Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Posouzení vlivu nízkých teplot na odolnost dřeva proti vytažení hřebíků

Diplomová práce

Autor: Bc. Tomáš Houska

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Gašparík, PhD.

2020

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Tomáš Houska

Dřevařské inženýrství
Dřevařské inženýrství

Název práce

Posouzení vlivu nízkých teplot na odolnost dřeva proti vytažení hřebíků

Název anglicky

Assessing the influence of low temperatures on the nail withdrawal resistance of wood

---

Cíle práce

Cílem práce je experimentální zkoumání fyzikálních vlastností a odolnosti dřeva proti vytažení hřebíků během nebo po působení nízkých teplot nebo cyklického střídání nízkých a vysokých teplot. Experimentální zkoumání zahrnuje zjišťování odolnosti proti vytažení hřebíků na různých dřevinách s použitím několika typů hřebíků používaných ve stavebních konstrukcích.

Metodika

1. Zpracování literární rešerše o fyzikálních a mechanických vlastnostech dřeva a jejich vztahu k působení nízkých a vysokých teplot, jako i změnách zapříčiněných střídavým působením nízkých a vysokých teplot. Analýza odolnosti mechanických spojů, vytvořených pomocí hřebíků pro dřevěné konstrukce, vůči změnám teplot a vlhkosti.

2. Příprava, třídění a značení zkušebních těles.

3. Určení základních fyzikálních vlastnosti dřeva.

4. Experimentální zjišťování vlivu střídavého působení nízkých a vysokých teplot na odolnost dřeva proti vytažení hřebíků. Odolnost proti vytažení hřebíků hodnocená na mechanických spojích vytvořených z dřeva různých dřevin a z několika typů hřebíků. Porovnání odolnosti proti vytažení hřebíků u teplotně zatěžovaného dřeva s vlastnostmi dřeva bez vlivu střídání teplot.

5. Statistické zpracování výsledků v textové, tabulkové a grafické podobě.

6. Diskuze a závěry.

Doporučený rozsah práce

65 – 75

Klíčová slova

hřebíkové spoje, nízká teplota, teplotní střídání, odolnost proti vytažení hřebíků

Doporučené zdroje informací

AICHER, S., REINHARDT, H.-W., GARRECHT, H. Materials and Joints in Timber Structures: Recent Developments of Technology. Springer Science & Business Media, 2013, 819 s. ISBN: 978-94-007-7810-8

AMBROSSE, J. Building Structures. 2nd ed., John Wiley & Sons, 1993, 701 s. ISBN: 0-471-54060-9

BODIG, J., JAYNE, B. A. Mechanics of Wood and Wood Composites. Van Nostrand Reinhold Company New York, Cincinnati, Toronto, London, Melbourne, 1982, 712 s.

HALPERIN, D. A., BIBLE, G. T. Principles of Timber Design for Architects and Builders. John Wiley & Sons, 1994, 400 s. ISBN: 0-471-55768-4

KOLLMANN, F. F. P., COTE, W. A. Jr. Principles of Wood Science and Technology: I. Solid Wood. Springer Science & Business Media, 2012, 592 s. ISBN: 978-3-642-87928-9

KOLLMANN, F. F. P., KUENZI, E. W., STAMM, A. J. Principles of Wood Science and Technology: II. Wood Based Materials. Springer Science & Business Media, 2012, 703 s. ISBN: 978-3-642-87933-3

POŽGAJ, A., CHOVANEC, D., KURJATKO, S., BABIAK, M. Štruktúra a vlastnosti dreva, Bratislava: Príroda a. s., 1997, 485 s.

Předběžný termín obhajoby

2019/20 LS – FLD

Vedoucí práce

Ing. Miroslav Gašparík, PhD.

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Elektronicky schváleno dne 27. 4. 2019

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 22. 2. 2020

prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.

Děkan

V Praze dne 25. 02. 2020

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Posouzení vlivu nízkých teplot na odolnost dřeva proti vytažení hřebíků“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Miroslava Gašparíka, PhD. a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

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

V Praze dne 10.6.2020 …….

Bc. Tomáš Houska

Poděkování

Tímto bych velice rád poděkoval svému vedoucímu Ing. Miroslavu Gašparíkovi, PhD. za ochotu, cenné rady a vstřícné jednání při psaní mé závěrečné práce. Dále bych rád poděkoval všem lidem, kteří mě během psaní diplomové práce i celém studiu podporovali, především pak svým rodičům za podporu při mém studiu.

Abstrakt

Diplomová práce se zaobírá vlivem nízkých teplot (-15 °C a -25 °C) na hustotu a vlhkost modřínového a smrkového dřeva a taktéž vlivem kombinace nízkých (-15 °C a -25 °C) a vysokých teplot (70 °C) na hustotu a vlhkost dřeva i na odpor dřeva proti vytažení hřebíku a parametr vytažení hřebíku. Jsou zde hodnoceny hladké, konvexní a spirálové hřebíky průměru 2,8 mm zaražené v radiálním a tangenciálním směru do dřeva smrku a modřínu do hloubky 30 mm. Ze získaných výsledků je patrné, že po působení nízkých teplot vlhkost i hustota zkušebních těles mírně vzrostla a po ohřevu obě veličiny výrazně poklesly. Odpor dřeva proti vytažení hřebíku i parametr vytažení hřebíku po teplotním zatěžování poklesly průměrně o 35 % při zatížení teplotami -15 °C a 70 °C a o 34,1 % při vystavení teplotám -25 °C a 70 °C oproti teplotně nezatíženým zkušebním tělesům. Z hřebíků se jako typ s nejvyššími hodnotami odporu proti vytažení a parametru vytažení jeví konvexní hřebíky. Spirálové a hladké hřebíky vykazují výrazně nižší hodnoty sledovaných veličin. Parametr vytažení hřebíku a odpor dřeva proti vytažení hřebíku byly zjištěny vyšší v radiálním směru dřeva než ve směru tangenciálním.

Klíčová slova

Hřebíkové spoje, nízká teplota, teplotní střídání, odpor dřeva proti vytažení hřebíku, parametr vytažení hřebíku.

Abstract

Diploma thesis is focused on effects of low temperatures (-15 °C and -25 °C) on density and moisture content of larch and spruce wood and also on effects of combination of low temperatures (-15 °C and -25 °C) with high temperature (70 °C) on density and moisture content of wood and on nail withdrawal resistance and nail withdrawal parameter. Smooth, annual and helical nails with diameter of 2,8 mm driven in the radial and tangential direction into spruce and larch wood to a depth of 30 mm are evaluated here. The results show that after the action of low temperatures, the moisture content and density of the test specimens increased slightly and after heating both quantities decreased significantly. Nail withdrawal resistance and nail withdrawal parameter after thermal loading decreased on average by 35 % when loaded with temperatures of -15 °C and 70 °C and by 34,1 % when exposed to temperatures of -25 °C and 70 °C compared to thermally unloaded test specimens. Of the nails, annual nails appear to be the type with the highest values of nail withdrawal resistance and nail withdrawal parameter. Helical and smooth nails show lower values of the monitored quantities. Nail withdrawal parameter and nail withdrawal resistance were found to be higher in the radial direction of wood than in the tangential direction.

Keywords

Nail joints, low temperature, temperature alternation, nail withdrawal resistence, nail withdrawal parameter.

Obsah

1. ÚVOD 12

2. CÍL PRÁCE 13

3. DŘEVO 14

3.1 Řezy a směry dřeva 16

3.1.1 Radiální řez 16

3.1.2 Tangenciální řez 17

3.1.3 Příčný řez 17

3.1.4 Základní směry ve dřevě 17

3.2 Charakteristika dřeva jehličnatých dřevin 18

3.2.1 Smrkové dřevo 18

3.2.2 Modřínové dřevo 19

3.3 Fyzikální vlastnosti dřeva 20

3.3.1 Vlhkost dřeva 20

3.3.2 Hustota dřeva 21

3.3.3 Vztah dřeva k teplu 23

3.4 Technologické vlastnosti dřeva 23

3.4.1 Schopnost dřeva držet spojovací prostředky 24

3.4.2 Houževnatost dřeva 25

3.4.3 Tvrdost dřeva 25

3.4.4 Štípatelnost dřeva 26

3.4.5 Opotřebovatelnost dřeva 27

3.4.6 Ohýbatelnost dřeva 27

3.5 Vliv nízkých teplot na dřevo 27

3.6 Vliv zvýšených teplot na dřevo 29

3.7 Vliv teplotního střídání na dřevo 30

3.8 Spojování dřeva 31
3.8.1 Rozdělení spojů dřeva 32
3.8.2 Spoje mechanickými spojovacími prostředky..... 33
3.8.2.1 Hřebíkové spoje..... 33
3.8.2.1.1. Hřebíky..... 34
3.8.2.1.2. Zatížení hřebíkových spojů 36
3.8.2.1.3. Odpor dřeva proti vytažení hřebíku a parametr vytažení hřebíku 37
3.8.2.1.4. Vliv vlhkosti a teploty na hřebíkové spoje..... 39
4. METODIKA 41
4.1 Podmínky experimentu..... 41
4.2 Příprava zkušebních těles..... 42
4.3 Teplotní zatěžování zkušebních těles 51
4.4 Stanovení odporu dřeva proti vytažení hřebíku a parametru vytažení hřebíku..... 52
4.5 Ověření vlhkosti zkušebních těles..... 54
4.6 Vyhodnocení získaných dat 55
5. VÝSLEDKY A DISKUSE..... 56
5.1 Fyzikální vlastnosti dřeva 56
5.2 Parametr vytažení hřebíku a odpor dřeva proti vytažení hřebíku 59
6. ZÁVĚR 78
7. POUŽITÁ LITERATURA..... 80
8. PŘÍLOHY 86

Seznam obrázků, tabulek a grafů

Obr. 1: Řezy dřeva……..16
Obr. 2: Smrkové dřevo……..19
Obr. 3: Modřínové dřevo……..20
Obr. 4: Zamrzlá voda volná ve dřevě……..28
Obr. 5: Hřebík……35
Obr. 6: Hladký hřebík……...35
Obr. 7: Konvexní hřebík……..35
Obr. 8: Spirálový hřebík……..36
Obr. 9: Zatížení na střih……36
Obr. 10: Zatížení na vytažení……36
Obr. 11: Rozměry zkušebního tělesa……...43
Obr. 12: Značení zkušebních těles……...44
Obr. 13: Klimatizační komora……46
Obr. 14: Podmínky v klimatizační komoře……...46
Obr. 15: Zkušební tělesa v klimatizační komoře……47
Obr. 16: Vážení zkušebních těles……47
Obr. 17: Měření zkušebních těles……48
Obr. 18: Rozmístění hřebíků ve zkušebním tělese……48
Obr. 19: Hladký hřebík 2,8 x 63 mm……49
Obr. 20: Spirálový hřebík 2,8 x 63 mm……49
Obr. 21: Konvexní hřebík 2,8 x 60 mm……49
Obr. 22: Šablona na zarážení hřebíků……50
Obr. 23: Laboratorní mrazící box……..51
Obr. 24: Laboratorní sušárna……52
Obr. 25: Zkušební trhací stroj UTS 50……..53
Obr. 26: Přípravek na vytahování hřebíků……..53
Obr. 27: Upnutí zkušebního tělesa v přípravku……..54

Tab. 1: Počet smrkových zkušebních těles pro experiment……..42
Tab. 2: Počet modřínových zkušebních těles pro experiment……..42
Tab. 3: Rozdělení zkušebních těles……45

Tab. 4: Vlhkost a hustota zkušebních těles……57
Tab. 5: Statistické vyhodnocení parametru vytažení hřebíku f_{ax}……..59
Tab. 6: Statistické vyhodnocení odporu dřeva proti vytažení hřebíku *R*…..60
Tab. 7: Průměrné hodnoty parametru vytažení hřebíku f_{ax}……73
Tab. 8: Průměrné hodnoty odporu dřeva proti vytažení hřebíku *R*…….....76

Graf 1: Závislost parametru vytažení hřebíku na dřevině……..61
Graf 2: Závislost odporu dřeva proti vytažení hřebíku na dřevině……61
Graf 3: Závislost parametru vytažení hřebíku na typu hřebíku…….62
Graf 4: Závislost odporu dřeva proti vytažení hřebíku na typu hřebíku……63
Graf 5: Závislost parametru vytažení hřebíku na anatomickém směru…..65
Graf 6: Závislost odporu dřeva proti vytažení hřebíku na anatomickém směru……..65
Graf 7: Závislost parametru vytažení hřebíku na teplotním zatížení……67
Graf 8: Závislost odporu dřeva proti vytažení hřebíku na teplotním zatížení……...68
Graf 9: Parametr vytažení hřebíku pro smrk……...71
Graf 10: Parametr vytažení hřebíku pro modřín……71
Graf 11: Odpor dřeva proti vytažení hřebíku pro smrk……...75
Graf 12: Odpor dřeva proti vytažení hřebíku pro modřín……..75

1. ÚVOD

Dřevo má v dnešní době mnoho využití. Používá se při výrobě mnoha různých typů výrobků. Mezi nejčastější příklady využití dřeva patří výroba nábytku, různých druhů speciálních dřevěných výrobků, papíru, materiálů na bázi dřeva jako jsou dřevotřískové desky a další druhy plošných materiálů. Další využití nachází dřevo při výrobě stavebně-truhlářských konstrukcí, stavebních konstrukcí budov a případně i dalších i exteriérových konstrukcí, jako jsou altánky, mosty, lávky, ploty nebo vybavení dětských hřišť.

U veškerých dřevěných konstrukcí je nutností spojovat jednotlivé dřevěné prvky do větších celků, a tím vytvářet zmiňované konstrukce. Spojování dřevěných prvků lze provádět úpravou tvaru prvku do konstrukčního spoje, lepením, anebo použitím mechanického spojovacího prostředku.

Mezi nejčastěji používané mechanické spojovací prostředky patří hřebíky, pomocí kterých vytváříme takzvané hřebíkové spoje. Hřebíky mohou být v konstrukci namáhány různými typy namáhání, a proto je důležité znát vlastnosti hřebíkových spojů a podle nich následně hřebíkové spoje vhodně navrhovat, tak aby splňovaly veškeré požadavky na únosnost a byly bezpečné.

Vlastnosti hřebíkových spojů jsou ovlivněny řadou faktorů, které mění vlastnosti, a tudíž i únosnost těchto spojů. Mezi faktory ovlivňující hřebíkové spoje lze zahrnout typ použitého hřebíku, druh dřeva i vlhkost dřeva a další.

V této práci bude teoreticky rozebrán a experimentálně otestován vliv teplotního zatížení na změnu odporu dřeva proti vytažení hřebíku a parametru vytažení hřebíku. Zatížení nízkými teplotami v kombinaci s teplotami vysokými může simulovat teplotní zatížení v exteriéru a přinést tak nové poznatky o chování hřebíkových spojů při teplotním zatížení konstrukcí, které by mohly najít uplatnění i v praxi.

2. CÍL PRÁCE

Cílem této práce je experimentální zkoumání fyzikálních vlastností dřeva (vlhkosti a hustoty) po působení nízkých teplot nebo po cyklickém střídání nízkých a vysokých teplot a taktéž zkoumání odporu dřeva proti vytažení hřebíku a parametru vytažení hřebíku po cyklickém střídání nízkých a vysokých teplot. Do experimentálního zkoumání je zahrnuto:

- zjišťování odporu dřeva proti vytažení hřebíku R a parametru vytažení hřebíku f_{ax},
- 3 typy hřebíků: hladké, konvexní a spirálové,
- 2 druhy dřevin: smrk a modřín,
- 3 typy teploty prostředí: -15 °C a 70 °C, -25 °C a 70 °C, referenční (20 °C).

3. DŘEVO

Jako dřevo se označuje organický materiál rostoucí v přírodě, který je anizotropního charakteru a je nehomogenní. Vytváří se za spolupůsobení ovzduší a půdy v kmeni, větvích a kořenech dřevin. Dřevo představuje rostlinné pletivo, jehož převážná většina buněčných elementů má zdřevnatělé buněčné stěny. Jedná se o obnovující se surovinu a při správném hospodaření existuje téměř neomezený potenciál jeho zásob. Dřevo jako surovina se získává ze dvou hlavních skupin rostlin, kterými jsou listnaté dřeviny (krytosemenné) a dřeviny jehličnaté (nahosemenné). Jeho přírodní charakter, kresba, variabilita barev a estetičnost jsou velice ceněným prvkem v prostředí pro život člověka (Koželuh 1998, Gandelová a kol. 2002, Šlezingerová a Gandelová 2005, Werner a Zimmer 2009).

Z chemického hlediska lze na problematiku složení dřeva nahlížet dvěma pohledy. Jednak pohledem elementárního složení dřeva, tedy z jakých prvků se dřevo skládá. Elementární složení je u všech dřevin téměř totožné. Dřevní hmota průměrně obsahuje 49 % uhlíku, 44 % kyslíku a 6 % vodíku 0,1 % dusíku a 0,2-0,5 % popelovin (Shmulsky a Jones 2011).

Z pohledu složení dřeva z chemických sloučenin se jedná o složitý komplex, který je z 90-97 % složen z hlavních látek a zbytek tvoří látky doprovodné. Mezi hlavní látky patří celulóza, hemicelulózy a lignin. Procentuální zastoupení hlavních látek ve dřevě se pohybuje v hodnotách 46-56 % celulózy, 23-35 % hemicelulózy a 15-28 % ligninu. Mezi látky doprovodné patří živice, třísloviny, škroby a dále pak anorganické doprovodné látky (Čunderlík 2009).

Mezi výhody dřeva jako materiálu patří již výše zmíněná skutečnost, že se jedná o obnovitelný přírodní materiál, velká barevná variabilita, přirozenost a příjemný pocit na dotek i na pohled. Dále mezi výhody dřeva lze zařadit dobré tepelněizolační a elektroizolační vlastnosti a malou tepelnou roztažnost, výborné akustické vlastnosti, značnou chemickou odolnost a v neposlední řadě snadné opracování, schopnost držet spojovací prostředky a možnost snadno dřevo lepit a povrchově upravovat (Horáček 2008). V dnešní době, kdy se stále více do podvědomí lidí dostává

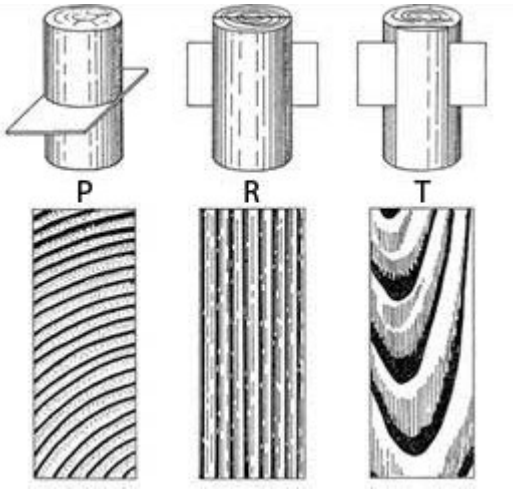
ekologie a jakési ekologické myšlení se tak dřevo jeví jako velice vhodný materiál, zejména právě na základě svého přírodního charakteru a obnovitelnosti.

Za nevýhody dřeva se považují jeho hygroskopické vlastnosti, tedy že dřevo mění svou vlhkost v závislosti na vlhkosti a teplotě okolního prostředí. Změny vlhkosti mají následný vliv na rozměrovou stabilitu dřeva. V závislosti na vlhkosti okolního prostředí se tak společně s vlhkostí dřeva mění i jeho rozměry (do meze nasycení vláken) a dochází k sesychání a bobtnání dřeva. Změna vlhkosti dřeva způsobuje taktéž změnu pevnosti a pružnosti dřeva při mechanickém namáhání. Další nevýhodou dřeva jsou vlastnosti lišící se v jeho jednotlivých anatomických směrech, tedy anizotropie dřeva. Velkou nevýhodou dřeva je i jeho hořlavost a možnost degradace biotickými i abiotickými činiteli. Poslední významnou nevýhodou dřeva je jeho nehomogenita, jejímž důsledkem je značná proměnlivost vlastností dřeva (Horáček 2008). Některé z uvedených nevýhod se však dají eliminovat vhodnou úpravou dřeva. Do těchto úprav lze zařadit termickou úpravu dřeva případně chemickou úpravu nebo impregnaci, a i vhodnou povrchovou úpravu dřevěných prvků. Správným konstrukčním řešením konstrukce ze dřeva a pravidelnou údržbou se taktéž uvedené nevýhody dají výrazně snížit.

Dřevo je jako konstrukční materiál lehký, a přitom velice pevný, což o mnohých ostatních konstrukčních materiálech nelze tvrdit. Velkými výhodami dřeva pro použití v konstrukcích jsou relativně nízká hustota a lehká opracovatelnost při schopnosti snášet velké mechanické zatížení. Poměrně snadno se spojuje lepením nebo mechanickými spojovacími prostředky, hlavně kovovými (Čunderlík 2009). Díky těmto vlastnostem je proto jako konstrukční materiál dřevo velice rozšířeno a využíváno a jeho použití na vytváření konstrukcí rozhodně neklesá, ale naopak se postupně zvyšuje.

3.1 Řezy a směry dřeva

Problematika řezů a směrů ve dřevě je důležitá z pohledu toho, že v každém anatomickém směru má dřevo rozdílné vlastnosti. Anatomické směry jsou důležité i při posuzování odolnosti dřeva proti vytažení hřebíků. Náčrt jednotlivých řezů dřeva je na Obr. 1. Následující kapitoly popisují jednotlivé řezy a směry ve dřevě.



Obr. 1: *Řezy dřeva (Balabán 1955)*

3.1.1 Radiální řez

Radiální řez se nazývá též středový nebo i poloměrový řez, na Obr. 1 je označen písmenem R. Jedná se o podélný řez vedený rovnoběžně s podélnou osou kmene. Radiální řez prochází středem kmene, tedy dření. Většina anatomických elementů dřeva je na tomto řezu řezána ve svých podélných rozměrech. Na radiálním řezu vytváří letokruhy téměř rovnoběžné pásy, široké cévy vytvářejí rýhy, to hlavně u jasanu, akátu a jilmu. Dřeňové paprsky vytvářejí na radiálním řezu rozmanitě tvarované, různě mohutné lesklé plochy, které jsou barevně odlišné od okolního dřeva, a které se nazývají zrcátka a vyskytují se především u listnáčů (Šlezingerová a Gandelová 2005).

3.1.2 Tangenciální řez

Tangenciální řez bývá často označován také jako tečnový případně fládrový, je vyobrazen na Obr. 1 a označen písmenem T. Tangenciální řez je vedený rovnoběžně s podélnou osou kmene v určité vzdálenosti od dřeně. Z pohledu příčného řezu prochází v poloze tečny k letokruhům. Ve střední části řezu vytvářejí letokruhy parabolické útvary, na okraji řezu mají pak letokruhy téměř rovnoběžný průběh. Anatomické elementy dřeva jsou zde řezány v podélných rozměrech, výjimkou jsou dřeňové paprsky nebo případně horizontální pryskyřičné kanálky. Široké dřeňové paprsky jsou zde viditelné ve svých příčných rozměrech jako různě široké a vysoké pásky. Nejčastěji jsou viditelné například u buku nebo u dubu. Délka pásku odpovídá výšce dřeňového paprsku. Široké cévy některých listnáčů jsou viditelné ve vrstvě jarního dřeva jako drobné malé rýhy, které jsou dobře viditelné například u dubu nebo jilmu (Gandelová a kol. 2002, Šlezingerová a Gandelová 2005).

3.1.3 Příčný řez

Příčný řez bývá v odborné literatuře nazýván taktéž jako čelní, případně transverzální a je na Obr. 1 označen písmenem P. Jedná se o první řez, který uděláme, pokud kácíme strom. Příčný řez je vedený kolmo na podélnou osu kmene. Letokruhy na příčném řezu vytvářejí soustavu soustředně uspořádaných kruhů se středem v biologickém středu kmene, tedy ve dřeni. V případě jehličnatých dřevin je příčný řez tvořen dobře rozlišitelnými světlejšími a tmavšími kruhy (Čunderlík 2009).

3.1.4 Základní směry ve dřevě

Ve dřevě rozeznáváme tři základní směry, kterými jsou podélný směr, radiální směr a tangenciální směr. Podélný směr je rovnoběžný s podélnou osou kmene a je kolmý na plochu příčného řezu a nazývá se taktéž směrem axiálním.

Radiální směr je veden ve směru dřeňových paprsků a je kolmý na plochu tangenciálního řezu.

Tangenciální směr je ve směru tečny k letokruhům a je kolmý na plochu radiálního řezu (Požgaj a kol. 1997).

3.2 Charakteristika dřeva jehličnatých dřevin

Jehličnaté dřeviny jsou vývojově starší a na Zemi rostly dříve než dřeviny listnaté. Dřevo jehličnatých dřevin má jednodušší stavbu, než je stavba dřeva dřevin listnatých. Dřevo jehličnanů se skládá především z tracheid, jinak také cévic, které mají funkci vodivou a zároveň zabezpečují pevnost dřeva a jejich zastoupení ve dřevě jehličnanů je 90–95 % hmoty. Dalším typem anatomických elementů ve dřevě jehličnatých dřevin jsou pak parenchymatické buňky, které tvoří dřeňové paprsky, podélný parenchym a podílejí se na stavbě pryskyřičných kanálků (Hoadley 2000, Šlezingerová a Gandelová 2005, Čunderlík 2009, Siklienka a Kminiak 2013). Pro výzkum prováděný v této práci je důležité znát dřevo smrku a modřínu. Dvě následující kapitoly se dřevem smrku a modřínu zaobírají.

3.2.1 Smrkové dřevo

Smrk je nejdůležitější hospodářskou dřevinou v Evropě. Jeho aktuální zastoupení v České republice je 54 %. Smrk se zařazuje do skupiny dřevin s vyzrálým dřevem (Musil 2003).

Ve smrkovém dřevě se nachází velké množství pryskyřičných kanálků. Přechod mezi jarním dřevem a letním dřevem je klasifikován jako pozvolný. Dřevo smrku je poměrně měkké a lehké, ale zároveň pevné i elastické. Jeho předností je velice snadná opracovatelnost. Smrkové dřevo lze označit jako středně odolné proti působení povětrnostních vlivů a jako náchylné na napadení houbami a hmyzem. Hustota jarního dřeva u smrku se pohybuje kolem hodnoty 350 kg/m^3, zatímco hustota dřeva letního dosahuje hodnot okolo 870 kg/m^3. Hustota dřeva smrku při vlhkosti 12 % se uvádí podle různých autorů okolo hodnot 400-450 kg/m^3. Na Obr. 2 je zachyceno smrkové dřevo ve třech základních řezech.

Smrkové dřevo je jedním z nejvíce využívaných druhů dřeva pro zpracování, to souvisí se značným rozšířením smrku a jeho velkém

procentuálním zastoupení v druhové skladbě lesů. Svoje uplatnění nachází jako stavební a konstrukční dřevo pro nadzemní i podzemní stavby jako jsou střešní a mostní konstrukce, konstrukce dřevostaveb, sloupy nebo důlní dříví. Dále se pak používá na ploty a zahradní konstrukce. Ze smrku se dále vyrábí v nemalém množství i nábytek, interiérový design a stavebně truhlářské výrobky, jako jsou okna, dveře nebo schodiště. Své uplatnění nachází i při výrobě dýh a při výrobě aglomerovaných materiálů. Nedílným odvětvím pro zpracování smrku je taktéž chemický průmysl, tedy výroba buničiny a papíru. Okrajovým ale důležitým využitím smrku jsou pak hudební nástroje (Vavrčík 2004, Josten a kol. 2009, Böhm a Zeidler 2018).

Obr. 2: *Smrkové dřevo (Zeidler 2012)*

3.2.2 Modřínové dřevo

Modřín je dřevina hor i nižších poloh střední Evropy a její procentuální zastoupení v České republice je 3,7 % (Musil 2003).

Modřín se řadí mezi jádrové dřeviny, to znamená, že má běl i jádro. Běl modřínu má nažloutlou barvu a je značně úzká. Jádro je tmavší. Je zbarvené do červeno hněda případně i fialovo hněda. V modřínovém dřevě se nacházejí pryskyřičné kanálky a přechod mezi jarním dřevem a letním dřevem je definován jako ostrý. Dřevo modřínu se mezi jehličnany řadí k tvrdším a je velice odolné. Zejména pak výtečně odolává působení povětrnostních vlivů a vodě. Opracovávat modřínové dřevo je poměrně jednoduché, ale má sklony k tomu se třepit. Hustota modřínového dřeva při

vlhkosti 12 % je udávaná v hodnotách okolo 600 kg/m^3. Obr. 3 ukazuje základní řezy modřínového dřeva.

Modřínové dřevo nachází své uplatnění při výrobě povětrností zatížených výrobků, jako jsou vnější obklady nebo ploty a exteriérové konstrukce zahradních domků a podobně. Dalším uplatněním modřínového řeziva je výroba lodí a konstrukcí zatížených vodou jako jsou mola. Z modřínu se taktéž vyrábí stavebně truhlářské výrobky jako okna nebo dveře a obklady. Své uplatnění nachází i v nábytkářství a při výrobě dýh. V menší míře se modřín zpracovává v chemickém průmyslu (Vavrčík 2004, Horáček 2008, Josten a kol. 2009).

Obr. 3: *Modřínové dřevo (Zeidler 2012)*

3.3 Fyzikální vlastnosti dřeva

Z pohledu fyzikálních vlastností dřeva je pro tuto práci důležitá především vlhkost a hustota. Obě tyto vlastnosti jsou v následujících kapitolách popsány a doplněny kapitolou popisující vztah dřeva k teplu.

