilpeläinen H., Verkasalo E. (2014): Factors and models for the bending properties of sawn timber from Finland and north-western Russia. Part II: Scots pine. *Baltic Forestry*, 20: 142–156.
- Ivković M., Gapare W., Wu H., Espinoza S., Rozenberg P. (2013): Influence of cambial age and climate on ring width and wood density in *Pinus radiata* families. *Annals of Forest Science*, 70: 525–534.
- Jelonek T., Pazdrowski W., Tomczak A., Szaban J. (2008): The effect of social position of a tree in the stand and site on wood quality of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities*, 11: 10.
- Kollmann F. (1951): *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag: 1050.
- Kord B., Kialashaki A., Kord B. (2010): The within-tree variation in wood density and shrinkage, and their relationship in *Populus euramericana*. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 34: 121–126.
- Koubaa A., Hernández R., Beaudoin M. (1998): Shrinkage of fast-growing hybrid poplar clones. *Forest Products Journal*, 48: 82–87.
- Krahmer R.L. (1986): Fundamental anatomy of juvenile and mature wood. In: Robertson D. (ed.): *Proceedings of the Technical Workshop: Juvenile Wood. What Does it Mean to Forest Management and Forest Products?*, Bellingham, Nov 7, 1985: 12–16.
- Liziniwicz M. (2014): Influence of spacing and thinning on wood properties in conifer plantations. [Ph.D. Thesis.] Alnarp, Swedish University of Agricultural Sciences: 62.
- Macdonald E., Hubert J. (2002): A review of the effects of silviculture on timber quality of Sitka spruce. *Forestry*, 75: 107–138.
- Möttönen V., Luostarinen K. (2006): Variation in density and shrinkage of birch (*Betula pendula* Roth) timber from plantations and naturally regenerated forests. *Forest Products Journal*, 56: 34–39.
- Muñoz G.R., Cañas M.A.S., Soalleiro R.R. (2008): Physical properties of wood in thinned Scots pines (*Pinus sylvestris* L.) from plantations in northern Spain. *Annals of Forest Science*, 65: 507.
- Nicholls J.W.P., Brown A.G. (1974): The relationship between ring width and wood characteristics in double-stemmed trees of radiata pine. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 4: 105–111.
- Pang S. (2002): Predicting anisotropic shrinkage of softwood Part 1: Theories. *Wood Science and Technology*, 36: 75–91.

- Peltola H., Kilpelainen A., Sauvala K., Raisanen T., Ikonen V. (2007): Effects of early thinning regime and tree status on the radial growth and wood density of Scots pine. *Silva Fennica*, 41: 489–505.
- Plíva K. (1971): Typologický systém ÚHÚL. Brandýs nad Labem, ÚHÚL: 119.
- Požgaj A., Chovanec D., Kurjatko S., Babiak M. (1997): Štruktúra a vlastnosti dreva. Bratislava, Príroda: 485.
- Raaskila S., Saranpää P., Fagerstedt K., Laakso T., Löijä M., Mahlberg R., Paajanen L., Ritschkoff A.C. (2006): Growth rate and wood properties of Norway spruce cutting clones on different sites. *Silva Fennica*, 40: 247–256.
- Repola J. (2006): Models for vertical wood density of Scots pine, Norway spruce and birch stems, and their application to determine average wood density. *Silva Fennica*, 40: 673–685.
- Shmulsky R., Jones D.P. (2011): *Forest Products and Wood Science: An Introduction*. 6th Ed. New York, Wiley-Blackwell: 477.
- Šķēle K., Alksne A., Cirule D., Hrols J. (2002): Anatomical structure and physical properties of pine (*Pinus sylvestris* L.) wood in Latvia. *Proceedings of the Latvia University of Agriculture*, 5: 68–74.
- Tomczak A., Jelonek T. (2013): Radial variation in the wood properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) grown on former agricultural soil. *Leśne Prace Badawcze (Forest Research Papers)*, 74: 171–177.
- Tomczak A., Pazdrowski W., Jelonek T., Stypula I. (2007): Vertical variability of selected macrostructural properties of juvenile wood organization in trunks of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) trees. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 76: 27–33.
- Tsoumis G.T. (1991): *Science and Technology of Wood: Structure, Properties, Utilization*. New York, Van Nostrand Reinhold: 494.
- Vacek S., Vacek Z., Břek L., Simon J., Remeš J., Hůnová I., Král J., Putalová T., Mikeska M. (2016): Structure, regeneration and growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands with respect to changing climate and environmental pollution. *Silva Fennica*, 50: 1564.
- Wagenführ R. (2002): *Dřevo – obrazový lexikon*. Prague, Grada Publishing, a.s.: 348.
- Wood L., Smith D., Hartley I. (2016): Predicting softwood quality attributes from climate data in interior British Columbia, Canada. *Forest Ecology and Management*, 361: 81–89.
- Worrell R., Malcolm D.C. (1990): Productivity of Sitka spruce in northern Britain. 1. The effects of elevation and climate. *Forestry*, 63: 105–118.
- Zeidler A. (2013): Shrinkage of Turkish hazel (*Corylus colurna* L.) wood and its within-stem variation. *Zprávy lesnického výzkumu*, 58: 10–16.
- Zobel B.J., van Buijtenen J.P. (1989): The effect of silvicultural practices on wood properties. In: *Wood Variation: Its Causes and Control*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag: 218–248.

Received for publication March 22, 2018
Accepted after corrections June 7, 2018

Příloha 3: Impact of silvicultural measures on the quality of Scots pine wood. part I. Effect of regeneration method

**IMPACT OF SILVICULTURAL MEASURES
ON THE QUALITY OF SCOTS PINE WOOD
PART I. EFFECT OF REGENERATION METHOD**

ONDŘEJ SCHÖNFELDER, ALEŠ ZEIDLER, VLASTIMIL BORŮVKA
CZECH UNIVERSITY OF LIFE SCIENCES PRAGUE, FACULTY OF FORESTRY
AND WOOD SCIENCES, DEPARTMENT OF WOOD PROCESSING AND BIOMATERIALS
PRAGUE, CZECH REPUBLIC

LUKÁŠ BÍLEK
CZECH UNIVERSITY OF LIFE SCIENCES PRAGUE, FACULTY OF FORESTRY
AND WOOD SCIENCES, DEPARTMENT OF SILVICULTURE
PRAGUE, CZECH REPUBLIC

(RECEIVED APRIL 2019)

ABSTRACT

This study deals with the influence of the silvicultural measures on selected mechanical properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood in the Czech Republic. Sample trees were selected at two different localities that are characteristic of Scots pine growth, and they represent two different Scots pine regeneration methods, namely the clear-cutting and shelterwood regeneration method. We tested compressive strength and impact bending strength. The density of the wood was also evaluated as a factor influencing strength characteristics. The shelterwood regeneration method shows higher values in most of the investigated characteristics (49.3 MPa for the shelterwood method and 44.6 MPa for the clear-cutting method in the case of compressive strength); however, these differences are not significant for the processing industry. Another positive effect of the shelterwood regeneration method is the even distribution of the properties within the trunk in radial direction in contrast to clear-cutting method.

KEYWORDS: Scots pine, silviculture, wood, mechanical properties, variability.

INTRODUCTION

The Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) is the most wide spread and one of the most economically important evergreen trees in Europe (Kask 2015). Currently, the regeneration of new stands by planting seedlings is the most widespread method of growing Scots pine (Agestam et al.

1998). However, due to favourable environmental impacts, there is a growing interest in natural regeneration of stands. This method of regeneration of Scots pine stands is widely applied in the Scandinavian countries, but in Central Europe it is a marginal regeneration method (Bílek et al. 2018). Very little attention is paid to the influence of silvicultural practices on the quality of wood, in particular on the properties of wood, which are important from the perspective of the processing industry (Eriksson et al. 2006).

One of the criteria determining the use of wood in industry are the mechanical properties of wood. In particular, strength characteristics are closely related to wood density and are closely related to each other (Zeidler et al. 2015). Differences in mechanical properties can be found between individual trees of the same species as well as within a single tree, both in the radial (from the pith to the bark) (Horáček et al. 2017). The variability of properties in the trunk in the radial direction has been confirmed by many authors (Hautamäki et al. 2014, Kask 2015, Jelonek et al. 2008, Raiskila et al. 2006a). Generally, for conifers, it applies that the wood properties increase with increasing distance from the pith (Fernandes et al. 2017, Ivković et al. 2013, Nicholls and Brown 1973, Repola 2006). Factors contributing to this radial variability include, in particular, the annual ring width and the presence of juvenile wood in the trunk (Zeidler and Šedivka 2015, Zobel and Van Buitenen 1989). The presence of juvenile wood is cited as one of the main causes of horizontal variability, in particular in coniferous trees (MacDonald and Hubert 2002, Kretschmann et al. 1998). Juvenile wood is a zone in the middle of the trunk occupied by approximately 5 to 20 annual rings (Kretschmann et al. 1998). It shows a different structure (fiber length, fibril orientation in the cell wall) and chemical composition (Horáček et al. 2017) compared to mature wood. Another cause of the variability of wood properties in the radial direction is the thickness of the annual ring and the associated proportion of late wood (Požgaj et al. 1997, Kolmann 1951). Generally, for softwoods, it applies that with increasing annual ring thickness, the resulting wood properties are decreasing. The variability of properties in the trunk is primarily due to the relationship between the wood density and its strength (Horáček et al. 2017). The variability of wood properties between trees is around 5 - 20% and is much smaller than the variability of characteristics in the trunk. The variability between individual trees is mainly due to genetic properties, while variability within the trunk is caused by different trunk thickness and the number of annual rings (Horáček et al. 2017).

The aim of this work is to assess the impact of the application of the shelterwood regeneration method and clear-cutting regeneration method on selected physical and mechanical characteristics of Scots pine wood from the Czech Republic. The evaluation criteria determining the impact of the regeneration method were wood density, impact bending strength and compressive strength of wood. The variability of these wood properties in the trunk in the horizontal plane was also analysed. The influence of density on the strength characteristics was also evaluated.

MATERIAL AND METHODS

Materials

Sampling was carried out in two different localities, which are representative of the growth of Scots pine in the Czech Republic (Fig. 1). At each locality, two stands were selected that represent different habitats and different regeneration methods (Tab. 1).



Fig.1: Location of study areas in the Czech Republic.

Tab. 1: Stand and site characteristics.

Locality	Regeneration method	Tree height (m)	DBH (mm)	Forest site type*
1 Doksy	Shelterwood	13.0	169	0K
	Clear-cutting	18.1	187	0K
2 Chvojno	Shelterwood	15.2	205	2I
	Clear-cutting	21.7	224	2I

DBH – diameter at the breast height

* set of forest types according to the Czech typological system (Viewegh et al. 2003)

A total of 7 sample trees were taken from each stand. A total of 28 sample trees were taken from which the test material was made. An important criterion for the selection of samplers was the representation of characteristic individuals for a given stand, and the absence of growth irregularities and defects.

Methods

A 120 cm long section from the trunk base region was taken from each sample trees. Along with the sections, discs were cut off at the collection point so that annual ring analyses could be carried out. The sections were taken from the forest stands for subsequent cutting on a band saw, and the planks were stored and left to dry naturally. The subject of further processing was a central plank that allows for the evaluation of the distribution of properties over the trunk diameter, which was subsequently used for the production of test specimens. The test material was used for the production of test specimens for physical and mechanical tests. The test specimens for the physical tests were 20 x 20 x 30 mm (radial x tangential x axial). The physical property examined was density. The wood compressive strength was determined on the same specimens as the wood density and specimens for impact bending strength had dimensions of 20 x 20 x 300 mm (radial x tangential x axial). The test specimens in the air-conditioning chamber are air-conditioned to an equilibrium moisture of 12%, in conditions with an air temperature of 20°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) and a relative moisture content of 65% ($\pm 5^\circ\text{C}$). All of the samples comply with quality standard ČSN 49 0101 and do not have irregularities, growth defects or pressure wood.

Standard ČSN 49 0108 was used to evaluate wood density. The number of test samples for wood density was 1268. The density (ρ) was determined according to the following Eq. 1:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{g cm}^{-3}) \quad (1)$$

where: m - the weight of the specimen (g),
 V - the volume of the specimen (cm^3).

Compressive strength was determined by means of universal testing machine Tira 2850 (Tira GmbH, Schalkau, Germany). Compressive strength (σ) was evaluated on 733 specimens. The test was determined in accordance with standard ČSN 49 0110.

$$\sigma = \frac{F}{a \cdot b} \quad (\text{MPa}) \quad (2)$$

where: F - the maximum load force (N),
 a and b - the cross-sectional dimensions of the specimen (mm).

Another investigated characteristic is impact bending strength. Charpy's hammer (CULS, Prague, Czech Republic) was used for this determination. The hammer impact direction was tangential. The number of test samples used for impact bending strength was 536. Impact bending strength (A) was determined in accordance with standard ČSN 49 0117.

$$A = \frac{Q}{a \cdot b} \quad (\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}) \quad (3)$$

where: Q - the consumed power to break the specimen (J),
 a and b - the cross-sectional dimensions of the specimen (cm).

Multi-factor ANOVA tests (Fisher's F-test) and Duncan's multiple comparison tests were used to evaluate the statistical significance of each factor. The significance level of $\alpha = 0.05$ was used for all statistical analyses. The evaluated factors were the regeneration method and locality. The impact of the horizontal position in trunk was also evaluated.

A linear regression model was used to assess the effect of density on strength characteristics. Statistical analyses were performed using program STATISTICA 14 (Statsoft Inc., USA).

RESULTS AND DISCUSSION

The impact of silvicultural measures on the strength characteristics of wood was investigated between the stands where the shelterwood and clear-cutting regeneration methods were applied. Both regeneration methods were applied in stands that are close to each other at the same forest locality type and can therefore be compared to each other. Wood density, impact bending strength and compressive strength reached higher values in all of the renewed localities in stands regenerated using the shelter wood method (Figs. 2 and 3, Tab. 5). Although all of the examined characteristics are higher for the shelter wood regeneration method, this difference is completely irrelevant from a processing point of view. Statistically significant differences caused by silvicultural measures were only found in compressive strength at both localities ($P < 0.05$). For wood density and impact bending strength, the statistically significant effect of silvicultural measures on the properties of wood did not occur ($P > 0.05$), see Tab. 2 - 4. Many studies have reported that the natural regeneration of pine stands or stands with a small planting span is necessary for the production of wood with high wood mass quality (Agestam et al. 1998, Herman 1962, Ekö and Agestam 1994, Auty and Achim 2008). Zobel and van Buijtenen (1989) conducted a study in which they worked with Scots pine spacing of 0.75 x 0.75 m to 3.00 x 3.00 m. They found that trees with a higher planting span had reduced wood density. Furthermore, an increased proportion of juvenile wood was recorded in sparsely planted pines. Persson (1975) found the same results in Norway spruce as Zobel and van Buijtenen (1989) found in Scots pine.

Agestam et al. (1998) states that the greater spacing of planted trees leads to lower quality of produced wood compared to naturally renewed stands.

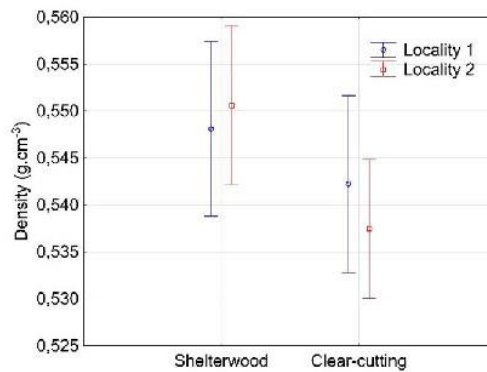


Fig. 2: Impact of regeneration method on wood density.

Tab. 2: Duncan's multiple range test for density.

MS = 0.00367 DF = 1264	L1 S	L1 C	L2 S	L2 C
L1	S			
L1	C	0.335		
L2	S	0.687	0.209	
L2	C	0.108	0.444	0.053

* Values are significant at $p < 0.05$. Error: Between MS = mean squares, DF = degrees of freedom. L = Locality, S = Shelterwood, C = Clear-cutting.

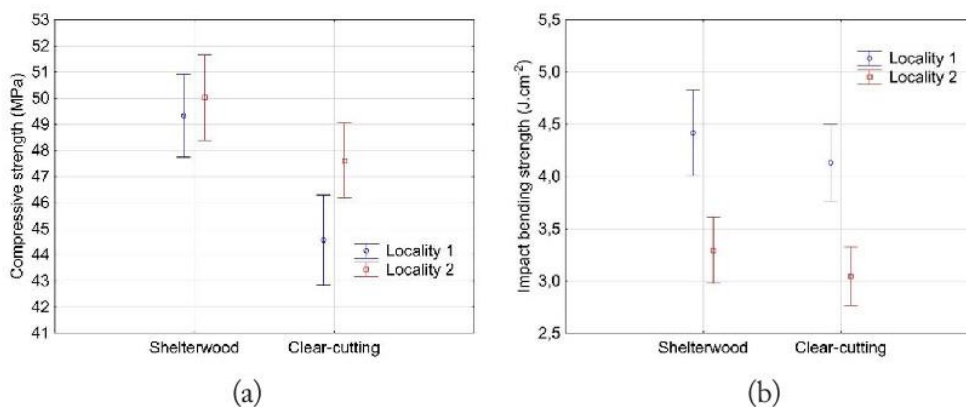


Fig. 3: Impact of regeneration method on compressive strength (a) and impact bending strength (b).

Tab. 3: Duncan's multiple range test for compressive strength.

MS = 5,531,000 DF = 729	L1 S	L1 C	L2 S	L2 C
L1	S			
L1	C	0.000*		
L2	S	0.544	0.000*	
L2	C	0.138	0.008*	0.047*

* Values are significant at $p < 0.05$. Error: Between MS = mean squares, DF = degrees of freedom. L = Locality, S = Shelterwood, C = Clear-cutting.

Tab. 4: Duncan's multiple range test for impact bending strength.

MS = 5,531,000 DF = 532	L1 S	L1 C	L2 S	L2 C
L1	S			
L1	C	0.295		
L2	S	0.000*	0.000*	
L2	C	0.000*	0.000*	0.317

* Values are significant at $p < 0.05$. Error: Between MS = mean squares, DF = degrees of freedom.

L = Locality, S = Shelterwood, C = Clear-cutting.

Tab. 5: Descriptive statistics—comparison of the regeneration method on the investigated properties.

Site	Property	Shelterwood			Clear-cutting		
		Mean \pm SD	Min	Max.	Mean \pm SD	Min.	Max.
Locality 1	Density ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	0.548 \pm 0.043	0.438	0.699	0.542 \pm 0.052	0.371	0.658
	Compressive strength (MPa)	49.3 \pm 5.7	35	68	44.6 \pm 11.1	26	72
	Impact bending strength ($\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$)	4.4 \pm 1.3	1.9	7.6	4.1 \pm 1.6	1	8.3
Locality 2	Density ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	0.550 \pm 0.052	0.449	0.741	0.537 \pm 0.070	0.381	0.701
	Compressive strength (MPa)	50.0 \pm 6.4	35	63	47.6 \pm 7.8	28	64
	Impact bending strength ($\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$)	3.3 \pm 1.2	0.6	7.1	3.0 \pm 1.7	0.7	6,9

In terms of processing and final use of wood, it is necessary to be aware of the distribution of wood properties over the trunk cross-section, i.e. from the trunk pith to the cambium (Fig. 4 and 5). It is very evident that stands regenerated via the clear-cutting regeneration method show the lowest strength value in the juvenile wood zone, and the density and strength of the wood grows towards the trunk perimeter. This trend is described by many authors (Ivković et al. 2013, Nicholls and Brown 1973 and Fritts et al. 1991). In contrast, stands regenerated via the shelterwood method show higher values of the investigated properties in the centre of the trunk compared to the clear-cutting method. As mentioned above, Zobel and van Buijtenen (1989) have found an increasing proportion of juvenile wood in the trunk with increasing spacing between growing trees, thus explaining the higher values of properties in the centre of the trunk for stands regenerated via the shelterwood method. Furthermore, stands regenerated via the shelterwood method at both localities show a uniform distribution of properties along stem radius, regardless of the position in the trunk.

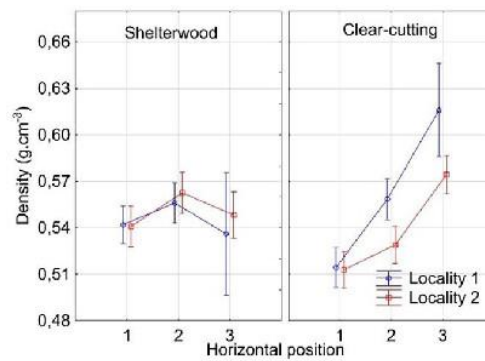


Fig. 4: Impact of regeneration method on the density distribution in the trunk in the radial direction.

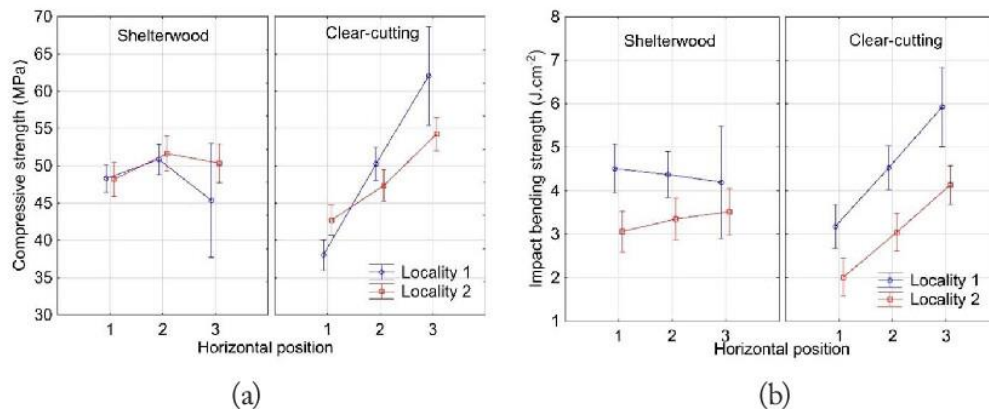


Fig. 5: Impact of regeneration method on the distribution of compressive strength (a) and impact bending strength (b) in the trunk in the radial direction.

The different method of distributing properties in the horizontal direction is due to the effect of the applied methods on the course of widths of annual rings in this direction. Fig. 5 clearly shows that stands regeneration via the clear-cutting renewal method at all localities have the widest annual rings in the area closest to the pith. With increasing distance from the pith, the width of the annual rings is presented by a downward trend. In contrast, stands regenerated via the shelterwood method show low annual growth in the centre of the trunk, and after the release of the maternal stand, the annual ring width suddenly increases. The course of annual rings widths of individual stands is very much related to the resulting properties, which are in strong correlation to each other (Kask 2015, Raiskila et al. 2006b) and, to some extent, explain the horizontal course of strength characteristics.

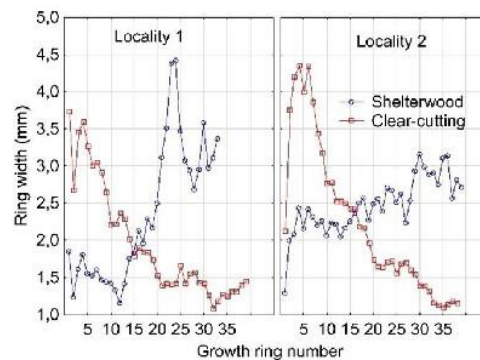


Fig. 6: Layout of annual ring width depending on the applied method.

Since wood density is seen as one of the most important indicators of wood quality, it is important to be aware of the relationship between mechanical properties and wood density. The strongest correlation was found in impact bending strength for stands regeneration via the clear-cutting method ($R = 0.70$) at Locality 1 and is shown in Fig. 7. The stand regenerated via the shelter wood regeneration method shows the highest correlation in compressive strength ($R = 0.68$) at Locality 2 (Tab. 6).

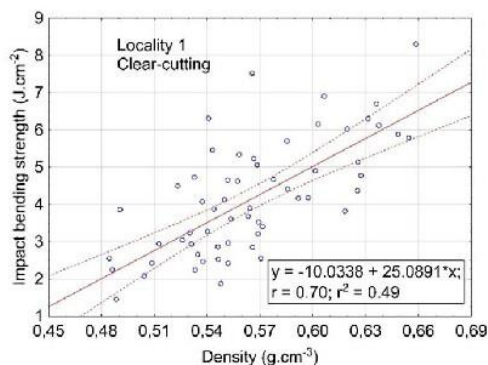


Fig. 7: Dependence of compressive strength on density.

Tab. 6: Dependence of strength characteristics on wood density.

Site	Forest stand	Property	Equation	R
Locality 1	Shelterwood	Compressive strength	$y = 17.9446 + 57.7923 \cdot x$	0.43
		Impact bending strength	$y = 2.1885 + 3.9928 \cdot x$	0.13
	Clear-cutting	Compressive strength	$y = -8.4779 + 100.8647 \cdot x$	0.48
		Impact bending strength	$y = -10.0338 + 25.0891 \cdot x$	0.70
Locality 2	Shelterwood	Compressive strength	$y = 1.3905 + 89.8576 \cdot x$	0.68
		Impact bending strength	$y = -0.0277 + 5.8747 \cdot x$	0.26
	Clear-cutting	Compressive strength	$y = -0.505 + 92.8486 \cdot x$	0.68
		Impact bending strength	$y = -3.4923 + 11.855 \cdot x$	0.53

The average density and strength characteristics are shown in Tab. 7. By comparing these results with literature, we can state that in the majority of cases, slightly lower mean compressive strength values were achieved than those specified in certain literature. Locality 1 shows impact bending strength values comparable to literature. On the other hand, somewhat lower impact bending strength values were achieved at locality 2. With regard to density, the results obtained oscillate around the mean value that it indicates (Novák 1970).

Tab. 7: Comparison of Scots pine wood values to literature.

			Density ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Compressive strength (MPa)	Impact bending strength ($\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$)
This study	Locality 1	Shelterwood	0.548	49.3	4.4
		Clear-cutting	0.542	44.6	4.1
	Locality 2	Shelterwood	0.550	50.0	3.3
		Clear-cutting	0.537	47.6	3.0
Wagenführ (2002)			0.510	55.0	4.0
Novák (1970)			0.540	55.0	4.0
Požgaj et al. (1997)			-	49.9	4.6

CONCLUSIONS

1. The significant impact of the shelterwood method regeneration was reflected in the uniform distribution of properties over the trunk radius, regardless of position. Compared to the clear-cutting method, which produces wood with significant trunk width variability, the wood produced via the shelterwood method is quite homogeneous.
2. A statistically significant difference was only found in the case of compressive strength. The difference in wood density and impact bending strength was not significantly confirmed at any of the investigated localities. The slight differences found in the mechanical properties are almost negligible and insignificant in terms of practical application.
3. The dependence of strength characteristics on density was found in most cases to be higher in compressive strength, regardless of the type of stand regeneration. The highest value, $R = 0.7$, was found at the stand regenerated via the clear-cutting method at Locality 1. From these results it can be stated that density can be used to predict the strength properties of wood.
4. The density values are comparable to the density values found in the Czech Republic. Compressive strength achieves somewhat lower values than those specified in literature. As these are young stands, it can be assumed that with increasing age, strength characteristics will increase as well.

