

**MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ**

Lesnická a dřevařská fakulta

Ústav nauky o dřevě

**Porovnání hydrotermické a chemické plastifikace dřeva**

Diplomová práce

Brno 2015

Radim Rousek

Zadávací list

## Čestné prohlášení

*Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Porovnání hydrotermické a chemické plastifikace dřeva zpracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje diplomová práce byla zveřejněna v souladu s § 47b Zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.*

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

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

*V Brně, dne:*

*Radim Rousek*

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat všem, kteří mi pomohli při zpracování této diplomové práce. Především chci poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. Aleši Dejmalovi, Ph.D. za cenné rady a ochotu při řešení problémů. Také bych chtěl poděkovat Ing. Václavu Seberovi, Ph.D. a Ing. Martinu Brabcovi za odbornou pomoc s měřením pomocí digitální korelace obrazu. Dále bych chtěl poděkovat Dr. Peterovi Rademacherovi za odborné konzultace výzkumného plánu a způsobu prezentace výsledků. Také děkuji Bc. Stanislavu Horníčkoví za asistenci při měření mechanických vlastností zkušebních vzorků. V neposlední řadě děkuji své rodině a přátelům, kteří mě podpořili během studia.

Tato práce vznikla v rámci projektu Vytvoření mezinárodního vědecko-výzkumného týmu pro vývoj nových materiálů na bázi dřeva (INWOOD), který je financován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky (EE2.3.20.0269).

## **Abstrakt**

**Autor:** Radim Rousek

**Název:** Porovnání hydrotermické a chemické plastifikace dřeva

Proces plastifikace a lisování dřeva je známý desítky let. Je využíván pro zlepšování mechanických vlastností dřev s nízkou hustotou. Cílem této práce je porovnat dvě nejdůležitější metody plastifikace, a to pomocí horké páry a plynného amoniaku. Plastifikované vzorky bukového dřeva (*Fagus sylvatica*) byly lisovány v tangenciálním směru a velikost napětí byla vyhodnocena. Součástí práce je i zhodnocení vlivu odklonu letokruhů na proces lisování bukového dřeva v příčném směru.

Plynný amoniak při tlaku 0,2 MPa se ukázal být méně účinný než horká pára. Nejlepších plastifikačních účinků bylo dosaženo skombinováním obou metod. Odklon letokruhů 15° od směru lisování (téměř tangenciální) byl vyhodnocen jako nejlepší při lisování bukového dřeva.

**Klíčová slova:** Modifikace dřeva, plastifikace, zhušťování, lisování, amoniak, čpavek

## **Abstract**

**Author:** Radim Rousek

**Title:** Comparison of Hydrothermal and Chemical Method of Wood Plasticization

The process of wood plasticization and densification has been known for decades. It is used for improvement of mechanical properties of low density wood. The objective of this study is to compare two different methods of wood plasticization. Specimens made of European beech wood (*Fagus sylvatica*) were plasticized by hot steam or gaseous ammonia and then compressed in tangential direction. Stress-strain behaviour during compression was evaluated. In this study influence of growth ring angle on densification process was also investigated.

Gaseous ammonia at a pressure of 0.2 MPa was less efficient than hot steam. The best plasticizing effect was reached by combining these two methods. A growth ring angle of 15° from direction of compression (almost tangential) was evaluated as the best for densification of European beech wood.

**Keywords:** Wood modification, plasticization, densification, ammonia

## Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod.....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Cíl práce .....</b>	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>Literární přehled.....</b>	<b>11</b>
3.1	Bukové dřevo.....	11
3.2	Možnosti plastifikace dřeva.....	14
3.3	Plastifikace dřeva pomocí horké páry .....	15
3.4	Plastifikace dřeva pomocí amoniaku.....	16
3.4.1	Vlastnosti amoniaku.....	17
3.4.2	Plastifikace bezvodým kapalným amoniakem.....	17
3.4.3	Plastifikace plynným amoniakem .....	19
3.4.4	Plastifikace roztokem amoniaku ve vodě.....	20
3.5	Praktické aplikace lisování dřeva .....	20
3.5.1	Zhuštěné dřevo .....	20
3.5.2	Ohebné dřevo Bendywood.....	20
3.5.3	Lignostone.....	21
3.5.4	Staypak.....	21
3.5.5	Compreg.....	21
3.5.6	Lignamon .....	22
3.5.7	VTC proces .....	23
3.6	Digitální korelace obrazu.....	24
<b>4</b>	<b>Materiál a metodika.....</b>	<b>26</b>
4.1	Měření vlivu odklonu letokruhů na proces lisování dřeva .....	26
4.1.1	Příprava vzorků .....	26
4.1.2	Stanovení postupu nanášení černobílého vzoru na příčný řez .....	27
4.1.3	Plastifikace vzorků horkou párou a nástřik černobílého vzoru.....	29
4.1.4	Optické snímání deformací a průběh měření .....	29
4.1.5	Zpracování dat.....	30
4.2	Výzkum mikroskopické struktury slisovaného dřeva .....	31
4.2.1	Příprava slisovaných vzorků dřeva .....	31
4.2.2	Příprava povrchu a snímání mikroskopické struktury .....	31

4.3	Měření příjmu plynného amoniaku v čase .....	32
4.4	Porovnání plastifikačních metod .....	35
4.4.1	Příprava vzorků – výroba a zvlhčování.....	35
4.4.2	Plastifikace pomocí horké páry a způsob měření.....	37
4.4.3	Laboratorní autokláv na plynný amoniak .....	39
4.4.4	Plastifikace pomocí plynného amoniaku a způsob měření .....	42
4.4.5	Kombinovaná plastifikace.....	46
4.4.6	Měření referenčních vzorků na zkušebním stroji.....	46
4.4.7	Bezpečnostní opatření při plastifikaci plynným amoniakem .....	46
<b>5</b>	<b>Výsledky .....</b>	<b>47</b>
5.1	Vliv odklonu letokruhů na proces lisování dřeva .....	47
5.1.1	Stanovení postupu nanášení černobílého vzoru na příčný řez .....	47
5.1.2	Vliv odklonu letokruhů na deformaci ve směru síly .....	50
5.1.3	Vliv odklonu letokruhů na Poissonovo číslo .....	52
5.1.4	Vliv odklonu letokruhů na smykovou deformaci.....	54
5.2	Mikroskopická struktura slisovaného dřeva .....	57
5.3	Příjem plynného amoniaku v čase .....	59
5.4	Porovnání plastifikačních metod .....	60
<b>6</b>	<b>Diskuze .....</b>	<b>65</b>
6.1	Vliv odklonu letokruhů na proces lisování dřeva .....	65
6.2	Mikroskopická struktura slisovaného dřeva .....	66
6.3	Příjem plynného amoniaku v čase .....	67
6.4	Porovnání plastifikačních metod .....	67
<b>7</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>69</b>
<b>8</b>	<b>Summary .....</b>	<b>70</b>
<b>9</b>	<b>Použitá literatura .....</b>	<b>71</b>
<b>10</b>	<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>75</b>
<b>11</b>	<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>78</b>



# 1 Úvod

V dnešní době nabývá na významu skutečnost, že dřevo je přírodní obnovitelná surovina. Podmínkou je, že pochází z lesů s trvale udržitelným hospodařením. To v případě tropických dřev často neplatí. Lidé si stále více uvědomují důležitost ochrany tropických pralesů s obrovským ekologickým a klimatickým významem. Tropická dřeva, která jsou využívána pro svoje výjimečné vlastnosti, mohou být nahrazována domácími druhy dřev s modifikovanými vlastnostmi. Vhodná technologie může přispět k lepšímu využívání domácí obnovitelné suroviny.

Lisování dřeva je známá technologie, která zlepšuje jeho mechanické vlastnosti až na úroveň srovnatelnou s tropickými dřevy. Byly vyvinuty různé postupy, z nichž některé našly uplatnění v dřevozpracujícím průmyslu. Vlastnosti výsledného produktu jsou ovlivněny velkým množstvím lisovacích parametrů, jako jsou vlhkost dřeva, teplota, čas, lisovací tlak, odklon letokruhů a druh dřeviny. Parametry hydrotermické plastifikace mohou být rozšířeny o působení chemických plastifikačních látek, z nichž nejslibnější se jeví amoniak. Kombinací lisovacích parametrů je ovlivněna plasticita dřeva během lisování, což může významně ovlivňovat nejen průběh lisování, ale také vlastnosti slisovaného dřeva.

Jedním z parametrů, na které se zaměřuje tato diplomová práce, je vliv odklonu letokruhů. K tomu se přistupuje dvěma způsoby. V oblasti výzkumu je snaha lisovat dřevo vždy radiálně nebo tangenciálně, protože vlastnosti takového materiálu jsou snadněji definovatelné v anatomických směrech. Z těchto dvou se volí ten, který je pro daný druh dřeva nejvhodnější. V oblasti průmyslového zpracování dřeva jsou často rozhodující parametry výtěž a produktivita. Je tedy ekonomičtější vyrábět přířezy k lisování s různým odklonem letokruhů, pokud tím není příliš ovlivněna kvalita výsledného produktu. Proto je důležité znát vliv odklonu letokruhů na proces lisování dřeva.

Plastifikace dřeva amoniakem je v odborné literatuře označována jako velmi účinná, přesto je velmi málo využívána. V této diplomové práci je srovnáván plastifikační účinek plynného amoniaku s nejčastěji využívanou plastifikací dřeva pomocí horké syté páry. Získané poznatky umožní lépe zhodnotit využitelnost amoniaku k výrobě lisovaného dřeva.

## 2 Cíl práce

Cílem první části této diplomové práce je zhodnocení vlivu odklonu letokruhů na proces lisování bukového dřeva (*Fagus sylvatica*) v příčném směru. Deformace zkušebních těles plastifikovaných horkou sytou párou budou vyhodnoceny s využitím digitální korelace obrazu. Postup nanášení požadovaného černobílého vzoru bude optimalizován tak, aby jej bylo možné kombinovat s pařením. Rovnoměrnost stlačování bude popsána na základě variability poměrné deformace ve směru lisování. Deformace těles budou také charakterizovány Poissonovými čísly a poměrnými smykovými deformacemi. Budou pořízeny mikroskopické snímky slisovaného bukového dřeva s různým odklonem letokruhů a budou popsány rozdíly v deformacích mikroskopické struktury. Na základě těchto výsledků bude stanoven nejvhodnější odklon letokruhů pro lisování bukového dřeva.

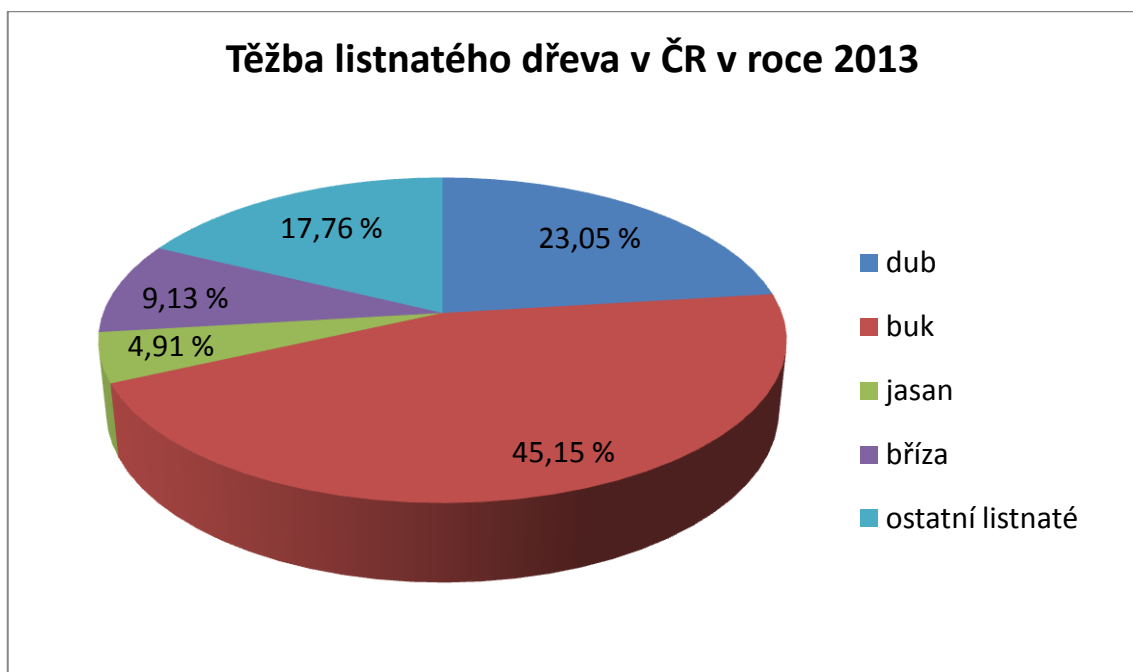
V druhé části této práce budou porovnány plastifikační účinky horké syté páry a plynného amoniaku za zvýšeného tlaku. Nejprve bude změřen příjem amoniaku v čase a stanovena potřebná doba plastifikace zkušebních těles. Plastifikované a referenční vzorky budou stlačovány v tangenciálním směru na zkušebním stroji. Průběhy napětí v závislosti na deformaci budou zaznamenány a rozdíly budou vyhodnoceny.