3.3.1 Vlhkost dřeva

Dřevo, stejně jako mnoho dalších přírodních materiálů, je hygroskopické. To znamená, že přijímá vodu z okolního prostředí. Výměna vlhkosti, tedy její přijímání a vypouštění ze dřeva, mezi dřevem a okolním prostředím závisí na relativní vlhkosti a teplotě okolního prostředí, tedy vzduchu. Skutečnost, že dřevo mění svou vlhkost má zásadní vliv na vlastnosti dřeva a jeho použití (Glass a Zelinka 2010).

Vlhkost dřeva je tedy charakterizována jako přítomnost vody ve dřevě. Podle způsobu jejího výpočtu vlhkost rozdělujeme na vlhkost absolutní a vlhkost relativní. Absolutní vlhkost je vyjádřena jako podíl hmotnosti vody k hmotnosti absolutně suchého dřeva a její výpočet ukazuje vzorec 1. Absolutní vlhkost se používá pro charakteristiku fyzikálních a mechanických vlastností dřeva (Horáček 2008).

$$w_{abs} = \frac{m_w - m_o}{m_o} * 100 = \frac{m_v}{m_o} * 100 \quad [\%] \tag{1}$$

w_{abs}….absolutní vlhkost dřeva,

m_w…...hmotnost mokrého dřeva [g],

m_0…....hmotnost absolutně suchého dřeva [g],

m_v……hmotnost vody ve dřevě [g].

Relativní vlhkost dřeva je udávána jako poměr hmotnosti vody k hmotnosti mokrého dřeva a vztah pro její výpočet je znázorněn ve vzorci 2. Relativní vlhkost dřeva se nejčastěji používá v případech, kdy potřebujeme znát procentuální zastoupení vody z celkové hmotnosti mokrého dřeva. Relativní vlhkost dřeva nachází uplatnění při prodeji nebo nákupu dřeva podle jeho hmotnosti (Horáček 2008).

$$w_{rel} = \frac{m_w - m_o}{m_w} * 100 = \frac{m_v}{m_w} * 100 \quad [\%] \tag{2}$$

w_{rel}…..relativní vlhkost dřeva,

m_w…...hmotnost mokrého dřeva [g],

m_0……hmotnost absolutně suchého dřeva [g],

m_v……hmotnost vody ve dřevě [g].

3.3.2 Hustota dřeva

Hustota dřeva, tedy jeho hmotnost na jednotku objemu, je jednou z nejdůležitějších charakteristik dřeva. Podle údaje znázorňujícího hustotu dřeva se dají většinou předpovědět i další jeho vlastnosti. Podle hustoty lze předpovědět například tvrdost, složitost obrábění dřeva nebo odolnost proti vytažení hřebíků (Hoadley 2000).

Hustota dřeva je velice závislá na vlhkosti dřeva. Proto je důležité udávat hustotu dřeva při určité vlhkosti, která je nejčastěji 12 % anebo se můžeme setkat s hustotou dřeva udávanou v absolutně suchém stavu. Jednotkou hustoty jsou kg/m^3 nebo g/cm^3 a její výpočet je znázorněn vzorcem 3.

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad [\text{kg/m}^3] \tag{3}$$

ρ……hustota,
m…...hmotnost [kg],
V……objem [m^3].

U dřeva se dá mimo hustoty stanovit dále ještě redukovaná hustota a konvenční hustota. Redukovaná hustota dřeva je dána podílem hmotnosti dřeva v absolutně suchém stavu a jeho objemem při určité vlhkosti, který je vyjádřen vzorcem 4. Redukovaná hustota udává, kolik sušiny se nachází v nabobtnaném objemu dřeva.

Konvenční hustota dřeva je definována jako podíl hmotnosti dřeva v absolutně suchém stavu a jeho maximálního objemu. Vzorec pro výpočet nese číslo 5. Konvenční hustota nachází uplatnění především při váhové přejímce dříví (Horáček 2008).

$$\rho_{rw} = \frac{m_0}{V_w} \qquad [\text{kg/m}^3] \tag{4}$$

ρ_{rw}…..redukovaná hustota,
m_0…...hmotnost v absolutně suchém stavu [kg],
V_w……objem při určité vlhkosti [m^3].

$$\rho_k = \frac{m_0}{V_{max}} \quad [\text{kg/m}^3] \tag{5}$$

ρ_k…....konvenční hustota,
m_0…...hmotnost v absolutně suchém stavu [kg],
V_{max}….maximální objem [m^3].

Oproti jiným stavebním materiálům má dřevo relativně nízkou hustotu při zachování vysoké pevnosti. To znamená, že i při nízké hmotnosti dokáže

být velice efektivní a přenést velké zatížení a tuto vlastnost lze považovat za jednu z největších výhod dřeva (Koželuh 1998, Kolb 2008).

3.3.3 Vztah dřeva k teplu

Dřevo není příliš dobrým vodičem tepla. Tepelná vodivost závisí na hustotě dřeva, jeho vlhkosti a na teplotě. Vodivost tepla je taktéž ovlivněna pórovitostí dřeva. Pórovitost snižuje tepelnou vodivost dřeva díky tomu, že vzduch uzavřený v pórech dřeva, který zaujímá značné procento objemu dřeva, má velice nízkou tepelnou vodivost a snižuje tak vlastní vodivost dřevní hmoty. Čím jsou jemnější póry v materiálu, tím lépe materiál izoluje, jelikož nedochází k pohybu vzduchu v pórech a je tak zamezeno přenosu tepla prouděním. Pokud dochází ke zvyšování vlhkosti dřeva, dochází současně s tím i ke zvyšování tepelné vodivosti dřeva.

Tepelná vodivost se vyjadřuje koeficientem tepelné vodivosti, který představuje množství tepla, které projde 1 m^2 dřeva za hodinu k opačnému povrchu dřeva vzdálenému 1 metr při teplotním rozdílu 1 K. Koeficient tepelné vodivosti se označuje jako λ [$W*m^{-1}*K^{-1}$]. Tepelná vodivost dřeva je vyšší rovnoběžně s vlákny dřeva než napříč vláken. Díky své ne příliš dobré tepelné vodivosti je dřevo velice dobrým izolantem, což má za následek použití dřeva jako obkladů nebo podlah. Příkladem nízké hodnoty tepelné vodivosti je fakt, že 15 cm tlustá dřevěná stěna poskytuje stejnou izolaci jako cihlová zeď tloušťky 60 cm (Balabán 1955, Fábryová a Božeková 1986).

3.4 Technologické vlastnosti dřeva

Do skupiny technologických vlastností dřeva zařazujeme druhy zatížení, které vyvolávají složité stavy napjatosti, a proto je nelze zařadit do klasických mechanických vlastností dřeva. Označení technologické vlastnosti dřeva nesou, protože se většinou jedná o vlastnosti spojené s technologickým procesem zpracování dřeva. Do skupiny technologických vlastností dřeva zařazujeme houževnatost dřeva, tvrdost dřeva, štípatelnost dřeva, opotřebovatelnost dřeva, ohýbatelnost a schopnost dřeva držet

spojovací prostředky (Požgaj 1987, Matovič 1993). Všechny technologické vlastnosti jsou v následujících podkapitolách stručně popsány, největší důraz je kladen na schopnost dřeva držet spojovací prostředky.

3.4.1 Schopnost dřeva držet spojovací prostředky

Technologická vlastnost schopnost držet spojovací prostředky přestavuje především schopnost dřeva držet hřebíky, vruty, skoby a další spojovací prostředky. Schopnosti dřeva držet spojovací prostředky se využívá při spojování v truhlářství, nábytkářství, stavebnictví případně při výrobě obalů a u dřevěných konstrukcí.

Když hřebík vniká do dřeva jednotlivá vlákna dřeva se částečně přeřezávají a ohýbají a tlačí na dřík hřebíku ze strany. Tím vytváří tření, které má za následek, že hřebík ve dřevě drží.

V praxi lze rozlišit statickou a dynamickou únosnost spojů, což znamená odpor dřeva proti vniknutí nebo vytažení spojovacích prostředků při statickém a dynamickém zatížení.

Statická únosnost je stanovena jako síla potřebná k vniknutí nebo vytažení spojovacího prostředku ze dřeva nebo také odpor dřeva proti vytažení zavedeného spojovacího prostředku.

Dynamická únosnost se experimentálně stanovuje pomocí pulzátorů a zjišťuje se při ní trvalá únosnost při kmitavém zatížení. Vyjadřuje se procentuálně ke statické únosnosti spojovacího prostředku.

Schopnost dřeva držet mechanické spojovací prostředky závisí na druhu dřeviny, hustotě a vlhkosti dřeva. Se zvýšením hustoty dřeva se odpor k vytažení spojovacího prostředku zvyšuje. Odpor suchého dřeva proti vnikání spojovacího prostředku je větší než proti jeho vytažení a taktéž odpor proti vytažení hřebíku se zvyšuje s průměrem hřebíku. U vlhkého dřeva není rozdíl mezi odporem proti vnikání spojovacího prostředku a odporem proti vytažení spojovacího prostředku znatelný. Vlhkost dřeva usnadňuje vnikání kovových spojovacích prostředků. S rostoucí vlhkostí se taktéž snižuje schopnost dřeva držet spojovací prostředky. S vysycháním dřeva se jeho schopnost držet již ve dřevě zavedené spojovací prostředky

snižuje, a to z důvodu změny pružných deformací na trvalé, což má za následek, že tření mezi dřevem a hřebíkem, které udržuje spojovací prostředek ve dřevě se snižuje (Perelygin 1965, Fábryová a Božeková 1986, Gandelová a kol. 2002).

3.4.2 Houževnatost dřeva

Houževnatost dřeva se označuje jako mechanická práce, která je spotřebovaná na vytvoření plastické deformace. Má velice úzký vztah s plastičností dřeva. Podle druhu zatížení rozdělujeme houževnatost na statickou a dynamickou (rázovou houževnatost).

Statická houževnatost je mechanická vlastnost dřeva, která představuje mechanickou energii spotřebovanou ke vzniku plastické deformace. V případě, že je deformační práce malá a plastická deformace téměř zanedbatelná řadíme takové materiály mezi křehké. Naopak u dřeva je deformace velice energeticky náročná a velmi výrazná. Dřevo tak řadíme mezi houževnaté materiály.

Schopnost dřeva absorbovat práci vykonanou rázovým ohybem označujeme jako rázovou houževnatost dřeva. Rázová houževnatost charakterizuje schopnost dřeva odolávat rázovým zatížením. Je vyjádřena jako přerážecí energie potřebná k přeražení vzorku dřeva definovaných rozměrů (Gandelová a kol. 2002).

3.4.3 Tvrdost dřeva

Tvrdost dřeva charakterizuje jeho schopnost klást odpor proti vnikání jiného tělesa. Tvrdost dřeva ovlivňuje zpracování dřeva. Čím je dřevo tvrdší, tím více odolává průniku řezné hrany a zvyšuje opotřebení nástroje. Tvrdost dřeva má taktéž význam při zatížení dřeva oděrem. Tvrdost dřeva je možno měřit dvěma způsoby. Podle způsobu měření lze stanovit tvrdost Brinellovu nebo tvrdost Jankovu (Zejda a kol. 2007, Josten a kol. 2009).

Při měřeni tvrdosti podle Brinella se ocelová kulička s průměrem 10 mm vtlačuje do dřeva. Pro velmi tvrdé dřeviny je zatěžující síla 1000 N, pro středně tvrdé dřeviny 500 N a pro dřeviny velmi měkké je pak zatěžující

síla 100 N. Následně se při této zkoušce měří pomocí Brinellovi lupy průměr otlačení kuličky ve dřevě. Ze získaného průměru se vypočte plocha otlačení a Brinellova tvrdost je pak stanovena jako poměr zatěžující síly a této plochy. Brinellova tvrdost se stanovuje pro čelní, radiální i tangenciální rovinu (Požgaj a kol. 1997).

Metoda měření tvrdosti podle Janka, tedy Jankova metoda, je založena na tom, že do rovné čelní plochy dřeva se vtlačuje ocelová polokoule s průměrem 11,284 mm. Přesně daný průměr polokoule zajišťuje otlačovanou plochu přesně 100 mm^2. Nerovnoměrnost stavby dřeva a možnost výskytu chyb dřeva mohou ovlivnit výsledky měření. Z tohoto důvodu se při měření provádí na jednom vzorku větší množství zkoušek a výsledkem měření je průměr hodnot všech těchto zkoušek (Balabán 1955).

Balabán (1955) podle tvrdosti dřevo rozděluje do šesti skupin tvrdosti, kterými jsou:

- dřeva velmi měkká (smrk, borovice, jedle, topol, vrba, lípa),
- dřeva měkká (modřín, douglaska, bříza, olše),
- dřeva středně tvrdá (platan, jilm, kaštanovník),
- dřeva tvrdá (tis, dub, ořešák, javor, akát, habr),
- dřeva velmi tvrdá,
- dřeva neobyčejně tvrdá.

3.4.4 Štípatelnost dřeva

Štípatelnost dřeva lze označit jako odolnost proti štípání, tedy jako odpor dřeva proti jeho rozdělení za pomoci klínu. Štípání dřeva je poměrně složitý jev, při kterém se pomocí klínu dřevo rozděluje na více částí a provádí se nejčastěji ve směru vláken v radiální nebo tangenciální rovině. Odolnost proti štípání dřeva je vyšší u listnáčů než u jehličnanů. Negativní vliv na odpor proti štípání má taktéž zvyšující se vlhkost dřeva, a to až do bodu nasycení vláken. Své opodstatnění má štípatelnost při výrobě dřevěných polotovarů jako jsou šindele nebo dužiny (Fábryová a Božeková 1986, Matovič 1993, Zejda a kol. 2007).

3.4.5 Opotřebovatelnost dřeva

Opotřebovatelnost dřeva lze charakterizovat jako jeho schopnost odolávat postupnému mechanickému porušování povrchových vrstev. Nejvýraznějším činitelem poškozujícím dřevo jeho opotřebováním je tření. Mírou opotřebení dřeva je odpor proti opotřebení, který je vyjádřen jako úbytek hmoty zkušebního tělesa při zatížení opotřebením (Matovič 1993).

3.4.6 Ohýbatelnost dřeva

Ohýbatelnost dřeva je založena na schopnosti dřeva poměrně snadno se deformovat působením ohybového momentu. Zkoušení ohýbatelnosti dřeva se provádí na šablonách se stále se snižujícím poloměrem ohybu až dokud nedojde k prasknutí dřevěného vzorku. Mírou ohýbatelnosti je tedy nejmenší možný poloměr ohybu, do kterého lze dřevěné těleso ohnout bez jeho porušení. Ohýbatelnost dřeva lze zvýšit plastifikací, tedy pařením nebo vařením dřeva (Zejda a kol. 2007).

V této práci prováděný experiment se zaobírá taktéž vlivem nízkých teplot nebo teplotního střídání na vlastnosti dřeva. V následujících kapitolách je tato problematika rozebrána.

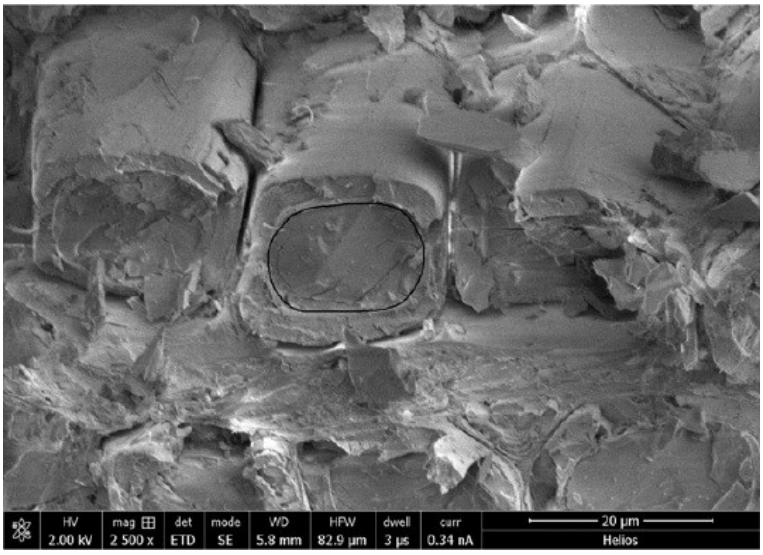
3.5 Vliv nízkých teplot na dřevo

Pevnost a tvrdost dřeva se se zvyšující se teplotou snižují, a naopak při snižující se teplotě se zvyšují. Působení teplot na dřevo je téměř vždy v interakci s vlhkostí. Pokud teplota nepoklesne pod -30 °C dochází ve dřevě pouze k zmrznutí vody volné, která je ve zmrzlém stavu zachycena na Obr. 4. Voda vázaná mrzne až při nižších teplotách (Winandy 1994, Cividini 2001).

Při vysoké vlhkosti dřeva v kombinaci s nízkými teplotami mají uvedené podmínky významný vliv na pevnost dřeva. Pevnost dřeva se zvyšuje. Ke zvýšení pevnosti dřeva dochází v důsledku vzniku ledových krystalků v lumenech dřeva. Pevnost dřeva při libovolné vlhkosti při nízkých teplotách je vyšší než při stejné vlhkosti a pokojové teplotě. Do vlhkosti

přibližně 30 % má zvyšování vlhkosti na pevnost dřeva negativní vliv při teplotě pokojové i teplotě záporné.

Při pokojové teplotě nemá vlhkost dřeva vyšší, než je bod nasycení vláken žádný vliv na mechanické vlastnosti dřeva, což ovšem nelze říct o teplotách nízkých. Při nízkých teplotách naopak po dosažení bodu nasycení vláken pevnost opět stoupá. Svého maxima při záporných teplotách dosahuje pevnost při vlhkosti 85 % a následně opět klesá. Tato skutečnost je vysvětlena vznikem ledu ve dřevě. S rostoucí vlhkostí se zaplňuje stále více lumenů ve dřevě ledem, a proto stoupá celková pevnost dřeva. Zvyšování pevnosti pokračuje až do doby, dokud krystaly ledu nevytvoří souvislou mřížku a při tomto stavu začíná zatížení přenášet led, který je méně plastický než dřevo. Při dalším zvyšování napětí se led začíná opět rozpouštět a tím pevnost klesá přibližně až na hodnotu, které dosahuje při bodě nasycení vláken (Matovič 1993, Požgaj a kol. 1997).



Obr. 4: *Zamrzlá voda volná ve dřevě (Zhao a kol. 2015)*

U suchého dřeva dochází k výrazně nižšímu zvýšení pevnosti než u dřeva s vyšší vlhkostí. Suché dřevo borovice ochlazované z 0 °C až na -80 °C zvýšilo svou pevnost v tlaku ve směru vláken o hodnotu přibližně 10 %. Naproti tomu dřevo s vlhkostí nad bod nasycení vláken zvýšilo svou pevnost přibližně o 40 % (Matovič 1993, Požgaj a kol. 1997).

U dřeva smrku v mokrém stavu s vlhkostí okolo 155 % a jeho zmrazování za různých podmínek a jeho následném rozmrazení a vysušení na vlhkost 12 % se ukázal pokles mechanických vlastností v závislosti na podmínkách zmrazování. U rychlého zmrazování dřeva s rychlostí -10 °C/h až do teploty -25 °C se pokles mechanických vlastností neprojevil ve velké míře. Nejvyšší pokles nastal u tahového zatížení v tangenciálním směru a tento pokles byl 6 %. U dřeva zmrazovaného rychlostí -1 °C/h byl pokles mechanických vlastností dřeva značně výraznější. Pevnost v tlaku podél vláken poklesla o 31 % a největšího zhoršení se dosáhlo u tvrdosti dřeva, u té byl pokles 34 %. Pokles mechanických vlastností je vysvětlen vznikem ledových krystalů ve dřevě a ukazuje na velký vliv rychlosti zmrazování na vlastnosti dřeva. Při pomalém zmrazování vznikají ve dřevě větší krystaly ledu a více poškozují buněčnou stěnu dřeva vznikem mikrotrhlin. Při opětovném rozmražení již dřevo díky vzniklým mikrotrhlinám nedosahuje původních mechanických vlastností (Szmutku a kol. 2013).

V případě dřeva břízy se ukázalo, že modul pružnosti a pevnost dřeva v ohybu se se snižující se teplotou zvyšují. Skutečnost, že modul pružnosti a pevnost se zvyšovala se prokázala u dřeva mokrého i u dřeva sušeného na vzduchu. Pro dřevo absolutně suché nedocházelo k významné změně těchto vlastností (Zhao a kol. 2015).

Při zatížení dřeva nízkou teplotou hraje významnou roli taktéž čas působení teplotního zatížení současně s velikostí dřevěného prvku. Pokud je zatížení teplem krátké a průřez tělesa velký, nedojde k dosažení stejné teploty v celém průřezu dřeva a jeho vlastnosti se tak na povrchu a uprostřed liší. Efekt teplotního zatížení bude znatelný pouze v povrchových vrstvách zkušebního tělesa, zatímco středová část si ponechá původní teplotu a původní vlastnosti. Ke změně teploty v celém průřezu tělesa je potřeba delší doba zatěžování nízkou teplotou (Green a kol. 1999).

3.6 Vliv zvýšených teplot na dřevo

Pokud na dřevo působí vyšší teploty - okolo 100 °C, tak se jeho mechanické vlastnosti snižují se zvyšující se teplotou, dobou působení

teploty a vlhkostí dřeva. Snižuje se pevnost dřeva v tahu, ohybu, tlaku i přerážecí práce a modul pružnosti. Snížení pevnosti dřeva při zvyšování teploty se vysvětluje změknutím látek, které vyplňují celulózovou kostru a spojují jednotlivé buňky dřeva. Při zvyšování obsahu vázané vody se popsaná skutečnost projevuje stále výrazněji.

Ohříváním dřeva se snižují jeho rozměrové změny, tedy sesychání a bobtnání, a zvyšuje se tak jeho rozměrová stabilita, ale často je tato skutečnost spojená s poklesem mechanických vlastností dřeva. Vliv zvýšených teplot na vlastnosti dřeva se mění s vlhkostí dřeva. Zvyšováním teploty a vlhkosti se pevnost dřeva v tlaku snižuje. Působení obou uvedených faktorů současně má na pokles mechanických vlastností dřeva výraznější vliv než působení pouze jednoho z nich. Vliv vlhkosti se na změnu mechanických vlastností dřeva projevuje pouze do meze nasycení vláken, další zvyšování vlhkosti již mechanické vlastnosti dřeva neovlivňuje (Perelygin 1965, Matovič 1993).

3.7 Vliv teplotního střídání na dřevo

U teplotního střídání dochází k cyklické změně teploty dřeva z kladných na záporné nebo ze záporných na kladné a tato změna se podle počtu cyklů neustále opakuje.

Při výzkumu zaměřeném na změnu vlastností dřeva při cyklickém zatížení teplotami v rozsahu od -30 °C do 60 °C na borovicové a dubové dřevo ve třech vlhkostních stavech, 12 %, 23 % a absolutně suché dřevo, v počtu 40, 80 a 120 cyklů se prokázal pokles mechanických vlastností dřeva. Se zvyšujícím se počtem cyklů teplotního zatížení dřeva se i jeho mechanické vlastnosti stále snižují. Prokázalo se, že mechanické vlastnosti dřeva klesají pro všechny vlhkostní stavy a pro všechny varianty změn teploty. Nejvýraznější pokles vlastností nastává při prvních 40-ti cyklech a následně se rychlost poklesu vlastností snižuje. Nejvíce ovlivněnými vlastnostmi dřeva při cyklickém zatížení teplotou jsou přerážecí práce a pevnost v tlaku napříč vláken následované smykovou a tlakovou pevností podél vláken (Perelygin 1965).

Szmutku a kol. (2013) zkoumali vliv takovéhoto teplotního střídání na vlastnosti dřeva. Střídavé teplotní zatížení má na vlastnosti dřeva výraznější vliv než pouze samotné zmrazování s následným rozmrazením a testováním vlastností dřeva. U mokrého smrkového dřeva s vlhkostí okolo 155 % zatíženého cyklickým zmrazováním a rozmrazováním ve vnější expozici s teplotou -18 °C až 4 °C po dobu jednoho měsíce a následně klimatizovaného na vlhkost 12 % byl pokles jeho vlastností velice výrazný. Pokles pevnosti v ohybu byl 24 % a modulu pružnosti 37 %. Pro pevnost v tlaku podél vláken byl pokles 37 % oproti dřevu bez teplotního zatížení.

U mokrého dřeva smrku cyklicky zmrazovaného na -25 °C a následně ohřívaného na 10 °C ve dvanáctihodinových cyklech po dobu sedmi dní a jejich následném klimatizováním na vlhkost 12 % byl zjištěn i pokles schopnosti držet hřebíky. V radiálním směru byl pokles 8 % a ve směru tangenciálním 1-2 % (Szmutku a kol. 2012).

3.8 Spojování dřeva

Dřevěné konstrukce se obvykle skládají z většího počtu jednotlivých prvků, které je potřeba v konstrukci spojit do jednoho. Výběr vhodného spoje pro dřevěnou konstrukci se řídí nejen zatížením konstrukce a únosností spoje. Důležitým bodem při výběru spoje jednotlivých prvků může být i estetické hledisko nebo způsob montáže konstrukce do celku (Koželuh 1998, Ambrose a Tripeny 2012).

Od dávné minulosti se k tomuto účelu využívalo klasických tesařských vazeb, jinak řečeno klasických tesařských spojů, které bývaly často zajišťovány dřevěnými kónickými kolíky. Od konce 18. století se začíná masivně rozšiřovat použití prken a fošen. Pro spojování těchto typů řeziva do konstrukčních celků se začínají používat kovové spojovací prostředky. Jako první z těchto se objevují hřebíky. Postupně přicházejí kovové hmoždíky a svorníky následované vruty a dalšími modernějšími spojovacími prostředky z kovu.

V současné době se ke spojování jednotlivých prvků dřevěných konstrukcí v některých případech stále používají klasické tesařské spoje

často zajištěné kovovými spojovacími prostředky. Příkladem dnešního použití klasických tesařských spojů jsou klasické krovy.

Mimo klasických tesařských spojů se dnes ke spojování dřevěných konstrukcí používá kovových spojovacích prostředků. V současnosti používané jsou ocelové kolíky, hřebíky a sponky, vruty a svorníky. Mezi dnes používané kovové spojovací prostředky lze zahrnout i složitější spojovací prostředky nebo spojovací prvky používané samostatně nebo v kombinaci s výše zmíněnými kovovými spojovacími prostředky. Složitější spojovací prostředky jsou vyrobeny z ocelového plechu, který je upraven do požadovaného tvaru. Do této skupiny zařazujeme hmoždíky, desky s prolisovanými trny nebo desky s navařenými trny a zařazujeme sem i svařované prvky z ocelového plechu jako jsou třmeny.

Samostatnou skupinu dnes používaných spojů jsou spoje lepené, které se používají v kombinaci s klasickými tesařskými spoji nebo samostatně například pří výrobě lepeného lamelového dřeva (Kuklík 2005, Jelínek 2012).

3.8.1 Rozdělení spojů dřeva

Podle uspořádání jednotlivých spojovaných prvků ve spoji lze spoje dřeva rozdělit podle Kuklíka (2005) do tří skupin:

- nastavování - spojování jednotlivých dřevěných prvků v podélném směru,
- sdružování - spojování jednotlivých dřevěných prvků v příčném směru,
- spojování do styčníku - spojování jednotlivých dřevěných prvků pod různými úhly v rovině a v prostoru.

Podle poddajnosti spoje při zatížení se spoje dřeva podle Jelínka (2012) rozdělují na:

- spoje poddajné,
- spoje nepoddajné.

U spojů dřevěných prvků poddajných dochází při zatížení působící silou k určitému malému posuvu ve spoji. Do kategorie poddajných spojů zařazujeme spoje jednak klasické tesařské a taktéž spoje dřevěných prvků spojené za pomoci mechanických spojovacích prostředků. U poddajných spojů dochází k poddajnosti při přenosu sil především na základě jejich otlačení. U spojů spojovacími prostředky kolíkového typu je poddajnost způsobena otlačením otvoru pro spojovací prostředek a taktéž smykovým zatížením dřevěných prvků od dříků spojovacích prostředků.

U spojů nepoddajných při zatížení k žádnému pohybu nedochází a takovýto spoj je tak bez jakékoli vůle naprosto pevný. Do skupiny nepoddajných spojů patří lepené spoje dřevěných prvků (Jelínek 2012).

3.8.2 Spoje mechanickými spojovacími prostředky

Mechanické spojovací prostředky do dřeva jsou rozděleny do dvou skupin, kterými jsou spojovací prostředky kolíkového typu a dále pak spojovací prostředky povrchové. Téměř všechny mechanické spojovací prostředky jsou vyrobeny z kovu.

Kolíkové spojovací prostředky jsou hřebíky, kolíky, vruty, sponky a svorníky. Všechny kolíkové spojovací prostředky jsou při přenosu zatížení konstrukce často ohýbány a zatlačovány do dřeva.

Spojovací prostředky povrchové jsou do spojů dřevěných prvků vkládány nebo zalisovány. Zatížení spoje je pak přenášeno v zásadě na povrchu konstrukčního prvku. Do skupiny povrchových spojovacích prostředků patří hmoždíky a dále pak styčníkové desky s prolisovanými trny (Koželuh 1998, Kuklík 2005).

3.8.2.1 Hřebíkové spoje

Hřebíkové spoje jsou spoje dřeva provedené za pomoci hřebíků. Jak již bylo zmíněno výše, jedná se o spoje pomocí mechanických spojovacích prostředků kolíkového typu a řadí se tak do skupiny poddajných spojů.

