

Mendelova univerzita v Brně

Lesnická a dřevařská fakulta

Ústav nauky o dřevě

**Srovnání stavby a vybraných vlastností modřínu
opadavého a modřínů sibiřského**

Bakalářská práce

Brno 2017

Josef Alexa

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci: Srovnání stavby a vybraných vlastností modřínu opadavého a modřínu sibiřského vypracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.

Jsem si vědom/a, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity, a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně, dne 9. 5. 2017

Podpis

PODĚKOVÁNÍ:

Dovoluji si tímto poděkovat vedoucímu své bakalářské práce doc. Ing. Vladimíru Grycovi, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady. Dále bych rád poděkoval Ing. Janu Baarovi Ph.D. za pomoc při měření, zpracovávání dat a vyhodnocování výsledků.

Abstrakt

Josef Alexa

Srovnání stavby a vybraných vlastností sibiřského modřínu a modřínu opadavého

Cílem bakalářské práce bylo porovnat stavbu dřeva a vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti modřínu sibiřského a modřínu opadavého. Všechny zkoušky probíhaly na zkušebních tělískách o rozměrech 20×20×30 mm. Stavba dřeva byla porovnána na úrovni letokruhové analýzy a podílu letního dřeva v letokruhu, za použití stereolupy. Z fyzikálních vlastností byla zjištěna hustota modřínu opadavého 592 kg·m³ a modřínu sibiřského 611 kg·m³ při vlhkosti 12 %, bobtnání v jednotlivých směrech včetně bobtnání objemového a diferenciálního. Dále byla zjištěna maximální vlhkosti dřeva, která byla u dřeva modřínu opadavého stanovena na hodnotě 137,49 %. Dalším způsobem bobtnání je bobtnání ve vzdušném prostředí v laboratorním exikátoru a stanovení meze hygroskopicity, která je u dřeva modřínu opadavého při vlhkosti 24,8 %. Z mechanických vlastností byla zjišťována pevnost v tlaku ve směru vláken. Zkouška byla prováděna na zkušebním stroji Zwick Z050. Výsledkem jsou hodnoty meze pevnosti a moduly pružnosti. Rozdíl pevnosti mezi dřevem modřínu opadavého a modřínu sibiřského je 2,67 MPa.

Klíčová slova: modřín, sibiřský modřín, letokruh, bobtnání, pevnost dřeva v tlaku podél vláken

Abstract

Josef Alexa

Comparison of structure and selected properties of the Siberian larch and the European larch

The aim of the bachelor thesis was to compare the wood structure and selected physical and mechanical properties of the Siberian larch and the European larch. All the tests were carried out on test specimens of dimensions 20×20×30 mm. Wood structure was compared as regards the tree-ring width and the latewood proportion within a tree ring, using a stereomagnifier. As regards physical properties, the density of the European larch and the Siberian larch was established – 592 kg·m⁻³ and 611 kg·m⁻³ at 12 % moisture, respectively – as well as swelling in various directions including volumetric and differential swelling. Further, the maximum wood moisture content was determined as 137.49 % for the European larch. Another possible manner of swelling is swelling in the air of a laboratory desiccator and the determination of the fibre saturation point, which is a moisture content of 24.8 % in the case of the European larch. As regards mechanical properties, compression strength parallel to the grain was established. The test was carried out using Zwick Z050 testing machine. The resulting values show the breaking strength and the modulus of elasticity. The difference between the strength of European larch wood and Siberian larch is 2.67 MPa.

Key words: larch, Siberian larch, tree ring, swelling, compression strength parallel to the grain

Obsah

1	Úvod.....	8
2	Literární přehled.....	9
2.1	Charakteristika dřevin a dřeva	9
2.1.1	Dendrologická charakteristika	9
2.1.1.1	Borovicovité – <i>Pinaceae</i>	9
2.1.1.2	Modřín opadavý – <i>Larix decidua</i> Mill.....	9
2.1.1.3	Modřín sibiřský – <i>Larix sibirica</i> Ledeb.....	11
2.1.2	Charakteristika dřeva.....	12
2.1.2.1	Modřín opadavý – <i>Larix decidua</i> Mill.....	12
2.1.2.2	Modřín sibiřský – <i>Larix sibirica</i> Ledeb.....	13
2.2	Makroskopická stavba dřeva	13
2.2.1	Juvenilní dřevo.....	14
2.2.2	Rozdíly <i>Larix decidua</i> Mill. a <i>Larix Sibirica</i> Ledeb.....	14
2.3	Mikroskopická stavba dřeva jehličnatých dřevin.....	14
2.3.1.1	Modřín opadavý	15
2.3.1.2	Modřín sibiřský	16
2.3.2	Juvenilní dřevo.....	17
2.4	Hustota dřeva	17
2.4.1	Juvenilní dřevo.....	19
2.5	Pevnostní charakteristika	20
2.5.1	Pevnost dřeva v tlaku ve směru vláken	20
2.5.1.1	Modřín opadavý	21
2.5.1.2	Modřín sibiřský	21
2.5.1.3	Modul pružnosti	22
2.6	Vlhkost dřeva	22
2.6.1	Mez hygroskopicity – MH.....	23
2.6.2	Bobtnání	23
2.7	Využití dřeva.....	24
2.7.1	Modřín opadavý	24
2.7.2	Modřín sibiřský.....	25
2.7.3	Srovnání cen výrobků.....	26
3	Cíl práce.....	27

4	Materiál a metodika.....	28
4.1	Výroba zkušebních tělísek.....	28
4.2	Zjištění hustoty.....	29
4.3	Měření šířky letokruhu a šířky letního dřeva.....	29
4.4	Zjištění celkového bobtnání, meze hygroskopicity a maximální vlhkosti	30
4.5	Stanovení meze pevnosti a modulu pružnosti v tlaku ve směru vláken.....	31
5	Výsledky.....	33
5.1	Charakteristika letokruhu	33
5.2	Srovnání hustoty modřínu opadavého a modřínu sibiřského	35
5.3	Celkové bobtnání	38
5.4	Stanovení maximální vlhkosti a meze hygroskopicity.....	41
5.5	Stanovení meze pevnosti ve směru rovnoběžně s vláknou	45
6	Diskuze	50
6.1	Letokruhová analýza	50
6.2	Srovnání hustoty modřínu opadavého a modřínu sibiřského	51
6.3	Celkové bobtnání	52
6.4	Stanovení maximální vlhkosti a meze hygroskopicity.....	54
6.5	Stanovení meze pevnosti ve směru rovnoběžně s vláknou	55
7	Závěr.....	57
8	Summary.....	58
9	Seznam použité literatury	59

1 Úvod

Dřevo je přírodní obnovitelná surovina, která je člověkem využívána od pradávna. Původně jako zdroj tepla a postupem času také na vytváření různých nástrojů, přístřešků, příbytků atd. V nedávné minulosti byly stavěny domy právě ze dřeva, neboť to byla levná a dostupná surovina v porovnání s pálenými cihlami, které si mohla dovolit jen vyšší společnost. Výstavbu dřevěných domů omezila Marie Terezie, která vydala v roce 1751 tzv. ohňový patent, který stanovoval průlomové zásady požární ochrany, zejména stavbu domů z nehořlavých materiálů. Dnešní ekonomická situace je taková, že dřevo je poměrně drahým materiálem a domy postavené z masivního dřeva jsou dražší než domy cihlové. Dřevo viditelné v konstrukci nebo v interiéru dodává obyvatelům takové stavby nejen vkusný prvek, ale také pocit uvolnění a klidu. V posledních letech stoupá zájem o ekologické a zdravé bydlení, díky tomuto trendu se dřevěné domy objevují v našem okolí stále častěji. Každý výrobek ze dřeva je v podstatě originál, díky nehomogenosti tohoto materiálu, takže pokaždé nás překvapí jiná textura dřeva, množství a vzhled zarostlých suků atd. Dřevo nemusí tvořit jen nosnou část domu, může být použito jen jako povrchová vrstva stěn, interiérové podlahy, exteriérové fasády a stavebně truhlářské výrobky. K těmto účelům se nejčastěji používá modřínové dřevo, které vyniká oproti ostatním jehličnanům svou přirozenou trvanlivostí, odolností a krásnými tóny zbarvení. Rod *Larix* zahrnuje velkou škálu druhů, u nás je nejpoužívanější domácí modřín opadavý (*Larix decidua* Mill.) a v posledních letech modřín sibiřský (*Larix sibirica* Ledeb.), který je k nám dovážený z východu. Co se týče rozdílných vlastností těchto druhů dřev, právě na to je zaměřena tato práce, která porovná a vyhodnotí vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti těchto dřev.

2 Literární přehled

2.1 Charakteristika dřevin a dřeva

2.1.1 Dendrologická charakteristika

2.1.1.1 Borovicovité – *Pinaceae*

Jedná se o stálezelené nebo opadavé stromy nebo keře. Větévky jsou jednodomé často dvoutvárné dlouhé se spirálovitě uspořádanými někdy šupinovitými listy. Krátké větévky nesou na vrcholku husté svazečky listů. Listy jsou jednotlivě nebo ve svazečcích po 1–8, s pochvou, čepel čárkovitá nebo jehlicovitá, nesbíhavá. Šišťice jsou jednopohlavní, samčí jednotlivě nebo ve svazečcích s početnými a spirálovitě uspořádanými mikrosporofovy, ty mají 2 mikrosporangia, samičí šišťice vzpřímené, dozrávají v 1–3. roce a jsou pukavé nebo někdy nepukavé s početnými spirálovitě uspořádanými šupinami a listeny. Semenné šupiny jsou přitisklé, dřevnaté či kožovité, proměnlivé tvarem a velikostí, semena na vrcholku křídlatá s výjimkou některých borovic 9–11 rodů a kolem 235 druhů na severní polokouli. Borovicovité dřeviny jsou velmi cenné a hospodářsky důležité, mnoho stromovitých druhů poskytuje cenné stavební dřevo, pryskyřici, vlákninové dřevo, oleje a další produkty, početné druhy s mnoha kultivary jsou pěstovány jako dřeviny okrasné (Heike, 2008).

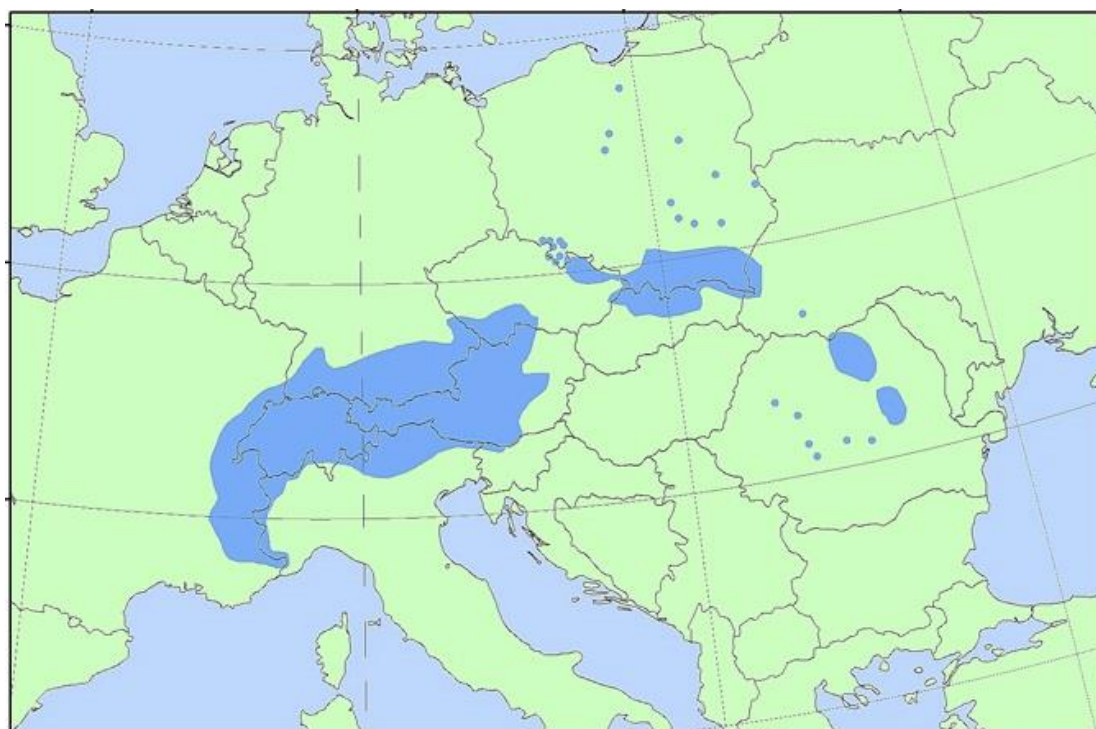
2.1.1.2 Modřín opadavý – *Larix decidua* Mill.

Jedná se o jehličnaté, opadavé stromy s kuželovitě vejcovitou, nepravidelnou a vzdušnou korunou. Dosahuje výšky až 50 metrů a stárí 500 i více let, roste téměř nejrychleji ze všech modřínů, v mládí dokonce ze všech jehličnanů. Vzrůst do výšky vrcholí kolem 20 let, po 60 letech slábne a trvá přes 100 let, růst do síly trvá téměř neomezeně, takže na vhodných stanovištích modřín dosahuje neobyčejných rozměrů, kmen může být až 2 m tlustý (výčetní tloušťka). Kůra je velmi silná, rozpraskaná, u dospělých jedinců dosahuje tloušťky až 10–20 cm. Vytváří mohutný kůlový kořen, který však brzy zakrňuje a je nahrazen silnými postranními kořeny, které se daleko rozvětvují a dřevině zajišťují značnou stabilitu. Vedle normálních výhonů vytváří i silně zkrácené větévky, tzv. brachyblasty. Každoročně opadávající jehlice jsou velmi měkké, ploché, do 30 mm dlouhé, vyrůstající v chomáčcích po 15–50 na brachyblastu. Krása modřínu vyniká nejenom na jaře, kdy je zbarvení jehlic svěže zelené, ale i přes léto, kdy barvu podrží a na podzim, kdy se barví zlatožlutě. Květy jsou jednopohlavní, samčí na konci bezlistých brachyblastů drobnější, převislé, žlutě zbarvené, samičí na konci

olistěných brachyblasty, vzpřímené, nápadně do červena zbarvené. Plody jsou nerozpadavé, vzpřímené, podlouhlé vejčité šištice 1,5–4 cm dlouhé setrvávající na stromě několik let. Semenné šupiny jsou vejčité až téměř okrouhlé, 8–15 mm velké. Listeny mají 3laločný vrcholek a nevyčnívají. Semena jsou tmavě hnědavě šedá, vejcovitě klínovitá (Heike, 2008).

2.1.1.2.1 Výskyt

Oblast přirozeného výskytu *Larix decidua* je poměrně malá. Největší oblasti se nachází v Alpách a menší na území v Karpatech, sudetských horách a na jihozápadě Polska. Většina studií se shoduje, že evropský modřín zahrnuje pět zeměpisných výskytů, podle kterých je často rozlišován na poddruhy (Bergstedt, Lyck, 2003). Farjon (1990) rozděluje *Larix decidua* na pouhé tři poddruhy (*decidua*, *polonica* a *carpatica*). V oblasti Alp pochází největší distribuce z oblasti Francie až na západ Slovinska. Modříny rostoucí v oblasti kolem Polska se liší oproti modřínům z oblasti Alp tím, že mají menší a kratší šišky s více zaoblenými semeny. Přírodní oblast výskytu je mezi Krakovem a Varšavou směrem k severovýchodu (Farjon 1990). Bornebusch (1948) uvádí, že modříny rostoucí severně od Dunaje jsou odolnější na škody způsobené mrazem než modříny rostoucí na jih od Dunaje.



Obr. 1 Přirozený výskyt *Larix decidua* Mill. (<http://www.euforgen.org>).

2.1.1.2 Situace modřínu opadavého v evropských zemích

V Německu modřín pokrývá asi 1 % z celkové výměry tavních lesů. Je vykupován a zpracováván ve dřevozpracujícím průmyslu jako řeziva a dýhy, které jsou prodávány za velmi vysoké ceny v případě, že kmen je bezchybný (Bornebusch, 1948). Ve Francii pokrývají modřínové porosty asi 100 000 ha. Stálý objem se odhaduje na 16 500 000 m³ nebo 2 % z jehličnatých zdrojů dřeva (Reuling et al., 2002). Ve Francii má modřín rozptýlenou distribuci. Přirozeně se vyskytuje v Alpách, kde je zpracováván na méně specializovaných pilách ve francouzských Alpách. V Rakousku je modřín nejvíce rozšířen, pokrývá 26 % z celkové výměry rakouských lesů (Grosser, Teetz, 1985). Severské a pobaltské země mají jen omezenou zásobu modřínového dřeva. Ve zbytku Evropy má několik zemí značné zdroje modřínového dřeva, zejména Velká Británie, Itálie, Polsko, Rakousko a Česká republika. Pokud v těchto zemích nedojde ke zvýšení pokrytí modřínem, budeme svědky toho, že západní Evropa bude závislá na dovozu modřínu z trhu na východě, bude-li nadále pokračovat aktuální trend spotřeby (Bergstedt, Lyck, 2003). V České republice je pokryto modřínem 99 707 ha, což je přibližně 3,9 %. Průměrné staří modřínových stromů v České republice je 56 let (MZE, 2004).

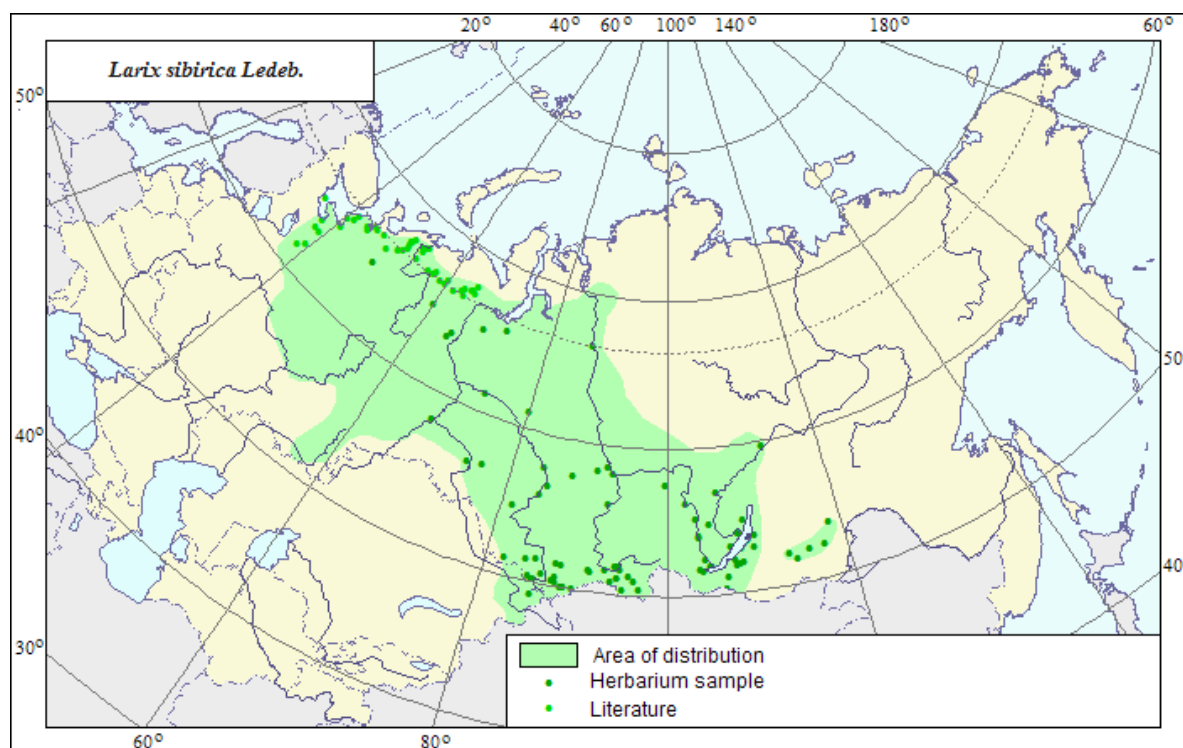
2.1.1.3 Modřín sibiřský – *Larix sibirica* Ledeb.

