

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ

KATEDRA ZÁKLADNÍHO ZPRACOVÁNÍ DŘEVA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE - VĚDECKÁ PRÁCE

**Posouzení rázové houževnatosti a
pevnosti v ohybu dřeva modřínu
z antropogenně ovlivněných stanovišť**

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

Autor práce: Matěj Koudelka

Rok vydání 2015

Poděkování

Za pomoc při tvorbě této bakalářské práce bych rád vyjádřil dík vedoucímu práce doc. Ing. Aleši Zeidlerovi Ph.D. za jeho trpělivost a odborné vedení a Ing. Tomáši Pavelkovi za spolupráci při přípravě zkušebních těles a odbornou pomoc při obsluze zkušebních strojů a zařízení. Díky také patří mé rodině za podporu a oporu při studiu.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma posouzení rázové houževnatosti a pevnosti v ohybu dřeva modřínu z antropogenně ovlivněných stanovišť vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing Aleše Zeidlera Ph.D. a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědom, že zveřejněním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Praze dne 20.4.2015

Podpis autora

Abstrakt

Tato práce pojednává o mechanických vlastnostech dřeva modřínu z antropogenně ovlivněných stanovišť výsypek po hnědouhelných dolech na Sokolovsku, které budou pravděpodobně v budoucnu jedním ze zdrojů dřevní hmoty. V současné době existuje znalost vlastností dřeva z těchto zdrojů pouze ve velmi omezené míře. Zjišťované vlastnosti dřeva modřínu byly hustota, pevnost ve statickém ohybu, rázová houževnatost a modul pružnosti v ohybu. Mechanické vlastnosti byly zjištěny srovnatelné s hodnotami uváděnými pro dřevo modřínu z běžných stanovišť, ale s mírně vyšší variabilitou. Tento výzkum má potenciál pro využití při doplnění informací o surovině z výsypek, o jejichž vlastnostech neexistuje dostatečné množství informací.

Klíčová slova: dřevo, vlastnosti, rázová houževnatost, pevnost v ohybu, variabilita, výsypky

Abstract

This thesis was made on mechanical properties of larch wood from anthropogenic sites, specifically from Sokolov closed coal mines. These sites will probably be a source of wood material in the future. Recently the knowledge on properties of wood from these sources is mostly limited. The properties described in this thesis are density, bending strength, impact strength and modulus of elasticity. Mechanical properties described were similar that can be found for larch wood from common sites, but the variability was slightly higher. This research could possibly be used to complete the spectre of information on revitalised sites located wood, which is poor in recent days.

Keywords: wood, properties, impact strength, flexural strength, variability, mine sites

Obsah

Poděkování	2
Prohlášení	3
Abstrakt	4
Abstract	4
Seznam tabulek.....	7
Seznam grafů.....	7
Seznam obrázků	8
Zkratky a symboly	8
Úvod.....	9
Cíle práce.....	10
Rešerše problematiky mechanických vlastností dřeva modřínu a vlivu stanoviště.....	11
Charakteristika dřeviny	11
Popis dřeviny	11
Výskyt	11
Využití	12
Stavba dřeva	12
Vlastnosti dřeva modřínu	13
Zkoumané vlastnosti dřeva.....	14
Pevnost v ohybu	14
Modul pružnosti	14
Rázová houževnatost dřeva	14
Vliv stanoviště na vlastnosti dřeva modřínu	15
Metodika.....	16
Dřevo – zkušební materiál.....	16
Zjištění hustoty	17
Zkouška na zjištění dynamického modulu pružnosti	17
Zkouška na zjištění pevnosti ve statickém ohybu a modulu pružnosti ve statickém ohybu.....	18
Zkouška na zjištění rázové houževnatosti v ohybu	19
Zjišťování vlhkosti při fyzikálních a mechanických zkouškách	20
Měření šířky letokruhu, podílu letního a jarního dřeva a zastoupení jádra a běli	20
Zpracování naměřených dat	21
Výsledky a diskuse.....	22
Fyzikální vlastnosti.....	22
Mechanické vlastnosti	23

Vliv šířky letokruhů, podíl letního a jarního dřeva, podíl běli a jádra.....	31
Závěr.....	36
Zdroje	37
1. Tiskové zdroje	37
2. Normy.....	37
3. Internetové zdroje.....	38

Seznam tabulek

- *Tabulka 1: Variační koeficienty mechanických vlastností dřeva*
- *Tabulka 2: Hustota dřeva modřínu*
- *Tabulka 3: Rázová houževnatost dřeva modřínu*
- *Tabulka 4: Mez pevnosti v ohybu dřeva modřínu*
- *Tabulka 5: Statický modul pružnosti v ohybu dřeva modřínu*
- *Tabulka 6: Dynamický modul pružnosti v ohybu dřeva modřínu*
- *Tabulka 7: Průměrné šířky jarního a letního dřeva a podíly bělí a jádra v jednotlivých sekcích*
- *Tabulka 8: Procentuální podíly jarního a letního dřeva, průměrná hustota a průměrná rázová houževnatost v jednotlivých sekcích*
- *Tabulka 9: Procentuální podíl jarního a letního dřeva, průměry dynamického modulu pružnosti v ohybu a průměry statického modulu v ohybu v jednotlivých sekcích*
- *Tabulka 10: Procentuální podíl jarního a letního dřeva, průměry pevnosti v ohybu v jednotlivých sekcích*

Seznam grafů

- *Graf 1: Hustota dřeva v závislosti na poloze od dřeně*
- *Graf 2: Hustota dřeva v jednotlivých stromech*
- *Graf 3: Rázová houževnatost dřeva v závislosti na hustotě*
- *Graf 4: Rázová houževnatost v závislosti na poloze od dřeně*
- *Graf 5: Mez pevnosti v ohybu v závislosti na poloze od dřeně*
- *Graf 6: Mez pevnosti v ohybu v závislosti na hustotě*
- *Graf 7: Statický modul pružnosti v ohybu v závislosti na poloze od dřeně*
- *Graf 8: Statický modul pružnosti v ohybu v závislosti na hustotě*
- *Graf 9: Dynamický modul pružnosti v ohybu v závislosti na poloze od dřeně*
- *Graf 10: Mez pevnosti v ohybu v závislosti na dynamickém modulu pružnosti v ohybu*
- *Graf 11: Statický modul pružnosti v ohybu v závislosti na dynamickém modulu pružnosti v ohybu*
- *Graf 12: Mez pevnosti v ohybu v závislosti na statickém modulu pružnosti v ohybu*
- *Graf 13: Průběh šířky letokruhu směrem od dřeně ke kůře pro jednotlivé kmeny*
- *Graf 14: Podíl letního dřeva v letokruhu v průběhu od dřeně ke kůře*

Seznam obrázků

- *Obrázek 1: Modřín opadavý – habitus*
- *Obrázek 2: příčný, tangenciální a radiální řez dřevem modřínu*
- *Obrázek 3: Schéma rozmístění a označení zkušebních těles*

Zkratky a symboly

V této práci jsou použity běžně používané zkratky a symboly, adekvátní označení veličin a jednotek v příslušných normách. Symboly veličin a koeficientů, zvláště jedná-li se o vzorce specificky dřevařského rázu, jsou vždy v příslušné kapitole bezprostředně popsány.

Úvod

Po ukončení povrchové těžby hnědého uhlí na Sokolovsku vznikají rekultivované oblasti, tzv. výsypky. Tyto oblasti jsou charakterizovány specifickým půdním typem – nachází se zde převážně antropogenní sedimenty a závážky, a vzhledem k tomu, že těchto oblastí přibývá společně se stále se zvětšujícím počtem míst, kde byla povrchová těžba ukončena, nabývá tato problematika na aktuálnosti. Tyto substráty jsou pro výstavbu pozemních staveb většinou nevhodné a nestabilní, a proto se nabízí možnost rekultivace zalesněním.

Takto vzniklé lesní porosty mají různé druhové složení a výchovné způsoby, které jsou často popisovány v oboru lesnictví a rekultivační dendrologie. Po dosažení mýtního věku budou tyto porosty těženy a je nutné znát vlastnosti takto vzniklé suroviny.

Mechanické vlastnosti dřeva předurčují možnosti využití produktů z tohoto dřeva vzniklých. Jsou základními faktory, určujícími vhodnost dřeva pro konstrukční použití – při vzniku staveb, při výrobě konstrukčních součástí nábytku, nebo při stavebním truhlářství.

Tato práce zkoumá pevnost dřeva v ohybu a rázovou houževnatost. Ke zjišťování těchto vlastností bylo přidruženo zjištění statického i dynamického modulu pružnosti. Velmi důležitou stránkou je i závislost těchto vlastností na hustotě a na šířce letokruhu a podílu letního dřeva v letokruhu. Nedílnou součástí takového výzkumu je i srovnání výsledků s hodnotami zjištěnými pro stejnou dřevinu na obvyklých stanovištích a s vlastnostmi jiných komerčně významných domácích jehličnatých dřevin.

Vlastnosti dřeva z těchto stanovišť jsou málo známé a doposud proběhlo pouze malé množství výzkumů v této oblasti. Vzhledem k množství zalesněných výsypek je ale znalost takového materiálu důležitá z důvodu efektivního určení zpracování a použití dřevní suroviny z výsypek.

Cíle práce

- 1) Zhodnotit rázovou houževnatost a pevnost v ohybu dřeva modřínu z oblasti severočeských výsypek.
- 2) Srovnat zjištěné hodnoty s údaji dosahovanými v jiných oblastech.
- 3) Získané hodnoty porovnat s jinými jehličnatými dřevinami.
- 4) Posoudit vliv šířky letokruhů a polohy v kmeni na posuzované vlastnosti.
- 5) Při zjišťování pevnosti v ohybu zároveň zjistit statický modul pružnosti v ohybu a před destruktivními zkouškami zjistit nedestruktivní metodou dynamický modul pružnosti.

Rešerše problematiky mechanických vlastností dřeva modřínu a vlivu stanoviště

Charakteristika dřeviny

Taxonomické zařazení

Modřín opadavý (*Larix decidua* Mill.)

- říše *Plantae* (rostliny)
- oddělení *Pinophyta* (jehličnany)
- třída *Pinopsida* (jehličnany)
- řád *Pinales* (borovicotvaré)
- čeleď *Pinaceae* (borovicovité)

(www.biolib.cz)

Popis dřeviny

Dřevina dorůstá výšky až přes 50 metrů. Kmen přímý, ve výčetní výšce dorůstající 1 – 1,5m s průměru, koruna je štíhlá, kuželovitá, řídká. Ve vyšším věku často vytváří silné větve a tím pádem dochází k tvorbě širokých korun. U mladých stromů je hlavní kůlový kořen, který se později větví a vytváří se tak bohatý srdčitý kořenový systém, který strom pevně kotví v půdě a umožňuje mu čerpat vodu a živiny z nižších vrstev. Používáme jej jako zpevňující dřevinu. Dožívá se maximálně 500 let (Bažant, Slávik 2012).

Výskyt

Podle zastaralého názvu Modřín evropský (*Larix europaea*), který je považován za vědecké synonymum (www.biolib.cz), je uváděné rozšíření v Alpách, Karpatech, Sudetech a jinde ve střední Evropě, kde se jedná o rozsáhlá umělá rozšíření (Lexa 1952).