ACKNOWLEDGEMENT

The research was supported by the Ministry of Agriculture of the Czech Republic [project number QJ1520037 – „Increasing the adaptability of pine (*Pinus sylvestris* L.) silviculture in the conditions of the Czech Republic“] and by Internal Grant Agency of the Faculty of Forestry and Wood Sciences [A03/18].

REFERENCES

1. Agestam, E., Ekö, P.M., Johansson, U., 1998: Timber quality and volume growth in naturally regenerated and planted Scots pine stands in S.W. Sweden. *Studia Forestalia Suecica* 204: 1-17.
2. Auty, D., Achim, A., 2008: The relationship between standing tree acoustic assessment and timber quality in Scots pine and the practical implications for assessing timber quality from naturally regenerated stands. *Forestry* 81(4): 475–487.
3. Bílek, L., Zeidler, A., Pulkrab, K., Ulbrichová, I., Vacek, S., Borůvka, V., Vítámvás, J., Remeš, J., Vacek, Z., Sloup, R., 2018: Pěstební a ekonomické aspekty clonné obnovy borovice lesní. (Silvicultural and economical aspects of shelterwood regeneration of Scots pine). *Lesnický průvodce*. Strnady, 56 pp.
4. ČSN 49 0101, 1980: Drevo. Všeobecné požiadavky na fyzikálne a mechanické skúšky (Wood. General requirements for physical and mechanical testing).
5. ČSN 49 0108, 1993: Drevo. Zisťovanie hustoty (Wood. Determination of the density).

6. ČSN 49 0117, 1980: Drevo. Rázová húževnatosť v ohybe (Wood. Impact strength in flexure).
7. ČSN 49 0110, 1980: Drevo. Medza pevnosti v tlaku v smere vlákien (Wood. Compression strength limits parallel to the grain).
8. Ekö, P.M., Agestam, E., 1994: A comparison of naturally regenerated and planted Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) on fertile sites in southern Sweden. *Forest & Landscape Research* 1(2): 111-126.
9. Eriksson, D., Lindberg, H., Bergsten, U. 2006: Influence of silvicultural regime on wood structure characteristics and mechanical properties of clear wood in *Pinus sylvestris*. *Silva Fennica* 40(4): 743-762.
10. Fernandes, C., Gaspar, M.J., Pires, J., Alves, A., Simões, R., Rodrigues, J.C., Silva, M.E., Carvalho, A., Brito, J.E., Lousada, J.L., 2017: Physical, chemical and mechanical properties of *Pinus sylvestris* wood at five sites in Portugal. *iForest* 10(4): 669-679.
11. Fritts, H.C., Vaganov, E.A., Sviderskaya, I.V., Shashkin, A.V., 1991: Climatic variation and tree-ring structure in conifers: Empirical and mechanistic models of tree-ring width, number of cells, cell size, cell-wall, thickness and wood density. *Climate Research* 1: 97-116.
12. Hautamäki, S., Kilpeläinen, H., Verkasalo, E., 2014: Factors and models for the bending properties of sawn timber from Finland and north-western Russia. Part II: Scots pine. *Baltic Forestry* 20(1): 142-156.
13. Herman, F. R., 1962: Shelterwood cutting to see if young-growth hem-lock can be regenerated by series of successive cut-tings. *Pulp and Paper* 36(1): 61-63.
14. Horáček, P., Fajstavr, M., Stojanović, M., 2017: The variability of wood density and compression strength of Norway spruce (*Picea abies* /L./ Karst.) within the stem. *Beskydy* 10(1,2): 17-26.
15. Ivković, M., Gapare, W., Wu, H., Espinoza, S., Rozenberg, P., 2013: Influence of cambial age and climate on ring width and wood density in *Pinus radiata* families. *Annals of Forest Science* 70(5): 525-534.
16. Jelonek, T., Pazdrowski, W., Tomczak, A., Szaban, J., 2008: The effect of social position of a tree in the stand and site on wood quality of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities* 11(2): 1-13
17. Jelonek, T., Tomczak, A., Jakubowski, M., Pazdrowski, W., 2005: Properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) timber growing on former arable and forest land. *Acta Scientiarum Polonorum Silvarum Colendarum Ratio et Industria Lignaria* 4(2): 35-47.
18. Kask, R., 2015: The influence of growth conditions on physico-mechanical properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood in Estonia. Institute of Forestry and Rural Engineering. Tartu, 164 pp.
19. Kollmann, F., 1951: *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Springer-Verlag. Berlin, 1050 pp.
20. Kretschmann, D. E., Moody, R. C., Pellerin, R. F., Bendtsen, B. A., Cahill, J. M., Mcalister, R. H., Sharp, D. W. 1998: Properties of juvenile wood. *Techline - properties and use of wood, composites, and fiber products*. USDA. Forest Products Laboratory 09/98: 6-7.
21. Macdonald, E., Hubert, J., 2002: A review of the effects of silviculture on timber quality of Sitka spruce. *Forestry* 75(2): 107-138.
22. Nicholls, J.W.P., Brown, A.G., 1974: The relationship between ring width and wood characteristics in double-stemmed trees of Radiata pine. *New Zealand Journal of Forestry Science* 4: 105-111.

23. Novák, V., 1970: Dřevařská technická příručka. (Wood handbook). SNTL. Praha, 748 pp.
24. Persson, A., 1975: Ved och pappersmassa fran gran och tall i olika forband. (Wood and pulp of Norway spruce and Scots pine at various spacings). SkogshOgsk Stockholm Inst Skogsprod Rapp Upps, 145 pp.
25. Požgaj, A., Chovanec, D., Kurjatko, S., Babiak, M., 1997: Štruktúra a vlastnosti dreva. (Structure and properties of wood). Príroda. Bratislava, 485 pp.
26. Raiskila, S., Saranpää, P., Fagerstedt, K., Laakso, T., Löija, M., Mahlberg, R., Paajanen, L., Ritschkoff, A.C., 2006: Growth rate and wood properties of Norway spruce cutting clones on different sites. *Silva Fennica* 40(2): 247-256.
27. Raiskila, S., Saranpää, P., Fagerstedt, K., Laakso, T., Löija, M., Mahlberg, R., Paajanen, L., Ritschkoff, A.C., 2006: Growth rate and wood properties of Norway spruce cutting clones on different sites. *Silva Fennica* 40(2): 247-256.
28. Repola, J., 2006: Models for vertical wood density of Scots pine, Norway spruce and birch stems, and their application to determine average wood density. *Silva Fennica* 40(4): 673-685.
29. Tomczak, A., Jelonek, T., 2013: Radial variation in the wood properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) grown on former agricultural soil. *Forest Research Papers* 74(2): 171-177.
30. Viewegh, J., Kusbach, A., Mikeska, M., 2003: Czech forest ekosystém classification. *Journal of Forest Science* 49(2): 85-93.
31. Wagenfuhr, R., 2002: Dřevo – obrazkový lexikon. (Lexicon of Timbers). Grada Publishing, a.s. Prague, 348 pp.
32. Zeidler, A., Borůvka, V., Schönfelder, O., 2017: Comparison of wood quality of Douglas fir and spruce from afforested agricultural land and permanent forest land in the Czech Republic. *Forests* 9(1): 1-13.
33. Zeidler, A., Salem Mohamed, Z., M., Borůvka, V., 2015: Mechanical properties of grand fir wood grown in the Czech Republic in vertical and horizontal positions. *BioResources* 10(1): 793-808.
34. Zeidler, A., Šedivka, P., 2015: Influence of selected factors on wood density variability in grand fir (*Abies grandis* /Douglas/ Lindl.). *Wood research* 60(1): 33-44.
35. Zobel, B.J., van Buijtenen, J.P., 1989: The Effect of Silvicultural Practices on Wood Properties. In *Wood Variation*. Pp 218-248, Springer, Berlin.

ONDŘEJ SCHÖNFELDER, ALEŠ ZEIDLER, VLASTIMIL BORŮVKA*
 CZECH UNIVERSITY OF LIFE SCIENCES PRAGUE
 FACULTY OF FORESTRY AND WOOD SCIENCES
 DEPARTMENT OF WOOD PROCESSING AND BIOMATERIALS
 KAMÝČKÁ 129
 165 00 PRAHA 6 - SUCHDOL
 CZECH REPUBLIC
 PHONE: +420 224 383 636
 *Corresponding author: boruvkav@fld.czu.cz

LUKÁŠ BÍLEK
CZECH UNIVERSITY OF LIFE SCIENCES PRAGUE
FACULTY OF FORESTRY AND WOOD SCIENCES
DEPARTMENT OF SILVICULTURE
KAMÝČKÁ 129
165 00 PRAHA 6 - SUCHDOL
CZECH REPUBLIC

Příloha 4: Impact of silvicultural measures on the quality of Scots pine wood part II. Effect of site

IMPACT OF SILVICULTURAL MEASURES ON THE QUALITY OF SCOTS PINE WOOD PART II. EFFECT OF SITE

ONDŘEJ SCHÖNFELDER, ALEŠ ZEIDLER, VLASTIMIL BORŮVKA, LUKÁŠ BÍLEK
CZECH UNIVERSITY OF LIFE SCIENCES PRAGUE
PRAGUE, CZECH REPUBLIC

(RECEIVED MAY 2019)

ABSTRACT

This study deals with the variability of wood density, compression strength and the impact bending strength within the trunk of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). The impact of the site on the examined properties was also evaluated. The tree samplers come from four different sites that are representative for Scots pine growth in the Czech Republic. From the samplers the sections representing a basal part of the trunk and a middle part of the tree were cut. The most significant influence of the site was confirmed for wood density; on the other hand, the influence of the site is ambiguous in terms of the examined strength characteristics. A decrease in the wood properties with increasing trunk height was proven for all tested properties. The highest impact of the position was observed for wood density, while the results of vertical variability in mechanical properties are not always significant (compression strength: basal 47.1 MPa and middle 45.8 MPa). A close correlation between mechanical properties and wood density was also proven.

KEYWORDS: Scots pine, wood, mechanical and physical properties, site, vertical variability.

INTRODUCTION

After the spruce, the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) represents our second most important economic coniferous tree species, and its importance will grow with anticipated climate changes (Bílek et al. 2018). The state forest policy is considering the idea of increasing the proportion of Scots pine in forest stands according to Report on the State of Forest and Forestry in the Czech Republic 2016.

However, there are very few studies on the quality of pine wood produced in the Czech Republic. Wood quality is in the focus of both forest managers and the woodworking industry. They must always be understood in the appropriate context, usually in terms of the properties

that are important for the final processing and use of wood. Wood density is a physical property that is widely used to evaluate the resulting wood quality (Tsoumis 1991, Požgaj et al. 1997). The reason for using wood density as a quality indicator is that it largely influences other physical, and especially mechanical properties of wood (Kollmann 1951). It is generally supposed that the strength of the wood increases with increasing density (Hautamäki et al. 2014).

When evaluating the variability within a tree, it can be seen that a certain characteristic of wood follows a certain trend. The variability depends on the vertical position inside the trunk and the distance from the center of the trunk (Horáček et al. 2017, Zeidler and Šedivka 2015, Zobel and Van Buitenen, 1989). The vertical variability of wood properties in softwoods has been evaluated by many authors (Požgaj et al. 1997, Muñoz 2008, Repola 2006). Factors that contribute to the vertical variability mainly include the width of the annual rings, the structure of the wood and the different proportion of juvenile wood in the trunk (Zeidler and Šedivka 2015, Zobel and Van Buitenen 1989).

The site is another of the significant factors affecting wood quality. Zobel and van Buijtenen (1989) state that the site is one of the worst determinable factors relating to wood properties, as it is a measure of soil and climate quality, which is collectively referred to as the quality of the site. In some studies, the effect of temperature and wind is referred to as the site indicator (Worrell and Malcolm 1990). The differences in growth rates caused by climate change will lead to differences in wood quality due to the known relationship between growth rate and wood properties. In addition to the direct effects on tree growth, the soil moisture regime is one of the factors of tree stability. These factors interact with each other and have a significant impact on wood quality (Macdonald and Hubert 2002). In general, trees growing in places with high altitude usually produce less dense wood and have shorter tracheids than pine trees growing in low altitude areas. This trend has been confirmed by many studies (Zobel and van Buijtenen 1989, Kollman, 1951, Macdonald and Hubert 2002, Tsoumis 1991). Hautamäki et al. (2014) investigated the impact of a site on Scots pine trees from Finland and Russia, and he found a significant difference between these sites in wood density. The significant impact of site conditions on Scots pine wood density is also confirmed by Jelonek et al. (2005) or Tomczak and Jelonek (2013). Zobel and van Buijtenen (1989) state that the density of coniferous tree species has a growing tendency at poor and less fertile sites.

The aim of this paper is to assess the influence of a site and the effect of vertical position in the trunk on the physical and mechanical properties of Scots pine wood in the Czech Republic. Namely, we tested wood density, impact bending strength and compression strength along fibres. The influence of wood density on the studied strength characteristics was also evaluated. This paper follows the previous study dealing with effect of regeneration methods on wood quality of Scots pine wood.

MATERIAL AND METHODS

Materials

Samplers were collected in four different localities Natural Forest Areas (NFA), which are characteristic for the growth of Scots pine in the Czech Republic, namely NFA 18 - Severočeská pískovcová plošina a Český ráj (North Bohemian Sandstone Plateau and Bohemian Paradise), NFA 6 - Západočeská pahorkatina (West Bohemian Hills), NFA 17 - Polabí and NFA 15b - Jihočeská pánev (South Bohemian Basin), and part of Třeboňská pánev (Třeboň Basin) (Fig. 1). At each locality, two stands were selected that represent a different site (Tab. 1). All of the evaluated pine stands were regenerated using the clear-cutting method.

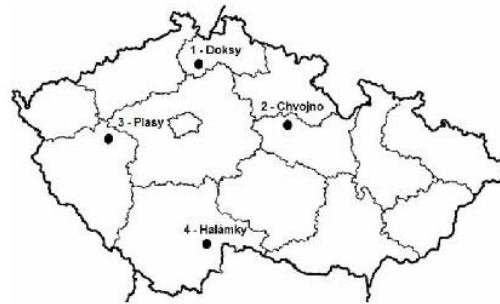


Fig. 1: Location of study areas in the Czech Republic.

Tab. 1: Stand and locality characteristics.

Locality	Stand	Tree height (m)	DBH (mm)	Forest site type*
1 (Doksy)	1	18.1	187	0K
	2	21.6	204	2K
2 (Plasy)	1	17.1	180	4Q
	2	23.7	238	2K
3 (Chvojno)	1	21.7	224	2I
	2	17.4	213	2K
4 (Halámky)	1	17.2	180	0K
	2	17.3	209	3K

DBH – diameter at the breast height

* set of forest types according to the Czech typological system (Viewegh et al. 2003).

A total of 7 samplers were felled at each stand. A total of 56 sample trees were taken for the preparation of test material. An important criterion for the selection of samplers was the representation of characteristic individuals for a given stand and the absence of growth irregularities and defects.

Methods

From each sampler, a 120 cm long section from the trunk base region was taken, followed by a section representing the central trunk section. This operation allowed for the monitoring of the vertical variability of the wood properties. The sections were removed from the forest stands for subsequent cutting on a band saw, and the obtained planks were stored and left to dry naturally until the moisture content drop under 20%. The central plank (Schönfelder et al. 2017) was used for the production of the test specimens. The test material was used for the production of test specimens for physical and mechanical tests. The test specimens for the physical tests were 20 x 20 x 30 mm (radial x tangential x axial). The wood density as a representative of physical properties was tested. Wood compression strength along fibres was determined on identical specimens as regards the wood density, and the impact strength specimens had dimensions of 20 x 20 x 300 mm (radial x tangential x axial). The test specimens were air conditioned to equilibrium moisture content of about 12% in an air conditioning chamber, in conditions with an air temperature of 20°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) and a relative air moisture content of 65% ($\pm 5^\circ\text{C}$). With their quality, all of the samples met standard ČSN 49 0101 (1980, Wood. General requirements for physical and mechanical testing) and did not have irregularities, growth defects or compression wood.

Standard ČSN 49 0108 (1993, Wood. Determination of the density) was used to evaluate the wood density. We used in total 2435 test samples for the wood density evaluation. The density (ρ) was determined according to the following formula:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (g \cdot cm^{-3}) \quad (1)$$

where: m - the weight of the specimen (g),
 V - the volume of the specimen (cm³).

Compression strength was determined by means of universal testing machine Tira 2850 (Tira GmbH, Schalkau, Germany). Compression strength (σ) was evaluated on 2435 specimens. The test was determined in accordance with standard ČSN 49 0110 (1980, Wood. Compression strength limits parallel to the grain).

$$\sigma = \frac{F}{a \cdot b} \quad (MPa) \quad (2)$$

where: F - the maximum load force (N),
 a and b are the cross-sectional dimensions of the specimen (mm).

Another investigated characteristic was impact bending strength. Charpy's hammer (CULS, Prague, Czech Republic) was used for this determination. The hammer impact direction was tangential. The number of test samples used for impact bending strength was 1117. Impact bending strength (A) was determined in accordance with standard ČSN 49 0117 (1980, Wood. Impact strength in flexure).

$$A = \frac{Q}{a \cdot b} \quad (J \cdot cm^{-2}) \quad (3)$$

where: Q - the consumed power to break the specimen (J),
 a and b - the cross-sectional dimensions of the specimen (cm).

Multi-factor ANOVA tests (Fisher's F-test) and Duncan's multiple comparison tests were used to evaluate the statistical significance of each factor. The significance level of $\alpha = 0.05$ was used for all statistical analyses. We used the locality as a factor influencing the physical and mechanical properties. The impact of the vertical position in trunk was also evaluated. A linear regression model was used to assess the effect of density on strength characteristics. Statistical analyses were performed using program STATISTICA 14 (Statsoft Inc., USA).

RESULTS AND DISCUSSION

One of the most important parameters influencing the resulting wood quality is the site (Zobel and van Buijtenen 1989). The impact of the locality was observed in both the basal part of the trunk and at middle of the trunk height (Figs. 2 and 3 and Tabs. 2 and 3). The impact of the stand on the wood density in the basal part of the trunk was significantly reflected at all of the localities ($P < 0.05$). In the central part of the trunk, the impact of the stand was not manifested only at locality 3 ($P > 0.05$). The influence of the stand on the compression strength in the basal part of the trunk was not manifested only at locality 1 ($P > 0.05$). The remaining localities show

a statistically significant difference ($P < 0.05$). On the other hand, in terms of impact bending strength, the impact of the stand was confirmed only at locality 4. In the middle part of the trunk, due to the stand, a statistically significant difference was found in compression strength only at locality 3 and for impact bending strength at locality 2 and locality 4 ($P < 0.05$). The other localities do not show statistically significant differences. The results show that impact bending strength is not as influenced by site conditions as compression strength. Different values of pine wood density at different localities were achieved by Jelonek et al. (2005), Hautamäki et al. (2014) and Tomczak and Jelonek (2013). In contrast, Zeidler et al. (2017) found no influence on impact bending strength for the Norway spruce.

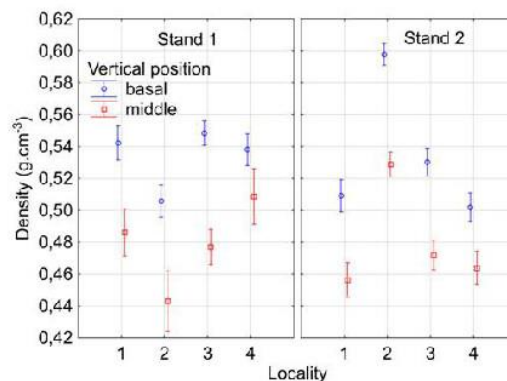


Fig. 2: Impact of locality and vertical position in the trunk on wood density.

The design of the experiment also enabled comparison of the quality of wood from stands of same set of forest types. This comparison of the quality of wood was monitored always at Stand 2 and yields relatively inconsistent results. Thus, it can be stated that stands growing on the same set of forest types do not produce wood with the same properties. This means that there must be another factor, probably the intensity of silvicultural measures, which can overshadow the effect of the site.

Tab. 2: Descriptive statistics (mean \pm standard deviation) – impact of locality and vertical position in the trunk on wood density.

Locality	Basal section		Middle section	
	Density ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)		Density ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	
	Stand 1	Stand 2	Stand 1	Stand 2
1	0.542 \pm 0.052	0.509 \pm 0.083	0.486 \pm 0.044	0.456 \pm 0.061
2	0.506 \pm 0.067	0.598 \pm 0.060	0.443 \pm 0.032	0.528 \pm 0.043
3	0.548 \pm 0.071	0.530 \pm 0.073	0.477 \pm 0.056	0.472 \pm 0.054
4	0.538 \pm 0.082	0.501 \pm 0.076	0.508 \pm 0.041	0.463 \pm 0.075

In terms of processing and final use of wood, it is necessary to be aware of the distribution of wood properties in the trunk in the vertical direction, i.e. from the basal part of the trunk to its top. Fig. 2 and 3 and Tab. 2 and 3 show that with increasing trunk height the strength characteristics of the wood decrease. The wood with the highest quality (from a view of the tested properties) is thus found in the basal part of the trunk. Wood density shows a clear trend of decreasing values with increasing trunk height at all sites. Compression strength at stand 1 does not show any significant difference only at locality 1; at stand 2, there was no proven impact of the vertical position on strength at locality 3 and locality 4. Impact bending strength at stand

1 did not demonstrate a difference in strength at locality 3 and locality 4; stand 2 does not show significant impact of trunk position at any of the investigated localities. A decrease in wood quality with increasing trunk height has been observed by many authors (Ivković et al. 2013, Repola 2006). The reduction in wood properties values is associated primarily with the increasing width of annual rings, and the different proportion of juvenile wood in the trunk compared to the basal part of the trunk (Zeidler and Šedivka 2015). Fischer et al. (2016) found out that for the Norway spruce, the wood density increases with trunk height at rich sites, but the effect is the opposite at poor sites. Repola (2006) found a slight decrease in wood density up to half of the trunk, followed by an increase in the upper half.

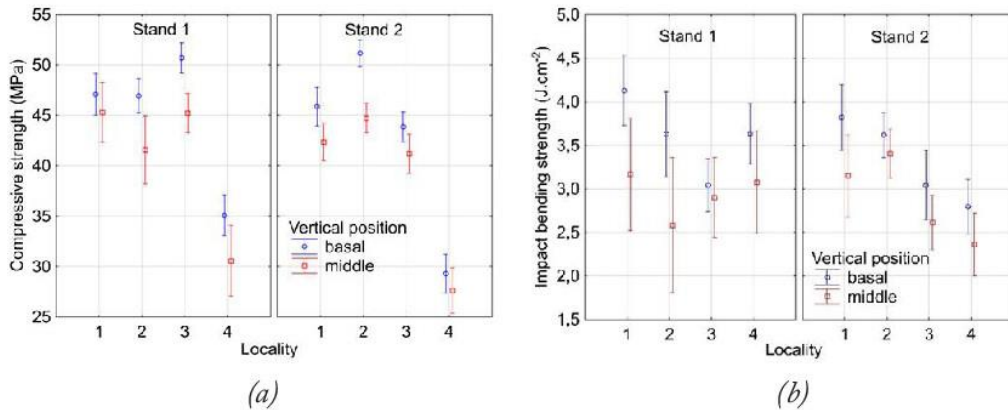


Fig. 3: Impact of locality and vertical position in the trunk on compression strength (a) and impact bending strength (b).

Tab. 3: Descriptive statistics (mean ± standard deviation) – comparison of the locality on the mechanical properties.

Locality	Basal section				Middle section			
	Compression strength (MPa)		Impact bending strength (J·cm ⁻²)		Compression strength (MPa)		Impact bending strength (J·cm ⁻²)	
	Stand 1	Stand 2	Stand 1	Stand 2	Stand 1	Stand 2	Stand 1	Stand 2
1	47.1±9.8	45.8±13.0	4.1±1.6	3.8±2.1	45.3±4.7	42.4±8.4	3.2±1.0	3.1±1.3
2	47.0±8.7	51.2±11.4	3.6±1.5	3.6±1.7	41.6±4.1	44.7±7.7	2.6±0.8	3.4±1.1
3	50.7±9.8	43.9±10.9	3.0±1.7	3.0±1.7	45.2±8.3	41.2±7.9	2.9±1.7	2.6±1.9
4	35.1±8.3	29.3±7.3	3.6±1.7	2.8±1.5	30.6±6.4	27.6±5.2	3.1±1.6	2.4±1.1

The correlation between wood density and mechanical properties was confirmed, and it has been confirmed that with increasing wood density, the strength characteristics of wood also increase. In most cases, a higher dependence on wood density was found for compression strength (Tab. 4). Fig. 4 shows the model with the highest achieved correlation coefficient value (R=0.90) between wood density and compression strength. Based on the results achieved, we can say that wood density can be used as an indicator of wood strength characteristics.

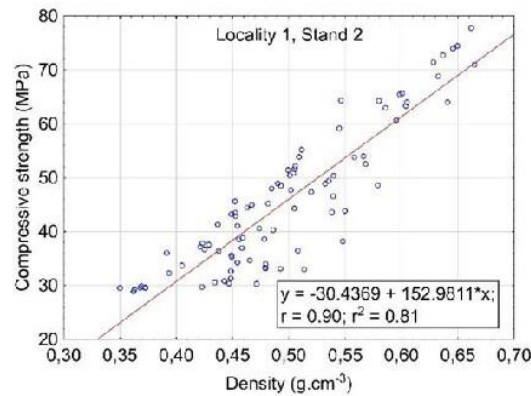


Fig. 4: Dependence of compression strength on density.

Tab. 4: Dependence of strength characteristics on wood density.

Site	Forest stand	Property	Equation	R
Locality 1	Stand 1	Compression strength	$y = -8.4779 + 100.8647 \cdot x$	0.48
		Impact bending strength	$y = -10.0338 + 25.0891 \cdot x$	0.70
	Stand 2	Compression strength	$y = -30.4369 + 152.911 \cdot x$	0.90
		Impact bending strength	$y = -6.4456 + 19.6342 \cdot x$	0.85
Locality 2	Stand 1	Compression strength	$y = -10.1386 + 116.6212 \cdot x$	0.79
		Impact bending strength	$y = -3.0463 + 12.3417 \cdot x$	0.48
	Stand 2	Compression strength	$y = -12.5763 + 107.3926 \cdot x$	0.61
		Impact bending strength	$y = -3.8574 + 11.9273 \cdot x$	0.40
Locality 3	Stand 1	Compression strength	$y = -0.505 + 92.8486 \cdot x$	0.67
		Impact bending strength	$y = -3.4923 + 11.855 \cdot x$	0.53
	Stand 2	Compression strength	$y = 0.005 + 82.4892 \cdot x$	0.58
		Impact bending strength	$y = -5.9275 + 16.0231 \cdot x$	0.61
Locality 4	Stand 1	Compression strength	$y = 23.9452 + 20.5234 \cdot x$	0.23
		Impact bending strength	$y = -4.4271 + 15.1895 \cdot x$	0.63
	Stand 2	Compression strength	$y = 21.9925 + 12.444 \cdot x$	0.48
		Impact bending strength	$y = -2.4105 + 10.3334 \cdot x$	0.41

Tab. 5 shows the average values of the properties of each site, regardless of the position in the trunk. The table shows that the ascertained wood density at some of the sites is comparable to literature, while the remaining density values are lower. The strength characteristics are lower than those stated by the authors. The lower values of the ascertained wood properties are due to the low age of the examined trees, which is lower than the felling age of the pine. At a young age, pines have a higher percentage of juvenile wood in the trunk, resulting in lower strength characteristics values (Zobel and van Buitenen 1989). However, it can be assumed that both strength characteristics and wood density will increase with increasing tree age.