## 3 Literární přehled

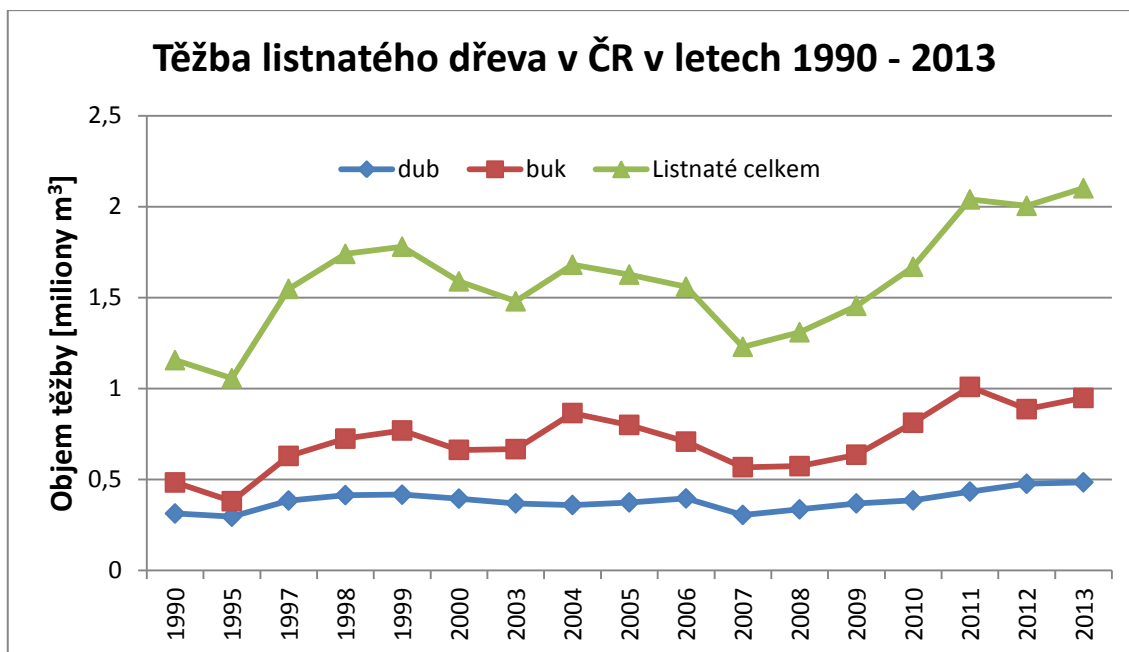
### 3.1 Bukové dřevo

Buk lesní (*Fagus sylvatica*) je nejrozšířenější listnatá dřevina v České republice. V roce 2013 byl jeho podíl 7,8 % z celkové plochy lesů. Podle údajů z předchozích let tento podíl pozvolna roste. Od roku 2000 se zvýšil o 1,8 %. Buk je dřevina ideálně adaptovaná na naše podmínky a bez zásahu člověka by byl mnohem více rozšířen. Doporučený podíl buku v našich lesích je stanoven na 18 % na základě ekonomické, ekologické a funkční optimalizace. Cílem je vyvážené plnění produkčních a mimoprodukčních funkcí lesa (Ministerstvo zemědělství 2014).

V české republice tvoří listnaté dřeviny 13,71 % z celkové těžby. V roce 2013 bylo vytěženo 2 102 000 m<sup>3</sup> listnatého dřeva. Z toho nejvíce bylo zastoupeno bukové dřevo s objemem těžby 949 000 m<sup>3</sup> což je 45,15 % (Obr. 1). Na celkové těžbě dřeva v našich lesích se buk podílí 6,19 %. Z dlouhodobého vývoje (Obr. 2) vyplývá, že objem těžby buku má rostoucí trend, stejně jako v případě podílu bukových porostů. (Český statistický úřad 2015)



Obr. 1 Těžba listnatého dřeva v ČR v roce 2013 (Český statistický úřad 2015)



Obr. 2 Vývoj objemu těžby dřeva v České republice od roku 1990 (Český statistický úřad 2015)

Bukové dřevo patří mezi dřeva zralá s nápadně sušší středovou částí kmene u čerstvě pokácených stromů. Barva je narůžovělá, nahnědlá a po napaření získává červenohnědý odstín. Poměrně častý je výskyt nepravého jádra v zóně zralého dřeva. Má tmavší barvu a proměnlivý, často nepravidelný tvar. Dřevo je roztroušeně pórovité se zřetelnými letokruhy. Charakteristické 5 mm vysoké dřevové paprsky jsou viditelné na všech řezech (Šlezingerová, Gandelová 1999).

Dřevo je středně tvrdé a středně těžké. Průměrná hustota v absolutně suchém stavu je  $680 \text{ kg.m}^{-3}$  a při 12% vlhkosti je  $720 \text{ kg.m}^{-3}$  (Wagenführ 2000). Gryc et al. (2007) zjistili, že bukové dřevo ze zdejší oblasti v okolí Brna má hustotu  $752 \text{ kg.m}^{-3}$  při 12% vlhkosti. Odolnost proti dřevokazným houbám a hmyzu je nízká. Sušení je obtížnější, dřevo má sklon k tvorbě trhlin a borcení (Porter 2008; Šlezingerová, Gandelová 1999). Propustnost je dobrá, takže se snadno impregnuje. Výjimkou je nepravé jádro, které je málo propustné. Cévy jádra jsou ucpané thylami a znemožňují impregnaci. (Nečesaný 1958, Dömény et al. 2014). I přesto nemusí být vždy považováno za vadu. Pouchanič (2011) zjistil, že hustota a pevnost nepravého jádra je zpravidla vyšší.

Bukové dřevo se díky svým vlastnostem využívá hlavně v nábytkářství, kde je zvláště vhodné na výrobu ohýbaného nábytku. Je zpracováváno na dýhy, překližky, dřevotřískové a dřevovláknité desky a také buničinu na výrobu papíru. Vyrábí se z něj železniční pražce, parkety, pažby loveckých zbraní, drobné nářadí a spousta dalších drobných předmětů (Šlezingerová, Gandelová 1999). Bukové dřevo je považováno za velmi dobrý materiál k soustružení (Porter 2008). Základní fyzikální a mechanické vlastnosti bukového dřeva podle Požgaje (1993) jsou uvedeny v následující tabulce.

**Tab. 1** Základní fyzikální a mechanické vlastnosti bukového dřeva podle Požgaje (1993)

Vlastnost dřeva	Anatomický směr	Hodnota
Hustota		684 kg.m <sup>-3</sup>
Pevnost v tlaku	L	56,7 MPa
	R	12,9 MPa
	T	8,5 MPa
Pevnost v ohybu		124 MPa
Modul pružnosti při ohybu		12 966 MPa
Tvrdost podle Brinella	R	26,8 MPa
	T	30,4 MPa
Sesychání	R	5,3 %
	T	12,5 %

### 3.2 Možnosti plastifikace dřeva

Plastifikace dřeva znamená uvedení dřeva do tvárného stavu. Plastifikované dřevo lze do určité míry ohýbat nebo lisovat aniž by došlo k jeho poškození. Metody plastifikace lze rozdělit na dvě hlavní skupiny – chemickou a hydrotermickou plastifikaci.

Nejdůležitější chemická plastifikace je pomocí amoniaku. Ten může být použit ve vodném roztoku při koncentraci 25 % za normální teploty, v plynné podobě nebo kapalný bezvodý amoniak při teplotě  $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Z nich nejúčinnější je poslední jmenovaná. Tyto tři metody jsou podrobněji popsány níže. Byly úspěšně vyzkoušeny další látky podobné amoniaku. Pro svou toxicitu se jeho použití nerozšířilo. Další běžné chemikálie, které změkčují dřevo jsou voda, močovina, dimethylol močovina, fenolformaldehydová pryskyřice s nízkou molekulární hmotností, dimethylsulfoxid, alkálie a další. (Navi, Sandberg 2012)

Hydrotermická plastifikace je spolupůsobení tepla a vlhkosti na dřevo. Ohřev může být realizován přímo plamenem (historická metoda výroby sudů), v horkém písku mezi horkými deskami, dielektrickým ohřevem (radiofrekvenční a mikrovlnný ohřev), vařením ve vodě a ohřevem v syté páře při teplotě kolem  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Použití syté páry je nejrozšířenější způsob plastifikace dřeva. (Navi, Sandberg 2012)

Existují také speciální metody plastifikace, při kterých se dřevo ohřívá nad  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  a je následně slisováno na vyšší hustotu. Součástí procesu je i tvarová stabilizace. Označují se THM (Thermo Hydro Mechanical process) (Navi, Girardet 2000) a VTC (Viscoelastic Thermal Compression) (Kamke, Sizemore 2005). Byly vyvinuty různými autory, ale základní princip je stejný. VTC proces je podrobněji popsán v kapitole 3.5.7 na straně 23.

### 3.3 Plastifikace dřeva pomocí horké páry

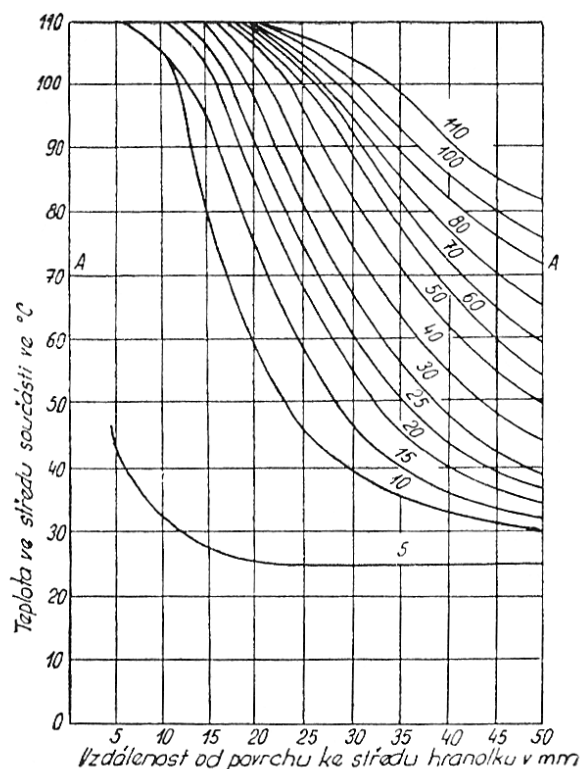
Změkčování dřeva působením tepla a vlhkosti se nazývá hydrotermická plastifikace. Plasticitu dřeva ovlivňují vlastnosti tří základních polymerních složek dřeva, z celulosy, hemicelulosy a ligninu. Teplota, při které tyto látky měknou, se nazývá teplota skelného přechodu. V suchém stavu je teplota skelného přechodu semikrystalické celulosy 200–250 °C, hemicelulosy 150–220 °C a ligninu 140–190 °C. Tyto teploty závisí na vlhkosti a s rostoucí vlhkostí klesají. Teplota skelného přechodu hemicelulosy vlivem vlhkosti klesá až pod 0 °C, ale celuloza je ovlivněna minimálně. Při hydrotermické plastifikaci jsou vlastnosti dřeva ovlivněny převážně chováním ligninu. Jeho teplota skelného přechodu je ve vlhkém stavu snížena až na 70 °C. Optimální teplota tváření polymerů je doporučována o 25 °C vyšší než je teplota skelného přechodu (Navi, Sandberg 2012).