Obrázek 1: *Modřín opadavý – habitus* (foto Jakub Horák, www.biolib.cz)

Využití

Vlastnosti dřeva modřínu, ať už estetické, mechanické, chemické či vlastnosti ve vztahu k vodě jej předurčují pro některá použití. Dřevařská technická příručka uvádí použití modřínu na dýhy a překližky, piloty a stožáry, jeho odolnost ve vztahu k vodě dále na vodní stavby a zemní stavby, dále je díky odolnosti povětrnostním vlivům vhodný na venkovní okna a dveře, části lodí a kolářství, zvláštní použití pak je výroba nádrží a potrubí v pro chemický průmysl, dlažební špalíky nebo železniční pražce (Johánek, Spurná 1970).

Stavba dřeva

Modřín vytváří dřevo s jasně viditelnými letokruhy s náhlým přechodem jarního a letního dřeva. Jedná se o dřevinu jádrovou. Jádru má barvu žlutohnědou až červenohnědou, běl potom žlutobílou. Běl této dřeviny je úzká. V letním dřevě jsou obtížně viditelné pryskyřičné kanálky. Dřevo se řadí mezi dřeva středně tvrdá a středně těžká (Lexa 1952, Zeidler 2012).

Podle Gandelové (2002) je dřevo modřínu hustoty střední (tedy v rozmezí 540 kg/m^3 - 750 kg/m^3) podobně jako bříza, buk nebo jasan.



Obrázek 2: příčný, tangenciální a radiální řez dřevem modřínu

Vlastnosti dřeva modřínu

Jakožto základní charakteristiku dřeva, která často určuje vlastnosti dřeva, uvádíme hustotu. Podle Lexy (1952) má modřínové dřevo hustotu $0,46 \text{ g/cm}^3$. Podle Wagenführa (2006) je hustota dřeva modřínu v rozmezí od 550 kg/m^3 do 590 kg/m^3 . Hodnotu 590 kg/m^3 uvádí také Gandelová (2002).

Z mechanických vlastností zjišťovaných v této práci je popsána pevnost v ohybu modřínu $\sigma = 68,5 \text{ MPa}$ při vlhkosti 10 – 12%. Variační koeficient je uváděn 18% při rozsahu souboru 197 vzorků. (Požgaj 1997). Naproti tomu lze se setkat i s hodnotami ohybové pevnosti mnohem většími, pro modřín vlhkosti 12% až 112 MPa (Gandelová 2002).

Stejný autor uvádí i modul pružnosti v ohybu určený staticky: $E = 8273 \text{ MPa}$, variační koeficient je 28,3% při souboru 157 vzorků (Požgaj 1997).

Dále Požgaj (1997) uvádí rázovou houževnatost $4,8 \text{ J/cm}^2$ s variačním koeficientem 58,7% na souboru 86 vzorků. Johánek – Spurná (1970) uvádí přerážecí práci $6,0 \text{ J/cm}^2$. Další hodnotu pro modřín vlhkosti 12% uvádí i Gandelová (2002), a to $5,2 \text{ J/cm}^2$.

V této práci je také popsán podíl letního dřeva, šířka letokruhů a podíl jádra a běli a je zjišťován vliv těchto faktorů na vlastnosti dřeva. Předpokládá se, že se zvětšujícím se podílem letního dřeva se zlepšují mechanické vlastnosti dřeva. Je to z části dáno samotným rozdílem hustoty letního a jarního dřeva, zároveň se částečně určující vliv připisuje struktuře materiálu, kdy jarní dřevo vytváří především vodivé elementy se slabší podpůrnou funkcí a tlustostěnné letní buňky naopak zajišťují pevnostní funkci ve stavbě letokruhů (Požgaj 1997).

Šířka letokruhů také ovlivňuje mechanické vlastnosti dřeva. Pro jehličnaté dřeviny existuje minimální a maximální počet přírůstků na 1cm, kdy jsou mechanické vlastnosti optimální, mimo tento interval se pak mechanické vlastnosti snižují (Požgaj 1997).

Variabilita pevnosti dřeva

Každá pevnostní charakteristika určená u dřeva je variabilní. Míru variability popisuje statisticky vypočtený variační koeficient v procentech. Variační koeficienty u vlastností dřeva zjišťovaných v této práci uvádí Požgaj (1997):

Tabulka 1: Variační koeficienty mechanických vlastností dřeva

Pevnost v ohybu (statická)	16 - 18%
Modul pružnosti v ohybu	22%
Hustota	5 – 20%

Zkoumané vlastnosti dřeva

Pevnost v ohybu

Namáháním dřevěného nosníku ohybem zapříčiňuje jeho deformaci, při níž vznikají na vnější straně nosníku napětí tahová a na vnitřní straně nosníku napětí tlaková. Při pomyslném řezu nosníkem napříč k jeho podélné ose pozorujeme mezi těmito dvěma oblastmi partii bez jakéhokoli napětí, tzv. neutrální osu. Napětí vzrůstá směrem od této osy ke kraji nosníku, tak, že maximální hodnotu lze popsat v krajních vláknech. Pro velmi malá zatížení platí, že průběh nárůstu napětí směrem k okraji je přímkový, což ale neplatí pro zatížení vyšší. V takovém případě napětí v tlaku, tedy na vnitřní straně nosníku, je nižší za očekávání a napětí v tahu, tedy na vnější straně nosníku je vyšší. Neutrální pásmo se pomyslně posouvá na stranu taženou. Záleží i na orientaci nosníku, respektive jestli jde o ohyb radiální nebo tangenciální. To ovšem platí pouze u jehličnanů (Požgaj 1997).

Modul pružnosti

Modul pružnosti vyjadřuje odpor materiálu proti pružné deformaci. Čím je modul pružnosti větší, tím větší napětí je třeba vyvinout, aby k deformaci došlo. Moduly pružnosti představují důležité konstanty při statických výpočtech dřevěných konstrukcí (Požgaj 1997). V této práci jsme zkoumali modul pružnosti E při normálových namáháních.

Při pozorování diagramu napětí-deformace je zřejmé, že do meze úměrnosti jsou vztahy lineární. Modul pružnosti lze pak všeobecně fyzikálně popsat jako podíl mezi napětím a poměrnou deformací. Jednotky Pa jsou pro jednoduchost nahrazeny MPa v praktickém použití. Modul pružnosti našich významných hospodářských dřevin se pohybuje v rozmezí 7000 – 15000 MPa (Požgaj 1997).

Rázová houževnatost dřeva

Je popsána jako schopnost dřeva absorbovat práci rázovým ohybem. Cílem takového namáhání je zjistit, jak velkou práci spotřebujeme na přeražení vzorku dřeva. Obvyklé je,

vyjadřovat tuto práci vztahenou k ploše řezu vzorkem. Čím větší je práce, kterou je dřevo schopno absorbovat na jednotku plochy průřezu, tím je hodnoceno jako houževnatější. Dalším hodnoceným parametrem u této vlastnosti je charakter lomu. Dřevo s lomem vláknitým bývá obvykle houževnatější, dřevo s lomem tupým či schodovitým potom křehčí (Požgaj 1997).

Požgaj (1997) kromě závislosti na hustotě také uvádí výrazný vliv orientace těles. U *Larix decidua* uvádí v radiálním směru o 50% větší množství spotřebované práce než ve směru tangenciálním.

Vliv stanoviště na vlastnosti dřeva modřínu

Navzdory tomu, že lze v literatuře a odborném žurnálu snadno a relativně často dohledat výsledky mnohých výzkumů mechanických vlastností dřeva modřínu, vliv stanoviště je postižen často pouze velmi povrchně. Gandelová (2002) uvádí variabilitu v rámci dřeviny ovlivněnou stanovištěm, věkem, sociálním postavením a genotypem jedinců. Uvádí vliv stanoviště jakožto jasně prokázaný (ve vztahu k hustotě dřeva) u ekologických faktorů jako je stupňovitost porostu a trofnost půdního typu. Zmiňuje rozsáhlý výzkum vlivu stanoviště na hustotu dřeva smrku.

Kupka a Dimitrovský (2011) zmiňují modřín jako vhodnou rekultivační dřevinu v práci, která se zabývá rekultivační dendrologií právě na Sokolovsku. Tato práce ovšem nijak nehodnotí mechanické vlastnosti dřeva z těchto stanovišť. Další podobné práce se týkají rekultivace antropogenních sedimentů či půdní typologie rekultivovaných lokalit.

Částečně lze čerpat z výzkumu vlivu postavení v porostu („social class“) na mechanické vlastnosti, provedeného na univerzitě v Poznani. Informace o vlivu stanoviště tak specifického, jako je důlní výsypka či jiné podobné stanoviště na mechanické vlastnosti dřeva modřínu, nejsou v relevantních zdrojích v dostatečné míře dostupné.

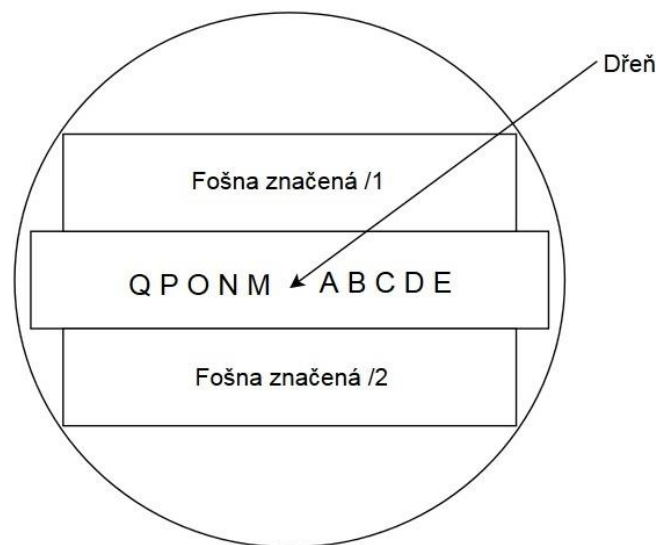
Jelonek (2009) však ve svém výzkumu uvádí poznatky o vlivu věku a postavení v porostu na mechanické vlastnosti dřeva modřínu z lokalit v západním Polsku. Uvádí, že ačkoli starší stromy s dominantním postavením v porostu měly větší hustotu dřeva, ta se ale neprojevila v prokazatelné míře jakožto určující pro lepší výsledky ve zkouškách mechanických vlastností tohoto dřeva, například pevnost v ohybu zde dosahovala velmi konzistentních hodnot napříč Kraftovými třídami.

Metodika

Dřevo – zkušební materiál

Na výrobu vzorků bylo použito šest kmenů modřínu (*Larix decidua* Mill.) ze stanovišť na Sokolovsku, která byly těženy a dovezeny k pilařskému zpracování do Kostelce nad Černými lesy v roce 2012. Poté byl materiál uskladněn v hrání po dobu dvou let. Z každého kmene byly vymanipulovány dvě vertikálně různě položené sekce tak. Z každé sekce byly na výrobu těles použity tři fošny – fošna středová, obsahující dřeň a umožňující výrobu těles, u kterých lze rozlišit jejich polohu od dřene, a dvě fošny boční, u kterých tělesa takto rozlišit nelze.

Z těchto fošen byla vyrobena tělesa a příslušně označena. Polohu sekcí a polohu těles v sekci znázorňuje schéma:



Obrázek 3: Schéma rozmístění a označení zkušebních těles

Všechna tělesa byla označena kódem, který umožňoval jednoznačnou identifikaci jejich vertikální polohy a u těles ze středové fošny i polohy horizontální.