Při vytváření hřebíkového spoje se spojují minimálně dva dřevěné prvky, z nichž slabší by měl být vždy připojován k silnějšímu. V hřebíkovém spoji by se pak měli nacházet vždy alespoň dva hřebíky (Jelínek 2012).

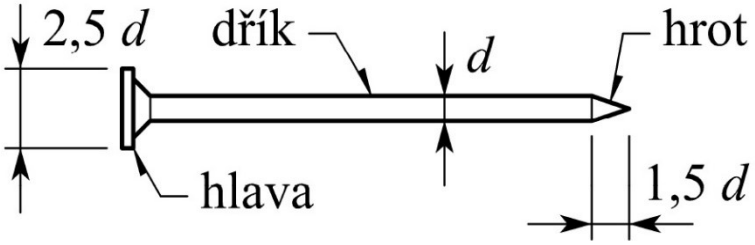
Hřebíkové spoje se používají téměř ve všech dřevěných konstrukcích, které přenášejí menší zatížení a spojují jednoduché prvky. Své uplatnění tedy najdou často při výrobě rámů a stěn dřevostaveb, střešních konstrukcích a sbíjených nosníků, případně při konstrukcích podlah nebo připojování palubek. Hřebíkové spoje se dále uplatňují i při výrobě obalů a palet nebo nábytku a při speciálních dřevěných výrobcích (Kermani 1999).

3.8.2.1.1. Hřebíky

Hřebíky jsou podle Cabrera a kol. (2018) třetími nejčastěji používanými mechanickými spojovacími prostředky na dřevo v Evropě. Jedná se o rovné štíhlé spojovací prvky, které jsou na jedné straně špičaté a na druhém konci mívají obvykle hlavičku. Hřebík se tedy skládá z dříku, špičky a hlavičky. Nejčastěji mají kruhový průřez, může však být upraven i na průřez čtvercový. Existuje mnoho typů hřebíků, které se prodávají v nepřeberném množství průměrů a délek. Hřebíky jsou nabízené bez povrchové úpravy, galvanicky pokovené, leptané, smaltované, případně potažené speciálním polymerem nebo cementovým povlakem. Povrchové úpravy se používají nejčastěji z důvodu zamezení koroze hřebíku a prodloužení tak jeho životnosti. Nejčastěji se na trhu vyskytují hřebíky bez povrchové úpravy a hřebíky zinkované (Kermani 1999, Soltis 1999, Larsen 2003).

Rozměry hřebíků se uvádějí ve tvaru: *d x l*, kde *d* uvádí průměr hřebíku a *l* je pak jeho délka (Jelínek 2012). Jednotlivé části a rozměry hladkého hřebíku jsou pak znázorněny na Obr. 5.

Nejčastěji používané jsou hřebíky hladké. Hladké hřebíky se vyrábí z ocelového drátu s minimální pevností v tahu 600 MPa. Průměry těchto hřebíků jsou standardizovány až do průměru 8 mm.



Obr. 5: *Hřebík (Pilgr 2008)*

Pro zvýšení odporu hřebíku proti vytažení a jeho parametru vytažení se provádí úprava dříku hřebíku, která může spočívat ve válcování drážek nebo závitů. Další možností je zkroucení hřebíku se čtvercovým dříkem. Speciálními úpravami dříku hřebíku se získávají hřebíky spirálové nebo konvexní, které se používají pro přenos většího zatížení při stejném průměru hřebíku (Koželuh 1998).

Hřebíky s hladkým dříkem drží ve dřevě a dávají spoji pevnost díky tření hřebíku se dřevem. Konvexní a spirálové hřebíky mají zajištěnou pevnost spoje pomocí tření hřebíku se dřevem a současně i vlákny dřeva, která se nacházejí v mezerách mezi zářezy nebo závity hřebíku. Při vytahování hřebíku musí být tato vlákna porušena, aby bylo možno hřebík vytáhnout, a zvyšuje se tak odpor proti vytažení i parametr vytažení hřebíku (Rammer a kol. 2001). Obrázky 6, 7 a 8 znázorňují výše popsané druhy hřebíků, konkrétně pak hřebík hladký na Obr. 6, hřebík konvexní na Obr. 7 a na Obr. 8 hřebík spirálový.

Obr. 6: *Hladký hřebík (Chalko Příkrý s.r.o. 2020)*

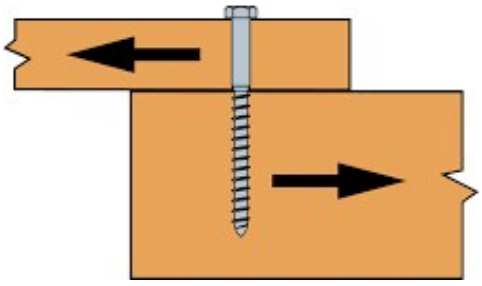
Obr. 7: *Konvexní hřebík (Chalko Příkrý s.r.o. 2020)*

Obr. 8: *Spirálový hřebík (Chalko Příkrý s.r.o. 2020)*

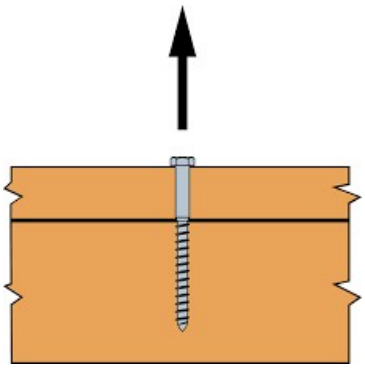
3.8.2.1.2. Zatížení hřebíkových spojů

Zatížení hřebíkových spojů nastává v dřevěných konstrukcích dvěma způsoby. Jedním z těchto zatížení je boční zatížení hřebíkového spoje na střih, a to buď jednostřižné nebo více střižné. Kolika střižný hřebík ve spoji je se určuje počtem spojovaných prvků a tím, na kolika místech je hřebík namáhán na střih. Schéma střihového zatížení spojovacího prostředku je na Obr. 9. Zobrazený spojovací prostředek je namáhán jednostřižně.

Druhým typem zatížení hřebíkových spojů je zatížení na vytažení hřebíku (Ozelton a Baird 2006). Schéma zatížení spojovacího prostředku na vytažení je znázorněno na Obr. 10.



Obr. 9: *Zatížení na střih (Simpson Strong Inc. 2020)*



Obr. 10: *Zatížení na vytažení (Simpson Strong Inc. 2020)*

V následující kapitole popsané faktory působící na dřevo s hřebíky, zejména pak druh hřebíku, druh dřeva a podmínky použití spoje, mají výraznější vliv na odolnost proti vytažení hřebíků než na vlastnosti hřebíkového spoje namáhaného na střih (Rammer 2010).

3.8.2.1.3. Odpor dřeva proti vytažení hřebíku a parametr vytažení hřebíku

Při zatížení na vytažení hřebíku dochází k vytahování hřebíku ze dřeva ve směru jeho podélné osy působením zatěžující síly. Únosnost hřebíku na vytažení je rovna maximální síle na vytažení hřebíku F_{max}. Výpočet parametru vytažení hřebíku ze dřeva se podle normy ČSN EN 1382 (2018) provádí podle vzorce 6.

$$f_{ax} = \frac{F_{max}}{d * l_d} \text{ [MPa]} \quad (6)$$

f_{ax}.....parametr vytažení hřebíku,
F_{max}…maximální síla na vytažení hřebíku [N],
d…….průměr hřebíku [mm],
l_d…....délka zaražení hřebíku [mm].

Výpočet odporu dřeva proti vytažení hřebíku se na základě normy ČSN 49 0135 (1984) provádí podle vzorce 7.

$$R = \frac{F_{max}}{l} \text{ [N/mm]} \quad (7)$$

R……..odpor dřeva proti vytažení hřebíku,
F_{max}…maximální síla na vytažení hřebíku [N],
l ….....délka zaražení hřebíku [mm].

Hřebíky s hladkým dříkem při zatížení na vytažení vykazují relativně nízký odpor proti vytažení i nízký parametr vytažení a měly by tak být používány pouze pro lehké zatížení. Parametr vytažení a odpor proti vytažení u hřebíkových spojů lze zvýšit použitím hřebíků s upraveným dříkem, tedy hřebíků konvexních nebo spirálových. Hřebíky s upraveným

dříkem poskytují vyšší odpor proti vytažení díky speciálně tvarovanému dříku a taktéž parametr vytažení je u nich vyšší.

Odpor proti vytažení a parametr vytažení hřebíku při zatížení v jeho ose závisí na typu hřebíku, hustotě dřeva, průměru hřebíku a taktéž na délce jeho zaražení. Dalšími faktory ovlivňujícími odpor hřebíku proti jeho vytažení a jeho parametr vytažení jsou povrchová úprava hřebíku a čas, po který je hřebík ve dřevě zaražen a u hladkých hřebíků hraje významnou roli taktéž vlhkost dřeva. U hřebíků konvexních a spirálových nejsou odpor proti vytažení a parametr vytažení hřebíku vlhkostí ovlivněny v takovém rozsahu jako u hřebíků hladkých (Ozelton a Baird 2006, Rammer 2010).

Hřebíky zatížené na vytažení v koncových vláknech dřeva, tedy tak, že jejich osa je rovnoběžná se směrem vláken dřeva, mají o mnoho menší únosnost na vytažení a měly by se používat pouze pro drobné nezatížené prvky jako jsou například římsová prkna. Jejich návrhová únosnost je snížena na jednu třetinu oproti hřebíkům používaným do dřeva v příčném směru (Werner a Zimmer 2009).

Aytekin (2008) ve svém výzkumu uvádí, že při použití hladkých hřebíků průměru 2,5 mm do dřeva jedle kavkazské je síla potřebná k vytažení hřebíku napříč vláken v tangenciálním směru 525,6 N, v radiálním směru 523,2 N, ale ve směru podélném jen 320,7 N. Analogie poklesu maximální síly na vytažení hladkého hřebíku v podélném směru oproti směrům příčným je patrná i u dřeva dubu a borovice černé.

Porovnání síly potřebné k vytažení různých typů hřebíků ze dřeva smrku, borovice a jedle se věnují ve svém výzkumu také Luszczki a kol. (2013). V jejich výzkumu se porovnávala maximální vytahovací síla pro hřebíky hladké, konvexní a spirálové. Hladké hřebíky měly průměr 3,3 mm a délku 62,5 mm. Hřebíky konvexní byly použité s průměrem 3,34 mm a s délkou 62,6 mm. Hřebíky spirálové měly průměr 3,71 mm a délku 60,1 mm. Hřebíky byly do dřeva zaraženy tak, že mezera mezi povrchem dřeva a hlavičkou hřebíku byla 10 mm. Výsledky jejich výzkumu ukazují, že největší vytahovací síla je potřeba pro hřebíky spirálové, menší pak pro hřebíky konvexní a nejnižší síly bylo potřeba pro vytažení hřebíků hladkých.

Pro vytažení hladkého hřebíku bylo potřeba průměrně síly 730 N, pro hřebíky konvexní byla tato síla 1260 N a pro hřebíky spirálové 1390 N.

3.8.2.1.4. Vliv vlhkosti a teploty na hřebíkové spoje

Odpor suchého dřeva proti vnikání hřebíku do dřeva je vyšší než odpor suchého dřeva proti vytažení hřebíku. Rostoucí vlhkost dřeva vnikání spojovacích prostředků z kovu do dřeva usnadňuje. S rostoucí vlhkostí se taktéž snižuje schopnost dřeva držet mechanické spojovací prostředky.

Při vysychání dřeva, ve kterém jsou již zavedeny kovové spojovací prostředky dochází ke snižování jejich odporu proti vytažení i parametru vytažení. Popsaný jev je způsoben změnou pružných deformací na trvalé a tím pádem dochází ke snížení tření mezi hřebíkem a dřevem a tím i ke snížení odporu proti vytažení hřebíku a parametru vytažení hřebíku. Na uvedenou skutečnost je třeba dbát zejména při použití hřebíků do dřeva s vyšší vlhkostí, které s vysycháním dřeva výrazně snižují svou únosnost a spoj tak ztrácí pevnost (Anderson a Heebink 1964, Fábryová a Božeková 1986, Gandelová a kol. 2002).

Stejnou teorii podporuje výzkum z roku 1964. Do dřeva o vlhkosti 60 % byly zaráženy hřebíky a dřevo se následně sušilo a postupně se snižující se vlhkostí se měřil odpor dřeva proti vytažení hřebíků. Odpor proti vytažení hřebíků se se snižující vlhkostí pod bodem nasycení vláken stále snižoval (Bacher 1964).

Vliv střídání záporných a kladných teplot na dřevo je zmíněn již v předešlých kapitolách, a to včetně vlivu na odolnost proti vytažení hřebíků a jejich únosnost. Szmutku a kol. (2012) uvádějí, že u dřeva zatíženého střídáním záporných a kladných teplot na mokré dřevo dochází k poklesu schopnosti dřeva držet spojovací prostředky. Při týdenním střídání dvanáctihodinových cyklů s teplotami -25 °C a 10 °C s následným klimatizováním vzorků dřeva na vlhkost 12 % došlo k poklesu schopnosti držet hřebíky v radiálním směru o 8 % a v tangenciálním směru o 1-2 %.

Při tepelné úpravě dřeva smrku při teplotách 140 °C, 180 °C a 240 °C klesá se zvyšující se teplotou úpravy dřeva jeho schopnost držet

hřebíky. Se zvyšující se teplotou tepelné úpravy nad 140 °C postupně klesá odpor proti vytažení hřebíku. Pokles odporu proti vytažení se prokázal ve všech třech anatomických směrech dřeva, tedy ve směru radiálním, tangenciálním i podélném, a i u všech použitých druzích hřebíků, a to hladkých, konvexních i spirálových (Barcík a kol. 2014).

4. METODIKA

Metodika je část práce zahrnující podrobný popis všech činností při provádění tohoto experimentu. Metodika je jakýsi návod na provedení experimentu. V případě opakování zde prováděného experimentu je metodika vodítkem pro postup.

Metodiku k v této práci prováděnému experimentu lze rozdělit na několik dílčích bodů:

- stanovení podmínek experimentu,
- výroba zkušebních těles,
- značení zkušebních těles
- klimatizování zkušebních těles,
- stanovení hustoty zkušebních těles,
- opatření zkušebních těles hřebíky
- teplotní zatěžování zkušebních těles
- stanovení odporu dřeva proti vytažení hřebíku a parametru vytažení hřebíku,
- ověření vlhkosti zkušebních těles,
- statistické vyhodnocení naměřených dat.

4.1 Podmínky experimentu

Pro experiment bylo vybráno dřevo dvou jehličnatých dřevin. Jednou z nich je smrk, druhou pak modřín. Pro testování odporu dřeva proti vytažení hřebíku a parametru vytažení hřebíku byly vybrány tři nejpoužívanější a nejdostupnější druhy hřebíků. Použitými druhy hřebíků jsou hřebík hladký, hřebík konvexní a hřebík spirálový.

Stanovené teplotní zatížení pro experiment je kombinace teplot -15 °C a 70 °C, druhým způsobem teplotního zatížení je pak kombinace teplot -25 °C a 70 °C.

Pro experiment byly pro každou dřevinu použity dva druhy zatížení teplotou (-15 °C a 70 °C, -25 °C a 70 °C) a dále pak série zkušebních těles bez teplotního zatížení, tedy referenční zkušební tělesa (20 °C). Pro každou dřevinu a každou skupinu zkušebních těles podle zatížení teplotou včetně

referenčních těles, byly použity tři výše uvedené druhy hřebíků. Pro každou kombinaci byl stanoven počet zkušebních těles na 20 kusů, a navíc bylo vyrobeno několik zkušebních těles pro případ poškození zkušebních těles. Celkem bylo tedy použito 360 zkušebních těles. Počty zkušebních těles jsou pro přehlednost uvedeny pro smrk v Tab. 1 a pro modřín v Tab. 2.

Dále bylo stanoveno, že odpor dřeva proti vytažení hřebíku i parametr vytažení hřebíku se u všech kombinací dřeviny, teplotního zatížení a typu hřebíků budou stanovovat v tangenciálním a v radiálním směru dřeva.

Tab. 1: *Počet smrkových zkušebních těles pro experiment*

SMRK			
Teplotní zatížení	**Typ hřebíku**		
	Hladký	**Konvexní**	**Spirálový**
Reference	20 ks	20 ks	20 ks
-15 °C, 70 °C	20 ks	20 ks	20 ks
-25 °C, 70 °C	20 ks	20 ks	20 ks

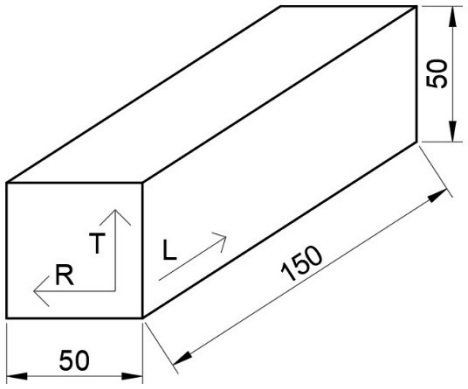
Tab. 2: *Počet modřínových zkušebních těles pro experiment*

MODŘÍN			
Teplotní zatížení	**Typ hřebíku**		
	Hladký	**Konvexní**	**Spirálový**
Reference	20 ks	20 ks	20 ks
-15 °C, 70 °C	20 ks	20 ks	20 ks
-25 °C, 70 °C	20 ks	20 ks	20 ks

4.2 Příprava zkušebních těles

Pro zkušební tělesa ze smrku a modřínu byl podle normy ČSN EN 1382 (2018) stanoven rozměr 50, 50 a 150 mm v radiálním, tangenciálním a podélném směru. Rozměry zkušebního tělesa názorně ukazuje Obr. 11, radiální směr je označen písmenem R, tangenciální směr písmenem T a písmeno L označuje podélný směr. Pro výrobu zkušebních těles byly vybrány radiální fošny, aby na zkušebních tělesech byl patrný rozdíl mezi radiálním a tangenciálním směrem. Pro zkušební tělesa

vyrobená z modřínu bylo použité jádrové dřevo, případně byly na zkušebních tělesech ponechány pouze malé části běli.



Obr. 11: *Rozměry zkušebního tělesa*

Ze smrkových a modřínových fošen byly nejprve ořezány obliny. Následně bylo provedeno vyříznutí dřeňové části fošny.

Fošny bez oblin s vyříznutou středovou částí byly připraveny k rozřezání na jednotlivé latě, ke kterému došlo v dalším kroku. Na kotoučové pile byly fošny bez oblin a středové části rozřezány na rozměry latě s přídavkem na další opracování. Jednotlivé latě byly při výrobě značeny, aby bylo možno přesně určit jejich polohu ve fošně.

Latě v délce čtyři metry byly kvůli svému prohnutí před dalším opracováním nařezány na kusy dlouhé 1 metr. Všechny kusy byly opět značeny tak, aby bylo možné jednotlivé metrové kusy složit opět zpět do celé latě.

Na metrových přířezech bylo provedeno orovnání dvou sousedních ploch do pravého úhlu, což je operace, která byla prováděna na srovnávací frézce.

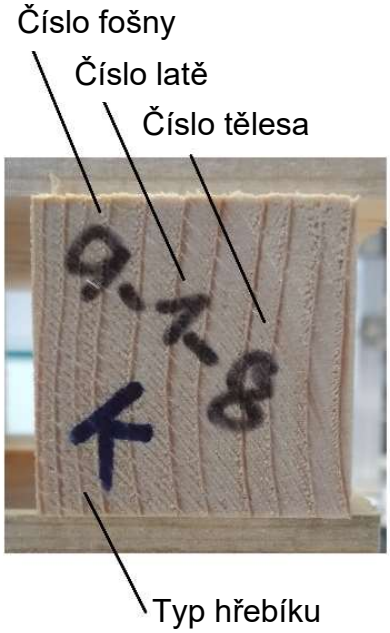
Jednotlivé metrové přířezy byly následně za pomoci tloušťkovací frézky opracovány na pravoúhlý průřez daných rozměrů. Popsanými kroky bylo dosaženo metrových přířezů přesného průřezu připravených na krácení na jednotlivá zkušební tělesa.

Krácení přířezů na jednotlivá zkušební tělesa probíhalo na kotoučové pile s pomocí dorazu nastaveného na 150 mm. Nejprve bylo vždy zaříznuto

čelo každého přířezu a následně byl přířez krácen na jednotlivá zkušební tělesa požadované délky. Při krácení latí docházelo zároveň k vyřezání a odstranění vad dřeva, kterými byly především praskliny, smolníky a suky.

Každé jedno zkušební těleso bylo ihned po uříznutí na požadovanou délku označeno na čelní plochu trojmístným kódem. Kód na každém tělese obsahuje vždy tři číslice oddělené pomlčkou (Obr. 12). První číslice v kódu udává číslo fošny, ze které bylo těleso vyrobeno. Druhá číslice udává číslo latě ve fošně, vždy počítáno od jedné strany fošny. Číslice třetí udává pořadí tělesa v lati vždy počítáno od stejného čela fošny.

Po zapsání vyrobených zkušebních těles do programu Microsoft Excel 2016 a jejich rozdělení do jednotlivých skupin byl kód každého zkušebního tělesa ještě doplněn písmenem, které udávalo druh použitého hřebíku.



Obr. 12: *Značení zkušebních těles*

Zkušební tělesa byla rozdělena do skupin podle svého budoucího zatížení teplem a v každé této skupině byly ještě rozděleny jednotlivé typy hřebíků pro každé zkušební těleso.

Vždy byly tři po sobě jdoucí zkušební tělesa v lati určena pro stejný typ hřebíku. První zkušební těleso v pořadí bylo zařazeno do skupiny těles referenčních. Následující zkušební těleso, v pořadí tedy druhé bylo

zařazeno do skupiny pro teplotní zatížení kombinací -15 °C a 70 °C. Zkušební těleso v pořadí třetí bylo zařazeno do skupiny s teplotním zatížením kombinací teplot -25 °C a 70 °C. Výsledkem rozdělení tedy je, že vždy tři za sebou jdoucí tělesa jsou určena pro stejný typ hřebíku a první z nich je referenční, druhé pro zatížení kombinací -15 °C a 70 °C a třetí těleso pro zatížení -25 °C a 70 °C. První trojice těles byla určena pro osazení hladkými hřebíky, následující trojice hřebíky konvexními, následující trojice hřebíky spirálovými a další trojice opět hřebíky hladkými. Postup rozdělování se neustále opakoval, dokud nedošlo k rozdělení všech zkušebních těles. Pro přehlednost je příklad rozdělení zkušebních těles znázorněn v Tab. 3.

Tab. 3: *Rozdělení zkušebních těles*

Číslo tělesa	Druh hřebíku	Teplotní zatížení
3-4-1	Hladký	Reference
3-4-2	Hladký	-15 °C, 70 °C
3-4-3	Hladký	-25 °C, 70 °C
3-4-4	Konvexní	Reference
3-4-5	Konvexní	-15 °C, 70 °C
3-4-6	Konvexní	-25 °C, 70 °C
3-4-7	Spirálový	Reference
3-4-8	Spirálový	-15 °C, 70 °C
3-4-9	Spirálový	-25 °C, 70 °C

Po výrobě a označení byla všechna zkušební tělesa připravena ke klimatizování na vlhkost 12 %. Klimatizace probíhala v klimatizační komoře Memmert, GmbH. HPP 750 uvedené na Obr. 13. Podmínky v klimatizační komoře byly nastaveny na teplotu 20 °C a relativní vlhkost vzduchu 65 % (Obr. 14). Zkušební tělesa byla v klimatizační komoře vyskládána do malých hranic (Obr. 15), kde každé patro hranice bylo složeno ze dvou zkušebních těles, mezi nimiž byla vynechána mezera velikosti jednoho zkušebního tělesa a každé další patro hranice bylo pootočeno proti

předchozímu o 90°. V případě lichého počtu zkušebních těles byly v nejvyšším patře hranice uložena tři zkušební tělesa. Mezery byly mezi jednotlivými tělesy vynechány z důvodu proudění vzduchu a rychlejší klimatizaci na požadovanou vlhkost zkušebních těles.

Obr. 13: *Klimatizační komora*

Obr. 14: *Podmínky v klimatizační komoře*

V klimatizační komoře byla vždy umístěna pouze jedna třetina všech zkušebních těles, tedy 120 kusů. Nejprve byla v klimatizační komoře klimatizována všechna zkušební tělesa určená jako referenční, následně tělesa určená k teplotnímu zatížení -15 °C a 70 °C a jako poslední pak zkušební tělesa určená k teplotnímu zatížení kombinací teplot -25 °C a 70 °C.

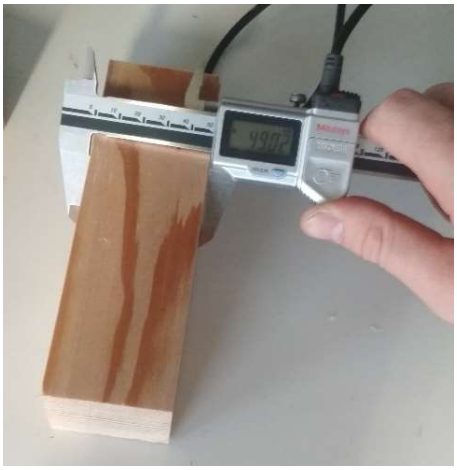
Ze všech zkušebních těles uložených v klimatizační komoře byly vybrány vždy dvě smrková a dvě modřínová zkušební tělesa, která byla

průběžně vážena na laboratorní váze IMAL BL 100 LCD s přesností na setiny gramu. Norma ČSN EN 1382 (2018) uvádí, že pokud se naměřené hmotnosti zkušebních těles při dvou po sobě jdoucích měřeních nelišily o více než 0,1 % hmotnosti tělesa, byla tělesa považována za klimatizovaná na vlhkost 12 % a připravena k dalšímu pokračování experimentu.

Obr. 15: *Zkušební tělesa v klimatizační komoře*

Po klimatizování byla u všech zkušebních těles stanovena hustota. Každé zkušební těleso bylo po klimatizaci změřeno a zváženo. Stanovení hmotnosti zkušebních těles probíhalo pomocí laboratorní váhy IMAL BL 100 LCD opět s přesností na setiny gramu, jak ukazuje Obr. 16. Měření se provádělo digitálním posuvným měřítkem s přesností na setiny milimetru (Obr. 17).

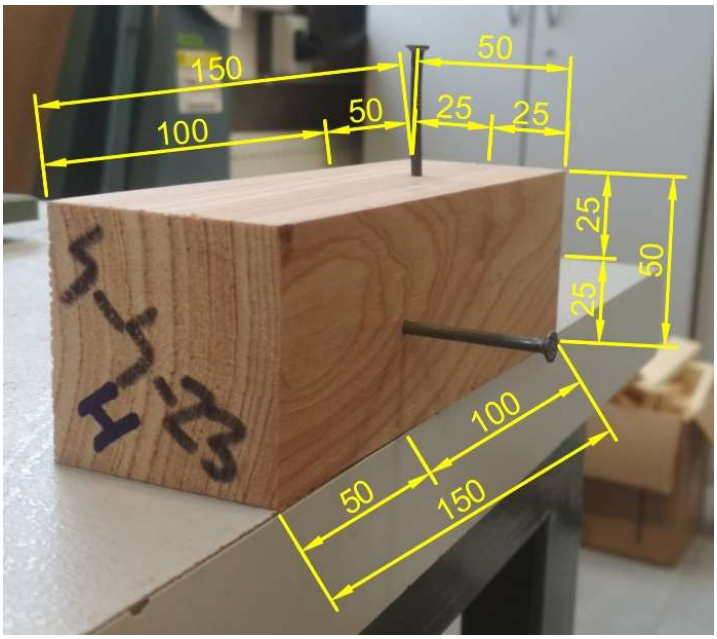
Obr. 16: *Vážení zkušebních těles*



Obr. 17: *Měření zkušebních těles*

Všechny naměřené hodnoty byly zapisovány do tabulky v programu Microsoft Excel 2016 vždy k příslušnému zkušebnímu tělesu. Z naměřených hodnot byla následně výpočtem podle vzorce 3 stanovena hustota zkušebních těles po klimatizaci.

Každé klimatizované zkušební těleso bylo po změření a zvážení opatřeno dvojicí hřebíků. Hřebíky byly ve zkušebních tělesech rozmístěny dle normy ČSN EN 1382 (2018) a rozmístění hřebíků je znázorněno a okótováno na Obr. 18. Hloubka zaražení hřebíků byla taktéž stanovena podle normy ČSN EN 1382 (2018), a to na 30 mm.



Obr. 18: *Rozmístění hřebíků ve zkušebním tělese*

Hřebíky byly zaraženy do dřeva v radiálním a tangenciálním směru. Pro experiment byly použity tři typy hřebíků stejného průměru. Použité hladké hřebíky měly průměr 2,8 mm a délku 63 mm, na jejichž výrobu je použit za studena tažený hřebíkový drát kruhového průřezu. Použitý hladký hřebík je na Obr. 19 a výrobcem použitých hladkých hřebíků je firma Chalko Příkrý s.r.o.

Obr. 19: *Hladký hřebík 2,8 x 63 mm*

Hřebíky spirálové byly taktéž průměru 2,8 mm a délky 63 mm. Materiálem na jejich výrobu je za studena tažený hřebíkový drát čtvercového průřezu a jejich výrobcem je také firma Chalko Příkrý s.r.o. (Obr. 20).

Obr. 20: *Spirálový hřebík 2,8 x 63 mm*

Posledním v tomto experimentu použitým typem hřebíků jsou hřebíky konvexní. Průměr použitých konvexních hřebíků je opět 2,8 mm a délka je 60 mm (Obr. 21). Jejich výrobcem je firma Hašpl a.s.