Pevnost dřeva klesá při zvyšování jeho vlhkosti, ale jen v rozsahu vody vázané. Teplota také snižuje pevnost dřeva. Při vzájemné interakci obou faktorů je pokles pevnosti nejvýraznější (Požgaj et al. 1993). Působení teploty a vlhkosti na pevnost bukového dřeva zkoumal Kúdela (1996). Zjistil, že s rostoucí vlhkostí klesá pevnost bukového dřeva nejvíce při vlhkostech blízkých nule. Jak se hodnota vlhkosti přibližuje k mezi nasycení buněčných stěn, pokles pevnosti je pozvolnější. Při vyšších vlhkostech již není pevnost ovlivněna. S rostoucí teplotou lineárně klesá pevnost ve zkoumaném rozsahu 0 až 100 °C. Nejnižší pevnost dřeva je dosažena kombinací teploty 100 °C a vlhkosti na mezi nasycení buněčných stěn. Při těchto podmínkách klesne konvenční pevnost bukového dřeva v radiálním směru o 74 % a v tangenciálním směru o 84 %.

Hydrotermická plastifikace je využívána v průmyslu převážně na výrobu ohýbaného nábytku. Provádí se v uzavřených retortách horkou sytou párou při teplotě 102–105 °C a přetlaku 20–50 kPa. Vyšší tlak a teplota při tomto způsobu plastifikace nepřináší lepší výsledky (Vaněk 1952). Optimální počáteční vlhkost dřeva je kolem meze hygroskopicity (28–35 %). Dílce jsou řádně plastifikované při dosažení teploty 100 °C. (Kafka 1989)

Potřebná doba paření pro dřevo s počáteční vlhkostí 30 % se stanoví podle diagramu (Obr. 3). Dřevo je považováno za dostatečně ohřáté, pokud teplota uvnitř součásti dosáhne 70 °C. Určí se průsečík pro požadovanou teplotu ve středu hranolu a vzdálenost od povrchu ke středu. Nejbližší křivka u průsečíku udává potřebnou dobu

hydrotermické plastifikace. V případě materiálu s vlhkostí nižší než 25 % se doba paření prodlužuje o 5 minut na každé procento vlhkosti pod 25 %. Rychlost příjmu vlhkosti závisí na druhu dřeva, avšak doba ohřevu je pro všechny druhy dřev stejná. (Vaněk 1952)



Obr. 3 Diagram pro stanovení potřebné doby paření dřeva (Vaněk 1952)

### 3.4 Plastifikace dřeva pomocí amoniaku

Je to nejslibnější metoda chemické plastifikace, která je velmi rychlá a efektivní. Velkou výhodou je, že se dá ze dřeva snadno odstranit (Kafka 1989). Z hlediska plastifikačních účinků je nejlepší kapalný bezvodý amoniak. Plynný amoniak je méně účinný, ale v praxi snadněji využitelný. Vodný roztok amoniaku má nízké plastifikační účinky (Navi, Sandberg 2012). V praxi je často využíván na ztmavování barvy dřeva působením plynného amoniaku, který se z roztoku uvolňuje (Weigl et al. 2007).



### 3.4.1 Vlastnosti amoniaku

Amoniak  $\text{NH}_3$  je bezbarvý plyn s nepříjemným dusivým zápachem. Se svou hustotou  $0,7713 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  je o 41 % lehčí než vzduch. Tlakem  $0,846 \text{ MPa}$  při  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  lze snadno zkondenzovat na bezbarvou kapalinu, jejíž teplota varu je za normálního tlaku  $-33,4 \text{ }^\circ\text{C}$ . Tento plyn se velice snadno rozpouští ve vodě a vytváří zásaditý roztok. Při tom se uvolňuje značné rozpouštěcí teplo  $8,4 \text{ kcal/mol}$ . Rozpustnost klesá s rostoucí teplotou. 1 ml vody při teplotě  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  rozpustí 1176 ml plynu (48% roztok) a při teplotě  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  rozpustí 702 ml plynu (35% roztok). Varem se plyn zcela vyloučí. (Remy 1972)

Amoniak je dráždivý a při vyšších koncentracích zdraví škodlivý plyn. Díky jeho zápachu se lze snadno vyhnout nebezpečné expozici, protože průměrný práh vnímání je dostatečně nižší než nebezpečné nebo škodlivé koncentrace (Wikipedia 2015a).

### 3.4.2 Plastifikace bezvodým kapalným amoniakem

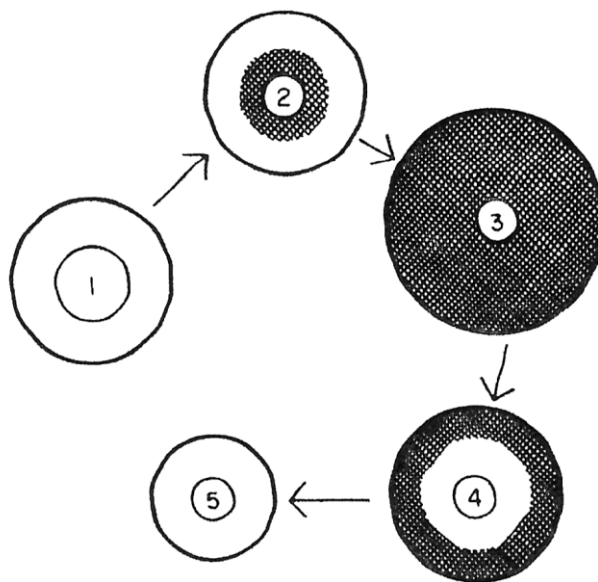
Dřevo je plastifikováno ponořením do zkapalněného bezvodého amoniaku s teplotou  $-33 \text{ }^\circ\text{C}$  nebo nižší. Po nasáknutí lze snadno tvarovat. V porovnání s plastifikací horkou sytou párou je zapotřebí menší síly k vytvoření ostřejších ohybů a riziko poškození dřeva je nízké. Lze tvarovat i druhy dřev, u kterých to s párou není možné. Nejpozoruhodnější znak této techniky je skutečnost, že dřevo může být zkrouceno do složitých tvarů bez potřeby fixace svěrkami. K přesnému natvarování stačí krátké držení v požadovaném tvaru. Tvarované dřevo nevykazuje žádnou snahu vrátit se zpět do původního tvaru. Tvar je zachován dokonce po máčení v horké vodě a následném vysušení. (Schuerch 1963, Navi, Sandberg 2012)

Velkou nevýhodou plastifikace kapalným amoniakem je nízký bod varu amoniaku a nutnost použití mrazícího a zkapalňovacího zařízení (Navi, Sandberg 2012). Další nevýhodou kapalného amoniaku je, že proniká do dřeva pomalu a rovnoměrné nasycení je dosaženo za dlouhou dobu. Také bobtnání dřeva je nerovnoměrné. Při odpařování amoniaku je proces opačný. K nejrychlejšímu sesychání dochází v oblasti čelních konců a dřevo často praská. V případě plastifikace tenkých dých k praskání nedochází (Schuerch et al. 1966).

Princip plastifikace je vysvětlován následovně: Bezvodý amoniak je polární rozpouštědlo s nízkou hmotností molekul a se silnou schopností vázat se vodíkovými můstky. Uvolňuje vodíkové vazby ve dřevě a proniká nejen do struktury ligninu, ale

také do oblastí buněčné stěny s amorfni i krystalickou celulosou a způsobuje její bobtnání (Schuerch 1963, Navi, Sandberg 2012). Dochází zde k trvalým změnám ve struktuře krystalické celulosy. Celulosa typu I je změněna na typ III (Schuerch et al. 1966). Výsledné změkčení umožní pohyb molekul vůči sobě. Když se amoniak odpaří, vodíkové můstky jsou znovu vytvořeny mezi řetězci polymerů a jejich vazby jsou opět pevné jako dříve. (Navi, Sandberg 2012). Působením horké vody se krystalická celulosa mění zpět na typ I. Kapalný čpavek způsobuje velmi málo chemických změn a působení je převážně fyzikální v podobě uvolňování vodíkových můstků a jejich opětovné tvorby (Stojčev et al. 1979).

Bariska (1975) zkoumal fenomén zmenšení objemu bukového dřeva vlivem amoniaku. Bobtnání dřeva v kapalném amoniaku je přibližně stejné jako ve vodě. Při odpaření amoniaku dochází k velkému zmenšení rozměrů vzorku. Bukové dřevo se zmenší pod svoje původní rozměry o 10 % až 18 %. Princip zmenšování buněk je znázorněn na následujícím obrázku (Obr. 4). Po této změně je bobtnání ve vodě téměř dvojnásobné, ale žádný vzorek nedosáhne rozměrů referenčního vzorku.



**Obr. 4** Schematické znázornění působení amoniaku na buněčnou stěnu: (1) suchá buňka před plastifikací, (2) první fáze adsorpce, lumen se zmenšuje, (3) kompletně nabobtnalá buňka, (4) první fáze desorpce, (5) vysušená buňka se zmenšeným průměrem (Pollisco et al. 1971).

Hustota bukového dřeva se vlivem smrštění zvýší o 12,4 %. Mechanické vlastnosti upraveného dřeva zůstávají téměř stejné jako před plastifikací. Rovnovážná vlhkost je v běžných podmínkách mírně nižší. Významně se zvýší hodnoty bobtnání. V tangenciálním směru vzroste z 10,7 % na 14,2 % a v radiálním směru vzroste ze 4,3 % na 10,7 %. Obsah dusíku v bukovém dřevě je zvýšen z původních 0,17 % na 1,44% (Mahdalík 1971).

### **3.4.3 Plastifikace plynným amoniakem**

Plastifikace dřevní hmoty plynným amoniakem probíhá mechanismem mezi kapalným amoniakem a vodným roztokem amoniaku. Záleží na podmínkách daných vlhkostí dřeva, tlakem čpavku a teplotou prostředí (Stojčev et al. 1979). Vlhkost dřeva zlepšuje pronikání amoniaku do buněčné stěny a zvyšuje plasticitu dřeva. Plastifikační účinky plynného amoniaku jsou nižší v porovnání s kapalným amoniakem (Navi, Sandberg 2012). Rovnoměrné nasycení dřeva je v případě plynu dosaženo mnohem rychleji (Schuerch et al. 1966). Tvarované dřevo není rozměrově stabilní a po navlhčení se vrací do původního tvaru. (Navi, Sandberg 2012).

Z dostupné literatury není zřejmý nejvhodnější obsah vlhkosti ve dřevě a různí autoři používají různé hodnoty. Například Kafka uvádí optimální vlhkost  $18 \pm 3$  % pro výrobu lignamonu, Bach a Hastrup (1973) plastifikovali bukové dřevo s vlhkostí 15 % a Pandey et al. (1991) použili dřevo s vlhkostí 10 až 17,6 %. Sharma et al. (1988) považují za optimální vlhkost v rozsahu 10–20 %.

Plynný amoniak za zvýšeného tlaku vyvolává smrštění buněk a zvýšení hustoty dřeva stejně jako kapalný amoniak (Pollisco et al. 1971). Objem bukového dřeva se může zmenšit až o 30 %. Také bobtnání se zvýší, a to v radiálním směru ze 7,1 % na 18,9 % a v tangenciálním směru z 16,6 % na 27,3 %. Obsah vodorozpustných látek v bukovém dřevě vzroste z původních 4,03 % až na 10,58 %. Obsah dusíku je zvýšen z původních 0,14 % na 1,83 %. Mechanické vlastnosti jsou ovlivněny velmi málo a změny jsou statisticky nevýznamné (Lábský, Mahdalík 1972).