Tělesa mají tvar pravoúhlého hranolu a mají rozměry 20x20x300mm, jejich nejdelší hrana je rovnoběžná s dřevními vlákny a orientace letokruhů je v tělesech taková, že vznikají na každém tělese dvě radiální a dvě tangenciální plochy.

Tato tělesa byla rozdělena do dvou sad přibližně rovným dílem tak, aby se na každé sadě zkoušela jedna z vlastností – rázová houževnatost a společně pevnost v ohybu a modul pružnosti v ohybu, s tím, že v případě nedostatku bezvadných těles z jedné sekce pro obě

zkoušky, mělo přednost zařazení tělesa do sady na zkoušku pro zjištění pevnosti v ohybu a modulu pružnosti v ohybu.

Všechna tělesa byla poté tři měsíce uskladněna ve zkušebně dřeva, za účelem dosažení rovnovážné vlhkosti.

Zjištění hustoty

Zjištění hustoty proběhlo na všech tělesech. Byly zjištěny rozměry v tangenciálním a radiálním směru s přesností 0,01mm pomocí posuvného měřidla a rozměr a axiálním směru pomocí pravítka s přesností na 1mm. Tělesa byla zvážena na vahách s přesností 0,01g.

Hustota byla vypočtena při aktuální vlhkosti podle vzorce:

$$\rho_w = \frac{m_w}{a_w \cdot b_w \cdot l_w} \cdot 10^6 \quad [kg \cdot m^{-3}]$$

Kde ρ_w je hustota dřeva při vlhkosti w , m_w je hmotnost dřeva v gramech při vlhkosti w , a a_w , b_w , l_w jsou rozměry tělesa v milimetrech.

Protože vlhkost dřeva ovlivňuje jeho hustotu, bylo u každého vybraného (každé desáté těleso nebo vybrané tak, aby bylo v každé sekci alespoň jedno těleso, u kterého byla zjištěna vlhkosti) tělesa po provedení zkoušky provedeno zjištění jeho vlhkosti (viz kapitola Zjišťování vlhkosti při fyzikálních a mechanických zkouškách). Zjištěný průměr reálných vlhkostí byl vztažen na všechna tělesa, jejichž hustota byla poté přepočtena na hustotu při vlhkosti 12% podle vzorce:

$$\rho_{12} = \rho_w \cdot \left[1 - \frac{(1 - K) \cdot (W - 12)}{100} \right]$$

Kde K je koeficient objemového sesychání při změně vlhkosti o 1%, $K=0,85$ ρ_w (ČSN 49 0108).

Zkouška na zjištění dynamického modulu pružnosti

Na tělesech určených na zkoušku pevnosti ve statickém ohybu byla provedena i zkouška na zjištění dynamického modulu pružnosti v ohybu metodou využívající akustické vlastnosti dřeva. Za použití přístroje Fakopp Ultrasonic Timer byly zjišťovány doby prostupu ultrazvukové vlny mezi sondami tohoto přístroje.

Fakopp Ultrasonic Timer je přístroj pracující na principu měření doby prostupu ultrazvukové vlny mezi sondami přiloženými na vzorek. Vlna je generována elektrickým impulsem a má

frekvenci 45 – 90 kHz v závislosti na použitém piezoelektrickém snímači. Přístroj je určen na použití při malé vzdálenosti sond (www.fakopp.com)

Pro korekci byla u každého desátého tělesa zjištěna opravná hodnota následujícím způsobem: Byla zjištěna lineární závislost doby prostupu vlny tělesem na vzdálenosti sond. Tato závislost byla graficky vyjádřena a časový údaj v mikrosekundách, zjištěný jakožto průsečík přímky dané závislosti s osou času byl jako opravný údaj použit na příslušnou skupinu deseti těles.

U všech ostatních těles pak byl změřený údaj délky časové prodlevy mezi vysláním ultrazvukové vlny vysílací sondou a jejím přijetím sondou přijímací zmenšen o tento opravný údaj. Měření prodlevy probíhalo ve vzdálenosti sond 140mm tak, že tělesa byla umístěna na pěnové podpory a sondy k tělesu byly přitlačeny ručně u všech těles přibližně stejnou silou. Dynamický modul pružnosti pak byl vypočten podle vzorce:

$$Ed = \frac{\rho_w \cdot \left(\frac{1000 \cdot s}{t \cdot tk}\right) \cdot \left(\frac{1000 \cdot s}{t \cdot tk}\right)}{1\ 000\ 000}$$

Kde E_d je dynamický modul pružnosti, t je čas prostupu vlny úsekem, s je délka úseku a tk je opravný údaj času.

Získané hodnoty byly následně přepočteny na hodnoty pro vlhkost 12% podle vzorce:

$$E_{12} = \frac{E_w}{1 - \alpha \cdot (w - 12)}$$

Kde E_{12} je modul pružnosti v ohybu při 12% vlhkosti, E_w je modul pružnosti v ohybu při vlhkosti v době zkoušky, α je opravný vlhkostní koeficient stejný pro všechny dřeviny 0,04, a w je vlhkost tělesa v době zkoušky.

Zkouška na zjištění pevnosti ve statickém ohybu a modulu pružnosti ve statickém ohybu

Tělesa určená na tuto zkoušku byla nejprve použita na zkoušku na zjištění dynamického modulu pružnosti. Tato zkouška je nedestruktivní, a proto nebyla tělesa pro potřeby zkoušky na zjištění modulu pružnosti ve statickém ohybu nijak znehodnocena.

Zkušební tělesa byla měřena v tangenciálním a radiálním směru posuvným měřidlem s přesností 0,01mm a jejich délka byla měřena pravítkem s přesností 1mm. Tělesa byla umístěna na podpory univerzálního zkušebního stroje vzdálené 240mm tangenciálním povrchem orientována k zatěžovací hlavě s jednou oblou tlakovnicí o průměru 30mm

umístěnou v polovině vzdálenosti mezi podpěrami a zatěžována konstantní rychlostí tak, aby byla porušena po délce trvání zkoušky 90 sekund (+/-30 sekund).

Zkušební stroj UTS 50 byl napojen na software TIRAtest, který zobrazoval a ukládal příslušné hodnoty maximální zatěžovací síly a statického modulu pružnosti v ohybu a vypočítával hodnoty pevnosti v ohybu. Statický modul pružnosti v ohybu byl tedy určen metodou podle normy EN 310 na tělesech vyrobených podle normy ČSN 49 0116.

Získané hodnoty modulu pružnosti ve statickém ohybu byly následně přepočteny na hodnoty pro vlhkost 12% podle vzorce:

$$E_{12} = \frac{E_w}{1 - \alpha \cdot (w - 12)}$$

Kde E_{12} je modul pružnosti ve statickém ohybu při 12% vlhkosti, E_w je modul pružnosti ve statickém ohybu při vlhkosti v době zkoušky, α je opravný vlhkostní koeficient stejný pro všechny dřeviny 0,04, a w je vlhkost tělesa v době zkoušky (ČSN 49 0116).

Získané hodnoty pevnosti ve statickém ohybu byly následně přepočteny na hodnoty pro vlhkost 12% podle vzorce:

$$\sigma_{12} = \sigma_w \cdot [1 + \alpha \cdot (w - 12)]$$

Kde σ_{12} je pevnost ve statickém ohybu při 12% vlhkosti, σ_w je pevnost ve statickém ohybu při vlhkosti v době zkoušky, α je opravný vlhkostní koeficient stejný pro všechny dřeviny 0,04, a w je vlhkost tělesa v době zkoušky (ČSN 49 0115).

Zkouška na zjištění rázové houževnatosti v ohybu

Na tělesech byl změřen rozměr tangenciální (výška tělesa) a radiální plochy (šířka tělesa).

Tělesa byla umístěna na Charpyho kladivo tak, aby úderník narazil na tangenciální plochu.

Poté byla odečtena hodnota přerážecí práce s přesností na 0,5 joulu. Rázová houževnatost je pak vypočtena podle vzorce:

$$A_w = \frac{Q}{b \cdot h} \text{ [J/cm}^2\text{]}$$

Kde A_w je rázová houževnatost v ohybu při vlhkosti v okamžiku zkoušky, Q je přerážecí práce, b je šířka tělesa a h je výška tělesa.

Při případné odlišnosti od vlhkosti 12% byla použita korekce podle vzorce:

$$A_{12} = A_w \cdot [1 + \alpha \cdot (W - 12)]$$

Kde α je opravný koeficient na vlhkost, pro všechny dřeviny 0,02, w je vlhkost dřeva v % (ČSN 49 0117).

Zjišťování vlhkosti při fyzikálních a mechanických zkouškách

Neprodleně po mechanických zkouškách byla vybrána tělesa tak, že ze souboru těles pro danou zkoušku bylo vybráno každé desáté těleso. Zároveň bylo dbáno, aby bylo vybráno těleso i z každé sekce zastoupené v souboru. U těchto těles byla zjištěna hmotnost v době vykonání mechanické zkoušky a tato tělesa byla umístěna do sušárny nastavené na 103°C. Tělesa neměla rozměr daný normou ČSN 49 0103, což byl jediný rozpor s postupem stanoveným touto normou. Tělesa byla poté průběžně převažována až do dosažení úbytku hmotnosti menšího než 0,01g za dvě hodiny. Poté byla tělesa převážena v suchém stavu. Reálná vlhkost w v době zkoušky pak byla vypočtena podle vzorce:

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \cdot 100$$

Kde m_1 je hmotnost tělesa před vysušením (g) a m_2 hmotnost tělesa po vysušení (g). (ČSN 49 0103)

Tato zjištěná skutečná vlhkost byla poté vztažena na celou část (desítku) souboru, popřípadě byla-li tělesa vybrána z každé sekce když sekci zastupovalo méně než 10 těles, pak byla tato vlhkost vztažena na sekci, ze které bylo těleso vybráno. Tato vlhkost pak byla vždy použita pro přepočet hodnot mechanických vlastností na hodnoty mechanických vlastností při 12% vlhkosti.

Měření šířky letokruhu, podílu letního a jarního dřeva a zastoupení jádra a běli

Ze spodní části každé sekce byly odříznuty úzké vzorky napříč vláken pro skenování a vyhodnocení šířky letokruhů. Každý z těchto vzorků byl rozdělen na dvě části tak, že lze vztáhnout změřené šířky letokruhů vždy na příslušnou skupinu vzorků a lze tedy přiřadit průměrné šířce letního dřeva a šířce letokruhu za sekci a polohu od dřene i příslušný průměr hodnot mechanické vlastnosti za příslušnou sekci a její část, tedy část A nebo M. Toto značení (číslo sekce a její část – tedy číslo a A nebo M) je použito i v části Výsledky a diskuse.

Každý vzorek byl skenován skenerem v rozlišení 600dpi a poté byly softwarově (software pro obrazovou analýzu NIS - elements) změřeny šířky každého celého letokruhu v sekci a její

části a pro každý letokruh i šířky letního a jarního dřeva a převedeny na hodnoty v centimetrech. Stejně byl na každém vzorku změřen rozměr běli a jádra. Naměřené hodnoty byly použity pro tabelární a grafické vyjádření šířek letokruhů a podílů jarního a letního dřeva pro každou sekci a její část a přiřazení průměrných hodnot mechanických vlastností této sekce a její části (tyto tabulky jsou v této práci uvedeny v oddílu Výsledky a diskuse v pododdílu Vliv šířky letokruhů, podíl letního a jarního dřeva a zastoupení jádra a běli).