Obr. 21: *Konvexní hřebík 2,8 x 60 mm*

Všechny tři použité typy hřebíků jsou v provedení bez povrchové úpravy a každý hřebík byl při experimentu použitý pouze jednou

K zaražení hřebíků bylo použito kladivo a pomocná šablona zabezpečující přesnou polohu hřebíku a sloužila zároveň jako doraz pro

přesnou hloubku jeho zaražení (Obr. 22). Šablony byly ve dvou vyhotoveních s rozdílnou tloušťkou kvůli dvěma různým délkám hřebíků. Vrchní strana obou šablon byla opatřena plechem, aby byla zabezpečena stále stejná hloubka zaražení hřebíku, která byla na základě normy ČSN EN 1382 (2018) stanovena na 30 mm a nedocházelo postupem času k omačkání šablony a zvyšování hloubky zaražení hřebíku. V případě modřínových zkušebních těles, které obsahovaly část bělového dřeva byly hřebíky zaraženy vždy do jádrového dřeva.

Obr. 22: *Šablona na zarážení hřebíků*

Po opatření hřebíky byla zkušební tělesa stanovená jako referenční připravena k vytahování hřebíků. Zkušební tělesa určená pro zatížení kombinací teplot -15 °C a 70 °C a kombinací -25 °C a 70 °C byla po opatření hřebíky opět zvážena s přesností na setiny gramu. Navážená hodnota byla zapsána do tabulky v programu Microsoft Excel 2016 vždy k příslušnému zkušebnímu tělesu.

U zkušebních těles zvážených i s hřebíky byla následně prostým odečtem hmotnosti zkušebního tělesa po klimatizování od hmotnosti s hřebíky stanovena hmotnost hřebíků v každém zkušebním tělese.

4.3 Teplotní zatěžování zkušebních těles

Zkušební tělesa určená k teplotnímu zatížení, byla po opatření hřebíky a stanovení hmotnosti uložena do laboratorního mrazícího boxu LIEBHERR, který byl s dostatečným předstihem nastaven a vychlazen na teplotu -15 °C nebo -25 °C podle zmrazované série těles. Použitý laboratorní mrazící box je zobrazen na Obr. 23. Zkušební tělesa byla v mrazícím boxu uložena stejně jako v klimatizační komoře, tedy do hranic. V mrazícím boxu byla zkušební tělesa uložena po dobu 12 hodin. Po uplynutí této doby byla zkušební tělesa vyjmuta. Na zkušebních tělesech vyjmutých z mrazícího boxu byly stanoveny rozměry pomocí posuvného měřítka a hmotnost pomocí laboratorní váhy IMAL BL 100 LCD. Rozměry byly stanoveny s přesností na setiny milimetru a hmotnost s přesností na setiny gramu.

Obr. 23: *Laboratorní mrazící box*

Po změření a zvážení byla zkušební tělesa umístěna do laboratorní sušárny BINDER (Obr. 24), která byla předem nastavena a vyhřáta na teplotu 70 °C. V laboratorní sušárně byla zkušební tělesa uložena po dobu 12 hodin. Po uplynutí stanovené doby byla zkušební tělesa z laboratorní sušárny vyjmuta a stejně jako v předchozím kroku po skončení mražení a se stejnou přesností, byly změřeny rozměry každého zkušebního tělesa posuvným měřítkem a byla stanovena hmotnost každého zkušebního tělesa pomocí laboratorní váhy IMAL BL 100 LCD.

Obr. 24: *Laboratorní sušárna*

Zkušební tělesa, která prošla stádiem mražení a následného ohřevu a byla u nich stanovena hmotnost a rozměry, byla připravena na zkoušku pro stanovení odporu dřeva proti vytažení hřebíku a parametru vytažení hřebíku.

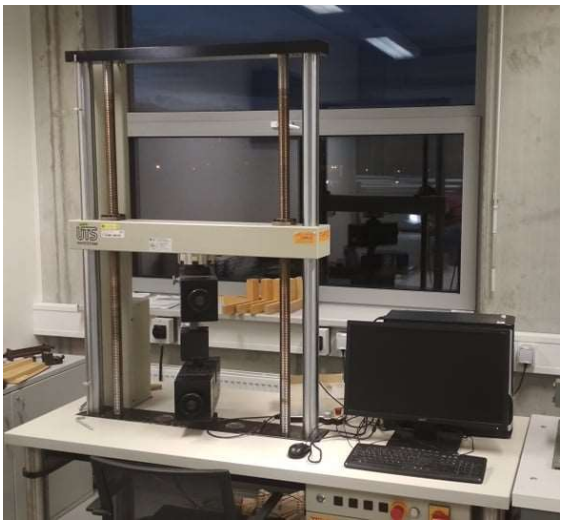
4.4 Stanovení odporu dřeva proti vytažení hřebíku a parametru vytažení hřebíku

Pro všechna zkušební tělesa, tedy referenční zkušební tělesa a dvě sady zkušebních těles zatížených teplotním střídáním (-15 °C a 70 °C, -25 °C a 70 °C), byla následně stanovována maximální síla na vytažení hřebíku F_{max} v radiálním a v tangenciálním směru. Maximální síla na vytažení hřebíku byla vždy pro dané zkušební těleso zapisována do tabulky v programu Microsoft Excel 2016 a podle vzorců 6 a 7 byl vypočítán parametr vytažení f_{ax} a také odpor proti vytažení hřebíku R.

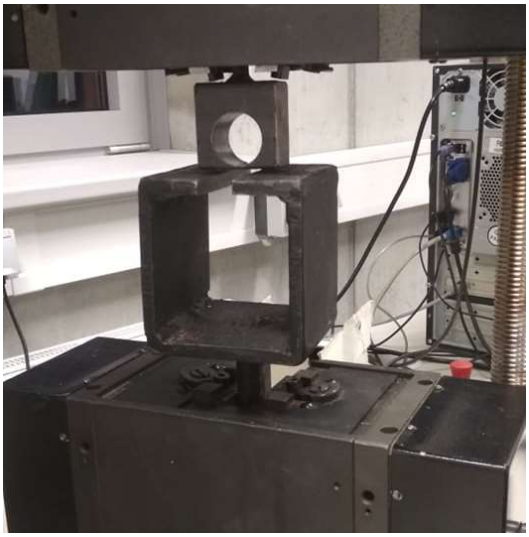
Maximální síla na vytažení hřebíku byla stanovována za pomoci zkušebního trhacího stroje UTS 50 od firmy Testsysteme, GmbH, s maximálním možným zatížením 50 kN (Obr. 25). Trhací stroj je ovládán pomocí počítače se softwarem TIRAtest.

Zkušební tělesa byla v trhacím stroji upnuta pomocí speciálního přípravku umožňujícího zachycení hlavičky hřebíku do horních čelistí stroje, který zajišťoval osové působení síly. Druhá část přípravku umožňovala

upnutí zkušebního tělesa do spodních čelistí stroje. Přípravek byl vyroben z masivní oceli a je zachycen na Obr. 26.



Obr. 25: *Zkušební trhací stroj UTS 50*

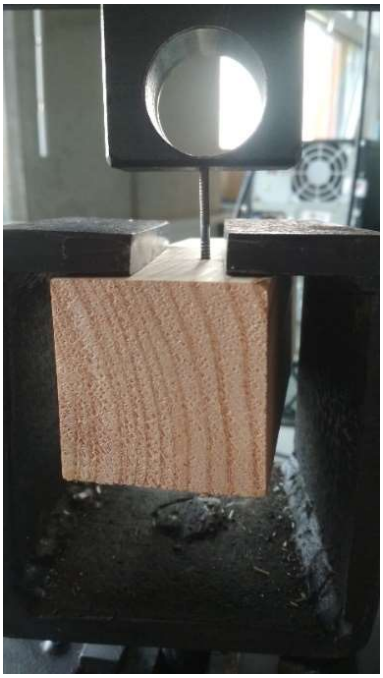


Obr. 26: *Přípravek na vytahování hřebíků*

Na trhacím stroji byla nastavena výchozí poloha umožňující uložení vzorku do přípravku. Dosedací síla byla nastavena na F_0 = 20 N a dosahovalo se jí rychlostí V_0 = 60 mm/min. Po dosažení síly F_0 se rychlost zkoušky přepnula na zkušební rychlost V_1, která byla nastavena na 2-3 mm/min. Nastavenou zkušební rychlostí zkouška postupovala až do svého ukončení. Ukončení zkoušky bylo nastaveno při poklesu síly o 20 %. Celá zkouška měla trvání 60 ± 15 sekund, jak udává norma ČSN EN 1382

(2018). Průběh zkoušky s upnutým zkušebním tělesem zachycuje Obr. 27. Po ukončení zkoušky se čelisti trhacího stroje vrátily do výchozí polohy, aby bylo možno zkušební těleso vyjmout a otočit nebo případně vložit jiné.

Výstupem měření byla maximální síla na vytažení hřebíku F_{max}, která byla po ukončení zkoušky zapsána, vždy k příslušnému zkušebnímu tělesu a příslušnému anatomickému směru dřeva, do tabulky v programu Microsoft Excel 2016. Z naměřené maximální síly na vytažení hřebíku F_{max} byl následně podle vzorce 6 vypočten parametr vytažení hřebíku f_{ax} a také odpor dřeva proti vytažení hřebíku R, který byl vypočten podle vzorce 7.



Obr. 27: *Upnutí zkušebního tělesa v přípravku*

4.5 Ověření vlhkosti zkušebních těles

Po stanovení maximální síly na vytažení hřebíku F_{max} byla z každé skupiny zkušebních těles, tedy referenčních zkušebních těles a dvou skupin zkušebních těles zatížených teplotním střídáním (-15 °C a 70 °C, -25 °C a 70 °C), vybrána dvě zkušební tělesa ze smrku a dvě z modřínu. Celkem bylo tedy vybráno 12 zkušebních těles, která byla vložena do laboratorní sušárny BINDER nastavené na 103 °C. V průběhu sušení byla zkušební tělesa průběžně vážena na laboratorní váze IMAL BL 100 LCD, dokud se

hmotnost každého tělesa neustálila. Po ustálení hmotnosti byla tato hmotnost společně s hmotnostmi naměřenými po klimatizování, po mražení a po ohřevu při teplotě 70 °C dosazena do vzorce 1. Provedeným výpočtem byly stanoveny vlhkosti zkušebních těles během experimentu a bylo zároveň ověřeno, zda zkušební tělesa po klimatizování měla skutečně vlhkost 12 %.

4.6 Vyhodnocení získaných dat

Veškerá naměřená data byla zapisována do tabulek v programu Microsoft Excel 2016. V excelových tabulkách byla získaná data uchovávána a podle potřeby řazena a tříděna. V programu Microsoft Excel 2016 byly taktéž z naměřených dat podle příslušných vzorců vypočítávány hodnoty hustoty zkušebních těles a dále byly pak vypočteny hodnoty hmotnosti hřebíků v každém tělese. Odpor proti vytažení hřebíku a parametr vytažení hřebíku byly taktéž vypočteny v programu Microsoft Excel 2016.

Data vypočtená programem Excel byla dále statisticky zpracována v softwaru Statistica 14 od společnosti Tibco Inc. V rámci softwaru Statistica 14 byla použita více faktorová analýza rozptylu ANOVA, která využívá Fischerova testu.

ANOVA využívá 95 % interval spolehlivosti, což znamená, že připouští statistickou chybu maximálně 5 %, v absolutních hodnotách 0,05. Hladina významnosti statistického vyhodnocení je tedy stanovena na 0,05. V tabulkách ve výsledcích je hladina významnosti uvedena ve sloupci „Hladina významnosti“. Pokud její hodnota nabývá hodnoty nižší než 0,05, pak je hodnocený faktor statisticky významný a je v tabulce uveden červenou barvou. Pokud je hodnota hladiny významnosti nad 0,05 je uvedena barvou černou a hodnocený faktor je statisticky nevýznamný, jelikož statistická chyba je vyšší, než je dovolená hodnota.

5. VÝSLEDKY A DISKUSE

V kapitole „Výsledky a diskuse“ jsou všechny získané výsledky předkládány ve formě přehledných tabulek a grafů, které popisují vliv teplotního zatížení na vybrané fyzikální vlastnosti dřeva, konkrétně hustotu a vlhkost, a taktéž na odpor dřeva proti vytažení hřebíku a na parametr vytažení hřebíku.

Všechny naměřené hodnoty hustot zkušebních těles, maximální síly potřebné na vytažení hřebíku a taktéž odporu dřeva proti vytažení hřebíku a parametru vytažení hřebíku jsou uvedeny v přílohách v Tab. 1 až Tab. 18. Získané hodnoty hmotností a vlhkostí zkušebních těles jsou pak uvedeny v přílohách v Tab. 19.

Získané výsledky jsou zde taktéž doplněny o porovnání s daty dostupnými v odborné literatuře.

5.1 Fyzikální vlastnosti dřeva

Z fyzikálních vlastností dřeva byly zkoumané dvě, konkrétně hustota dřeva a vlhkost dřeva. Souhrn průměrných hodnot obou zkoumaných vlastností je pro všechny skupiny zkušebních těles, tedy referenční i tepelně zatížená tělesa (-15 °C a 70 °C, -25 °C a 70 °C), uveden v Tab. 4.

Ze získaných hodnot plyne, že vlhkost smrkových i modřínových zkušebních těles po mražení mírně vzrostla. Nejvyšší nárůst vlhkosti při mražení zkušebních těles byl u skupiny smrkových těles zatížených teplotou -25 °C, a to 2,1 %. Nejnižšího nárůstu vlhkosti, 0,4 %, bylo naopak dosaženo u zkušebních těles z modřínového dřeva zatížených teplotou -15 °C. Vyšší nárůst vlhkosti byl sledován u zkušebních těles ze smrkového dřeva, nižší pak u zkušebních těles modřínových. Zvýšení vlhkosti zkušebních těles lze odvodit ze zvýšení jejich hmotnosti, ze které se za pomoci příslušných vzorců počítá vlhkost dřeva. Ke zvýšení vlhkosti zkušebních těles při mražení mohlo docházet z důvodu usazování vzdušné vlhkosti uvnitř mrazícího boxu na povrch zkušebních tělese. Na zkušebních tělesech se tak vytvořila námraza, která mohla způsobit zvýšení vlhkosti zkušebních těles. Obdobné změny vlhkosti při stejném způsobu mražení

zkušebních těles, tedy její lehké zvýšení, zjistil ve svém výzkumu i Vebr (2019) a taktéž Hlaváček (2019), u kterého se procentuální změny vlhkosti jak po mražení, tak i po ohřevu velice podobají hodnotám získaným při zde prováděném experimentu.

Co se týče změny vlhkosti zkušebních těles po ohřevu na 70 °C v laboratorní sušárně, nastal výrazný pokles vlhkosti. Vyšší pokles vlhkosti byl zjištěn u skupiny zkušebních těles ze smrkového dřeva než u těles z modřínového dřeva. Pokles byl nejvyšší u smrkových zkušebních těles před ohřevem zatížených teplotou -15 °C, kde byl pokles vlhkosti oproti vlhkosti po mražení 66,1 %. Průměrně pak pokles vlhkosti při ohřevu u všech zkušebních těles činil 49,9 % a konečná vlhkost u zkušebních těles zatížených teplotami -15 °C a 70 °C byla 5,4 % a u těles zatěžovaných kombinací -25 °C a 70 °C pak 6,8 %. Pokles vlhkosti zkušebních těles v laboratorní sušárně nastal v důsledku působení vyšší teploty, která má za následek rychlejší odpařování vody ze dřeva a sledovaná vlhkost zkušebních těles tak klesá.

Tab. 4: *Vlhkost a hustota zkušebních těles*

Soubor	Dřevina	Teplota (°C)	Vlhkost			Hustota		
			W_p (%)	W_m (%)	W_k (%)	ρ_p (kg/m^3)	ρ_m (kg/m^3)	ρ_k (kg/m^3)
1	Smrk	Reference	11,75	-	-	382,57	-	-
2	Smrk	-15, 70	12,30	12,40	4,20	381,94	382,59	369,44
3	Smrk	- 25, 70	12	12,25	5,75	381,65	382,51	369,25
4	Modřín	Reference	12	-	-	621,61	-	-
5	Modřín	-15, 70	12	12,05	6,60	619,86	621,82	603,41
6	Modřín	- 25, 70	12	12,10	7,90	617,27	618,54	601,30

W_p…….počáteční vlhkost zkušebních těles po klimatizaci na vlhkost 12 % [%],

W_m…....vlhkost zkušebních těles po mražení danou teplotou [%],

W_k…….konečná vlhkost zkušebních těles po ohřevu na 70 °C [%],

ρ_p……..počáteční hustota zkušebních těles po klimatizaci na vlhkost 12 % [kg/m^3],

ρ_m…….hustota zkušebních těles po mražení danou teplotou [kg/m^3],

ρ_k……..konečná hustota zkušebních těles po ohřevu na 70 °C [kg/m^3].

Ze získaných hodnot pro hustotu zkušebních těles plyne, že průměrná hustota všech při experimentu použitých smrkových zkušebních těles při vlhkosti 12 % činí 382,39 kg/m^3. Josten a kol. (2009) uvádějí hustotu smrkového dřeva při stejné vlhkosti 470 kg/m^3 a Matovič (1993) připisuje smrkovému dřevu hustotu 455 kg/m^3, což jsou v porovnání s naměřenými hodnotami hodnoty vyšší.

U zkušebních těles vyrobených z modřínového dřeva je průměrná hodnota hustoty pro všechna použitá zkušební tělesa s vlhkostí 12 % 620,6 kg/m^3. Hustota modřínového dřeva s vlhkostí 12 % je v literatuře uváděna v hodnotě 590 kg/m^3 dle práce Horáčka (2008) nebo 600 kg/m^3, jak uvádí Josten a kol. (2009).

V experimentu používané smrkové dřevo má tedy nižší hustotu, než je uváděna v odborné literatuře. Naproti tomu dřevo modřínové v experimentu používané má hustotu vyšší, než je uvedena v odborné literatuře. Zde je dobře vidět velká variabilita hustoty dřeva.

Změna rozměrů zkušebních těles při mražení byla pouze minimální, a to v řádu několika setin milimetru. Změny hmotnosti způsobené změnami vlhkosti dřeva tak nejvýrazněji stojí i za změnou hodnot hustoty dřeva při mražení. Z uvedeného i z hodnot v Tab. 4 tedy plyne, že při mražení docházelo k mírnému nárůstu hustoty zkušebních těles. Nejvýraznější nárůst hustoty lze pozorovat u modřínových zkušebních těles zatížených teplotou -15 °C, a to 0,3 %. Výraznější nárůst hustoty při mražení zkušebních těles nastal u modřínových zkušebních těles než u smrkových.

Hustota po ohřevu zkušebních těles v laboratorní sušárně výrazně poklesla. Nejvýraznější pokles hustoty byl zaznamenán u smrku před ohřevem zatíženým teplotou -25 °C, kde byl naměřen pokles hustoty oproti hustotě po mražení 3,5 %. Změna rozměrů způsobená sesýcháním v důsledku změny vlhkosti zkušebních těles byla v řádu i několika desetin milimetru. Změna hmotnosti zkušebních těles byla způsobena ztrátou vlhkosti. Hustota zkušebních těles po ohřevu v porovnání s hustotou po mražení poklesla výrazněji u modřínu než u smrku. Hlaváček (2019) ve svém výzkumu, který probíhal při stejných podmínkách jako zde prováděný

experiment, uvádí pro smrk před ohřevem vystavený teplotě -25 °C pokles hustoty dřeva po ohřevu na 70 °C oproti hustotě dřeva po mražení zkušebních těles o 4,6 %. V experimentu prováděném v této práci je tedy pokles hustoty zkušebních těles nižší.

5.2 Parametr vytažení hřebíku a odpor dřeva proti vytažení hřebíku

V Tab. 5 jsou zobrazeny statistické významnosti jednotlivých posuzovaných faktorů na parametr vytažení hřebíku. Na hladině významnosti 0,05 jsou všechny zkoumané faktory každý zvlášť statisticky významné. Statisticky významnými faktory ovlivňujícími parametr vytažení hřebíku jsou tedy druh dřeviny, ze které jsou vyrobena zkušební tělesa, způsob teplotního zatěžování zkušebních těles, druh hřebíku a taktéž anatomický směr dřeva, ve kterém je hřebík zaražený, se ukazuje jako statisticky významný. Naproti tomu kombinace všech zmíněných faktorů na parametr vytažení hřebíku se ukazuje jako statisticky nevýznamná.

Zcela obdobných výsledků je dosaženo taktéž u odporu dřeva proti vytažení hřebíku, který se stejně jako parametr vytažení hřebíku vypočítává z hodnoty maximální síly potřebné na vytažení hřebíku F_{max}. Statistické vyhodnocení odporu proti vytažení hřebíku je pak uvedeno v Tab. 6.

Tab. 5: *Statistické vyhodnocení parametru vytažení hřebíku* f_{ax}

Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fischerův F - Test	Hladina významnosti
Intercept	33295,66	1	33295,66	7795,693	0,000000
Dřevina	4154,93	1	4154,93	972,815	0,000000
Teplota	1491,98	2	745,99	174,663	0,000000
Typ hřebíku	22924,12	2	11462,06	2683,674	0,000000
Anatomický směr	185,96	1	185,96	43,539	0,000000
Dřevina * Teplota * Typ hřebíku * Anatomický směr	24,38	4	6,09	1,427	0,223324
Chyba	2921,39	684	4,27	-	-

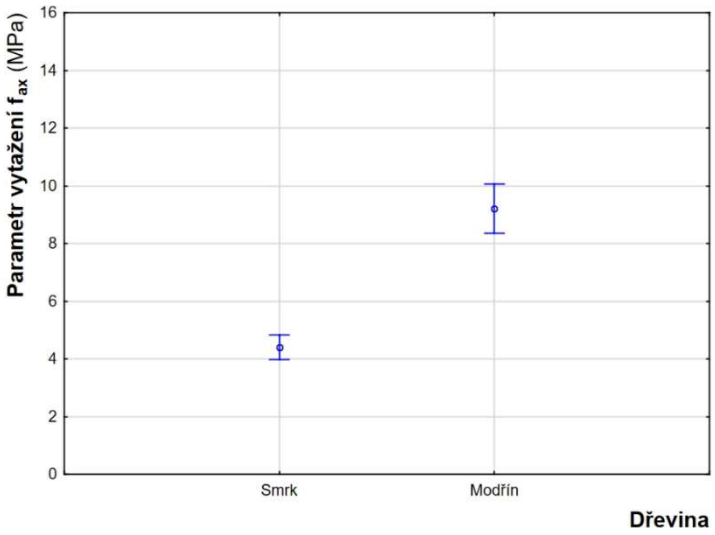
Tab. 6: *Statistické vyhodnocení odporu dřeva proti vytažení hřebíku R*

Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fischerův F - Test	Hladina významnosti
Intercept	261038,0	1	261038,0	7795,693	0,000000
Dřevina	32574,6	1	32574,6	972,815	0,000000
Teplota	11697,1	2	5848,6	174,663	0,000000
Typ hřebíku	179725,1	2	89862,6	2683,674	0,000000
Anatomický směr	1457,9	1	1457,9	43,539	0,000000
Dřevina * Teplota * Typ hřebíku * Anatomický směr	191,1	4	47,8	1,427	0,223324
Chyba	22903,7	684	33,5	-	-

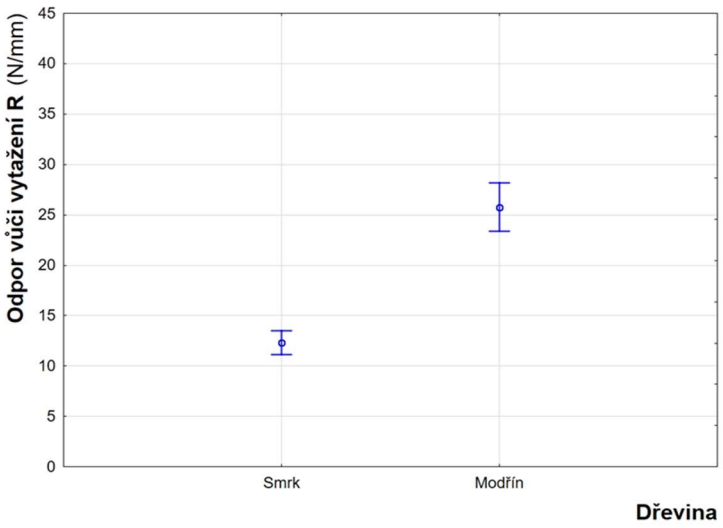
V grafu 1 jsou zobrazeny hodnoty parametru vytažení hřebíku pro smrk a pro modřín. Graf nezohledňuje druh hřebíku, anatomický směr zaražení hřebíku ani teplotní zatížení zkušebního tělesa. Graf bere v úvahu pouze druh dřeviny. Průměrná hodnota parametru vytažení hřebíku pro smrk činí 4,4 MPa. U modřínu je získaná průměrná hodnota parametru vytažení 9,2 MPa, což je hodnota více než dvojnásobná v porovnání se smrkovým dřevem. Rozdíl získaných hodnot může být způsoben zejména odlišnou hustotou smrkového a modřínového dřeva, která má významný vliv na odolnost dřeva proti vytažení hřebíku a u dřeva použitého pro výrobu zkušebních těles se liší bezmála o 250 kg/m^3. Získaný výsledek potvrzuje Gandelovou a kol. (2002), kteří zjistili, že s rostoucí hustotou dřeva roste taktéž schopnost dřeva držet spojovací prostředky. Vliv hustoty dřeva na parametr vytažení hřebíku zkoumali i Sandhaas a Görlacher (2018), kteří potvrdili, že s rostoucí hustotou dřeva roste taktéž parametr vytažení hřebíku.

Obdobně jako u parametru vytažení hřebíku v grafu 1 je i u odporu dřeva proti vytažení hřebíku, uvedeném v grafu 2, dřevinou s vyššími hodnotami odporu proti vytažení hřebíku modřín. Pokud se bere v úvahu pouze druh dřeviny a nezohledňují se další faktory ovlivňující odpor dřeva

proti vytažení hřebíku, tak je průměrná hodnota odporu pro smrk 12,31 N/mm a pro modřín je získaná hodnota 25,77 N/mm.



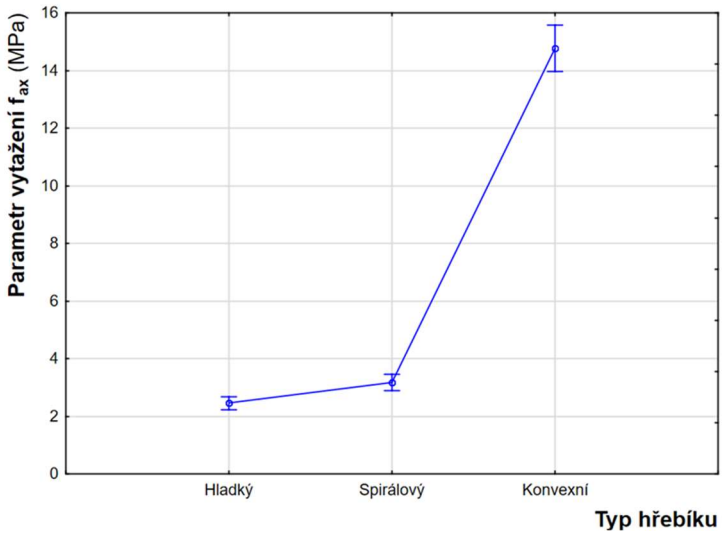
Graf 1: *Závislost parametru vytažení hřebíku na dřevině*



Graf 2: *Závislost odporu dřeva proti vytažení hřebíku na dřevině*

Vztah mezi parametrem vytažení hřebíku a typem hřebíku je znázorněn v grafu 3, ze kterého plyne, že nejvyššího parametru vytažení hřebíku při uvážení všech naměřených hodnot dosahují hřebíky konvexní. Výrazně nižších hodnot parametru vytažení hřebíku dosahují hřebíky spirálové a nejnižší hodnoty byly získány v případě použití hřebíků hladkých. Konvexní hřebíky vykazují průměrnou hodnotu parametru vytažení hřebíku 14,77 MPa, spirálové hřebíky 3,17 MPa, což je pokles

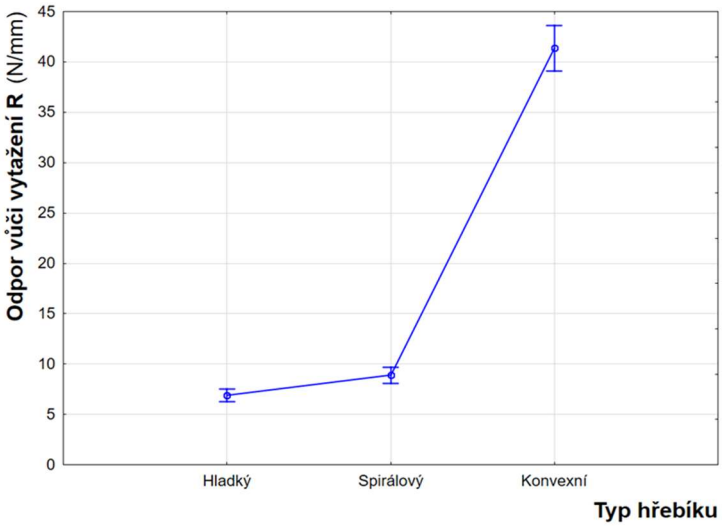
oproti konvexním hřebíkům o 78,5 %. Hřebíky hladké dosahují průměrné hodnoty parametru vytažení 2,46 MPa, a to je proti hřebíkům konvexním hodnota o 83,3 % nižší a proti spirálovým hřebíkům nižší o 22,4 %.