Jedná se o stromy vysoké 24–30 m, kmen 80–115 cm tlustý (výčetní tloušťka). Kůra tmavošedá až tmavohnědá, drsná, podélně rýhovaná. Koruna kónická s nepřevíslými větvkami, které jsou žluté nebo žlutošedé, v mládí hustě chlupaté, olysávající. Krátké větévky na vrcholku jsou hustě chlupaté, zimní pupeny téměř kulovité nebo kónické, pryskyřičnaté. Listy jsou 2–5 cm velké, naspodu kýlnaté, vrcholek špičatý nebo tupý. Semenné šištice jsou napurpurovéle nebo červenavě hnědé, vzácně zelené, za zralosti bledě hnědé nebo napurpurověle hnědé, vejcovité, 25–45 mm velké, obsahujících 25–40 semenných šupin, které jsou vejčité nebo úzce kosočtverečně vejčité a 10–18 mm velké, vrcholek tupý, listeny jsou fialové, podlouhle kopinaté, nevyčnívající. Semena světle hnědá, šikmo obvejcovitá, 10–15 mm velká včetně křídla (Heike, 2008).

2.1.1.3.1 Výskyt

Modřín sibiřský roste v široké škále půdních typů a různých terénech, ale dává přednost hluboké a vlhké půdě. Staré sibiřského stromy mohou dosáhnout výšky až 45 m, s průměrem 80–180 cm. Charakteristiky modřínu jsou jeho velký podíl jádrového dřeva a jasně definovatelné letní dřevo v letokruhu (Stern, 2003). Sibiřský

modřín pochází z velké distribuce z okolí Bílého moře v Rusku severovýchodně k jezeru Bajkal na Sibíři, v blízkosti ústí řeky Yenisei do pohoří Altaj, dále pak ze severu Mongolska a severozápadu Číny (Bergstedt, Lyck, 2003). Tyto oblasti jsou zásadní jako cenný zdroj konstrukčního řeziva, a to z důvodu vysokého tempa růstu v mladém věku a mechanickou jakostí zralého dřeva. Jednou z hlavních zásob modřínového dřeva je distribuce z Ruska, kde dosahuje asi 22,9 miliardy m³ a činí 30,4 % z celkového objemu ruských lesů (Abaimov et al., 1998). Rod *Larix* původem z Ruska se dělí na tři nebo více druhů (Abaimov et al., 1998).



Obr. 2 Přirozený výskyt *Larix sibirica* Ledeb. (<http://www.agroatlas.ru>).

2.1.2 Charakteristika dřeva

2.1.2.1 Modřín opadavý – *Larix decidua* Mill.

Modřínové dřevo je pevné, velmi trvanlivé a je cenným materiálem. Modřínové dřevo má lepší pevnostní vlastnosti než většina ostatních jehličnanů. Modřínové dřevo není vhodná surovina pro papírenský průmysl v důsledku vysokého obsahu arabinogalaktanů ve dřevě. Jádrové dřevo je velmi trvanlivé a odolné, dobře se suší, málo se bortí a sesychá, dobře se opracovává a je hůře impregnovatelné (Bajaj, 1991; Stern, 2003).

2.1.2.2 Modřín sibiřský – *Larix sibirica* Ledeb.

Sibiřský modřín je známý po celém světě pro své jedinečné biologické a fyzikálně–mechanické vlastnosti, je to jediný představitel jehličnanů, který se zařazuje do kategorie tvrdého dřeva a tvrdost je srovnatelná s dubem. Barva dřeva může být velmi pestrá, přinejmenším 12 tónových odstínů. Rozsah zbarvení je z téměř bílé s lehkým nádechem žluté až po tmavě červenohnědé odstíny. Ale základní tón je oranžová. Povrch má hedvábný lesk. Červený odstín modřínového dřeva je důsledkem pudy bohaté na železo a slouží jako údaj pro případnou existenci minerálních látek v půdě. Je třeba poznamenat, že červený odstín modřínového dřeva je také těžší než světlejší odstíny modřínového dřeva. Sibiřský modřín má krásnou texturu a zbarvení dřeva nevyžadující ošetření. Největší výhodou je, že modřín je optimální volbou z hlediska nákladů v porovnání s jinými druhy vzácného a tvrdého dřeva, s ohledem na udržitelnost, kvalitu, ekologii a vizuální vzhled (<http://www.trustimex.lv/en/about-larch>).

2.2 Makroskopická stavba dřeva

Při makroskopickém zkoumání dřeva pozorujeme dřevo pouhým okem. Pozorujeme charakteristické morfologické znaky textury, a to kresbu, barvu, tvar a výskyt jednotlivých znaků dřeva. Znaky jsou typické pro určité dřeviny, což umožňuje určení příslušných druhů. Většina znaků dřeva se rozdílně projevuje na řezech, které mají různou polohu na podélnou polohu osy kmene (Požgaj et al., 1997).

Modřín patří mezi dřevo jehličnanů s jádrovým dřevem. Jehličnany mají jednodušší anatomickou stavbu než dřevo listnáčů. Dřevo jehličnanů se skládá z parenchymatických buněk a tracheid. Dřevo modřínů má velmi výrazné přechody mezi jarním a letním dřevem v letokruhu, který vidíme na příčném řezu. Letokruh můžeme charakterizovat jako přírůstek dřeva vytvořený za jedno vegetační období periodickou činností dělivých buněk (kambia) a jeho vrstva obaluje kmen, větve a kořeny (Požgaj et al., 1997). Jarní dřevo je světlejší a tvoří asi 70 % šířky letokruhu, zatímco letní dřevo je výrazně tmavší a tvoří jen 30 %. Dále můžeme vidět na příčném řezu úzkou běl, která je nažloutlá. Běl má ve dřevě funkci vést vodu s rozpuštěnými látkami a uskladňovat zásobní látky. Šířka běli úzce závisí na šířce koruny (Požgaj et al., 1997). Jádro je červenohnědé až červeno fialové barvy a na vzduchu tmavne a jeho funkcí je přenášet stabilitu kmene. Malé, světlé nebo tmavé tečky na

příčném řezu značí přítomnost pryskyřičných kanálků ve dřevě, které se na radiálním a tangenciálním řezu zobrazí jako vřetena.

2.2.1 Juvenilní dřevo

Podle Rendla (1959) je juvenilní dřevo sekundární xylém, který se tvoří na počátku života stromu. Z anatomického hlediska juvenilní dřevo může být charakterizováno postupnými změnami rozměrů a odpovídajícími změnami formy struktury a uspořádáním buněk v letokruhu. Většinou se ale jedná o určitý počet letokruhů obklopujících dřeň, které vykazují horší technologické vlastnosti dřeva. Loo et al. (1985) zjistili, že tvorba juvenilního dřeva závisí na umístění stromu, zdroji semen, místním klimatu a také na genetickém základě každého stromu. Juvenilní dřevo se obvykle vyznačuje nižší hustotou, než dřevo vyzrálé.

Šířka letokruhu je u juvenilního dřeva většinou vyšší než u vyzrálého dřeva. Jedná se o letokruhy blízké středu kmene, ty jsou vždy širší. S rostoucím průměrem kmene je šířka letokruhu menší, aby se zachoval obdobný objemový přírůst (Šlezingerová et. al., 1996). Timko (2013) uvádí, že mezi vyzrálým a juvenilním dřevem se nachází zóna tzv. přechodová, kde se postupně vlastnosti mění, a tudíž žádná jasná hranice neexistuje a určení závisí na individuálním posouzení.

2.2.2 Rozdíly *Larix decidua* Mill. a *Larix Sibirica* Ledeb.

Rozlišit modřín sibiřský od modřínu opadavého na makroskopické úrovni je velmi složité, hlavním znakem je šířka letokruhu. Modřín sibiřský má velmi úzké letokruhy, často užší než 0,5 mm, které jsou způsobeny tvrdými vegetačními podmínkami, zatímco šířka letokruhu u modřínu opadavého je asi 3–5 mm. Letokruhy u modřínu sibiřského jsou často rozeznatelné pouze pod lupou (<http://www.trustimex.lv>). Modřín sibiřský má také menší běl oproti modřínu opadavému.

2.3 Mikroskopická stavba dřeva jehličnatých dřevin

Stavba jehličnatého dřeva na příčném řezu je jednoduchá a skoro pravidelná. Tracheidy jarního a letního dřeva jsou uspořádané v řadách za sebou. Hranice letokruhu je výrazná. Letní tracheidy se zužují jen v radiálním směru. Dřeňové paprsky jsou úzké pásy přebíhající mezi dvěma řadami tracheid kolmo na letokruhy. Dřeviny, které obsahují pryskyřici, mají na příčném řezu vertikální pryskyřičné kanálky jako oválné otvory nejčastěji mezi tracheidami letního dřeva. Horizontální pryskyřičné kanálky se na příčném řezu vyskytují zřídka v podobě širokého pásu ve středu dřeňových paprsků.

Radiální řez jehličnatých dřev je charakteristický pravidelnou stavbou tracheid, které na tomto řezu vypadají jako rovnoměrně vedle sebe uložené dlouhé žlábků. Na jarních tracheidách je typický výskyt velkých dvojteček. Hranice letokruhu má náhlý přechod z letních do jarních tracheid. V rámci letokruhu je přechod mezi jarními a letními tracheidami pozvolnější. Dvojtečky na letních tracheidách se vyskytují zřídka a jsou malé, takže je můžeme lehce přehlédnout. Radiální řez se vede ve směru dřeňových paprsků, proto jsou řady parenchymatických buněk orientovány horizontálně křížem přes vertikální stavbu tracheid. Na parenchymatických dřeňových paprscích pozorujeme často výskyt jednoduchých ztenčenin – teček. Radiální řez je nejvhodnější na zjištění přítomnosti příčných tracheid na okrajích dřeňových paprsků a výskytu jádrových látek v parenchymatických buňkách. Rovina radiálního řezu nemusí na pozorované ploše zachytit výskyt pryskyřičných kanálků.

Hranice letokruhu na tangenciálním řezu nejčastěji nejde pozorovat. Řez může být položený jen v letním nebo jarním dřevě. Dobře pozorovatelné je zakončení tracheid. I na tomto řezu je můžeme pozorovat jako podélné rozřezané rourky ve formě dlouhých žlábků, které se rovnoměrně opakují po celém řezu. Jejich stavba je přerušena jen výskytem dřeňových paprsků a ojediněle i výskytem vertikálního pryskyřičného kanálku. Velké dvojtečky, které byly na radiálním řezu výrazným znakem, jsou na tomto řezu nevýrazné, jen jako jemné ztlustěny buněčné stěny mezi dvěma tracheidami. Charakteristickým znakem tangenciálního řezu je dřeňový paprsek přeřezaný kolmo na jeho délku a pozorujeme ho v rozměrech výšky a šířky. Pro jehličnaté dřeviny je to převážně jen jedna řada okrouhlých buněk nad sebou. Jsou to parenchymatické buňky, případně příčné tracheidy přeřezané v nejmenším rozměru kolmo na jejich podélnou osu. Počet buněk na výšku dřeňového paprsku může záviset na druhu dřeviny. U dřevin, které mají pryskyřičné kanálky, se ve středu rozšířených dřeňových paprsků vyskytují horizontální dřeňové kanálky jako okrouhlé otvory. Výskyt vertikálních pryskyřičných kanálků je náhodný, nejčastěji se však vyskytují v tangenciálním řezu v letním dřevě. Výskyt příčných tracheid poznáme podle zploštělých a tlustostěnných buněk na krajích dřeňových paprsků (Požgaj et al., 1997).

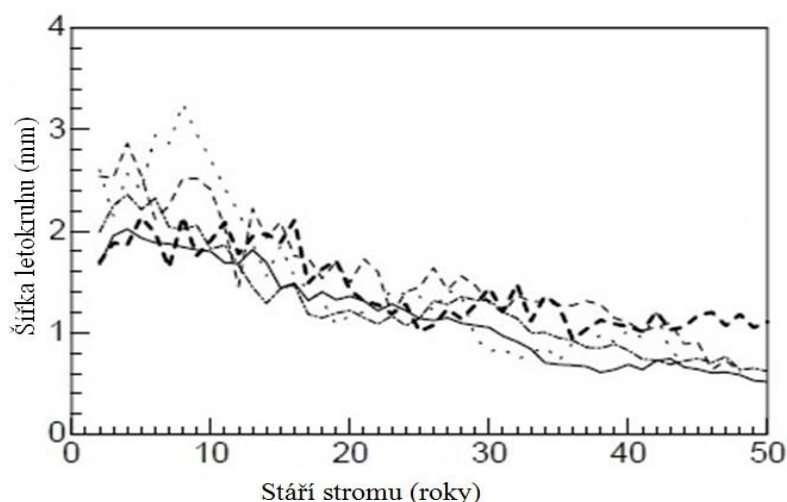
2.3.1.1 Modřín opadavý

U dřeva modřínu opadavého můžeme pozorovat na příčném řezu velmi ostrý přechod mezi jarními a letními tracheidami. Na příčném a tangenciálním řezu jsou přítomny pryskyřičné kanálky, které jsou tvořeny 8–12 tlustostěnnými epitelovými

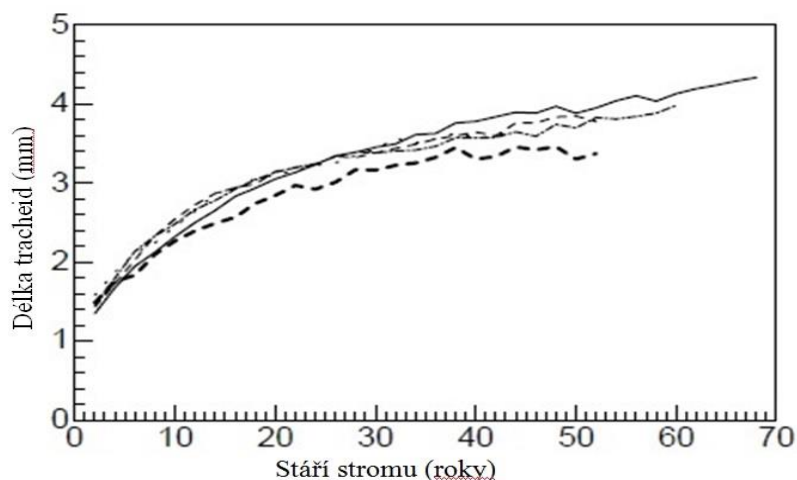
buňkami. Na těchto řezech může být ojediněle viditelný podélný dřevní parenchym. Na tangenciálním řezu můžeme dále pozorovat 10–25 parenchymatických buněk po výšce dřevného paprsku a Sainovy valy mezi dvojtečkami na buněčných stěnách tracheid, které jsou patrné i na radiálním řezu. Na radiálním řezu jsou viditelné heterocelulární dřevové paprsky, křížové pole piceoidního typu, tenké, hladké a zvlněné buněčné stěny na příčných tracheidách s častým výskytem párových dvojteček.

2.3.1.2 Modřín sibiřský

Dřevo modřínu sibiřského je z mikroskopického hlediska velmi podobné dřevu *Larix decidua* Mill. Může se pouze lišit ve velikosti jednotlivých elementů, tloušťkou buněčné stěny a velikostí lumenu. Na Obr. 3 a 4 je znázorněna šířka letokruhu a délka tracheid v závislosti na stáří stromu.



Obr. 3 Závislost šířky letokruhů na stáří stromu u *Larix sibirica* (Koizumi et al., 2003)



Obr. 4 Závislost délky tracheid na stáří stromu u *Larix sibirica* (Koizumi et al., 2003)

2.3.2 Juvenilní dřevo

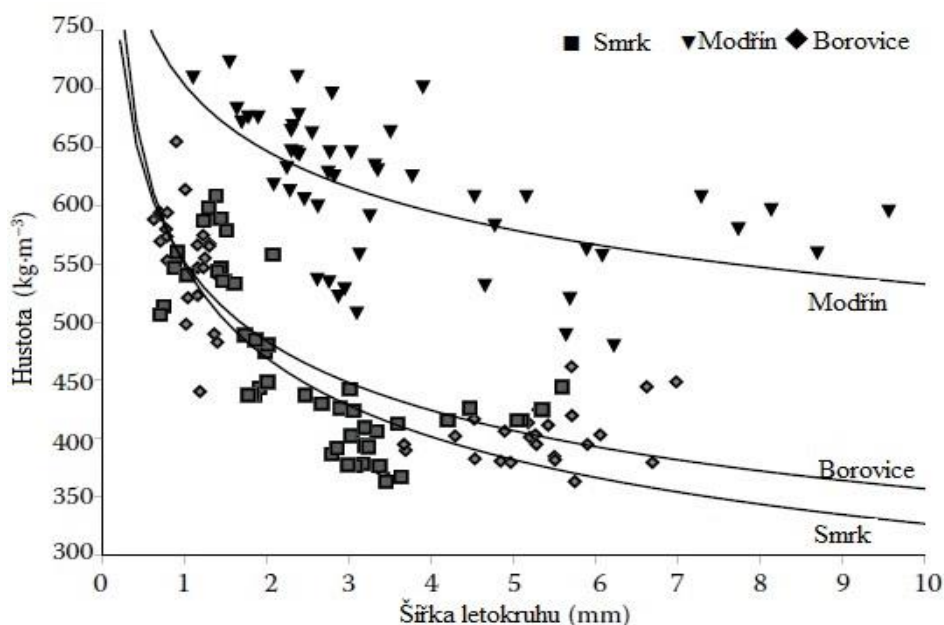
Larson et al. (2001) uvádí, že juvenilní dřevo je dřevo měkké vzniklé z axiálních tracheid, které mají vyšší úhel mikrofibril v S2 vrstvě buněčné stěny. Vyšší úhel mikrofibril v S2 vrstvě je v korelaci s podélným smršťováním buněk, když se dřevo suší, což vede k deformacím dřeva. Stavba buněk je často změněna, místo aby byly dlouhé a rovné, tak jsou často kratší, hranaté, zkroucené, nebo ohnuté (Wood HandBook, 2010). Rozsah juvenilního dřeva je obvykle definován na základě počtu letokruhů. Nicméně, neexistuje žádný sjednocený názor týkající se počtu letokruhů juvenilního dřeva. Většina autorů se vztahují k 10–20 letokruhům (10 letokruhů – Cown 1992; 15 letokruhů – Corson 1991; 22 letokruhů – Mutz et al., 2004). Na druhou stranu Harris (1981) uvedl, že juvenilní dřevo nikdy nemůžeme přesně definovat, protože závisí na velkém počtu faktorů, které se mohou v radiálním směru výrazně lišit. Například délka tracheid, která má zčásti vliv i na hustotu dřeva. Například gradace délky tracheid může být ukončena, zatímco růst hustoty dřeva je teprve v polovině svého rozsahu.