Zpracování naměřených dat

Všechny naměřené hodnoty byly zaneseny do připravených tabulek obsahujících označení těles uspořádaných po stromech a po sekcích rozdělených na soubory označení skupin těles určených pro jednotlivé zkoušky. Zjištěné hodnoty fyzikálních a mechanických zkoušek při 12% vlhkosti jsou uvedeny v kapitole Výsledky a diskuze. Jestliže je uvedena hodnota všech těles/jednoho stromu/jedné sekce, jedná se vždy o průměr ze všech hodnot zjištěných pro všechna tělesa/jeden strom/jednu sekci. Dále je ve výsledcích uveden počet vzorků, modus, medián, směrodatná odchylka a variační koeficient jakožto základní ukazatele popisné statistiky.

U krabicových grafů je průměrná hodnota dané veličiny znázorněna jako střed boxu, box samotný zabírá oblast součtu/rozdílu průměru a směrodatné odchylky a patky nad a pod boxem vytyčují oblast součtu/rozdílu průměru a 1,96 násobku směrodatné odchylky popisované vlastnosti.

Výsledky a diskuse

Fyzikální vlastnosti

Hustota

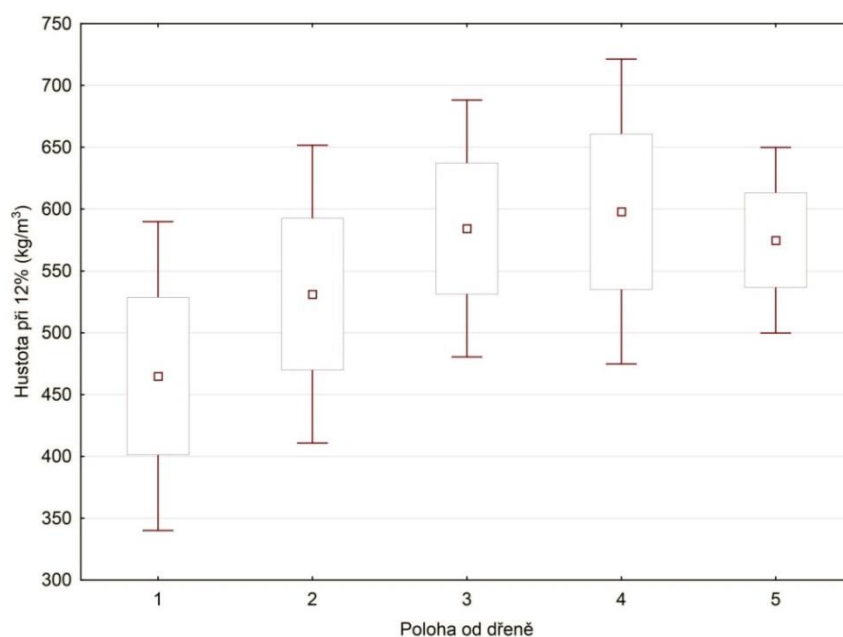
Tabulka 2: Hustota dřeva modřínu

počet vzorků	průměr (kg/m ³)	median (kg/m ³)	minimum (kg/m ³)	maximum (kg/m ³)	směrodatná odchylka	variační koeficient (%)
616	564	561	372	798	69,17	12,26

Jednotlivé kmeny se hustotou podstatně lišily (520 – 631 kg/m³). Průměr hustoty dolních sekcí kmenů 574 kg/m³, což je mírně vyšší hodnota než horních sekcí kmenů, který dosáhl hodnoty 545 kg/m³. Pokles hustoty od paty stromu k vrcholu je obvyklý trend (Požgaj 1997).

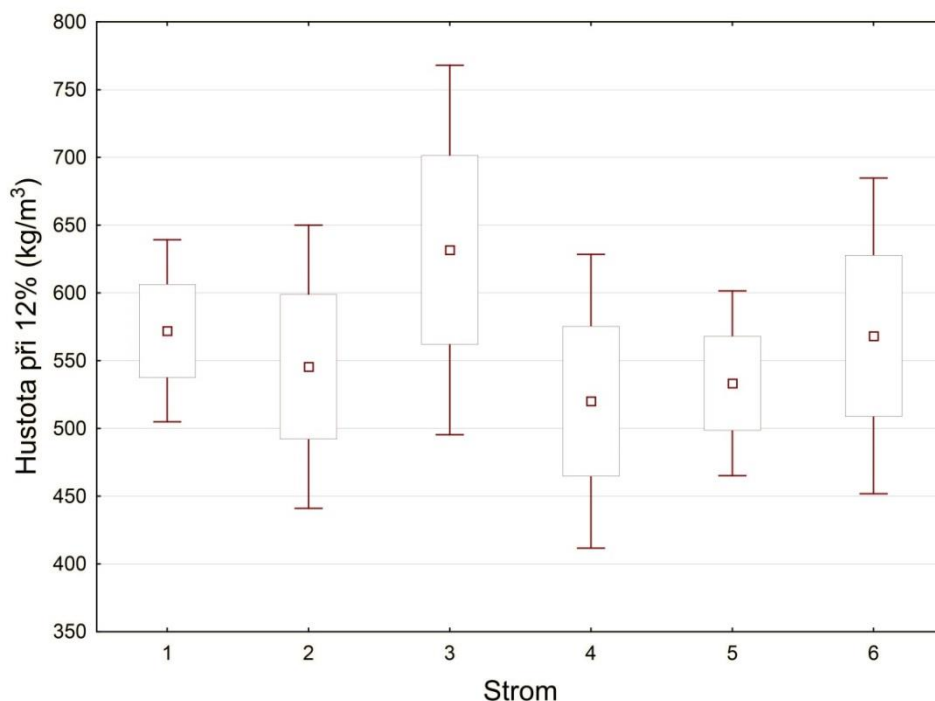
Ve srovnání s hodnotami uváděnými v dostupných zdrojích je tato hustota buď vysoká, kdy například Lexa (1952) uvádí 460 kg/m³, nebo srovnatelná – spadá do intervalu uváděného Wagenführem (2006). Variabilita odpovídá rozmezí udávanému Požgajem (1997), který udává variabilitu 5 – 20%.

Ve srovnání s domácími jehličnany je hodnota hustoty vyšší oproti smrku (uvádí jako *picea excelsa* nyní *picea abies*) – Požgaj (1997) uvádí u smrku hustotu 430 kg/m³, dále ve srovnání s borovicí lesní (*pinus sylvestris*), u které stejný autor uvádí 490 kg/m³, je hodnota zjištěná u modřínu vyšší, stejně jako při srovnání s hustotou dřeva jedle (*abies alba* Mill.) kde Lexa (1952) uvádí hustotu 390 kg/m³.



Graf 1: Hustota dřeva v závislosti na poloze od dřevě

Hustota v závislosti na vzdálenosti od dřeně má převážně vzestupný charakter směrem od dřeně ke kůře stromu. Toto je obvyklý trend u jehličnanů, uvádí se variabilita 5 – 20% v závislosti na poloze od dřeně (Požgaj 1997).



Graf 2: Hustota dřeva v jednotlivých stromech

Graf 2 zobrazuje variabilitu hustoty u jednotlivých stromů. Je zde zřejmá vyšší hodnota hustoty u stromu č. 3. Nejnižších hodnot dosahoval strom č. 4.

Mechanické vlastnosti

Rázová houževnatost

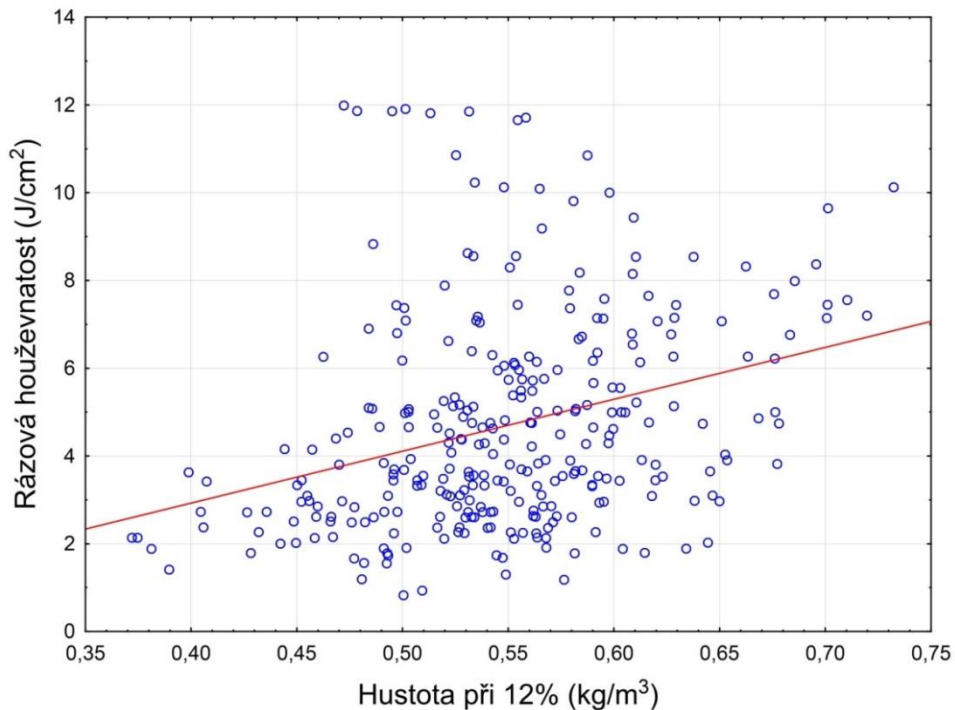
Tabulka 3: Rázová houževnatost dřeva modřínu

počet vzorků	průměr (J/cm ²)	median (J/cm ²)	minimum (J/cm ²)	maximum (J/cm ²)	směrodatná odchylka	variační koeficient (%)
299	4,7	4,1	0,8	12,0	2,43	51,88

Hodnoty rázové houževnatosti jsou uvedeny v tabulce 3. Variabilita dosažených hodnot je vysoká (51,88%), jednotlivé stromy se také lišily. Nejvyšší hodnoty za jeden strom byla 6,2 J/cm², nejnižší byla 3,4 J/cm².