Tab. 5: Comparison of Scots pine wood values to literature.

			Density (g·cm ⁻³)	Compression strength (MPa)	Impact bending strength (J·cm ⁻²)
This study	Locality 1	Stand 1	0.514	46.2	3.7
		Stand 2	0.483	44.1	3.5
	Locality 2	Stand 1	0.475	44.3	3.1
		Stand 2	0.563	48.0	3.5
	Locality 3	Stand 1	0.513	48.0	3.0
		Stand 2	0.501	42.6	2.8
	Locality 4	Stand 1	0.523	32.9	3.4
		Stand 2	0.482	28.5	2.6
Wagenführ (2002)			0.510	55.0	4.0
Novák (1970)			0.540	55.0	4.0
Požgaj et al. (1997)			-	49.9	4.6

CONCLUSIONS

The impact of the vertical position in the trunk, where a decreasing trend with increasing height was showed, was unequivocally confirmed for the wood density. Hence, the highest density wood was found in the basal part of the trunk. The impact of the vertical position of the wood in the trunk on strength characteristics is not as crucial.

The impact of the site conditions was significantly showed for the wood density, while on the other hand, the influence of the site is not that crucial for the investigated strength characteristics. Furthermore, it can be stated that stands growing on the same set of forest types do not produce wood with identical properties.

The linear dependence of strength characteristics on the wood density was proven. In most cases, higher correlation coefficients were found between the wood density and compression strength. Based on the wood density values, wood strength characteristics so can be predicted to great extent.

ACKNOWLEDGEMENT

The research was supported by the Ministry of Agriculture of the Czech Republic [project number QJ1520037 – „Increasing the adaptability of pine (*Pinus sylvestris* L.) silviculture in the conditions of the Czech Republic“] and by Internal Grant Agency of the Faculty of Forestry and Wood Sciences [A19/07].

REFERENCES

1. Bílek, L., Zeidler, A., Pulkrab, K., Ulbrichová, I., Vacek, S., Borůvka, V., Vítámvás, J., Remeš, J., Vacek, Z., Sloup, R., 2018: Pěstební a ekonomické aspekty clonné obnovy borovice lesní. (Silvicultural and economical aspects of shelterwood regeneration of Scots pine). Lesnický průvodce. Strnady, 56 pp.

2. ČSN 49 0101, 1980: Drevo. Všeobecné požiadavky na fyzikálne a mechanické skúšky (Wood. General requirements for physical and mechanical testing).
3. ČSN 49 0108, 1993: Drevo. Zisťovanie hustoty (Wood. Determination of the density).
4. ČSN 49 0117, 1980: Drevo. Rázová húževnatosť v ohybe (Wood. Impact strength in flexure).
5. ČSN 49 0110, 1980: Drevo. Medza pevnosti v tlaku v smere vlákien (Wood. Compression strength limits parallel to the grain).
6. Fischer, C., Vestøl, G., Høibø, O. 2016: Modelling the variability of density and bending properties of Norway spruce structural timber. *Canadian Journal of Forest Research* 46(7): 1184-1192.
7. Hautamäki, S., Kilpeläinen, H., Verkasalo, E., 2014: Factors and models for the bending properties of sawn timber from Finland and north-western Russia. Part II: Scots pine. *Baltic Forestry* 20(1): 142-156.
8. Horáček, P., Fajstavr, M., Stojanović, M., 2017: The variability of wood density and compression strength of Norway spruce (*Picea abies* /L./ Karst.) within the stem. *Beskydy* 10(1,2): 17–26.
9. Ivković, M., Gapare, W., Wu, H., Espinoza, S., Rozenberg, P., 2013: Influence of cambial age and climate on ring width and wood density in *Pinus radiata* families. *Annals of Forest Science* 70(5): 525–534.
10. Jelonek, T., Tomczak, A., Jakubowski, M., Pazdrowski, W., 2005: Properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) timber growing on former arable and forest land. *Acta Scientiarum Polonorum Silvarum Colendarum Ratio et Industria Lignaria* 4(2): 35–47.
11. Kollmann, F., 1951: *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. SpringerVerlag Berlin Heidelberg, 1050 pp.
12. Macdonald, E., Hubert, J., 2002: A review of the effects of silviculture on timber quality of Sitka spruce. *Forestry* 75(2): 107–138.
13. Muñoz, G.R., Cañas, M.A.S., Soalleiro, R.R., 2008: Physical properties of wood in thinned Scots pines (*Pinus sylvestris* L.) from plantations in northern Spain. *Annals of Forest Science* 65(5): 507-507.
14. Novak, V., 1970: *Dřevořada technická příručka*. (Wood handbook). SNTL. Prague, 748 pp.
15. Požgaj, A., Chovanec, D., Kurjatko, S., Babiak, M., 1997: *Štruktúra a vlastnosti dreva*. (Structure and properties of wood). *Príroda*. Bratislava, 485 pp.
16. Repola, J., 2006: Models for vertical wood density of Scots pine, Norway spruce and birch stems, and their application to determine average wood density. *Silva Fennica* 40(4): 673-685.
17. Schönfelder, O., Zeidler, A., Borůvka, V., Bílek, L., 2017: Influence of site conditions and silvicultural practice on the wood density of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) – a case study from the Doksy locality, Czech Republic. *Journal of Forest Science* 63(10): 457-462.
18. Tomczak, A., Jelonek, T., 2013: Radial variation in the wood properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) grown on former agricultural soil. *Forest Research Papers* 74(2): 171-177.
19. Tsoumis, G., 1991: *Science and technology of wood: Structure, Properties, Utilization*. New York: Chapman and Hall, 497 pp.
20. Wagenführ, R., 2002: *Dřevo – obrazový lexikon*. Grada Publishing, a.s. Prague, 348 pp.
21. Worrell, R., Malcolm, D.C., 1990: Productivity of Sitka spruce in northern Britain 2. Prediction from Site Factors. *Forestry* 63(2): 119-128.
22. Zeidler, A., Borůvka, V., Schönfelder, O., 2017: Comparison of Wood Quality of Douglas Fir and Spruce from Afforested Agricultural Land and Permanent Forest Land in the Czech Republic. *Forests* 9(1): 1-13.

23. Zeidler, A., Sedivka, P., 2015: Influence of selected factors on wood density variability in grand fir (*Abies grandis* /Douglas/ Lindl.). Wood Research 60(1): 33-44.
24. Zobel, B.J., van Buijtenen, J.P., 1989: The Effect of Silvicultural Practices on Wood Properties. In Wood Variation. Pp 218–248, Springer. Berlin.

ONDŘEJ SCHÖNFELDER, ALEŠ ZEIDLER, VLASTIMIL BORŮVKA*
CZECH UNIVERSITY OF LIFE SCIENCES PRAGUE
FACULTY OF FORESTRY AND WOOD SCIENCES
DEPARTMENT OF WOOD PROCESSING AND BIOMATERIALS
KAMÝČKÁ 129
165 00 PRAHA 6 - SUCHDOL
CZECH REPUBLIC
*Corresponding author: boruvkav@fld.czu.cz

LUKÁŠ BÍLEK
CZECH UNIVERSITY OF LIFE SCIENCES PRAGUE
FACULTY OF FORESTRY AND WOOD SCIENCES
DEPARTMENT OF SILVICULTURE
KAMÝČKÁ 129
165 00 PRAHA 6 - SUCHDOL
CZECH REPUBLIC

Příloha 5: Impact of shelterwood regeneration method on mechanical properties of scots pine wood



Impact of shelterwood regeneration method on mechanical properties of scots pine wood

Aleš Zeidler¹ · Vlastimil Borůvka¹ · Lukáš Bílek² · Ondřej Schönfelder¹ · Jan Vítámvas³

Received: 17 January 2020 / Accepted: 12 February 2021
© The Author(s), under exclusive licence to Springer-Verlag GmbH, DE part of Springer Nature 2021

Abstract

Key message Regeneration method effects within-stem variability of mechanical wood properties but has no impact on overall quality of Scots pine logs.

Abstract In Central Europe, group shelterwood regeneration method relying on natural regeneration is generally considered as an approach that meets the criteria of close-to-nature silviculture. We tested its effect on wood properties in contrast to the clearcutting method with subsequent artificial regeneration by planting in the case of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). Four localities were chosen in the Czech Republic, where both regeneration methods were applied. Sample trees were felled and subsequently evaluated for the impact of the applied regeneration method on wood properties. Modulus of elasticity, bending strength and wood density were used as indicators of wood quality. The impact of the regeneration method on the examined characteristics of the wood was not statistically significant, 78 MPa (megapascal) for shelterwood and 75 MPa for clearcutting method in the case of bending strength, and they are of negligible importance in terms of influencing end-product potential. Much more significant was the impact of the applied regeneration method on the distribution of the properties along trunk radius, where the shelterwood method provides even distribution. Non-destructive methods turned out to be useful tools for elastic properties estimation of wood as the close correlation to modulus of elasticity was confirmed ($r=0.66$ and $r=0.82$ for shelterwood and clearcutting method, respectively).

Keywords Forest stand regeneration · Strength · Stiffness · Density · Variability

Introduction

Scots pine currently occupies more than 16% of the total area of forests in the Czech Republic and is the second most important commercial tree species after Norway spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst.) (MACR 2020). In member countries of the EU it covers around 20% of the whole forest

area. Due to climatic changes and the dying of forest stands in the middle and lower altitudes, its importance will continue to increase (Hlásny et al. 2011, 2014). At the same time, in these forest habitats mostly endangered by drought, it will be necessary to modify prevailing clearcutting regeneration method towards close-to-nature approaches (Brang et al. 2014; Bolte et al. 2009). Currently, small-scale close-to-nature forest management is considered by numerous authors to be a suitable measure for increasing the stability, resistance and the capacity to adapt to ongoing climate changes (Churchill et al. 2013; Merlin et al. 2015; Spathelf et al. 2015).

Generally little attention is paid to this ecologically-oriented silviculture in stands with the dominance of light demanding trees such as oak species and especially Scots pine. Despite certain obstacles related to natural regeneration here, successful examples with risk prevention against stand disruption by stress factors such as air-pollution and drought periods are reported (Vacek et al. 2016, 2017). At the same time, the majority of research efforts focus on the

✉ Aleš Zeidler
zeidler@fd.czu.cz

¹ Faculty of Forestry and Wood Sciences, Department of Wood Processing and Biomaterials, Czech University of Life Sciences Prague, Kamýcká 129, 165 00 Prague, Czech Republic

² Faculty of Forestry and Wood Sciences, Department of Silviculture, Czech University of Life Sciences Prague, Kamýcká 129, 165 00 Prague, Czech Republic

³ Faculty of Forestry and Wood Sciences, Department of Forest Ecology, Czech University of Life Sciences Prague, Kamýcká 129, 165 00 Prague, Czech Republic

individual aspects of forest management and wood processing as separate disciplines, although the selected silvicultural approach can significantly influence the mechanical properties of wood and the final quality of the raw material produced. In case of Scots pine and other species of conifers, there is a negative correlation between the growth rate of the tree and the quality related properties of the wood. This partly explains generally lower quality of the wood in stands originating from artificial regeneration, especially in the case of lower initial plant densities (Agestam et al. 1998; Jiang et al. 2007; Peltola et al. 2007; Ulvcrorna and Ulvcrorna 2011; Vincent et al. 2011; Ivković et al. 2013; Pretzsch et al. 2016). Naturally regenerated pine stands or artificially regenerated stands with initial high densities provide wood of high quality.

The shelterwood regeneration of Scots pine stands is currently mostly used in Fennoscandia (e.g., Marcos et al. 2007; Ruuska et al. Axelsson et al. 2014). Ecological and environmental benefits of shelterwood regeneration include maintaining the protective function of the parent stand which lowers temperature extremes and prevent drying out of soil in the summer months (Nilsson et al. 2002; Matías, Jump 2012) and restricts the competition of ground vegetation (Paluch, Bartkovicz 2004; Erefur et al. 2008). Moreover, trees being established under the shelter of parent stand show lower increment and higher share of latewood in the annual ring, which correlates with the increasing wood density (Makinen and Hynynen 2014). Beside this, higher wood quality is further supported by formation of branches of lower diameter with better natural pruning of stems (Auty and Achim 2008). By understanding the influence of silvicultural measures such as forest regeneration and thinning on the properties of wood, it is possible to develop a silvicultural model for a specific final wood quality for different localities (Mörling 2002; Zobel and Buijtenen 1989). The quality of wood is extremely important for the industry and subsequent utilisation of wood. This term may be perceived in different way depending on the technology of processing and applications. For the industry, the qualitative parameters usually mean the proportion of the heartwood, wood density, amount of defects and especially mechanical properties (utilisation in constructions), i.e. strength and stiffness (Kurjatko 2010).

The aim of this work was to provide information on the impact of the group shelterwood and clearcut regeneration method on wood properties of Scots pine. The clearcutting method represents a regeneration of an even-aged stand in which a new age class develops in a fully exposed microclimate after removal, in a single harvest operation, of all trees in the previous stand, whereas in shelterwood method a new age class develops beneath the moderated microenvironment provided by the residual trees (Adams et al. 1994). Our primary hypothesis is that wood of pine regenerated via the shelterwood method will reach higher values of the

investigated properties compared to the clearcutting method. The second hypothesis assumes that the properties of wood will have a more even distribution along trunk radius in the case of shelterwood method. Wood bending strength and modulus of elasticity are used as wood quality parameters for assessing the differences between the regeneration methods. Radial within-stem variation of the tested properties, their correlation to wood density and potential of non-destructive methods to assess stiffness are part of the study.

Materials and methods

Materials

The research was conducted in four localities representing typical areas of Scots pine silviculture in the Czech Republic. The research localities cover the area of western, northern, southern and eastern Bohemia (Fig. 1). Average annual normal precipitation ranged from 550 mm (Plasy) to 770 mm (Chvojnó). In Trebon and Doksy Localities, the average annual sum of precipitation amounts to 650–670 mm. The average annual temperature is the lowest in Plasy (6–7 °C) and the highest in Doksy (8–8.5 °C). Table 1 shows the basic stand and habitat conditions for the given sites. In all cases, these were areas in flat terrain and with a dominant presence of Scots pine in forest stands.

Two stands were selected at each site, the first representing a clearcutting regeneration method and a second the group shelterwood regeneration method. In the first case, the stands were regenerated in blocks of a size of predominantly 0.2 ha to 1.0 ha. According to the minimal requirements for plantation densities in the Czech Republic (Act on Forests No. 289/1995 Coll.; Regulation No. 139/2004 Coll.), the initial plantation density of these stands was superior to

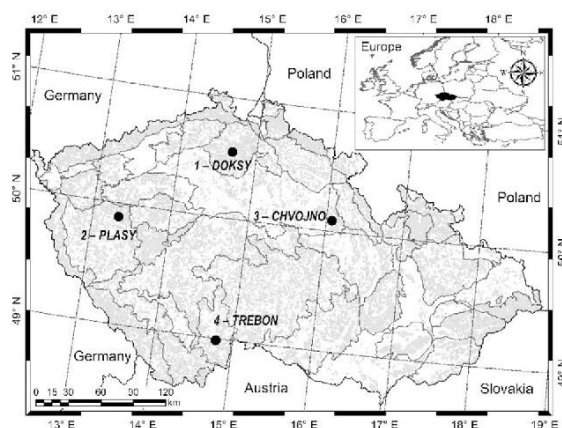


Fig. 1 Location of study areas in the Czech Republic

Table 1 Basic site and stand characteristics (stand summary characteristics according to management plan)

	Locality	Regeneration method	Cambial age*	Height** (m)	DBH*** (cm)	GPS (WGS-84)	Altitude (m a.s.l)	Soil type****	Forest site type
1	Doksy	clearcut	37	17	16	50°33'58.668"N, 14°40'17.575"E	270	Podzol Arenic	<i>Pinetum acidophilum</i>
		Shelterwood	31	12	14	50°34'20.084"N, 14°41'9.485"E	270	Podzol Arenic	<i>Pinetum acidophilum</i>
2	Plasy	Clearcut	27	12	13	49°55'13.846"N, 13°14'42.748"E	530	Gleyic Podzol	<i>Querceto-Abietum oligotrophicum</i>
		Shelterwood	25	11	12	49°55'35.827"N, 13°14'2.424"E	580	Gleyic Podzol	<i>Querceto-Abietum oligotrophicum</i>
3	Chvojno	Clearcut	40	21	22	50°3'21.354"N, 16°8'52.095"E	270	Cambisol Arenic	<i>Fageto-Quercetum acidophilum</i>
		Shelterwood	34	10	12	50°3'18.602"N, 16°8'59.047"E	270	Cambisol Arenic	<i>Fageto-Quercetum acidophilum</i>
4	Trebon	Clearcut	40	12	11	48°50'10.268"N, 14°56'33.539"E	470	Podzol Arenic	<i>Pinetum acidophilum</i>
		Shelterwood	32	11	10	48°50'13.280"N, 14°56'22.976"E	470	Podzol Arenic	<i>Pinetum acidophilum</i>

*Based on number of annual rings in DBH

**Average height for Scots pine according to Forest management plan

***Average breast-height diameter for Scots pine according to Forest management plan

****According to Viewegh et al. (2012)

9,000 ind.ha⁻¹. Before these stands reached the top height of 15 m, usually two thinning treatments were carried out to decrease the density to 3,500–4,000 ind.ha⁻¹. From the very beginning, the sample trees from clearcut regenerated stands have been growing in an open area in a one-storey even-aged stand. In the second case, regeneration appeared under the shelter of the parent stand with a long regeneration period. In these forest stands, a felling policy was carried out with the objective to support natural regeneration and create a complex forest structure. Here, abrupt cover releases were strictly rejected. The ongoing regeneration period ranges from 30 to 50 years (initial densities in the 0.25 m–4.0 m height class ranged from 5,000 to 20,000 ind.ha⁻¹). In all of the shelterwood stands, the overstory is still present in different stages of final felling. The stands density range from 30 to 50% of full stocking and rotation period ranges from 100 to 150 years.

A total of 7 sample trees were selected from each stand, representing the respective regeneration method, from which the test material was made. An important criterion for selecting samples was the representation of characteristic individuals for the given stand, their vitality and the absence of growth irregularities and defects.

Methods

After cutting, a section for the preparation of mechanical test specimens was taken from each of the sample trees. The length of the section was 150 cm and it was cut from the trunk base (Fig. 2). Subsequently, a disc was also taken from each section (at the height of 150 cm) for annual ring analyses and for determining a density profile in the radial direction. The sections were then cut into balk on a band saw. From the balks, 20 × 20 mm laths were cut, starting from the area close to the pith and continuing to the bark. Such a sampling method makes it possible to follow the distribution of the examined properties along the trunk diameter (Fig. 2). The lath was cut up to the clear wood test specimens for mechanical properties. The length of the test specimens was 300 mm and the cross section of the specimens was 20 × 20 mm. The test specimens for the density determination were cut up from the ends of the specimens for mechanical tests. The length of the testing samples for density evaluation was 30 mm and the cross section of the specimens was 20 × 20 mm. The test specimens were manufactured so that each sample had clearly-defined radial and tangential area. For more details see section position, lathes positions and test specimen preparation in Fig. 2.

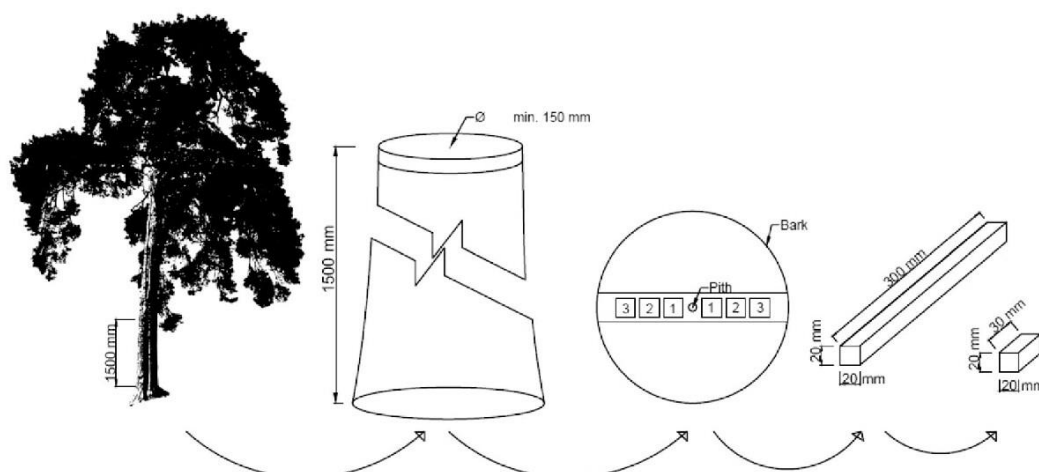


Fig. 2 Cutting diagram for test specimen preparation

To ascertain the quality of Scots pine wood, when using the relevant regeneration method, the mechanical properties of the wood were evaluated, both via destructive and non-destructive methods. Wood density was also evaluated. Samples for mechanical and physical testing were conditioned to 12% equilibrium moisture content under air temperature conditions of 20 °C (± 2 °C) and relative air humidity of 65% ($\pm 5\%$). Dynamic modulus of elasticity was determined on 432 specimens, static modulus of elasticity on 509 specimens, and bending strength was determined on 509 specimens.

Mechanical properties testing

The dynamic modulus of elasticity was determined via a non-destructive method using the following formula (Moavenzadeh and Cahn 1990):

$$MOE_{dyn} = v^2 \cdot \rho [MPa]. \quad (1)$$

where MOE_{dyn} is dynamic modulus of elasticity [MPa], v is the sound wave velocity [$m \cdot s^{-1}$], ρ is wood density [$kg \cdot m^{-3}$].

Measurements were made using a Fakopp Ultrasonic Timer with a frequency range of 15 kHz to 300 kHz. In this experiment, 45-kHz piezo-electric triangle shaped transducers for transmitting and receiving were used.

The static modulus of elasticity (MOE) was determined destructively according to standard ČSN 49 0116:

$$MOE = \frac{\Delta F_{max} \cdot l_o^3}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot \Delta y} [MPa], \quad (2)$$

where F_{max} is the difference in load forces at 10% and 40% of the total load [N], l_o is the distance of support centres [mm], b is the width of the test specimen [mm] (width of the radial area), h is the height of the test specimen [mm] (width of the tangential area), Δy is the difference in deflection (deformation) at 10% and 40% of the total load [N].

The static modulus of elasticity and bending strength were determined on test machine Tira 2850 (Tira GmbH, Schalkau, Germany) at a distance of supports 240 mm, i.e. 12 times the height of the test specimen.

The determination of bending strength (σ) was in accordance with standard ČSN 49 0115:

$$\sigma = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot l_o}{2 \cdot b \cdot h^2} [MPa], \quad (3)$$

where F_{max} is the maximum load force [N], l_o is the distance of support centres [mm], b is the width of the test specimen [mm] (width of the radial area), h is the height of the test specimen [mm] (width of the tangential area).

Wood density evaluation

From physical characteristics, the wood density was determined. The specimen dimensions for density determination were $20 \times 200 \times 30$ mm. Wood density ρ was determined in accordance with ČSN 49 0108:

$$\rho = \frac{m}{V} [g \cdot cm^{-3}] \quad (4)$$

where m is the weight of the specimen [g], V is the volume of the specimen [cm^{-3}].

Wood density was also determined via the densitometric method, which serves to explain the radial trend of wood

density distribution in the trunks of the tested trees. The detailed results of these analyses are the subject of another study (Schönfelder et al. 2020); in this paper, only illustrative images are used in the discussion to better understand the impact of the regeneration method on the studied variables.

Annual ring analysis

Discs were polished and scanned on an A3 desktop scanner at a resolution of 800 DPI. Using the measurement function in the NIS Elements AR 4.11 image analysis software (Laboratory Imaging, Czech Republic), the annual ring width was measured in millimetres.

Statistical analysis

To evaluate the impact of regeneration methods on the tested properties, we used the analysis of variance—ANOVA (Fisher’s F—test) and Duncan’s multiple comparison tests to evaluate the statistical significance of the individual factors. Two-way analysis of variance with fixed effects was employed. The significance level $\alpha=0.05$ was the same for all statistical analyses. The evaluated factors were the regeneration method and the individual localities that were used as a repetition to make the results conclusive irrespective a site. We also tested the effect of within-stem position in radial direction. A linear regression model was used to assess the effect of density on the bending strength and elasticity characteristics. The linear regression model was also used to assess relationship between static modulus of elasticity and bending strength on dynamic modulus of elasticity, which was determined in a non-destructive manner. Statistical analyses were carried out using STATISTICA 13.2 (Statsoft Inc., USA).

Results

Dynamic modulus of elasticity

Higher values for the dynamic modulus of elasticity were achieved at all localities for stands regenerated via the clearcutting method (Table 2). Only location 3 showed differences in the dynamic modulus of elasticity between the two regeneration methods (Fig. 3). However, none of the localities with a higher dynamic modulus of elasticity value caused due to the regeneration method proved to be statistically significant ($P>0,05$), see Table 6 and Table 7.

Static modulus of elasticity

In all of the localities, the static modulus of elasticity achieved higher values for the shelterwood method of forest regeneration (Table 3). However, the difference between the stands is virtually negligible in practical

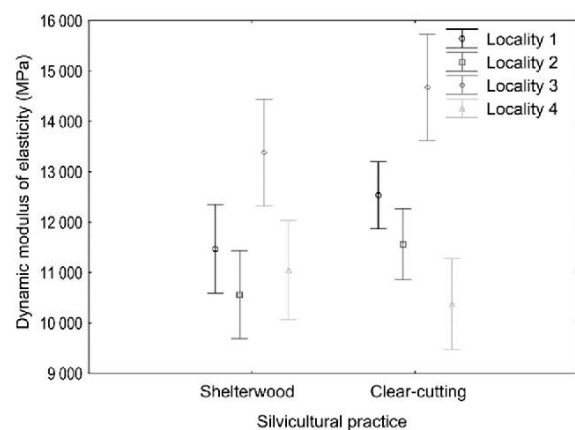


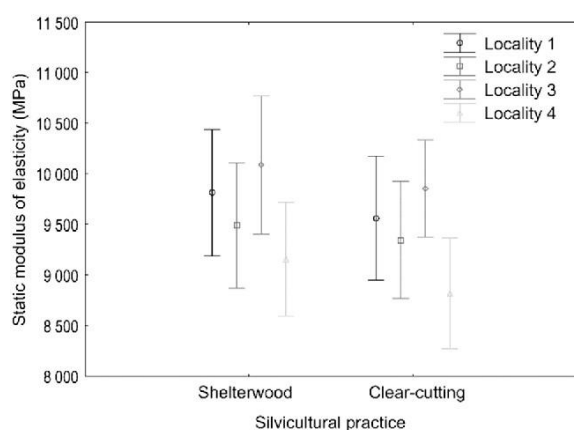
Fig. 3 Impact of site and regeneration method on dynamic modulus of elasticity (ANOVA results)

Table 2 Dynamic modulus of elasticity (in MPa) of individual localities and regeneration method—Descriptive statistics

Locality	Regeneration method	Mean	Minimum	Maximum	Standard deviation	Coefficient of variation (%)	Number of specimens
1	Shelterwood	11,471	6693	18,765	3021	26.3	55
	Clearcutting	12,535	5626	22,737	3423	27.3	62
2	Shelterwood	10,562	4672	17,927	3056	28.9	56
	Clearcutting	11,611	6156	18,447	3009	25.9	64
3	Shelterwood	13,378	9199	19,410	2755	21.8	38
	Clearcutting	14,688	10,839	17,651	2068	14.8	40
4	Shelterwood	11,049	4228	17,198	3960	35.6	39
	Clearcutting	10,374	3825	22,309	4648	47.9	42

Table 3 Static modulus of elasticity (in MPa) of individual localities and regeneration method—descriptive statistics

Locality	Regeneration method	Mean	Minimum	Maximum	Standard deviation	Coefficient of variation (%)	Number of specimens
1	Shelterwood	9814	5391	13,773	2133	21.7	55
	Clearcutting	9559	5014	13,315	2283	24.3	57
2	Shelterwood	9490	5709	14,125	2192	23.1	56
	Clearcutting	9421	5011	15,665	2449	26.0	64
3	Shelterwood	10,150	4086	14,420	2113	20.8	46
	Clearcutting	9854	4589	16,094	2594	27.9	93
4	Shelterwood	9156	4316	12,968	2328	25.4	67
	Clearcutting	8818	3340	13,356	2356	26.7	71

**Fig. 4** Impact of site and regeneration method on modulus of elasticity (ANOVA results)

terms. The stand regenerated via the shelterwood method achieves higher values than stands regenerated via the clearcutting method in all of the study localities (Fig. 4). However, none of these higher elasticity values due to regeneration method proved to be statistically significant at any of the localities ($P > 0.05$), see Tables 8 and 9.