2.4 Hustota dřeva

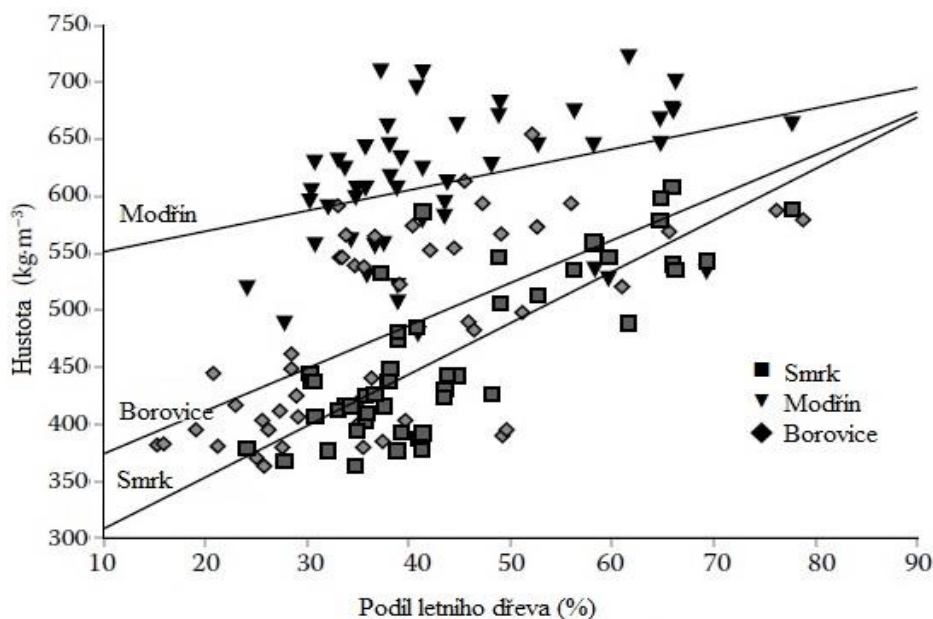
Hustota dřeva udává hmotnost jeho objemové jednotky, přičemž se nejčastěji vyjadřuje v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ nebo $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Tato charakteristika dřeva významně ovlivňuje fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva. Hustota dřeva nabývá na významu při jeho mechanickém a chemickém zpracování, kde se klade důraz na hmotnostní množství dřevní hmoty, a kde je potřebné vědět, kolik dřevní hmoty obsahuje konkrétní objemová jednotka. Dále je ukazatelem vhodnosti použití dřeva na takové účely, kde se vyžaduje například nízká hmotnost při vysoké pevnosti a pružnosti, např. stavebnictví (Požgaj et al., 1997). Bowyer et al. (2003) dodává, že hustota je jednou z nejdůležitějších vlastností dřeva. Hustota je hmotnost dřeva dělená objemem vzorku při dané vlhkosti. Pokud jsou hodnoty uváděny v literatuře, musí být vždy uvedena také vlhkost. Specifická hmotnost je hustota vzorku normalizována k hustotě vody (Wood HandBook, 2010). Gryc et al. (2011) prokázali, že hustota klesá se zvyšující se šířkou letokruhu, zatímco se zvyšujícím se podílem letního dřeva hustota roste u jehličnatých dřev. Hlavním faktorem na makroskopické úrovni je šířka letokruhu a podíl letního dřeva, na mikroskopické úrovni můžeme konstatovat, že buněčné stěny jarních tracheid jsou tenké ve srovnání s buněčnými stěnami letního dřeva. Vyzrálé dřevo tvoří tracheidy s tlustými stěnami a úzkým lumenem. Znamená to tedy, že

závislost mikroskopické struktury na hustotě není zcela zanedbatelná. U modřínového dřeva vycházela závislost šířky letokruhu na hustotě poměrně malá, s determinací pouze $R^2 = 0,33$, zatímco u smrku $R^2 = 0,6$, což je patrné z Obr. 5. V závislosti letního dřeva na hustotě má modřín stoupající linii, ale její sklon není tak strmý a determinace je velmi nízká $R^2 = 0,14$, jak je patrné z Obr. 6 (Gryc et al., 2011).

Karlman (1998) uvádí, že rozdíly v hustotě různých stromů stejného druhu jsou velké. Průměrná hustota modřínu opadavého, staří 120–150 let je v rozmezí 535 až 670 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, průměrně tedy 618 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, zatímco hustota modřínu sibiřského, stejného věku je 550 až 665 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, průměrně 621 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. U mladých stromů stáří 30–35 let je hustota u modřínu sibiřského 515 až 560 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, průměrně 536 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a u modřínu opadavého 410 až 490 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, průměrně 451 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Hustota v zóně jádrového dřeva je o 20 až 40 % vyšší než v zóně juvenilního dřeva. Hustota modřínu v zóně jádrového dřeva se zvyšuje se šířkou letokruhu až do 2,5 mm, a snižuje se s letokruhem širším než 3 mm. Průměrný podíl letního dřeva v letokruhu je 40–50 % u modřínu opadavého a asi 40 % u modřínu sibiřského.



Obr. 5 Závislost hustoty dřeva na šířce letokruhu (Gryc et al., 2011)



Obr. 6 Závislost hustoty dřeva na podílu letního dřeva (Gryc et al., 2011)

2.4.1 Juvenilní dřevo

Gryc et al. (2011) prokázali, že juvenilní dřevo modřínu má nižší hodnotu hustoty než dřevo vyzrálé. Střední hodnotu hustoty juvenilního dřeva u modřínu při vlhkosti 0 % byla stanovena na $542,9 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, zatímco hustotu vyzrálého dřeva na hodnotě $617 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Diference hodnot $74 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ je poměrně nízká ve srovnání se smrkem a borovicí. Po statickém vyhodnocení bylo zjištěno, že variabilita hodnot hustoty je malá. Gryc et al. (2011) dále konstatuje, že modřín je nejvíce homogenní z hlediska zastoupení letního dřeva v juvenilním a vyzrálém dřevě. Největší rozdíl velikosti letokruhu byl zaznamenán u borovice, a to pro juvenilní dřevo 5,23 mm a pro vyzrálé 1,05 mm viz Obr. 7.

Popisná statistika		Smrk		Borovice		Modřín	
		Juv. d.	Vyz. d.	Juv. d.	Vyz. d.	Juv. d.	Vyz. d.
Velikost letokruhu (mm)	Průměr (mm)	3.54	1.49	5.23	1.05	4.89	2.42
	Směrodatná odchylka (mm)	0.88	0.41	0.90	0.26	2.15	0.62
	Variační koeficient (mm)	24.91	27.52	17.24	23.05	43.92	25.74
Podíl letního dřeva (%)	Průměr (%)	36.68	51.90	28.84	46.82	31.79	40.22
	Směrodatná odchylka (%)	5.54	13.40	9.20	12.81	9.05	7.59
	Variační koeficient (%)	15.09	25.81	31.90	27.37	28.47	18.86

Obr. 7 Hodnoty makroskopických charakteristik pro vyzrálé a juvenilní dřevo (Gryc et al., 2011)

2.5 Pevnostní charakteristika

Pevností dřeva rozumíme odpor, anebo odolnost dřeva proti jeho trvalému porušení. Číselně pevnost vyjadřujeme napětím, při kterém se poruší soudržnost (Požgaj et al., 1997). Údaje o pevnosti dřeva se zjišťují prostřednictvím zkoušek, kde se sleduje skutečné napětí v okamžiku porušení tělesa.

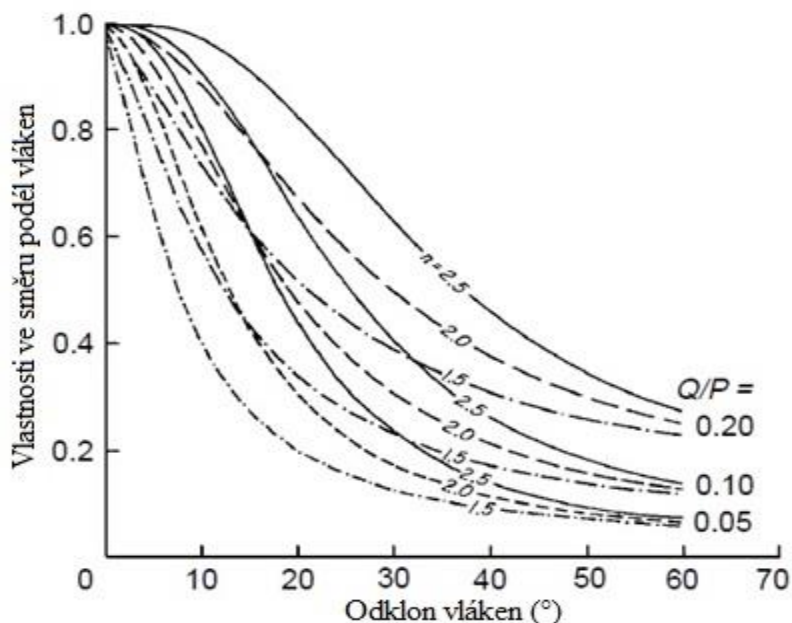
2.5.1 Pevnost dřeva v tlaku ve směru vláken

Nejvýznamnější a nejcharakterističtější tlakovou pevností v porovnání s ostatními směry zatížení je pevnost podél vláken. Pro jednoduchost zatížení a poměrně vysokou pevnost má tlak rovnoběžně s vlákny široké uplatnění (kůly, piloty, vzpěry různé části prvků a nosníků) (Požgaj et al., 1997). Působíme-li na těleso tlakem podél vláken, tak dojde k jeho deformaci, jež se projeví zkrácením délky tělesa (Matovič, 1993). Důležitými činiteli jsou hustota, vlhkost dřeva a odklon vláken. Se zvyšujícím se odklonem vláken, klesá pevnost dřeva viz Obr. 8.

U dřeva suchého s vysokou hustotou a tedy i s vysokou pevností vzniká zatížením porušení dřeva ve formě smyku jedné části tělesa (např. zkušební vzorku) vzhledem k druhé po linii, která na tangenciální ploše probíhá pod úhlem 60° vzhledem k podélné ose tělesa. U dřeva vlhkého s nízkou hustotou a malou pevností dochází k otlacení vláken na čelních plochách a k vybočení stěn zatěžovaných těles. V zóně porušení dřeva dochází ke změnám mikroskopické stavby jednotlivých elementů. Určité porušení dřeva tlakem podél vláken lze pozorovat již při počátečním zatížení tělesa vytvářením příčných rysek na tracheidách jehličnanů – tzv. skluzových čar, které s osou tracheid svírají úhel 70° . Skluzové čary se dále mění na čary porušení, přičemž ještě nedochází k zakřivení vláken. V další fázi, již pouhým okem viditelné, se deformují buněčné stěny a celá vlákna. Průměrná hodnota meze pevnosti v tlaku ve směru vláken u dřev s vlhkostí 12 % je cca 50 MPa. Variační koeficient se pohybuje v rozmezí 8–16 % (Gandelová et al., 2008).

Hodnota meze úměrnosti je pro jehličnany přibližně 68 % meze pevnosti. Rozdíly mezi jednotlivými druhy dřev jsou dány rozdílnou stavbou dřeva. Nejvyšší mez úměrnosti mají jehličnatá dřeva, díky své pravidelné stavbě. Předpokládá se, že vzniklé napětí v tělese je přenášeno hlavně elementy s tlustšími buněčnými stěnami, letními tracheidami u jehličnanů a libriformními vlákny u listnáčů. V buněčných stěnách je napětí přenášeno přes makromolekuly celulózy a hemicelulóz na amorfni výplň

celulózní kostry buněčné stěny. Výrazná plastická deformace, která při tlaku vzniká je tedy především projevem trvalých změn ve struktuře ligninu, případně narušení spojů lignino–sacharidového komplexu. (Gandelová et al., 2008).



Obr. 8 Pokles vlastností vlivem odklonu vláken (Wood Handbook, 2010)

2.5.1.1 Modřín opadavý

Ugolev (1975) stanovil pevnost v tlaku ve směru vláken na hodnotě 64,5 MPa pro absolutně suché dřevo a 25,5 MPa při vlhkosti 12 %. Mez úměrnosti v tlaku ve směru vláken je pro dřevo modřínu průměrně 60% meze pevnosti (Gandelová et al., 2008). Bergstedt, Lyck (2003) stanovili mez pevnosti *Larix decidua* Mill. na hodnotě 50,9 MPa, zatímco Bozkurt, Göker (1996) na hodnotě 55 MPa. Collinder, Borgstrand (1929) uvedli, že pevnostní vlastnosti modřínového dřeva klesají pomalu se zvyšující se šířkou letokruhu, mělo by být tedy možné použít rychle vzrostlý modřín, aniž by byly ohroženy pevnostní vlastnosti. Harvald (1988) uvádí, že hodnoty uvedené v literatuře jsou naměřeny na malých bezvadých vzorcích, ale skutečné pevnosti komerčně využívaného dřeva modřínu budou mnohem nižší kvůli přítomnosti suků ve dřevě, rozdílné šířce letokruhů i v rámci stejného stromu. Celková odchylka je poměrně velká.

2.5.1.2 Modřín sibiřský

Na pevnost dřeva mají vliv růstové podmínky a ekologické faktory, zejména nadmořská výška, vystavení větru, půdní a klimatické faktory, které ovlivňují šířku letokruhu ve dřevě a hustotu (Bozkurt, Erdin, 1997). Proto může dřevo modřínu

sibiřského vykazovat širší škálu hodnot. Koizumi et al., (2003) stanovili pevnost v tlaku ve směru vláken na hodnotě 76,37 MPa, zatímco Bergstedt, Lyck (2003) pouze na hodnotě 53,31 MPa. Dřevo jehličnanů lze klasifikovat dle pevnosti do 3 skupin, dřevo modřínu sibiřského vykazuje vlastnosti prostřední skupiny (Bozkurt, Erdin, 1997).

2.5.1.3 Modul pružnosti

Modul pružnosti vyjadřuje vnitřní odpor materiálu proti pružné deformaci. Čím je modul pružnosti větší, tím větší napětí je potřebné na vyvolání deformací. (Požgaj et al., 1997). Modul pružnosti charakterizuje elasticitu materiálu, znamená to, že deformace vzniklé nízkým napětím jsou zcela odstranitelné po odstranění zátěže. Když zatížíme vyššími úrovněmi napětí, nastane deformace plastická, která je již trvalá a po odtížení zůstává. Modul pružnosti pro dřevo modřínu je 12900 MPa (Wood Handbook, 2010).

2.6 Vlhkost dřeva

Dřevo je hygroskopickým materiálem a je schopné přijímat nebo odevzdávat vodu, ať už ve skupenství kapalném nebo plynném a má schopnost měnit svoji vlhkost podle vlhkostí okolního prostředí. Ve většině případů voda ve dřevě ovlivňuje i vlastnosti dřeva a způsobuje často jejich zhoršení. Se změnou obsahu vody ve dřevě jsou spojeny změny fyzikálních a mechanických vlastností. Přítomnost tekutin ve dřevě se nazývá vlhkostí dřeva (Gandelová et al., 2008).

V závislosti na podílu vody ve dřevě ve vztahu k sušině dřeva rozlišujeme tři hraniční hodnoty:

- Vlhkost suchého dřeva – ustálený poměr hmotnosti vody ke hmotnosti sušiny při sušení dřeva teplotou 103 ± 2 °C, tzn., že se ve dřevě nenachází žádná voda vázaná ani volná ($w_0 = 0$ %).
- Vlhkost při nasycení buněčných stěn – mikrokapilární systém v buněčné stěně je zcela zaplněn vodou. Tato vlhkost se vyjadřuje mezi nasycení buněčných stěn MNBS nebo mezi hygroskopicity
- Vlhkost při nasycení dřeva – mikro i makrokapilární systém je plně nasycen vodou, dřevo obsahuje maximální množství vody. Tato vlhkost se vyjadřuje maximální vlhkostí dřeva ($w_{\max} = 80\text{--}400$ %).

Voda chemicky vázaná – je součástí chemických sloučenin, nelze ji ze dřeva odstranit sušením, ale pouze spálením, představuje 1–2 % suchého dřeva.

Voda vázaná (hygrokopická) – nachází se v BS a je vázána vodíkovými můstky na hydroxylové skupiny – OH amorfni části celulózy a hemicelulózy. Voda vázaná se ve dřevě se vyskytuje při vlhkostech 0–30 %. Při charakteristice fyzikálních a mechanických vlastností má největší a zásadní význam.

Voda volná (kapilární) – vyplňuje ve dřevě lumeny buněk a mezibuněčné prostory, má podstatně menší roli než voda vázaná (Horáček, 2008).

2.6.1 Mez hygrokopicity - MH

Hranici mezi vodou vázanou a volnou stanovujeme na základě určení meze hygrokopicity. MH je takovou rovnovážnou vlhkostí, kterou dosáhne dřevo dlouhodobě vystavené prostředí (vzduchu), jehož relativní vlhkost je blízká nasycení ($\varphi = 0,995$ %). U meze hygrokopicity je voda ve skupenství plynném a je závislá na teplotě prostředí a s rostoucí teplotou klesá (Horáček 2008). Je to stav, kdy jsou buněčné stěny zcela nasycené, ale není žádná voda v lumenech buněk. Se zvyšující se vlhkostí nad MH se již nemění fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva v závislosti na obsahu vlhkosti. MH se liší podle jednotlivých druhů a kusů dřeva, průměrně však odpovídá obsahu vlhkosti 30 % ve dřevě (Wood Handbook, 2010). Horáček (2008) uvádí, že mez hygrokopicity pro dřevo modřinu je při obsahu vlhkosti 22–24 %.

2.6.2 Bobtnání

Bobtnání nazýváme schopnost dřeva zvětšovat svoje lineární rozměry, plochu, anebo objem dřeva při přijímání vázané vody v rozsahu od 0 % do MH. Bobtnání se vysvětluje tím, že vázaná voda se dostává do amorfni oblasti celulóзовých fibril, které roztlačí, čímž vyvolává zvětšení buněčných stěn jednotlivých elementů a dřeva jako celku. Dřevo bobtná při pohlcování vody, jako i vodních par do MH. Další zvyšování obsahu vody bobtnání dřeva nevyvolává, neboť voda vyplňuje jen lumeny, případně mezibuněčné dutiny (Požgaj et al., 1997). Velký vliv na velikost bobtnání má orientace fibril v buněčné stěně. Vzhledem k tomu, že největší podíl z buněčné stěny připadá na S2 vrstvu sekundární buněčné stěny (až 90 %), kde se orientace fibril příliš neodklání od podélné osy (15–30°), dochází k maximálnímu bobtnání napříč vláken. Bobtnání v podélném směru podmíněné sklonem fibril je nepatrné. Malé rozměrové změny v podélném směru se vysvětlují tím, že molekuly vody nemohou vnikat mezi fibrily do

valenčního řetězce v podélném spojení, takže nenastává jejich rozestupování v tomto směru (Gandelová et al., 2008).

Bobtnání má anizotropní charakter. Podél vláken je bobtnání velmi malé a nepřesahuje 1 %, průměrná hodnota celkového podélného bobtnání se pro naše dřeviny udává 0,1–0,4 %. V příčném směru dřevo bobtná mnohem více, v radiálním směru 3–6 %, v tangenciálním 6–12 %. Bobtnání v jednotlivých směrech lze často vyjádřit poměrem 20:10:1. Součinitelem lineárních bobtnání získáme přibližnou hodnotu bobtnání objemového. Poměr bobtnání v příčných směrech, tangenciálním a radiálním, se nazývá diferenciální bobtnání, které závisí na hustotě. S rostoucí hustotou se snižuje. Proto mají jehličnaté dřeviny celkově vyšší hodnotu než listnaté. Průměrná hodnota se udává kolem 2, běžně se však pohybuje v intervalu od 1 do 3,5 (Horáček 2008).

V literatuře se udává koeficient bobtnání, který říká, o kolik procent se změní rozměry, při příjmu vlhkosti 1 %. Podle Ugoleva (1975) je pro modřínové dřevo koeficient objemového bobtnání 0,52 %, radiálního bobtnání 0,20 % a tangenciálního bobtnání 0,39 %.