### **3.4.4 Plastifikace roztokem amoniaku ve vodě**

Pokud je dřevo plastifikováno roztokem amoniaku ve vodě, jeho ohýbatelnost je mnohem menší v porovnání s účinky kapalného amoniaku. Ohnuté dřevo musí být zafixováno, dokud není řádně vysušeno. Vytvořený tvar nevykazuje trvalou fixaci, nebo jen velmi málo. Pokud je navlhčen, vrací se zpět do původního tvaru (Navi, Sandberg 2012). Při sušení dřeva nasáklého vodným roztokem amoniaku může docházet k tvorbě trhlin (Killmann, Koh 1988).

Čpavková voda je absorbována dřevem rychleji a ve větším množství než voda. Více reaguje se složkami dřeva než kapalný bezvodý amoniak a obsah chemicky vázaného dusíku je vyšší. Amoniak ve vodném roztoku nevniká do krystalické mřížky celulosy (Stojčev et al. 1979).

## **3.5 Praktické aplikace lisování dřeva**

### **3.5.1 Zhuštěné dřevo**

Zhuštěné dřevo se vyrábí lisováním dřeva napříč vláken po jeho plastifikaci. Zvyšováním hustoty se úměrně zvyšují jeho mechanické vlastnosti. Některá dřeva lze lisovat i bez předchozí plastifikace. Z hlediska produktivity je výhodnější použít materiál s nižší vlhkostí (10 až 16 %). Hranolky se přehřejí na teplotu 80 °C a jsou slisovány při teplotě 100 až 120 °C. Je možné plastifikovat přímo v lisu při teplotách do 130 až 180 °C. Nízká plasticita se vyvažuje použitím vysokých lisovacích tlaků až 30 MPa. Takto vyrobený materiál má velmi zvýšené mechanické vlastnosti, ale tvarová stabilita ve vlhkém prostředí je nízká. Použití je omezeno na suché prostředí, například výroba tkalcovských člunků. (Kafka 1989). V české republice se vyrábělo zhuštěné bukové dřevo pod názvem bukolis (Stojčev 1979).

### **3.5.2 Ohebné dřevo Bendywood**

Ohebné dřevo s obchodním názvem Bendywood<sup>®</sup> se vyrábí v Itálii. Technologie výroby je celosvětově chráněná patentem. Hydrotermicky plastifikovaný hranol je podélně stlačen o 20 %, zafixován v přípravku a vysušen. Bendywood je vyráběn z buku, javoru, jasanu, třešně a ořechu v maximálních rozměrech 120×120×2200 mm. Vyznačuje se tím, že lze snadno za studena ohýbat až do koeficientu ohýbatelnosti 1:10 (poměr tloušťky a poloměru). Na první pohled nelze odlišit od neupraveného dřeva.

Před ohýbáním je nutné opracované dílce nejprve zvlhčit na 11 až 12 % vlhkosti a po ohnutí jsou vysušeny na 7 až 8 % vlhkosti. Tím dojde k zafixování tvaru. (Bendywood 2015). Podélně komprimované dřevo má nižší pevnost a více bobtná (Kafka 1989). Ohebné dřevo nabízí také Americká firma Pure Timber LCC pod obchodní značkou Cold-Bent™ (Puretimber 2015). Dalším výrobcem v Evropě je Maďarská firma Compwood (Compwood 2015).

### **3.5.3 Lignostone**

Lignostone® je lisované vrstvené dřevo vyrobené z loupaných bukových dých. Dýhy jsou slepené termosetickou pryskyřicí a slisované na hustotu 0,82 – 1,38 g/cm<sup>3</sup>. Vyrábí se v rozměrech běžné překližky do 2400×1200mm s tloušťkou od 6 do 120 mm. Holandský výrobce přirovnává jeho vlastnosti ke sklolaminátu s výhodou nižší ceny. Na trhu jsou různé varianty dle účelu použití a může mít i sníženou hořlavost (třída B1 podle normy DIN 4102). Používá se na nejrůznější součástky do elektrických rozvodů, transformátorů, pro železniční průmysl, na speciální konstrukční spoje dřevostaveb a jiné. Vyrábí se i neprůstředná varianta kombinovaná s moderními materiály jako jsou uhlíková vlákna a kevlar. (Lignostone 2015)

### **3.5.4 Staypak**

Staypak je lisované dřevo, které bylo tepelně stabilizováno během lisovacího procesu. Hustota dosahuje 1,3 g/cm<sup>3</sup>. Přestože ve vlhku značně bobtná, po vysušení se vrátí do původní slisované tloušťky. Staypak se vyrábí jako lisované masivní dřevo nebo velkoplošné panely vyrobené z dých. Dýhy nebo desky s vlhkostí pod 15 % jsou lisovány při teplotě 104 až 120 °C a následně stabilizovány teplotou 166 až 177 °C. Výrobní proces byl patentován v USA. (Seborg et al. 1956)

### **3.5.5 Compreg**

Compreg je dřevo impregnované syntetickou pryskyřicí a slisované. Stabilizace materiálu je zajištěna vytvrzením pryskyřice. Dýhy jsou impregnovány vodným roztokem fenolformaldehydové pryskyřice a vysušeny tak, aby nedošlo k vytvrzení. Následně jsou slisovány do podoby panelu při teplotě do 150 °C. V některých případech není nutné nanášet lepidlo před lisováním, protože množství lepidla ve dřevě je dostatečné. (Stamm, Seborg 1960)

### 3.5.6 Lignamon

Lignamon je zhuštěné dřevo tmavohnědé barvy (Obr. 5) které bylo vyrobeno s využitím plastifikace plynným amoniakem. Je převážně vyráběn z bukového dřeva, ale mohou být použity i jiné dřeviny jako topol, bříza a další. Slisováním se dosahuje hustoty až  $1300 \text{ kg.m}^{-3}$  (Stojčev 1979). Tento produkt vyniká dobrými mechanickými vlastnostmi. V porovnání s neupraveným bukem je pevnost v ohybu vyšší o 78 % a modul pružnosti je vyšší o 86 %. Tvrdost se při výrobním procesu zvýší o 150 % (Pařil et al. 2014). Lignamon je na rozdíl od lisovaného dřeva tvarově stálý ve vlhkém prostředí. Po vysušení se vrátí téměř na rozměry před namočením. Lignamon byl průmyslově vyráběn v České republice od roku 1976. Produkce v Dalekých Dušníkách byla před několika lety ukončena. (Stojčev 1979)



**Obr. 5** Fotografie středně tmavého lignamonu vyrobeného z bukového dřeva

Celý proces modifikace dřeva probíhá ve speciálním uzavřeném autoklávu, který je vybaven hydraulickým lisem. Dřevěné hranoly o vlhkosti nad 14 % jsou naskládány na prokládací plechy a vytvořená hráň je přepravena do autoklávu (Kafka 1989). Po uzavření probíhá vakuovo-tlaková impregnace plynným amoniakem. Pracovní tlak autoklávu je 0,5 MPa. Reakční teplo zvýší teplotu dřeva asi o 30 °C, ale pro potřeby plastifikace je materiál ohříván až na 90 °C (Stojčev 1979). Následuje slisování plastifikovaného materiálu tlakem 0,3 až 1,8 MPa (Kafka 1989). Operace sušení probíhá při teplotách 90 až 160 °C. Lignamon je tepelně stabilizován při teplotě 180 °C. Po následném ochlazení je hotový lignamon vyvezen z autoklávu (Stojčev 1979).

Lignamon byl využíván na výrobu modelů ve slévárnách, na součásti hudebních nástrojů, držadla nožů, součástky strojů, umělecké předměty, různé výrobky v nábytkářském průmyslu, a jiné. Kromě dobrých fyzikálních a mechanických vlastností vyniká lignamon také svým vzhledem připomínajícím tropické dřeviny. (Stojčev 1979)

### **3.5.7 VTC proces**

VTC proces je způsob zhušťování dřeva využívající plastifikaci při vysoké teplotě a tlaku. Dosud není průmyslově využíván. Vyvinuli jej Kamke a Sizemore (2005) v USA, kde si jej nechali patentovat. Tento patent popisuje kontinuální linku pro zhušťování dřeva VTC technologií.

Dřevo o vlhkosti 15–30 % se v první fázi ohřívá nad teplotu skelného přechodu, a to na 160–175 °C. Tlak páry je při tom 650–2000 kPa. Následuje rychlá dekomprese a uvolnění vázané vody z buněčné stěny, čímž dojde k dramatickému změkčení dřeva a snížení lisovacího tlaku napříč vlákna. Tento krátký přechodný stav je nazýván mechanosorpční efekt, a nastává pouze při rychlém pohybu vlhkosti z buněčné stěny nebo naopak. Tato desorpční fáze je velmi krátká. Například u materiálu o tloušťce 3 až 6 mm a teplotě 175 °C trvá asi 10 sekund. Během této doby je nutné materiál slisovat na vysokou hustotu.

Slisovaný materiál vstupuje do fáze stabilizace, kdy dochází uvolnění napětí ve dřevě, snížení hygroskopicity, a stabilizuje se slisovaný tvar. V této fázi je teplota dřeva 175–225 °C, a lisovací tlak 2000–4000 kPa. Ochlazovací fáze je zahájena rozprašováním vody na povrch horkého dřeva. Voda se ihned odpaří. Při tom dojde k rychlému, ale jen částečnému snížení teploty. Dřevo se mírně zvlhčí na požadovanou vlhkost výsledného produktu. Lisovací tlak je obnoven a produkt se dále ochlazuje až pod 50 °C. Teplota musí být nižší, než je teplota skelného přechodu dřeva s danou vlhkostí.

Tento produkt má vysokou hustotu, dobrou rozměrovou stabilitu a zlepšené mechanické vlastnosti. Takto slisované dřevo může být využito k výrobě překližovaných materiálů. Testovaný třívrstvý kompozit se středovou neupravenou vrstvou dosahoval zlepšení modulu pružnosti o 130 % a ohybové pevnosti o 91 % (Kamke, Sizemore 2005).

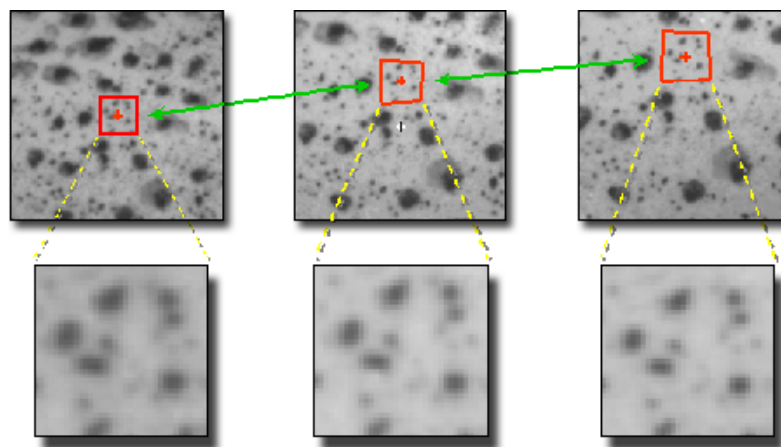
### 3.6 Digitální korelace obrazu

V této diplomové práci je řešen vliv odklonu letokruhů na proces lisování dřeva. Pro bukové dřevo je jako nejvhodnější uváděn tangenciální směr (Kúdela 2011), ale někteří autoři lisují bukové dřevo i v radiálním směru (Morsing, Hoffmeyer 1998). Rozdíly v deformacích lze nejlépe vyhodnotit pomocí digitální korelace obrazu. Tato metoda je poměrně nová a využívá se ve výzkumu dřeva teprve krátce. Proto je jí zde věnována samostatná kapitola.