Table 4 Bending strength (in MPa) of individual localities and regeneration method—descriptive statistics

Locality	Regeneration method	Mean	Minimum	Maximum	Standard deviation	Coefficient of variation (%)	Number of specimens
1	Shelterwood	75	44	94	10	12.9	55
	Clearcutting	74	54	94	10	13.3	57
2	Shelterwood	73	52	91	10	13.5	56
	Clearcutting	73	37	106	13	17.6	64
3	Shelterwood	84	49	108	13	15.7	46
	Clearcutting	80	25	117	20	26.6	93
4	Shelterwood	81	33	112	19	23.4	67
	Clearcutting	79	46	112	17	22.1	71

Bending strength

Although it seems that the bending strength reached higher values in forest stands managed by shelterwood method in the all localities (Table 4), there was not any striking difference in the bending strength between applied methods in the case of the all localities (Fig. 5). The impact of the regeneration methods on the tested property was again not statistically significant, like in the case of the previous properties ($P > 0.05$), see Tables 10 and 11.

Correlations between the tested properties

The dependence of strength and elasticity characteristics of wood on wood density was investigated at all of the localities. The bending strength of wood exhibits higher correlation coefficient values than the static modulus of elasticity. A close relationship between the strength properties and wood density was found (Fig. 6).

The dependence of the bending strength and static modulus of elasticity on the dynamic modulus of elasticity was also investigated. As with the dependence of these characteristics on density, the dependency of the studied characteristics on the dynamic modulus of elasticity was higher for the shelterwood method (Fig. 7). On the basis of the results, it can be stated that with increasing density

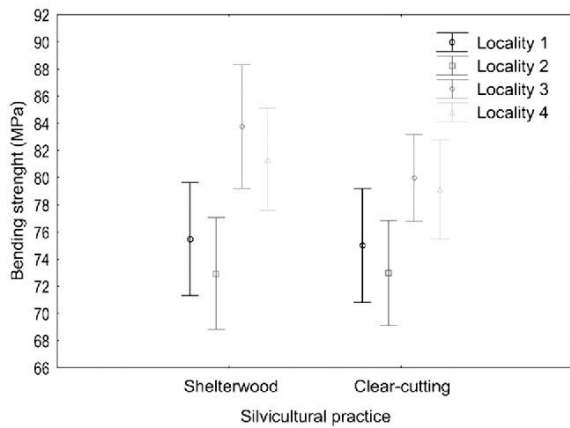


Fig. 5 Impact of site and regeneration method on bending strength (ANOVA results)

and dynamic modulus, the bending strength of the wood also increases. Although non-destructive testing methods using sound wave velocity usually better describe material characteristics than density, no significant difference was found between the correlations of the tested properties to density and to the dynamic modulus of elasticity.

Effect of position

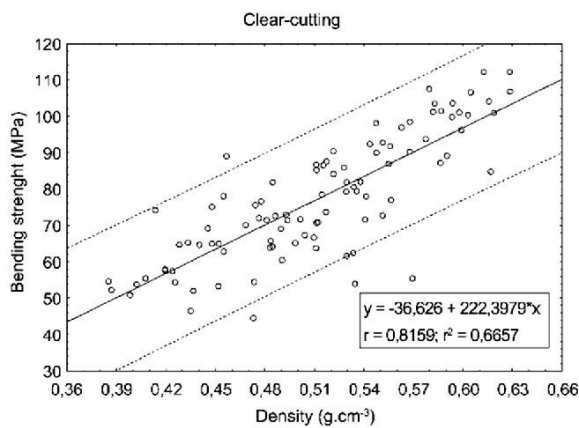
The influence of the regeneration method on the course of wood properties in the radial direction, from the centre of the trunk to its circumference is shown in Fig. 8. It is clear that the stands regenerated via the clearcutting method show a clear trend of increasing density from the pith to

the cambium. Adversely, the shelterwood forest regeneration method exhibits uniform distribution of wood properties across the trunk radius. A similar trend of distribution of wood properties along the diameter of the trunk was also found with the strength and elastic characteristics of the examined wood.

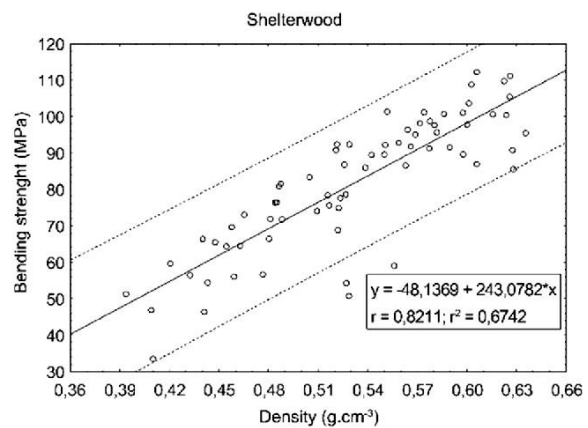
Figure 9 shows the results of the annual ring analysis from all samples and Fig. 10 shows an illustrative densitometric record for a better understanding of the distribution of the investigated properties along the trunk diameter. It is clear from both graphs that stands regenerated via the shelterwood method achieve lower annual ring widths at an early stage of growth. After shelterwood felling was carried out, the annual ring width increases and then drops again. Stands regenerated via the clearcutting method show a different course of annual ring thickness over the trunk width. In such regenerated stands, there is a gradual reduction in the annual ring thickness towards the cambium until it is almost stable.

Discussion

In Nordic countries, where Scots pine plays the role of the most important commercial tree species, regardless of the applied regeneration method, in most cases a higher value of strength and modulus of elasticity are reported (Aleinikovas and Grigaliūnas 2006; Kask 2015). Results similar to those of the Nordic countries were described in the conditions of Central Europe (Tsoumis 1991; Wagenführ 2000). In the Czech Republic, Hassan et al. (2013) reported strength characteristic values comparable to our measurements; however,



(a)



(b)

Fig. 6 Relationship between density and bending strength in relation to regeneration method in Locality 4 (a clearcutting method, b shelterwood method)

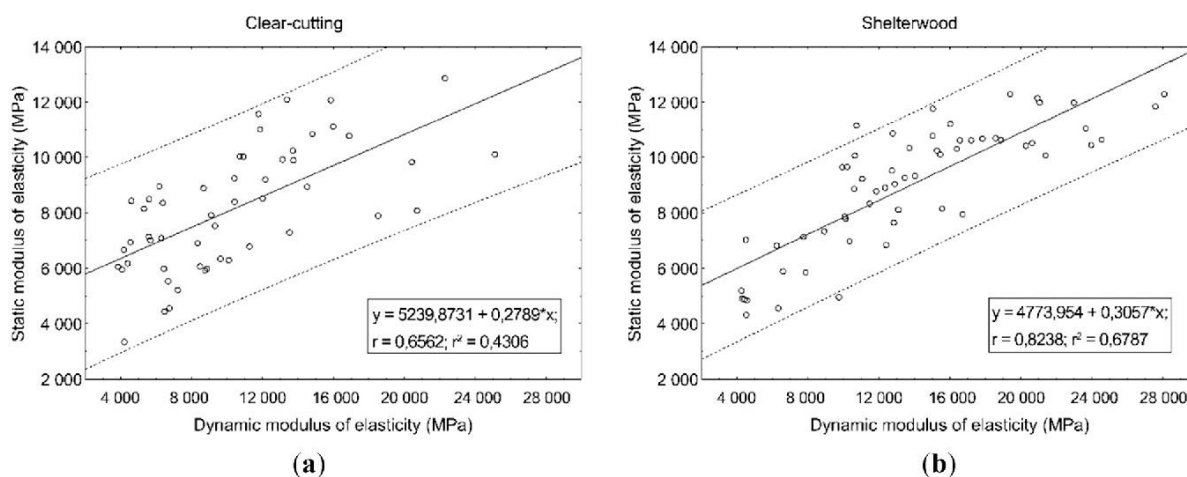


Fig. 7 Relationship between static modulus of elasticity and dynamic modulus of elasticity in relation to regeneration method in Locality 4 (**a** clear-cutting method, **b** shelterwood method)

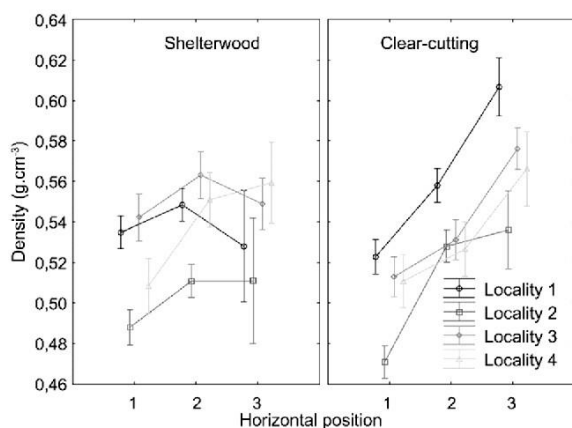


Fig. 8 Impact of regeneration method on the distribution of wood density in the radial position

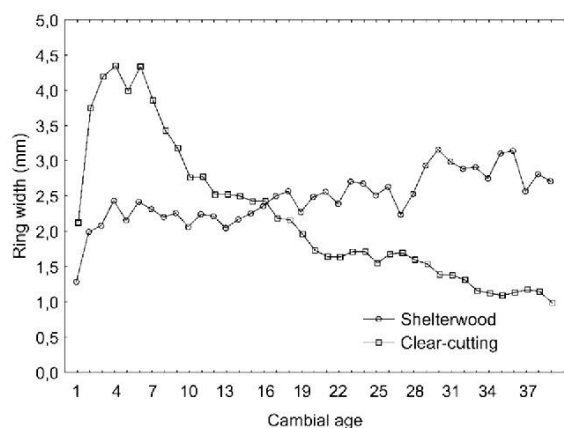


Fig. 9 Changes in ring width with the cambial age of the tree in relation to regeneration methods

Novák (1970) and Požgaj et al. (1993) achieved higher values. The ascertained data (Table 5) fall into the interval of values of dynamic modulus of elasticity specified by Horáček et al. (2012). Lower strength characteristic values than those specified in literature are caused by the low age of the investigated trees, which is significantly lower than the usual felling age of Scots pine in the Czech Republic. It can be assumed that with increasing tree age, the strength characteristics will also increase.

As a part of the experiment, aimed at an assessing the effect of regeneration method, the influence of a localities on wood properties was also investigated. Strength and elasticity properties were the highest at the Locality 3 from this point of view. Although a statistically significant difference

was confirmed among the localities, from a practical point of view, differences in strength values are negligible. A statistically significant influence of the site on wood properties was found by Zobel and Buijtenen (1989), Jelonek et al. (2005), Tomczak and Jelonek (2013) and Hautamäki et al. (2014).

The impact of the regeneration method did not appear as a factor in most of the examined strength characteristics that would significantly affect the properties of the wood. However, even this difference is negligible for the final processing of wood. Auty and Achim (2008) found that increased tree competition due to dense natural regeneration contributed to a slower growth rate. The indirect effect of slower growth in naturally regenerated stands is the fact that increased competition at the onset of tree growth leads to the

Fig. 10 Densitometric record—effect of regeneration method on wood density (shelterwood method top, clearcutting method bottom)

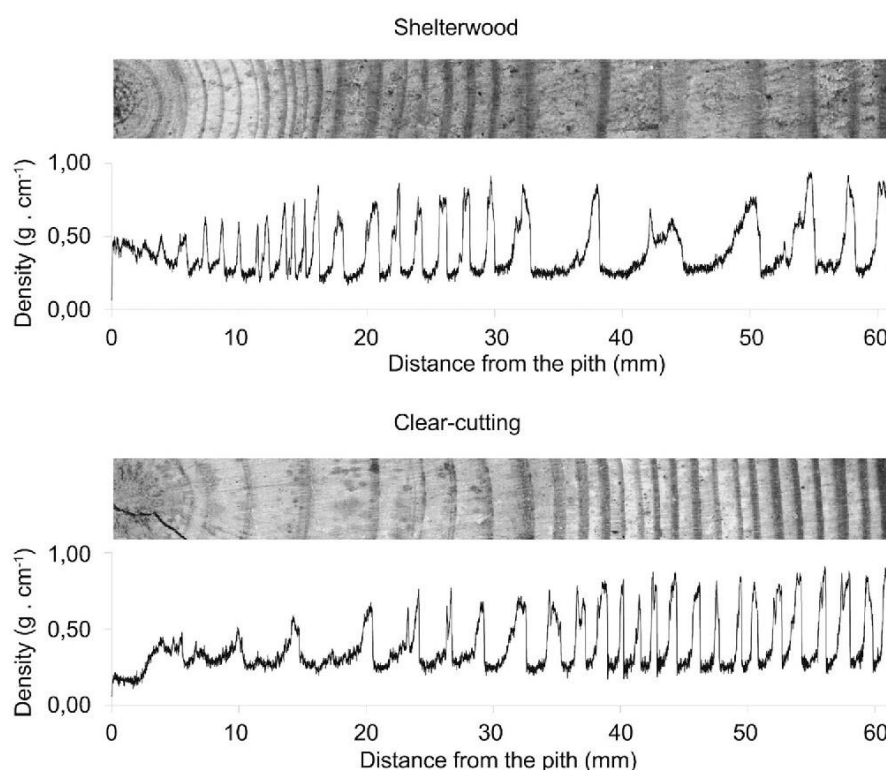


Table 5 Comparison of the results of Scots pine with various authors

	Bending strength (MPa)	MOE (MPa)	MOE _{dyn} (MPa)	Density (kg.m ⁻³)
Shelterwood—this study	78	9652	11,755	523
Clearcutting—this study	75	9233	12,224	517
Novák (1970)	100	12,000		520
Tsoumis (1991)	98	11,760		530
Wagenführ (2000)	80	12,000		510
Požgaj et al. (1993)	100.1	10,620		
Kask (2015)	97–100	10,900		
Aleinikovas and Grigaliūnas (2006)	78–98			572–586
Hassan et al. (2013)	74	9015	11,805	453.4
Horáček et al. (2012)			7141–13,000	

creation of a smaller heartwood on the trunk. Mörling and Valinger (1999) report that the number of annual rings in heartwood is almost fixed, but the percentage representation of heartwood in the trunk is due to the growth of the tree at a young age. The slower growth of stands regenerated via the shelterwood method results in homogenous distribution of wood properties along the trunk width. For the final processing of wood, it is thus not as important to know from which part of the trunk the wood comes. Stands regenerated naturally are characterised by higher values of the investigated

properties near the pith. This trend can be explained by the small annual ring width in the trunk centre. However, after partial overstory removal, the annual ring width starts to increase, which is reflected in the decrease of wood properties. The decrease in the examined strength characteristics of wood due to the increasing annual ring width is described by Mörling and Valinger (1999) and Gryc et al. (2011). The stands regenerated via the shelterwood method in Locality 2 do not show such an obvious even distribution of the properties compared to naturally regenerated stands. This trend was

caused by the early shelterwood felling, where the growth of the stand increased because of increased amount of radiation. The difference in the resulting strength characteristics between the stands with different regeneration method was low, and it is, therefore, questionable whether such small differences in property values have a significant effect on the final processing of wood.

The clearcutting forest regeneration method shows a completely different trend compared to group shelterwood regeneration method. The wood with the lowest values of properties is located in the centre of the trunk, and in the direction from the pith, the examined properties of the wood increase. The annual ring width trend explains to some extent the course of the properties of the stands regenerated in this manner. The influence of the annual ring width on wood properties was described by Kollmann (1951) or Tsoumis (1991). Barnett and Jeronimidis (2003) state that increased wood growth rate leads to a higher proportion of juvenile wood, which negatively affects the properties of the wood in the centre of the trunk (Auty et al. 2016; Macdonald and Hubert 2002; Moore et al. 2017).

The results of regression dependencies point to a high correlation of strength and elasticity characteristics in the dynamic modulus of elasticity. The strong relationship ($r=0.74$) between the dynamic module and bending strength is confirmed, for example, by Horáček et al. (2012). Based on this information, the resulting wood properties values can be predicted without the use of destructive tests. The influence of wood density on the bending strength of wood was less pronounced compared to the dynamic elasticity module. Wood density may not reveal hidden wood defects, but acoustic methods are much more reliable for predicting the resulting properties. Similar results from the use of acoustic methods were also found by Auty and Achim (2008).

In conclusion, it should be noted that in our research we investigated the effect of given silvicultural approach on mechanical properties of wood without taking into account other advantages and disadvantages of both regeneration methods. From ecological point of view there are many studies that confirm the benefits of group shelterwood regeneration method mainly with respect to microsite characteristics (Giuggiola and 2013) and stability of forest stands as result of their higher structural heterogeneity (Spathelf et al. 2015).

Conclusions

The primary hypothesis that pine wood regenerated by the shelterwood method will reach higher values of the investigated properties compared to the clearcutting method was not confirmed. It was, therefore, necessary to accept the alternative hypothesis, that the properties are almost identical regardless of the regeneration method. This is quite a surprising result even with regard to the lower age of the studied trees.

The secondary hypothesis that the properties of wood will have a more even distribution along radius in the case of the shelterwood method was confirmed, and it is such the most important benefit in terms of utilisation of logs grown in this way in the woodworking industry.

The trunks from the stands regenerated through the clearcutting method exhibited an increasing trend in wood properties from the pith to the cambium. Therefore, the radial within-stem position played an important role in the terms of properties and consequent utilization. On the other hand, trees regenerated through the shelterwood method had a uniform distribution of characteristics along the trunk width. From the view of wood processing industry it is thereby not important which part of the trunk is used in this case.

The non-destructive methods for detecting of dynamic modulus of elasticity can be used as a reliable indicator of strength properties, based on the confirmed high correlation with bending strength and static modulus of elasticity.

Author contribution statement OS, AZ, VB and LB: designed the research and wrote manuscript. AZ, VB and LB: performed data analysis, contributed to data description and reviewed manuscript. JV: provided data and reviewed manuscript. All authors read and approved the manuscript.

Appendix

See Tables 6, 7, 8, 9, 10 and 11.

Table 6 Tests of significance for dynamic modulus of elasticity

Effect	SS	DF	MS	F	<i>p</i>
Intercept	5.130E+10	1	5.130E+10	4635.359	0.000
Locality	6.368E+08	3	2.122E+08	19.179	0.000
Silvicultural practice	1.739E+07	1	1.739E+07	1.571	0.210
Locality*Silvicultural practice	1.0487E+08	3	3.494E+07	3.157	0.024
Error	4.150E+09	388	1.106E+07		

Error: Between *MS* mean squares, *DF* degrees of freedom, *SS* sum of squares, *F* Fisher's test, *p* significant level

Table 7 Duncan's multiple range test for dynamic modulus of elasticity

		MS = 11,068,000							
		L1	L1	L2	L2	L3	L3	L4	L4
DF = 388		S	C	S	C	S	C	S	C
L1	S								
L1	C	0.527							
L2	S	0.444	0.187						
L2	C	0.737	0.732	0.299					
L3	S	0.051	0.149	0.007*	0.091				
L3	C	0.004*	0.021*	0.000*	0.010*	0.332			
L4	S	0.782	0.391	0.588	0.567	0.030*	0.002*		
L4	C	0.150	0.046*	0.442	0.087	0.000*	0.000*	0.218	

*Values are significant at $p < 0.05$. Error: Between MS mean squares, DF degrees of freedom, L Locality, S Shelterwood, C Clearcutting

Table 8 Tests of significance for static modulus of elasticity

Effect	SS	DF	MS	F	<i>p</i>
Intercept	4.433E+10	1	4.433E+10	8016.692	0.000
Locality	6.826E+07	3	2.275E+07	4.114	0.006
Silvicultural practice	7.202E+06	1	7.202E+06	1.302	0.254
Locality*Silvicultural practice	6.136E+05	3	2.045E+05	0.037	0.990
Error	2.770E+09	501	5.531E+06		

Error: Between MS mean squares, DF degrees of freedom, SS sum of squares, F Fisher's test, *p* significant level

Table 9 Duncan's multiple range test for static modulus of elasticity

		MS = 5,531,000							
		L1	L1	L2	L2	L3	L3	L4	L4
DF = 501		S	C	S	C	S	C	S	C
L1	S								
L1	C	0.549							
L2	S	0.476	0.869						
L2	C	0.323	0.640	0.736					
L3	S	0.548	0.263	0.216	0.130				
L3	C	0.925	0.518	0.443	0.296	0.582			
L4	S	0.173	0.395	0.464	0.665	0.058	0.156		
L4	C	0.038*	0.123	0.152	0.244	0.008*	0.033*	0.426	

*Values are significant at $p < 0.05$. Error: Between MS mean squares, DF degrees of freedom, L Locality, S Shelterwood, C Clearcutting

Table 10 Tests of significance for bending strength

Effect	SS	DF	MS	F	<i>p</i>
Intercept	2,924,868	1	2,924,868	11,864.22	0.000
Locality	6364	3	2121	8.61	0.000
Silvicultural practice	311	1	311	1.26	0.262
Locality*Silvicultural practice	274	3	91	0.37	0.774
Error	122,771	501	247		

Error: Between MS mean squares, DF degrees of freedom, SS sum of squares, F Fisher's test, *p* significant level

Table 11 Duncan's Multiple Range Test for Bending Strength

MS=246.53		L1	L1	L2	L2	L3	L3	L4	L4
DF=501		S	C	S	C	S	C	S	C
L1	S								
L1	C	0.872							
L2	S	0.426	0.497						
L2	C	0.414	0.476	0.987					
L3	S	0.008*	0.005*	0.000*	0.000*				
L3	C	0.135	0.112	0.028*	0.026*	0.214			
L4	S	0.058	0.046*	0.008*	0.007*	0.397	0.633		
L4	C	0.199	0.174	0.051	0.047*	0.140	0.764	0.468	

*Values are significant at $p < 0.05$. Error: Between MS mean squares, DF degrees of freedom. L Locality, S Shelterwood, C Clearcutting

Acknowledgements The authors are grateful to Forests of the Czech Republic, state enterprise, and Municipal forests of Doksy for kindly providing us with the testing material.

Funding The research was supported by the Ministry of Agriculture of the Czech Republic [project number QJ1520037 – „Increasing the adaptability of pine (*Pinus sylvestris* L.) silviculture in the conditions of the Czech Republic “] and by Internal Grant Agency of the Faculty of Forestry and Wood Sciences [A03/18].

Compliance with ethical standards

Conflict of interest The authors declare no conflict of interest.