2.7 Využití dřeva

2.7.1 Modřín opadavý

Modřínové dřevo má velmi široké uplatnění díky vysoké pevnosti, tvrdosti a odolnosti, proto se používá hlavně pro venkovní použití. Modřín je například použitelný pro stavění mostů, velkolepé příklady těchto děl lze nalézt v Německu, Itálii a pravděpodobně v několika dalších zemích. Modřín má mnoho dalších venkovních použití: vnější dveře, vnější dřevěné obložení, balkóny, ploty, konstrukce a bariéry proti lavinám atd. (Grosser, Teetz, 1985). Pro použití ve vnitřních prostorech se modřín používá tam, kde je kladen důraz na estetiku, například v oblasti viditelných střešních konstrukcí, pohledových stropů, stěn, dveří, schodišť a podlahy (Bosshard, 1982; Boutelje, Rydell 1986; Grosser, Teetz, 1985). I přesto, že způsobuje problémy při sbíjení je v Německu a ve Velké Británii používán na výrobu palet (Harding, 1988). V oblasti Alp je modřín využíván pro výrobu střešních a stěnových šindelů v tradiční bytové výstavbě. V USA se modřín používá hlavně ve stavebnictví pro konstrukce, trámy, prkna, desky, železniční pražce a důlní trámy, stejně jako pro piloty, stožáry a sloupky (Wood Handbook, 2010). Kvalitního modřínového dřeva je také poptáváno pro restaurování starých dřevěných lodí a pro výrobu člunů a hůlek pro námořní účely

(Vadla 2002; Lutdal 1997). V Norsku a Finsku byl modřín využíván na výrobu síranu z buničiny (Borset 1957). Dříve bylo modřínové dřevo používáno pro výrobu kontejnerů na chemický odpad, protože je odolné a trvanlivé vůči kyselinám (Geyer 1979). V Rusku byl nalezen kus modřínu, který zřejmě měl být pod zemi více než 1000 let, a dřevo bylo stále zdravé. Dalším příkladem, který také ilustruje různé způsoby využití modřínu, je kostel v Kirenski. Církev jej nechala kompletně vyrobit z modřínu v roce 1756 a v roce 1937 byl stále ve velmi dobrém stavu (Sjöström 1938).

2.7.2 Modřín sibiřský

Dřevo modřínu sibiřského pochází z nedotčených lesů sibiřské tajgy a není konfrontováno znečištěním, které způsobuje člověk. Modřínové dřevo má speciální látky – fytoncidy, které se ze dřeva uvolňují v průběhu celého životního cyklu, bez ohledu na to, zda je strom v tajze, nebo ve vaší domácnosti. Fytoncidy se šíří ve vzduchu a očišťují jej od škodlivých mikrobů. Takže v okolí dřeva modřínu sibiřského existuje jen velmi málo virů a mikrobů.

Sibiřský modřín vyniká také vysokou požární odolností a nízkou tepelnou vodivostí. Modřín je odolný proti ohni dvakrát více než borové nebo smrkového dřevo. Zatímco nízká tepelná vodivost zajišťuje v domech postavených z modřínu, že v zimě udržují teplo a v létě příjemně chladí. Dřevo modřínu sibiřského je díky své speciální pryskyřici, která má celou řadu chemických látek, velmi odolné proti hnilobě a škůdcům a vydrží sloužit 2–3krát déle než ostatní druhy jehličnanů, a to i bez chemického ošetření, které absorbuje velmi špatně. V případě požáru to snižuje riziko, že se člověk může otrávit chemickými látkami, které se při požáru uvolňují z impregnačních látek.

Neošetřené modřínové dřevo použité v exteriéru za působení povětrnostních podmínek (slunce, déšť, sníh a vítr) získá stříbřitě šedou barvu, která dodává charakteristický vzhled budovy. (<http://www.trustimex.lv/en/about-larch>)

2.7.3 Srovnání cen výrobků

Ve srovnání výrobků z modřínu sibiřského a z modřínu opadavého je zřejmé, že totožný výrobek je dražší z modřínu sibiřského, než z modřínu opadavého, což je patrné z Tab. 1. Na Obr. 9 jsou fotky výrobků uvedených v Tab. 1.

Výrobek	MD	MD	Zdroje
	sibiřský	opadavý	
	Kč/m ²		
Terasová prkna 27×143×4000	664	543	www.artisan.cz
Terasové prkno 28×145×4000	534	355	www.susenerezivo.cz
Palubka klasik 19×146×4000	411	285	www.susenerezivo.cz
Fasadní obklad 21×146×3000	551	411	www.palubky-seca.cz

Tab. 1 Srovnání cen výrobků z modřínu sibiřského a modřínu opadavého



Obr. 8 Palubka profil "C" a terasové prkno vyrobené z modřínu opadavého (www.palubky-seca.cz).

3 Cíl práce

Cílem této bakalářské práce je porovnání stavby a vybraných fyzikálních a mechanických vlastností mezi dřevem modřínu sibiřského (*Larix sibirica* Ledeb.) a modřínu opadavého (*Larix decidua* Mill.). Všechna zjištěná data porovnat mezi sebou a s literaturou, zjistit faktory, které danou problematiku ovlivňují a najít závislosti a zjistit příčiny případných odchylek. Práce je rozdělena na několik částí:

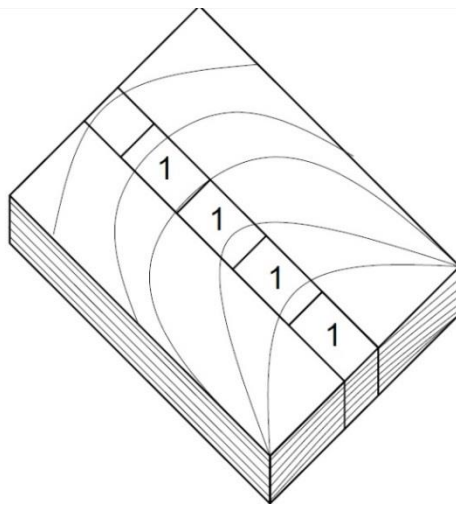
- Letokruhová analýza – zjistit šířku letokruhu, šířku letního dřeva a podíl letního dřeva v letokruhu.
- Hustota dřeva – stanovit hustotu dřeva při vlhkosti 12 % a 0 %.
- Bobtnání – zjistit bobtnání v jednotlivých směrech, bobtnání objemové a bobtnání diferenciální.
- Maximální vlhkost a mez hygroskopicity – stanovit maximální vlhkost dřeva a vlhkost, při které nastává mez hygroskopicity.
- Mez pevnosti a modul pružnosti – zjistit mez pevnosti ve směru vláken a modul pružnosti.

4 Materiál a metodika

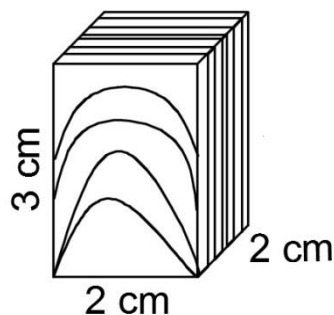
4.1 Výroba zkušebních tělísek

Na výrobu zkušebních vzorků byly použity nevyužité a odpadní kusy dřeva z různých realizací (obkladů, podlah, podkladních prahů atd.). Modřín opadavý byl získán od firmy TTJ dřevostavby a modřín sibiřský byl získán od firmy Pechar s.r.o. sídlící v Praze. Vzorky byly vybírány z velkého množství realizací a dodávek, aby byla zachována variabilita dřeva.

Vzorky byly nejprve roztříděny tak, aby následným zpracováním z nich bylo možné udělat speciálně ortotropní tělíska bez odklonu vláken na příčném řezu. Poté byly vzorky zpracovány ve školní dřevozpracující dílně Mendlovy univerzity v Brně, kde byly všechny vzorky nejprve zhoblovány na výšku 2 cm a poté rozřezávány na formátovací pile na standardizovaná tělíska 2×2×3 cm. Z každého kusu byla vyrobena vždy 4 zkušební tělíska, kdy jedno bylo použito na bobtnání ve vodě, jedno na bobtnání v exikátoru, jedno na stanovení tlaku na trhačce a poslední na letokruhovou analýzu.



Obr. 9 Princip vyřezávání zkušebních tělísek



Obr. 10 Tvar a rozměry zkušebního tělíska

4.2 Zjištění hustoty

Hustota byla měřena na absolutně suchých tělískách, která byla vložena do laboratorní sušárny Sanyo MOV a při teplotě $103\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ vysušena na vlhkost 0 %. Poté byla tělíska změřena digitálním posuvným měřidlem Jiangsu S. Ltd úhlopříčně ve všech třech směrech a to ve směru radiálním (R), tangenciálním (T) a podélném (L) s přesností 0,01 mm a zvážena na digitální laboratorní váze Scaltec SBC 51 s přesností 0,001 g, měření a vážení muselo probíhat rychle, aby nedocházelo k rychlému zvětšování vlhkosti získané z okolního vzduchu. Všechna naměřená data byla zapisována do MS Excel, kde byla následně zpracována a analyzována.

Hustota absolutně suchého dřeva

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0} \quad [\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$$

ρ_0 ... hustota suchého dřeva [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

m_0 ... hmotnost suchého dřeva [g]

V_0 ... objem suchého dřeva [cm^3]

4.3 Měření šířky letokruhu a šířky letního dřeva

Pro letokruhovou analýzu byla použita předem připravená zkušební tělíska o standardních rozměrech $2\times 2\times 3$ cm, na jejichž příčném řezu probíhalo měření. Princip měření byl založen na měření velikosti jarního a následně letního dřeva, součtem těchto hodnot se získá velikost 1 letokruhu. Měřeny byly vždy všechny letokruhy na příčném řezu. Měření bylo prováděno na speciálním stole s inkrementálním snímačem. Vzorek byl umístěn pod stereolupou Leica DFC295 na speciální posuvnou podložku. Obraz ve stereolupě je možné zaostřovat dle potřeby. Vzorek je posouván ovládacím šroubem podložky od středu k okraji. Přesnost měřicího stolu je 0,01 mm. Vzdálenost mezi jarním a letním dřevem byla měřena jako kolmá vzdálenost mezi tečnami přechodů. Naměřené vzdálenosti byly zaznamenávány do programu PAST 4, odkud byly následně exportovány do programu Microsoft Excel, kde byly zpracovávány.

Z naměřených šířek letokruhu a šířek letního dřeva probíhá výpočet podílu letního dřeva podle vzorce:

$$\text{podíl l. d.} = \frac{\text{šířka l. d.}}{\text{šířka letok.}} \cdot 100 (\%)$$

4.4 Zjištění celkového bobtnání, meze hygroskopicity a maximální vlhkosti

Vzorky byly máčeny po dobu 21 dní, po této době již vzorky jistě dosáhly vlhkosti meze nasycení buněčných stěn i meze hygroskopicity. Při dosažení této hranice je dále objem vzorku považován za konstantní a maximální. Rozměry byly změřeny digitálním posuvným měřidlem Jiangsu S. Ltd úhlopříčně ve všech třech směrech a to ve směru radiálním (R), tangenciálním (T) a podélném (L) s přesností 0,01 mm. Vzorky připravené ke zjišťování meze hygroskopicity byly vysušeny v laboratorní sušárně, byly změřeny digitálním posuvným měřidlem Jiangsu S. Ltd úhlopříčně ve všech třech směrech a zváženy, poté byly vloženy do laboratorního exikátoru, kde bobtnaly ve vzdušném prostředí po dobu 16 týdnů. Každý týden byly vzorky převáženy, aby se zaznamenal týdenní hmotnostní přírůstek.

Stanovení celkového bobtnání ($\alpha_{v,t,r,l}$), meze hygroskopicity a maximální vlhkosti

Při výpočtu bobtnání α je níže uvedený vzorec platný pouze pokud je odklon vláken menší než 10° , což všechny naše vzorky splňovaly.

Výpočet bobtnání probíhá podle vztahu:

$$\alpha_{i_{\max}} = \frac{i_{\max} - i_0}{i_0} \cdot 100 [\%]$$

i_{\max} – hodnoty 21 dní ve vodě ponořeného tělíska V, R, T, L (cm^3) a (cm).

i_0 – hodnoty absolutně suchého tělíska V, R, T, L (cm^3) a (cm).

$$\alpha_{dif} = \frac{\alpha_T}{\alpha_R} [\%]$$

α_{dif} ... diferenciální bobtnání [%]

α_T ... bobtnání v tangenciálním směru [%]

α_R ... bobtnání v radiálním směru [%]

Výpočet MH standardního tělíska:

$$MH = \frac{m_e - m_0}{m_0} \cdot 100[\%]$$

MH ... mez hygroskopicity [%]

m_e ... hmotnost dřeva v exikátoru [g]

m_0 ... hmotnost suchého dřeva [g]

Výpočet w_{\max} standardního tělíska:

$$w_{\max} = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100[\%]$$

w_{\max} ... maximální vlhkost [%]

m_w ... hmotnost máčeného dřeva [g]

m_0 ... hmotnost suchého dřeva [g]

4.5 Stanovení meze pevnosti a modulu pružnosti v tlaku ve směru vláken

Měření pevnosti v tlaku byla prováděna na univerzálním zkušebním stroji Zwick Z050. Pro tlakovou zkoušku byla využita tělíska, jež odpovídají normě ČSN 490110 (mez pevnosti ve směru vláken). Byla použita předem připravená zkušební tělíska o příčných rozměrech 20x20 mm a výškou 30 mm (ve směru vláken). Tělíska byla změřena digitálním posuvným měřidlem Jiangsu S. Ltd úhlopříčně ve všech třech směrech a to ve směru radiálním (R), tangenciálním (T) a podélném (L) s přesností 0,01 mm a zvážena na digitální laboratorní váze Scaltec SBC 51 s přesností 0,001 g, zjištěné rozměry se zadaly do obslužného počítače přístroje Zwick Z050. Při zkoušce by se mělo působit při tlaku ve směru vláken po celou dobu střední rychlostí 24,5 MPa/cm² za minutu až do porušení tělesa a u tlaku napříč vláken 1,5 MPa/cm² za minutu. Vzhledem k tomu, že celé měření je značně ovlivněné použitým zkušebním zařízením, kdy je v softwaru zaznamenáván posun příčnicku a nikoli ve zkušebním tělese. Vzhledem k tomu, že testovaná tělesa mají vlhkost pod MH, je nutné provést přepočet pevnosti na pevnost při 12 %. Získaná data byla exportována do Microsoft Excel, kde byla dále zpracovávána.

$$\sigma = \frac{F}{S} [N / mm^2] \rightarrow [MPa]$$

σ ... mez pevnosti [MPa]

F ... maximální síla [N]

S ... poměrná deformace [mm²]

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} [MPa]$$

E ... modul pružnosti v tlaku [MPa]

σ ... napětí v tlaku [MPa]

ε ... poměrná deformace [%]

5 Výsledky

5.1 Charakteristika letokruhu

Statisticky vyhodnocená naměřená data, která jsou výstupem z letokruhové analýzy, jsou uvedena Tab. 2. Průměrná šířka letokruhu modřínu opadavého byla zjištěna 2,04 mm, z čehož průměrně 31,52 % tvořilo dřevo letní, zatímco průměrná šířka letokruhu modřínu sibiřského je 1,28 mm, což je 0,76 mm méně než u modřínu opadavého. Procentuální zastoupení letního dřeva v letokruhu u modřínu sibiřského je také menší než u modřínu opadavého, a to 25,88 %. Nejmenších letokruhů dosahoval vzorek modřínu sibiřského, který měl šířku letokruhu průměrně 0,3 mm, zatímco největší letokruhy měl vzorek modřínu opadavého s průměrným letokruhem 3,62 mm. Variační koeficient pro šířku letokruhu u dřeva modřínu opadavého vyšel 28,15 %, zatímco u dřeva modřínu sibiřského 61,87 %, což značí o velké variabilitě hodnot u dřeva modřínu sibiřského.

	Modřín opadavý		Modřín sibiřský	
	šířka letokruhu (mm)	podíl let.dř. (%)	šířka letokruhu (mm)	podíl let.dř. (%)
N	28	28	33	33
Průměr	2,04	31,52	1,28	25,88
Medián	1,86	30,95	1,12	25,77
Rozptyl	0,32	52,59	0,60	25,83
Směr. od.	0,56	7,25	0,77	5,08
Var. koef. %	28,15	23,43	61,87	19,94
Min	1,41	17,73	0,30	19,34
Max	3,62	43,37	3,05	40,40

Tab. 2 Popisná statistika šířky letokruhu a podílu letního dřeva v letokruhu dřeva modřínu opadavého a modřínu sibiřského.

Pro srovnání shody rozptylů a středních hodnot byl použit F–test a T–test. Výsledek testování šířky letokruhu je zobrazen v Tab. 3, výsledkem je zamítnutí nulové hypotézy. Šířka letokruhu u dřeva modřínu opadavého a modřínu sibiřského je statisticky rozdílná. Při srovnání rozptylů a středních hodnot podílu letního dřeva je výsledkem opět zamítnutí nulové hypotézy viz Tab. 4. Podíl letního dřeva v letokruhu u dřeva modřínu opadavého a modřínu sibiřského je statisticky rozdílný.

Dvouvýběrový F-test pro rozptyl		
	<i>Šířka letokruhu MD sibiřský</i>	<i>šířka letokruhu MD opadavý.</i>
Stř. hodnota	1,276	2,041
Rozptyl	0,623	0,330
Pozorování	33	28
Rozdíl	32	27
F	1,888	
P(F<=f) (1)	0,048	
F krit (1)	1,872	
Dvouvýběrový T-test s nerovností rozptylů		
t Stat	-4,367	
P(T<=t) (1)	0,000	
t krit (1)	1,672	
P(T<=t) (2)	0,000	
t krit (2)	2,002	

Tab. 3 Vyhodnocení dvouvýběrového F a T testu pro srovnání šířek letokruhu u dřeva modřínu opadavého a modřínu sibiřského.

Dvouvýběrový F-test pro rozptyl		
	<i>Podíl let. dřeva MD opadavý</i>	<i>Podíl let. dřeva MD sibiřský</i>
Stř. hodnota	31,522	25,880
Rozptyl	54,542	26,641
Pozorování	28	33
Rozdíl	27	32
F	2,047	
P(F<=f) (1)	0,027	
F krit (1)	1,838	
Dvouvýběrový T-test s nerovností rozptylů		
t Stat	3,399	
P(T<=t) (1)	0,001	
t krit (1)	1,678	
P(T<=t) (2)	0,001	
t krit (2)	2,012	

Tab. 4 Vyhodnocení dvouvýběrového F a T testu pro srovnání podílu letního dřeva v letokruhu u dřeva modřínu opadavého a modřínu sibiřského.

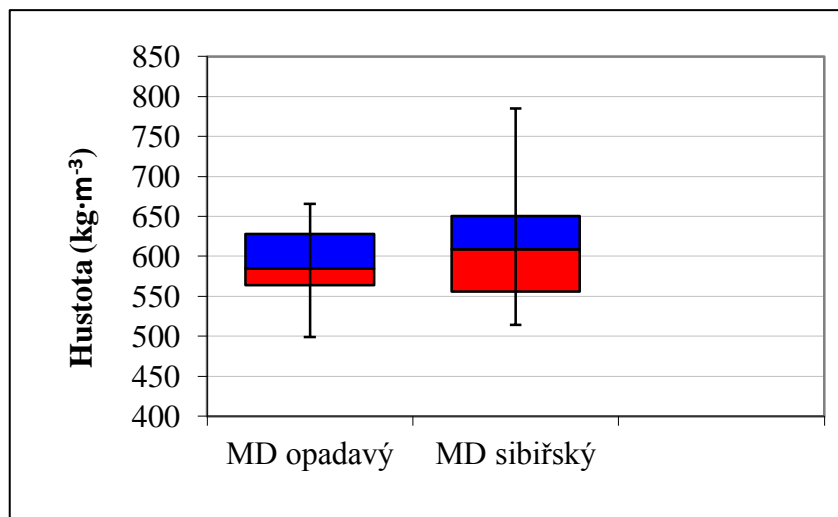
5.2 Srovnání hustoty modřínu opadavého a modřínu sibiřského

Vyhodnocená data hustoty dřeva jsou zobrazena v Tab. 5, hustota je uvedena při vlhkosti 12 %. Průměrná hustota modřínu opadavého, která byla zjišťována na 28 zkušebních vzorcích je $592 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Hustota dřeva modřínu sibiřského byla zkoušena na 32 vzorcích a průměrná hustota je o $19 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ větší než u dřeva modřínu opadavého, tedy $611 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Nejvyšší zjištěná hodnota hustoty je $785 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, a to dřeva modřínu sibiřského a nejmenší hustota byla zjištěna u modřínu opadavého, a to $499 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. U obou dřev je poměrně nízký variační koeficient, u dřeva modřínu opadavého 7 % a u dřeva modřínu sibiřského 11 %, který značí poměrně malou variabilitu hustoty. U dřeva modřínu sibiřského je více než dvojnásobný rozptyl hodnot oproti modřínu opadavému.