Graf 3: *Závislost parametru vytažení hřebíku na typu hřebíku*

Obdobný trend vykazují i získané hodnoty odporu dřeva proti vytažení hřebíku (Graf 4). Nejvyšší odpor dřeva proti vytažení hřebíku byl zjištěn u hřebíků konvexních. Výrazně nižších hodnot odporu dřeva proti vytažení hřebíku dosahují hřebíky spirálové, a ještě nižších hodnot bylo zjištěno u hřebíků hladkých. Průměrný odpor proti vytažení hřebíku získaný pro konvexní hřebíky činí 41,36 N/mm, pro hřebíky spirálové byla zjištěna průměrná hodnota 8,88 N/mm, tedy pokles o 78,5 % a pro hladké hřebíky potom 6,89 N/mm. U hladkých hřebíků je získaná hodnota o 83,3 % nižší než u hřebíků konvexních a oproti spirálovým hřebíkům je nižší o 22,4 %.

Grafy 3 a 4 a hodnoty v nich zobrazené neberou v úvahu různých sledovaných faktorů na obě sledované veličiny ve vztahu k typu použitého hřebíku. Jsou zde uvedeny pouze průměry všech získaných hodnot odporu dřeva proti vytažení hřebíku a parametru vytažení hřebíku bez ohledu na to, zda se jedná o referenční zkušební tělesa nebo o zkušební tělesa zatížená teplotním střídáním.



Graf 4: *Závislost odporu dřeva proti vytažení hřebíku na typu hřebíku*

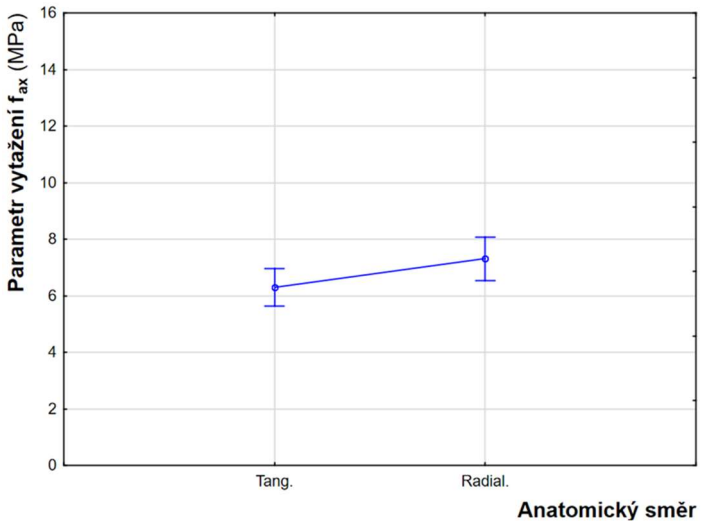
Rammer (2010) uvádí, že nejvyšších hodnot odporu dřeva proti vytažení hřebíku a parametru vytažení hřebíku dosahují hřebíky konvexní následovány hřebíky spirálovými a dále pak hřebíky hladkými. Oproti tomu Luszczki a kol. (2013) uvádějí, že nejvyšší maximální síly potřebné na vytažení hřebíku dosahují hřebíky spirálové, následované hřebíky konvexními a nejnižší síly na vytažení dosahují hřebíky hladké. Autoři uvádějí pouze maximální sílu na vytažení hřebíku, ale jelikož byly všechny použité hřebíky podobného průměru a podobné délky zaražení, tak i parametr vytažení hřebíku a odpor dřeva proti vytažení hřebíku budou stejného pořadí jako maximální síla potřebná na vytažení hřebíku.

V případě zde prováděného experimentu bylo nejvyšších hodnot odporu dřeva proti vytažení hřebíku a parametru vytažení hřebíku zjištěno u hřebíků konvexních a hřebíky spirálové vykazovaly výrazně nižší hodnoty a nejnižší hodnoty byly u hřebíků hladkých. V případě konvexních hřebíků je nejvyšších hodnot dosaženo z důvodu, že jednotlivé zářezy na dříku konvexního hřebíku jsou zachyceny mezi vlákny dřeva. Pro vytažení konvexního hřebíku ze dřeva je tedy nutností vlákna dřeva přetrhnout a hřebík vytáhnout i s nimi, uloženými v zářezech na dříku hřebíku. Uvedené potvrzuje i fakt, že po vytahování konvexních hřebíků byly zářezy na jejich dříku vždy zaplněny dřevěnou drtí.

Hřebíky spirálové by tedy měly podle Rammera (2010) i Luszczkiho a kol. (2013) dosahovat výrazně vyšších hodnot parametru vytažení hřebíku a odporu dřeva proti vytažení hřebíku oproti hřebíkům hladkým. Nicméně použitý druh hřebíku od firmy Chalko Příkrý s.r.o. má pravděpodobně nevhodně zvolený úhel stoupání šroubovice na dříku hřebíku, která tak nedokáže zajistit výrazně pevnější ukotvení hřebíku ve dřevě než v případě hřebíků s hladkým dříkem.

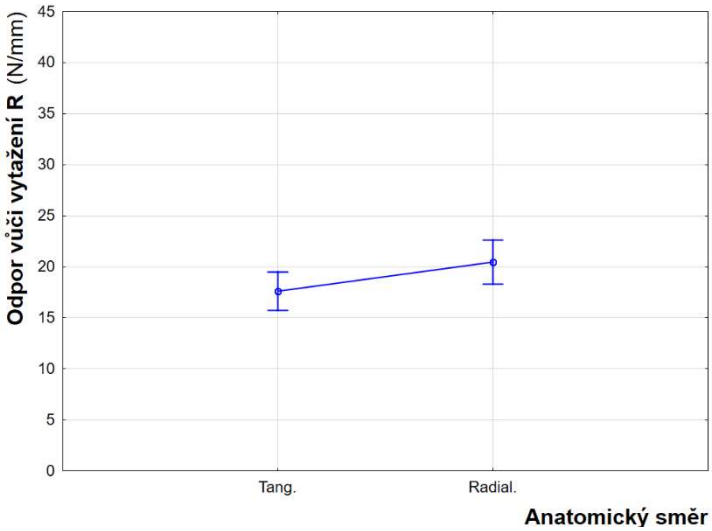
Hřebíky hladké dosahovali nejnižších hodnot obou sledovaných veličin. Hladký hřebík drží ve dřevě pouze díky tření povrchu jeho dříku se dřevem. Naproti tomu konvexní a spirálové hřebíky mají zvýšený odpor proti vytažení i parametr vytažení díky tvarovanému dříku, který v případě konvexních hřebíků vyžaduje přetržení dřevních vláken a v případě použitých spirálových hřebíku otlačení dřevních vláken při vytahování. Otlačení vláken dřeva spirálovým hřebíkem společně s třením zajišťují vyšší hodnoty odporu proti vytažení hřebíku a parametru vytažení hřebíku než pouze tření u hřebíku hladkého. Potvrdily se zde tedy skutečnosti, které uvádí Rammer (2010), že hladké hřebíky dosahují nejnižších hodnot odporu proti vytažení i parametru vytažení hřebíku a nejvyšší hodnoty vykazují hřebíky konvexní.

Anatomický směr dřeva, ve kterém je hřebík zaražen, je taktéž statisticky významným faktorem pro parametr vytažení hřebíku a pro odpor dřeva proti vytažení hřebíku. Vyšších hodnot výsledků bylo pro obě zkoumané veličiny dosaženo ve směru radiálním, v tangenciálním směru byly získané hodnoty nižší. V případě, že se zohledňuje pouze anatomický směr, ve kterém je hřebík zaražen a vyhodnotí se všechny získané výsledky, tak je průměrná hodnota parametru vytažení hřebíku pro radiální směr 7,31 MPa. V tangenciálním směru je pak průměrná hodnota parametru vytažení hřebíku 6,29 MPa. Pokud je tedy hřebík zaražen v tangenciálním směru, tak jeho parametr vytažení je oproti radiálnímu směru nižší o 13,9 %. Závislost parametru vytažení hřebíku na anatomickém směru dřeva je zobrazena na grafu 5.



Graf 5: *Závislost parametru vytažení hřebíku na anatomickém směru*

Stejně jako parametr vytažení hřebíku se taktéž odpor dřeva proti vytažení hřebíku prokázal vyšší v radiálním směru dřeva než ve směru tangenciálním (Graf 6). Průměrně byla v radiálním směru získána hodnota 20,46 N/mm. V tangenciálním směru byla pak výsledná hodnota 17,62 N/mm, což je hodnota o 13,9 % nižší než v radiálním směru.



Graf 6: *Závislost odporu dřeva proti vytažení hřebíku na anatomickém směru*

Nižší hodnoty parametru vytažení hřebíku a odporu dřeva proti vytažení hřebíku v tangenciálním směru mohou být způsobeny anatomickou stavbou dřeva. Konkrétně řečeno může být důvodem to, že

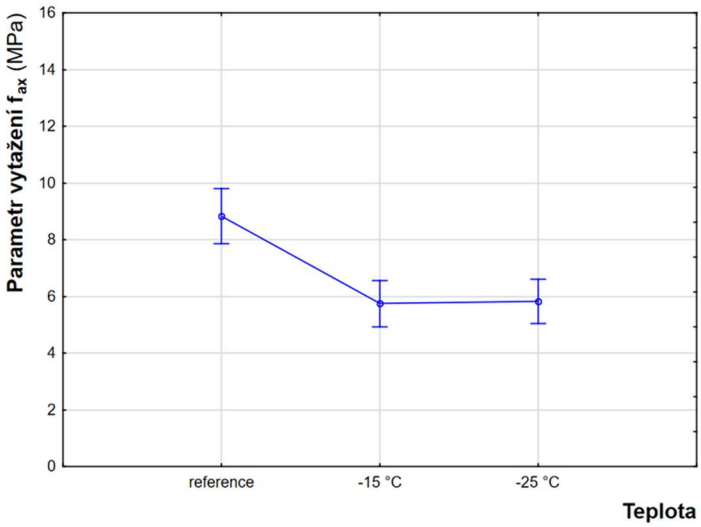
hřebík zaražený v radiálním směru protíná více letokruhů. Jelikož letní dřevo u jehličnanů vykazuje výrazně vyšší hustotu, hřebíky v něm mohou vykazovat vyšší odolnost proti vytažení. Naproti tomu hřebík zaražený v tangenciálním směru vůbec nemusí s letním dřevem přijít do styku a je tak celý zaražený ve dřevě jarním. Jarní dřevo má na rozdíl od dřeva letního hustotu výrazně nižší. K popsané situaci mohlo dojít zejména v případě zkoušeného dřeva smrku, které mělo nízkou hustotu, a navíc mělo velice široké letokruhy s malým zastoupením letního dřeva. Mohlo tedy dojít k situaci, že hřebík byl zaražen pouze v jarním dřevě a vykazoval tak nižší odpor proti vytažení i parametr vytažení hřebíku.

Aytekin (2008) uvádí, že vyšších hodnot maximální síly potřebné na vytažení hřebíku dosahují hřebíky zaražené v radiálním směru. Hřebíky zaražené do dřeva tangenciálně mají hodnoty maximální síly potřebné na vytažení hřebíku lehce nižší. Při použití hladkých hřebíků průměru 2,5 mm se tato skutečnost prokázala u všech čtyř testovaných druhů dřeva, kterými byly dub, jedle a dva druhy borovice. Ve zde prováděném experimentu získané výsledky ukazující vyšší odolnost dřeva proti vytažení hřebíku se s Aytekinovým výzkumem (2008) shodují. Wang a kol. (2011) uvádějí, že v odolnosti dřeva proti vytažení hřebíku nebyl nalezen žádný významný rozdíl mezi hřebíky zaraženými v radiálním a v tangenciálním směru. Jejich výzkum byl prováděn s běžnými hladkými hřebíky na dřevě douglasky a javoru. Naproti tomu Barcík a kol. (2014) uvádějí nejvyšší hodnoty odporu dřeva proti vytažení hřebíku u smrku pro hřebíky zaražené do dřeva v tangenciálním směru než pro hřebíky zaražené ve směru radiálním.

Pokud se bere v úvahu pouze teplotní zatížení zkušebních těles a pominou se faktory typ hřebíku, anatomický směr a druh dřeviny, pak je pro parametr vytažení hřebíku dosaženo výsledků zobrazených v grafu 7 a pro odpor dřeva proti vytažení hřebíku výsledků uvedených v grafu 8.

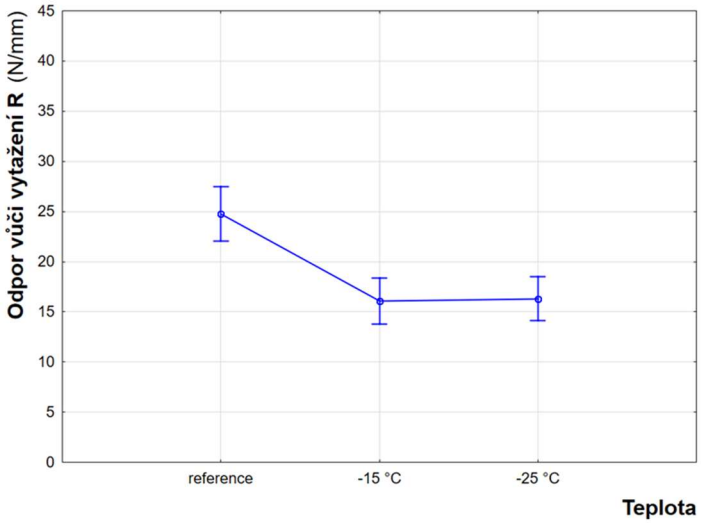
Z grafu 7 plyne, že průměrná hodnota parametru vytažení hřebíku z referenčních zkušebních těles, tedy zkušebních těles s vlhkostí 12 % činí 8,84 MPa. Pro zkušební tělesa vystavené teplotnímu zatížení je jasně patrný výrazný pokles hodnoty parametru vytažení hřebíku. Pro zkušební

tělesa vystavená teplotnímu zatížení -15 °C v kombinaci s teplotou 70 °C je průměrná hodnota parametru vytažení 5,74 MPa. Pokles hodnoty parametru vytažení je tedy oproti referenčním zkušebním tělesům 35 %. Pro zkušební tělesa zatížená kombinací teplot -25 °C a 70 °C byla zjištěna průměrná hodnota parametru vytažení hřebíku o něco málo vyšší, něž pro tělesa zatížená kombinací teplot -15 °C a 70 °C. Konkrétně byla pro zkušební tělesa zatížená -25 °C v kombinaci se 70 °C zjištěna průměrná hodnota parametru vytažení hřebíku 5,82 MPa. Pokles parametru vytažení oproti referenční sadě zkušebních těles je tak 34,1 % a oproti sadě zkušebních těles zatížených teplotou -15 °C a 70 °C je zde nárůst o 1,4 %.



Graf 7: *Závislost parametru vytažení hřebíku na teplotním zatížení*

Odpor dřeva proti vytažení hřebíku vykazuje stejné chování při teplotním zatížení jako parametr vytažení hřebíku a je patrné z grafu 8. Nejvyššího odporu dřeva proti vytažení hřebíku je dosaženo u referenční sady zkušebních těles, a to průměrné hodnoty 24,74 N/mm. Pokles odporu dřeva proti vytažení hřebíku pro zkušební tělesa zatížená teplotami -15 °C a 70 °C byl o 35 % na hodnotu 16,08 N/mm. Pro zkušební tělesa zatížená kombinací teplot -25 °C a 70 °C byla získaná průměrná hodnota odporu dřeva proti vytažení hřebíku 16,31 N/mm, což je oproti referenční sadě zkušebních těles pokles o 34,1 % a oproti zkušebním tělesům zatíženým -15 °C a 70 °C nárůst o 1,4 %.



Graf 8: *Závislost odporu dřeva proti vytažení hřebíku na teplotním zatížení*

Výrazný pokles hodnot parametru vytažení hřebíku i odporu dřeva proti vytažení hřebíku při teplotním zatěžování teplotami -15 °C a 70 °C a taktéž teplotami -25 °C a 70 °C může být způsoben výrazným poklesem vlhkosti zkušebních těles průměrně přibližně o 50 %. Pokles odolnosti dřeva proti vytažení hřebíků při snižování vlhkosti dřeva s již zavedenými hřebíky uvádějí i Gandelová a kol. (2002) a taktéž Anderson a Heebink (1964). Mírně vyšší získané hodnoty parametru vytažení hřebíku a odporu dřeva proti vytažení hřebíku u zkušebních těles zatížených kombinací teplot -25 °C a 70 °C v porovnání se zkušebními tělesy zatíženými teplotami -15 °C a 70 °C lze vysvětlit nižším poklesem vlhkosti zkušebních těles zatížených -25 °C a 70 °C oproti vlhkosti zkušebních těles po klimatizování. Konečná vlhkost zkušebních těles po ohřevu byla v případě kombinace teplot -15 °C a 70 °C průměrně 5,4 % a u těles zatížených teplotami -25°C a 70 °C pak 6,8 %. Jasně znatelný rozdíl vlhkostí tedy může mít vliv na rozdílnou odolnost dřeva proti vytažení hřebíku u obou skupin zkušebních těles vystavených teplotnímu zatížení.

Nejvyšších hodnot parametru vytažení hřebíku dosahují u smrkových i modřínových zkušebních těles hřebíky konvexní zaražené v radiálním směru, což je jasně patrné z grafů 9 a 10. Ve smrkových zkušebních

tělesech referenčních dosahují konvexní hřebíky zaražené do dřeva v radiálním směru hodnoty parametru vytažení hřebíku 12,15 MPa. Při teplotním zatížení kombinací -15 °C a 70 °C je zde pokles o 16,1 % a při vystavení teplotám -25 °C a 70 °C je pokles oproti referenční skupině zkušebních těles o 20,7 %.

Konvexní hřebíky zaražené do smrkového dřeva tangenciálně vykazovaly u referenčních zkušebních těles průměrnou hodnotu parametru vytažení hřebíku 10,23 MPa. Zde byl pokles při zatížení -15 °C a 70 °C o 15,2 % a v případě kombinace -25 °C a 70 °C byl pak pokles parametru vytažení hřebíku o 19,4 %.

V případě konvexních hřebíků a dřeva modřínu byla v radiálním směru u referenčních zkušebních těles zjištěna průměrná hodnota parametru vytažení hřebíku 25,89 MPa. Pokles hodnoty parametru vytažení hřebíku v případě zatížení teplotami -15 °C a 70 °C byl 26,5 % a 30,2 % v případě zatížení kombinací teplot -25 °C a 70 °C.

Konvexní hřebíky zaražené do modřínových zkušebních těles v tangenciálním směru vykazují nejvyšší průměrnou hodnotu parametru vytažení hřebíku u referenční sady, a to 21,38 MPa. Pokles při teplotním zatěžování byl 21,6 % a 20,6 % pro zkušební tělesa zatížená -15 °C a 70 °C respektive -25 °C a 70 °C.

Spirálové hřebíky dosahovaly, stejně jako hřebíky konvexní, nejvyšších hodnot parametru vytažení hřebíku u referenčních sad zkušebních těles obou dřevin. U smrkových zkušebních těles v radiálním směru dosahoval parametr vytažení hřebíku průměrné hodnoty 3,09 MPa a ve směru tangenciálním 2,79 MPa. Pokles při teplotním zatěžování kombinací teplot -15 °C a 70 °C a kombinací teplot -25 °C a 70 °C byl v radiálním směru o 54,7 % a o 54 % a ve směru tangenciálním o 62,7 % a o 58,4 % při zatížení teplotami -25 °C a 70 °C.

Pro zkušební tělesa vyrobená z modřínového dřeva dosáhly spirálové hřebíky při zaražení v radiálním směru průměrné hodnoty parametru vytažení hřebíku 6,82 MPa. Pokles průměrné hodnoty parametru vytažení

hřebíku v tomto případě byl 54,8 % a 34,6 % pro zkušební tělesa mražená teplotou -15 °C respektive -25 °C vždy v kombinaci s ohřevem na 70 °C.

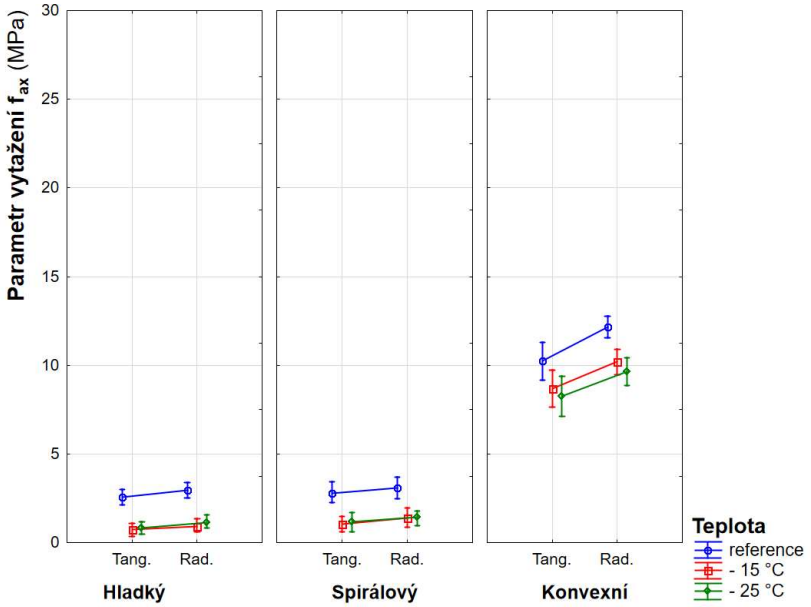
V tangenciálním směru zaražené spirálové hřebíky do modřínových zkušebních těles vykazují průměrnou hodnotu pro parametr vytažení hřebíku 6,85 MPa u referenčních zkušebních těles. Při zatížení zápornými teplotami -15 °C a -25 °C vždy s následným ohřevem na 70 °C vykazují spirálové hřebíky pokles o 61 % a o 52,1 %.

Nejnižších hodnot parametru vytažení hřebíku dosahovaly hřebíky hladké. Při zaražení hladkého hřebíku v radiálním směru dřeva do smrku byla získaná průměrná hodnota parametru vytažení hřebíku při referenčních zkušebních tělesech 2,96 MPa. Snížení této hodnoty při teplotním zatížení -15 °C a 70 °C bylo o 68,2 %. Při vystavení teplotě -25 °C v kombinaci s ohřevem na 70 °C byl pokles parametru vytažení hřebíku nižší, konkrétně o 61,5 %.

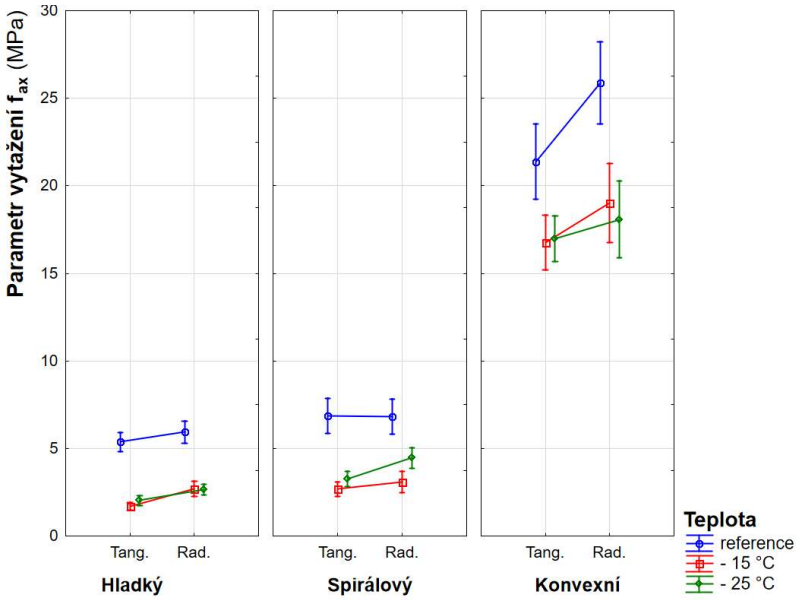
V tangenciálním směru u smrkových zkušebních těles a hladkých hřebíků se prokázal obdobný trend jako ve směru radiálním, tedy že při zatížení kombinací -15 °C a 70 °C byl pokles parametru vytažení hřebíku vyšší než v případě -25 °C a 70 °C. V prvním případě byl zjištěn pokles o 71,6 % a ve druhém 68,1 % oproti referenční sadě zkušebních těles, kde byla průměrná hodnota parametru vytažení 2,57 MPa.

Při použití hladkých hřebíků do dřeva modřínu vykazují vyšší hodnoty parametru vytažení hřebíku hřebíky zaražené do dřeva radiálně. Nejvyšších hodnot bylo opět dosaženo u referenční sady zkušebních těles, a to jak v radiálním, tak i tangenciálním směru. Hladké hřebíky u referenčních zkušebních těles vykazovaly průměrnou hodnotu parametru vytažení hřebíku v radiálním směru 5,94 MPa a ve směru tangenciálním 5,37 MPa. U radiálně zaražených hřebíků poklesla průměrná hodnota parametru vytažení hřebíku o 54,7 % respektive o 55,4 % u teplotního zatížení mražením na -15 °C a ve druhém případě na -25 °C vždy v kombinaci s ohřevem na 70 °C. U hladkých hřebíků zavedených do dřeva modřínu v tangenciálním směru se snížila průměrná hodnota parametru vytažení

hřebíku při působení teplot -15 °C a 70 °C o 68,2 % a při -25 °C a 70 °C o 62,4 %.



Graf 9: *Parametr vytažení hřebíku pro smrk*



Graf 10: *Parametr vytažení hřebíku pro modřín*

Z grafů 9 a 10 tedy plyne, že nejvyšších hodnot parametru vytažení hřebíku dosahují konvexní hřebíky následované hřebíky spirálovými a nejnižší hodnoty byly zjištěny u hřebíků hladkých. Vyšších hodnot parametru vytažení hřebíku bylo zjištěno v případě modřínového dřeva než

u dřeva smrkového a co se týče anatomických směrů, tak se jako směr poskytující vyšší parametr vytažení hřebíku jeví směr radiální. Nejnižšího procentuálního poklesu parametru vytažení hřebíku při teplotním zatížení dosahují hřebíky konvexní, naopak nejvyšší pokles byl zaznamenán u hřebíků hladkých. Všechny získané průměrné hodnoty parametru vytažení hřebíku včetně směrodatných odchylek a dalších statistických veličin jsou zobrazeny v Tab. 7, kde H označuje hladký hřebík, K značí konvexní hřebík a spirálový hřebík je označen písmenem S.

Při posuzování odporu dřeva proti vytažení hřebíku bylo zjištěno obdobných trendů poklesu hodnoty odporu jako v případě parametru vytažení hřebíku. Nejvyšších hodnot odporu dřeva proti vytažení hřebíku dosáhly při všech typech hřebíků, anatomických směrech i teplotních zatíženích vždy referenční sady zkušebních těles. Výsledky pro odpor dřeva proti vytažení hřebíku jsou pro všechny kombinace typu hřebíku, dřeviny a teplotní zatížení zobrazeny v grafech 11 a 12 a taktéž v Tab. 8.

Nejvyšších hodnot odporu dřeva proti vytažení hřebíku dosahují hřebíky konvexní zaražené v radiálním směru do referenčních zkušebních těles, a to jak u modřínových, tak i u smrkových zkušebních těles. V případě smrku je průměrná hodnota odporu dřeva proti vytažení hřebíku 34,02 N/mm a v případě modřínu 72,5 N/mm. Hodnoty získané u smrkových zkušebních těles lze porovnat s hodnotami pro referenční tělesa ve výzkumu Barcíka a kol. (2014), kteří pro konvexní hřebíky ve smrku v radiálním směru uvádějí odpor dřeva proti vytažení hřebíku 29,39 N/mm.

Konvexní hřebíky zaražené v referenčních zkušebních tělesech do tangenciálního směru dosahují u smrku průměrné hodnoty odporu dřeva proti vytažení hřebíku 28,64 N/mm a u modřínu 59,86 N/mm. U smrku uvádějí Barcík a kol. (2014) odpor dřeva proti vytažení konvexního hřebíku 31,39 N/mm.