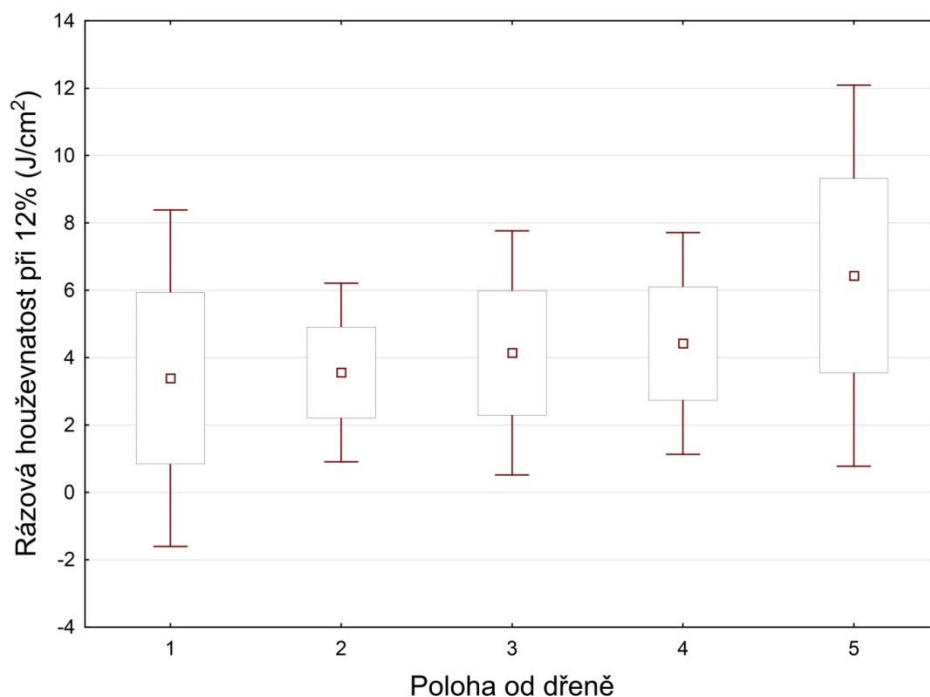
Ve srovnání s údaji, které uvádí Požgaj (1997) je hodnota rázové houževnatosti téměř stejná (velmi mírně nižší) – uvádí 4,8 J/cm² s variačním koeficientem ještě vyšším než v tomto výzkumu, a to 58,7%. Oproti hodnotám podle Kollmanna (1951) je hodnota z tohoto výzkumu vyšší – autor uvádí 4,5 J/cm². Zjištěná rázová houževnatost je ovšem zřetelně nižší oproti údaji, který uvádí Johánek, Spurná (1970) – uvádějí 6,0 J/cm².

Ve srovnání s jinými ekonomicky významnými domácími jehličnany je hodnota z tohoto výzkumu vyšší oproti jedli, která dosahuje $4,2 \text{ J/cm}^2$ (Požgaj 1997) i borovici - $4,0 \text{ J/cm}^2$ podle Kollmanna (1951). Smrkové dřevo podle stejného autora dosahuje hodnoty rázové houževnatosti $4,6 \text{ J/cm}^2$, což je nepatrně nižší hodnota než hodnota dosažená v tomto výzkumu.



Graf 3: Rázová houževnatost dřeva v závislosti na hustotě

Rázová houževnatost se jeví jako hustotou málo ovlivněná (koeficient determinace $r^2=0,1$). Požgaj (1997) zmiňuje několik faktorů ovlivňujících tuto vlastnost (odklon vláken, teplota, vlhkost), podotýká však, že dřeva dosahující vysokých hodnot hustoty a pevnosti, se mohou při této zkoušce projevit jako křehká.



Graf 4: Rázová houževnatost v závislosti na poloze od dřevě

Navzdory nižší míře závislosti rázové houževnatosti na hustotě lze u houževnatosti v závislosti na poloze od dřevě pozorovat mírně vzestupný trend směrem od dřevě ke kůře, který částečně kopíruje trend závislosti hustoty na poloze od dřevě.

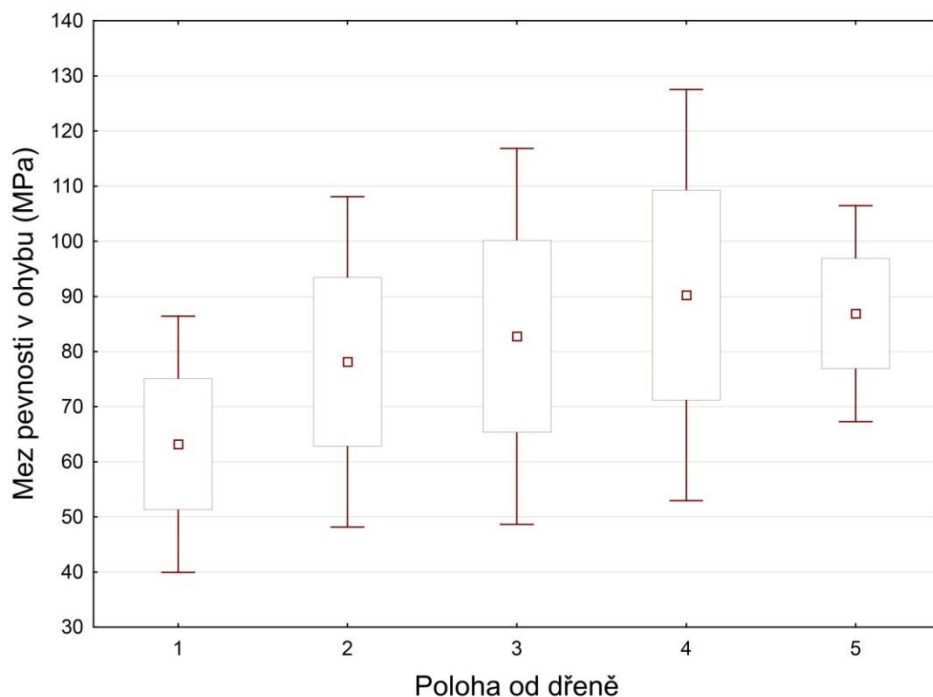
Mez pevnosti v ohybu

Tabulka 4: Mez pevnosti v ohybu dřeva modřínu

počet vzorků	průměr (MPa)	medián (MPa)	minimum (MPa)	maximum (MPa)	směrodatná odchylka	variační koeficient (%)
317	81,40	80,59	39,27	136,04	17,47	21,46

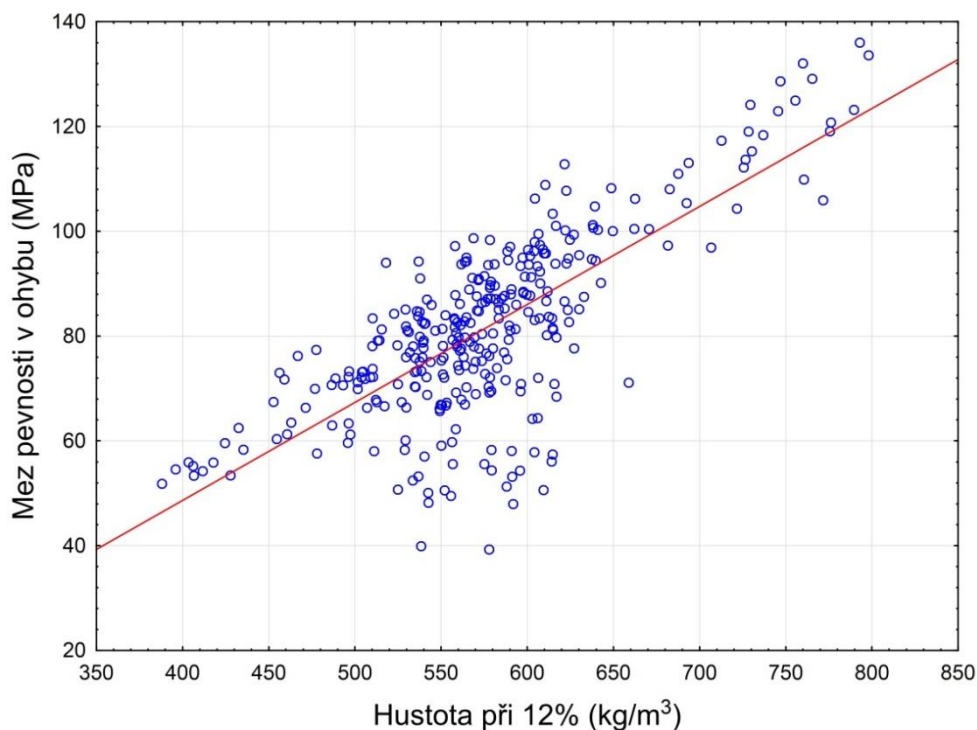
Průměr i medián odpovídají lepší než běžné pevnosti v ohybu modřínu (68,5 MPa – Požgaj 1997), ale vzhledem k tomu, že šlo o zkoušku statickou, je variabilita hodnot vysoká (variační koeficient je 21,46%, ale Požgaj, 1997, uvádí variační koeficient 16 - 18%).

Ve srovnání s jinými dřevinami je zjištěná hodnota meze pevnosti v ohybu vyšší oproti smrku a jedli (72,9 a 69,4 MPa podle Požgaje, 1997). Hodnotu vyšší podle stejného autora ale dosahuje borovice – 100,1 MPa.



Graf 5: Mez pevnosti v ohybu v závislosti na poloze od dřevě

Mez pevnosti v ohybu v závislosti na poloze od dřevě směrem ke kůře vykazuje vzestupný charakter. Tento trend lze pozorovat i u hustoty v závislosti na poloze od dřevě.



Graf 6: Mez pevnosti v ohybu v závislosti na hustotě

Závislost meze pevnosti v ohybu na hustotě, ovšem bez vstupu vlivu polohy od dřevě lze jasně pozorovat i v tomto grafu (Graf 6). Mezi mezí pevnosti v ohybu a hustotou zde lze

pozorovat jistou souvislost (koeficient determinace $r^2 = 0,56$). Při hodnocení vertikální variability byly zjištěny mírně nižší hodnoty pro horní sekce stromů.

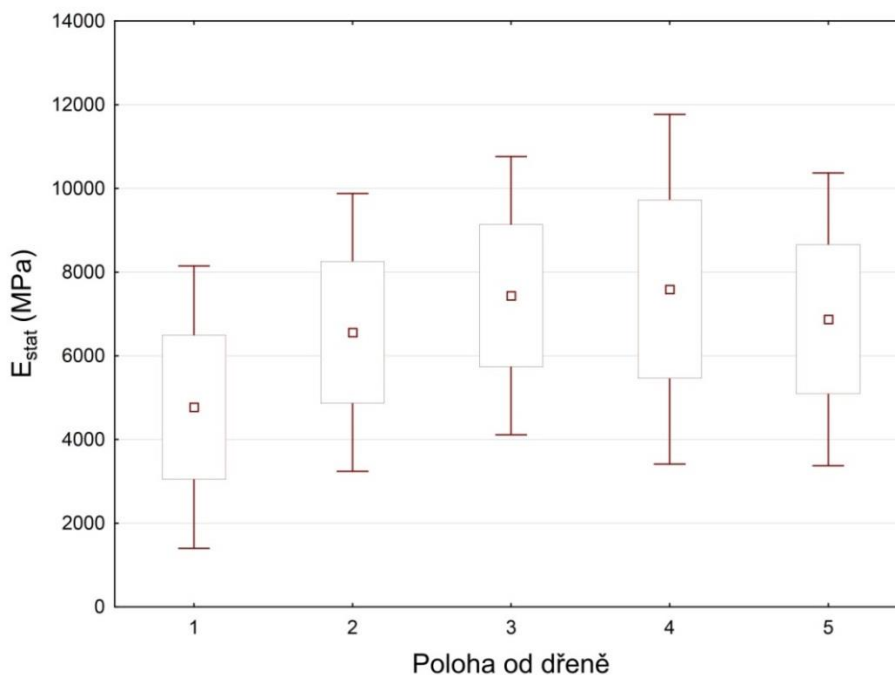
Statický modul pružnosti v ohybu

Tabulka 5: Statický modul pružnosti v ohybu dřeva modřínu

počet vzorků	průměr (MPa)	medián (MPa)	minimum (MPa)	maximum (MPa)	směrodatná odchylka	variační koeficient (%)
317	7114	7074	3110	12648	1897,6	26,67