	Modřín opadavý	Modřín sibiřský
	Hustota ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	
N	28	32
Průměr	592	611
Medián	585	608
Rozptyl	1698	4411
Směr. od.	41	66
Var. koef. %	7	11
Min	499	514
Max	666	785

Tab. 5 Popisná statistika hustoty dřeva při vlhkosti 12 % dřeva modřínu opadavého a modřínu sibiřského.

Grafické znázornění hodnot je patrné na krabicovém grafu Obr. 11, kde vidíme rozložení dat v okolí mediánu, maximální a minimální hodnoty. Modrá oblast grafu znázorňuje 75% kvantil a barva červená zobrazuje oblast 25% kvantilu. Z grafu je patrné, že u dřeva modřínu opadavého leží hodnoty převážně v oblasti 75% kvantilu, zatímco u modřínu sibiřského je rozložení hodnot rovnoměrnější a převažuje kvantil 25%.



Obr. 11 Krabicový graf znázorňující rozložení hustoty při vlhkosti 12 % v okolí mediánu, maximální a minimální hodnoty.

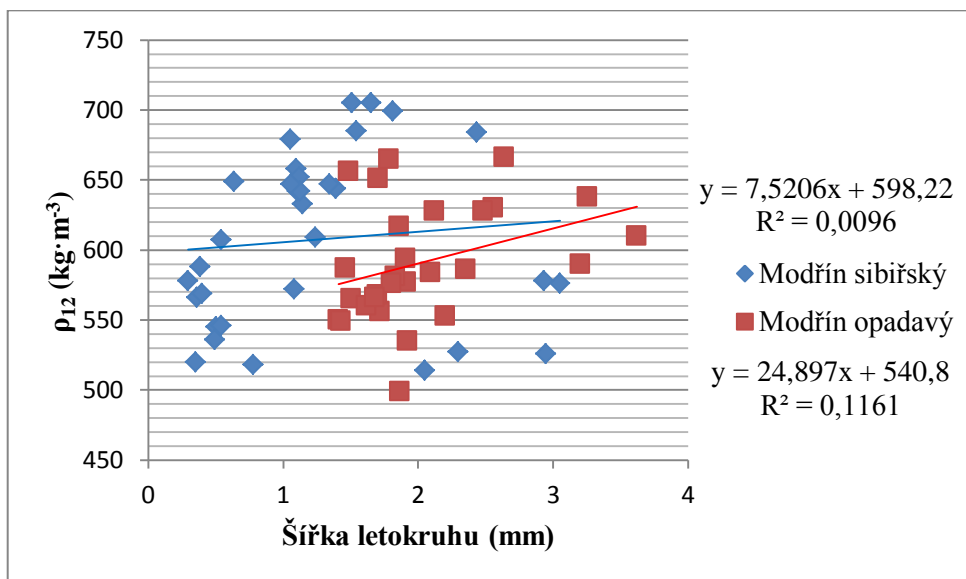
Pro srovnání shody hustoty mezi dřevem modřínu sibiřského a modřínu opadavého byl použit F–test a T–test. Výsledkem F–testu je zamítnutí nulové hypotézy, rozptyly hustot mezi modřínem opadavým a modřínem sibiřským jsou statisticky rozdílné.

Dvouvýběrový F-test pro rozptyl		
	ρ_{12} MD. sibiřský	ρ_{12} opad MD. opadavý
Stř. hodnota	607,688	591,607
Rozptyl	3742,028	1760,988
Pozorování	32	28
Rozdíl	31	27
F	2,125	
P(F<=f) (1)	0,025	
F krit (1)	1,878	
Dvouvýběrový T-test s nerovností rozptylů		
t Stat	1,199	
P(T<=t) (1)	0,118	
t krit (1)	1,673	
P(T<=t) (2)	0,236	
t krit (2)	2,004	

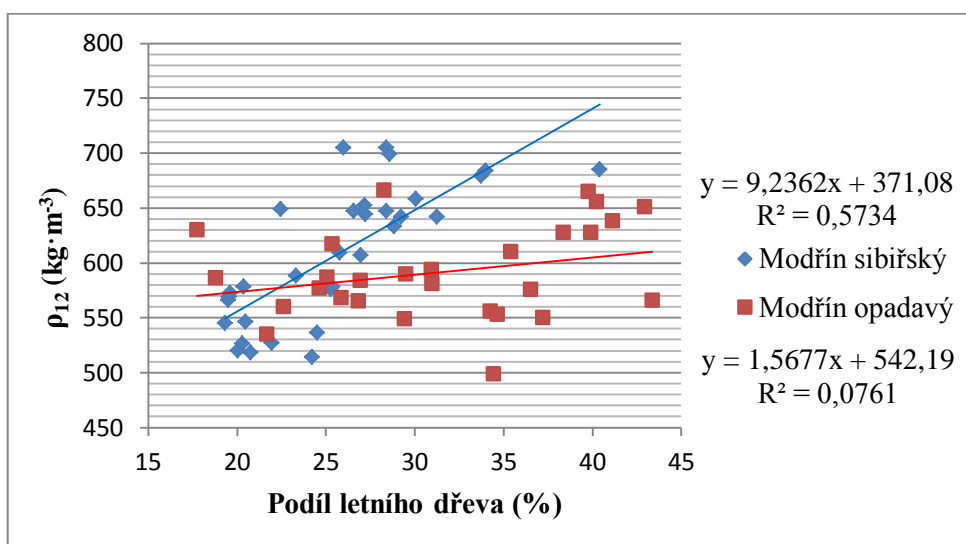
Tab. 6 Vyhodnocení dvouvýběrového F a T testu pro srovnání hustoty dřeva modřínu opadavého a modřínu sibiřského při vlhkosti 12 %.

Vyhodnocením T – testu je nezamítnutí nulové hypotézy, existuje tedy shoda středních hodnot na úrovni pravděpodobnosti $\alpha=0,05$. Na Obr. 12 je patrná závislost hustoty na šířce letokruhu u dřeva modřínu opadavého a modřínu sibiřského. Z grafu

nejde vyvodit žádná závislost, koeficienty determinace jsou velmi nízké, pro modřín sibiřský 0,0096 a pro modřín opadavý 0,1161. Koeficient determinace 0,5734 prokazuje závislost hustoty na podílu letního dřeva u modřínu sibiřského, jak je patrné na Obr. 13. Z rostoucího trendu je zřejmé, že s rostoucím podílem letního dřeva roste také hustota vzorku u dřeva modřínu sibiřského. U modřínu opadavého se nepodařilo prokázat žádnou závislost mezi podílem letního dřeva a hustotou, koeficient determinace je příliš nízký, pouze 0,0761.



Obr. 12 Závislosti hustoty dřeva na šířce letokruhu.



Obr. 13 Graf závislosti hustoty dřeva na podílu letního dřeva v letokruhu.

5.3 Celkové bobtnání

Statisticky vyhodnocená data bobtnání ve všech směrech včetně bobtnání objemového a bobtnání diferenciálního u dřeva modřínu opadavého a modřínu sibiřského jsou uvedeny v Tab. 7. Ve všech směrech bobtnal modřín opadavý více než modřín sibiřský. Modřín sibiřský má větší hodnotu o 0,14 % jen u bobtnání diferenciálního, což je poměr mezi tangenciálním a radiálním bobtnáním. Největší bobtnání je ve směru tangenciálním, a to průměrně 10,74 % u modřínu sibiřského a o 1,18 % více, tedy 11,92 %, u modřínu opadavého. Rozdíl bobtnání ve směru radiálním mezi modřínem sibiřským a opadavým je 0,75 %. Ve směru podélném je bobtnání nejmenší, modřín sibiřský bobtnal ve směru podélném pouze o 0,45 % a modřín opadavý o 0,06 % více než modřín sibiřský. Součtem bobtnání v jednotlivých směrech se získá bobtnání objemové, které vychází pro dřevo modřínu sibiřského průměrně 16,01 % a pro dřevo modřínu opadavého 18 %. Variační koeficient objemového bobtnání vychází pro modřín opadavý 10,22 % a pro modřín sibiřský 16,36 %, je tedy patrné, že objemové bobtnání u dřeva modřínu sibiřského vykazuje větší variabilitu hodnot oproti objemovému bobtnání dřeva modřínu opadavého.

	Modřín sibiřský					Modřín opadavý				
	α_{dif} (%)	α_{L} (%)	α_{R} (%)	α_{T} (%)	α_{V} (%)	α_{dif} (%)	α_{L} (%)	α_{R} (%)	α_{T} (%)	α_{V} (%)
N	34	34	34	34	34	29	29	29	29	29
Průměr	2,32	0,45	4,82	10,74	16,01	2,18	0,51	5,57	11,92	18,00
Medián	2,33	0,30	4,79	11,00	16,61	2,14	0,40	5,50	12,00	18,11
Rozptyl	0,21	0,19	1,57	2,64	6,66	0,13	0,11	0,70	2,01	3,27
Směr. od.	0,46	0,45	1,27	1,65	2,62	0,36	0,33	0,85	1,44	1,84
Var. koef. %	19,67	99,64	26,39	15,35	16,36	16,42	65,70	15,29	12,12	10,22
Min	1,44	0,03	3,03	7,62	11,14	1,28	0,10	4,07	8,98	15,15
Max	3,30	2,21	7,61	13,81	21,30	2,94	1,60	7,22	16,13	22,59

Tab. 7 Statisticky vyhodnocená data bobtnání ve všech směrech včetně bobtnání objemového a bobtnání diferenciálního u dřeva modřínu opadavého a modřínu sibiřského.

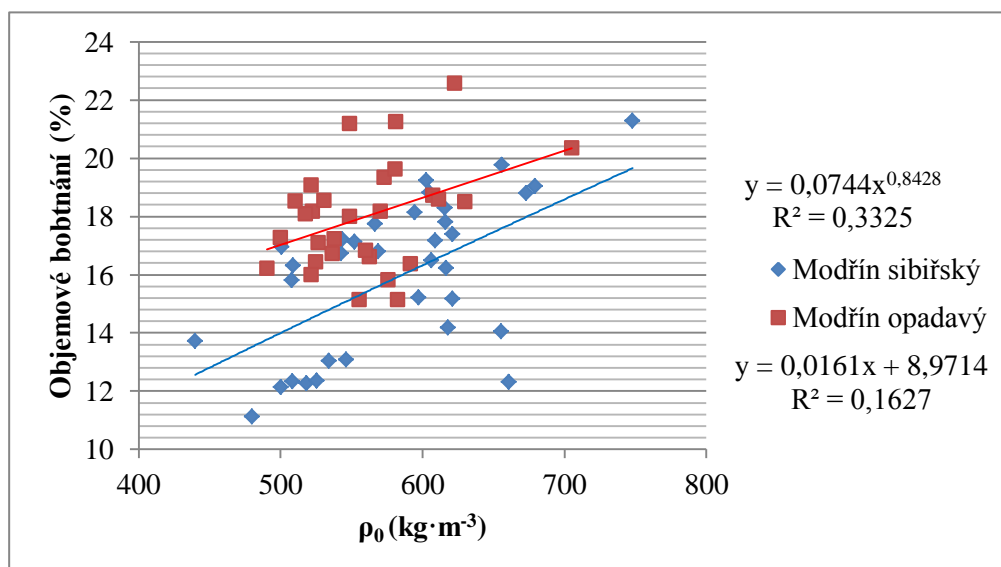
Pro srovnání statické významnosti objemového bobtnání byl použit dvouvýběrový F–test a T–test. Výstupem srovnání rozptylů zadaných kritérií je zamítnutí nulové hypotézy, je tedy prokázáno, že shody rozptylů objemového bobtnání jsou statisticky rozdílné. Při posuzování shody středních hodnot objemového bobtnání pomocí dvouvýběrového T–testu byla nulová hypotéza zamítnuta. Střední hodnoty objemového

bobtnání jsou také statisticky rozdílné. Existuje statistická rozdílnost objemového bobtnání mezi dřevem modřinu sibiřského a modřinu opadavého.

Dvouvýběrový F-test pro rozptyl		
	α_v <i>MD sibiřský</i>	α_v <i>MD opadavý</i>
Stř. hodnota	16,008	18,001
Rozptyl	6,858	3,384
Pozorování	34	29
Rozdíl	33	28
F	2,026	
P(F<=f) (1)	0,030	
F krit (1)	1,851	
Dvouvýběrový T-test s nerovností rozptylů		
t Stat	-3,532	
P(T<=t) (1)	0,000	
t krit (1)	1,671	
P(T<=t) (2)	0,001	
t krit (2)	2,001	

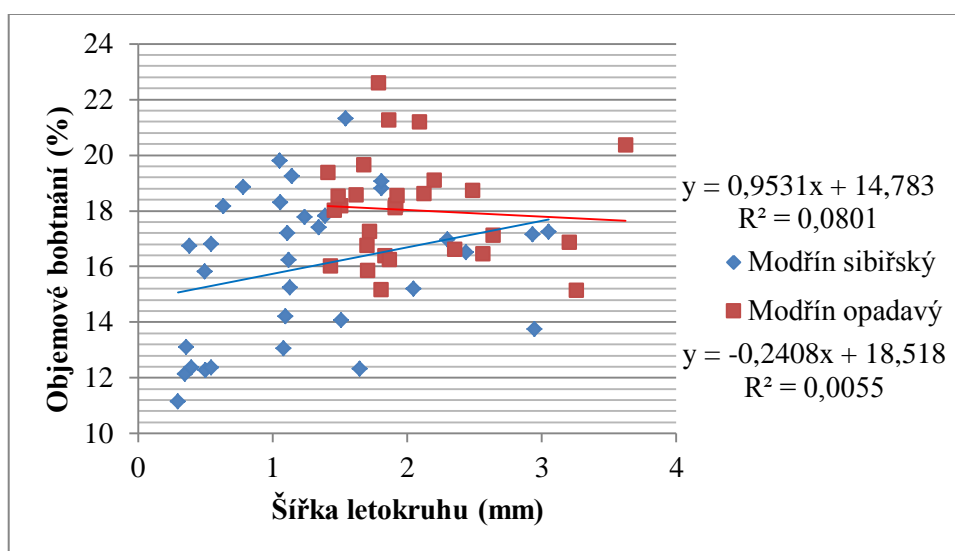
Tab. 8 Vyhodnocení dvouvýběrového F a T testu pro srovnání objemového bobtnání modřinu opadavého a modřinu sibiřského.

Na Obr. 14 je patrná závislost objemového bobtnání na hustotě dřeva při vlhkosti 0 %. Na grafu je patrná středně silná závislost u dřeva modřinu sibiřského s determinačním koeficientem 0,3508, zatímco u dřeva modřinu opadavého je jen malá závislost, determinační koeficient je poměrně nízký, pouze 0,1627.

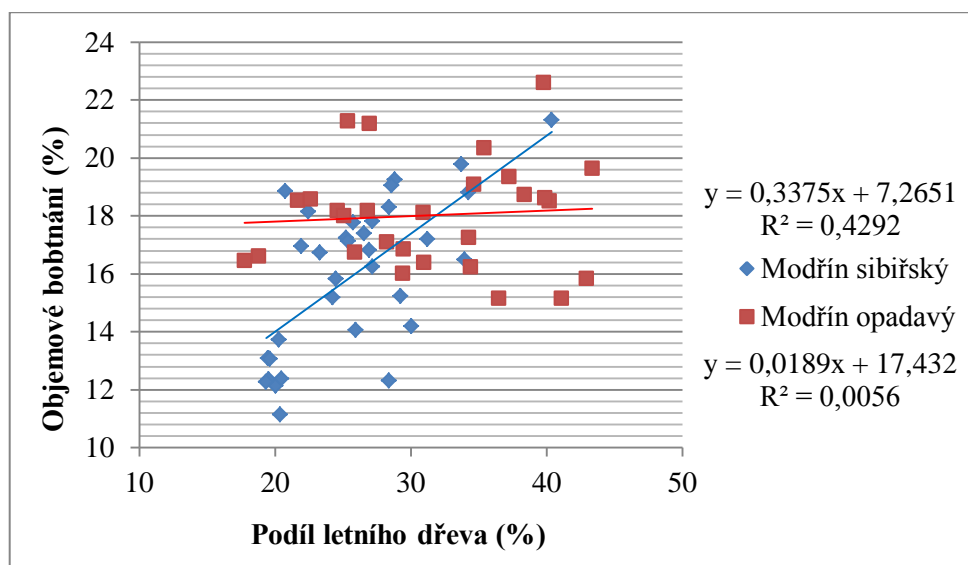


Obr. 14 Závislost objemového bobtnání na hustotě dřeva při vlhkosti 0 %.

Obr. 15 znázorňuje graf vytvořený z objemového bobtnání a šířky letokruhu u dřeva modřínu opadavého a modřínu sibiřského. Mezi těmito zadanými parametry nebyla zjištěna žádná statisticky prokazatelná závislost. U obou dřev je rozmístění dat velmi nahodilé, což je důsledkem velmi malých determinačních koeficientů. Pro dřevo modřínu opadavého je koeficient determinace velmi nízký 0,0055 a pro dřevo modřínu sibiřského je koeficient determinace 0,0801. Z takto nízkých koeficientů determinace nelze vyvodit žádnou závislost. Vyšší koeficient determinace je patrný na Obr. 16 u dřeva modřínu sibiřského v závislosti objemového bobtnání na podílu letního dřeva v letokruhu. Rostoucí trend s determinací 0,4292 značí, že s rostoucím podílem letního dřeva roste také objemové bobtnání u dřeva modřínu sibiřského.



Obr. 15 Závislost objemového bobtnání na šířce letokruhu.



Obr. 16 Závislost objemového bobtnání na podílu letního dřeva.