References

- Act No 289/1995 Coll., Forest Act, as amended (in Czech Zákon č. 289/1995 Sb. o lesích a o změně a doplnění některých zákonů), Prague, Ministry of Agriculture, Czech Republic.
- Adams DL, Hodges JD, Loftis DL, Long, JN; Seymour RS; Helms JA. (1994) Silviculture Terminology with Appendix of Draft Ecosystem Management Terms. Silviculture Instructors Subgroup of the Silviculture Working Group of the Society of American Foresters. Available online: http://oak.smr.missouri.edu/silviculture/silviculture_terminology.htm (accessed on 15 August 2020).
- Agestam E, Ekö PM, Johansson U (1998) Timber quality and volume growth in naturally regenerated and planted Scots pine stands in S.W. Sweden. Swedish Univ. of Agricultural Sciences, Uppsala
- Aleinikovas M, Grigaliūnas J (2006) Differences of Pine (*Pinus sylvestris* L.) Wood Physical and Mechanical Properties from Different Forest Site Types in Lithuania. *Bal For* 12:9–13
- Auty D, Achim A (2008) The relationship between standing tree acoustic assessment and timber quality in Scots pine and the practical implications for assessing timber quality from naturally regenerated stands. *Forestry* 81:475–487. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpn015>
- Auty D, Achim A, Macdonald E, Cameron AD, Gardiner BA (2016) Models for Predicting Clearwood Mechanical Properties of Scots Pine. *For Sci* 62:403–413. <https://doi.org/10.5849/forsci.15-092>
- Axelsson EP, Lundmark T, Högberg P, Nordin A (2014) Belowground Competition Directs Spatial Patterns of Seedling Growth in Boreal Pine Forests in Fennoscandia. *Forests* 5:2106–2121
- Barnett JR, Jeronimidis G (2003) Wood quality and its biological basis. Blackwell, USA
- Bolte A, Ammer C, Löf M, Madsen P, Nabuurs GJ, Schall P, Spathelf P, Rock J (2009) Adaptive forest management in central Europe: Climate change impacts, strategies and integrative concept. *Scand J For Res* 24:473–482. <https://doi.org/10.1080/02827580903418224>
- Brang P, Spathelf P, Larsen JB, Bauhus J, Boncina A, Chauvin C, Drossler L, Garcia-Guemes C, Heiri C, Kerr G, Lexer MJ, Mason B, Mohren F, Muhlethaler U, Nocentini S, Svoboda M (2014) Suitability of close-to-nature silviculture for adapting temperate European forests to climate change. *Forestry* 87:492–503. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpu018>
- Churchill DJ, Larson AJ, Dahlgreen MC, Franklin JF, Hessburg P, Lutz JA (2013) Restoring forest resilience: from reference spatial patterns to silvicultural prescriptions and monitoring. *For Ecol Manage* 291:442–457. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.11.007>
- ČSN 49 0108. Drevo. Zisťovanie hustoty [Wood. Determination of the density], Czech Standards Institute: Prague, Czech Republic, 1993
- ČSN 49 0115. Drevo. Zisťovanie medze pevnosti v statickom ohybe [Wood. Determination of ultimate strength in flexure tests], Office for Standardization and Measurement: Prague, Czech Republic, 1979
- ČSN 49 0116. Drevo. Metóda zisťovania modulu pružnosti pri statickom ohybe [Wood. Determination of the modulus of elasticity in static bending], Office for Standardization and Measurement: Prague, Czech Republic, 1982
- Erefur Ch, Bergsten U, de Chantal M (2008) Establishment of direct seeded seedlings of Norway spruce and Scots pine: Effects of stand conditions, orientation and distance with respect to shelter tree, and fertilisation. *For Ecol Manage* 255:1186–1195
- FAKOPP Ultrasonic Timer (2019) User's guide. <https://fakopp.com/docs/products/ultrasonic/UltrasonicGuide.pdf>. Accessed 19 August 2019)
- Gryc V, Vavřík H, Horn K (2011) Density of juvenile and mature wood of selected coniferous species. *J For Sci* 57:123–130. <https://doi.org/10.11118/actaun200452040059>
- Hassan KS, Horáček P, Tippner J (2013) Evaluation of stiffness and strength of scots pine wood using resonance frequency and ultrasonic techniques. *Biores*. 8:1634–1645. <https://doi.org/10.15376/biores.8.2.1634-1645>
- Hautamäki S, Kilpeläinen H, Verkasalo E (2014) Factors and models for bending properties of sawn timber from Finland and North-Western Russia. Part II Scots Pine *Bal For* 20:142–156
- Hlásky T, Holuša J, Štěpánek P, Turčáni M, Šitková Z, Zajčková L (2011) Expected impacts of climate change on forests: Czech

- Republic as a case study. *J For Sci* 57:422–431. <https://doi.org/10.17221/103/2010-JFS>
- Hlásny T, Mátyás C, Seidl R, Kulla L, Merganičová K, Trombik J, Dobor L, Barcza Z, Konôpka B (2014) Climate change increases the drought risk in Central European forests: What are the options for adaptation? *Lesn Cas For J* 60:5–18. <https://doi.org/10.2478/forj-2014-0001>
- Horáček P, Tippner J, Hassan KS (2012) Nondestructive evaluation of static bending properties of scots pine wood using stress wave technique. *Wood Res* 57:359–366
- Ivković M, Gapare W, Wu H, Espinoza S, Rozenberg P (2013) Influence of cambial age and climate on ring width and wood density in *Pinus radiata* families. *Ann For Sci* 70:525–534. <https://doi.org/10.1007/s13595-013-0290-z>
- Jelonek T, Tomczak A, Jakubowski M, Pazdrowski W (2005) Properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) timber growing on former arable and forest land. *Acta Sci Pol Silv Colendar Rat Ind Lignar* 4:35–47
- Jiang ZH, Wang XQ, Fei BH, Ren HQ, Liu XE (2007) Effect of stand and tree attributes on growth and wood quality characteristics from a spacing trial with *Populus xiaohai*. *Ann For Sci* 64:807–814. <https://doi.org/10.1051/forest:2007063>
- JR, Cown DJ (2017) Corewood (Juvenile Wood) and Its Impact on Wood Utilisation. *Curr For Rep* 3:107–118. Doi: <https://doi.org/10.1007/s40725-017-0055-2>
- Kask R (2015) The influence of growth conditions on physico-mechanical properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood in Estonia. Estonian University of Life Sciences
- Kollmann F (1951) *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Berlin, Germany
- Kurjatko S (2010) Vlastnosti dreva ako parametre jeho kvality [Wood properties as a parameters of its quality]. Parametre kvality dreva určujúce jeho finálne použitie [Wood quality parameters determining its end use], 1st edn. TU Zvolen, Slovakia, pp 11–23
- Macdonald E, Hubert J (2002) A review of the effects of silviculture on timber quality of Sitka spruce. *Forestry* 75:107–138. <https://doi.org/10.1093/forestry/75.2.107>
- MACR (2016) Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství ČR v roce 2016 [Report on the State of Forest and Forestry in the Czech Republic 2016]. Ministry of Agriculture of the Czech Republic, Prague, p 443
- Makinen H, Hynynen J (2014) Wood density and tracheid properties of Scots pine: responses to repeated fertilization and timing of the first commercial thinning. *Forestry* 87:437–448. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpu004>
- Marcos JA, Marcos E, Taboada A, Tárrega R (2007) Comparison of community structure and soil characteristics in different aged *Pinus sylvestris* plantations and a natural pine forest. *For Ecol Manage* 247(1–3):35–42
- Matías L, Jump AS (2012) Interactions between growth, demography and biotic interactions in determining species range limits in a warming world: The case of *Pinus sylvestris*. *For Ecol Manage* 282:10–22
- Merlin M, Perot T, Perret S, Korboulewsky N, Vallet P (2015) Effects of stand composition and tree size on resistance and resilience to drought in sessile oak and Scots pine. *For Ecol Manage* 339:22–33. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.11.032>
- Moavenzadeh F, Cahn RW (1990) *Concise encyclopedia of building & construction materials*. Pergamon Press 1st edition, Michigan USA
- Moore JR, Cown DJ (2017) Corewood (Juvenile Wood) and Its Impact on Wood Utilisation. *Curr Forestry Rep* 3:107. <https://doi.org/10.1007/s40725-017-0055-2>
- Mörling T (2002) Evaluation of annual ring width and ring density development following fertilisation and thinning of Scots pine. *Ann For Sci* 59:29–40. <https://doi.org/10.1051/forest:2001003>
- Mörling T, Valinger E (1999) Effects of Fertilization and Thinning on Heartwood Area, Sapwood Area and Growth in Scots Pine. *Scan J For Res* 14:462–469. Doi: <https://doi.org/10.1080/02827589950154168>
- Nilsson U, Gemmel P, Johansson U, Karlsson M, Welander T (2002) Natural regeneration of Norway spruce, Scots pine and birch under Norway spruce shelterwoods of varying densities on a mesic-dry site in southern Sweden. *For Ecol Manage* 161:133–145
- Novák V (1970) *Dřevařská technická příručka* [Wood handbook]. Prague, Czech republic, Státní nakladatelství technické literatury
- Paluch JG, Bartkowiak LE (2004) Spatial interactions between Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), common oak (*Quercus robur* L.) and silver birch (*Betula pendula* Roth.) as investigated in stratified stands in mesotrophic site conditions. *For Ecol Manage* 192:229–240
- Peltola H, Kilpeläinen A, Sauvala K, Räisänen T, Ikonen VP (2007) Effects of early thinning regime and tree status on the radial growth and wood density of Scots pine. *Silva Fenn.* <https://doi.org/10.14214/sf.285>
- Požgaj A, Chovanec D, Kurjatko S, Babiak M (1993) *Štruktúra a Vlastnosti Dreva* [Structure and Properties of Wood], 1st edn. Príroda, Bratislava, Slovakia
- Pretzsch H, del Río M, Schütze G, Ammer C, Annighöfer P, Avdagic A, Barbeito I, Bielak K, Brazaitis G, Coll L, Drössler L, Fabrika M, Forrester DI, Kurylyak V, Löf M, Lombardi F, Matović B, Mohren F, Motta R, den Ouden J, Pach M, Ponette Q, Skrzyszewski J, Sramek V, Sterba H, Svoboda M, Verheyen K, Zlatanov T, Bravo-Oviedo A (2016) Mixing of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) enhances structural heterogeneity, and the effect increases with water availability. *For Ecol Manage* 373:149–166. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.04.043>
- Schönfelder O, Zeidler A, Borůvka V, Bílek L, Vítámvás J (2020) Effect of Shelterwood and Clear-Cutting Regeneration Method on Wood Density of Scots Pine. *Forests* 11(8):868. <https://doi.org/10.3390/f11080868>
- Regulation No. 139/2004 Coll., on transfer rules of seeds and forest tree plants, on origin registration of reproduction material, and details on forest regeneration, and afforestation of land designated for forest functions (in Czech Vyhláška č. 139/2004, kterou se stanoví podrobnosti o přenosu semen a sazenic lesních dřevin, o evidenci o původu reprodukčního materiálu a podrobnosti o obnově lesních porostů a o zalesňování pozemků prohlášených za pozemky určené k plnění funkcí lesa), Prague, Ministry of Agriculture, Czech Republic.
- Spathelf P, Bolte A, Maaten ECD (2015) Is Close-to-Nature Silviculture (CNS) an adequate concept to adapt forests to climate change? *Landbauforschung Appl Agric Forestry Res* 65:161–170. <https://doi.org/10.3220/LBF1452526188000>
- Tomczak A, Jelonek T (2013) Radial variation in the wood properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) grown on former agricultural soil. *For Res Pap* 74:171–177. <https://doi.org/10.2478/frp-2013-0017>
- Tsoumis GT (1991) *Science and technology of wood – structure, properties, utilization*. Verlag Kessel, Eifelweg, Germany
- Ulvcrona T, Ulvcrona KA (2011) The effects of pre-commercial thinning and fertilization on characteristics of juvenile clearwood of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Forestry* 84:207–219. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpr007>
- Vacek S, Vacek Z, Bílek L, Simon J, Remeš J, Hůnová I, Král J, Putalová T, Mikeska M (2016) Structure, regeneration and

- growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands with respect to changing climate and environmental pollution. *Silva Fenn* 50:1–21. <https://doi.org/10.14214/sf.1564>
- Vacek S, Vacek Z, Remeš J, Břek 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(5):1599–1617. <https://doi.org/10.1007/s00468-017-1572-0>
- Viewegh J, Kusbach A, Mikeska M (2012) Czech forest ecosystem classification. *J For Sci* 49:74–82. <https://doi.org/10.17221/4682-JFS>
- Vincent M, Krause C, Koubaa A (2011) Variation in black spruce (*Picea mariana* (Mill.) BSP) wood quality after thinning. *Ann For Sci* 68:1115–1125. <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0127-6>
- Wagenführ R (2000) *Holzatlas*, 5th edn. Fachbuchverlag, Leipzig, Germany
- Zobel BJ, Buijtenen JP (1989) *Wood Variation: Its Causes and Control*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Berlin, Germany

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Příloha 6: Effect of Shelterwood and Clear-Cutting Regeneration Method on Wood Density of Scots Pine

Article

Effect of Shelterwood and Clear-Cutting Regeneration Method on Wood Density of Scots Pine

Ondřej Schönfelder ¹, Aleš Zeidler ^{1,*} , Vlastimil Borůvka ¹ , Lukáš Bílek ² and Jan Vítámvas ³

¹ Department of Wood Processing and Biomaterials, Faculty of Forestry and Wood Sciences, Czech University of Life Sciences Prague, 165 00 Prague, Czech Republic; schonfelder@fld.czu.cz (O.S.); boruvkav@fld.czu.cz (V.B.)

² Department of Silviculture, Faculty of Forestry and Wood Sciences, Czech University of Life Sciences Prague, 165 00 Prague, Czech Republic; bilek@fld.czu.cz

³ Department of Forest Ecology, Faculty of Forestry and Wood Sciences, Czech University of Life Sciences Prague, 165 00 Prague, Czech Republic; vitamvas@fld.czu.cz

* Correspondence: zeidler@fld.czu.cz; Tel.: +420-224-383-742

Received: 9 July 2020; Accepted: 6 August 2020; Published: 10 August 2020



Abstract: With the gradual decline in the proportion of spruce as the most important tree species in the Czech Republic, the importance of pine will increase. The test material for this study was selected from two localities with important representation of pure Scots pine stands. Two stands, representing clear-cutting and shelterwood regeneration methods were selected from each locality. In the case of shelterwood method, tree samples from a lower layer were cut down and subsequently evaluated in terms of the impact of the regeneration method on the density of the wood, the density of earlywood and latewood, the proportion of latewood and the width of the annual rings. These qualitative parameters of the wood were compared before and after the release of the parent stand canopy. The clear-cutting regeneration method served as a reference. The values obtained before the release of the parent stand canopy are significantly different from values after its removal (share of latewood 47.7% and 48.1% before the release in contrast to 39.5% and 39.1% after the release for the locality 1 and the locality 2 respectively). The shelterwood regeneration method has not a significant impact on the overall investigated characteristics. Most significant was the impact of the regeneration method on the distribution of properties along the trunk radius, where the shelterwood method shows a uniform density distribution from the pith to the bark. From the view of industry, therefore, it is not important for the final processing which part of the trunk the wood comes from.

Keywords: *Pinus sylvestris* L.; silviculture; wood density; latewood; X-ray densitometry

1. Introduction

Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) is the second most important tree species in the Czech Republic from an ecological and production point of view [1]. Currently, the clear-cutting method of forest regeneration is mostly used in commercial pine stands [2]. However, due to climate change with many adverse effects on forest stands, alternative methods relying more on natural processes and fostering stand heterogeneity are being increasingly used. The shelterwood regeneration in pine stands is considered a promising approach in the Czech Republic [3]. The impact of applied silvicultural methods is most often manifested in the radial growth of a tree [4]. The radial growth of a tree in a forest stand is also influenced by the mutual interaction of competing trees and the conditions of the given environment [5]. Forest managers can influence certain factors, such as stand density, to achieve the required wood quality [4,6].

Wood density is considered to be one of the most important indicators of wood quality, which affects both the mechanical and physical properties of wood [7–9]. In general, wood formation and density may vary depending on habitat, tree species, genetics, climatic characteristics, physiological factors

and on silvicultural measures [5,7,10–14]. Wood density variability can also be observed inside the trunk [15]. The characteristics of the wood are closely linked to different types of trees, but are largely influenced by the surrounding environment, including the silvicultural measures carried out during the growth of the tree [16].

Thinning is a basic silvicultural treatment leading to increased tree growth due to higher availability of resources, which may result in a reduction of wood density in the annual ring [5,7]. Different values of annual ring wood density are mostly related to cambium activity and change with growing age [17]. In addition, the density of annual ring wood changes due to the proportion of latewood and earlywood [18]. Latewood shows a higher density value and earlywood usually reaches a higher percentage representation in the annual ring [7]. The density of earlywood remains almost constant throughout the growth of the tree, but the density of latewood increases with age [5,7,16]. The variability of wood density across the trunk cross section depends on the proportion of juvenile and mature wood [17], although the transition between juvenile and mature wood may be affected by intensive management [7]. Juvenile wood encompasses between few to several annual rings located in the central part of a stem. In contrast to mature wood, the juvenile xylem is characterised, among other things, by wider annual rings and lower participation of latewood, decreased density, shorter tracheids, and greater angle of inclination of fibrils in the cell wall [19,20]. Juvenile wood is regarded as one of the most important sources of variability within a trunk [21,22].

The aim of this study was to understand the impact of regeneration method on wood properties of Scots pine. We evaluated the annual ring widths, average density, density of latewood and earlywood and percentage of latewood for the shelterwood and the clear-cutting regeneration method. The evaluated parameters were investigated for the stem as a whole but also with respect to the time of release of the lower layer. The clear-cutting regeneration method served as a reference. Individual annual ring parameters were quantified using X-ray densitometry.

2. Materials and Methods

2.1. Materials

The test material came from two localities that are characteristic of the cultivation of Scots pine in the Czech Republic. In each locality two forest stands representing clear-cutting and shelterwood regeneration method were selected [23]. All stands used in this research were regenerated naturally.

Clear-cutting method in the conditions of the Czech Republic is usually realised in blocks of a size of predominantly 0.2 ha to 1.5 ha. Before the newly established stands reach the top height of 15 m, usually two thinning treatments are carried out in order to decrease the density to 3500–4000 ind.ha⁻¹. The sample trees from clear-cut regenerated stands have been growing from the very beginning in a single-layer even-aged stand.

In the second case, close-to-nature silviculture approach is applied with the objective to create a complex forest structure, support natural processes and decrease costs for thinning. Here, abrupt cover release is generally rejected. The ongoing regeneration period ranges from 30 to 50 years (initial densities in the 0.25 m–4.0 m height class usually range from 5000 to 20,000 ind.ha⁻¹). After the realised release cut the investigated forest stands consist of an upper layer (density 30–50%) and an advanced lower layer. The sample trees represent these understorey individuals. At the locality 1, the lower layer was released at the age of 24 years, at the locality 2 at the age of 34 years.

The material used for this study was taken from the Doksy region (locality 1) and Chvojno region (locality 2) (Table 1). The locality 1 is located in North-western Bohemia and the forest stands are owned by the Městské lesy Doksy, where average rainfall reaches 550 mm, the average temperature is between 7–8 °C and the altitude is up to 450 m above sea level. The locality 2 is located in West Bohemia and forest stands are owned by Lesy České republiky s.p. (Forests of the Czech Republic, state enterprise), where the average annual total precipitation reaches 680 mm, the average temperature is around 8 °C and the altitude reaches 362 m above sea level.

Table 1. Basic locality and stand characteristics (stand summary characteristics according to forest management plan).

Locality	Regeneration Method	Stand Size (ha)	GPS (WGS-84) *	Height ** (m)	Dbh *** (cm)	Average Age of Sample Trees ****	Altitude (m a.s.l.)	Site Index (m)	Soil Type	Forest Site Type *****
1	Clear-cutting	2.0	50°34'19.931" N, 14°41'7.245" E	17	16	37	270	24	Podzol Arenic	<i>Pinetum acidophilum</i>
	Shelterwood	0.9	50°34'20.035" N, 14°41'2.803" E	12	14	31	270	24	Podzol Arenic	<i>Pinetum acidophilum</i>
2	Clear-cutting	1.7	50°3'21.354" N, 16°8'52.095" E	21	22	40	270	28	Cambisol Arenic	<i>Fageto-Quercetum acidophilum</i>
	Shelterwood	1.0	50°3'18.602" N, 16°8'59.047" E	10	12	34	270	28	Cambisol Arenic	<i>Fageto-Quercetum acidophilum</i>

* Global position system (World Geodetic System 1984); ** average height for Scots pine according to forest management plan; *** average breast-height diameter for Scots pine according to forest management plan; **** based on number of annual rings in Dbh; ***** according to [24].

The investigated trees were co-dominant individuals within the particular tree-layer, free of any defects (curvature = compression wood, fungi, injury etc.), with diameter representing average Dbh of the tree-layer. From those trees, meeting such criterions, we randomly chose seven sample trees, these were felled in winter period and further used for the production of the test material.

2.2. Methods

A 3–5 cm thick disc was taken from each sampler at the breast height of the trunk (1.3 m). A test specimen of wood was cut from this disc using a double disc saw (Dendrocut, Walesch Electronic GmbH, Effretikon, Switzerland), 0.8 mm thick and 18 mm high. The cut was made in a north–south direction by the disc, running through the pith and perpendicular to the annual rings. All of the cut test specimens were conditioned to 65% ($\pm 5\%$) relative humidity and 20 °C (± 2 °C) to 12% moisture content before X-ray densitometry measurements. The test specimens were measured longitudinally from the pith to the cambium with an X-ray beam on a QTRS-01X Tree Ring Analyzer (Quintek Measurement Systems Inc., Knoxville, TN, USA). Sample measurements were performed automatically using QTRS-01X software (Quintek Measurement Systems Knoxville, Knoxville, TN, USA) with a step size of 0.01 mm (Figure 1). The average density and width of the annual ring, the density of latewood and earlywood and the percentage of latewood in the annual ring were determined.



Figure 1. X-ray densitometer QTRS-01X Tree Ring Analyzer (a); wood density profile for one of the testing samples using QTRS-01X software (b).

2.3. Statistical Analyses

An analysis of variance was performed to test whether the regeneration method led to statistically significant differences ($p < 0.05$) in the examined characteristics. The qualitative parameters of wood (average annual ring density, latewood and earlywood density, percentage of latewood in the annual ring) were subjected to a two-factor analysis of variance (ANOVA), where the regeneration method and locality were used as independent factors. We used a parametric test as the data possessed even distribution. Finally, a linear regression model was applied to test the correlation (significance level $p < 0.05$) between annual ring width and wood density and between annual ring width and the proportion of latewood in relation to the regeneration method.

3. Results

The average values of the evaluated parameters of the Scots pine for the whole stem radius are given in Table 2. There was no difference in average values of the width of the annual rings between the regeneration methods (Table A6). The higher percentage of latewood in the annual ring is shown by the stands restored via the shelterwood regeneration method. A statistically significant difference was not confirmed here (Table A7). For Locality 1, a statistically significant difference was found in the values of latewood density, where higher values were found in the stand regenerated with the clear-cutting method (Table A8). No statistically significant difference was found at locality 2, and although the shelterwood regeneration method shows higher values of latewood density, this difference is completely negligible. The table shows that higher values of earlywood density were achieved

for the stand restored via the clear-cutting method, but these differences are completely negligible and statistically insignificant (Table A9). The annual ring density was found to be higher in the stands regenerated with the shelterwood method, but this difference is also not statistically significant (Table A10).

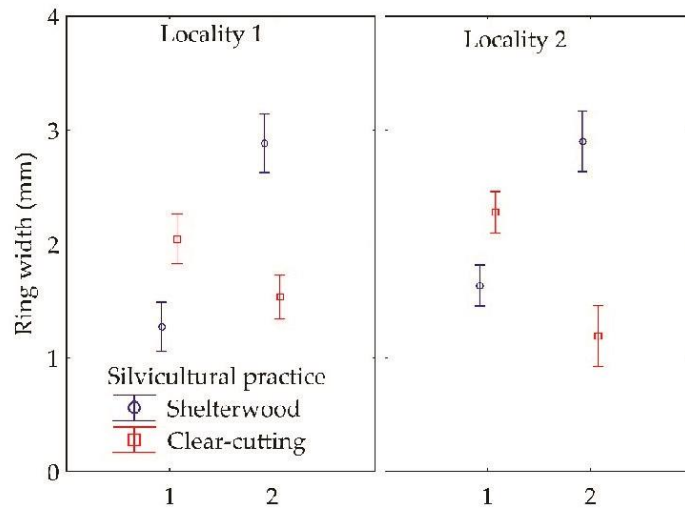
Table 2. Monitored characteristics for the individual localities and the regeneration methods (mean \pm standard deviation).

		Shelterwood	Clear-Cutting
Locality 1	Ring width (mm)	1.9 \pm 1.0	1.8 \pm 0.6
	Latewood percentage (%)	44.3 \pm 7.9	41.0 \pm 9.0
	Latewood density (kg.m ⁻³)	582 \pm 56	617 \pm 72
	Earlywood density (kg.m ⁻³)	305 \pm 34	309 \pm 21
	Annual ring density (kg.m ⁻³)	430 \pm 27	421 \pm 68
Locality 2	Ring width (mm)	2.0 \pm 0.7	1.9 \pm 0.8
	Latewood percentage (%)	45.2 \pm 5.9	43.8 \pm 10.5
	Latewood density (kg.m ⁻³)	632 \pm 54	631 \pm 65
	Earlywood density (kg.m ⁻³)	299 \pm 18	305 \pm 17
	Annual ring density (kg.m ⁻³)	458 \pm 22	453 \pm 59

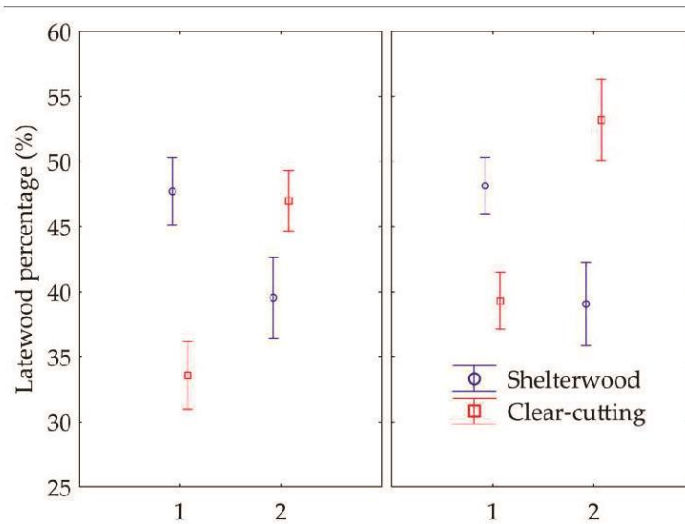
Impact of a release of the parent stand canopy on evaluated parameters for both localities is given in Table 3 and Figure 2. At locality 1, due to the release, the width of the annual ring increased by 123% and at locality 2 by 81%. The higher average annual ring width was found at both localities for stands regenerated via the shelterwood method, but this difference is not statistically significant (Table A1). The impact of the release of the parent stand is manifested at locality 1 by reducing the proportion of latewood in the annual ring by 17% and at locality 2 by 19%. The impact of the release of the parent stand on the percentage of latewood was not confirmed (Table A2). The impact of the release of the parent stand on the densities of latewood was not recorded (Table A3). The impact of the removal of the parent stand canopy resulted in a slight decrease in the density of earlywood at both localities. This decrease was found to be statistically significant only at locality 1 (Table A4). The impact of the felling of the parent stand leads to an even distribution of the wood density at locality 1, where no change in density was recorded. At locality 2, there was a slight decrease in density by 5%, which was statistically significant (Table A5).

Table 3. Monitored characteristics for the individual localities and the regeneration methods in relation to the time of release of the parent stand canopy (mean \pm standard deviation).

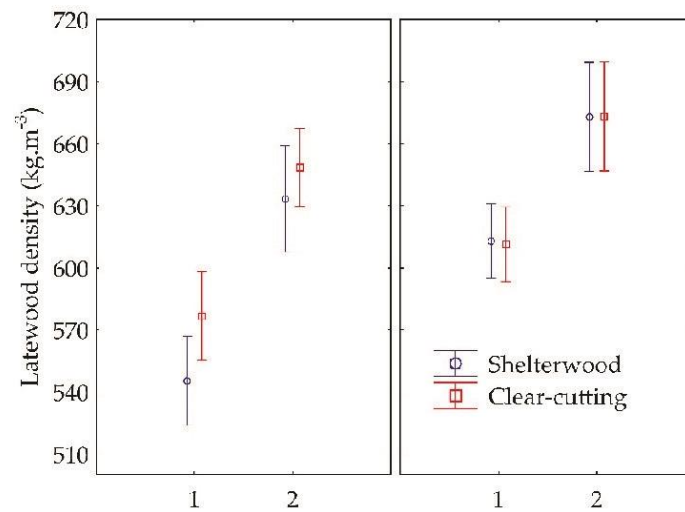
Period		Shelterwood	Clear-Cutting	
Locality 1	Before release	Ring width (mm)	1.3 \pm 0.2	2.0 \pm 0.4
		Latewood percentage (%)	47.7 \pm 4.4	33.6 \pm 7.8
		Latewood density (kg.m ⁻³)	545 \pm 40	577 \pm 80
		Earlywood density (kg.m ⁻³)	320 \pm 25	302 \pm 26
		Annual ring density (kg.m ⁻³)	430 \pm 19	376 \pm 46
	After release	Ring width (mm)	2.9 \pm 0.8	1.4 \pm 0.2
		Latewood percentage (%)	39.5 \pm 9.4	46.2 \pm 4.4
		Latewood density (kg.m ⁻³)	633 \pm 30	648 \pm 16
		Earlywood density (kg.m ⁻³)	284 \pm 35	314 \pm 15
		Annual ring density (kg.m ⁻³)	430 \pm 36	466 \pm 23
Locality 2	Before release	Ring width (mm)	1.6 \pm 0.3	2.3 \pm 0.8
		Latewood percentage (%)	48.1 \pm 3.3	39.3 \pm 9.6
		Latewood density (kg.m ⁻³)	613 \pm 56	611 \pm 70
		Earlywood density (kg.m ⁻³)	302 \pm 20	302 \pm 19
		Annual ring density (kg.m ⁻³)	466 \pm 17	428 \pm 55
	After release	Ring width (mm)	2.9 \pm 0.7	1.2 \pm 0.2
		Latewood percentage (%)	39.1 \pm 5.6	53.6 \pm 4.0
		Latewood density (kg.m ⁻³)	673 \pm 15	673 \pm 11
		Earlywood density (kg.m ⁻³)	293 \pm 8	312 \pm 7
		Annual ring density (kg.m ⁻³)	441 \pm 23	506 \pm 16



(a)



(b)



(c)

Figure 2. Cont.