Tab. 7: *Průměrné hodnoty parametru vytažení hřebíku f_{ax}*

Dřevina	Typ hřebíku	Anatom. směr	Teplota (°C)	Parametr vytažení hřebíku f_{ax}				
				Průměr (MPa)	Směrodat. odchylka	Standardní chyba - SE	-95 % (MPa)	+95 % (MPa)
SM	H	Tan.	Ref.	2,57	0,526	0,12	2,32	2,81
SM	H	Tan.	-15, 70	0,73	0,385	0,09	0,55	0,91
SM	H	Tan.	- 25, 70	0,82	0,314	0,07	0,67	0,97
SM	H	Rad.	Ref.	2,96	0,255	0,06	2,84	3,08
SM	H	Rad.	-15, 70	0,94	0,265	0,06	0,81	1,06
SM	H	Rad.	- 25, 70	1,14	0,254	0,06	1,02	1,26
SM	S	Tan.	Ref.	2,79	0,506	0,11	2,55	3,02
SM	S	Tan.	-15, 70	1,04	0,261	0,06	0,92	1,16
SM	S	Tan.	- 25, 70	1,16	0,246	0,06	1,04	1,27
SM	S	Rad.	Ref.	3,09	0,450	0,10	2,88	3,30
SM	S	Rad.	-15, 70	1,40	0,325	0,07	1,25	1,56
SM	S	Rad.	- 25, 70	1,42	0,336	0,08	1,26	1,58
SM	K	Tan.	Ref.	10,23	2,278	0,51	9,16	11,30
SM	K	Tan.	-15, 70	8,67	2,227	0,50	7,63	9,71
SM	K	Tan.	- 25, 70	8,25	2,411	0,54	7,12	9,37
SM	K	Rad.	Ref.	12,15	1,288	0,29	11,55	12,75
SM	K	Rad.	-15, 70	10,19	1,506	0,34	9,49	10,90
SM	K	Rad.	- 25, 70	9,63	1,674	0,37	8,85	10,42
MD	H	Tan.	Ref.	5,37	1,163	0,26	4,82	5,91
MD	H	Tan.	-15, 70	1,71	0,455	0,10	1,50	1,92
MD	H	Tan.	- 25, 70	2,02	0,584	0,13	1,75	2,30
MD	H	Rad.	Ref.	5,94	1,343	0,30	5,31	6,56
MD	H	Rad.	-15, 70	2,69	0,923	0,21	2,25	3,12
MD	H	Rad.	- 25, 70	2,65	0,611	0,14	2,36	2,94
MD	S	Tan.	Ref.	6,85	2,139	0,48	5,85	7,85
MD	S	Tan.	-15, 70	2,67	0,586	0,19	2,27	3,07
MD	S	Tan.	- 25, 70	3,28	0,939	0,21	2,84	3,72
MD	S	Rad.	Ref.	6,82	2,165	0,48	5,81	7,83
MD	S	Rad.	-15, 70	3,08	1,273	0,28	2,48	3,68
MD	S	Rad.	- 25, 70	4,46	1,223	0,27	3,89	5,03
MD	K	Tan.	Ref.	21,38	4,588	1,03	19,23	23,53
MD	K	Tan.	-15, 70	16,76	3,321	0,74	15,21	18,32
MD	K	Tan.	- 25, 70	16,97	2,793	0,62	15,67	18,28
MD	K	Rad.	Ref.	25,89	5,006	1,12	23,55	28,23
MD	K	Rad.	-15, 70	19,03	4,835	1,08	16,76	21,29
MD	K	Rad.	- 25, 70	18,08	4,717	1,05	15,87	20,29

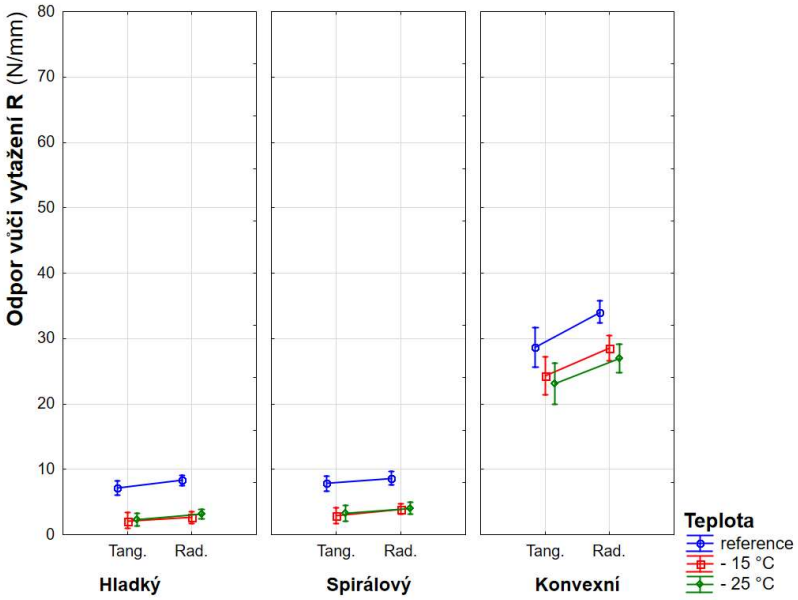
Pro spirálové hřebíky opět platí, že nejvyšších hodnot odporu dřeva proti vytažení hřebíku dosahují hřebíky v referenční sadě zkušebních těles. U smrku je vyšší hodnoty dosaženo v radiálním směru, a to 8,65 N/mm, zatímco ve směru tangenciálním 7,8 N/mm. Zde Barcík a kol. (2014) udávají odpor dřeva proti vytažení hřebíku 10,41 N/mm v radiálním směru, respektive 10,52 N/mm ve směru tangenciálním. Pro modřínová zkušební tělesa z referenčního souboru byla zjištěna vyšší hodnota odporu dřeva proti vytažení hřebíku v tangenciálním směru než ve směru radiálním. V tangenciálním směru byla zjištěna hodnota odporu 19,18 N/mm a v radiálním směru 19,10 N/mm.

Referenční zkušební tělesa vyrobená ze smrkového dřeva v kombinaci s hladkými hřebíky vykazují stejné chování jako hřebíky konvexní, vyšší hodnoty odporu tedy dosahují v radiálním směru, a to 8,29 N/mm. V tangenciálním směru je pak průměrná hodnota odporu dřeva proti vytažení hřebíku pro zmíněnou kombinaci dřeviny a typu hřebíku 7,18 N/mm. U kombinace hladkého hřebíku a radiálního směru smrkového dřeva Barcík a kol. (2014) uvádějí odpor dřeva proti vytažení hřebíku o velikosti 14,27 N/mm a ve směru tangenciálním 14,7 N/mm. Hladké hřebíky zavedené v modřínovém dřevě opět dosahují vyšší průměrné hodnoty odporu dřeva proti vytažení hřebíku v radiálním směru, konkrétně hodnotu 16,62 N/mm. V tangenciálním směru je pak dosaženo hodnoty 15,03 N/mm.

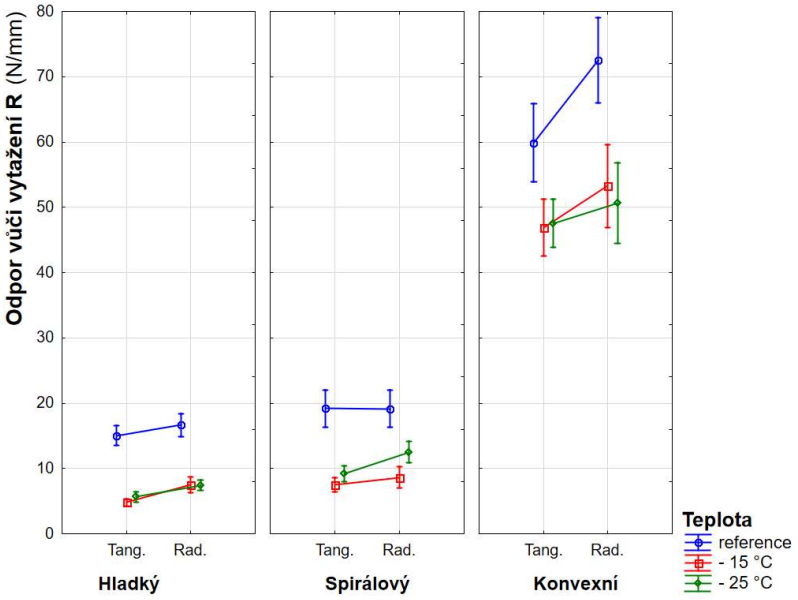
Rozdílné hodnoty odporu dřeva pro referenční smrková zkušební tělesa v této práci a ve výzkumu Barcíka a kol. (2014) při použití stejných typů hřebíků se stejným průměrem a stejnou hloubkou zaražení, které jsou ve zmiňovaném výzkumu ve všech případech kromě konvexních hřebíků zaražených v radiálním směru vyšší, mohou být způsobeny výrazným rozdílem hustot zkušebních těles. Průměrná hustota zkušebních těles v případě zde prováděného experimentu je 382,57 kg/m^3, zatímco Barcík a kol. (2014) uvádějí průměrnou hustotu při vlhkosti 11,8 % u referenční sady zkušebních těles 433 kg/m^3.

Veškeré poklesy průměrných hodnot odporu dřeva proti vytažení hřebíku při teplotním zatěžování zkušebních těles teplotními kombinacemi

-15 °C a 70 °C a taktéž -25 °C a 70 °C se pak procentuálně shodují s poklesem hodnot parametru vytažení hřebíku. Uvedené platí pro všechny kombinace dřeviny, typu hřebíku, anatomického směru a teplotního zatížení. Všechny získané průměrné hodnoty odporu dřeva proti vytažení hřebíku jsou přehledně uvedeny v Tab. 8, kde písmeno H označuje hladký hřebík, K značí konvexní hřebík a S pak spirálový hřebík.



Graf 11: *Odpor dřeva proti vytažení hřebíku pro smrk*



Graf 12: *Odpor dřeva proti vytažení hřebíku pro modřín*

Tab. 8: *Průměrné hodnoty odporu dřeva proti vytažení hřebíku R*

Dřevina	Typ hřebíku	Anatom. směr	Teplota (°C)	Odpor dřeva proti vytažení hřebíku *R*				
				Průměr (N/mm)	Směrodat. odchylka	Standardní chyba - SE	-95 % (N/mm)	+95 % (N/mm)
SM	H	Tan.	Ref.	7,18	1,473	0,329	6,50	7,87
SM	H	Tan.	-15, 70	2,03	1,078	0,241	1,53	2,53
SM	H	Tan.	- 25, 70	2,29	0,880	0,196	1,88	2,71
SM	H	Rad.	Ref.	8,29	0,714	0,159	7,95	8,62
SM	H	Rad.	-15, 70	2,62	0,744	0,166	2,27	2,97
SM	H	Rad.	- 25, 70	3,19	0,713	0,159	2,86	3,53
SM	S	Tan.	Ref.	7,80	1,418	0,317	7,14	8,46
SM	S	Tan.	-15, 70	2,91	0,730	0,163	2,57	3,25
SM	S	Tan.	- 25, 70	3,25	0,690	0,154	2,92	3,57
SM	S	Rad.	Ref.	8,65	1,261	0,282	8,05	9,24
SM	S	Rad.	-15, 70	3,93	0,910	0,203	3,50	4,36
SM	S	Rad.	- 25, 70	3,98	0,941	0,210	3,54	4,42
SM	K	Tan.	Ref.	28,64	6,380	1,426	25,66	31,63
SM	K	Tan.	-15, 70	24,28	6,236	1,394	21,36	27,19
SM	K	Tan.	- 25, 70	23,09	6,753	1,509	19,93	26,25
SM	K	Rad.	Ref.	34,02	3,607	0,806	32,34	35,71
SM	K	Rad.	-15, 70	28,54	4,218	0,943	26,57	30,51
SM	K	Rad.	- 25, 70	26,97	4,689	1,048	24,77	29,16
MD	H	Tan.	Ref.	15,03	3,258	0,729	13,51	16,56
MD	H	Tan.	-15, 70	4,79	1,276	0,285	4,19	5,39
MD	H	Tan.	- 25, 70	5,67	1,637	0,366	4,90	6,43
MD	H	Rad.	Ref.	16,62	3,763	0,841	14,86	18,38
MD	H	Rad.	-15, 70	7,52	2,587	0,579	6,31	8,73
MD	H	Rad.	- 25, 70	7,42	1,713	0,383	6,62	8,22
MD	S	Tan.	Ref.	19,18	5,991	1,340	16,37	21,98
MD	S	Tan.	-15, 70	7,49	2,397	0,536	6,37	8,61
MD	S	Tan.	- 25, 70	9,17	2,631	0,588	7,94	10,40
MD	S	Rad.	Ref.	19,10	6,064	1,356	16,26	21,94
MD	S	Rad.	-15, 70	8,63	3,566	0,797	6,96	10,30
MD	S	Rad.	- 25, 70	12,48	3,425	0,766	10,88	14,09
MD	K	Tan.	Ref.	59,86	12,847	2,873	53,85	65,87
MD	K	Tan.	-15, 70	46,93	9,300	2,079	42,58	51,28
MD	K	Tan.	- 25, 70	47,53	7,821	1,749	43,87	51,19
MD	K	Rad.	Ref.	72,50	14,017	3,134	65,94	79,06
MD	K	Rad.	-15, 70	53,27	13,541	3,028	46,94	59,61
MD	K	Rad.	- 25, 70	50,63	13,208	2,953	44,45	56,81

Konvexní hřebíky tedy vykazují nejvyšší odolnost proti vytažení hřebíku a taktéž nejnižší procentuální poklesy odolnosti proti vytažení při teplotním zatěžování. Konvexní hřebíky jsou následovány hřebíky spirálovými, u kterých je ale pokles odolnosti proti vytažení o několik desítek procent, a ještě nižší odolnost proti vytažení hřebíku vykazují hřebíky hladké. Při pohledu na cenu jednotlivých hřebíků však toto pořadí neodpovídá cenám za jednotlivé typy hřebíků. Nejvyšší ceny mají hřebíky spirálové, a to 0,23 Kč/ks. Hřebíky konvexní stojí 0,2 Kč/ks a hřebíky hladké jsou nejlevnější s cenou 0,12 Kč/ks.

6. ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá otázkou, jaký vliv mají nízké teploty a střídání nízkých a vysokých teplot na vlhkost a hustotu dřeva a taktéž jaký vliv má střídání nízkých a vysokých teplot na odpor dřeva proti vytažení hřebíku a na parametr vytažení hřebíku. Experiment byl prováděn na dvou druzích jehličnatých dřevin - smrku a modřínu, při použití třech nejčastěji používaných typů hřebíků s průměrem 2,8 mm - hladké, konvexní a spirálové hřebíky. Hřebíky byly do dřeva zaráženy v radiálním a v tangenciálním směru do hloubky 30 mm. Zkušební tělesa byla rozdělena na referenční sadu s vlhkostí 12 % a na dvě sady teplotně zatěžovaných zkušebních těles s počáteční vlhkostí 12 %, na které bylo působeno kombinacemi teplot -15 °C a 70 °C a také -25 °C a 70 °C po dobu vždy 12 hodin mražení a 12 hodin ohřevu.

Ze získaných dat plyne, že vlhkost zkušebních těles po mražení teplotami -15 °C a -25 °C mírně vzrostla. Vyšší nárůst vlhkosti byl pak sledován u skupiny zkušebních těles vystavených teplotě -25 °C. Při ohřevu na 70 °C pak vlhkost zkušebních těles výrazně poklesla. Co se týče hustoty, zde byl obdobně jako u vlhkosti sledován po mražení mírný nárůst a po ohřevu pak výrazný pokles její hodnoty.

Nejvyšších hodnot odporu dřeva proti vytažení hřebíku a parametru vytažení hřebíku bylo pro všechny typy hřebíků i obě dřeviny a oba anatomické směry vždy dosaženo u referenčních sad zkušebních těles. Při teplotním zatížení docházelo k poklesu odporu dřeva proti vytažení hřebíku i parametru vytažení hřebíku. Průměrný pokles obou sledovaných veličin při teplotním zatížení -15 °C a 70 °C byl oproti průměru u referenčních sad zkušebních těles 35 % a v případě teplot -25 °C a 70 °C byl pokles 34,1 %. Vyšších hodnot odporu dřeva proti vytažení hřebíku a parametru vytažení hřebíku dosahovala modřínová zkušební tělesa a z pohledu anatomických směrů bylo vyšších hodnot výsledků dosaženo v radiálním směru dřeva. Typem hřebíků s nejvyššími hodnotami odporu proti vytažení a parametru vytažení jsou hřebíky konvexní, následované hřebíky spirálovými a hřebíky hladkými. Konvexní hřebíky taktéž vykazovaly při teplotním zatěžování

nejnižší procentuální poklesy odporu proti vytažení hřebíku a parametru vytažení hřebíku oproti teplotně nezatíženým zkušebním tělesům. Procentuální poklesy obou veličin v případě spirálových hřebíků byly výrazně vyšší než v případě hřebíků konvexních a hladké hřebíky vykazovaly ještě výraznější procentuální poklesy odporu proti vytažení hřebíku a parametru vytažení hřebíku.

Z pohledu praxe mohou být získané výsledky přínosné z důvodu, že objasňují chování hřebíků zatížených na vytažení při jejich vystavení teplotnímu střídání nízkých a vysokých teplot. Výsledky by mohly pomoci při navrhování hřebíkových spojů u dřevěných konstrukcí, které se nacházejí v oblastech s častým střídáním teplot (skandinávské oblasti, Rusko, Kanada) a jsou tak vystaveny výraznému teplotnímu zatížení kombinacemi nízkých a vysokých teplot. Příkladem mohou být dřevěné konstrukce, dřevostavby nebo exteriérové aplikace s využitím hřebíkových spojů, jako jsou terasy, altánky nebo obklady ve zmíněných oblastech.

Pro další výzkum problematiky hřebíkových spojů zatížených teplotou lze zde získané výsledky doplnit dalším výzkumem zabývajícím se například vytahováním hřebíků ze zmrzlého dřeva nebo případně zde prováděný experiment upravit a po ohřevu zkušební tělesa znovu klimatizovat na počáteční vlhkost. Díky tomu by bylo možné získat ucelený přehled o chování hřebíkových spojů zatížených na vytažení, v případech, kdy jsou vystaveny nízkým teplotám nebo teplotnímu střídání.

7. POUŽITÁ LITERATURA

AMBROSE, J.; TRIPENY, P. *Building structures*. 3. vyd. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2012. 528 s. ISBN 978-0-470-54260-6.

ANDERSON, L. O.; HEEBINK, T. B. *Wood Crate: Desing Manual*. Washington: Forest Service, U. S. Dept. Of Agriculture, 1964. 131 s.

AYTEKIN, A. Determination of Screw and Nail Withdrawal Resistance of Some Important Wood Species. *International Journal of Molecular Sciences*. 2008, vol. 9, no. 4, s. 626-637. ISSN 1422-0067.

BACHER, F. Nailing of Wet Wood. *Holzforsch Holzverwert*. 1964, vol. 6, no. 3, s. 6-55.

BALABÁN, K. *Nauka o dřevě. 1. část, Anatomie dřeva*. Praha: Státní zemědělské nakladatelství, 1955. 216 s.

BARCÍK, Š.; GAŠPARÍK, M.; HOREJŠ, P. Influence of Thermal Modification on Nail Withdrawal Strenght of Spruce Wood. *BioResources*. 2014, vol. 9, no. 4, s. 5963-5975. ISSN 1930-2126.

CABRERO, J. M.; STEPINAC, M.; RANASINGHE, K.; KLEIBER, M. Results from a questionnaire for practitioners about the connections chapter of Eurocode 5. In SANDHAAS, C.; MUNCH-ANDERSEN, J.; DIETSCH, P. *Design of Connections in Timber Structures.* Aachen: Shaker Verlag GmbH., 2018. s. 3-17. ISBN 978-3-8440-6144-4.

CIVIDINI, R. *Conventional kiln - drying of lumber: compendium*. 1. vyd. Milan: Nardi S. p. A., 2001.

ČUNDERLÍK, I. *Štruktúra dreva*. 1. vyd. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2009. 135 s. ISBN 978-80-228-2061-5.

FÁBRYOVÁ, G.; BOŽEKOVÁ, O. *Materiály – pro 1. ročník středních odborných učilišť učebního oboru tesař*. 1. vyd. Praha: SNTL Nakladatelství technické literatury, 1986. 149 s.

GANDELOVÁ, L.; HORÁČEK, P.; ŠLEZINGEROVÁ, J. *Nauka o dřevě*. 2.vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2002. 176 s. ISBN 80-7157-577-1.

GLASS, S. V.; ZELINKA, S. L. Moisture relations and Physical Properties of Wood. In *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*. Madison: U.S. Dept of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. s. 80-99.

GREEN, D. W.; WINANDY, J. E.; KRETSCHMANN, D. E. Mechanical Properties of Wood. In *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*. Madison: U.S. Dept of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. s. 76-120.

HLAVÁČEK, J. *Mechanické vlastnosti dřeva vystaveného teplotnímu zatížení*. Praha, 2019. Diplomová práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Fakulta lesnická a dřevařská. Katedra zpracování dřeva a biomateriálů. Vedoucí práce Ing. Miroslav Gašparík, PhD.

HOADLEY, R. B. *Understanding wood: A craftsman´s guide to wood technology*. 1. vyd. Newtown: The Taunton Press, 2000. 280 s. ISBN 1-56158-358-8.

HORÁČEK, P. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I*. 2. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2008. 124 s. ISBN 978-80-7375-169-2.

JELÍNEK, L. *Dřevěné a kovové konstrukce podle ČSN EN 1995-1-1 a ČSN EN 1993-1-1*. 1. vyd. Volyně: Vyšší odborná a střední průmyslová škola, Volyně, 2012. 146 s. ISBN 978-80-86837-42-0.

JOSTEN, E.; REICHE, T.; WITTCHEN, B. *Holzfachkunde: Ein Lehr-, Lern- und Arbeitsbuch, für Tischler / Schreiner, Holzmechaniker und Fachkräfte, für Möbel-, Küchen- und Umzugsservice*. 5. vyd. Weisbaden: Vieveg+Taubner, 2009. 594 s. ISBN 978-3-8348-0530-0.

KERMANI, A. *Structural Timber Design*. 1. vyd. Edinburgh: Blackwell Science Ltd., 1999. 268 s. ISBN 0-632-05091-8.

KOLB, J. *Systems in Timber Engeneering: Loadbearing Structures and Component Layers*. Basilej: Birkenhäser, 2008. 317 s. ISBN 978-3-7643-8689-4.

KOŽELUH, B. *Dřevěné konstrukce podle Eurokódu 5, STEP 1: Navrhování a konstrukční materiály*. 1. vyd. Zlín: Bohumil Koželuh, 1998. 456 s. ISBN 80-238-2620-4.

KUKLÍK, P. *Dřevěné konstrukce*. 1. vyd. Praha: Česká technika nakladatelství ČVUT, 2005. 188 s. ISBN 80-01-03310-4.

LARSEN, H. J. Introduction: Fasteners, Joints and Compozite Structures. In THELARDENSSON, S.; LARSEN, H. J. *Timber Engineering*. Chichester: Wiley & Sons Ltd, 2003. s. 303-313. ISBN 0-470-84469-8.

LUSZCZKI, G. E.; CLAPP, J. D.; DAVIDS, J. G.; LOPEZ-ANIDO, R. Withdrawal Capacity of Plain, Annual Shank, and Helical Shank Nail Fasteners in Spruce – Pine - Fir Lumber. *Forest Products Journal*. 2013, vol. 63, no. 5-6, s. 213-220. ISSN 0015-7473.

MATOVIČ, A. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva.* 1. vyd. Brno: Vysoká škola zemědělská, 1993. 212 s. ISBN 80-7157-086-9.

MUSIL, I. *Lesnická dendrologie 1: Jehličnaté dřeviny*. 3. vyd. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2003. 177 s. ISBN 80-213-0992-X.

OZELTON, E. C.; BAIRD, J. A. *Timber Designer´s Manual*. 3. vyd. Wiley Blackwell, 2006. 560 s. ISBN 978-1-405-14671-5.

PERELYGIN, L. M. *Náuka o dreve*. 2. vyd. Bratislava: SVTL, 1965. 444 s.

POŽGAJ, A. *Metódy zisťovania mechanických vlastností dreva a drevných velkoplošných kompozitných materiálov*. 3. vyd. Zvolen: VŠLD, 1987. 170 s.

POŽGAJ, A.; CHOVANEC, D.; KURJATKO, S.; BABIAK, M. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 2. vyd. Bratislava: Príroda a. s., 1997. 488 s. ISBN 80-07-00960-4.

RAMMER, D. R.; WINISTORFER, S. G.; BENDER, D. A. Withdrawal strength of threaded nail. *Journal of Structural Engineering*. 2001, vol. 127, no. 4, s.442-449. ISSN 0733-9445.

RAMMER, D. R. Fastening. In *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*. Madison: U.S. Dept of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. s. 188-216.

SANDHAAS, C.; GÖRLACHER, R. Analysis of nail properties for joint design. *Engineering Structures*. 2018, vol. 173, s. 231-240. ISSN 0141-0296.

SHMULSKY R.; JONES, P. D. *Forest Products and Wood Science: An Introduction*. 6. vyd. Wiley-Blackwell, 2011. 496 s. ISBN 978-0-8138-2074-3.

SIKLIENKA, M.; KMINIAK, R. *Dělenie a obrábanie dreva*. 1. vyd. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2013. 207 s.

SOLTIS, L. A. Fastening. In *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*. Madison: U.S. Dept of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. s. 158-186.

SZMUTKU, M. B.; CAMPEAN, M.; LAURENZI, W. Influence of cyclic freezing and thawing upon spruce wood properties. *Pro Ligno*. 2012, vol. 8, no. 1, s. 35-43. ISSN 1841-4737.

SZMUTKU, M. B.; CAMPEAN, M.; POROJAN, M. Strength reduction of spruce wood through slow freezing. *European Journal of Wood and Wood Products.* 2013, vol. 71, s. 205-210. ISSN 0018-3768.

ŠLEZINGEROVÁ, J.; GANDELOVÁ, L. *Stavba dřeva*. Dotisk 1. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2005. 187 s. ISBN 80-7157-636-0.

VEBR, V. *Vliv nízkých teplot na tvrdost dřeva*. Praha, 2019. Diplomová práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Fakulta lesnická a dřevařská. Katedra zpracování dřeva a biomateriálů. Vedoucí práce Ing. Miroslav Gašparík, PhD.

WANG, Y.; SU, W.; KASEMSIRI, P.; HIZIROGLU, S. A comparison of the withdrawal resistance load of nails using experimental and interference approaches. *Wood Material Science and Engineering.* 2011, vol. 6, s. 213-218. ISSN 1748-0272.

WERNER, G.; ZIMMER, K. *Holzbau 1: Grundlagen DIN 1052 (neu 2008) und Eurocode 5*. 4. vyd. Berlín: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. 370 s. ISBN 978-3-540-95859-8.

WINANDY, E. J. Wood Properties. In ARNTZEN, C. J. *Encyclopedia of Agricultural Science.* 4. vyd. Orlando: Academic Press, 1994. s. 549-561. ISBN 978-0122266706.

ZHAO, L.; JIANG, J.; LU, J.; ZHAN, T. Flexural property of wood in low temperature environment. *Cold Regions Science and Technology*. 2015, vol. 116, s. 65-69. ISSN 0165-232X.

Technické normy:

ČSN EN 1382. *Dřevěné konstrukce - Zkušební metody - Únosnost na vytažení spojovacích prostředků*. Česká agentura pro standardizaci, 2018. 12 s.

ČSN 49 0135*. Drevo - Metóda zišťovania odporu proti vytiahnutiu klincov a skrutiek*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1984. 8 s.

Elektronické zdroje:

BÖHM, M.; ZEIDLER, A. *Zajímavosti ze stavby dřeva - jak stavba dřeva ovlivňuje jeho vlastnosti* [online]. Kostelec nad Černými lesy: Lesnická práce, 2018 [4.1.2020]. Dostupné z WWW: http://silvarium.cz/sklad/Zajimavosti_stavby_dreva_2018.pdf

CHALKO PŘÍKRÝ s. r. o. *Stavební a speciální hřebíky* [online]. [29.1.2020]. Dostupné z WWW: http://chalko.cz/?nails

PILGR, M. *Dřevěné konstrukce. Hřebíkové spoje. Pracovní verze příkladu do cvičení rozpracovaného podle ČSN EN 1995-1-1* [online]. Brno, 2008 [2.2.2020]. Dostupné z WWW: https://www.fce.vutbr.cz /KDK/pilgr.m/Vyuka-bo03/Hrebikove_spoje. pdf

SIMPSON STRONG - TIE COMPANY INC. *Fastener Designer* [online]. [27.1.2020]. Dostupné z WWW: https://www2.strongtie.com /webapps/fastenerdesigner/

VAVRČÍK, H. *Anatomická stavba dřeva: Lexikon dřeva* [online]. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2004 [5.1.2020]. Dostupné z WWW: https://ldf.mendelu.cz/unod/multimedia/stavba_dreva/lexikon/index.htm

ZEIDLER, A. *Lexikon dřeva* [online]. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2012 [30.12.2019]. Dostupné z WWW: https://docplayer.cz/4041658-Ceska-zemedelska-univerzita-v-praze-fakulta-lesnicka-a-drevarska-lexikon-dreva.html

ZEJDA, J.; TIPPNER, J.; SEBERA, V.; KOŇASOVÁ, E.; DÁNIEL, V. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva* [online]. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2007 [10.1.2020]. Dostupné z WWW: https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/index.pl?opora=554

8. PŘÍLOHY

Všechny hodnoty uvedené v přílohách byly získány při měření nebo dopočteny z dat získaných měřením. Při získávání dat a dopočtech hodnot bylo postupováno v souladu s postupem uvedeným v kapitole 4 „Metodika“ a jejích podkapitolách.

V tabulkách uvedených v přílohách jsou použity následující zkratky:

- ρ_p……počáteční hustota zkušebních těles po klimatizaci [kg/m3],
- ρ_m…..hustota zkušebních těles po mražení danou teplotou [kg/m3],
- ρ_k……konečná hustota zkušebních těles po ohřevu [kg/m3],
- $F_{max\ Tan}$.....maximální síla na vytažení hřebíku v tangenciálním směru [N],
- $F_{max\ Rad}$…..maximální síla na vytažení hřebíku v radiálním směru [N],
- $f_{ax\ Tan}$……..parametr vytažení hřebíku v tangenciálním směru [MPa],
- $f_{ax\ Rad}$……..parametr vytažení hřebíku v radiálním směru [MPa],
- R_{tan}……..odpor dřeva proti vytažení hřebíku v tangenciálním směru [N/mm],
- R_{rad}……odpor dřeva proti vytažení hřebíku v radiálním směru [N/mm],
- SM……smrk,
- MD……modřín,
- K……konvexní hřebík 2,8 x 60 mm,
- S……spirálový hřebík 2,8 x 63 mm,
- H……hladký hřebík 2,8 x 63 mm,
- m_p……..počáteční hmotnost zkušebních těles [g],
- w_p……..počáteční vlhkost zkušebních těles [%],
- m_m…….hmotnost zkušebních těles po mražení danou teplotou [g],
- w_m……..vlhkost zkušebních těles po mražení danou teplotou [%],
- m_k……..konečná hmotnost zkušebních těles po ohřevu [g],
- w_k……..konečná vlhkost zkušebních těles po ohřevu [%],
- m_o…….hmotnost absolutně suchých zkušebních těles [g].