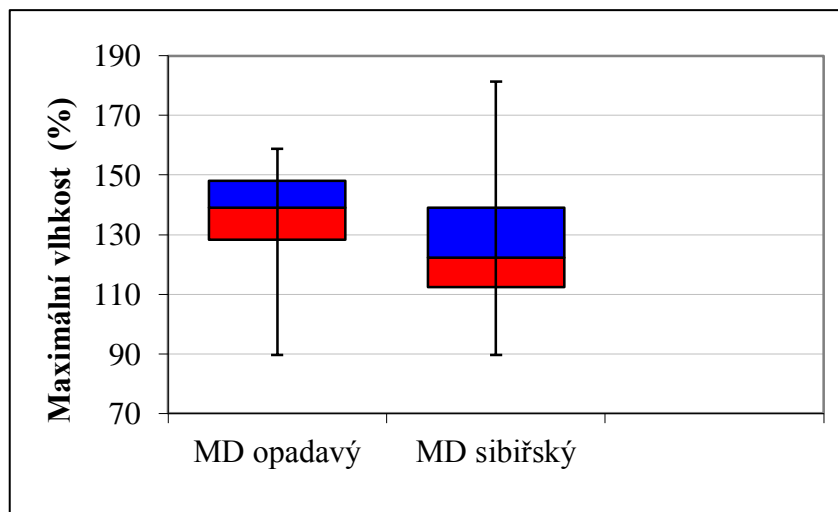
5.4 Stanovení maximální vlhkosti a meze hygroskopicity

Vyhodnocená data maximální vlhkosti a meze hygroskopicity jsou uvedena v Tab. 9. Průměrně vyšší maximální vlhkost dosahovalo dřevo modřinu opadavého, a to 137,49 %, zatímco dřevo modřinu sibiřského hodnotu o 11,59 % nižší a to 125,9 %. Nejvyšší a nejnižší maximální vlhkost byla zjištěna u dřeva modřinu sibiřského, nejvyšší 181,4 % a naopak nejnižší 89,69 %. Variační koeficienty maximální vlhkosti jsou u obou dřev poměrně nízké: 10,78 % u dřeva modřinu opadavého a modřinu sibiřského je variabilita mírně vyšší 16,13 %. Průměrná mez hygroskopicity pro dřevo modřinu sibiřského byla stanovena na hodnotě 27,1 % vlhkosti a pro dřevo modřinu opadavého na vlhkosti o 2,4 % nižší, tedy na vlhkosti 24,7 %. U modřinu opadavého je rozptyl hodnot 0,38 a variační koeficient pouze 2,54 %, zatímco u dřeva modřinu sibiřského je rozptyl hodnot skoro sedminásobně větší, a to 2,56 a variační koeficient 6 %, je tedy patrné že dřevo modřinu sibiřského vykazuje větší variabilitu meze hygroskopicity než dřevo modřinu opadavého.

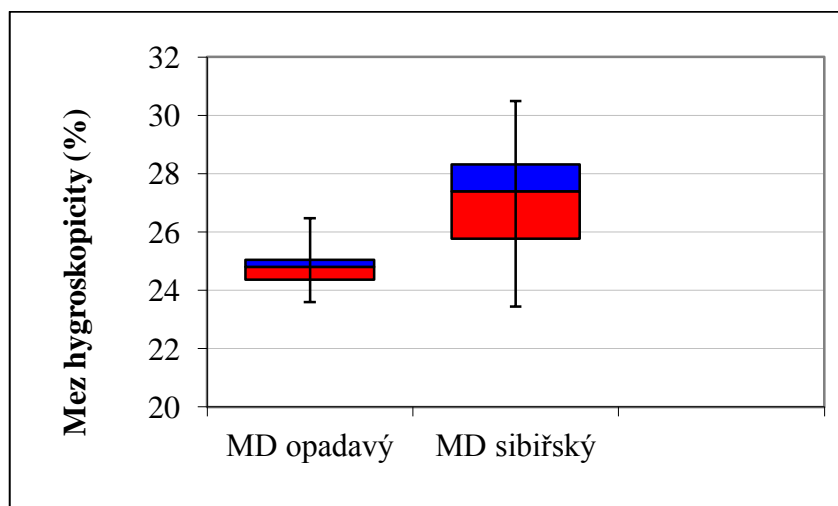
	Modřin sibiřský		Modřin opadavý	
	w _{max} (%)	MH (%)	w _{max} (%)	MH (%)
N	34	33	29	29
Průměr	125,90	27,10	137,49	24,70
Medián	122,21	27,39	138,95	24,80
Rozptyl	400,19	2,56	211,97	0,38
Směr. od.	20,00	1,60	14,56	0,62
Var. koef. %	16,13	6,00	10,78	2,54
Min	89,69	23,44	89,71	23,59
Max	181,41	30,50	158,85	26,47

Tab. 9 Popisná statistika maximální vlhkosti a meze hygroskopicity dřeva modřinu sibiřského a modřinu opadavého.

Rozložení hodnot meze hygroskopicity v okolí mediánu je patrné z krabicového grafu Obr. 18. Vidíme poměrně rovnoměrné rozložení v okolí mediánu u dřeva modřinu opadavého, zatímco u dřeva modřinu sibiřského převládají hodnoty v oblasti 25% kvantilu. Obrácené rozložení hodnot je na krabicovém grafu pro maximální vlhkost viz Obr 17, hodnoty modřinu sibiřského převládají v oblasti 75% kvantilu a rozložení hodnot maximální vlhkosti u dřeva modřinu opadavého je opět rovnoměrné v okolí mediánu.



Obr. 17 Krabicový graf znázorňující rozložení dat maximální vlhkosti dřeva modřínu opadavého a modřínu sibiřského.



Obr. 18 Krabicový graf znázorňující rozložení dat maximální vlhkosti dřeva modřínu opadavého a modřínu sibiřského.

Pro stanovení statistické významnosti dat maximální vlhkosti a meze hygroskopicity u dřeva modřínu opadavého a modřínu sibiřského byla tato data testována pomocí dvouvýběrového F–testu a T–testu. V Tab. 10 jsou zobrazeny výsledky pro srovnání shody maximální vlhkosti u dřeva modřínu opadavého a modřínu sibiřského. Výstupem F–testu je zamítnutí nulové hypotézy, shoda rozptylů testovaných hodnot je statisticky rozdílná. V T–testu je nulová hypotéza opět zamítnuta, je prokázána statistická rozdílnost středních hodnot testovaných dat mezi modřínem opadavým a modřínem sibiřským. V Tab. 11 jsou uvedeny výsledky ze statistického testování shody meze hygroskopicity mezi modřínem opadavým a modřínem sibiřským. V obou případech byla nulová hypotéza zamítnuta. Je tedy prokázáno že, rozptyly a střední hodnoty meze

hygroskopicity se statisticky liší mezi dřevem modřinu sibiřského a modřinu opadavého.

Dvouvýběrový F-test pro rozptyl		
	w_{max} <i>MD sibiřský</i>	w_{max} <i>MD opadavý</i>
Stř. hodnota	125,898	137,490
Rozptyl	412,315	219,545
Pozorování	34	29
Rozdíl	33	28
F	1,878	
P(F<=f) (1)	0,046	
F krit (1)	1,851	
Dvouvýběrový T-test s nerovností rozptylů		
t Stat	-2,612	
P(T<=t) (1)	0,006	
t krit (1)	1,671	
P(T<=t) (2)	0,011	
t krit (2)	2,000	

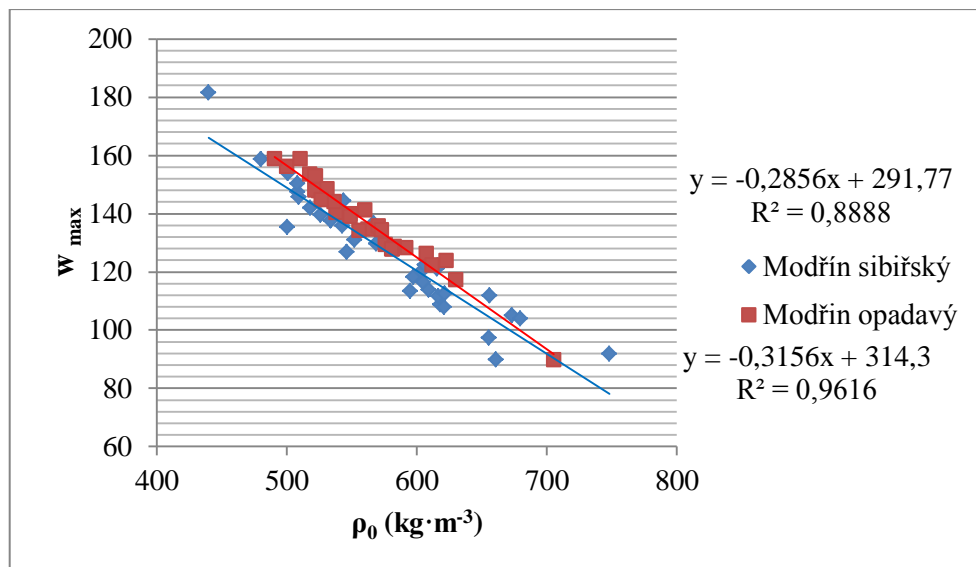
Tab. 10 Vyhodnocení dvouvýběrového F a T testu pro srovnání maximální vlhkosti dřeva modřinu opadavého a modřinu sibiřského.

Dvouvýběrový F-test pro rozptyl		
	<i>MH</i> <i>MD. sibiřský</i>	<i>MH</i> <i>MD. opadavý</i>
Stř. hodnota	27,097	24,698
Rozptyl	2,642	0,392
Pozorování	33	29
Rozdíl	32	28
F	6,737	
P(F<=f) (1)	0,000	
F krit (1)	1,857	
Dvouvýběrový T-test s nerovností rozptylů		
t Stat	7,839	
P(T<=t) (1)	0,000	
t krit (1)	1,682	
P(T<=t) (2)	0,000	
t krit (2)	2,018	

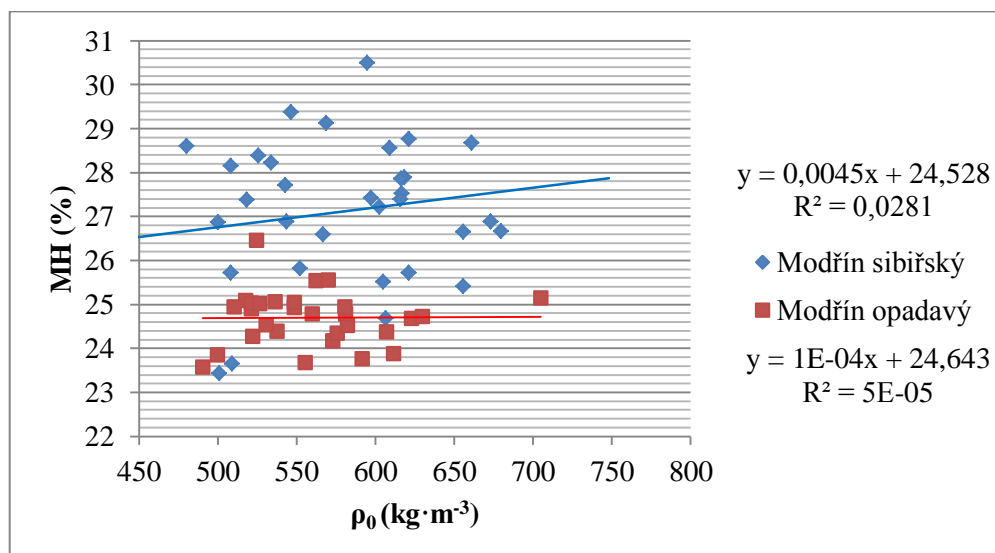
Tab. 11 Vyhodnocení dvouvýběrového F a T testu pro srovnání meze hygroskopicity dřeva modřinu opadavého a modřinu sibiřského.

Závislost mezi maximální vlhkostí a hustoty dřeva při vlhkosti 0 % zobrazuje Obr. 19, kde vidíme, že s rostoucí hustotou dřeva klesá maximální vlhkost vzorků. Tato závislost je prokazatelná u obou dřev. U dřeva modřinu sibiřského je závislost

potvrzena koeficientem determinace 0,888 a dřeva modřinu opadavého s koeficientem determinace ještě vyšším, a to 0,9616. Žádná závislost nebyla prokázána mezi mezi hygroskopicity a hustotou dřeva při vlhkosti 0 %, průběh závislosti je patrný na Obr. 20. Determinační koeficienty u obou dřev jsou velmi nízké, je tedy prokazatelné, že u námi zkoušených vzorků neexistuje žádná závislost mezi mezi hygroskopicity a hustotou dřeva.



Obr. 19 Závislost maximální vlhkosti na hustotě při vlhkosti 0 %.



Obr. 20 Závislost meze hygroskopicity na hustotě při vlhkosti 0 %.

5.5 Stanovení meze pevnosti ve směru rovnoběžně s vlákny

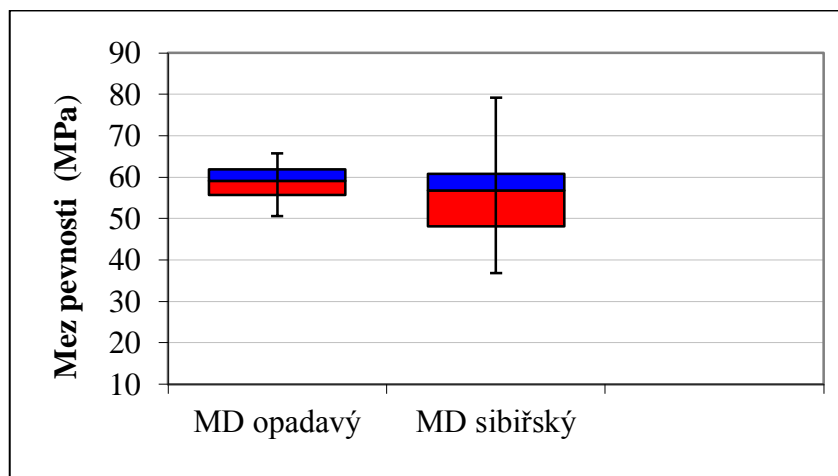
Stanovování meze pevnosti a modulu pružnosti probíhalo na zkušebním zatěžovacím stroji Zwick Z050, z kterého byly po měření vyexportovány hodnoty meze pevnosti a modulu pružnosti. Modul pružnosti byl zaznamenáván přístrojem za pomoci extenzometru. Vyhodnocená data meze pevnosti a modulu pružnosti pro dřevo modřínu sibiřského a modřínu opadavého jsou uvedena v Tab. 12.

	Modřín opadavý		Modřín sibiřský	
	E_{12} (MPa)	σ_{12} (MPa)	E_{12} (MPa)	σ_{12} (MPa)
N	28	28	32	32
Průměr	19119	59,00	18227	56,33
Medián	18995	59,17	18184	56,83
Rozptyl	20737860	14,66	19904033	88,53
Směr. od.	4637	3,90	4533	9,56
Var. koef. %	23,82	6,49	24,48	16,71
Min	12161	50,60	6068	36,89
Max	29910	65,69	28229	79,29

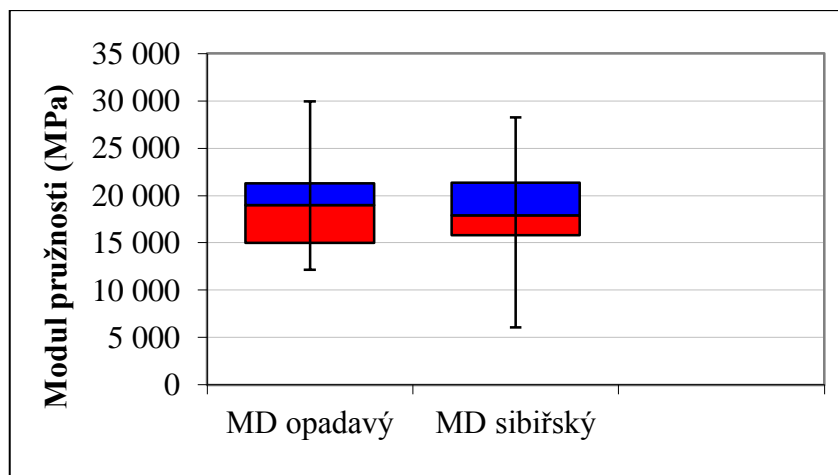
Tab. 12 Popisná statistika pevnosti v tlaku ve směru vláken a modulu pružnosti dřeva modřínu sibiřského a modřínu opadavého.

Vyšší průměrné pevnosti dřeva ve směru vláken dosahovalo dřevo modřínu opadavého, a to 59 MPa, zatímco dřevo modřínu sibiřského průměrné pevnosti 56,33 MPa. Dřevo modřínu sibiřského vykazovalo větší extrémní hodnoty, maximální pevnost pro toto dřevo byla zjištěna 79,29 MPa, zatímco minimální pevnost pouze 36,89 MPa. Tato velká variabilita hodnot je patrná také z variačního koeficientu, který je 16,71 %. Variační koeficient pro mez pevnosti u dřeva modřínu opadavého je pouze 6,49 %, tento nízký variační koeficient je důkazem menší variability naměřených hodnot. U dřeva modřínu opadavého byla maximální mez pevnosti stanovena na hodnotě 65,69 MPa a minimální mez pevnosti na hodnotě 50,6 MPa. Rozložení zjištěných mezí pevnosti je patrné na Obr. 21, krabicový graf znázorňuje rozložení v okolí mediánu. U dřeva modřínu opadavého je toto rozložení rovnoměrné, zatímco u dřeva modřínu sibiřského se nachází více hodnot v oblasti 25% kvantilu. Na Obr. 22 je znázorněno rozložení hodnot modulu pružnosti dřeva modřínu opadavého a modřínu sibiřského. U dřeva modřínu opadavého převládají hodnoty v oblasti 25% kvantilu, zatímco u dřeva modřínu sibiřského v oblasti 75% kvantilu. Průměrné hodnoty modulu

pružnosti dřeva modřínu opadavého a modřínu sibiřského jsou o 892 MPa odlišné. Průměrná hodnota modulu pružnosti dřeva modřínu opadavého je 19119 MPa, zatímco modřínu sibiřského 18227 MPa.



Obr. 21 Krabicový graf znázorňující rozložení hodnot meze pevnosti u dřeva modřínu opadavého a modřínu sibiřského.



Obr. 22 Krabicový graf znázorňující rozložení hodnot modulu pružnosti u dřeva modřínu opadavého a modřínu sibiřského.

Pro zjištění statistické významnosti a shody hodnot meze pevnosti a modulu pružnosti mezi dřevy modřínu opadavého a modřínu sibiřského, byly hodnoty podrobeny dvouvýběrovému F–testu a T–testu. Z Tab. 13 je patrné, že při porovnání rozptylů meze pevnosti mezi dřevy modřínu sibiřského a modřínu opadavého, byla prokázána statistická rozdílnost mezi rozptyly. Při porovnání středních hodnot, nebyla nulová hypotéza zamítnuta, existuje tedy prokazatelná závislost středních hodnot meze pevnosti mezi dřevy modřínu sibiřského a opadavého. V Tab. 14 jsou výsledky testování shody modulu pružnosti mezi dřevem modřínu opadavého a modřínu

sibiřského. V tomto případě nedošlo k žádnému zamítnutí nulové hypotézy. Je tedy prokazatelné, že rozptyly hodnot a střední hodnoty modulu pružnosti jsou statisticky nerozdílné na úrovni pravděpodobnosti $\alpha=0,05$.