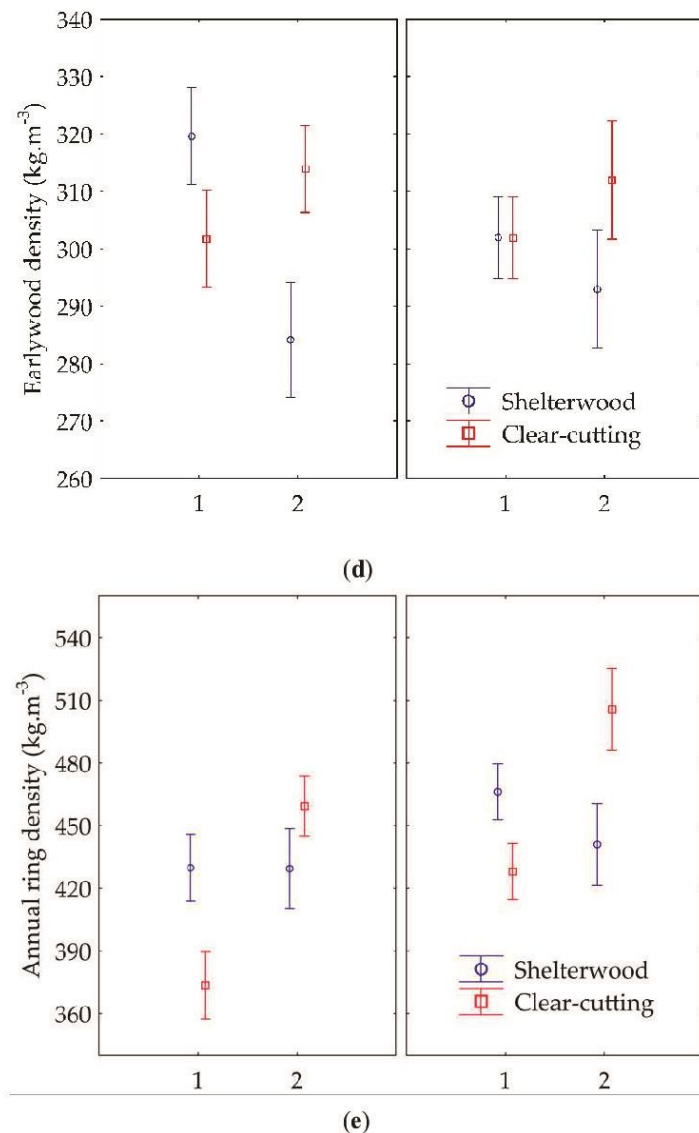


Figure 2. Impact of regeneration method and locality on annual ring width (a), percentage of latewood (b), latewood density (c), earlywood density (d), annual ring density (e) (x-axis: 1-values up to the time of the release of the parent stand canopy, 2-values after the release of the parent stand canopy. In the case of the clear-cutting method x-axis values serve as a reference).

It is clear from Figure 3 that the width of the annual ring in the case of the clear-cutting regeneration method has the same trend at both localities, namely decreasing towards the cambium. The shelterwood method shows a completely opposite trend, where the lowest annual ring width was found to be close to the pith and, after the release of the parent stand, the annual ring width increases. The width of the annual ring is closely connected with the percentage of latewood and, quite logically, in connection with the above mentioned, the clear-cutting method shows a lower proportion of latewood in the annual ring at the pith and is increasing towards the cambium. The shelterwood method shows the opposite trend, where the proportion of latewood at the pith is higher and decreases towards the cambium. The density of latewood follows the same trend for both regeneration methods at both localities, namely increasing the density of wood from the pith to the cambium. The annual ring density in the clear-cutting regeneration method gradually increases from the pith to the cambium until it reaches its maximum. The shelterwood method shows an even distribution of annual ring density along the trunk radius.

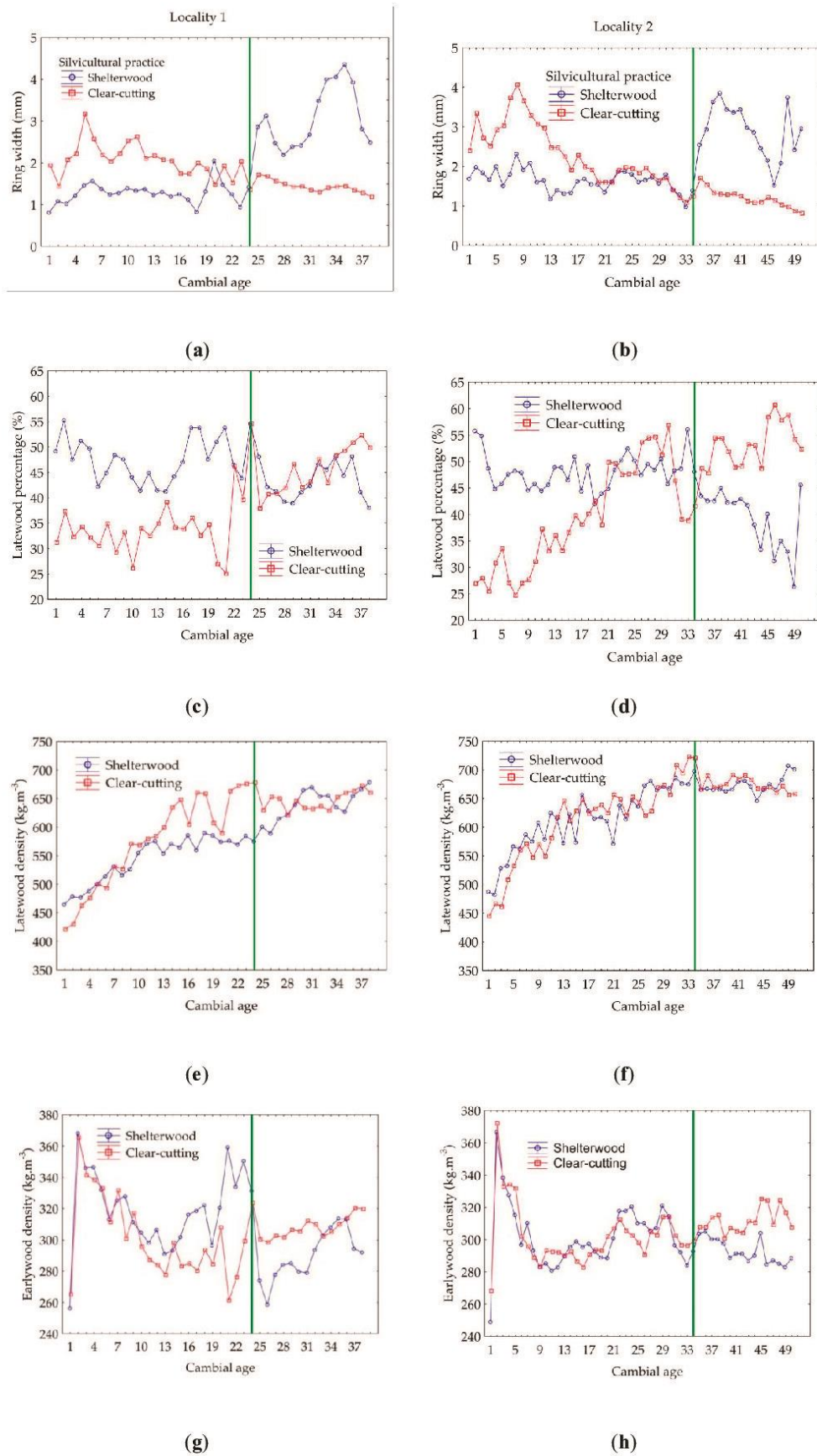


Figure 3. Cont.

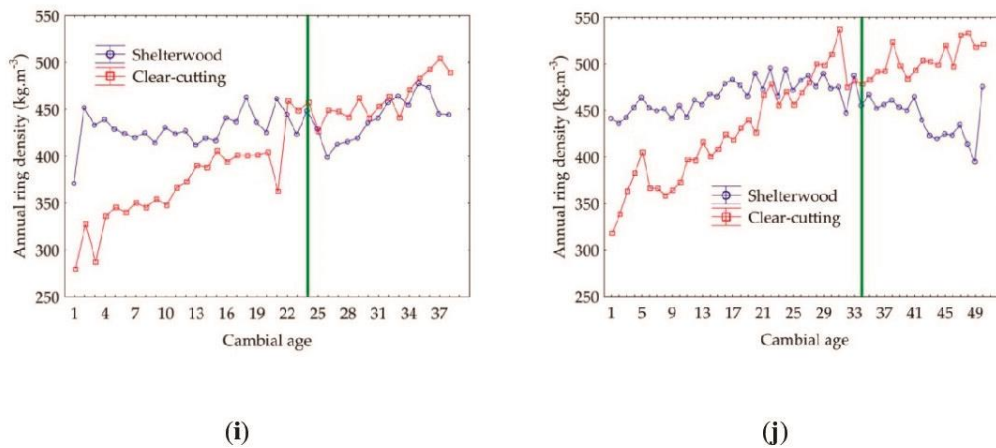


Figure 3. Distribution of the monitored characteristics along the trunk radius (from the pith to the bark) for the stands with a different regeneration method from both localities. Annual ring width (a,b), latewood percentage (c,d), latewood density (e,f), earlywood density (g,h), annual ring density (i,j). Green line denotes the time of release of the parent stand canopy.

For the shelterwood regeneration method, the percentage of latewood and annual ring density at locality 2 decreases slightly with increasing width of the annual ring (Figure 4). After the release of the parent stand canopy the evaluated properties increase with increasing width of the annual ring. Locality 1 shows ambiguous results. Closer correlation of the tested characteristics and the annual ring width was found after the release of the parent stand canopy, a similar trend was confirmed for the locality 1 (Table 4).

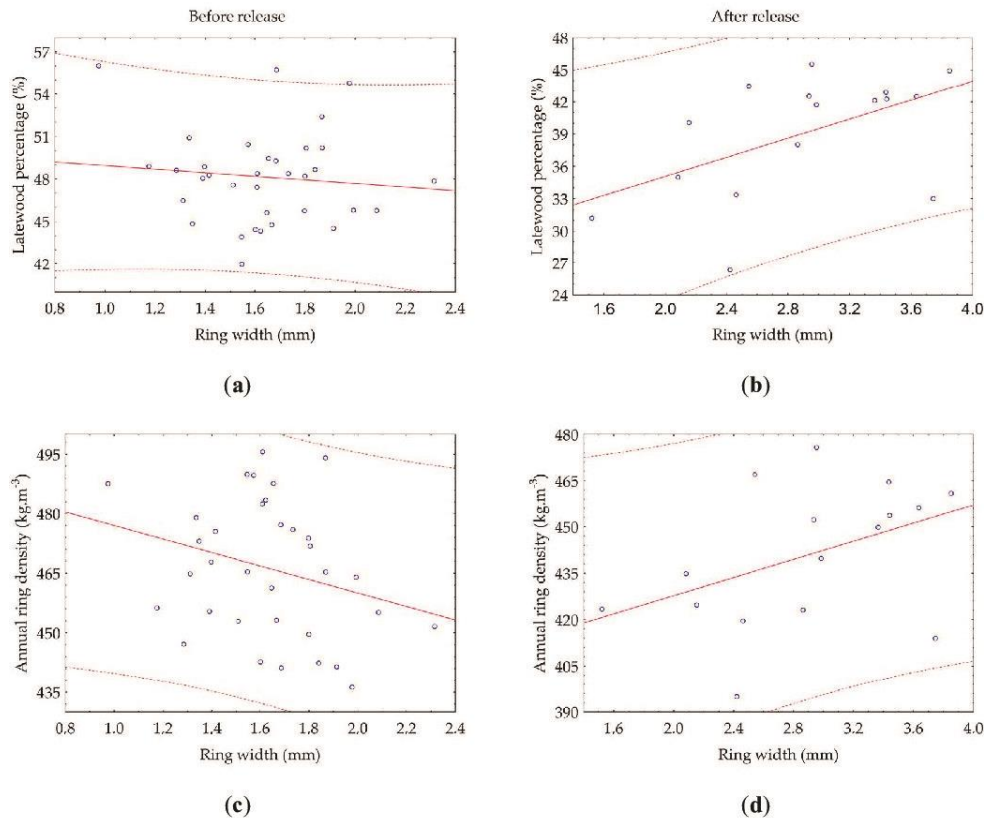


Figure 4. Correlation between annual ring width and proportion of latewood and between annual ring width and annual ring density related to the release of the parent stand canopy (locality 2). Shelterwood regeneration method. Latewood percentage (a,b), annual ring density (c,d).

Table 4. Regression model for an effect of annual ring width (locality 2). Shelterwood regeneration method.

Period		Equation $y =$	r	r^2
Before release	Latewood percentage (%)	$50.1979 - 1.2571 \cdot x$	-0.1053	0.0111
	Annual ring density ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$493.9478 - 16.966 \cdot x$	-0.2721	0.0740
After release	Latewood percentage (%)	$26.2203 + 4.4288 \cdot x$	0.5247	0.2753
	Annual ring density ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$398.3916 + 14.6653 \cdot x$	0.4312	0.1860

r is the coefficient of correlation, r^2 is the coefficient of determination.

At locality 2, a strong correlation between the investigated characteristics and the width of the annual ring was confirmed for the clear-cutting regeneration method (Table 5). It is clear from Figure 5 that with increasing annual ring width the proportion of latewood and annual ring density decrease. A similar trend was demonstrated at locality 1.

Table 5. Regression model for an effect of annual ring width (locality 2). Clear-cutting regeneration method.

	Equation $y =$	r	r^2
Latewood percentage (%)	$64.047 - 10.5093 \cdot x$	-0.8270	0.6840
Annual ring density ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$574.8656 - 63.201 \cdot x$	-0.8896	0.7913

r is the coefficient of correlation, r^2 is the coefficient of determination.

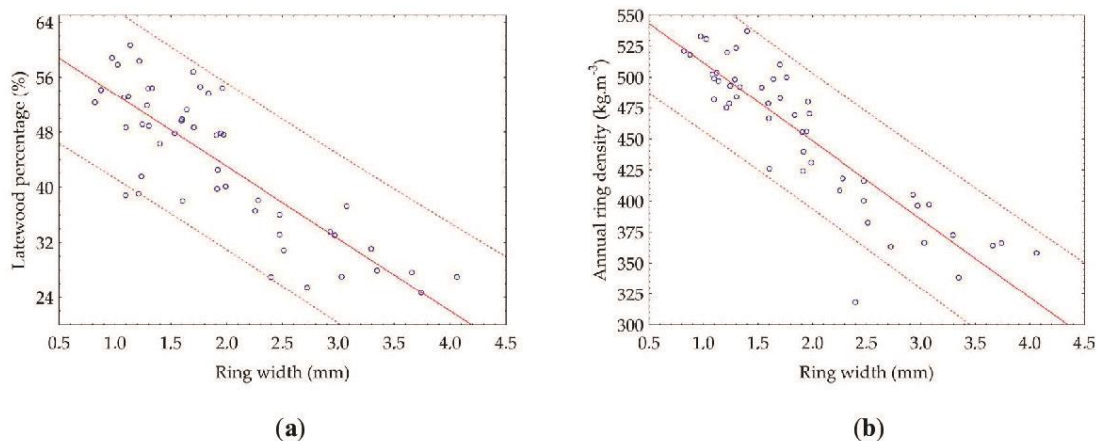


Figure 5. Correlation between annual ring width and proportion of latewood and between annual ring width and annual ring density (locality 2). Clear-cutting regeneration method. Latewood percentage (a) and annual ring density (b).

4. Discussion

The aim of this study was to analyse the influence of regeneration method on the annual ring characteristics of the Scots pine. Like all conifers, Scots pine and its radial growth clearly respond to environmental factors [5,11,12,14,25–27]. Tree growth is known to affect the resulting properties of wood, while the regeneration method has a direct effect on the trunk diameter of the tree. The response to the release provides highly relevant information on practical forest management, potentially allowing the determination and intensity of cultivation practices to be optimized [4].

Our results show that the removal of the parent stand led to a significant increase in the width of the annual ring when using the shelterwood method. The clear-cutting regeneration shows a gradual decrease in the width of the annual ring towards the cambium. The influence of stand release and its positive effect on the width of the annual ring is mentioned by several authors [4,5,28]. Peltola et al. [29] state that the reaction to growth in the Scots pine was manifested only in heavily cut stands.

The variability of the annual ring widths is mainly connected with the variability of the width of earlywood area, which is highly correlated with the proportion of latewood [18]. The results of the

study show a higher percentage of latewood in the annual ring before the felling of the parent stand, when the width of the annual ring is low. Increasing the width of the annual ring also reduces the proportion of latewood. The increase in the width of annual rings usually causes the wood density to lower, which also causes the quality of the wood to decrease [11,30].

The clear-cutting regeneration method shows an increasing trend of the proportion of latewood to the cambium, which is confirmed by [18]. Candel-Pérez et al. [4] state that thinning can also lead to an increase in the percentage of latewood, which could lead to increase in wood density. The density of latewood is not affected in any way by the release of the parent stand, and in both stands it shows the same trend, increasing from the pith to the cambium. This trend is also described by [7]. Earlywood is an integral part of the annual ring. Earlywood occupies a higher percentage in the annual ring than latewood and has a lower density. This phenomenon has been observed by many authors [5,9,18]. Moreno-Fernandez et al. [7] state that the density of earlywood remains constant for almost the entire growth period. This trend was demonstrated for stands restored with the clear-cutting method and for the shelterwood regeneration at locality 2. Due to the release of the parent stand, there was a significant decrease in the density of earlywood at locality 1 for the shelterwood regeneration method.

The impact of the felling of the mother parent stand on the density of the wood was most significant in the shelterwood regeneration method. At locality 1, the effect of felling on wood density did not manifest and the density remained constant. A slight decrease was recorded at locality 2. Mörling [31] states that the impact of thinning has almost no effect on wood density. On the other hand, some authors state that thinning accelerates growth and, in relation thereto, reduces the density of wood [5,32]. Wodzicki [33] even states that thinning can also lead to an increase in wood density. The wood density for the clear-cutting method reaches the lowest values near the pith, and subsequently a constant increase in values was observed. This trend has been described by several authors [34–36].

The lower quality of wood near the pith for the clear-cutting regeneration may be due to the higher occurrence of juvenile wood. Juvenile wood is characterized by low wood density, lower percentage of latewood, higher lignin and hemicellulose content, low cellulose content, thin cell wall, short tracheids with wide lumens, high fibre and microfibrils rotation angle [20,37]. As the impact of juvenile wood on the final quality of wood is significant, it is necessary to decrease the proportion of juvenile wood in a trunk [38]. The proportion of juvenile wood in the trunk is discussed in many professional publications [20,39]. Yang [40] states that the size of juvenile wood is determined primarily by the number of individuals in the stand. However, Hébert et al. [41] state that spacing between trees on juvenile size does not have a significant effect on juvenile wood formation.

Compared to the clear-cutting regeneration method, the lower width of annual rings in the juvenile wood zone in the shelterwood regeneration method may be due to a higher number of individuals in the stand and growth of the examined individuals under the shadow of the parent stand at both localities. After releasing the parent stand, the width of the annual ring subsequently increases. This trend was also described by Eriksson et al. [42]. The release of the parent stand was manifested in the mature wood zone, where the shelterwood regeneration method has a higher annual ring width than the clear-cutting method. The width of the annual ring closely correlates with the percentage of latewood [18], where a higher proportion of latewood was found for the shelterwood regeneration method in the juvenile zone of the wood. The impact of a higher proportion of latewood in the juvenile zone of the wood in the shelterwood method was significantly reflected in the wood density, where the shelterwood regeneration method shows higher density values compared to the clear-cutting regeneration. Many studies report that mature wood has higher density values than juvenile wood [5,43,44], as found in the clear-cutting method. However, the shelterwood regeneration method does not show a difference between juvenile and mature wood.

The average values of the examined characteristics of the Scots pine, regardless of the time of the release of the parent stand canopy, show that the shelterwood regeneration method does not have a significant effect on the investigated properties of wood. There was no difference found in the average values between the shelterwood and clear-cutting regeneration method, with the exception of

the density of latewood at locality 1. This is also confirmed in studies by authors who did not find the effect of thinning on wood density, latewood density and latewood content for the Scots pine in Finland. [6,45]. Similar results were also reported by Tong et al. [46].

5. Conclusions

The most important finding is that different regeneration methods produce wood of different quality along the stem radius. The distribution of wood density within the trunk is significantly affected by silvicultural measures. Due to the release cut, the shelterwood regeneration method shows an even distribution of wood density along the trunk radius, whereas the clear-cutting regeneration method shows an increasing trend from the pith to the cambium. The shelterwood regeneration method had a positive effect on the extent of the juvenile wood zone, wherein it eliminates its negative properties compared to the clear-cutting method. From the point of view of the wood processing industry, therefore, it is not important which part of the trunk is used in the case of the shelterwood method.

For the stem as a whole, the shelterwood regeneration method did not have a significant effect on the evaluated wood quality characteristics. The impact of different regeneration methods on the wood properties of pine was not demonstrated at any of the localities investigated, with the exception of latewood density at locality 1, where a statistically significant difference was confirmed for the shelterwood regeneration method. It is also important to notice lower variability of the annual ring density in the case of the shelterwood regeneration method.

Author Contributions: Conceptualization, O.S. and A.Z.; methodology, O.S.; software, O.S.; validation, O.S., A.Z., L.B. and V.B.; formal analysis, O.S., A.Z., V.B.; investigation, L.B.; resources, O.S., J.V.; data curation, O.S.; writing—original draft preparation, O.S.; writing—review and editing, A.Z., L.B., V.B., J.V.; visualization, O.S.; supervision, A.Z.; project administration, L.B.; funding acquisition, O.S., L.B. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by the Ministry of Agriculture of the Czech Republic (project number QJ1520037—, “Increasing the adaptability of pine (*Pinus sylvestris* L.) silviculture in the conditions of the Czech Republic”) and by Internal Grant Agency of the Faculty of Forestry and Wood Sciences (project A19/07).

Acknowledgments: We would like to express our thanks to the Faculty of Forestry and Wood Sciences of the Czech University of Life Sciences Prague.

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

Appendix A

Table A1. Duncan’s multiple range test for ring width.

			B 24	B 34	B 24	B 34	A 24	A 34	A 24	A 34
MS = 29313			L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1	L2
DF = 188			S	S	C	C	S	S	C	C
B 24	L1	S								
B 34	L2	S	0.032 *							
B 24	L1	C	0.000 *	0.011 *						
B 34	L2	C	0.000 *	0.000 *	0.149 *					
A 24	L1	S	0.000 *	0.000 *	0.000 *	0.000 *				
A 34	L2	S	0.000 *	0.000 *	0.000 *	0.000 *	0.929			
A 24	L1	C	0.104	0.535	0.000 *	0.000 *	0.000 *	0.000 *		
A 34	L2	C	0.618	0.010 *	0.000 *	0.000 *	0.000 *	0.000 *	0.043 *	

* Values are significant at $p < 0.05$. Error: Between MS = mean squares, DF = degrees of freedom. L = Locality, S = Shelterwood, C = Clear-cutting, A = After felling, B = Before felling.

Table A2. Duncan's multiple range test for latewood percentage.

			B 24	B 34	A 24	A 34	B 24	B 34	A 24	A 34
MS = 246.53			L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1	L2
DF = 501			S	S	S	S	C	C	C	C
B 24	L1	S								
B 34	L2	S	0.824							
A 24	L1	S	0.000 *	0.000 *						
A 34	L2	S	0.000 *	0.000 *	0.818					
B 24	L1	C	0.000 *	0.000 *	0.003 *	0.004 *				
B 34	L2	C	0.000 *	0.000 *	0.896	0.907	0.004 *			
A 24	L1	C	0.707	0.577	0.000 *	0.000 *	0.000 *	0.000 *		
A 34	L2	C	0.006 *	0.008 *	0.000 *	0.000 *	0.000 *	0.000 *	0.002 *	

* Values are significant at $p < 0.05$. Error: Between MS = mean squares, DF = degrees of freedom. L = Locality, S = Shelterwood, C = Clear-cutting, A = After felling, B = Before felling.

Table A3. Duncan's multiple range test for latewood density.

			B 24	B 34	B 24	B 34	A 24	A 34	A 24	A 34
MS = 246.53			L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1	L2
DF = 501			S	S	S	S	C	C	C	C
B 24	L1	S								
B 34	L2	S	0.000 *							
B 24	L1	S	0.000 *	0.202						
B 34	L2	S	0.000 *	0.000 *	0.017 *					
A 24	L1	C	0.049 *	0.030 *	0.000 *	0.000 *				
A 34	L2	C	0.000 *	0.914	0.194	0.000 *	0.030 *			
A 24	L1	C	0.000 *	0.034 *	0.341	0.124	0.000 *	0.031 *		
A 34	L2	C	0.000 *	0.000 *	0.020 *	0.993	0.000 *	0.000 *	0.146	

* Values are significant at $p < 0.05$. Error: Between MS = mean squares, DF = degrees of freedom. L = Locality, S = Shelterwood, C = Clear-cutting, A = After felling, B = Before felling.

Table A4. Duncan's multiple range test for earlywood density.

			B 24	B 34	A 24	A 34	B 24	B 34	A 24	A 34
MS = 2840.2			L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1	L2
DF = 188			S	S	S	S	C	C	C	C
B 24	L1	S								
B 34	L2	S	0.008 *							
A 24	L1	S	0.000 *	0.009 *						
A 34	L2	S	0.000 *	0.195	0.158					
B 24	L1	C	0.010 *	0.976	0.007 *	0.162				
B 34	L2	C	0.009 *	0.991	0.008 *	0.182	0.983			
A 24	L1	C	0.362	0.071	0.000 *	0.002 *	0.084 *	0.030 *		
A 34	L2	C	0.251	0.111	0.000 *	0.005 *	0.140	0.130	0.755	

* Values are significant at $p < 0.05$. Error: Between MS = mean squares, DF = degrees of freedom. L = Locality, S = Shelterwood, C = Clear-cutting, A = After felling, B = Before felling.

Table A5. Duncan's multiple range test for annual ring density.

			B 24	B 34	A 24	A 34	B 24	B 34	A 24	A 34
MS = 1575.2			L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1	L2
DF = 188			S	S	S	S	C	C	C	C
B 24	L1	S								
B 34	L2	S	0.004 *							
A 24	L1	S	0.976	0.004 *						
A 34	L2	S	0.351	0.043 *	0.368					
B 24	L1	C	0.000 *	0.000 *	0.000 *	0.000 *				
B 34	L2	C	0.884	0.003	0.899 *	0.328 *	0.000 *			
A 24	L1	C	0.018 *	0.565	0.019 *	0.120	0.000 *	0.016 *		
A 34	L2	C	0.000 *	0.000 *	0.000 *	0.000 *	0.000 *	0.000 *	0.000 *	

* Values are significant at $p < 0.05$. Error: Between MS = mean squares, DF = degrees of freedom. L = Locality, S = Shelterwood, C = Clear-cutting, A = After felling, B = Before felling.

Table A6. Duncan's multiple range test for ring width.