Seznam příloh

Tab. 1: *Získané hodnoty pro referenční smrková zkušební tělesa opatřená konvexními hřebíky* .....……....4

Tab. 2: *Získané hodnoty pro smrková zkušební tělesa opatřená konvexními hřebíky zatížená teplotami -15 °C a 70 °C*……5

Tab. 3: *Získané hodnoty pro smrková zkušební tělesa opatřená konvexními hřebíky zatížená teplotami -25 °C a 70 °C*……6

Tab. 4: *Získané hodnoty pro referenční smrková zkušební tělesa opatřená spirálovými hřebíky*…….……7

Tab. 5: *Získané hodnoty pro smrková zkušební tělesa opatřená spirálovými hřebíky zatížená teplotami -15 °C a 70 °C*……8

Tab. 6: *Získané hodnoty pro smrková zkušební tělesa opatřená spirálovými hřebíky zatížená teplotami -25 °C a 70 °C*……9

Tab. 7: *Získané hodnoty pro referenční smrková zkušební tělesa opatřená hladkými hřebíky*……..……10

Tab. 8: *Získané hodnoty pro smrková zkušební tělesa opatřená hladkými hřebíky zatížená teplotami -15 °C a 70 °C*…….11

Tab. 9: *Získané hodnoty pro smrková zkušební tělesa opatřená hladkými hřebíky zatížená teplotami -25 °C a 70 °C*……12

Tab. 10: *Získané hodnoty pro referenční modřínová zkušební tělesa opatřená konvexními hřebíky*……..13

Tab. 11: *Získané hodnoty pro modřínová zkušební tělesa opatřená konvexními hřebíky zatížená teplotami -15 °C a 70 °C*……...14

Tab. 12: *Získané hodnoty pro modřínová zkušební tělesa opatřená konvexními hřebíky zatížená teplotami -25 °C a 70 °C*……..15

Tab. 13: *Získané hodnoty pro referenční modřínová zkušební tělesa opatřená spirálovými hřebíky*……..16

Tab. 14: *Získané hodnoty pro modřínová zkušební tělesa opatřená spirálovými hřebíky zatížená teplotami -15 °C a 70 °C*……17

Tab. 15: *Získané hodnoty pro modřínová zkušební tělesa opatřená spirálovými hřebíky zatížená teplotami -25 °C a 70 °C*……18

Tab. 16: *Získané hodnoty pro referenční modřínová zkušební tělesa opatřená hladkými hřebíky*…….19

Tab. 17: *Získané hodnoty pro modřínová zkušební tělesa opatřená hladkými hřebíky zatížená teplotami -15 °C a 70 °C*……..20

Tab. 18: *Získané hodnoty pro modřínová zkušební tělesa opatřená hladkými hřebíky zatížená teplotami -25 °C a 70 °C*……21

Tab. 19: *Získané hodnoty hmotnosti a vlhkosti zkušebních těles*……..22

Tab. 1: *Získané hodnoty pro referenční smrková zkušební tělesa opatřená konvexními hřebíky*

Číslo tělesa	Dřevina	Teplotní zatížení (°C)	Typ hřebíku	ρ_p (kg/m^3)	ρ_m (kg/m^3)	ρ_k (kg/m^3)	$F_{max\ Tan}$ (N)	$F_{max\ Rad}$ (N)	$f_{ax\ Tan}$ (MPa)	$f_{ax\ Rad}$ (MPa)	R_{tan} (N/mm)	R_{rad} (N/mm)
10-1-13	SM	REF	K	398	-	-	1057	902,15	12,58	10,74	35,23	30,07
10-1-4	SM	REF	K	377,58	-	-	730,75	1141,55	8,7	13,59	24,36	38,05
10-1-22	SM	REF	K	376,33	-	-	945,4	855,75	11,25	10,19	31,51	28,53
10-2-6	SM	REF	K	400,32	-	-	1092,6	1194,25	13,01	14,22	36,42	39,81
10-2-15	SM	REF	K	380,84	-	-	802,5	943,45	9,55	11,23	26,75	31,45
10-3-2	SM	REF	K	356,61	-	-	916,1	1009,45	10,91	12,02	30,54	33,65
10-3-11	SM	REF	K	373,06	-	-	1064,15	1080,65	12,67	12,86	35,47	36,02
10-3-20	SM	REF	K	385,81	-	-	958,25	952,55	11,41	11,34	31,94	31,75
10-4-5	SM	REF	K	398,98	-	-	699,15	1241,75	8,32	14,78	23,31	41,39
10-4-14	SM	REF	K	398,55	-	-	821	935,45	9,77	11,14	27,37	31,18
10-4-23	SM	REF	K	386,03	-	-	1002,35	1062,4	11,93	12,65	33,41	35,41
10-5-9	SM	REF	K	372,14	-	-	772,6	911,55	9,2	10,85	25,75	30,39
10-5-18	SM	REF	K	395,27	-	-	1010,35	1177,45	12,03	14,02	33,68	39,25
10-6-4	SM	REF	K	385,81	-	-	1139,55	1102,55	13,57	13,13	37,99	36,75
10-6-13	SM	REF	K	368,73	-	-	1036	990,1	12,33	11,79	34,53	33
10-6-22	SM	REF	K	359,04	-	-	804,2	891,6	9,57	10,61	26,81	29,72
9-1-8	SM	REF	K	389,32	-	-	719,4	1011,2	8,56	12,04	23,98	33,71
9-1-17	SM	REF	K	397,92	-	-	523,55	1044,5	6,23	12,43	17,45	34,82
9-2-3	SM	REF	K	353,51	-	-	570,2	977	6,79	11,63	19,01	32,57
9-2-12	SM	REF	K	364,34	-	-	521,8	989,55	6,21	11,78	17,39	32,99

Tab. 2: *Získané hodnoty pro smrková zkušební tělesa opatřená konvexními hřebíky zatížená teplotami -15 °C a 70 °C*

Číslo tělesa	Dřevina	Teplotní zatížení (°C)	Typ hřebíku	ρ_p (kg/m^3)	ρ_m (kg/m^3)	ρ_k (kg/m^3)	$F_{max\ Tan}$ (N)	$F_{max\ Rad}$ (N)	$f_{ax\ Tan}$ (MPa)	$f_{ax\ Rad}$ (MPa)	R_{tan} (N/mm)	R_{rad} (N/mm)
10-1-5	SM	-15, 70	K	387,09	389,26	376,52	685,5	882,5	8,16	10,51	22,85	29,42
10-1-14	SM	-15, 70	K	394,6	395,61	382,04	987,3	751	11,75	8,94	32,91	25,03
10-1-23	SM	-15, 70	K	370,34	371,45	356,82	981,85	790	11,69	9,4	32,73	26,33
10-2-7	SM	-15, 70	K	397,32	397,08	385,94	940	907,85	11,19	10,81	31,33	30,26
10-2-16	SM	-15, 70	K	380,6	379,69	366,14	712,85	913,25	8,49	10,87	23,76	30,44
10-3-3	SM	-15, 70	K	359,17	360,82	347,24	524,4	889,65	6,24	10,59	17,48	29,66
10-3-12	SM	-15, 70	K	369,21	369,19	358,37	809,65	726,5	9,64	8,65	26,99	24,22
10-3-21	SM	-15, 70	K	384,17	385,32	372,85	649,1	960,5	7,73	11,43	21,64	32,02
10-4-6	SM	-15, 70	K	409,78	411,07	399,27	746,7	919,5	8,89	10,95	24,89	30,65
10-4-15	SM	-15, 70	K	402,01	403,47	390,45	872,85	961,35	10,39	11,44	29,1	32,05
10-5-1	SM	-15, 70	K	370,16	371,41	356,98	477,4	908,4	5,68	10,81	15,91	30,28
10-5-10	SM	-15, 70	K	372,48	374	362,59	757,8	602,65	9,02	7,17	25,26	20,09
10-5-19	SM	-15, 70	K	395,08	395,61	382,57	930,9	909,25	11,08	10,82	31,03	30,31
10-6-5	SM	-15, 70	K	387,13	389,19	377,13	885,35	988,7	10,54	11,77	29,51	32,96
10-6-14	SM	-15, 70	K	366,56	367,54	355,97	791,4	709,45	9,42	8,45	26,38	23,65
10-6-23	SM	-15, 70	K	366,19	367,72	356,95	734,75	784	8,75	9,33	24,49	26,13
9-1-9	SM	-15, 70	K	387,97	387,12	374,33	659,35	1143,55	7,85	13,61	21,98	38,12
9-1-18	SM	-15, 70	K	391,92	392,4	371,45	571,65	931,2	6,81	11,09	19,06	31,04
9-2-4	SM	-15, 70	K	352,61	353,39	339,57	247,15	724,5	2,94	8,63	8,24	24,15
9-2-13	SM	-15, 70	K	359,26	361,35	347,78	599,25	719,7	7,13	8,57	19,98	23,99

Tab. 3: *Získané hodnoty pro smrková zkušební tělesa opatřená konvexními hřebíky zatížená teplotami -25 °C a 70 °C*

Číslo tělesa	Dřevina	Teplotní zatížení (°C)	Typ hřebíku	ρ_p (kg/m^3)	ρ_m (kg/m^3)	ρ_k (kg/m^3)	$F_{max\ Tan}$ (N)	$F_{max\ Rad}$ (N)	$f_{ax\ Tan}$ (MPa)	$f_{ax\ Rad}$ (MPa)	R_{tan} (N/mm)	R_{rad} (N/mm)
10-1-6	SM	-25, 70	K	387,54	388,97	375,23	863,7	768,9	10,28	9,15	28,79	25,63
10-1-15	SM	-25, 70	K	391,32	393,78	381,01	858,85	811,3	10,22	9,66	28,63	27,04
10-1-24	SM	-25, 70	K	372,32	374,54	360,68	918,95	985,25	10,94	11,73	30,63	32,84
10-2-8	SM	-25, 70	K	398,56	400,07	387,57	946,25	1028,55	11,26	12,24	31,54	34,29
10-2-17	SM	-25, 70	K	380,94	381,8	367,71	764,65	824,4	9,10	9,81	25,49	27,48
10-3-4	SM	-25, 70	K	361,83	364,41	352,72	689,75	583,85	8,21	6,95	22,99	19,46
10-3-13	SM	-25, 70	K	383,59	385,66	372,52	323,95	731,9	3,86	8,71	10,8	24,4
10-3-22	SM	-25, 70	K	377,36	378,74	366,51	709,7	639,95	8,45	7,62	23,66	21,33
10-4-7	SM	-25, 70	K	403,47	406,32	392,91	1084,9	941,7	12,92	11,21	36,16	31,39
10-4-16	SM	-25, 70	K	398,04	399,98	387,03	575,35	866,85	6,85	10,32	19,18	28,9
10-5-2	SM	-25, 70	K	362,93	365,93	351,7	671,85	875,65	8	10,42	22,4	29,19
10-5-11	SM	-25, 70	K	372,98	375,33	363,18	755,8	796,25	9	9,48	25,19	26,54
10-5-20	SM	-25, 70	K	390,65	393,26	380,95	706	873,95	8,4	10,40	23,53	29,13
10-6-6	SM	-25, 70	K	388,76	390,62	378,76	778,6	831,25	9,27	9,90	25,95	27,71
10-6-15	SM	-25, 70	K	365,81	368,03	355,07	640,8	581,85	7,63	6,93	21,36	19,4
9-1-1	SM	-25, 70	K	389,98	392,02	378,07	555,7	922,05	6,62	10,98	18,52	30,74
9-1-10	SM	-25, 70	K	387,05	389,05	375,82	794,8	875,95	9,46	10,43	26,49	29,2
9-1-19	SM	-25, 70	K	393,47	395,85	380,43	406,25	1002,35	4,84	11,93	13,54	33,41
9-2-5	SM	-25, 70	K	347,06	348,98	334,82	351,85	643,1	4,19	7,66	11,73	21,44
9-2-14	SM	-25, 70	K	353,18	354,64	342,01	455,5	595,55	5,42	7,09	15,18	19,85

Tab. 4: *Získané hodnoty pro referenční smrková zkušební tělesa opatřená spirálovými hřebíky*

Číslo tělesa	Dřevina	Teplotní zatížení (°C)	Typ hřebíku	ρ_p (kg/m^3)	ρ_m (kg/m^3)	ρ_k (kg/m^3)	$F_{max\ Tan}$ (N)	$F_{max\ Rad}$ (N)	$f_{ax\ Tan}$ (MPa)	$f_{ax\ Rad}$ (MPa)	R_{tan} (N/mm)	R_{rad} (N/mm)
10-1-7	SM	REF	S	395,87	-	-	269,6	247,1	3,21	2,94	8,99	8,24
10-1-16	SM	REF	S	395,72	-	-	251,65	203,55	3	2,42	8,39	6,79
10-1-25	SM	REF	S	393,84	-	-	241,15	259,35	2,87	3,09	8,04	8,65
10-2-9	SM	REF	S	398,27	-	-	250,25	290,65	2,98	3,46	8,34	9,69
10-2-18	SM	REF	S	383,77	-	-	197,85	182,8	2,36	2,18	6,6	6,09
10-3-5	SM	REF	S	370,26	-	-	242,55	305,2	2,89	3,63	8,09	10,17
10-3-14	SM	REF	S	386,86	-	-	256,8	223,75	3,06	2,66	8,56	7,46
10-3-23	SM	REF	S	390,2	-	-	314,85	233,15	3,75	2,78	10,5	7,77
10-4-8	SM	REF	S	412,13	-	-	295,5	259,05	3,52	3,08	9,85	8,64
10-4-17	SM	REF	S	399,16	-	-	267,6	308,9	3,19	3,68	8,92	10,3
10-5-3	SM	REF	S	378,44	-	-	217,2	262,2	2,59	3,12	7,24	8,74
10-5-12	SM	REF	S	398,5	-	-	222,35	286,7	2,65	3,41	7,41	9,56
10-5-21	SM	REF	S	388,22	-	-	228,05	274,15	2,71	3,26	7,6	9,14
10-6-7	SM	REF	S	392,24	-	-	258,2	313,15	3,07	3,73	8,61	10,44
10-6-16	SM	REF	S	368,37	-	-	223,2	283,85	2,66	3,38	7,44	9,46
9-1-2	SM	REF	S	391,16	-	-	168,55	300,9	2,01	3,58	5,62	10,03
9-1-11	SM	REF	S	391,1	-	-	242,25	219,2	2,88	2,61	8,08	7,31
9-1-20	SM	REF	S	397,76	-	-	146,9	270,15	1,75	3,22	4,9	9,01
9-2-6	SM	REF	S	349,18	-	-	156,3	255,35	1,86	3,04	5,21	8,51
9-2-15	SM	REF	S	355,55	-	-	229,75	207,8	2,74	2,47	7,66	6,93

Tab. 5: *Získané hodnoty pro smrková zkušební tělesa opatřená spirálovými hřebíky zatížená teplotami -15 °C a 70 °C*

Číslo tělesa	Dřevina	Teplotní zatížení (°C)	Typ hřebíku	ρ_p (kg/m^3)	ρ_m (kg/m^3)	ρ_k (kg/m^3)	$F_{max\ Tan}$ (N)	$F_{max\ Rad}$ (N)	$f_{ax\ Tan}$ (MPa)	$f_{ax\ Rad}$ (MPa)	R_{tan} (N/mm)	R_{rad} (N/mm)
10-1-8	SM	-15, 70	S	402	403,15	390,7	103,9	70,9	1,24	0,84	3,46	2,36
10-1-17	SM	-15, 70	S	398,08	399,73	386,67	103,65	117	1,23	1,39	3,46	3,9
10-2-1	SM	-15, 70	S	377,66	378,21	363,94	50,4	115,3	0,60	1,37	1,68	3,84
10-2-10	SM	-15, 70	S	397,13	398,19	386,44	120,15	123,25	1,43	1,47	4,01	4,11
10-2-19	SM	-15, 70	S	378,47	378,74	365,04	60,95	96,5	0,73	1,15	2,03	3,22
10-3-6	SM	-15, 70	S	371,89	373,23	359,53	83,7	112,15	1	1,34	2,79	3,74
10-3-15	SM	-15, 70	S	383,97	384,36	372,61	76	103,35	0,90	1,23	2,53	3,45
10-3-24	SM	-15, 70	S	373,09	374,23	361,23	70,05	112,75	0,83	1,34	2,34	3,76
10-4-9	SM	-15, 70	S	396,72	397,96	386,05	121	150,3	1,44	1,79	4,03	5,01
10-4-18	SM	-15, 70	S	393,38	395,99	383,52	110,75	117,6	1,32	1,4	3,69	3,92
10-5-4	SM	-15, 70	S	365,36	367,11	353,01	56,1	185,05	0,67	2,2	1,87	6,17
10-5-13	SM	-15, 70	S	394,19	395,04	383,27	109,3	113,6	1,3	1,35	3,64	3,79
10-5-22	SM	-15, 70	S	390,22	389,92	379,14	110,45	115,3	1,31	1,37	3,68	3,84
10-6-8	SM	-15, 70	S	387,13	387,14	374,76	87,4	122,4	1,04	1,46	2,91	4,08
10-6-17	SM	-15, 70	S	362,82	364,02	351,78	70,6	102,2	0,84	1,22	2,35	3,41
9-1-3	SM	-15, 70	S	391,03	391,25	378,92	86,25	171,95	1,03	2,05	2,88	5,73
9-1-12	SM	-15, 70	S	387,35	387,21	371,59	106,2	144,6	1,26	1,72	3,54	4,82
9-1-21	SM	-15, 70	S	392,06	393,06	378,14	76,6	98,2	0,91	1,17	2,55	3,27
9-2-7	SM	-15, 70	S	353,31	354,51	339,07	78,6	88,55	0,94	1,05	2,62	2,95
9-2-16	SM	-15, 70	S	358,46	361,35	347,01	64,9	96,5	0,77	1,15	2,16	3,22

Tab. 6: *Získané hodnoty pro smrková zkušební tělesa opatřená spirálovými hřebíky zatížená teplotami -25 °C a 70 °C*

Číslo tělesa	Dřevina	Teplotní zatížení (°C)	Typ hřebíku	ρ_p (kg/m^3)	ρ_m (kg/m^3)	ρ_k (kg/m^3)	$F_{max\ Tan}$ (N)	$F_{max\ Rad}$ (N)	$f_{ax\ Tan}$ (MPa)	$f_{ax\ Rad}$ (MPa)	R_{tan} (N/mm)	R_{rad} (N/mm)
10-1-9	SM	-25, 70	S	398,3	399,86	386,87	126,4	153,45	1,5	1,83	4,21	5,12
10-1-18	SM	-25, 70	S	391,16	392,83	379,99	127,8	129,8	1,52	1,55	4,26	4,33
10-2-2	SM	-25, 70	S	380,02	381,5	368,33	110,45	119,85	1,31	1,43	3,68	4
10-2-11	SM	-25, 70	S	369,59	373,25	360,43	97,65	114,45	1,16	1,36	3,26	3,82
10-2-20	SM	-25, 70	S	369,82	372,45	358,54	83,95	110,75	1	1,32	2,8	3,69
10-3-7	SM	-25, 70	S	379,07	381,71	369,29	118,7	132,95	1,41	1,58	3,96	4,43
10-3-16	SM	-25, 70	S	382,07	384,76	372,12	90,5	106,75	1,08	1,27	3,02	3,56
10-4-1	SM	-25, 70	S	403,83	407,78	393,08	92,5	171,1	1,1	2,04	3,08	5,7
10-4-10	SM	-25, 70	S	394,84	396,87	382,55	43	139,2	0,51	1,66	1,43	4,64
10-4-19	SM	-25, 70	S	390,69	393,48	381,36	90,5	143,2	1,08	1,7	3,02	4,77
10-5-5	SM	-25, 70	S	362,06	363,36	349,74	91,65	113	1,09	1,35	3,06	3,77
10-5-14	SM	-25, 70	S	391,72	395,04	381,5	113,85	73,45	1,36	0,87	3,8	2,45
10-5-23	SM	-25, 70	S	389,21	391,78	378,9	118,4	134,95	1,41	1,61	3,95	4,5
10-6-9	SM	-25, 70	S	384,69	385,37	372,51	114,7	121	1,37	1,44	3,82	4,03
10-6-18	SM	-25, 70	S	358,23	361,01	348,02	111	109,9	1,32	1,31	3,7	3,66
9-1-4	SM	-25, 70	S	391,1	392,74	380,5	88,8	117	1,06	1,39	2,96	3,9
9-1-13	SM	-25, 70	S	382,38	384,06	370,18	85,95	143,25	1,02	1,71	2,87	4,78
9-1-22	SM	-25, 70	S	392,43	394,83	378,82	85,1	118,4	1,01	1,41	2,84	3,95
9-2-8	SM	-25, 70	S	349,33	351,17	335,96	68,6	41,55	0,82	0,49	2,29	1,39
9-2-17	SM	-25, 70	S	355,75	359,04	344,33	88,5	93,35	1,05	1,11	2,95	3,11

Tab. 7: *Získané hodnoty pro referenční smrková zkušební tělesa opatřená hladkými hřebíky*

Číslo tělesa	Dřevina	Teplotní zatížení (°C)	Typ hřebíku	ρ_p (kg/m^3)	ρ_m (kg/m^3)	ρ_k (kg/m^3)	$F_{max\ Tan}$ (N)	$F_{max\ Rad}$ (N)	$f_{ax\ Tan}$ (MPa)	$f_{ax\ Rad}$ (MPa)	R_{tan} (N/mm)	R_{rad} (N/mm)
10-1-1	SM	REF	H	398,09	-	-	204,1	282,7	2,43	3,37	6,8	9,42
10-1-10	SM	REF	H	403,76	-	-	134,95	253,65	1,61	3,02	4,5	8,46
10-1-19	SM	REF	H	387,92	-	-	191,6	300,05	2,28	3,57	6,39	10
10-2-3	SM	REF	H	389,23	-	-	241,4	257,65	2,87	3,07	8,05	8,59
10-2-12	SM	REF	H	377,86	-	-	222,9	262,2	2,65	3,12	7,43	8,74
10-2-21	SM	REF	H	376,17	-	-	136,95	228,05	1,63	2,71	4,57	7,6
10-3-8	SM	REF	H	376,69	-	-	220,65	233,45	2,63	2,78	7,36	7,78
10-3-17	SM	REF	H	384,93	-	-	260,5	235,15	3,1	2,8	8,68	7,84
10-4-2	SM	REF	H	408,19	-	-	252,65	254,5	3,01	3,03	8,42	8,48
10-4-11	SM	REF	H	409	-	-	256,8	250,8	3,06	2,99	8,56	8,36
10-4-20	SM	REF	H	392,34	-	-	196,7	266,7	2,34	3,18	6,56	8,89
10-5-6	SM	REF	H	367,17	-	-	293,2	238	3,49	2,83	9,77	7,93
10-5-15	SM	REF	H	394,82	-	-	254,2	245,95	3,03	2,93	8,47	8,2
10-6-1	SM	REF	H	382,8	-	-	241,7	201	2,88	2,39	8,06	6,7
10-6-10	SM	REF	H	395,22	-	-	195,3	241,4	2,33	2,87	6,51	8,05
10-6-19	SM	REF	H	367,2	-	-	261,05	243,1	3,11	2,89	8,7	8,1
9-1-5	SM	REF	H	387,26	-	-	176,5	239,15	2,1	2,85	5,88	7,97
9-1-14	SM	REF	H	384,45	-	-	189,3	265,6	2,25	3,16	6,31	8,85
9-1-23	SM	REF	H	400,12	-	-	231,15	249,4	2,75	2,97	7,71	8,31
9-2-9	SM	REF	H	359,39	-	-	149,2	224,6	1,78	2,67	4,97	7,49

Tab. 8: *Získané hodnoty pro smrková zkušební tělesa opatřená hladkými hřebíky zatížená teplotami -15 °C a 70 °C*

Číslo tělesa	Dřevina	Teplotní zatížení (°C)	Typ hřebíku	ρ_p (kg/m^3)	ρ_m (kg/m^3)	ρ_k (kg/m^3)	$F_{max\ Tan}$ (N)	$F_{max\ Rad}$ (N)	$f_{ax\ Tan}$ (MPa)	$f_{ax\ Rad}$ (MPa)	R_{tan} (N/mm)	R_{rad} (N/mm)
10-1-2	SM	-15, 70	H	384,03	384,63	370,88	45,55	85,4	0,54	1,02	1,52	2,85
10-1-11	SM	-15, 70	H	402,49	402,85	393,39	67,5	86,85	0,8	1,03	2,25	2,9
10-1-20	SM	-15, 70	H	377,46	378,25	362,07	47,85	78	0,57	0,93	1,6	2,6
10-2-4	SM	-15, 70	H	392,24	393,08	380,14	78,3	82,85	0,93	0,99	2,61	2,76
10-2-13	SM	-15, 70	H	376,69	377,77	367,08	170,55	60,05	2,03	0,71	5,69	2
10-2-22	SM	-15, 70	H	369,34	368,69	351,94	50,7	49,25	0,6	0,59	1,69	1,64
10-3-9	SM	-15, 70	H	374,15	373,89	363,6	47	137,2	0,56	1,63	1,57	4,57
10-3-18	SM	-15, 70	H	383,21	382,81	370,86	49,85	68,9	0,59	0,82	1,66	2,3
10-4-3	SM	-15, 70	H	407,52	407,23	394,32	43,3	107,9	0,52	1,28	1,44	3,6
10-4-12	SM	-15, 70	H	404,65	406,21	392,62	97,35	119,55	1,16	1,42	3,25	3,99
10-4-21	SM	-15, 70	H	387,85	388,85	375,21	59,2	84,55	0,7	1,01	1,97	2,82
10-5-7	SM	-15, 70	H	368,6	371,27	358,17	49,25	56,35	0,59	0,67	1,64	1,88
10-5-16	SM	-15, 70	H	396,53	397,58	386,59	78,85	76	0,94	0,9	2,63	2,53
10-6-2	SM	-15, 70	H	387,3	388,7	374,24	97,65	67,75	1,16	0,81	3,26	2,26
10-6-20	SM	-15, 70	H	363,13	363,76	352,72	52,65	70,05	0,63	0,83	1,76	2,34
9-1-6	SM	-15, 70	H	385,3	385,42	371,94	30,75	57,5	0,37	0,68	1,03	1,92
10-6-11	SM	-15, 70	H	395,78	396,22	383,99	49,85	68,35	0,59	0,81	1,66	2,28
9-1-15	SM	-15, 70	H	387,31	388,22	374,93	29,9	92,25	0,36	1,1	1	3,08
9-2-1	SM	-15, 70	H	354,64	355,75	341,34	37,3	58,95	0,44	0,7	1,24	1,97
9-2-10	SM	-15, 70	H	359,46	360,51	345,91	35,6	63,8	0,42	0,76	1,19	2,13

Tab. 9: *Získané hodnoty pro smrková zkušební tělesa opatřená hladkými hřebíky zatížená teplotami -25 °C a 70 °C*

Číslo tělesa	Dřevina	Teplotní zatížení (°C)	Typ hřebíku	ρ_p (kg/m^3)	ρ_m (kg/m^3)	ρ_k (kg/m^3)	$F_{max\ Tan}$ (N)	$F_{max\ Rad}$ (N)	$f_{ax\ Tan}$ (MPa)	$f_{ax\ Rad}$ (MPa)	R_{tan} (N/mm)	R_{rad} (N/mm)
10-1-3	SM	-25, 70	H	382,38	384,76	370,52	51,8	116,7	0,62	1,39	1,73	3,89
10-1-12	SM	-25, 70	H	419,93	422,44	406,55	91,35	134,95	1,09	1,61	3,05	4,5
10-1-21	SM	-25, 70	H	374,02	376,19	363,49	72	79,15	0,86	0,94	2,4	2,64
10-2-5	SM	-25, 70	H	395,26	397,15	384,21	74,85	97,65	0,89	1,16	2,5	3,26
10-2-14	SM	-25, 70	H	377,46	380	366,87	69,45	82,85	0,83	0,99	2,32	2,76
10-3-1	SM	-25, 70	H	353,34	355,13	341,28	35,85	93,95	0,43	1,12	1,2	3,13
10-3-10	SM	-25, 70	H	371,64	373,46	361,4	80,25	115,85	0,96	1,38	2,68	3,86
10-3-19	SM	-25, 70	H	378,29	380,59	368,91	65,75	90,25	0,78	1,07	2,19	3,01
10-4-4	SM	-25, 70	H	406,89	408,19	394,29	95,95	112,7	1,14	1,34	3,2	3,76
10-4-13	SM	-25, 70	H	398,07	399,93	388,01	109	136,05	1,3	1,62	3,63	4,54
10-4-22	SM	-25, 70	H	382,74	386,15	373,01	77,15	94,8	0,92	1,13	2,57	3,16
10-5-8	SM	-25, 70	H	367,76	371,04	357,6	54,35	54,35	0,65	0,65	1,81	1,81
10-5-17	SM	-25, 70	H	388,18	391,65	378,73	31,6	92,8	0,38	1,1	1,05	3,09
10-6-3	SM	-25, 70	H	390,05	394,41	378,69	132,1	79,4	1,57	0,95	4,4	2,65
10-6-12	SM	-25, 70	H	367,6	369,9	358,06	70,6	78,3	0,84	0,93	2,35	2,61
10-6-21	SM	-25, 70	H	358,86	361,88	349,32	79,7	70	0,95	0,83	2,66	2,33
9-1-7	SM	-25, 70	H	386,53	388,51	373,35	71,45	108,75	0,85	1,29	2,38	3,63
9-1-16	SM	-25, 70	H	387,09	388,54	375,6	47,55	110,15	0,57	1,31	1,59	3,67
9-2-2	SM	-25, 70	H	350,54	351,71	337,89	33,3	94,8	0,4	1,13	1,11	3,16
9-2-11	SM	-25, 70	H	357,96	360,96	346,52	32,45	71,45	0,39	0,85	1,08	2,38