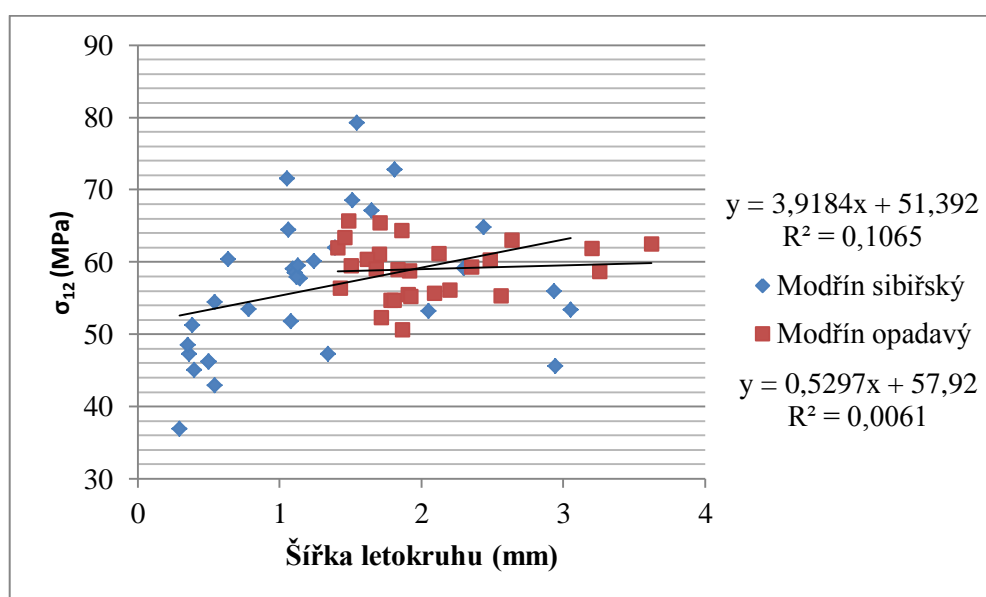
Dvouvýběrový F-test pro rozptyl		
	σ_{12} <i>MD sibiřský.</i>	σ_{12} <i>MD opadavý</i>
Stř. hodnota	56,325	59,001
Rozptyl	91,388	15,201
Pozorování	32	28
Rozdíl	31	27
F	6,012	
P(F<=f) (1)	0,000	
F krit (1)	1,878	
Dvouvýběrový T-test s nerovností rozptylů		
t Stat	-1,451	
P(T<=t) (1)	0,077	
t krit (1)	1,682	
P(T<=t) (2)	0,154	
t krit (2)	2,018	

Tab. 13 Vyhodnocení dvouvýběrového F a T testu pro srovnání meze pevnosti při vlhkosti 0 % dřeva modřínu opadavého a modřínu sibiřského.

Dvouvýběrový F-test pro rozptyl		
	E_{12} <i>MD opadavý</i>	E_{12} <i>MD sibiřský</i>
Stř. hodnota	19118,514	18226,728
Rozptyl	21505928,753	20546098,331
Pozorování	28	32
Rozdíl	27	31
F	1,047	
P(F<=f) (1)	0,448	
F krit (1)	1,849	
Dvouvýběrový T-test s rovností rozptylů		
t Stat	0,751	
P(T<=t) (1)	0,228	
t krit (1)	1,672	
P(T<=t) (2)	0,456	
t krit (2)	2,002	

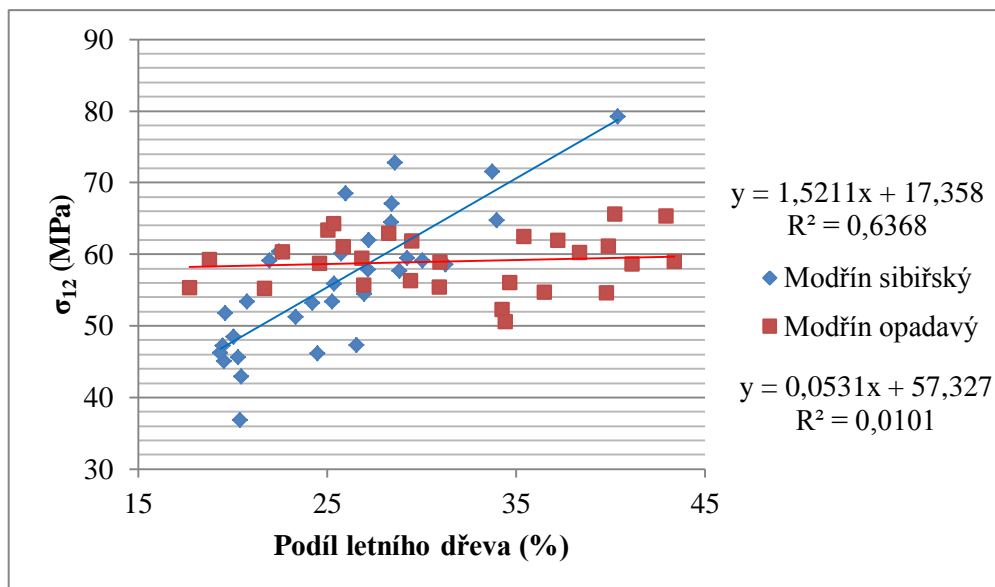
Tab. 14 Vyhodnocení dvouvýběrového F a T testu pro srovnání modulu pružnosti při vlhkosti 0 % dřeva modřínu opadavého a modřínu sibiřského.

Jestli šířka letokruhu nebo podíl letního dřeva ovlivňuje pevnost dřeva ve směru vláken je patrné z Obr. 23 a Obr. 24. Na Obr 23 je znázorněná závislost mezi mezi pevnosti a šířkou letokruhu, mezi těmito charakteristikami dřeva nebyla zjištěna žádná prokazatelná závislost. U obou dřev jsou koeficienty determinace příliš nízké, u dřeva modřínu sibiřského 0,1065 a u dřeva modřínu opadavého pouze 0,0061. Závislost byla zjištěna pouze mezi mezi pevnosti a podílem letního dřeva, a to pouze u dřeva modřínu sibiřského, jak je patrné z Obr. 24. Koeficient determinace pro tuto závislost je 0,6368, zatímco dřevo modřínu opadavého nevykazuje žádnou závislost mezi mezi pevnosti a podílem letního dřeva.

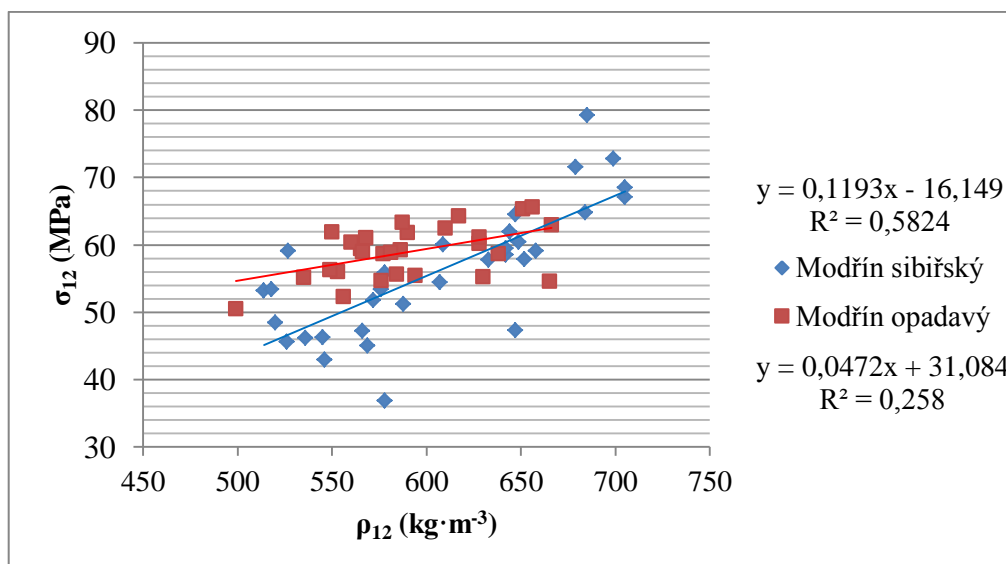


Obr. 23 Závislost meze pevnosti na šířce letokruhu u dřeva modřínu opadavého a modřínu sibiřského.

Modřín opadavý vykazuje malou závislost oproti modřínu sibiřskému také na Obr. 25, v závislosti meze pevnosti na hustotě dřeva, s determinací jen 0,258, zatímco u modřínu sibiřského je prokazatelná závislost s determinací 0,5824. Z Obr. 25 je tedy patrné, že u dřeva modřínu sibiřského roste s hustotou také hodnota meze pevnosti v tlaku ve směru vláken. Ve vztahu mezi pevností dřeva ve směru vláken a modulem pružnosti, nebyla zjištěna, žádná prokazatelná závislost. Na Obr. 26 je patrný jen rostoucí trend, který není podložen žádným statisticky prokazujícím koeficientem determinace.



Obr. 24 Závislost meze pevnosti na podílu letního dřeva u dřeva modřínu opadavého a modřínu sibiřského.



Obr. 25 Závislost meze pevnosti na hustotě dřeva u dřeva modřínu opadavého a modřínu sibiřského.

6 Diskuze

6.1 Letokruhová analýza

Při stanovování charakteristiky letokruhu bylo pracováno se vzorky modřínu sibiřského a modřínu opadavého, které byly podrobeny letokruhové analýze na stereolupě Leica DFC295. Všechny vzorky měly vlhkost 12 %. Šířka letokruhu je hlavním znakem, jak od sebe odlišit modřín sibiřský, dovážený z východu, a domácí modřín opadavý. Na webových stránkách firmy Trustimex je uvedeno, že šířka letokruhu modřínu opadavého by měla být asi 3–5 mm, zatímco modřín sibiřský by měl mít velmi úzké letokruhy často užší než 0,5 mm (www.trustimex.lv). Tento rozdíl v šířce letokruhu je způsoben především délkou vegetačního období a pěstebními podmínkami. Modříny sibiřské, které rostou v tvrdších klimatických pásech, mají kratší a chladnější vegetační období činnosti kambia, proto dochází jen k malému přírůstku xylému za vegetační období. Zatímco v oblastech růstu modřínu opadavého je vegetační období delší a za příznivějších teplot. Činnost kambia je tedy delší, tím pádem je větší přírůstek xylému. Dalším faktorem mohou být pěstební podmínky a složení půdy, ve kterých stromy rostou. Modříny sibiřské často rostou v kamenité půdě, která je často také promrzlá. Pro naši analýzu letokruhů jsme použili 28 vzorků modřínu opadavého a 33 vzorků modřínu sibiřského. Maximální počet letokruhů na vzorku byl naměřen u dřeva modřínu sibiřského, kde na délce 20 mm bylo naměřeno celkem 67 letokruhů o průměrné velikosti 0,29 mm. Vyhodnocená data z měření jsou uvedena v Tab. 2. Průměrná šířka letokruhu modřínu sibiřského byla stanovena na hodnotě 1,28 mm a modřínu opadavého 2,04 mm. U dřeva modřínu sibiřského bylo zjištěno, že procentuální zastoupení letního dřeva v letokruhu je průměrně 25,88 %, což je o 5,64 % méně než u dřeva modřínu opadavého, u kterého bylo zjištěno, že letokruh je tvořen průměrně z 31,52 % dřevem letním. Požgaj et al. (1997) uvádí, že procentuální zastoupení letního dřeva u jehličnanů je přibližně 30 %, čemuž zhruba odpovídají i naše výsledky. Naproti tomu Karlman (1998) uvádí, že průměrný podíl letního dřeva v letokruhu je 40–50% u modřínu opadavého, a asi 40% u modřínu sibiřského, čemuž námi zjištěné procentuální zastoupení letního dřeva v letokruhu neodpovídá. Poměrně velká variabilita hodnot podílu letního dřeva v letokruhu je podložena variačním koeficientem, který činí pro dřevo modřínu opadavého 23,43 % a pro dřevo modřínu sibiřského 19,94 %. Všechny zjištěné hodnoty podílu letního dřeva a šířky letokruhu modřínu opadavého a modřínu sibiřského byly podrobeny F–testu a T–testu, aby se

prokázal vzájemný vztah mezi dřevy. V obou případech je výsledkem zamítnutí nulové hypotézy, tudíž šířka letokruhu a podíl letního dřeva v letokruhu mezi dřevy modřínu sibiřského a modřínu opadavého jsou statisticky rozdílné, což je způsobeno rozdílnými růstovými podmínkami.

6.2 Srovnání hustoty modřínu opadavého a modřínu sibiřského

Při srovnání hustoty modřínu opadavého a modřínu sibiřského bylo použito 28 vzorků modřínu opadavého a 32 vzorků modřínu sibiřského, všechny vzorky byly klimatizovány v místnosti, aby bylo dosaženo vlhkosti dřeva 12 %. Vyhodnocená data jsou uvedena v Tab. 5, grafické znázornění rozložení dat je patrné z Obr. 11. Karlman (1998) uvádí, že hustota různých stromů stejného druhu se může velmi lišit. Karlman (1998) stanovil průměrnou hustotu modřínu opadavého, stáří 120–150 let v rozmezí 535 až 670 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, průměrně 618 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, zatímco hustota modřínu sibiřského, stejného věku je 550 až 665 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, průměrně 621 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. U mladých stromů stáří 30–35 let je hustota u modřínu sibiřského 515 až 560 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, průměrně 536 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a u modřínu opadavého 410 až 490 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, průměrně 451 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Hustota v zóně jádrového dřeva je o 20 až 40 % vyšší než v zóně juvenilního dřeva. Při výběru dřeva na námi použité zkušební vzorky nebyl brán ohled na stáří stromu, ale také nebyl použit žádný vzorek s juvenilním dřevem. Zkušební vzorky modřínu opadavého vykazovaly hustotu v rozmezí 499 až 666 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, průměrná hustota byla stanovena na hodnotě 592 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Zjištěné hodnoty jsou v souladu s hustotou dřeva modřínu opadavého, kterou uvádí Karlman (1998). Průměrná hodnota hustoty modřínu opadavého odpovídá také hodnotě, kterou uvádí Horáček (2008), a to 590 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. U dřeva modřínu sibiřského byla hustota zjištěna v rozmezí 514 až 785 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, průměrně 611 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Zjištěná průměrná hodnota hustoty modřínu sibiřského koresponduje s hodnotou, kterou uvádí Karlman (1998), nesoulad hodnot je zaznamenán pouze v případě maximální hodnoty hustoty modřínu sibiřského. Ve srovnání námi zkoumaných zkušebních vzorků vykazuje dřevo modřínu sibiřského o 19 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ vyšší hustotu, než dřevo modřínu opadavého. Dřevo modřínu sibiřského vykazovalo vyšší variabilitu hodnot, která je podložena variačním koeficientem 11 %, zatímco u dřeva modřínu opadavého je variační koeficient pouze 7 %. Dřevo modřínu sibiřského vykazovalo více než 2,5krát větší rozptyl hodnot než dřevo modřínu opadavého. Mezi hustotou dřeva modřínu sibiřského a modřínu opadavého byla prokázána statistická shoda středních hodnot na pravděpodobnostní úrovni $\alpha=0,05$. Výsledky z testu středních hodnot jsou uvedeny v Tab. 6. Rozdíly

v hustotě mezi modřínem sibiřským a modřínem opadavým jsou způsobeny několika faktory. Gryc et al. (2011) uvádí, že hlavním faktorem na makroskopické úrovni je šířka letokruhu a podíl letního dřeva, na mikroskopické úrovni konstatuje, že buněčné stěny jarních tracheid jsou tenké ve srovnání s buněčnými stěnami letních tracheid. Dalším faktorem je kvalita a délka vegetačního období. V oblastech růstu modřínu sibiřského je vegetační období kratší a za působení tvrdších klimatických podmínek. Přírůstkem za vegetační období modřínu sibiřského je menší počet buněk s tlustší buněčnou stěnou a menším lumenem ve srovnání s přírůstkem za vegetační období v oblastech růstu modřínu opadavého. Jak je patrné z Obr. 12, u našich zkušebních vzorků se nepodařilo prokázat závislost mezi hustotou dřeva a šířkou letokruhu. Koeficienty determinace jsou velmi nízké, pro modřín sibiřský 0,0096 a pro modřín opadavý 0,1161. Gryc et al. (2011) uvádí, že u modřínového dřeva je závislost šířky letokruhu na hustotě poměrně malá, s determinací pouze $R^2 = 0,33$, zatímco u smrku $R^2 = 0,6$. Gryc et al. (2011) dále uvádí, že v závislosti letního dřeva na hustotě má modřín stoupající linii, ale její sklon není tak strmý a determinace je velmi nízká $R^2 = 0,14$. Tuto závislost se podařilo prokázat na Obr. 13 u vzorků modřínu sibiřského, kde stoupající trend závislosti hustoty na podílu letního dřeva, vykazuje determinační koeficient 0,5734. U dřeva modřínu opadavého se nepodařilo prokázat žádnou závislost mezi hustotou a podílem letního dřeva. Z Obr. 13 je tedy zřejmé, že u dřeva modřínu sibiřského roste s procentuálním zastoupením letního dřeva v letokruhu také hustota dřeva.

6.3 Celkové bobtnání

Pro zjišťování bobtnání v jednotlivých směrech a celkového bobtnání byly použity vzorky modřínu opadavého a modřínu sibiřského, které byly uloženy ve vodní lázni po dobu 21 dní, po této době již vzorky jistě dosáhly vlhkosti meze nasycení buněčných stěn i meze hygroskopicity. Při dosažení této hranice je dále objem vzorku považován za konstantní a maximální. Horáček (2008) uvádí, že nejmenší bobtnání je ve směru podél vláken a nepřesahuje 1 %, průměrná hodnota celkového podélného bobtnání se pro naše dřeviny udává 0,1–0,4 %, zatímco v radiálním směru je bobtnání asi 10krát větší než ve směru podélném, tedy 3–6 %. Největší je bobtnání ve směru tangenciálním, přibližně 2krát větší než ve směru radiálním, tedy 6–12 %. Tomuto poměru odpovídají i hodnoty zjištěné při bobtnání modřínu sibiřského a modřínu opadavého, které jsou uvedeny v Tab. 7, ze které je patrné, že dřevo modřínu opadavého bobtná průměrně ve

všech směrech více než dřevo modřínu sibiřského. Ve směru podélném je tento rozdíl zanedbatelný, pouze 0,06 %, zatímco ve směru tangenciálním tento rozdíl již činí 1,18 %. Dřevo modřínu opadavého bobtnalo ve směru tangenciálním průměrně 11,92 %, zatímco dřevo modřínu sibiřského jen 10,74 %. Součtem bobtnání v jednotlivých směrech dostaneme bobtnání objemové. Objemové bobtnání pro dřevo modřínu sibiřského je 16,01 a pro dřevo modřínu opadavého 18 %. Objemové bobtnání modřínu sibiřského je podobné objemovému bobtnání smrku, které stanovil Gryc et al. (2007) na hodnotě 15,23 %. Je tedy patrné, že dřevo modřínu sibiřského a modřínu opadavého bobtná více než dřevo smrku. Variační koeficient objemového bobtnání je u modřínu opadavého 10,22 % a modřínu sibiřského 16,36 %. Z vyššího variačního koeficientu je prokazatelné, že dřevo modřínu sibiřského vykazuje vyšší variabilitu objemového bobtnání. Mezi objemovým bobtnáním modřínu opadavého a modřínu sibiřského nebyla prokázána žádná shoda rozptylů nebo středních hodnot. Výsledky statistické rozdílnosti jsou uvedeny v Tab. 8. Rozdílnost bobtnání je způsobena několika faktory. Hlavním faktorem je chemické složení dřeva a doprovodné látky obsažené ve dřevě. Jelikož dřevo modřínu sibiřského roste v jiných klimatických podmínkách, mění se i jeho chemické složení oproti dřevu modřínu opadavého. Dřevo modřínu sibiřského obsahuje větší procento extraktivních a doprovodných látek ve dřevě, např. fytoncidů, které se při máčení dřeva uvolňují, a tím pádem se ve dřevě uvolňuje místo pro příjem vody. Dalším faktorem může být také, odlišnost tlouštěk buněčné stěny tracheid a velikost lumenů. Jak je patrné z Obr. 15, záleží také na hustotě dřeva. U dřeva modřínu sibiřského roste s hustotou také procento objemového bobtnání, tato závislost je podložena jen poměrně nízkým koeficientem determinace 0,3508. U dřeva modřínu opadavého nebyla tato závislost prokázána, koeficient determinace je příliš nízký, pouze 0,1627. Podle Horáčka (2008) se právě vyšší hustota promítá do výraznějších rozměrových a objemových změn. Výraznější neprokázání této závislosti může být způsobeno poměrně malým počtem zkušebních vzorků. Že s rostoucí hustotou roste také objemové bobtnání, je možné také odvodit z Obr. 16, kde je u modřínu sibiřského zřejmé, že s rostoucím procentem letního dřeva roste také objemové bobtnání. Dřevo letní v letokruhu vykazuje větší hustotu než dřevo jarní, proto s rostoucím podílem letního dřeva se zvyšuje hustota celého vzorku. Tato závislost je prokazatelná s determinačním koeficientem 0,4293 jen u dřeva modřínu sibiřského. U dřeva modřínu opadavého je koeficient determinace pouze 0,0056, tudíž žádná závislost není prokázána.