Tabulka 5 uvádí hodnoty statického modulu pružnosti. S minimem 3110 MPa a maximum 12648 MPa a variačním koeficientem 26,67% je variabilita hodnot značná oproti uváděné hodnotě 22% (Požgaj 1997)

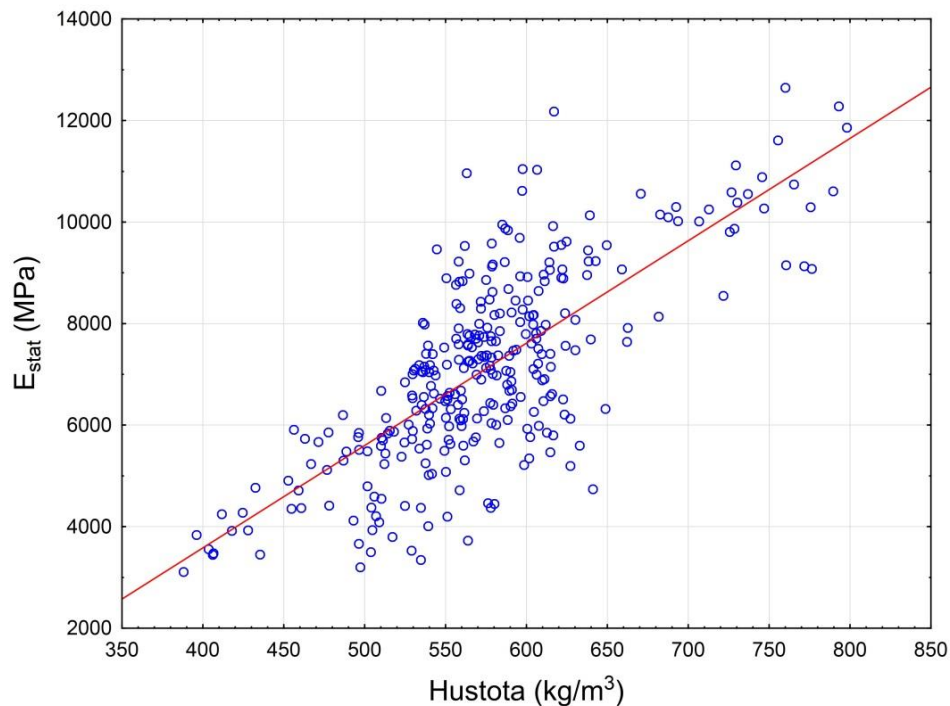
Zjištěná hodnota je oproti údajům podle Kollmanna (1951) velmi nízká, autor uvádí hodnotu přes 13500 MPa. Tomuto údaji se nepřiblížilo ani maximum z hodnot z tohoto výzkumu. Hodnoty statického modulu pružnosti jsou nízké i ve srovnání s ostatními ekonomicky významnými domácími jehličnany – podle stejného autora dosahuje statický modul pružnosti u smrku hodnot přesahujících 10500 MPa a u borovice hodnot přesahujících 11500 MPa.



Graf 7: Statický modul pružnosti v ohybu v závislosti na poloze od dřene

U závislosti modulu pružnosti ve statickém ohybu na poloze od dřene lze pozorovat převážně stoupající trend, který do velké míry kopíruje trend hustoty v závislosti na poloze od dřene. Předpoklad, že hustota a modul pružnosti ve statickém ohybu jsou vzájemně v úzké závislosti (Požgaj 1997), se zde potvrdil, ovšem v menší než očekávané míře, což je zřejmé z grafu

závislosti modulu pružnosti ve statickém ohybu v závislosti na hustotě (Graf 8) i z koeficientu determinace $r^2 = 0,55$.



Graf 8: Statický modul pružnosti v ohybu v závislosti na hustotě

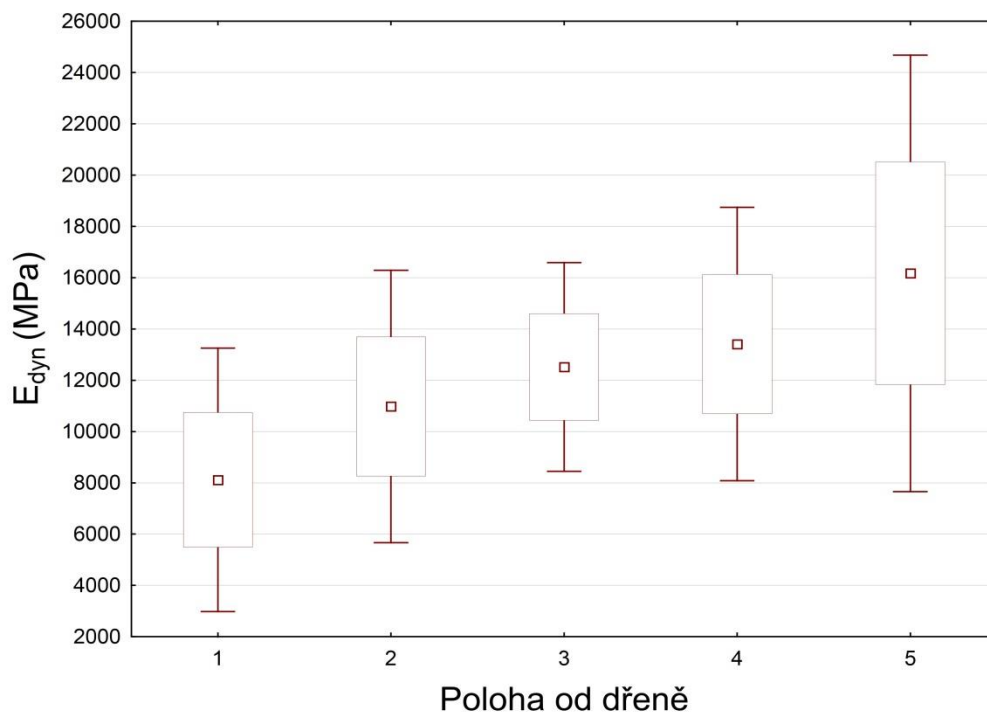
Byla zjištěna závislost statického modulu pružnosti na hustotě, a to v míře dané koeficientem determinace $r^2 = 0,55$. Při hodnocení vertikální variability byly zjištěny mírně nižší hodnoty pro horní sekce stromů.

Dynamický modul pružnosti v ohybu

Tabulka 6: Dynamický modul pružnosti v ohybu dřeva modřínu

počet vzorků	průměr (MPa)	medián (MPa)	minimum (MPa)	maximum (MPa)	směrodatná odchylka	variální koeficient (%)
317	13154	12107	4834	40191	4958,01	37,69

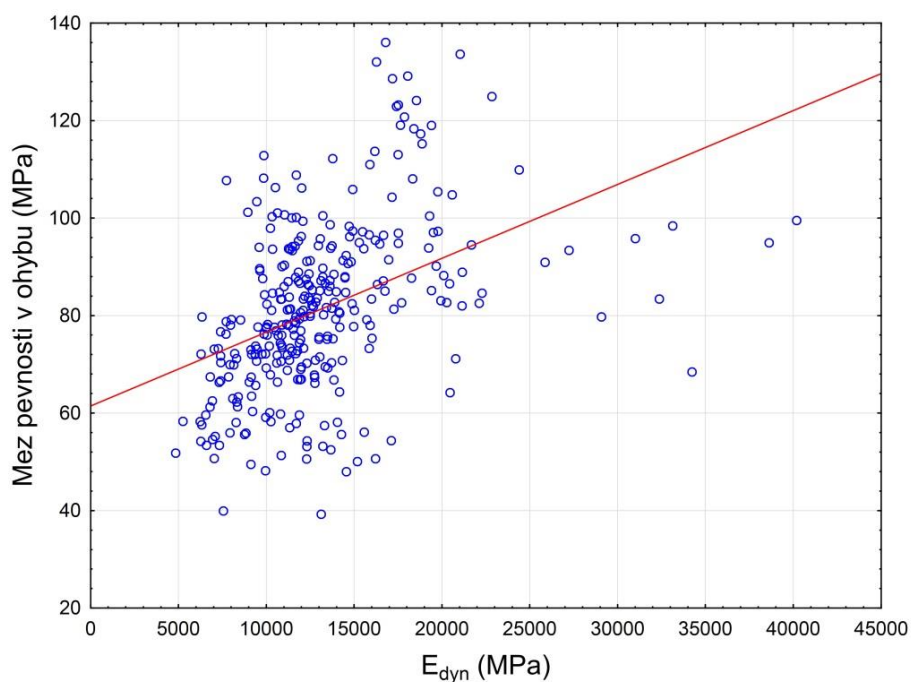
Tabulka 6 uvádí hodnoty dynamického modulu pružnosti. S minimem 4834 MPa a maximem 40191 MPa je pak průměrná hodnota této vlastnosti dřeva modřínu 13154 MPa.



Graf 9: Dynamický modul pružnosti v ohybu v závislosti na poloze od dřevě

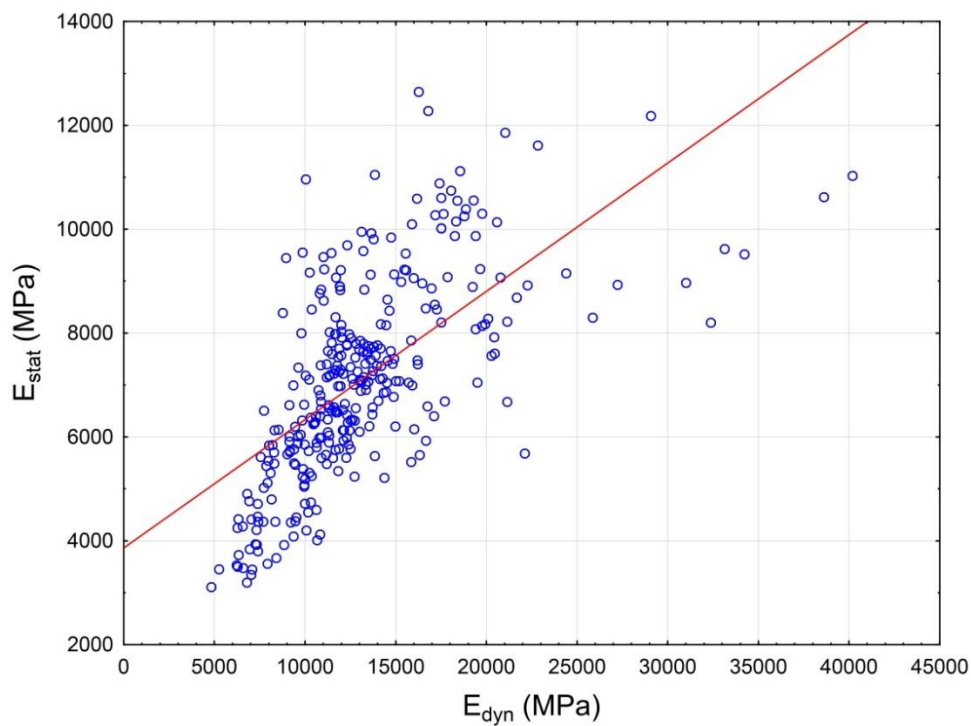
Dynamický modul pružnosti v závislosti na poloze od dřevě směrem ke kůře se jeví v tomto směru vzestupný a do určité míry tedy podobný trendu velikosti hustoty v závislosti na poloze od dřevě.