		MS = 0.59824	L1	L1	L2	L2
DF = 192		S	C	S	C	C
L1	S					
L1	C	0.276				
L2	S	0.526	0.102			
L2	C	0.952	0.271	0.518		

Error: Between MS = mean squares, DF = degrees of freedom. L = Locality, S = Shelterwood, C = Clear-cutting.

Table A7. Duncan's multiple range test for latewood percentage.

		MS = 72.995	L1	L1	L2	L2
DF = 192		S	C	S	C	C
L1	S					
L1	C	0.073				
L2	S	0.599	0.025 *			
L2	C	0.744	0.117	0.427		

* Values are significant at $p < 0.05$. Error: Between MS = mean squares, DF = degrees of freedom. L = Locality, S = Shelterwood, C = Clear-cutting.

Table A8. Duncan's multiple range test for latewood density.

		MS = 3965.1	L1	L1	L2	L2
DF = 192		S	C	S	C	C
L1	S					
L1	C	0.006 *				
L2	S	0.000 *	0.210			
L2	C	0.000 *	0.278	0.929		

* Values are significant at $p < 0.05$. Error: Between MS = mean squares, DF = degrees of freedom. L = Locality, S = Shelterwood, C = Clear-cutting.

Table A9. Duncan's multiple range test for earlywood density.

MS = 514.93		L1	L2	L1	L2
DF = 192		S	S	C	C
L1	S				
L2	S	0.208			
L1	C	0.467	0.062		
L2	C	0.965	0.221	0.462	

Error: Between MS = mean squares, DF = degrees of freedom. L = Locality, S = Shelterwood, C = Clear-cutting.

Table A10. Duncan's multiple range test for annual ring density

MS = 2437.1		L1	L1	L2	L2
DF = 192		S	C	S	C
L1	S				
L1	C	0.399			
L2	S	0.006 *	0.000 *		
L2	C	0.021 *	0.002 *	0.599	

* Values are significant at $p < 0.05$. Error: Between MS = mean squares, DF = degrees of freedom. L = Locality, S = Shelterwood, C = Clear-cutting.

References

1. Ministry of Agriculture. *Zpráva o Stavů Lesů a Lesního Hospodářství ČR v Roce 2018*; (Report on the State of Forest and Forestry in the Czech Republic 2018); Ministry of Agriculture: Prague, Czech Republic, 2019.
2. Vincent, M.; Krause, C.; Koubaa, A. Influence of Stem Taper on the Yield of Black Spruce Stands and Trees Following Commercial Thinning. *Forests* **2019**, *10*, 1024. [[CrossRef](#)]
3. Bílek, L.; Zeidler, A.; Pulkrab, K.; Ulbrichová, I.; Vacek, S.; Borůvka, V.; Vítámvás, J.; Remeš, J.; Vacek, Z.; Sloup, R. *Pěstební a Ekonomické Aspekty Clonné Obnovy Borovice Lesní. (Silvicultural and Economical Aspects of Shelterwood Regeneration of Scots Pine)*, 1st ed.; Lesnický Průvodce: Strnady, Czech Republic, 2019; p. 56.
4. Candel-Pérez, D.; Lo, Y.H.; Blanco, J.; Chiu, C.M.; Camarero, J.; de González, A.; Ester, I.J.; Castill, F. Drought-Induced Changes in Wood Density Are Not Prevented by Thinning in Scots Pine Stands. *Forests* **2018**, *9*, 4. [[CrossRef](#)]
5. Tsoumis, G.T. *Science and Technology of Wood—Structure, Properties, Utilization*, 1st ed.; Van Nostrand Reinhold: New York, NY, USA, 1991; p. 494.
6. Mäkinen, H.; Hynynen, J. Wood density and tracheid properties of Scots pine: Responses to repeated fertilization and timing of the first commercial thinning. *For. Int. J. For. Res.* **2014**, *87*, 437–447. [[CrossRef](#)]
7. Moreno-Fernández, D.; Hevia, A.; Majada, J.; Cañellas, I. Do Common Silvicultural Treatments Affect Wood Density of Mediterranean Montane Pines? *Forests* **2018**, *9*, 80. [[CrossRef](#)]
8. Auty, D.; Achim, A.; Macdonald, E.; Cameron, A.D.; Gardiner, B.A. Models for Predicting Clearwood Mechanical Properties of Scots Pine. *For. Sci.* **2016**, *62*, 403–413. [[CrossRef](#)]
9. Kollmann, F. *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 1951; p. 1050.
10. Torbenson, M.C.A.; Stahle, D.W.; Villanueva Díaz, J.; Cook, E.R.; Griffin, D. The Relationship Between Earlywood and Latewood Ring-Growth Across North America. *Tree-Ring Res.* **2016**, *72*, 53–66. [[CrossRef](#)]
11. Peltola, H.; Kilpeläinen, A.; Sauvala, K.; Räisänen, T.; Ikonen, V. Effects of early thinning regime and tree status on the radial growth and wood density of Scots pine. *Silva Fennica* **2007**, *41*, 489–505. [[CrossRef](#)]
12. Jelonek, T.; Pazdrowski, W.; Tomczak, A.; Szaban, J. The effect of social position of a tree in the stand and site on wood quality of scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Electron. J. Pol. Agric. Univ.* **2008**, *10*, 2.
13. Tomczak, A.; Jelonek, T.; Jakubowski, M. Density of scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood as an indicator of tree resistance to strong winds. *Sylvan* **2013**, *157*, 539–545.
14. Roszyk, E.; Moliński, W.; Kusiak, W.; Prądzyński, W.; Zborowska, M. Physical properties of Scots pine wood from the Notecka Forest. *Sylvan* **2016**, *160*, 547–555.

15. Gryc, V.; Holan, J. Influence of position within the tree stem according to growth-ring width of spruce (*Picea abies*/L./KARST.) with compression wood. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis* **2004**, *52*, 59–72. [CrossRef]
16. Zeidler, A.; Šedivka, P. Influence of selected factors on wood density variability in grand fir (*Abies grandis*/Douglas/Lindl.). *Wood Res.* **2015**, *60*, 33–44.
17. Bouslimi, B.; Koubaa, A.; Bergeron, Y. Intra-Ring Variations and Interrelationships for Selected Wood Anatomical and Physical Properties of *Thuja Occidentalis* L. *Forests* **2019**, *10*, 339. [CrossRef]
18. Požgaj, A.; Chovanec, D.; Kurjatko, S.; Babiak, M. *Štruktúra a Vlastnosti Dreva (Structure and Properties of Wood)*, 1st ed.; Příroda: Bratislava, Slovakia, 1993; p. 485.
19. Kretschmann, D.E.; Moody, R.C.; Pellerin, R.F.; Bendtsen, B.A.; Cahill, J.M.; Mcalister, R.H.; Sharp, D.W. Properties of Juvenile Wood. Techline—Properties and Use of Wood, Composites, and Fiber Products. *For. Prod. Lab.* **1993**, 6–7.
20. Zobel, B.J.; Sprague, J.R. *Juvenile Wood in Forest Trees*; Springer: Berlin, Germany, 1998; p. 300.
21. Macdonald, E.; Hubert, J. A review of the effects of silviculture on timber quality of Sitka spruce. *Forestry* **2002**, *75*, 107–138. [CrossRef]
22. Zobel, B.J.; Buijtenen, J.P. *Wood Variation: Its Causes and Control*, 1st ed.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 1989; p. 363.
23. Adams, D.L.; Hodges, J.D.; Loftis, D.L.; Long, J.N.; Seymour, R.S.; Helms, J.A. Silviculture Terminology with Appendix of Draft Ecosystem Management Terms. Silviculture Instructors Subgroup of the Silviculture Working Group of the Society of American Foresters. 1994. Available online: http://oak.snr.missouri.edu/silviculture/silviculture_terminology.htm (accessed on 3 August 2020).
24. Viewegh, J.; Kusbach, A.; Mikeska, M. Czech forest ecosystem classification. *J. For. Sci.* **2012**, *49*, 74–82. [CrossRef]
25. Jelonek, T.; Pazdrowski, W.; Tomczak, A.; Grzywiński, W. Biomechanical stability of pines growing on former farmland in northern Poland. *Wood Res.* **2012**, *57*, 31–44.
26. Tomczak, A.; Jelonek, T. Radial variation in the wood properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) grown on former agricultural soil. *For. Res. Pap.* **2013**, *74*, 171–177. [CrossRef]
27. Koubaa, A.; Isabel, N.; Zhang, S.Y.; Beaulieu, J.; Bousquet, J. Transition from juvenile to mature wood in black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.). *Wood Fib. Sci.* **2005**, *37*, 445–455.
28. Peltola, H.; Gort, J.; Pulkkinen, P.; Zubizarreta Gerendiain, A.; Karppinen, J.; Ikonen, V.P. Differences in growth and wood density traits in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) genetic entries grown at different spacing and sites. *Silva Fennica* **2009**, *43*, 339–354. [CrossRef]
29. Peltola, H.; Miina, J.; Rouvinen, I.; Kellomäki, S. Effect of early thinning on the diameter growth distribution along the stem of Scots pine. *Silva Fennica* **2002**, *36*, 813–825. [CrossRef]
30. Aleinikovas, M. Effect of the mean diameter increment on the pine wood mechanical–physical properties in Lithuania. *Baltic Forestry* **2002**, *13*, 103–108.
31. Mörling, T. Evaluation of annual ring width and ring density development following fertilization and thinning of Scots pine. *Ann. For. Sci.* **2002**, *59*, 29–40. [CrossRef]
32. Jaakkola, T.; Mäkinen, H.; Saranpää, P. Wood density in Norway spruce: Changes with thinning intensity and tree age. *Can. J. For. Res.* **2005**, *35*, 1767–1778. [CrossRef]
33. Wodzicki, T.J. Natural factors affecting wood structure. *Wood Sci. Technol.* **2001**, *3*, 5–26. [CrossRef]
34. Nicholls, J.W.P.; Brown, A.G. The relationship between ring width and wood characteristics in double-stemmed trees of radiata pine. *N. Z. J. For. Sci.* **1973**, *4*, 105–111.
35. Fritts, H.C.; Vaganov, E.A.; Sviderskaya, I.V.; Shashkin, A.V. Climatic variation and tree-ring structure in conifers: Empirical and mechanistic models of tree-ring width, number of cells, cell size, cell-wall, thickness and wood density. *Clim. Res.* **1991**, *1*, 97–116. [CrossRef]
36. Ivković, M.; Gapare, W.; Wu, H.; Espinoza, S.; Rozenberg, P. Influence of cambial age and climate on ring width and wood density in *Pinus radiata* families. *Ann. For. Sci.* **2013**, *70*, 525–534. [CrossRef]
37. Kučera, B. A hypothesis relating current annual height increment to juvenile wood formation in Norway Spruce. *Wood Fiber Sci.* **1992**, *26*, 152–167.
38. Barnett, J.R.; Jeronimidis, G. *Wood Quality and Its Biological Basis*; Blackwell: Hoboken, NJ, USA, 2003; p. 226. ISBN 1–84127–319–8.

39. Bembenek, M.; Giefing, D.F.; Jelonek, T.; Karaszewski, Z.; Kruszyk, R.; Tomczak, A.; Woszczyk, M.; Mederski, P.S. Carbon Content in Juvenile and Mature Wood of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). *Balt. For.* **2015**, *21*, 279–284.
40. Yang, K.C.; Chen, Y.S.; Chiu, C. Formation and vertical distribution of juvenile and mature wood in single stem of *Cryptomeria Japonica*. *Can. J. For. Res.* **1994**, *24*, 969–975. [CrossRef]
41. Hébert, F.; Krause, C.; Plourde, P.Y.; Achim, A.; Prigent, G.; Ménétrier, J. Effect of Tree Spacing on Tree Level Volume Growth, Morphology, and Wood Properties in a 25-Year-Old *Pinus banksiana* Plantation in the Boreal Forest of Quebec. *Forests* **2016**, *7*, 276.
42. Eriksson, D.; Lindber, H.; Bergsten, U. Influence of silvicultural regime on wood structure characteristics and mechanical properties of clear wood in *Pinus sylvestris*. *Silva Fennica* **2006**, *40*, 743–762. [CrossRef]
43. Pikk, J.; Kask, R. Mechanical properties of Juvenile Wood of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) On Myrtillus Forest Site Type. *Balt. For.* **2004**, *10*, 72–78.
44. Vavrčík, H.; Horn, K. Density of juvenile and mature wood of selected coniferous species. *J. For. Sci.* **2011**, *57*, 123–130.
45. Mäkinen, H.; Hynynen, J.; Penttilä, T. Effect of thinning on wood density and tracheid properties of Scots pine on drained peatland stands. *Forestry* **2015**, *88*, 359–367. [CrossRef]
46. Tong, Q.; Tanguay, F.; Zhang, S. Impact of commercial thinning on annual radial growth and wood density in plantation-grown black spruce. *Wood Fiber Sci.* **2011**, *43*, 311–325.



© 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/>).

6 Diskuze

Borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) je nejrozšířenější a jedna z hospodářsky nejvýznamnějších stálezelených dřevin v Evropě (Kask 2015). V současnosti je nejrozšířenějším způsobem pěstování borovice lesní regenerace nových porostů výsadbou sazenic na holé ploše (Agestam *et al.* 1998). Vzhledem k příznivým vlivům na životní prostředí roste zájem o přirozenou obnovu porostů. Tento způsob obnovy porostů borovice lesní je hojně uplatňován ve skandinávských zemích, ale ve střední Evropě jde o metodu marginální obnovy (Bílek *et al.* 2019). Velmi malá pozornost je věnována vlivu pěstebních postupů na kvalitu dřeva, zejména na vlastnosti dřeva, které jsou důležité z pohledu zpracovatelského průmyslu (Eriksson *et al.* 2006).

Vliv pěstebních opatření na vlastnosti dřeva

Vliv metody regenerace se u většiny zkoumaných charakteristik projevil ve prospěch clonného způsobu obnovy, i když zjištěné rozdíly hodnot vlastností nejsou tak významně

odlišné, aby mohly ovlivnit vlastnosti dřeva. Tento zjištěný jev je rozporován mnoho autory, kteří zjistili, že clonný způsob obnovy vykazuje vyšší hodnoty zkoumaných vlastností (Agestam *et al.* 1998, Ekö aa Agestam, 1994, Auty a Achim 2008). V této studii se rozdíl hodnot vlastností výrazně neprojevil a pro finální zpracování dřeva zanedbatelný.

Mnohem významněji se dopad obnovní metody projevil na rozložení vlastností dřeva v kmeni. Borovice lesní, tak jako všechny jehličnany a jejich radiální růst, jasně reaguje na enviromentální faktory (Tsoumis 1991; Peltola *et al.* 2007; Jelonek *et al.* 2009, Tomczak a Jelonek 2013, Roszyk *et al.* 2016). Prokázalo se, že růst stromu ovlivňuje výsledné vlastnosti dřeva, zatímco intenzita pěstebních opatření mají přímý vliv na průměr kmene stromu. Odezva na uvolnění a její závislost na změnách v podmínkách pěstování poskytují vysoce relevantní informace o praktickém řízení lesů, což potenciálně umožňuje optimalizovat stanovení a intenzitu pěstebních postupů (Candel-Pérez *et al.* 2018). Auty a Achim (2008) zjistili, že zvýšená konkurence stromů v důsledku husté přirozené obnovy přispěla k pomalejšímu tempu růstu. Nepřímým efektem pomalejšího růstu, v přirozeně obnovovaných porostech je skutečnost, že zvýšená konkurence na počátku růstu stromů vede k vytvoření menšího jádrového dřeva na kmeni. Mörling a Valinger (1999) uvádějí, že počet letokruhů u jádrového dřeva je téměř neměnný, ale procentuální zastoupení jádrového dřeva v kmeni je způsobeno růstem stromu v mladém věku.

Pomalejší růst porostů obnovených clonným způsobem má za následek homogenní rozložení vlastností dřeva po šířce kmene. Porosty obnovené přirozeným způsobem se vyznačují vyššími hodnotami vlastností v blízkosti dřeně. Tento trend lze vysvětlit malou šířkou letokruhu ve středu kmene. Po částečném uvolnění mateřského porostu se šířka letokruhu začíná zvětšovat, což se projevuje snížením hodnot vlastností dřeva. Pokles zkoumaných pevnostních charakteristik dřeva v důsledku rostoucí šířky letokruhu popisují Mörling a Valinger (1999) a Gryc *et al.* (2011). Výsledky ukazují, že odkácení mateřského porostu vedlo u clonného způsobu k významnému zvýšení tloušťky letokruhu. Holosečný způsob obnovy dřeva vykazuje postupný pokles tloušťky letokruhu směrem ke kambiu. Vliv uvolnění porostu a jeho pozitivní vliv na tloušťku letokruhu zmiňuje několik autorů (Tsoumis 1991, Peltola *et al.* 2009, Candel-Pérez *et al.* 2018). Peltola *et al.* (2002) uvádí, že nárůst růstu borovice lesní se projevil pouze u silně prořezaných porostů. Tloušťka letokruhu vysoce koreluje s podílem letního dřeva (Požgaj *et al.* 1997). Výsledky studie ukazují vyšší zastoupení letního dřeva v letokruhu před odkácením mateřského porostu, kdy je tloušťka letokruhu nízká. Zvýšením tloušťky letokruhu dochází i ke snížení podílu letního dřeva.

Holosečný způsob obnovy sleduje zvyšující se trend podílu letního dřeva ke kambiu, což potvrzuje i Požgaj *et al.* 1997. Candel-Pérez *et al.* 2018 uvádí, že prořezání může vést i ke zvýšení podílu letního dřeva což může vést i ke zvýšení hustoty dřeva. Mörling (2002) prokázal, že dopad prořezání nemá téměř žádný vliv na hustotu dřeva. Na druhou stranu někteří autoři uvádí, že vlivem prořezávání dochází ke zrychlení růstu a v souvislosti s tím i ke snížení vlastností dřeva (Tsoumis 1991, Jaakkola *et al.* 2005). Wodzicki (2001) dokonce uvádí, že vliv prořezávání může vést ke zvýšení hustoty dřeva.

Dřevo s nejnižšími hodnotami vlastností se u holosečného způsobu obnovy nachází ve středu kmene a směrem od dřeně se zkoumané vlastnosti dřeva zvyšují. Trend šířky letokruhu do jisté míry vysvětluje průběh vlastností u takto regenerovaných porostů. Dopad šířky letokruhu na vlastnosti dřeva popisuje Kollmann (1951) nebo Tsoumis (1991). Barnett a Jeronimidis (2003) uvádějí, že zvýšená rychlost růstu dřeva vede k vyššímu podílu juvenilního dřeva, což negativně ovlivňuje vlastnosti dřeva ve středu kmene (Macdonald a Hubert 2002, Auty *et al.* 2016, Moore *et al.* 2017). Jelikož je dopad juvenilního dřeva na finální kvalitu dřeva nemalý, je nutné definovat, jak velký podíl juvenilní dřeva v kmeni zaujímá (Barnett a Jeronimidis 2003). Podíl juvenilního dřeva v kmeni je diskutováno v mnoha odborných publikacích (Macdonald a Hubert 2002, Bembenek *et al.* 2015). Yang (1994) uvádí, že velikost juvenilního dřeva je dána především počtem jedinců v porostu. Avšak Hébert *et al.* (2016) uvádí, že rozestupy mezi stromy nemají na tvorbu juvenilního dřeva významný vliv.

Ve skandinávských zemích, kde borovice lesní hraje roli nejvýznamnější komerční dřeviny, bez ohledu na použitou metodu regenerace, dosahuje ve většině případů vyšší hodnoty vlastností dřeva borovice lesní, než bylo zjištěno v této studii (Aleinikovas a Grigaliūnas 2006, Kask 2015). Výsledky podobné těm ze severských zemí byly popsány v podmínkách střední Evropy (Tsoumis 1991, Wagenführ 2000). V České republice Hassan *et al.* (2013) uvedli pevnostní charakteristické hodnoty srovnatelné s našimi měřeními, nicméně Novák (1970) a Požgaj *et al.* (1993) dosáhl vyšších hodnot. Nižší hodnoty zjištěných charakteristik, než jaké uvádí literatura, jsou způsobeny nízkým věkem zkoumaných stromů, který je výrazně nižší než obvyklá mytní doba borovice lesní v ČR. Lze tedy předpokládat, že s přibývajícím věkem stromu se budou zvyšovat i hodnoty vlastností dřeva.

Závěrem je třeba poznamenat, že v našem výzkumu jsme zkoumali pouze vliv daného lesnického přístupu na vlastnosti dřeva bez zohlednění dalších výhod a nevýhod obou metod regenerace. Z ekologického hlediska existuje mnoho studií, které potvrzují přínosy obnovy

lesa pod zástiněm mateřského porostu, především s ohledem na charakteristiku mikrostanoviště (Giuggiola *et al.* 2013) a stabilitu lesních porostů v důsledku jejich vyšší strukturní heterogenity (Spathelf *et al.* 2015).

7 Závěry

Clonný způsob obnovy lesa byl dosud považován za jeden z možných prostředků ke zvýšení hodnotové produkce porostů při dlouhé obnovní době a uplatnění individuálního výběru (Bílek *et al.* 2018). Dopad způsobu obnovy na kvalitu dřeva borovice lesní na území České republiky nebyl doposud hodnocen. Z hlediska zpracovatelského průmyslu tedy nebylo možné konstatovat, zda clonný způsob obnovy produkuje ve srovnání s holosečným způsobem obnovy dřevo vyšší kvality.

Výzkum se zabýval dopadem clonného způsobu obnovy lesa na fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva, které jsou důležitým indikátorem pro finální využití dřeva. Bylo předpokládáno, že clonný způsob obnovy vykazuje, v porovnání s holosečným způsobem obnovy, dřevo vyšší kvality. I když se ve většině zkoumaných vlastností tento trend potvrdil, tak významný rozdíl hodnot byl nalezen jen málokde. Z hlediska zpracovatelského průmyslu jsou rozdíly zjištěných hodnot zanedbatelné. Je třeba vzít v úvahu, že výzkum probíhal na vzornících s nízkým věkem.

Vliv aplikované pěstební metody se mnohem významněji projevil na rozložení vlastností v radiální rovině kmene. Rozložení vlastností dřeva po šířce kmene u holosečného způsobu obnovy vykazuje jednoznačně rostoucí tendenci směrem od dřeně ke kambiu. U clonného způsobu obnovy bylo zjištěno rovnoměrné rozložení vlastností dřeva po šířce kmene. Clonným způsobem obnovy lze ovlivnit kvalitativní parametry dřeva jak v pozitivním, tak i v negativním smyslu. Zejména předčasné uvolnění mateřského porostu může vést ke snížení kvality dřeva a úplnému vytracení pozitivního efektu clonnému způsobu obnovy lesa. Z hlediska zpracovatelského průmyslu není u porostů obnovených přirozeným způsobem podstatné, z které části kmene dřevo pochází. Rozdíly ve vlastnostech dřeva nenalzáme jen po šířce kmene, ale lze je nalézt i po výšce kmene. Vliv vertikální polohy na kvalitu dřeva má u obou obnovních postupů stejný trend. S rostoucí výškou kmene vlastnosti dřeva klesají a lze tedy konstatovat, že nejkvalitnější dříví se nalzáá v bazální části kmene, což bylo zjištěno u obou způsobů obnovy. Dalším významným faktorem, ovlivňujícím výsledné vlastnosti dřeva, je tloušťka letokruhu. Tloušťka letokruhu pozitivně koreluje s mechanickými vlastnostmi

dřeva. Clonný způsob obnovy eliminuje rozsah zóny juvenilního dřeva a její negativní dopad. Vliv světových stran na vlastnosti dřeva se neprojevil u žádného způsobu obnovy.

Zkoumané porosty jsou charakteristické pro růst borovice lesní na našem území. U obou způsobů obnovy bylo dosaženo nižších hodnot výsledných vlastností, než uvádí literatura. Nižší hodnoty vlastností jsou způsobeny nízkým věkem zkoumaných stromů, který je nižší, než je mytní doba borovice lesní v ČR. Dá se předpokládat, že s přibývajícím věkem stromu se budou zvyšovat i hodnoty vlastností dřeva.

8 Přínos pro vědu a praxi

Hlavní přínos pro vědu a praxi je komplexní pojetí problematiky pěstování borovice lesní na vlastnosti dřeva, které nebylo na území České republiky doposud provedeno. Předkládaná práce se zaměřuje na hodnocení dvou odlišných způsobů pěstování borovice lesní a přináší souhrnné hodnocení kvalitativních parametrů dřeva.

Z hlediska zpracovatelského průmyslu bylo předpokládáno, že clonný způsob obnovy bude dosahovat, v porovnání s vysazovanými porosty, dřevo vyšší kvality. Toto dogma se nepotvrdilo a nelze tedy tvrdit, že přirozená obnova produkuje stromy s lepšími vlastnostmi. Porosty obnovené přirozeným způsobem dosahují nízkých objemových přírůstků v rané fázi růstu, po uvolnění mateřského porostu dochází ke zvýšení tvorby dřevní hmoty. U porostů obnovených clonným způsobem bylo zjištěno rovnoměrné rozložení vlastností po šířce kmene a pro finální zpracování tedy není podstatné, ze které části kmene dřevo pochází.

Pochopením dopadu růstu stromu, zejména konkurencí mezi stromy, je jednou z možností, jak lze ovlivnit výslednou kvalitu dřeva, a to jak v pozitivním, tak i negativním slova smyslu.