Digitální korelace obrazu (DIC) je jednoduchá bezkontaktní optická metoda, která umožňuje měřit deformace na povrchu tělesa. Je to metoda založená na porovnání dvou snímků pro přesné měření změn v těchto obrazech. Jeden zachycuje stav před deformací a druhý po deformaci. Je vyhodnocována změna polohy vysoce kontrastního skvrnitého vzoru na povrchu měřeného objektu. Vzor se skládá z matného bílého pozadí s náhodně rozptýlenými černými tečkami (Hung 2003, Zajíček 2011).

Každý zkoumaný bod na referenčním obrázku je charakterizovaný svým obdélníkovým okolím (subset) daných rozměrů. Na odpovídajícím místě deformovaného snímku je vybrána oblast určitého rozsahu. Zde je analyzován každý pixel i se svým charakteristickým okolím stejných rozměrů. Umístění hledaného bodu je vyhodnoceno na základě nejlepší shody vzoru v okolí daného bodu (Obr. 6). Hledání shody je převedeno na nalezení maxima korelační funkce (Zajíček 2011) nebo minima společného křížového koeficientu (Hung 2003). Ten je vypočítán na základě stupně šedi každého pixelu v definovaném okolí daných bodů na obou snímcích. Po nalezení shody je vypočítáno posunutí a poměrná deformace na základě rozdílu mezi souřadnicemi daného bodu na referenčním a deformovaném snímku (Hung 2003). Posunutí je možné vypočítat na pixelové úrovni, nebo sub-pixelové úrovni (Wikipedia 2015b, Zajíček 2011).





**Obr. 6 Princip sledování polohy bodu na tělese během deformace (Correlated Solutions 2013)**

Nejjednodušší je 2D měření, které lze provádět s použitím jakékoliv digitální kamery a příslušného programu. Slouží k měření deformací v jedné rovině. Kalibrace tohoto systému je jednoduchá a spočívá v nastavení měřítka pro známou vzdálenost na snímaném objektu. Pokud dojde k posunu měřeného objektu mimo danou rovinu, způsobí to nepřesnosti měření. (Correlated Solutions 2013)

Přesnější 3D systém měření využívá dvě kamery snímající objekt z různých úhlů. To umožňuje zaznamenat deformace objektu ve třech směrech (3D). Kalibrace se provádí pomocí tuhé kalibrační mřížky, která je nasnímaná v různých pozicích před párem kamer ve stereovizním uspořádání. To umožní vypočítat přesnou polohu, úhel a další parametry snímacích kamer. Také se odstraní optická deformace obrazu. (Correlated Solutions 2013)

## 4 Materiál a metodika

Metodika je členěna na 4 základní podkapitoly podle výzkumného zaměření:

- Měření vlivu odklonu letokruhů na proces lisování dřeva
- Výzkum mikroskopické struktury
- Měření příjmu plynného amoniaku v čase
- Porovnání plastifikačních metod

### 4.1 Měření vlivu odklonu letokruhů na proces lisování dřeva

#### 4.1.1 Příprava vzorků

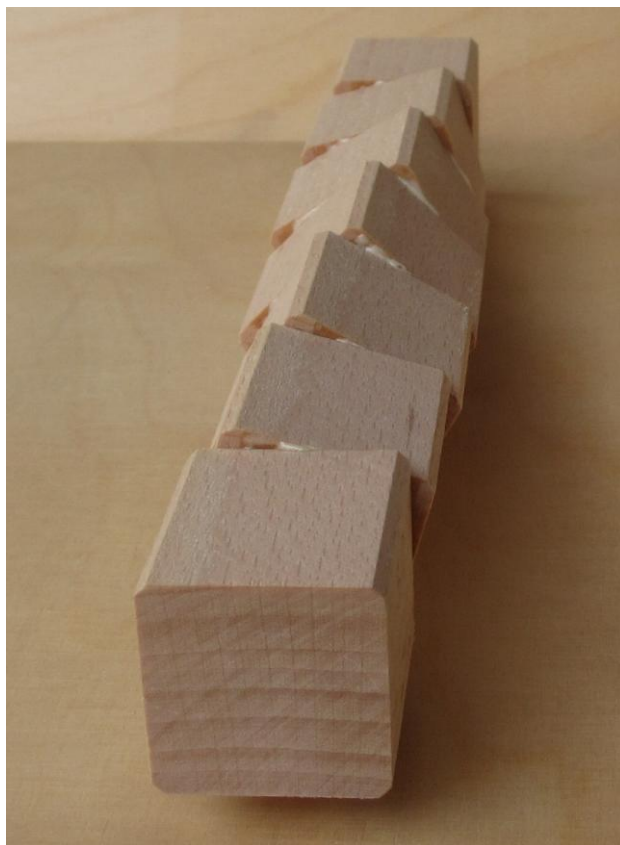
Na výrobu vzorků bylo použito bukové dřevo (*Fagus sylvatica*) v maximálně nabobtnalém stavu, tj. s vlhkostí těsně nad mezí hygroskopicity. Tím bylo zajištěno, že výsledné vzorky budou mít přesný a pravoúhlý tvar i po plastifikaci v horké páře. Cílem následujícího postupu je získat sadu sedmi vzorků, které na sebe navazují, tedy z jednoho kusu dřeva. Při tom směr letokruhů sousedních vzorků je vůči sobě pootočen o 15°.

Nejprve byl vyhoblován hranol s rozměry 35×35 mm a délkou asi 40 cm. Ten byl následně rozřezán na vzorky o délce 41 mm, které byly očíslovány dle pořadí. Vzorky byly k sobě slepeny čelními konci ve stejném pořadí, ale vždy vůči sobě pootočené o 15°. Bylo použito polyuretanové lepidlo, protože tvrdne vlivem vlhkosti a zvýšená vlhkost dřeva je v tomto případě výhodou. Výsledek je zachycen na následující fotografii (Obr. 7).

Z takto slepeného bloku (Obr. 7) byl vyhoblován hranolek o průřezu 20×20 mm a rozřezán na jednotlivá zkušební tělesa o délce 30 mm (Obr. 8). Uvedený rozměr byl zvolen dle normy ČSN 49 0112. Vzorky byly následně označeny a pozvolna vysušeny až na nulovou vlhkost. Hustota byla měřena v souladu s normou ČSN 49 0108. Protože většina vzorků v suchém stavu měla skosený tvar, výpočet hustoty  $\rho_0$  byl proveden s využitím délek úhlopříček ( $U_R, U_T$ ) v příčném směru podle následující rovnice:

$$\rho_0 = \frac{m_0}{L \cdot U_R \cdot U_T / 2} \quad [kg \cdot m^{-3}]$$

Suché vzorky byly uskladněny v běžných podmínkách laboratoře, kde dosáhly vlhkosti 6,5 %. Tak byly připraveny k plastifikaci horkou párou.



**Obr. 7** Polotovar na výrobu sady vzorků s různým odklonem letokruhů



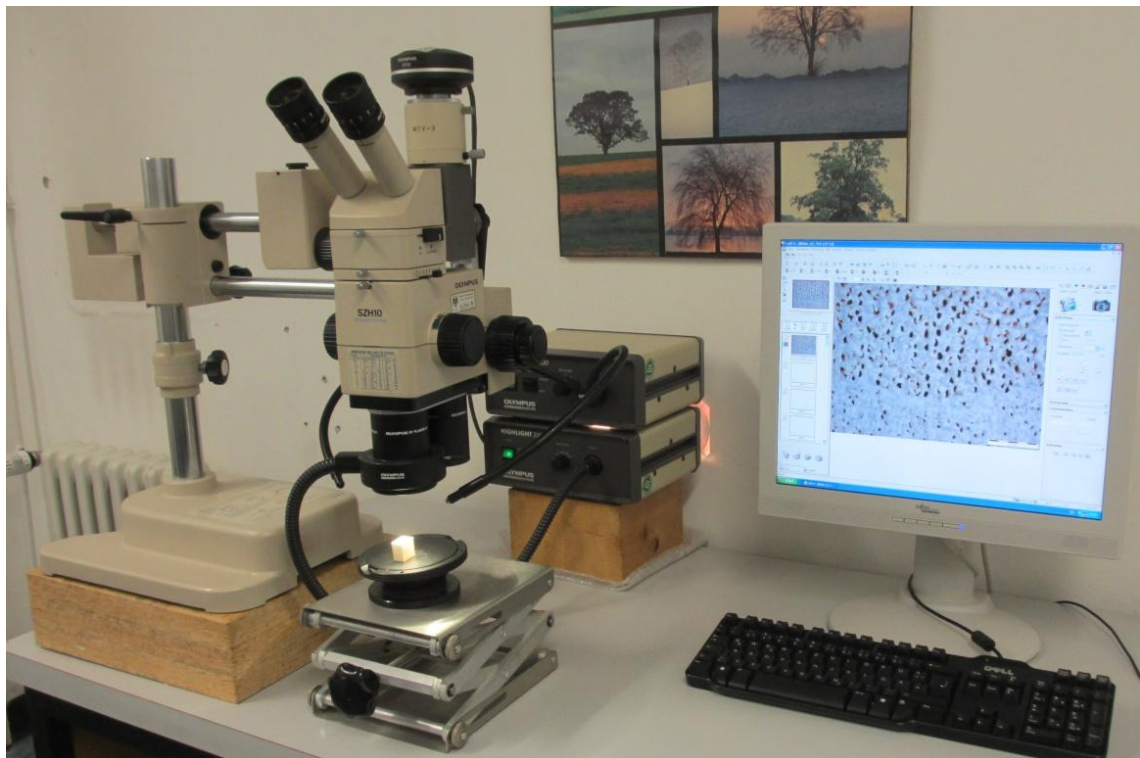
**Obr. 8** Zhotovená sada zkušebních vzorků s různým odklonem letokruhů

#### **4.1.2 Stanovení postupu nanášení černobílého vzoru na příčný řez**

Metoda korelace digitálního obrazu (DIC) vyžaduje, aby byl na příčném řezu vytvořen jemný skvrnitý vzor skládající se z černých teček na bílém podkladu. Bylo tedy nutné zvolit takový postup, který lze kombinovat s pařením a zároveň bude mít minimální vliv na proces paření a následného lisování.

K testování různých postupů byly použity tři bukové vzorky o rozměrech 20×20×20 mm. Jeden vzorek byl ponechán v suchém stavu, druhý byl plastifikován 5 minut v horké páře dle postupu popsaného v kapitole 4.4.2 na straně 37 a třetí byl na příčném řezu navlhčen vodou. Takto připravené vzorky byly nastříkány matnou bílou barvou ve spreji (univerzální rychleschnoucí syntetická barva) a vysušeny.

Vzorky byly podélně rozštípnuty, a byly pořízeny snímky mikrostruktury jejich příčného řezu a štípané plochy. Povrch byl snímán pomocí stereomikroskopu Olympus SZH10 (Obr. 9) vybaveného digitální kamerou Olympus DP25 a dvěma typy externího osvětlení. Snímky byly zpracovány na počítači pomocí software cell<sup>A</sup> 3.0, kde byla změřena hloubka průniku bílé barvy do dřeva. Pracoviště s mikroskopem zachycuje následující fotografie (Obr. 9).



**Obr. 9 Stereomikroskop Olympus SZH10 ve výzkumném centru Thünen-institut für Holzforschung v Hamburku**

### **4.1.3 Plastifikace vzorků horkou párou a nástřik černobílého vzoru**

Vzorky s běžnou vlhkostí 6,5 % byly plastifikovány v horké syté páře při teplotě 100 °C nejprve krátce po dobu asi 5 minut. Ihned po vyjmutí z pařící nádoby byl na vybraný příčný řez nastříkán vysoce kontrastní skvrnitý vzor pro potřeby optického měření deformací. Metoda nanášení barvy byla zvolena na základě výsledků testování tří metod, viz kapitola 5.1.1 na straně 47.