6.4 Stanovení maximální vlhkosti a meze hygroskopicity

Při zkoušce na zjištění maximální vlhkosti byly vzorky máčeny ve vodní lázni po dobu 16 týdnů, po stejnou dobu byla další sada vzorků uložena v laboratorním exikátoru pro zjištění meze hygroskopicity. Vzorky, které bobtnaly ve vodní lázni, překročily mez hygroskopicity a přijímaly vodu volnou, která se dostávala do lumenů buněk. Pokud ve dřevě všechny lumeny buněk obsahují vodu volnou, dřevo dosáhlo maximální vlhkosti. V případě vzorků v exikátoru bobtnání probíhalo pouze při vzdušné vlhkosti. Vlhkost je absorbována jen buněčnými stěnami a lumeny buněk jsou prázdné. Tento stav, kdy dřevo obsahuje vodu vázanou a žádnou vodu volnou nazýváme mez hygroskopicity. Bylo zjištěno, že dřevo modřínu opadavého přijme více vody volné a tím dosahuje vyšší průměrné hodnoty maximální vlhkosti. Statisticky vyhodnocená data jsou uvedena v Tab. 9. Modřín opadavý průměrně dosahoval maximální vlhkosti 137,49 %, zatímco dřevo modřínu sibiřského vlhkosti o 11,59 % nižší, a to 125,9 %. Maximální naměřená vlhkost byla u dřeva modřínu sibiřského, a to 181,41 %. Dřevo modřínu sibiřského vykazovalo větší škálu zjištěných hodnot oproti modřínu opadavému. Modřín sibiřský má rozptyl hodnot 400,19 a variační koeficient 16,13, zatímco variabilita hodnot modřínu opadavého je jen 10,78 % a rozptyl 211,97. Vyšší variabilita hodnot modřínu sibiřského je patrná také z Obr. 17. Maximální vlhkost modřínu sibiřského odpovídá hodnotě, kterou uvádí Ugolev (1975) pro dřevo modřínu, a to 123 %. Rozdíl maximálních vlhkostí mezi modřínem opadavým a modřínem sibiřským je dán především doprovodnými látkami ve dřevě, především obsahem extraktiv. Dřevo modřínu sibiřského obsahuje větší procento extraktivních látek, které brání průniku vody volné do lumenů buněk. Maximální vlhkost dřeva je ovlivněna také hustotou dřeva, což je patrné z Obr. 19, kde je znázorněna závislost klesající maximální vlhkosti dřeva s přibývajícím hustotou. Tato závislost je podložena vysokými determinačními koeficienty u dřeva modřínu sibiřského 0,8888 a u dřeva modřínu opadavého 0,9616. Tato závislost je způsobena tím, že dřevo s nižší hustotou je pórovitější a obsahuje více vzduchových mezer, které se mohou zaplnit vodou volnou. Naopak žádná závislost nebyla zjištěna mezi hustotou a mezí hygroskopicity. Bylo prokázáno, že hodnoty meze hygroskopicity jsou mezi dřevem modřínu sibiřského a modřínem opadavého statisticky rozdílné, což je zřejmé z Tab. 11. Mez hygroskopicity se liší podle jednotlivých druhů a kusů dřeva, průměrně však odpovídá obsahu vlhkosti 30 % ve dřevě (Wood Handbook, 2010). Matovič (1993) uvádí hodnotu konkrétnější, a to že mez hygroskopicity pro dřevo modřínu je při obsahu vlhkosti 22–24 %, čemuž odpovídá

hodnota modřínu opadavého, která byla stanovena na vlhkosti 24,80 %. Hodnota meze hygroscopicity dřeva modřínu sibiřského byla stanovena na vlhkosti 27,39 %. Rozdíl vlhkosti 2,59 % je způsoben především odlišným chemickým složením obou dřev a obsahem extraktivních látek ve dřevě modřínu sibiřského.

6.5 Stanovení meze pevnosti ve směru rovnoběžně s vlákny

Statické zatěžování bylo prováděno na zkušebním zatěžovacím stroji Zwick Z050, ze kterého byly získány meze pevnosti a modulu pružnosti. Modul pružnosti byl přístrojem přepočítáván podle posunu extenzometru. Vyhodnocená data jsou uvedena v Tab. 12, všechna data jsou uvedena při vlhkosti dřeva 12 %. Při zkoušce vznikaly na vzorcích tzv. skluzné čáry, které, jak uvádí Gandelová et al. (2008) svírají s osou tracheid úhel 70°. Gandelová et al. (2008) dále uvádí, že mez pevnosti ve směru vláken je u dřeva cca 50 MPa a variační koeficient se pohybuje v rozmezí 8–16 %. Při námi prováděné zkoušce dosahovalo průměrně vyšší pevnosti dřevo modřínu opadavého, a to 59 MPa. Dřevo modřínu sibiřského dosahovalo průměrnou hodnotu 56,33 MPa, rozdíl je tedy 2,67 MPa. Dřevo modřínu sibiřského vykazovalo vyšší rozptyl 88,53 a variabilitu hodnot 16,71, zatímco dřevo modřínu opadavého rozptyl 14,66 a variační koeficient jen 6,49 %, což je patrné také na Obr. 21. Z Obr. 21 je také patrné rovnoměrné rozložení hodnot v okolí mediánu. Bozkurt, Erdin, (1997) uvádí, že dřevo modřínu sibiřského vykazuje širší škálu hodnot, protože na pevnost dřeva mají vliv růstové podmínky a ekologické faktory, zejména nadmořská výška, vystavení větru, půdní a klimatické faktory, které ovlivňují šířku letokruhu ve dřevě a hustotu. Námi zjištěná mez pevnosti přibližně odpovídá hodnotě 53,31 MPa, kterou uvádí Bergstedt, Lyck (2003) pro dřevo modřínu sibiřského. Zjištěná mez pevnosti u dřeva modřínu opadavého 59 MPa je vyšší, než udává literatura. Bergstedt, Lyck (2003) stanovili mez pevnosti *Larix decidua* Mill. na hodnotě 50,9 MPa a Bozkurt, Göker (1996) na hodnotě 55 MPa. Mezi dřevem modřínu sibiřského a modřínu opadavého byla prokázána statistická shoda středních hodnot při pravděpodobnostním koeficientu $\alpha=0,05$. Rozptyly hodnot zkoumaných vzorků jsou statisticky rozdílné. Statistická shoda rozptylů i středních hodnot byla zaznamenána u modulu pružnosti mezi dřevem modřínu sibiřského a modřínu opadavého. Průměrná hodnota modulu pružnosti pro dřevo modřínu opadavého je 19 119 MPa a pro dřevo modřínu sibiřského o 892 MPa nižší, tedy 18 227 MPa. Hodnota modulu pružnosti uvedená v literatuře je 12 900 MPa pro dřevo modřínu (Wood Handbook, 2010). Tento velký rozdíl hodnot může být způsoben odlišnou

metodou měření modulu pružnosti. Dříve se modul pružnosti počítal z posuvu příčnicku, zatímco my jsme modul pružnosti zjišťovali z extenzometru. Mezi modulem pružnosti dřeva modřínu sibiřského a dřevem modřínu opadavého byla zjištěna statistická shoda rozptylu a středních hodnot, jak je patrné z Tab. 14. Dále byla prokázána závislost mezi podílem letního dřeva a mezi pevností. Jak je patrné, z Obr. 24, závislost byla prokázána jen u dřeva modřínu sibiřského, koeficient determinace je 0,6368. U dřeva modřínu opadavého nebyla tato závislost prokázána, koeficient determinace je příliš nízký, pouze 0,0101. Vyšší koeficient determinace u dřeva modřínu sibiřského je také v závislosti meze pevnosti na hustotě. Rostoucí trend u dřeva modřínu sibiřského je podložen koeficientem determinace 0,5824.

7 Závěr

Bakalářská práce byla zaměřena na porovnání stavby a vybraných fyzikálních a mechanických vlastností dřeva modřínu opadavého (*Larix decidua* Mill.) a modřínu sibiřského (*Larix sibirica* Ledeb.).

Pomocí letokruhové analýzy bylo zjištěno, že průměrná šířka letokruhu modřínu opadavého je 2,04 mm, z čehož průměrně 31,52 % je dřevo letní, zatímco šířka letokruhu modřínu sibiřského je 1,28 mm, z čehož je 25,88 % dřevo letní. Dřevo modřínu sibiřského vykazuje větší škálu hodnot. Hustota modřínu sibiřského byla stanovena na hodnotě $611 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a hustota modřínu opadavého na hodnotě $592 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Zjištěné hodnoty jsou v souladu s literaturou. Dřevo modřínu opadavého bobtná ve všech směrech více než dřevo modřínu sibiřského. Rozdíl v objemovém bobtnání je 1,99 %. Dřevo modřínu sibiřského dosahuje maximální vlhkosti při vlhkosti 125,9 %, zatímco dřevo modřínu opadavého při vlhkosti 137,49 %. Vlhkost na mezi hygroskopicity byla zjištěna u dřeva modřínu sibiřského 27,1 % a u modřínu opadavého 24,7 %. Závislost maximální vlhkosti na hustotě dřeva je podložena s vysokým koeficientem determinace pro dřevo modřínu sibiřského 0,8888 a pro dřevo modřínu opadavého 0,9616. Při statickém zatěžování bylo zjištěno, že mez pevnosti ve směru vláken u modřínu opadavého je 59 MPa a u dřeva modřínu sibiřského 56,33 MPa.

8 Summary

The purpose of this work was to compare the structure and selected physical and mechanical properties of the wood of European Larch (*Larix decidua* Mill.) and Siberian larch (*Larix sibirica* Ledeb.).

Test specimens of size 2×2×3 cm were made out of both the species of wood. Tree-ring analysis consisted in the measuring of tree-ring width and the width of latewood of the test specimens, using a stereomagnifier. The obtained data were used to calculate the percentage of latewood within a tree ring. It was found that the average tree-ring width of Siberian larch and European larch is 1.28 mm and 2.04 mm, respectively. The percentage of latewood is 25.88 % and 31.52 % in Siberian and European larch, respectively. No statistic agreement was found between the tree-ring width and the proportion of latewood of European and Siberian larch. Before the density establishment, the test specimens were placed in a conditioned room to achieve a moisture content of 12 %. Density of the Siberian larch is higher – 611 kg·m⁻³ - and the density of the European larch is 19 kg·m⁻³ lower, i.e., it is 592 kg·m⁻³. In the Siberian larch, we proved dependence of density on the latewood proportion - wood density increases with an increasing latewood proportion. Unfortunately, the same dependence could not be established for the European larch wood. Before the examination of swelling in the various directions, the specimens were laid in a water bath for 21 days. After this time, the fiber saturation point was definitely reached, and the wood shape stability does not change with further water intake. The wood of the European larch swelled in all directions more than the wood of the Siberian larch. In the three directions, the swelling ratio was 20:10:1. The wood swells the most in the tangential direction and the least in the longitudinal direction. In addition, the maximum moisture content of wood and the fibre saturation point were determined. When the maximum moisture content is reached, bound water - located in cell walls - as well as free water - filling the cell lumens - are contained in wood. The maximum moisture content of the wood of the European larch was 137.49 %, while it was only 125.9 % for the Siberian larch. The lower value of the maximum moisture content of the Siberian larch is caused by a higher amount of extractives in its wood. The chemical composition of wood affects the fibre saturation point. The fibre saturation point occurs when the wood contains bound water, but does not contain free water. This condition occurs at a moisture content of 27.1 % and 24.7 %, in Siberian and European larch wood,

respectively. The strength test was carried out using Zwick Z050 testing machine. Higher compression strength parallel to the grain was found in the European larch and it was 59 MPa.

9 Seznam použité literatury

ABAIMOV A. P., LESINSKI J.A., MARTINSSON O., MILYUTIN L., 1998. Variability and ecology of Siberian larch species, Swedish Univ. of Agr. Sci. Report No.43: 1-123.

BAJAJ Y.P.S., 1991. Biotechnology in Agriculture and Forestry, Vol. 16, Trees III, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 608s, ISBN: 978-3-662-13231-9.

BERGSTEDT A., LYCK C, 2003. Larch wood - a literature review. Forest & Landscape Working Papers no. 23, Forest & Landscape Denmark.

BORNEBUSCH C.H., 1948. Polsk lærk i Danmark, Dansk Skovforenings Tidsskrift, 323-328.

BORSET O., 1957. Lerk – et hurtigvoksende treslag, Skogeieren 44, 8-10.

BOSSHARD H. H., 1982. Holzkunde. Band 1. Mikroskopie und Makroskopie des Holzes, Birkhäuser, Stuttgart, 83 s., ISBN 3-7643-1328-5.

BOUTELJE J., RYDELL R., 1986. Träfakta – 44 trädslag i ord och bild, Träteknik Centrum, Stockholm, 47 s., ISBN: 91-970513-3-0.

BOZKURT A. Y., ERDIN N., 1997. Wood Technology, Istanbul University Publication No: 3998, Faculty of Forestry Publication No: 445, ISBN: 975-404-449-X.

BOZKURT A. Y., GÖKER Y., 1996. The Physical And Mechanical Wood Technology, Istanbul University Publication No: 3944, Faculty of Forestry Publication No: 436, 374 s., ISBN: 975-404-420-1.

COLLINDER S., BORGSTRAND C. A., 1929. Om lærkvirkets tekniska egenskaper. Sveriges Skogsvårdsförbunds Tidsskrift, Årsbok, 374-394.

- CORSON S. R., 1991. Wood characteristics influence pine TMP quality, *Tappi* 74, 135–146.
- COWN D. J., 1992. Corewood (juvenile wood) in *Pinus radiata* – should we be concerned? *New Zealand Journal of Science* 22, 87–95.
- FARJON A., 1990. Drawings and descriptions of the genera *Abies*, *Cedrus*, *Pseudolarix*, *Keteleeria*, *Nothotsuga*, *Tsuga*, *Cathaya*, *Pseudotsuga*, *Larix* and *Picea*, Koeltz Scientific Books, Königstein, 330 s.
- GANDELOVÁ L., ŠLEZINGEROVÁ J., HORÁČEK P., 2009. *Nauka o dřevě*, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, Brno, 176 s. ISBN 978-80-7375-312-2.
- GEYER S., 1979. Anfall und Verwertung des Holzes der Europäischen Lärche in Baden-Württemberg, *Allgemeine Forstzeitschrift* 34, 122-126.
- GROSSER D., TEETZ W., 1985. *Einheimische Nutzhölzer – Lärche* (Loseblattsammlung), Centrale Marketinggesellschaft der deutschen Agrarwirtschaft, Bonn und Arbeitsgemeinschaft Holz e. V., Düsseldorf, ISSN-Nr. 0446-2114.
- GRYC V., VAVRČIK H., HORN K., 2011. Density of juvenile and mature wood of selected coniferous species, *Journal of forest science* 57, 123 – 130.
- GRYC V., VAVRČIK H., HORÁČEK P., 2007. Variability in swelling of spruce (*Picea abies*) wood with the presence of compression wood, *Journal of forest science* 53, 243–252.
- HARDING T., 1988. *British Softwoods – Properties and Uses*, Forestry Commission Bulletin 77., Forest Research Station, Surrey, 41 s., ISBN: 0117102628.
- HARRIS J. M., 1981. Wood quality of radiata pine, *Appita* 35, 211–215.
- HARVALD C., 1988. Nåletræarternes tekniske egenskaber, En vedteknologisk undersøgelse af konstruktionstræ fra Statens Forstlige Forsøgsvæsens træartsforsøg på Krenkerup skovdistrikt. Skovbrugsinstituttet, Den Kgl. Veterinær- og Landbohøjskole, København, 83 s.

- HEIKE K., 2008. Encyklopedie jehličnatých stromů a keřů, Brno CPress, 248 s., ISBN: 978-80-251-1901-3.
- HORÁČEK P., 2008. Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I., 2. přeprac. vyd., Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Brno, 124 s. ISBN 978-80-7375-169-2.
- KARLMAN L., 1998. Stem quality of larch, Examensarbete i ämnet skogsskötsel, Institutionen för skogsskötsel, Sveriges lantbruksuniversitet, Umea.
- KOIZUMI A., TAKATA K., YAMASHITA K., NAKADA R., 2003. Anatomical Characteristics and Mechanical Properties of *Larix sibirica* Grown in South-Central Siberia, IAWA Journal, 24 , 355–370.
- LARSON P. R., KRETSCHMANN D. E., CLARK A., ISENBRANDS J. G., 2001. Formation and properties of juvenile wood in southern pines, Gen. Tech. Rep. FPL–GTR 129. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 42 s.
- LOO J. A., TAUER C. G., MCNEW R. W., 1985. Genetic variation in the time of transition from juvenile to mature wood (*Pinus taeda*), *Silvae Genetica*, 14–19.
- TIMKO L., 2013. Srovnání stavby a vybraných vlastností juvenilního a vyzrálého dřeva douglasky tisolisté, Ústav nauky o dřevě, Mendlova univerzita, Brno, 58 s.
- LUTDAL T., 1997. Kjerneved av furu og lerk – Egenskaper og muligheter, Inst. For skogfag, Hovedoppgave, 88 s.
- MATOVIČ A., 1993. Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva, učební text LDF VŠZ Brno, Brno, 212 s.
- MUTZ R., GUILLEY E., SAUTER U. H., 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.

MINISTERSTVO ZEMĚDĚLSTVÍ ČR, 2004. Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky, MZE, Praha, 107 s.

POŽGAJ A., CHOVANEC D., KURJATKO S., BABIAK M., 1997. Štruktúra a vlastnosti dreva, Bratislava, Príroda a. s., 475 s., ISBN: 80-07-00960-4

RENDLE B. J., 1959. Juvenile and adult wood, Journal of the Institute of Wood Science 5, 58–61.

REULING D., CHATELU R., GODARD J., LANVIN J. D., MARLIN R., 2002. Building with larch (*Larix decidua*), INRA 2002.

SJÖSTRÖM H., 1938. Från en studieresa til Sovjetunionen. I. Mot öster över Systerbäck. Skogen 11, 211-214.

STERN M. L., 2003. Larch in Commercial Forestry: A Literature Review to Help Clarify the Potential of Hybrid Larch (*Larix x eurolepis* Henry) in Southern Sweden, Swedish University of Agricultural Sciences, Alnarp, 107 s.

ŠLEZINGEROVA J., GANDELOVA L., 2008. Stavba dřeva, cvičení, Mendlova zemědělská a lesnická univerzita, Brno, 132 s.

UGOLEV B. N., 1982. Drevesinovedenie s osnovami lesnogo tovarovedeniya. Lesnaya proyshlennost, Moscow, 368 s.

VADLA K., 2002. Virkeskvalitet hos bartrevirke i Nord – Norge – anatomiske fysiske og geometriske egenskaper, Ramanus, stensiltrykk, 55 s.

WOOD HANDBOOK, 2010. Wood as an engineering material. General Technical Report, FPL–GTR–190., Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison 509 s.

Normy: ČSN 49 0110 Drevo. Medza pevnosti v tlaku v smere vláknien, 1980.

Internetové zdroje:

<http://www.trustimex.lv/en/about-larch>

http://www.agroatlas.ru/en/content/related/Larix_sibirica/map

<http://www.euforgen.org/fileadmin/templates/euforgen.org>