Tab. 10: *Získané hodnoty pro referenční modřínová zkušební tělesa opatřená konvexními hřebíky*

Číslo tělesa	Dřevina	Teplotní zatížení (°C)	Typ hřebíku	ρ_p (kg/m^3)	ρ_m (kg/m^3)	ρ_k (kg/m^3)	$F_{max\ Tan}$ (N)	$F_{max\ Rad}$ (N)	$f_{ax\ Tan}$ (MPa)	$f_{ax\ Rad}$ (MPa)	R_{tan} (N/mm)	R_{rad} (N/mm)
2-1-4	MD	REF	K	665,24	-	-	2277,45	3061,15	27,11	36,44	75,92	102,04
2-2-3	MD	REF	K	644,92	-	-	1560,9	2129,35	18,58	25,35	52,03	70,98
2-3-1	MD	REF	K	638,84	-	-	2127,7	2139,65	25,33	25,47	70,92	71,32
2-3-10	MD	REF	K	609,2	-	-	1638,35	2264,6	19,5	26,96	54,61	75,49
3-2-8	MD	REF	K	850,43	-	-	2605,35	2750,15	31,02	32,74	86,85	91,67
3-3-6	MD	REF	K	709,84	-	-	2083	2651,8	24,8	31,57	69,43	88,39
3-4-4	MD	REF	K	770,83	-	-	2414,9	2756,5	28,75	32,82	80,5	91,88
4-1-1	MD	REF	K	551,6	-	-	1753,9	2189,15	20,88	26,06	58,46	72,97
4-1-10	MD	REF	K	552,89	-	-	1686,7	1940,65	20,08	23,1	56,22	64,69
4-1-19	MD	REF	K	553,04	-	-	1488,3	1613,25	17,72	19,21	49,61	53,78
4-2-5	MD	REF	K	552,57	-	-	1583,35	1647,4	18,85	19,61	52,78	54,91
4-2-14	MD	REF	K	504,17	-	-	1295	1672,75	15,42	19,91	43,17	55,76
4-3-3	MD	REF	K	570,53	-	-	1360,5	1899,95	16,2	22,62	45,35	63,33
4-3-12	MD	REF	K	518,71	-	-	1070,1	1975,4	12,74	23,52	35,67	65,85
4-3-21	MD	REF	K	536,41	-	-	1732,25	2350	20,62	27,98	57,74	78,33
4-4-8	MD	REF	K	578,21	-	-	1647,7	1775,25	19,62	21,13	54,92	59,18
4-4-17	MD	REF	K	553,71	-	-	1677	1894,6	19,96	22,55	55,9	63,15
5-1-3	MD	REF	K	661,69	-	-	2104,05	2729,8	25,05	32,5	70,14	90,99
5-1-12	MD	REF	K	638,6	-	-	1911,6	1905,6	22,76	22,69	63,72	63,52
5-1-21	MD	REF	K	696,2	-	-	1898,2	2150,7	22,6	25,6	63,27	71,69

Tab. 11: *Získané hodnoty pro modřínová zkušební tělesa opatřená konvexními hřebíky zatížená teplotami -15 °C a 70 °C*

Číslo tělesa	Dřevina	Teplotní zatížení (°C)	Typ hřebíku	ρ_p (kg/m^3)	ρ_m (kg/m^3)	ρ_k (kg/m^3)	$F_{max\ Tan}$ (N)	$F_{max\ Rad}$ (N)	$f_{ax\ Tan}$ (MPa)	$f_{ax\ Rad}$ (MPa)	R_{tan} (N/mm)	R_{rad} (N/mm)
2-1-5	MD	-15, 70	K	658,53	662,31	643,11	1935,55	2307,05	23,04	27,46	64,52	76,9
2-2-4	MD	-15, 70	K	642,24	644,11	626,17	1285,35	1602,45	15,3	19,08	42,85	53,42
2-3-2	MD	-15, 70	K	617,24	617,1	603,45	1367,3	1466,7	16,28	17,46	45,58	48,89
2-3-11	MD	-15, 70	K	609,92	612,19	592,75	1345,7	1279,05	16,02	15,23	44,86	42,64
3-2-9	MD	-15, 70	K	836,44	837,79	817,27	1689,6	2689,4	20,11	32,02	56,32	89,65
3-3-7	MD	-15, 70	K	686,79	690,54	667,03	1318,35	1838,2	15,69	21,88	43,95	61,27
3-4-5	MD	-15, 70	K	755,55	761,79	738,75	1870,05	1626,95	22,26	19,37	62,34	54,23
4-1-2	MD	-15, 70	K	551,87	552,73	536,67	1467,25	1718,9	17,47	20,46	48,91	57,3
4-1-11	MD	-15, 70	K	545,35	546,84	530,79	1022,3	1499,7	12,17	17,85	34,08	49,99
4-1-20	MD	-15, 70	K	551,72	551,37	530,6	1124,5	1288,45	13,39	15,34	37,48	42,95
4-2-6	MD	-15, 70	K	553,35	553,03	532,27	1328,05	1463,25	15,81	17,42	44,27	48,78
4-2-15	MD	-15, 70	K	534,65	532,99	508,43	987,85	1423,95	11,76	16,95	32,93	47,47
4-3-4	MD	-15, 70	K	553,48	555,99	534,8	1684,75	1352,25	20,06	16,1	56,16	45,08
4-3-13	MD	-15, 70	K	517,45	517,85	499,75	1051,6	990,7	12,52	11,79	35,05	33,02
4-3-22	MD	-15, 70	K	524,69	526,03	506,13	1512,8	1289,6	18,01	15,35	50,43	42,99
4-4-9	MD	-15, 70	K	567,08	567,79	545,2	1088,05	1117,95	12,95	13,31	36,27	37,27
4-4-18	MD	-15, 70	K	566,21	568,88	548,53	1258,3	1453,6	14,98	17,3	41,94	48,45
5-1-4	MD	-15, 70	K	664,22	667,31	647,66	1614,15	2096,95	19,22	24,96	53,81	69,9
5-1-13	MD	-15, 70	K	649,42	651,14	624,81	1655,15	1594,8	19,7	18,99	55,17	53,16
5-1-22	MD	-15, 70	K	711,55	712,08	691,17	1551,25	1863,5	18,47	22,18	51,71	62,12

Tab. 12: *Získané hodnoty pro modřínová zkušební tělesa opatřená konvexními hřebíky zatížená teplotami -25 °C a 70 °C*

Číslo tělesa	Dřevina	Teplotní zatížení (°C)	Typ hřebíku	ρ_p (kg/m^3)	ρ_m (kg/m^3)	ρ_k (kg/m^3)	$F_{max\ Tan}$ (N)	$F_{max\ Rad}$ (N)	$f_{ax\ Tan}$ (MPa)	$f_{ax\ Rad}$ (MPa)	R_{tan} (N/mm)	R_{rad} (N/mm)
2-1-6	MD	-25, 70	K	652,56	654,32	643,69	1195,9	1423,1	14,24	16,94	39,86	47,44
2-2-5	MD	-25, 70	K	638,75	640,34	626,97	1591,9	1771	18,95	21,08	53,06	59,03
2-3-3	MD	-25, 70	K	609,28	611,92	594,86	1437,05	1107,65	17,11	13,19	47,9	36,92
3-2-1	MD	-25, 70	K	704,18	708,25	689,08	1562,9	1850,4	18,61	22,03	52,1	61,68
3-2-10	MD	-25, 70	K	817,51	817,23	798,37	1837,6	1953,45	21,88	23,26	61,25	65,12
3-3-8	MD	-25, 70	K	666,09	669,03	652,36	1708,65	1583,1	20,34	18,85	56,96	52,77
3-4-6	MD	-25, 70	K	734,8	737,63	720,72	1902,2	2088,4	22,65	24,86	63,41	69,61
4-1-3	MD	-25, 70	K	532,88	547,68	532	1336,55	1242,6	15,91	14,79	44,55	41,42
4-1-12	MD	-25, 70	K	544,26	546,2	532,95	1090	1912,45	12,98	22,77	36,33	63,75
4-1-21	MD	-25, 70	K	553,55	556,02	546,84	1342,25	1052,45	15,98	12,53	44,74	35,08
4-2-7	MD	-25, 70	K	547,93	549,64	532,63	1187,1	1028,8	14,13	12,25	39,57	34,29
4-2-16	MD	-25, 70	K	507,42	508,17	495,43	1199,35	1417,95	14,28	16,88	39,98	47,27
4-3-5	MD	-25, 70	K	550,62	552,08	539,49	1237,2	1206,15	14,73	14,36	41,24	40,21
4-3-14	MD	-25, 70	K	501,77	503,68	488,45	1517,6	1046,75	18,07	12,46	50,59	34,89
4-4-1	MD	-25, 70	K	568,2	570,29	552,24	1548,35	1175,45	18,43	13,99	51,61	39,18
4-4-10	MD	-25, 70	K	562,08	563,61	549,12	1103,95	1057,85	13,14	12,59	36,8	35,26
5-1-5	MD	-25, 70	K	666,73	669,86	656,57	1540,1	2041,7	18,33	24,31	51,34	68,06
4-4-19	MD	-25, 70	K	571,67	573,44	558,49	1506,8	1631,5	17,94	19,42	50,23	54,38
5-1-14	MD	-25, 70	K	655,93	659,14	643,28	1469,5	1579,65	17,49	18,81	48,98	52,66
5-2-1	MD	-25, 70	K	690,85	695,7	679,91	1202,2	2207,4	14,31	26,28	40,07	73,58

Tab. 13: *Získané hodnoty pro referenční modřínová zkušební tělesa opatřená spirálovými hřebíky*

Číslo tělesa	Dřevina	Teplotní zatížení (°C)	Typ hřebíku	ρ_p (kg/m^3)	ρ_m (kg/m^3)	ρ_k (kg/m^3)	$F_{max\ Tan}$ (N)	$F_{max\ Rad}$ (N)	$f_{ax\ Tan}$ (MPa)	$f_{ax\ Rad}$ (MPa)	R_{tan} (N/mm)	R_{rad} (N/mm)
2-1-7	MD	REF	S	654,9	-	-	518,95	713,4	6,18	8,49	17,3	23,78
2-2-6	MD	REF	S	638,33	-	-	819,6	553,15	9,76	6,59	27,32	18,44
2-3-4	MD	REF	S	607,12	-	-	698,9	770,05	8,32	9,17	23,3	25,67
3-2-2	MD	REF	S	734,03	-	-	684,35	760,65	8,15	9,06	22,81	25,36
3-2-11	MD	REF	S	784,74	-	-	794,8	271,3	9,46	3,23	26,49	9,04
3-3-9	MD	REF	S	667,28	-	-	646,2	721,95	7,69	8,59	21,54	24,07
3-4-7	MD	REF	S	710,76	-	-	919,2	963,35	10,94	11,47	30,64	32,11
4-1-4	MD	REF	S	568,04	-	-	461,45	431	5,49	5,13	15,38	14,37
4-1-13	MD	REF	S	555,97	-	-	512,15	517,25	6,1	6,16	17,07	17,24
4-1-22	MD	REF	S	575,56	-	-	413,05	435,85	4,92	5,19	13,77	14,53
4-2-8	MD	REF	S	554,91	-	-	398,25	507,6	4,74	6,04	13,28	16,92
4-2-17	MD	REF	S	524,76	-	-	361,55	450,95	4,3	5,37	12,05	15,03
4-3-6	MD	REF	S	537,07	-	-	322,25	347,05	3,84	4,13	10,74	11,57
4-3-15	MD	REF	S	517,69	-	-	296,35	391,7	3,53	4,66	9,88	13,06
4-4-2	MD	REF	S	577,92	-	-	499,35	522,1	5,94	6,22	16,65	17,4
4-4-11	MD	REF	S	564,2	-	-	417,35	427,3	4,97	5,09	13,91	14,24
4-4-20	MD	REF	S	585,82	-	-	653,6	490,5	7,78	5,84	21,79	16,35
5-1-6	MD	REF	S	669,94	-	-	620,9	679,55	7,39	8,09	20,7	22,65
5-1-15	MD	REF	S	676,08	-	-	753,85	659,05	8,97	7,85	25,13	21,97
5-2-2	MD	REF	S	709,63	-	-	714,25	846,05	8,5	10,07	23,81	28,2

Tab. 14: *Získané hodnoty pro modřínová zkušební tělesa opatřená spirálovými hřebíky zatížená teplotami -15 °C a 70 °C*

Číslo tělesa	Dřevina	Teplotní zatížení (°C)	Typ hřebíku	ρ_p (kg/m^3)	ρ_m (kg/m^3)	ρ_k (kg/m^3)	$F_{max\ Tan}$ (N)	$F_{max\ Rad}$ (N)	$f_{ax\ Tan}$ (MPa)	$f_{ax\ Rad}$ (MPa)	R_{tan} (N/mm)	R_{rad} (N/mm)
2-1-8	MD	-15, 70	S	635,41	636,65	616,09	177,35	254,5	2,11	3,03	5,91	8,48
2-2-7	MD	-15, 70	S	663,78	665,41	642,63	217,5	227,2	2,59	2,7	7,25	7,57
2-3-5	MD	-15, 70	S	597,2	598,99	579,71	177,95	251,95	2,12	3	5,93	8,4
3-2-3	MD	-15, 70	S	740,1	740,13	715,66	306,9	534,05	3,65	6,36	10,23	17,8
3-3-1	MD	-15, 70	S	833,07	837,19	816,58	420,5	102,5	5,01	1,22	14,02	3,42
3-3-10	MD	-15, 70	S	669,94	673,41	654,74	244,25	404,8	2,91	4,82	8,14	13,49
3-4-8	MD	-15, 70	S	676,31	677,48	656,72	175,35	384,3	2,09	4,58	5,85	12,81
4-1-5	MD	-15, 70	S	543,16	545,46	526,84	225,45	301,75	2,68	3,59	7,52	10,06
4-1-14	MD	-15, 70	S	553,64	557,2	537,02	206,95	166	2,46	1,98	6,9	5,53
4-1-23	MD	-15, 70	S	582,63	584,53	565,19	150,6	237,15	1,79	2,82	5,02	7,91
4-2-9	MD	-15, 70	S	551,66	552,24	528,85	144,6	221,2	1,72	2,63	4,82	7,37
4-2-18	MD	-15, 70	S	522,64	522,96	506,32	163,15	200,15	1,94	2,38	5,44	6,67
4-3-7	MD	-15, 70	S	538,74	537,87	516,86	185,05	162,25	2,2	1,93	6,17	5,41
4-3-16	MD	-15, 70	S	508,69	508,68	489,71	182,5	191,9	2,17	2,28	6,08	6,4
4-4-3	MD	-15, 70	S	579,42	580,89	552,51	207,55	241,4	2,47	2,87	6,92	8,05
4-4-12	MD	-15, 70	S	563,67	564,11	541,53	162	193	1,93	2,3	5,4	6,43
4-4-21	MD	-15, 70	S	598,75	600,22	578,56	313,7	330,5	3,73	3,93	10,46	11,02
5-1-7	MD	-15, 70	S	665,47	667,97	648,25	239,7	136,95	2,85	1,63	7,99	4,57
5-1-16	MD	-15, 70	S	670,79	672,09	649,81	250,8	222,05	2,99	2,64	8,36	7,4
5-2-3	MD	-15, 70	S	711,41	713,16	692,75	340,75	412,2	4,06	4,91	11,36	13,74

Tab. 15: *Získané hodnoty pro modřínová zkušební tělesa opatřená spirálovými hřebíky zatížená teplotami -25 °C a 70 °C*

Číslo tělesa	Dřevina	Teplotní zatížení (°C)	Typ hřebíku	ρ_p (kg/m^3)	ρ_m (kg/m^3)	ρ_k (kg/m^3)	$F_{max\ Tan}$ (N)	$F_{max\ Rad}$ (N)	$f_{ax\ Tan}$ (MPa)	$f_{ax\ Rad}$ (MPa)	R_{tan} (N/mm)	R_{rad} (N/mm)
2-1-9	MD	-25, 70	S	630,96	633,37	621,74	286,4	394,85	3,41	4,7	9,55	13,16
2-2-8	MD	-25, 70	S	659,95	661,21	645,34	269,85	304,6	3,21	3,63	9	10,15
2-3-6	MD	-25, 70	S	582,07	584,49	570,6	116,4	309,45	1,39	3,68	3,88	10,32
3-2-4	MD	-25, 70	S	759,47	762,58	744,41	341,3	586,45	4,06	6,98	11,38	19,55
3-3-2	MD	-25, 70	S	839,99	843,25	822,31	454,05	497,3	5,41	5,92	15,14	16,58
3-3-11	MD	-25, 70	S	655,05	659,03	649,48	362,1	508,45	4,31	6,05	12,07	16,95
3-4-9	MD	-25, 70	S	651,36	655,53	638,75	324,8	504,45	3,87	6,01	10,83	16,82
4-1-6	MD	-25, 70	S	549,61	551,74	537,34	275,25	281,55	3,28	3,35	9,18	9,39
4-1-15	MD	-25, 70	S	551,51	553,83	536,83	220,35	287,5	2,62	3,42	7,35	9,58
4-2-1	MD	-25, 70	S	580,43	580,91	568,7	292,65	400,5	3,48	4,77	9,76	13,35
4-2-10	MD	-25, 70	S	553,72	556,27	537,44	180,2	267,85	2,15	3,19	6,01	8,93
4-2-19	MD	-25, 70	S	494,27	497,59	485,99	229,75	271,85	2,74	3,24	7,66	9,06
4-3-8	MD	-25, 70	S	536,81	538,63	519,98	173,05	245,9	2,06	2,93	5,77	8,2
4-3-17	MD	-25, 70	S	509,01	510,94	498,14	302,9	290,65	3,61	3,46	10,1	9,69
4-4-4	MD	-25, 70	S	563,72	566,12	550,3	284,1	288,95	3,38	3,44	9,47	9,63
4-4-13	MD	-25, 70	S	566,93	568,38	555,51	280,4	343,3	3,34	4,09	9,35	11,44
4-4-22	MD	-25, 70	S	591,51	592,71	580,5	322,8	324,8	3,84	3,87	10,76	10,83
5-1-8	MD	-25, 70	S	667,38	671,72	658,97	304,9	437,55	3,63	5,21	10,16	14,59
5-1-17	MD	-25, 70	S	635,03	637,83	621,11	328,8	466	3,91	5,55	10,96	15,53
5-2-4	MD	-25, 70	S	696,49	700,53	685,54	153,15	477,95	1,82	5,69	5,11	15,93

Tab. 16: *Získané hodnoty pro referenční modřínová zkušební tělesa opatřená hladkými hřebíky*

Číslo tělesa	Dřevina	Teplotní zatížení (°C)	Typ hřebíku	ρ_p (kg/m^3)	ρ_m (kg/m^3)	ρ_k (kg/m^3)	$F_{max\ Tan}$ (N)	$F_{max\ Rad}$ (N)	$f_{ax\ Tan}$ (MPa)	$f_{ax\ Rad}$ (MPa)	R_{tan} (N/mm)	R_{rad} (N/mm)
2-1-1	MD	REF	H	692,54	-	-	581,05	455,2	6,92	5,42	19,37	15,17
2-1-10	MD	REF	H	635,06	-	-	491,05	507	5,85	6,04	16,37	16,9
2-2-9	MD	REF	H	643,47	-	-	441,25	420,5	5,25	5,01	14,71	14,02
2-3-7	MD	REF	H	597,79	-	-	315,7	328,5	3,76	3,91	10,52	10,95
3-2-5	MD	REF	H	772,3	-	-	595,25	677,55	7,09	8,07	19,84	22,59
3-3-3	MD	REF	H	832,81	-	-	621,15	696,05	7,39	8,29	20,71	23,2
3-4-1	MD	REF	H	779,34	-	-	559,1	713,4	6,66	8,49	18,64	23,78
3-4-10	MD	REF	H	655,56	-	-	435,3	534,05	5,18	6,36	14,51	17,8
4-1-7	MD	REF	H	546,56	-	-	372,65	475,15	4,44	5,66	12,42	15,84
4-1-16	MD	REF	H	563,06	-	-	382,6	427,6	4,55	5,09	12,75	14,25
4-2-2	MD	REF	H	582,62	-	-	397,7	515,25	4,73	6,13	13,26	17,18
4-2-11	MD	REF	H	560,83	-	-	355,85	395,7	4,24	4,71	11,86	13,19
4-2-20	MD	REF	H	520,94	-	-	320,85	317,7	3,82	3,78	10,7	10,59
4-3-18	MD	REF	H	511,69	-	-	408,5	435,85	4,86	5,19	13,62	14,53
4-4-5	MD	REF	H	565,31	-	-	376,35	405,4	4,48	4,83	12,55	13,51
4-4-14	MD	REF	H	563,33	-	-	446,95	459,75	5,32	5,47	14,9	15,33
4-4-23	MD	REF	H	599,62	-	-	617,45	491,35	7,35	5,85	20,58	16,38
5-1-9	MD	REF	H	666,55	-	-	375,5	522,65	4,47	6,22	12,52	17,42
5-1-18	MD	REF	H	657,29	-	-	495,9	553,7	5,9	6,59	16,53	18,46
5-2-5	MD	REF	H	705,75	-	-	429,3	639,1	5,11	7,61	14,31	21,3

Tab. 17: *Získané hodnoty pro modřínová zkušební tělesa opatřená hladkými hřebíky zatížená teplotami -15 °C a 70 °C*

Číslo tělesa	Dřevina	Teplotní zatížení (°C)	Typ hřebíku	ρ_p (kg/m^3)	ρ_m (kg/m^3)	ρ_k (kg/m^3)	$F_{max\ Tan}$ (N)	$F_{max\ Rad}$ (N)	$f_{ax\ Tan}$ (MPa)	$f_{ax\ Rad}$ (MPa)	R_{tan} (N/mm)	R_{rad} (N/mm)
2-1-2	MD	-15, 70	H	679,07	681,28	660,31	144,9	301,75	1,73	3,59	4,83	10,06
2-2-1	MD	-15, 70	H	637,36	637,8	617,23	121	225,2	1,44	2,68	4,03	7,51
2-2-10	MD	-15, 70	H	656,54	656,92	638,12	156,3	235,15	1,86	2,8	5,21	7,84
2-3-8	MD	-15, 70	H	593,94	595,08	574,93	93,1	174,5	1,11	2,08	3,1	5,82
3-2-6	MD	-15, 70	H	803,17	795,35	772,42	193,3	330,25	2,3	3,93	6,44	11,01
3-3-4	MD	-15, 70	H	764,85	764,44	741,87	216,35	301,2	2,58	3,59	7,21	10,04
3-4-2	MD	-15, 70	H	763,42	769,01	745,47	199,55	346,75	2,38	4,13	6,65	11,56
3-4-11	MD	-15, 70	H	641,79	643,86	623,77	109,9	219,5	1,31	2,61	3,66	7,32
4-1-8	MD	-15, 70	H	549,99	550,57	534,24	147,45	214,65	1,76	2,56	4,92	7,16
4-1-17	MD	-15, 70	H	562,4	565,17	542,77	138,65	189,05	1,65	2,25	4,62	6,3
4-2-3	MD	-15, 70	H	573,34	574,08	554,65	109,05	202,4	1,3	2,41	3,64	6,75
4-3-1	MD	-15, 70	H	541,95	542,12	520,57	99,95	138,35	1,19	1,65	3,33	4,61
4-3-10	MD	-15, 70	H	543,99	545,76	526,73	84,85	14,9	1,01	0,18	2,83	0,5
4-3-19	MD	-15, 70	H	518,81	519,87	503,17	143,5	207,55	1,71	2,47	4,78	6,92
4-4-6	MD	-15, 70	H	559,93	560,68	538,12	97,95	124,15	1,17	1,48	3,27	4,14
4-4-15	MD	-15, 70	H	559,9	559,52	541,83	158,55	232,3	1,89	2,77	5,29	7,74
5-1-1	MD	-15, 70	H	655,46	655,13	635,2	174,8	267,3	2,08	3,18	5,83	8,91
5-1-10	MD	-15, 70	H	662,85	664,76	641,47	154,6	302,9	1,84	3,61	5,15	10,1
5-1-19	MD	-15, 70	H	657,58	661,13	638,2	135,8	212,95	1,62	2,54	4,53	7,1
5-2-6	MD	-15, 70	H	711,46	711,99	689,05	193,85	270,75	2,31	3,22	6,46	9,03

Tab. 18: *Získané hodnoty pro modřínová zkušební tělesa opatřená hladkými hřebíky zatížená teplotami -25 °C a 70 °C*

Číslo tělesa	Dřevina	Teplotní zatížení (°C)	Typ hřebíku	ρ_p (kg/m^3)	ρ_m (kg/m^3)	ρ_k (kg/m^3)	$F_{max\ Tan}$ (N)	$F_{max\ Rad}$ (N)	$f_{ax\ Tan}$ (MPa)	$f_{ax\ Rad}$ (MPa)	R_{tan} (N/mm)	R_{rad} (N/mm)
2-1-3	MD	-25, 70	H	686,68	685,93	669,8	189	265,9	2,25	3,17	6,3	8,86
2-2-2	MD	-25, 70	H	632,36	634,88	617,55	149,45	264,15	1,78	3,14	4,98	8,81
2-2-11	MD	-25, 70	H	644,52	647,28	634,79	239,1	205,25	2,85	2,44	7,97	6,84
2-3-9	MD	-25, 70	H	570,51	572,28	558,39	122,7	156	1,46	1,86	4,09	5,2
3-2-7	MD	-25, 70	H	838,19	835,21	819,16	235,4	324,8	2,8	3,87	7,85	10,83
3-3-5	MD	-25, 70	H	732,48	736,25	717,21	170,8	239,7	2,03	2,85	5,69	7,99
3-4-3	MD	-25, 70	H	750,6	753,44	738,69	262,45	315,4	3,12	3,75	8,75	10,51
3-4-12	MD	-25, 70	H	624,89	627,04	613,21	138,65	219,75	1,65	2,62	4,62	7,33
4-1-9	MD	-25, 70	H	548,38	550,88	540,17	271,85	233,7	3,24	2,78	9,06	7,79
4-1-18	MD	-25, 70	H	553,96	555,92	539,88	148,3	221,2	1,77	2,63	4,94	7,37
4-2-4	MD	-25, 70	H	553,4	554,43	539,13	114,15	282,7	1,36	3,37	3,81	9,42
4-2-13	MD	-25, 70	H	504,6	505,01	493,4	88,8	183,05	1,06	2,18	2,96	6,1
4-3-11	MD	-25, 70	H	519,57	520,5	506,41	136,35	178,75	1,62	2,13	4,55	5,96
4-3-2	MD	-25, 70	H	548,72	550,93	533,04	144,05	179,9	1,71	2,14	4,8	6
4-3-20	MD	-25, 70	H	533,46	535,62	522,67	163,1	199,55	1,94	2,38	5,44	6,65
4-4-7	MD	-25, 70	H	571,9	573,31	556,95	182,75	190,15	2,18	2,26	6,09	6,34
4-4-16	MD	-25, 70	H	544,92	548,51	535,06	152,85	122,1	1,82	1,45	5,1	4,07
5-1-2	MD	-25, 70	H	658,69	659,6	643,1	135,5	228	1,61	2,71	4,52	7,6
5-1-20	MD	-25, 70	H	655,16	661,29	646,06	172,2	191,3	2,05	2,28	5,74	6,38
5-2-7	MD	-25, 70	H	715,63	718,26	700,77	181,9	249,95	2,17	2,98	6,06	8,33

Tab. 19: *Získané hodnoty hmotnosti a vlhkosti zkušebních těles*

Číslo tělesa	Dřevina	Teplotní zatížení (°C)	m_p (g)	w_p (%)	m_m (g)	w_m (%)	m_k (g)	w_k (%)	m_o (g)
10-1-7	SM	REF	136,19	11,8	-	-	-	-	121,81
9-2-6	SM	REF	120,5	11,7	-	-	-	-	107,89
2-3-10	MD	REF	224,77	11,6	-	-	-	-	201,47
4-2-2	MD	REF	213,75	12,4	-	-	-	-	190,24
10-5-1	SM	-15, 70	127,62	12,5	127,66	12,6	118,37	4,4	113,41
9-1-15	SM	-15, 70	133,8	12,1	133,92	12,2	124,16	4	119,36
4-1-17	MD	-15, 70	205,82	11,9	205,93	12	195,48	6,3	183,92
5-1-19	MD	-15, 70	237,98	12,1	238	12,1	226,95	6,9	212,33
10-3-4	SM	-25, 70	123,56	11,8	123,95	12,2	117,13	6	110,5
10-6-12	SM	-25, 70	125,03	12,2	125,33	12,4	117,64	5,5	111,46
4-3-2	MD	-25, 70	201,21	12	201,39	12,1	193,67	7,8	179,6
4-4-4	MD	-25, 70	203,83	12	204,06	12,1	196,67	8	182,04