Nejprve byla aplikována matná bílá barva jako základ, který byl pak jemně a rovnoměrně poprášen matnou černou barvou. Vhodný je krátký nástřik sprejem z větší vzdálenosti tak, aby hlavní proud větších kapek směřoval mimo upravovaný povrch. Tento postup je nutné nejprve vyzkoušet, protože vlastnosti skvrnitého vzoru mají rozhodující vliv na přesnost měření.

Vzorky byly uloženy zpět do pařící nádoby na 90 minut s cílem dosáhnout minimálně 28 % vlhkosti. Čas plastifikace byl stanoven podle diagramu (Vaněk 1952) na 10 minut plus 5 minut na každé procento vlhkosti pod 25 %. Plastifikovaná zkušební tělesa byla vkládána mezi dva hliníkové bloky předehřáté na 100 °C a tato sestava byla ihned vložena do zkušebního stroje Zwick Z050, kde bylo provedeno měření. Aby se omezil únik tepla do kovových částí zkušebního stroje, byl každý hliníkový blok odizolován dvěma deskami z papíru tvrzeného fenolformaldehydovou pryskyřicí s obchodním názvem Pertinax v celkové tloušťce 1,6 mm. Vlhkost zkušebních těles v době měření (která nedosáhla očekávaných hodnot) byla zjištěna dle normy ČSN 49 0103. Vylepšený postup plastifikace horkou párou je velmi podrobně popsán v kapitole 4.4.2 na straně 37.

### **4.1.4 Optické snímání deformací a průběh měření**

K optickému měření deformací na základě metody DIC byly použity dvě CCD kamery AVT Stingray Copper F-504B s rozlišením 2452×2056 pixelů vybavené objektivy Pentax C2514-M s ohniskovou vzdáleností 25 mm ve stereovizuální konfiguraci. Zvýšení efektivity korelace obrazu při výpočtu poměrných deformací bylo dosaženo nástřikem stochastického skvrnitého vzoru na snímáný povrch zkušebního tělesa. Potřebná kontrastnost vzoru byla podpořena pomocí dvou světelných zdrojů SobrietyCube 360 osazených vysoce výkonnými LED čipy, každý o výkonu 90 W.

Obě kamery byly upevněny na stativ a zaostřeny na snímanou plochu tělesa tak, aby byla snímána pod maximálním zorným úhlem zvyšujícím přesnost měření. Zatížení zkušebních těles jednoosým tlakem bylo zajištěno univerzálním zkušebním strojem Zwick Z050. Před samotným optickým měřením deformací byl systém kalibrován 30 páry snímků kalibračního terče (mřížka 5,5 mm) v různých prostorových pozicích. Výsledné měřítko bylo 0,07 mm na jeden pixel pro všechny vzorky.

Záznam kamer byl spuštěn ve stejném okamžiku, kdy začalo zatěžování zkušebního tělesa. Rychlost posuvu příčnicku zkušebního stroje byla nastavena na 8 mm za minutu. Vzhledem ke kvazistatickému zatížení byly deformace a zatížení tělesa snímány po 500 ms, tedy dvakrát za sekundu.

#### 4.1.5 Zpracování dat

Výpočet posunutí a poměrného přetvoření z obrazových dat byl proveden pomocí softwaru VIC-3D 2010 verze 1.14. S cílem získat optimální poměr mezi hustotou zkorelovaných pixelů a efektivností korelace byly pro párování pixelů využity podmnožiny o velikosti 29×29 pixelů v kroku 4 pixelů.

K vyhodnocení byly vybrány snímky s pořadovým číslem 80 zachycující značnou plastickou deformaci, ale bez viditelných známek porušení. Tyto snímky byly pořízeny 40 sekund od začátku zatěžování, kdy dosáhly stlačení o 26 %.

Výsledky deformací byly uloženy jako schéma rozložení po příčném řezu ve formátu JPG a také exportovány v číselné podobě ve formátu CSV (comma separated values = čárkou oddělené hodnoty). VIC-3D automaticky spočítá poměrné deformace ve svislém směru  $\varepsilon_{yy}$ , ve vodorovném směru  $\varepsilon_{xx}$ , smykové deformace a spoustu dalších. Výpočet Poissonova čísla není proveden automaticky, ale na základě vložené rovnice pomocí nástroje „Apply function“. Byla zadána následující rovnice:

$$Poisson = \frac{exx}{eyy} \cdot (-1)$$

Exportovaná data obsahovala přibližně 5 500 hodnot ke každé deformaci. Při zpracování v tabulkovém procesoru Excel bylo nutné nejprve odfiltrovat malé množství extrémních hodnot. Ty mohou vznikat na okrajích vyhodnocené oblasti a mohou se lišit až o pět řádů. K odfiltrování byla použita funkce „Seřadit podle velikosti“. Řádky s extrémními hodnotami byly odstraněny. Takto připravená data byla statisticky vyhodnocena a výsledky byly graficky zpracovány.

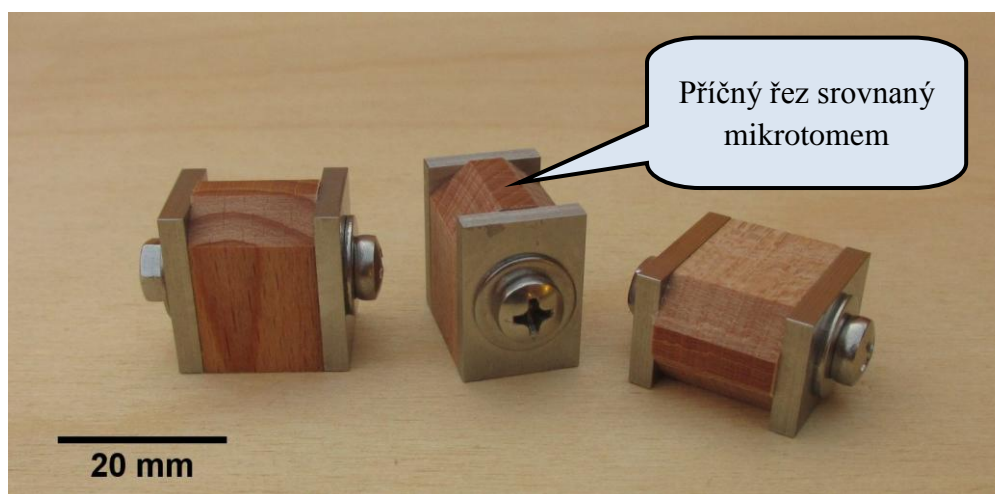
## 4.2 Výzkum mikroskopické struktury slisovaného dřeva

### 4.2.1 Příprava slisovaných vzorků dřeva

Jako vstupní materiál byly použity velké bukové hranoly o rozměrech 350×50×50 mm, aby se podmínky lisovacího procesu blížily průmyslové výrobě. Plastifikace byla prováděna v parním boxu Siemens HLHB36 působením syté páry o teplotě 100 °C. Proces probíhal za normálního atmosférického tlaku po dobu 4 hodin. Poté byly vzorky slisovány ve vyhřívaném laboratorním lise tlakem 0,57 MPa. Teplota lisovacích desek byla 90 °C a sušení při uvedených podmínkách probíhalo 10 dní. Při tomto procesu došlo ke slisování vstupního materiálu o 45 %.

### 4.2.2 Příprava povrchu a snímání mikroskopické struktury

Ze slisovaných bloků dřeva byly vyřezány malé vzorky o rozměrech 14×14×22 mm. Při běžném postupu krájení na mikrotomu ve vlhkém stavu dochází k nevratnému nabobtnání slisovaného dřeva. Aby se tomu zabránilo, vzorky byly provrtány a staženy šroubem mezi přitlačnými deskami z nerezové oceli. Jen malá část vzorku nepatrně přesahovala obrys těchto desek (Obr. 10).



Obr. 10 Vzorky slisovaného bukového dřeva připravené na snímání mikroskopické struktury

Plocha příčného řezu byla navlhčena destilovanou vodou a srovnána na malém sáňkovém mikrotomu GSL1 až těsně k přitlačným deskám. Vzorčky byly následně nasnímány ve vlhkém stavu. Pořízení snímků povrchu proběhlo za pomoci laboratorního mikroskopu Leica DM 2000 s digitální kamerou Leica DFC295 a vnějším zdrojem světla Leica CLS 100 X s dvouramenným světlovodem. Snímky byly následně zpracovány v software ImageJ.

### 4.3 Měření příjmu plynného amoniaku v čase

Na měření příjmu plynného amoniaku v čase bylo použito 5 vzorků standardních rozměrů 20×20×30 mm z různých materiálů. Cílem bylo ověřit dobu impregnace především buku (*Fagus sylvatica*). Pro porovnání byly vybrány další dřeviny, které by mohly být vhodné k modifikaci lisováním. Z domácích dřevin byla použita osika (*Populus tremula*) jádro a běl. Dále pak dřevo akácie (*Acacia* sp.) a pavlovnie (*Paulownia* sp.) které byly vypěstovány na plantážích ve Vietnamu. Vzorek akácie obsahoval 40 % běli.

Na měření příjmu amoniaku v čase při vakuové impregnaci byly použity následující pomůcky a přístroje:

- Laboratorní lahev skleněná 100 ml se šroubovacím uzávěrem
- Tříplášťový zásobní vak na 3 litry plynného amoniaku
- Laboratorní vývěva KNF LABOPORT N810.3FT.18
- Manometr na měření podtlaku
- Laboratorní váha Radwag MAC 210
- Hadičky z PVC, svorky, zátky a propojky

Plastová víčka lahví byla provrtána a do otvorů byly těsně vsunuty vývody z tuhého polyethylenu. Dále pak byly doplněny zátkami pro potřeby měření a manipulace. Zásobní vak byl slepen z PVC folie o tloušťce 0,15 mm a opatřen vývodem z PVC hadičky. Aby se zabránilo difúzi malých molekul amoniaku přes tuto folii, byl povrch vaku pokryt hliníkovou lepicí páskou a ochrannou vrstvou samolepicí PVC folie. Detailní pohled na sestavu je znázorněna na následující fotografii (Obr. 11). Dále pak celkový pohled na pracoviště (Obr. 13).





**Obr. 11 Detail sestavy na impregnaci dvou vzorků plynným amoniakem**

Vzorky o vlhkosti 12 % byly impregnovány plynným amoniakem v uzavřené skleněné lahvi za normálního atmosférického tlaku. Nejprve byl odsát vzduch vývěvou až na podtlak  $-0,94$  bar. To se rovná absolutnímu tlaku  $+6$  kPa, což znamená, že v lahvi zbylo 6 % vzduchu. Plynný amoniak byl následně přiváděn hadičkou ze zásobního vaku (Obr. 11). Vždy před vážením sklenice byly hadičky pečlivě zasvorkovány, odpojeny a ještě zazátkovány, aby se tak minimalizoval únik čpavku. Postup vakuové impregnace vzorků plynným amoniakem lze shrnout do těchto základních kroků:

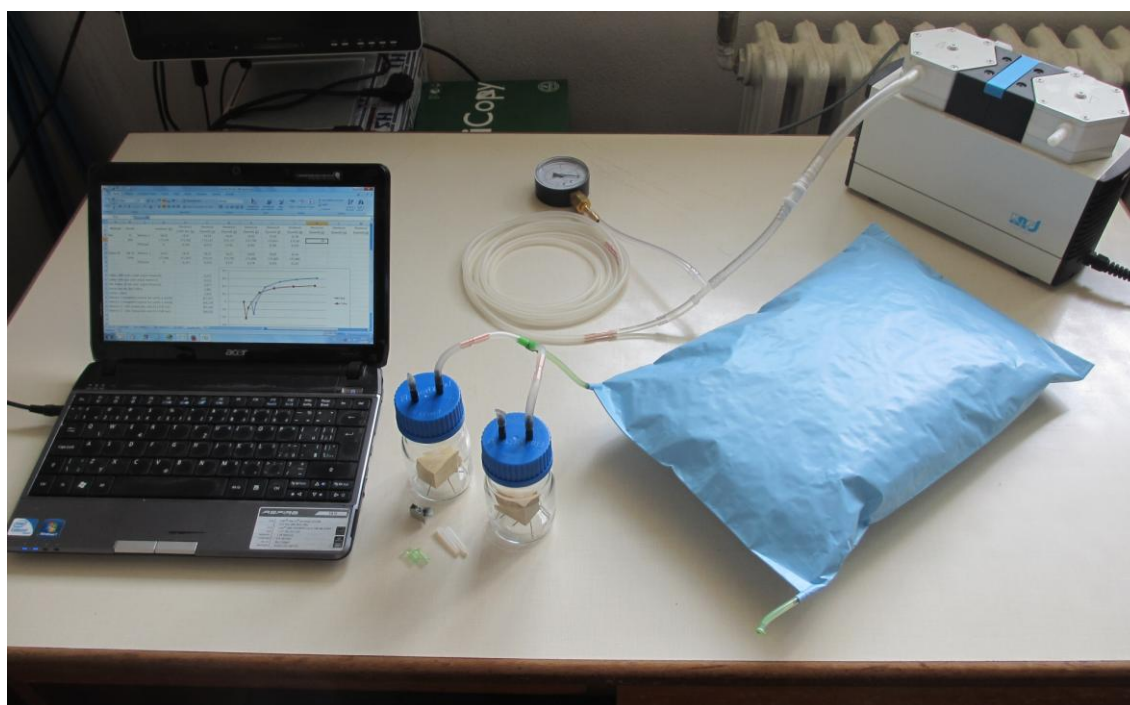
- 1) Uzavření vzorku do lahve a zvážení lahve (Obr. 12)
- 2) Odsátí vzduchu z lahve vývěvou až na podtlak  $-0,94$  bar
- 3) Opětovné zvážení lahve
- 4) Přivedení plynného amoniaku do lahve ze zásobního vaku (Obr. 11)
- 5) Průběžné vážení lahve
- 6) Ukončení měření a odvětrání lahve ve venkovním prostředí

Množství absorbovaného amoniaku v procentech (WPG) bylo vypočítáno jako podíl přírůstku hmotnosti  $\Delta m$  a hmotnosti absolutně suchého vzorku  $m_0$ :

$$WPG = \frac{\Delta m}{m_0} \cdot 100 \text{ [%]}$$



Obr. 12 Zazátkovaná lahev před vážením (vlevo) a vážení na laboratorní váze (vpravo)



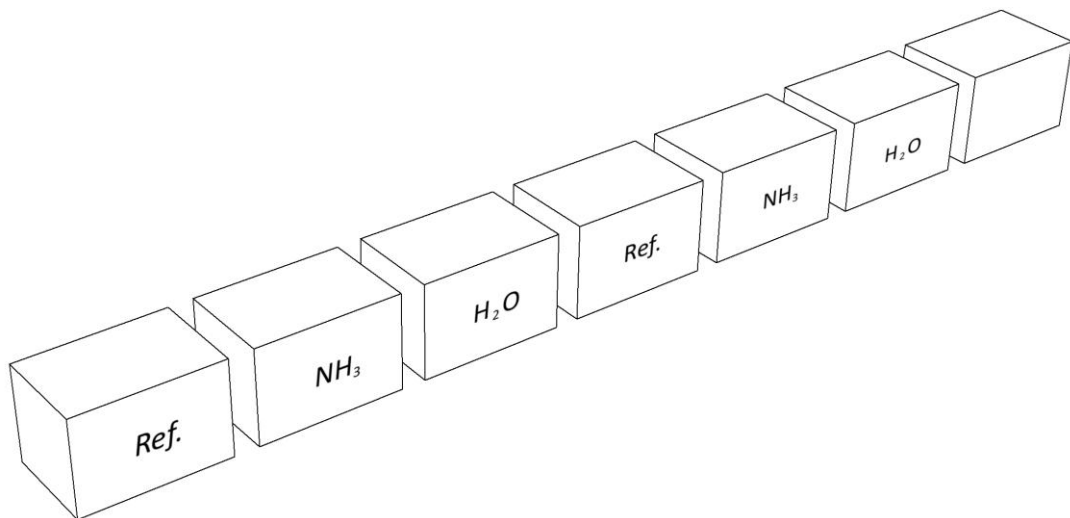
Obr. 13 Celkový pohled na pracoviště s lahvemi, zásobním vakem, vývěvou a počítačem

## 4.4 Porovnání plastifikačních metod

### 4.4.1 Příprava vzorků – výroba a zvlhčování

Speciálně ortotropní vzorky pro měření deformací při zatížení v příčném směru byly vyrobeny z bukového dřeva (*Fagus sylvatica*). Dle normy ČSN 49 0112 byly zvoleny rozměry 20×20×30 mm. Aby bylo zajištěno, že tloušťka vzorků výrazně nepřesáhne 20 mm, byly tyto rozměry zmenšeny. Zhotovená zkušební tělesa měla tedy rozměr 19,6 v radiálním směru a 18,6 v tangenciálním směru při vlhkosti 9,6 %.

Při zhotovování vzorků bylo zaznamenáno jejich pořadí v původním hranolu. Rozdělení na tři skupiny bylo provedeno na základě tohoto pořadí tak, že se střídaly vzorky z jednotlivých skupin. To znamená, že první byl referenční (Ref.), druhý byl určen na plastifikaci amoniakem ( $\text{NH}_3$ ), třetí byl určen na plastifikaci horkou párou ( $\text{H}_2\text{O}$ ) a tak dále. Toto rozdělení je znázorněno na následujícím obrázku (Obr. 14). Tím byla zajištěna minimální variabilita vlastností dřeva mezi skupinami.



**Obr. 14** Nákres dělení hranolu na vzorky pro jednotlivé úpravy – referenční (Ref.), plastifikace amoniakem ( $\text{NH}_3$ ) a plastifikace horkou párou ( $\text{H}_2\text{O}$ ).

Všechny zkušební vzorky byly vysušeny při teplotě  $103 \pm 2$  °C, a byla zjištěna jejich hustota. Měření proběhlo v souladu s normami ČSN 49 0103 a ČSN 49 0108. Poté byly uloženy v běžných podmínkách vnitřního prostředí budov.

Zvlhčování vzorků bylo prováděno v prostředí s relativní vlhkostí vzduchu blíží se 100 % a teplotou 20 °C za pomoci skleněného exsikátoru s destilovanou vodou. Zkušební tělesa byla dovnitř naskládána tak, aby měl vlhký vzduch přístup zejména k příčným řezům. Tak může vlhkost nejnáze vstupovat do dřeva. Pro urychlení procesu byla zvětšena odparná plocha pomocí snadno nasákavého papíru. Ten byl rozprostřen po stěnách a také připevněn do středu exsikátoru (Obr. 15).



**Obr. 15 Zvlhčování zkušebních vzorků v exsikátoru s destilovanou vodou**

Vybrané zkušební vzorky byly průběžně váženy a byla vypočítána jejich vlhkost dle normy ČSN 49 0103. Jakmile byla dosažena vlhkost dřeva 12 %, referenční vzorky a vzorky určené k plastifikaci amoniakem byly vyndány z exsikátoru a uzavřeny do plastového boxu. Zbylé vzorky určené k plastifikaci horkou párou byly dále zvlhčovány až na vlhkost minimálně 25 %. Poté byl proces přerušen a vzorky byly uloženy do plastového boxu.

#### 4.4.2 Plastifikace pomocí horké páry a způsob měření

Plastifikace vzorků s vlhkostí 25 % byla prováděna v prostředí syté páry s teplotou 100 °C. Současně probíhalo kontrolní měření teploty prostředí a teploty uvnitř bukových zkušebních těles. Součástí procesu přípravy byl i ohřev hliníkových bloků, mezi kterými byly vzorky následně lisovány. K plastifikaci a přípravě vzorků byly zapotřebí následující zařízení a pomůcky:

- Dvouplotýnkový elektrický vaříč
- Nerezová pařící nádoba s roštem a víkem
- Hliníkové bloky o rozměrech 40×40×12 mm
- Měřič teploty Omega DAQ USB 2401 s termočláanky
- Dřevěné vzorky s otvorem pro termočlánek
- Notebook se softwarem Omega DAQ Central 1.0.7
- Pinzeta na horké vzorky a hliníkové bloky
- Laboratorní váha Scaltec SBC 41
- Digitální posuvné měřidlo
- Rychlovarná konvice na doplňování horké vody
- Držák na přenášení horkého souboru do zkušebního stroje
- Zkušební stroj Zwick Z050
- Izolační vrstvy Pertinaxu

Nerezová nádoba s vodou a roštem byla umístěna na dvouplotýnkový vaříč. Víko nádoby mělo kuželový tvar, aby kondenzující pára stékala ke stěnám a nekapala na vzorky. Také byl připraven modul pro měření teploty Omega DAQ s termočláanky. Jakmile začala voda vařit, byly na rošt umístěny zkušební vzorky a jeden kontrolní vzorek s termočláankem. Současně byl sledován čas a teplota. Na základě měření teploty a času byl stanoven minimální čas paření pro dosažení teploty 100 °C uvnitř vzorku na tři minuty a optimální na 10 minut. Po deseti minutách byly vzorky po jednom odebírány, měřeny jejich rozměry (které již byly maximální) a znovu ukládány do pařící nádoby na nejméně 3 minuty.

Na druhé plotýnce probíhal ohřev hliníkových bloků. V jednom z nich byl vyvrtán otvor a vložen termočlánek. Výkon plotýnky byl regulován tak, aby teplota hliníkových bloků byla v rozsahu 100 až 105 °C. Pracoviště pro plastifikaci horkou párou zachycuje následující fotografie (Obr. 16).





**Obr. 16** Pracoviště pro plastifikaci vzorků horkou párou, měření a vážení vzorků, ohřev hliníkových bloků a přípravu souboru pro měření ve zkušebním stroji Zwick Z050

Před začátkem měření na zkušebním stroji Zwick Z050 byly provedeny úpravy tlačných ploch pro snížení přenosu tepla z hliníkových bloků. Na každou plochu byly pomocí vteřinového lepidla přilepeny dvě tenké desky z papíru tvrzeného fenol-formaldehydovou pryskyřicí s obchodním názvem Pertinax o celkové tloušťce 1,6 mm.

Plastifikovaný vzorek byl pomocí pinzety vyjmut z nádoby, rychle zvážen a umístěn na ohřátý hliníkový blok. Na něj byl nasunut plechový držák s izolační vrstvou Mirelonu, který slouží k přenosu souboru. Vzorek byl přiklopen druhým horkým hliníkovým blokem a celý soubor byl vložen do zkušebního stroje (Obr. 17). Ihned bylo zahájeno stlačování vzorku rychlostí 8 mm za minutu až do fáze viditelného porušení.