9 Seznam literatury

1. Adamopoulos, S., Passialis, C., Voulgaridis, E. (2010). “Ring width, latewood proportion and density Relationships in black locust wood of different origins and clones”, *IAWA Journal*, 31, 169–178.
2. Agestam, E., Ekö, P.M. a Johansson, U. (1998). “Timber quality and volume growth in naturally regenerated and planted Scots pine stands in S.W.”, Sweden. *Studia Forestalia Suecica*, 204, 1-17.
3. Alcorn, P.J., Pyttel, P., Bauhus, J., Smith, R.G.B., Thomas, D., James, R. (2007). “Effects of initial planting density on branch development in 4-year-old plantation grown *Eucalyptus pilularis* and *Eucalyptus cloeziana* trees”, *Forest Ecology and Management*, 252, 41-51.
4. Aleinikovas, M., Grigaliūnas, J. (2006). “Diferences of Pine (*Pinus sylvestris* L.) Wood Physical and Mechanical Properties from Diferent Forest Site Types in Lithuania“, *Baltic Forestry*, 12, 9–13.
5. Amuakwa-Mensah, F. (2017). “Essays on the Economics of Multifunctional Forests, Migration and Climate Change”, Doctoral thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, pp. 27, ISBN 978-91-7760-009-1.
6. Auty, D., Achim, A. (2008). “The relationship between standing tree acoustic assessment and timber quality in Scots pine and the practical implications for assessing timber quality from naturally regenerated stands”, *Forestry*, 81, 475–487.
7. Auty, D., Achim, A., Macdonald, E., Cameron, A.D., Gardiner, B. A. (2014). “Models for predicting wood density variation in Scots pine”, *Journal of Forest Research*, 62, 403-413.
8. Auty, D., Weiskittel, A.R., Achim, A., Moore, J.R., Gardiner, B.A. (2012). “Influence of early re-spacing on Sitka spruce branch structure”, *Annals of Forest Science*, 69, 93-104.
9. Barnett, J.R., Jeronimidis, G. (2003). “Wood Quality and its Biological Basis”, Blackwell Publishing Ltd, pp. 240, ISBN: 978-1-405-14781-1.
10. Beck, W. (2000). “Silviculture and stand dynamics of Scots pine in Germany”, *Forest Systems*, 9, 199-212.
11. Béland, M., Agestam, E., Ekö, P.M., Gemmel P., Nilsson U. (2000). “Scarification and Seedfall affects Natural Regeneration of Scots Pine Under Two Shelterwood

- Densities and a Clear-cut in Southern Sweden”, *Scandinavian Journal of Forest Research*, 15, 247-255.
12. Bembenek, M., Giefing, D.F., Jelonek, T., Karaszewski, Z., Kruszyk, R., Tomczak, A., Woszczyk, M. and Mederski, P.S. 2015. Carbon Content in Juvenile and Mature Wood of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). *BalticForestry* 21, 279-284.
 13. Benson, H.P. (1957). “Juvenile wood in conifers. *Forest Products Technologist*, U. S. Department of Agriculture”, 9, 2094.
 14. Bergstedt, A. (2013). “Effects of application of organic and inorganic fertilizer on Scots Pine (*Pinus silvestris* L.) needle nutrient composition and tree growth”, Master thesis, Umeå University, Sweden, pp. 34.
 15. Bílek, L., Zeidler, A., Pulkrab, K., Ulbrichová, I., Vacek, S., Borůvka, V., Vítámvás, J., Remeš, J., Vacek, Z., Sloup, R. (2019). “Pěstební a Ekonomické Aspekty Clonné Obnovy Borovice Lesní. (Silvicultural and Economical Aspects of Shelterwood Regeneration of Scots Pine)“, *Lesnický Průvodce: Strnady*, pp. 56.
 16. Biondi, F. (2000). “Are Climate-Tree Growth Relationships Changing in North-Central Idaho, U. S. A.?””, *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 32, 111-116. ISSN 1938-4246.
 17. Bytnerowicz, A., Badea, O., Barbu, I., Fleischer, P., Fraczek, W., Gancz, V., Godzik, B., Grodzinska, K., Grodzki, W., Karnosky, D., Koren, M., Krywult, M., Krzan, Z., Longauer, R., Mankovska, B., Manning, W. J., Mc Manus, M., Musselman, R. C., Novotny, J., Popescu, F., Postelnicu, D., Prus-Glowacki, W., Skawinski, P., Skiba, S., Szaro, R., Tamas, S., Vasile, C. (2003). “New international long-term ecological research on air pollution effects on the Carpathian Mountain forests”, *Environment International*, 29, 367-376, ISSN 0160-4120.
 18. Cameron, A.D., Dunham, R.A., Petty, J.A. (1995). “The effects of heavy thinning on stem quality and timber properties of silver birch (*Betula pendula*)”, *Forestry*, 68, 275–286.
 19. Candel-Pérez, D., Lo, Y.H., Blanco, J., Chiu, C.M., Camarero, J., de González, A., Ester, I.J., Castill, F. (2018). “Drought-Induced Changes in Wood Density Are Not Prevented by Thinning in Scots Pine Stands“, *Forests*, 9, 4.

20. Carson, S.D., Cown, D.J., McKinley, R.B., Moore J.R. (2014) “ Effects of site, silviculture and seedlot on wood density and estimated wood stiffness in radiata pine at mid-rotation”, New Zealand Journal of Forestry Science, 44, 26.
21. Carson, S.D., Cown, D.J., McKinley, R.B., Moore, J.R. (2014). “Effects of site, silviculture and seedlot on wood density and estimated wood stiffness in radiata pine at mid-rotation”, New Zealand journal of Forestry Science, 44, 26.
22. ČSN 49 0101. (1980). “Drevo: Všeobecné požiadavky na fyzikálne a mechanické skúšky”, Praha, Úrad pro normalizaci a měření, pp. 8.
23. ČSN 49 0103. (1979). “Drevo: Zisťovanie vlhkosti při fyzikálních a mechanických skúškách”, Praha: Úrad pre normalizáciu a meranie, pp. 8.
24. ČSN 49 0108. (1993). “Zisťovanie hustoty pri fyzikálnych a mechanických skúškach”, Praha, Federální úřad pro normalizaci a měření, pp. 5.
25. ČSN 49 0110. (1980). “Drevo: Medza pevnosti v tlaku v smere vlákien”, Praha: Úradu pre normalizáciu a meranie, pp. 7.
26. ČSN 49 0116. (1980). “Drevo: Metóda zisťovania modulu pružnosti při statickom ohybe”, Praha: Úradu pre normalizáciu a meranie, pp. 7.
27. ČSN 49 0116. (1980). “Drevo: Zisťovanie medze pevnosti v statickom ohybe”, Praha: Úradu pre normalizáciu a meranie, pp 7.
28. ČSN 49 0117. (1997). “Drevo: Rázová húževnatost v ohybe”, Praha: Český normalizační institut, pp. 3.
29. ČSN 49 0128. (1989). “Drevo: Skúšky vlastností rastlého dreva: Metóda zisťovania zosýchavosti”, Praha: Úrad pre normalizáciu a meranie, pp. 20.
30. Čvančara, A., Dvořáková, M., Hejný, S., Hrouda, L., Husák, Š., Chrtěk, J., Chrtková, A., Kovanda, M., Křisa, B., Kubát, K., Ložek, V., Moravec, J., Neuhausl, R., Osvačilová, V., Skalická, A., Skalický, V., Slavík, B., Slavíková, Z., Smejkal, M., Sutoryý, K., Šourková, M., Tomšovic, P., Zelený, V. (1997), “Květena ČESKÉ REPUBLIKY. I.”, Praha: Academia, pp. 557, ISBN 80-200-0643-5.
31. 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. ISSN 1365-2699.

32. Ekö, P.M. Agestam, E. (1994). "A comparison of naturally regenerated and planted Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) on fertile sites in southern Sweden", *Forest & Landscape Research*, 1, 111-126.
33. Eriksson, D., Lindberg, H., Bergsten, U. (2006). "Influence of silvicultural regime on wood structure characteristics and mechanical properties of clear wood in *Pinus sylvestris*", *Silva Fennica*, 40, 325.
34. Erkan, N., Uzun, E., Aydin, A.C., Bas, M.N. (2016). "Effect of Pruning on Diameter Growth in *Pinus brutia* Ten", *Plantations in Turkey. Croatian Journal of Forest Engineering* 37, 365-373.
35. Fahlvik, K. (2005). "Aspects of Precommercial Thinning in Heterogeneous Forests in Southern Sweden", Doctoral thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, pp. 38, ISBN 91-576-6967-8.
36. Fajstavr, M. (2018). "Analýza tvorby buněk sekundárního xylému a floému borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) v reakci na stres suchem", Doctoral Thesis, Mendelova univerzita v Brně, pp. 205.
37. Farsi, M., Kiaei, M., Miar, S., Kiasari, S.M. (2013). "Effect of Seed Source on Physical Properties of Scots Pine (a Case Study in Neka, Iran)", *Drvna industrija*, 64, 183-191.
38. Fellner, J., Teischinger, A., Zschokke, W. (2007). "Spektrum dřevin: vyobrazení, popis a srovnávací údaje", Vienna proHolz Austria, pp. 111.
39. Fielding, J.M. (1965). "Pruning *Pinus radiata* in Australia, with particular reference to the wood produced", IUFRO Sect 41 Melbourne, pp. 8.
40. Fischer, C., Vestøl, I.G, Høibø, O. (2016). "Modelling the variability of density and bending properties of Norway spruce structural timber", *Canadian Journal of Forest Research*, 46, 978-985.
41. Gartner, B.L., Robbins, J.M, Newton, M. (2003). Effects of pruning on wood density and tracheid length in young douglas-fir", *Wood and Fiber Science*, 37, 304–313.
42. Giuggiola, A., Bugmann, H., Zingg, A., Dobbertin, M., Rigling, A. (2013). "Reduction of stand density increases drought resistance in xeric Scots pine forests", *Forest Ecology and Management*, 310, 827-835.
43. Gross, J., Roček, I. (2000). "Lesní hospodářství", Praha: Česká zemědělská univerzita, pp. 145, ISBN 80-213-0586-7.

44. Gryc, V., Holan, J. (2004). "Influence of position within the tree stem according to growth-ring width of spruce (*Picea abies* /L./ KARST.) with compression wood", *Acta univ. agric. et silvic. Mendel. Brun.*, 4, 59-72.
45. Haapanen, M. Poykko, T. (1993). "Genetic relationships between growth and quality traits in an 8-year-old half-sib progeny trial of *Pinus sylvestris*", *Scandinavian Journal of Forest Research*, 8, 305-312.
46. Hakkila, P. (1966). "Investigations on the basic density of Finnish pine, spruce and birch wood", *Comm. Inst. For. Fenn.* 61, 1-98.
47. Hapla, F., Oliver-Villanueva, J.V., González-Molina, J.M. (2000). "Effect of silvicultural management on wood quality and timber utilisation of *Cedrus atlántica* in the European mediterranean area", *Holz als Roh-und Werkstoff*, 58, 1-8.
48. Hart, J.F. (2010). "A review of the effects of silviculture on wood quality", Master, University of British Columbia, Canada, pp. 27.
49. Hassan, K.S., Horáček, P., Tippner, J. (2013). "Evaluation of stiffness and strength of scots pine wood using resonance frequency and ultrasonic techniques", *BioResources*, 8, 1634–1645.
50. Hautamäki, S., Kilpeläinen, H., Verkasalo, E. (2014). "Factors and models for the bending properties of sawn timber from Finland and north-western Russia. Part II: Scots pine", *Baltic Forestry*, 20, 142-156.
51. Herman, F.R. (1962). "Shelterwood cutting", *Pulp & paper*, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, Oregon, pp. 3.
52. Høibø, O., Vestøl, G.I. (2010). "Modelling the variation in modulus of elasticity and modulus of rupture of Scots pine round timber", *Canadian Journal of Forest Research*, 40, 668-678.
53. Holmsgaard, E. (1956). "Authors Summary: Holmsgaard. Tree-Ring Analyses of Danish Forest Trees", *Tree-Ring Bulletin*, 21, 25-27, ISSN 0041-2198.
54. Ivković, M., Gapare, W., Wu, H., Espinoza, S., Rozenberg, P. (2013). "Influence of cambial age and climate on ring width and wood density in *Pinus radiata* families", *Annals of Forest Science*, 70, 525-534.
55. Jaakkola, T., Mäkinen, H., Saranpää, P. (2006). "Wood density of Norway spruce: Responses to timing and intensity of first commercial thinning and fertilisation", *Forest Ecology and Management*, 237, 513-521.

56. Jelonek, T., Pazdrowski, W., Tomczak, A., (2009). "The effect of biological class and age on physical and mechanical properties of european larch (*Larix decidua* MILL.) in Poland", Wood Research 54, 1-14.
57. Jelonek, T., Pazdrowski, W., Tomczak, A., Grzywiński, W. (2012). "Biomechanical stability of pines growing on former farmland in northern Poland", Wood Research, 57, 31-44.
58. Jelonek, T., Tomczak, A., Jakubowski, M., Pazdrowski, W., (2005). "Properties of scots pine (*Pinus sylvestris* L.) timber growing on former arable and forest land", Acta Scientiarum Polonorum, 4, 35-47.
59. Jiang, Z. H., Wang, X. Q., Fei, B. H., Ren, H. Q., Liu, X. E. (2007). "Effect of stand and tree attributes on growth and wood quality characteristics from a spacing trail with *Populus xiaohei*", Annual Forest Science, 64, 807-814.
60. Jozsa, L.A., Middleton, G.R. (1994). "A Discussion of Wood Quality Attributes and Their Practical Implications", Vancouver, Forintek Canada Corporation, pp. 42.
61. Kärenlampi, P.P., Riekkinen, M. (2004). "Maturity and growth rate effects on Scots pine basic density", Wood Science Technology, 38, 465–473.
62. Kärkkäinen, M. (1976). "Effect of tree social status on the basic density of Norway spruce", Silva Fennica, 18, 115–120.
63. Kask, R. (2015). "The influence of growth conditions on physico-mechanical properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood in Estonia", Doctoral thesis, Institute of Forestry and Rural Engineering, Estonia, pp. 164. ISSN 2382-7076.
64. Kollmann, F. (1951) "Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe", SpringerVerlag Berlin Heidelberg, pp. 1050.
65. Koprowski, M., Przybylak, R., Zielski, A., Pospieszńska, A. (2012). "Tree rings of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) as a source of information about past climate in northern Poland", Intitute Journal Biometeorol, 56, 1-10.
66. Koubaa, A., Hernández, R., Beaudoin, M. (1998). "Shrinkage of fast-growing hybrid poplar clones", Forest Products Journal, 48, 82-87.
67. Krahmer, R. L. (1986), "Fundamental anatomy of juvenilie and mature wood. Proc Tech Workshop: Juvenile wood – what does it mean to forest management and forest products", Forest products research socirty Madison, Wisconsin, pp. 12-16.
68. Kremer, B. P. (1995). "Stromy", Praha: Ikar, pp. 287, ISBN 80-85830-92-2.

69. Kretschmann, D. E., Moody, R. C., Pellerin, R. F., Bendtsen, B. A., Cahill, J. M., Mcalister, R. H., Sharp, D. W. (1993). "Properties of Juvenile Wood", *Techline-Properties and Use of Wood, Composites, and Fiber Products*. pp. 2.
70. Kučera, B. (1992). "A hypothesis relating current annual height increment to juvenile wood formation in Norway Spruce", *Wood and Fiber Science*, 26, 152-167.
71. Larson, P.R. (1969). "Wood formation and the concept of wood quality", *Bulletin no. 74*. New Haven, CT: Yale University, School of Forestry. pp. 54.
72. Larson, P.R. (1969b). "Wood formation and the concept of wood quality", *Yale Univ Sch For Bull*, 74, pp. 54.
73. Lebourgeois, F. (2000). "Climatic signals in earlywood, latewood and total ring width of Corsican pine from western France", *Annual Forest Science*, 57, 155-164.
74. Linderholm, W, H. (2015). "Climatic influence on Scots pine growth on dry and wet soils in the central Scandinavian mountains, interpreted from tree-ring widths", *Silva Fennica*, 35, 574.
75. Lindholm, M., Lehtonen, H., Kolström, T., Meriläinen, J., Eronen, M., Timonen, M. (2000). "Climatic signals extracted from ring-width chronologies of Scots pines from the northern, middle and southern parts of the boreal forest belt in Finland", *Silva Fennica*, 34, 616.
76. Lindström, H. (2002). "Intra-tree models of juvenile wood in Norway spruce as an input to simulation software", *Silva Fennica*, 36, 521-534.
77. Liu, C., Zhang, S.Y., Cloutier, A., Rycabel, T. (2007). "Modeling lumber bending stiffness and strength in natural black spruce stands using stand and tree characteristics", *Forest Ecology and Management*, 242, 648-655.
78. Liziniewicz, M. (2014). "Influence of spacing and thinning on wood properties in conifer plantations", *Doctoral Thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Sweden*, pp.62. ISSN 1652-6880.
79. Macdonald, E., Gardiner B., Mason W. (2010). "The effects of transformation of even-aged stands to continuous cover forestry on conifer log quality and wood properties in the UK", *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 83, 1, 1-16.
80. Macdonald, E., Hubert, J., (2002). "A review of the effects of silviculture on timber quality of Sitka spruce", *Forestry*, 75, 107-138.

81. Mäkinen, H., Colin, F. (1998). "Predicting branch angle and branch diameter of Scots pine from usual tree measurements and stand structural information", *Canadian Journal of Forest Research*, 28, 1686-1696.
82. Makinen, H., Hynynen J. (2014). "Wood density and tracheid properties of Scots pine: responses to repeated fertilization and timing of the first commercial thinning", *Forestry*, 87, 437-447.
83. Mäkinen, H., Isomaki, A. (2004). "Thinning intensity and growth of Scots pine stands in Finland", *Forest Ecology and Management*, 201, 311-325.
84. Mamoňová, M. (2013). "Wood Anatomy", Technical University In Zvolen, Zvolen, pp. 123.
85. Mederski, P.S., Bembenek, M., Karaszewski, Z., Giefing, D.F., Sulima-Olejniczak E., Rosińska, M., Łacka, A. (2015). "Density and mechanical properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood from a seedling seed orchard", *Drewno*, 58, 117-125.
86. Ministry of Agriculture of the Czech Republic (MZe) (2016). "Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2015", Available at <http://www.uhul.cz/ke-stazeni/informace-o-lese/zelene-zpravy-mze> (accessed Dec 17, 2016).
87. Moavenzadeh, F., Cahn, R.W. (1990). "Concise encyclopedia of building & construction materials", Pergamon Press, 1st edition; Michigan, pp. 682. ISBN: 978-0080347288.
88. Moilanen, M., Hytönen, J., Hökkä, H., Ahtikoski, A., (2015). "Fertilization increased growth of Scots pine and financial performance of forest management in a drained peatland in Finland", *Silva Fennica*, 49, 19.
89. Moore, J.R., Lyon, A.J., Searles, G.J., Vihermaa, L.E. (2009). "The effects of site and stand factors on the tree and wood quality of Sitka spruce growing in the United Kingdom", *Silva Fennica* 43, 383-396.
90. Mörling, T., (2002). "Evaluation of annual ring width and ring density development following fertilisation and thinning of Scots pine", *Annual Forestry Science*, 59, 29-40.
91. Mörling, T., Valinger, E. (1999). "Effects of Fertilization and Thinning on Heartwood Area, Sapwood Area and Growth in Scots Pine", *Scandinavia Journal Forest Research*, 14, 462-469.

92. Muñoz, G.R., Cañas, M.A.S., Soalleiro, R.R. (2008). "Physical properties of wood in thinned Scots pines (*Pinus sylvestris* L.) from plantations in northern Spain", *Annals of Forest Science*, 65, 507-507.
93. Mutz, R., Guilley, E., Sauter, U., Nepveu, G. (2004). "Modelling juvenile-mature wood transition in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) using nonlinear mixed-effects models", *Annals of Forest Science*, 61, 831-841.
94. Mutz, R., Guilley, E., Sauter, U.H., Nepveu, G. (2005). "Modelling juvenile-mature wood transition in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) using nonlinear mixed-effects models", *Annual forest Science*, 61, 831-841.
95. Nicholls, J.W.P, Brown, A.G. (1973). "The relationship between ring width and wood characteristics in double-stemmed trees of radiata pine", *Forest research*, 1, 105-11.
96. Novák, V. (1970). "Dřevařská technická příručka", Praha: SNTL. pp. 748, ISBN 04-821-70.
97. Ozolinčius, R., Varnagirytė-Kabašinskienė, I., Stakėnas, V., Mikšys, V. (2007). "Effects of wood ash and nitrogen fertilization on Scots pine crown biomass", *Biomass and Bioenergy*, 31, 700–709.
98. Pang, S. (2002). "Predicting anisotropic shrinkage of softwood Part 1: Theories", *Wood Science and Technology*, 36, 75-91.
99. Paul, B. H. (1960). "The juvenile core in conifers", *TAPPI Journal*. 43, 1–2.
100. Peltola, H., Kilpeläinen, A., Sauvala, K., Räsänen, T., Ikonen V. (2007). "Effects of Early Thinning Regime and Tree Status on the Radial Growth and Wood Density of Scots Pine", *Silva Fennica*, 41, 489-505.
101. Persson, A. (1975). "Ved och pappersmassa från gran och tall i olika förband. (Wood and pulp of Norway spruce and Scots pine at various spacings)", *Skogshögsk Stockholm Inst Skogsprod Rapp Upps* 37, pp. 145.
102. Pikk, J., Kask, R. (2004). "Mechanical properties of Juvenile Wood of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) On Myrtillus Forest Site Type", *Baltic Forestry*, 10, 72-78.
103. Pokorný, J., Matoušová, V., Konečná, K. (1990). "Stromy", Praha: Aventinum, pp. 222, ISBN 80-7151-045-9.
104. Požgaj, A., Chovanec, D., Kurjatko, S., Babiak, M. (1997). "Štruktúra a vlastnosti dreva", Bratislava, Príroda, pp. 485.

105. Pretzsch, H., Río, M., Schütze, G., Mohren, F., Ouden, J. (2016). “Mixing of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) enhances structural heterogeneity, And the effect increases with water availability”, *Forest Ecology and Management*, 373, 149–166.
106. Punches, J. (2004). “Tree Growth, Forest Management, and Their Implications for Wood Quality”, A Pacific Northwest Extension publication, pp. 8.
107. Raiskila, S., Saranpää, P., Fagerstedt, K., Laakso, T., Löija, M., Mahlberg, R., Paajanen, L., and Ritschkoff, A.C. (2006). “Growth rate and wood properties of Norway spruce cutting clones on different sites”, *Silva Fennica*, 40, 247-256.
108. Raymond, C.A. (2002). “Genetics of Eucalyptus wood properties”, *Annals of Forest Science*, 59, 525-531.
109. Repola, J. (2006). “Models for vertical wood density of Scots pine, Norway spruce and birch stems, and their application to determine average wood density”, *Silva Fennica*, 40, 673-685.
110. Rojo, A., Diéguez-Aranda, U., Rodríguez-Soalleiro, R., Von Gadow, K. (2005). “Modelling silvicultural and economic alternatives for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) plantations in north-western Spain”, *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 78, 4, 385–401.
111. Roszyk, E., Moliński, W., Kusiak, W., Pradzyński, W., Zborowska, M. (2016). “Physical properties of Scots pine wood from the Notecka Forest”, *Sylwan*, 160, 547-555.
112. Saarmann, E. (1998). “Puiduteadus. Wood science”, pp. 247.
113. Sattler, D.F., Finlay, C., Stewart, J.D. (2015). “Annual ring density for lodgepole pine as derived from models for earlywood density, latewood density and latewood proportion”, *Forestry*, 88, 622-632.
114. Savina, A.V. (1956). “The physiological justification for the thinning of forests”, *Israel Program for Scientific Translations*, pp. 91.
115. Shmulsky, R., Jones, D.P. (2011). “Forest Products and Wood Science: An Introduction”, New York, Wiley-Blackwell, pp. 504, ISBN: 978-1-119-42643-1.
116. Schindler, D. (2008). “Responses of Scots pine trees to dynamic wind loading”, *Agricultural and Forest Meteorology*, 148, 1733–1742.
117. Schoch, W., Heller, I., Schweingruber, F.H., Kienast, F. (2004). “Wood anatomy of central European Species”, Online version: www.woodanatomy.ch

118. Slávik, M., Bažant V. (2012). “Soubor map – zastoupení hospodářských dřevin v ČR”, Praha: Česká Zemědělská Univerzita v Praze, pp. 52.
119. Spathelf, P., Bolte, A., Maaten, E.C.D. (2015). “Is Close-to-Nature Silviculture (CNS) an adequate concept to adapt forests to climate change?“, *Landbauforschung Appl Agric Forestry Research*, 65, 161-170.
120. Stenberg, P., Möttus, M., Rautiainen, M., Sievänen, R. (2014). “Quantitative characterization of clumping in Scots pine crowns”, *Annals of Botany*, 114, 689-694.
121. Tomczak, A., Jelonek, T. (2013). “Radial variation in the wood properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) grown on former agricultural soil”, *Forest Research Papers*, 74, 171-177.
122. Tomczak, A., Jelonek, T., Jakubowski, M. (2013). “Density of scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood as an indicator of tree resistance to strong winds”, *Sylvan*, 157, 539-545.
123. Tomczak, A., Pazdrowski, W., Jelonek, T., Stypula, I. (2007). “Vertical variability of selected macrostructural properties of juvenile wood organization in trunks of scots pine (*Pinus Sylvestris* L.) trees”, *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 76, 27-33.
124. Torbenson, M.C.A., Stahle, D.W., Villanueva Díaz, J., Cook, E.R.,) Griffin, D. (2016). “The Relationship Between Earlywood and Latewood Ring-Growth Across North America”, *Tree-Ring Research*, 72, 53–66.
125. Trocha, L. K., Ewa Weiser, E., Robakowski, P. (2016). “Interactive effects of juvenile defoliation, light conditions, and interspecific competition on growth and ectomycorrhizal colonization of *Fagus sylvatica* and *Pinus sylvestris* seedlings”, *Mycorrhiza* 26, 47-56.
126. Tsoumis, G. (1991). “Science and technology of wood: Structure, Properties, Utimalization”, New York: Chapman and Hall, pp. 497. ISBN: 978-3-941300-22-4.
127. Ulvcrona, T., Ulvcrona, A.K. (2011). “The effects of pre-commercial thinning and fertilization on characteristics of juvenile clearwood of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.)”, *Forestry*, 84, 207-219.
128. Vestøl, G.I., Høibø, O., Langsethagen, K.G., Skaug, E., Skyrud, R.E.A. (2012). “Variability of density and bending properties of *Picea abies* structural timber”, *Wood Mater. Science Engeneering*, 7, 76-86.

129. Viewegh, J., Kusbach, A., Mikeska, M. (2003). "Czech forest ecosystem classification", *Journal of Forest Science*, 49, 74–78.
130. Vincent, M., Krause, C., Koubaa, A. (2011). "Variation in black spruce (*Picea mariana* (Mill.) BSP) wood quality after thinning", *Annals of Forest Science*, 68, 1115-1125.
131. Wagenführ, R. (2000). *Holzatlas*. 5. vydání. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag. pp. 707. ISBN 3-446-21390-2.
132. Wang, L., Payette, S., Bégin Y., (2001). "1300-year tree-ring width and density series based on living, dead and subfossil black spruce at tree-line in Subarctic Québec, Canada", *The Holocene*, 11, 333-341.
133. Wimmer, R. (1991). "Beziehungen zwischen Holzstruktur und Holzeigenschaften bei Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) im Nahbereich eines Fluoremittenten, Wien: WWG, Dissertationen der Univ. für Bodenkultur, pp. 227. ISSN 0256-4246.
134. Wodzicki, T.J. (2001). "Natural factors affecting wood structure", *Wood Science Technology*, 3, 5–26.
135. Worrell, R., Malcolm, D.C. (1990). "Productivity of Sitka spruce in northern Britain. 1. The effects of elevation and climate. *Forestry (United Kingdom)*", 63, 105-118.
136. Zeidler, A. (2012). "Lexikon dřeva", Praha: Česká Zemědělská Univerzita v Praze, pp 61.
137. Zeidler, A. (2013). " Sesychání dřeva lísky turecké (*Corylus colurna* L.) a jeho variabilita v kmeni", *Zprávy lesnického výzkumu*, 58, 10-16.
138. Zeidler, A., Šedivka, P. (2015). "Influence of selected factors on wood density variability in grand fir (*Abies Grandis* /douglas/ lindl.) *Wood Research* 60, 33-44.
139. Zobel, B. (1992). "Silvicultural Effects on Wood Properties", *IPEF International*, Piracicaba, 37, 31-38.
140. Zobel, B.J., Sprague, J.R. (1998). " Juvenile Wood in Forest Trees", Springer Berlin, Heidelberg, pp. 304, ISBN: 978-3-642-72126-7.
141. Zobel, B.J., van Buijtenen, J.P. (1989). "The Effect of Silvicultural Practices on Wood Properties. In *Wood Variation*", (Springer, Berlin, Heidelberg), pp. 218–248.
142. Zobel, B.J., van Buijtenen, J.P. (1989). "Wood Variation: Its Causes and Control", Springer-Verlag, Berlin, pp. 378, ISBN: 978-3642740718.