Vzájemné závislosti mechanických a fyzikálních vlastností



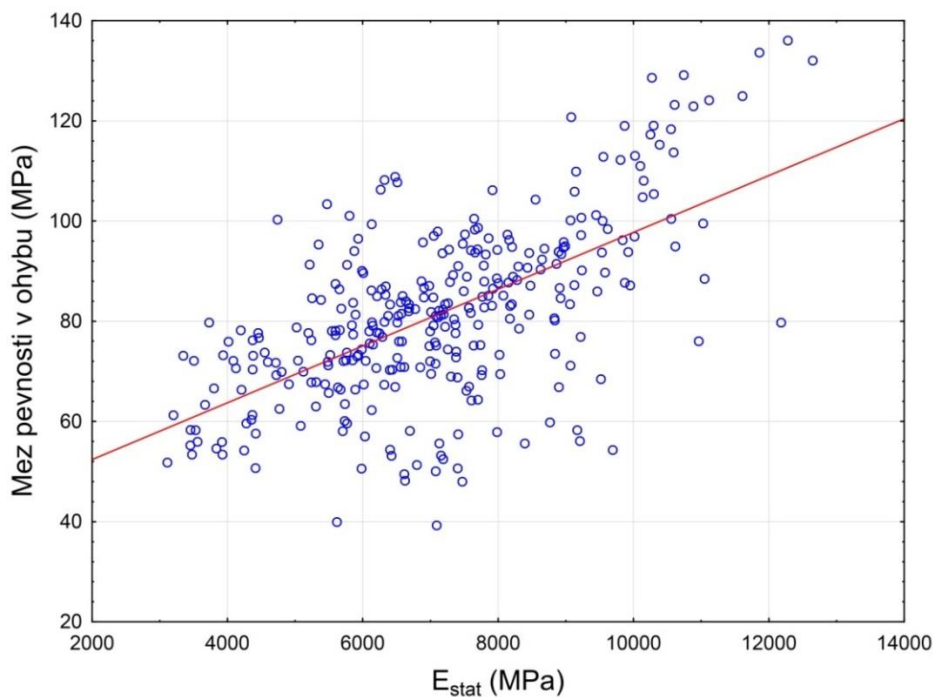
Graf 10: Mez pevnosti v ohybu v závislosti na dynamickém modulu pružnosti v ohybu

Při pozorování závislosti meze pevnosti v ohybu a dynamického modulu pružnosti byla sice zjištěna závislost, nicméně velmi slabá ($r^2 = 0,19$).



Graf 11: Statický modul pružnosti v ohybu v závislosti na dynamickém modulu pružnosti v ohybu

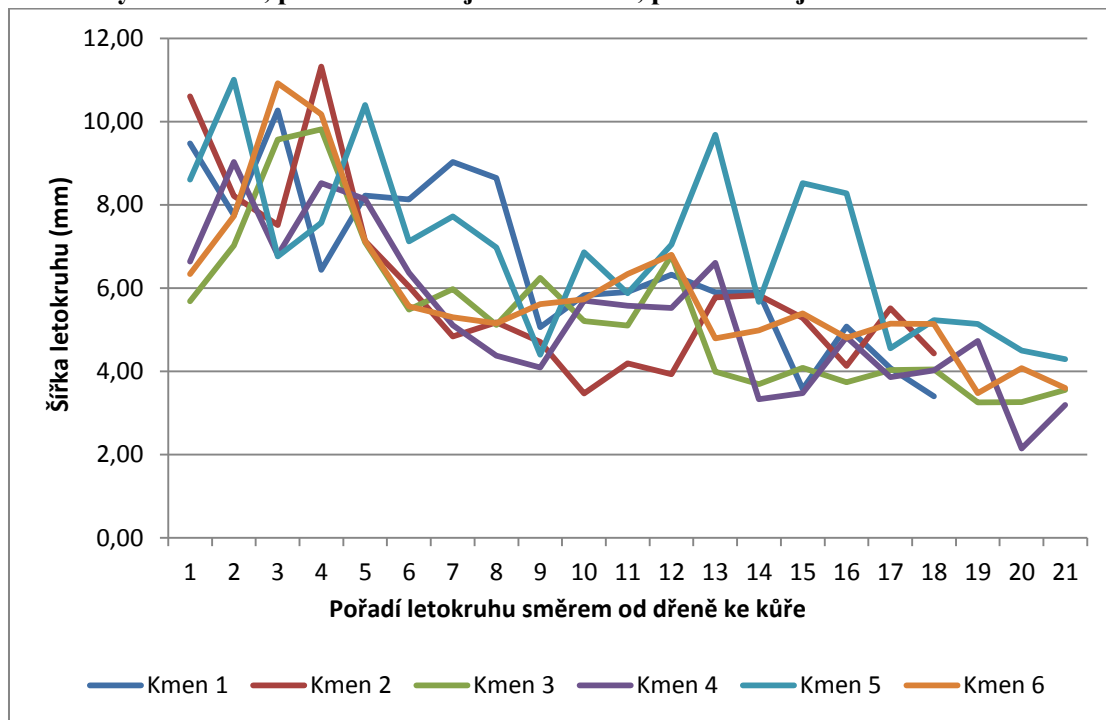
Vzájemná závislost modulu pružnosti ve statickém ohybu na dynamickém modulu pružnosti byla prokázána v míře, kterou určuje koeficient determinace ($r^2 = 0,4166$), nicméně pro použití jedné z těchto vlastností jako určující pro dostatečně přesný odhad druhé tato míra vzájemné závislosti nestačí.



Graf 12: Mez pevnosti v ohybu v závislosti na statickém modulu pružnosti v ohybu

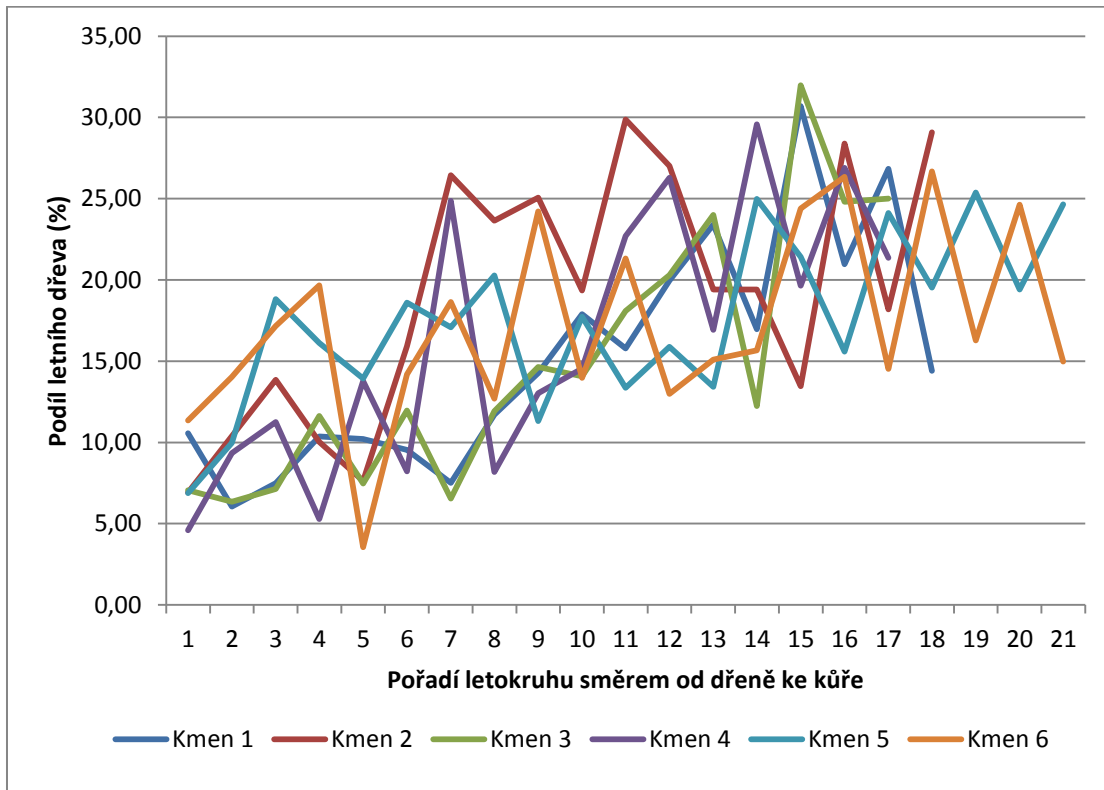
Méně těsná, stále však ještě pozorovatelná je závislost statického modulu pružnosti v ohybu a meze pevnosti v ohybu (koeficient determinace $r^2 = 0,38$).

Vliv šířky letokruhů, podíl letního a jarního dřeva, podíl bělí a jádra



Graf 13: Průběh šířky letokruhu směrem od dřene ke kůře pro jednotlivé kmeny

Z *Grafu 13* je zřejmé, že šířka letokruhu směrem od dřene ke kůře celkově klesala. Na křivkách pro jednotlivé kmeny jsou sice zřejmé výrazné výkyvy, ale celkově je trend v průměru klesající.



Graf 14: Podíl letního dřeva v letokruhu v průběhu od dřene ke kůře

V *Grafu 14* vykazují křivky, znázorňující podíl letního dřeva v letokruzích pro jednotlivé stromy, také jisté výkyvy, ale je zde pozorovatelný převážně stoupající trend, tedy v porovnání s předchozím grafem (*Graf 13*) pak formulujeme, že čím je šířka letokruhů nižší, tím vyšší je podíl letního dřeva v letokruhu.

Tabulka 7: Průměrné šířky jarního a letního dřeva a podíly běli a jádra v jednotlivých sekcích

Sekce	Strom	Průměrná šířka jarního dřeva (cm)	Průměrná šířka letního dřeva (cm)	Procentuální podíl jádra (%)	Procentuální podíl běli (%)
2A	1	0,52	0,12	72,08	27,92
2M	1	0,44	0,09	70,58	29,42
4A	2	0,48	0,12	77,71	22,29
4M	2	0,54	0,12	78,08	21,92
6A	3	0,48	0,12	75,49	24,51
6M	3	0,47	0,12	77,34	22,66
8A	4	0,57	0,12	69,08	30,92
8M	4	0,53	0,11	69,75	30,25
9A	5	0,50	0,10	46,38	53,62
9M	5	0,52	0,09	55,53	44,47
10A	5	0,52	0,09	63,39	36,61
10M	5	0,53	0,10	67,90	32,10
12A	6	0,49	0,09	68,06	31,94
12M	6	0,50	0,09	72,31	27,69

Průměrná šířka jarního dřeva v letokruhu byla pro jednotlivé sekce určena v rozmezí od 0,44 cm do 0,57 cm. Průměrná šířka letního dřeva v letokruhu pro jednotlivé sekce byla určena v rozmezí od 0,09 cm do 0,12 cm. Procentuální podíl běli pro jednotlivé sekce byl určen mezi 21,92% a 53,62% a procentuální podíl jádra pro jednotlivé sekce v rozmezí 46,38% až 78,08%. Většina sekcí se ale blížila rozdělení 70% jádra – 30% běli.

Tabulka 8: Procentuální podíly jarního a letního dřeva, průměrná hustota a průměrná rázová houževnatost v jednotlivých sekcích

Sekce	Strom	Procentuální podíl jarního dřeva (%)	Procentuální podíl letního dřeva (%)	Průměrná hustota v sekci při w=12% (kg/m ³)	Průměrná rázová houževnatost v sekci při w=12% (J/cm ²)
2A	1	80,61	19,39	545,31	2,37
2M	1	83,34	16,66	575,40	4,48
4A	2	80,36	19,64	539,72	6,24
4M	2	81,31	18,69	579,72	6,92
6A	3	79,28	20,72	651,05	5,02
6M	3	80,00	20,00	670,47	4,88
8A	4	83,05	16,95	485,81	3,44
8M	4	82,48	17,52	503,31	4,82
9A	5	82,99	17,01	520,35	4,37
9M	5	85,65	14,35	542,16	1,19
10A	5	84,93	15,07	553,35	3,95
10M	5	84,74	15,26	535,86	3,69
12A	6	84,97	15,03	-	-
12M	6	84,92	15,08	530,85	2,26

Procentuální podíl jarního dřeva byl změřen v rozmezí 79,28% až 85,65% a procentuální podíl letního dřeva v rozmezí 14,35% až 20,72%. V sekcích s těmito podíly jarního a letního dřeva byla zjištěna průměrná hodnota těles v sekci. Nejvyšší hodnota hustoty byla zjištěna v sekci 6M, a to 670,47 kg/m³. Druhá nejvyšší hodnota hustoty, 651,05 kg/m³ přísluší sekci s nejvyšším podílem letního dřeva, ale sekce s nejnižší hustotou (485,81 kg/m³ až 520,35 kg/m³) mají průměrný procentuální podíl letního dřeva (16,95% až 17,52%).

Hodnoty rázové houževnatosti těles podle jednotlivých sekcí vykazují vyšší hodnoty u těles s vyšším podílem letního dřeva (u těles s hodnotou rázové houževnatosti přesahující 4,5 J/cm² podíl letního dřeva vždy přesahuje 17,5%) a nižší hodnoty u těles s nižším podílem letního dřeva (tělesa s hodnotami rázové houževnatosti do 2,3 J/cm² procentuální podíl letního dřeva v letokruhu nepřesahuje 15,1%).

Tabulka 9: Procentuální podíl jarního a letního dřeva, průměry dynamického modulu pružnosti v ohybu a průměry statického modulu v ohybu v jednotlivých sekcích

Sekce	Strom	Procentuální podíl jarního dřeva (%)	Procentuální podíl letního dřeva (%)	Průměr dyn. modulu pružnosti v sekci při w=12% (MPa)	Průměr st. modulu pružnosti v sekci při w=12% (MPa)
2A	1	80,61	19,39	11275,50	8057,28
2M	1	83,34	16,66	12837,10	7630,01
4A	2	80,36	19,64	13802,56	4920,40
4M	2	81,31	18,69	10398,01	5456,26
6A	3	79,28	20,72	15746,58	9193,44
6M	3	80,00	20,00	16505,35	9927,90
8A	4	83,05	16,95	10068,40	5630,24
8M	4	82,48	17,52	11345,72	6352,24
9A	5	82,99	17,01	11334,54	6531,99
9M	5	85,65	14,35	9410,69	6112,95
10A	5	84,93	15,07	10269,41	5523,54
10M	5	84,74	15,26	10498,16	6449,12
12A	6	84,97	15,03	-	-
12M	6	84,92	15,08	12950,84	6061,21

V tabulce jsou uvedeny průměrné hodnoty modulů pružnosti měřených dvěma způsoby a to pro každou sekci. Nejvyšší modul pružnosti (dynamický i statický) pro sekci dosáhla sekce 6M. Právě tato sekce měla druhý nejvyšší podíl letního dřeva, a to 20%. Sekce s nejnižším podílem letního dřeva, sekce 9M vykazovala nejnižší dynamický modul pružnosti (9410,69 MPa), což koresponduje s předpokladem, že vyšší podíl letního dřeva předznačuje lepší mechanické vlastnosti.

Tabulka 10: Procentuální podíl jarního a letního dřeva, průměry pevnosti v ohybu v jednotlivých sekcích

Sekce	Strom	Procentuální podíl jarního dřeva (%)	Procentuální podíl letního dřeva (%)	Průměr pevnosti v ohybu v sekci při w=12% (MPa)
2A	1	80,61	19,39	85,76
2M	1	83,34	16,66	81,70
4A	2	80,36	19,64	78,91
4M	2	81,31	18,69	88,29
6A	3	79,28	20,72	103,67
6M	3	80,00	20,00	110,45
8A	4	83,05	16,95	73,43
8M	4	82,48	17,52	79,47
9A	5	82,99	17,01	82,68
9M	5	85,65	14,35	76,12
10A	5	84,93	15,07	64,63
10M	5	84,74	15,26	75,60
12A	6	84,97	15,03	-
12M	6	84,92	15,08	65,75

Průměrná pevnost dřeva v ohybu za sekci byla nejvyšší pro sekci 6M, tedy sekci, u které byl zjištěn druhý nejvyšší podíl letního dřeva. Tato nejvyšší zjištěná pevnost v ohybu dosáhla hodnoty 110,45 MPa. Sekce s nejvyšším podílem letního dřeva (6A) dosáhla také vysoké hodnoty 103,67 MPa. Sekce s nejnižší zjištěnou ohybovou pevností (sekce 10A s hodnotou pevnosti v ohybu 64,63 MPa) měla procentuální podíl letního dřeva 15,07%. Předpokladu, že sekce s nižším podílem letního dřeva bude mít i nižší výslednou hodnotu modulu pružnosti v ohybu, odpovídá i sekce s vůbec nejnižším podílem letního dřeva – sekce 9M (14,35% letního dřeva a 76,12 MPa).

Závěr

V této práci byly zkoumány vybrané vlastnosti, mechanické a fyzikální, dřeva modřínu ze severočeských výsypek, ze Sokolovska, a jejich závislost na šířce letokruhů a podílu letního a jarního dřeva.

Mechanické a fyzikální vlastnosti byly popsány celkově, i odděleně pro jednotlivé stromy a v závislosti na poloze od dřeně. Variabilita zjištěných vlastností byla u některých vlastností srovnatelná s hodnotami z dostupné literatury, u některých vlastností byla vyšší.

Byla popsána rázová houževnatost a pevnost dřeva v ohybu. Tento poznatek byl ještě doplněn o statický a dynamický modul pružnosti. Při srovnání zjištěných hodnot s hodnotami uváděnými jinými autory pro modřín z jiných oblastí byly zjištěny srovnatelné kvality se dřevem z jiných oblastí s výjimkou statického modulu pružnosti, který byl velmi nízký.

Ve srovnání s ostatními ekonomicky významnými domácimi jehličnany dosáhl modřín lepších nebo srovnatelných mechanických vlastností, s výjimkou statického modulu pružnosti, který nepřesáhl ani hodnoty uváděné pro smrk nebo jedli, navzdory tomu, že v jiných výzkumech hodnoty statického modulu pružnosti těchto dřevin převyšuje.

Zhodnocení vlivu šířky letokruhů a podílu letního dřeva na posuzované vlastnosti bylo provedeno, až na drobné odchylky se dřevo modřínu ze severočeských výsypek ve vztahu k šířce letokruhů a podílu letního dřeva chovalo standardně, tedy s klesající šířkou letokruhů a rostoucím podílem letního dřeva dosahovalo lepších mechanických vlastností.

Ze zjištěných výsledků mého výzkumu usuzuji, že po provedení podrobnějších měření (se zastoupením materiálu ze stromů s více stanovišť, různého věku a postavení porostu) by bylo možné považovat tento materiál, tedy dřevo modřínu z antropogenně ovlivněných stanovišť, za plnohodnotně uplatnitelný. Hlubší pozornost by zasloužilo prověření závislosti nižšího statického modulu pružnosti na stanovišti, neboť kromě konstatování že tyto hodnoty byly nižší než u dřeva z běžných stanovišť, nelze z tohoto výzkumu usoudit skutečný vliv stanoviště. Pro kompletaci poznatků o takto vzniklé surovině je ještě potřeba podrobnější výzkum, nicméně pro nastínění kvalit zkoumaného dřeva může tato práce částečně sloužit.

Zdroje

1. Tištěné zdroje

- KOLLMANN, F. Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe Erste Band. Berlin: Springer-Verlag, 1951. 1050 s.
- LEXA, J., NEČESANÝ, V., PACLT, J., TESAŘOVÁ, M., ŠTOFKO, J. Technologia dreva I. – Mechanické a fyzikálne vlastnosti dreva. Bratislava: Práca, 1952. 436 s.
- POŽGAJ, A., CHOVANEC, D., KURJATKO, S., BABIAK, M. Štruktúra a vlastnosti dreva. 2. vydání. Bratislava: Príroda, 1997. 485 s. ISBN 8007009604.
- WAGENFÜHR, R. Holzatlas. Leipzig: Fachbuchverlag, 2006. 707 s. ISBN 3446406492.
- KUPKA I., DIMITROVSKÝ A. Výsledky testování vybraných dřevin pro lesnické rekultivace na Sokolovsku In Zprávy lesnického výzkumu. 56, 2011 special. Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti. s. 52 – 56.
- JELONEK T. The Effect Of Biological Class and Age on Physical and Mechanical Properties of European Larch (*Larix decidua* Mill.) in Poland In Wood Research. 54, 2009. Slovak Forest Products Research Institute. s. 1 – 14.
- ZEIDLER A. Lexikon dřeva. Praha: Česká Zemědělská Univerzita v Praze. 2012. 61 s.
- JOHÁNEK A. SPURNÁ M. Dřevařská technická příručka. Praha: Státní nakladatelství technické literatury. 1970. 748 s.
- SLÁVIK M. BAŽANT V. Soubor map – zastoupení hospodářských dřevin v ČR. Praha: Česká Zemědělská Univerzita v Praze. 2012. 52 s.
- GANDELOVÁ L. Nauka o dřevě. Brno: Mendelova Zemědělská a Lesnická Univerzita v Brně. 2002. 176 s. ISBN 978-80-7375-312-2.

2. Normy

- ČSN 49 0108: Drevo. Zisťovanie hustoty, Federální úřad pro normalizaci a měření, 1993.
- ČSN 49 0115: Drevo. Zisťovanie medze pevnosti v statickom ohybe, Úřad pro normalizaci a měření, 1979.
- ČSN 49 0117: Drevo. Rázová húževnatosť v ohybe, Úřad pro normalizaci a měření, 1982.
- ČSN 49 0103: Drevo. Zisťovanie vlhkosti pri fyzikálnych a mechanických skúškach, Úřad pro normalizaci a měření, 1979.

- ČSN 49 0116: Drevo. Metóda zisťovania modulu pružnosti pri statickom ohybe, Úrad pro normalizaci a měření, 1982.
- ČSN EN 310 (490147): Desky ze dřeva. Stanovení modulu pružnosti v ohybu a pevnosti v ohybu, Český normalizační institut, 1995.

3. Internetové zdroje

- BioLib. www.biolib.cz, 26.3.2015 21.00, dostupné z <http://www.biolib.cz/cz/taxon/id2348/>
- BioLib – Jakub Horák. www.biolib.cz, 26.3.2015 22.00, dostupné z <http://www.biolib.cz/cz/image/id22540/>
- Fakopp Enterprise. www.fakopp.com, 15.4.2015 8.00, dostupné z <http://www.fakopp.com/site/timer>