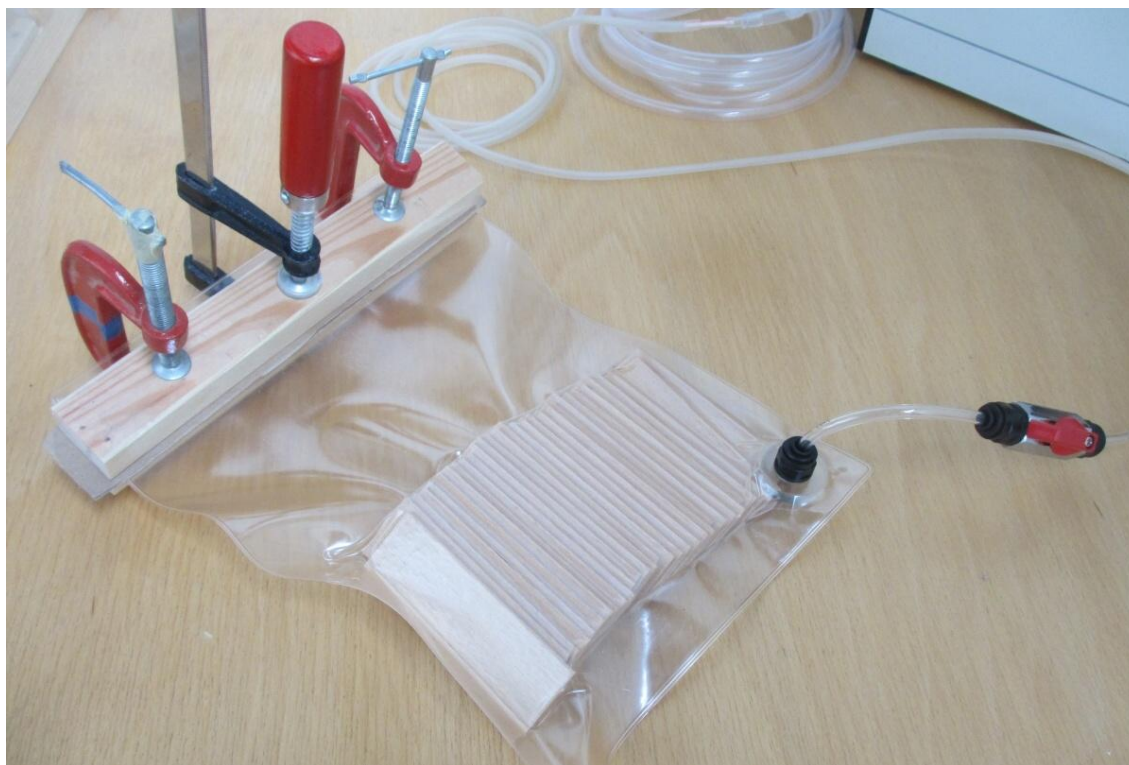
**Obr. 17** Lisování vzorku plastifikovaného horkou párou ve zkušebním stroji Zwick Z050. Na fotografii je zachycen držák, který kromě přenášení vzorku s horkými hliníkovými bloky slouží také k vlhkostní a tepelné izolaci celého souboru.

#### **4.4.3 Laboratorní autokláv na plynný amoniak**

Čpavkování dřeva je nutné provádět v uzavřeném vzduchotěsném obalu, který umožňuje odsátí vzduchu. Proto byl nejprve sestaven a testován jednoduchý vak z PVC folie (Obr. 18). Tento vak je vhodný pouze na vakuovou impregnaci plynným amoniakem a nelze použít přetlak. Přesto že nebyl použit při výzkumu plastifikačních účinků amoniaku, byl součástí výzkumné práce, a proto je zde uveden.

Hlavní část tohoto impregnačního vaku tvoří složka na dokumenty formátu A4 vyrobené ze silné PVC folie o tloušťce 0,25 mm. Složky z takto silné folie se již neprodávají. V případě potřeby lze vyrobit vak jakýchkoliv rozměrů slepením PVC folie pomocí speciálního lepidla Purocel.

Dále byla použita propojka John Guest 6 mm se závitem 1/4" a plastovou maticí, která sloužila jako vstupní otvor pro odsátí vzduchu a následného přivedení plynného amoniaku. Vzorky vkládané dovnitř nesmí mít ostré rohy, nebo musí být zabaleny do ochranné tkaniny, aby nedošlo k poškození folie při odsátí vzduchu. K uzavření vaku byly použity dva dřevěné hranoly podložené z obou stran lepenkou a několik ocelových svěrek.



**Obr. 18** Prototyp jednoduchého impregnačního vaku, který byl vyvinut pro vakuovou impregnaci vzorků plynným amoniakem. Na fotografii je zachycena fáze odsávání vzduchu vývěvou. Tato technologie impregnace nebyla využita k plastifikaci vzorků pro potřeby zde prezentovaného výzkumu.

Impregnační vak z tenké folie má jednoduchou konstrukci, umožňuje dokonalé odsátí vzduchu, ale nelze použít přetlak plynného amoniaku. Pro tlakovou impregnaci byl vyvinut malý laboratorní autokláv, ve kterém je možné dosáhnout vyšších hodnot příjmu čpavku a tím lepších plastifikačních účinků (Obr. 19).



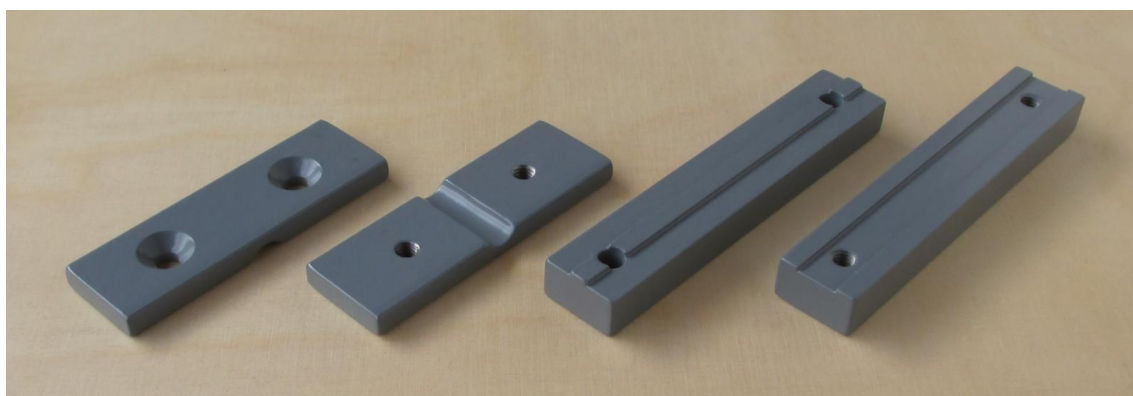
**Obr. 19** Laboratorní hadicový autokláv pro vakuovo-tlakovou impregnaci vzorků plynným amoniakem. Základem je na plocho svinovatelná hadice MERCURIO M o průměru 45 mm.



Základem malého laboratorního autoklávu je na plocho svinovatelná hadice MERCURIO M o průměru 45 mm. Tato hadice je vyrobena z měkčeného PVC. Pracovní tlak 8 bar je dostatečný pro potřeby plastifikace dřeva. Pracovní teplota hadice je od  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Konce této hadice byly uzavřeny pomocí svorek vyrobených z ocelové pásoviny. Na jedné straně byla vložena polyuretanová hadička o průměru 6 mm a konec byl trvale uzavřen pomocí dvoudílné ocelové svorky a stažen imbusovými šrouby. V místě průchodu hadičky měly oba díly o průřezu  $6\times 25\text{ mm}$  půlkruhový žlábek (Obr. 20). Pro vyšší spolehlivost bylo k utěsnění použito pružné polyuretanové lepidlo.

Vstupní otvor autoklávu byl uzavřen pomocí odnímatelné svorky vyrobené z ocelové pásoviny o průřezu  $12\times 20\text{ mm}$ . Pro zvýšení spolehlivosti byly tlačné plochy podélně profilovány do tvaru pero a drážka s hloubkou 1 mm (Obr. 20). Bez této úpravy dochází při pracovním tlaku k velmi pomalému vytahování hadice ze svorky.



**Obr. 20** Ocelové svorky pro uzavření konců hadicového autoklávu. Díly nalevo slouží k trvalému uzavření konce s upevněním přírodní hadičky. Napravo jsou díly odnímatelné svorky.

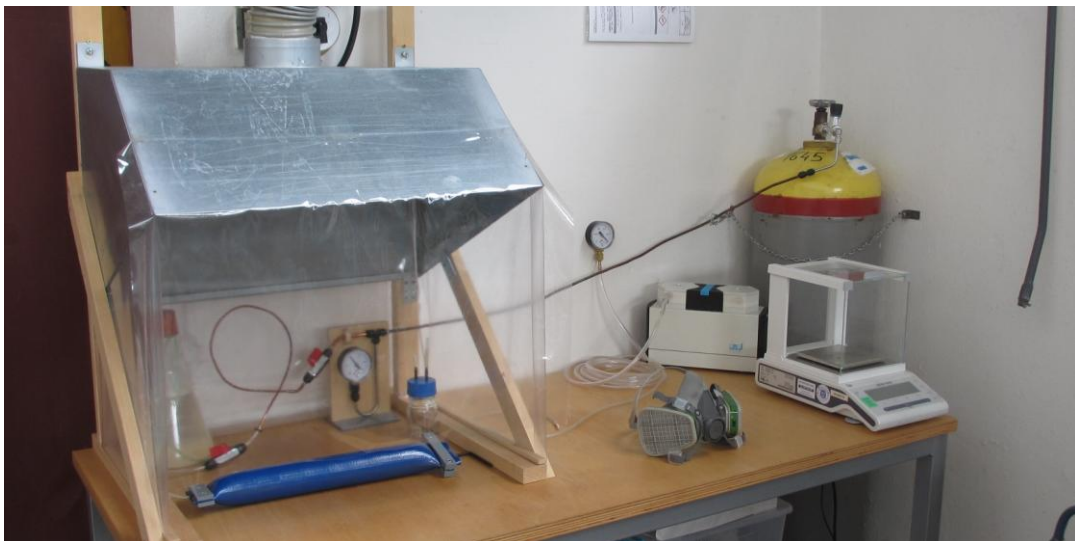
Třetí metodou impregnace dřeva je využití skleněných laboratorních lahví objemu 100 ml se šroubovacím plastovým víčkem. Tyto lahve byly úspěšně použity při měření příjmu čpavku za normálního atmosférického tlaku (viz Obr. 11 na straně 33).

Lahve byly testovány na použití při zvýšeném tlaku. Nejprve byly naplněny vodou a uzavřeny. Poté byl přiveden stlačený vzduch. Při tlaku nad 0,6 MPa přestávalo těsnit plastové víčko vlivem jeho průhybu. Skleněné lahve byly doplněny silikonovým těsněním o tloušťce 1 mm a pracovní tlak byl stanoven na 0,3 MPa.

#### 4.4.4 Plastifikace pomocí plynného amoniaku a způsob měření

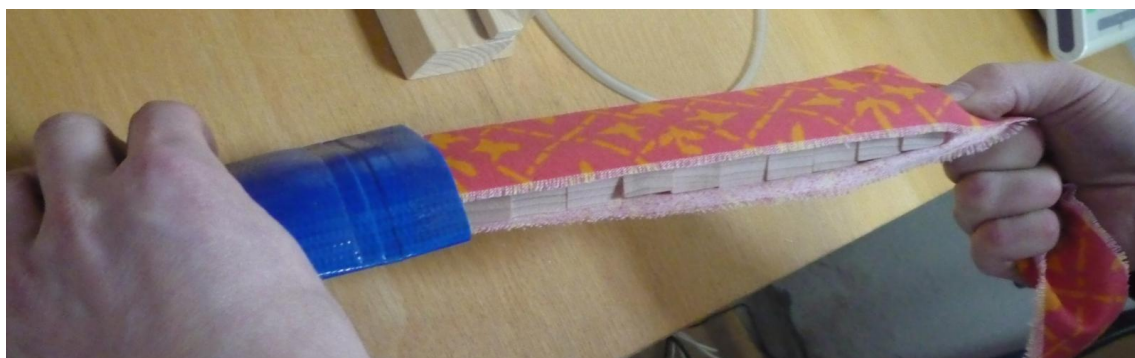
Plastifikace bukových vzorků o vlhkosti 12 % byla prováděna při tlaku plynného amoniaku 0,2 MPa. Byl k tomu využit hadicový autokláv a také tři skleněné laboratorní lahve (Obr. 24), které již byly použity při měření příjmu čpavku (viz kapitola 0 na straně 32). Součástí procesu bylo i kontrolní měření teploty, která se zvyšovala vlivem exotermické reakce amoniaku se složkami dřeva. Na plastifikaci bukových vzorků plynným amoniakem byly použity následující pomůcky a přístroje:

- Tlaková lahev s plynným amoniakem
- Malá laboratorní digestoř (Obr. 21)
- Laboratorní lahev skleněná 100 ml se šroubovacím uzávěrem
- Malý hadicový autokláv vlastní výroby (Obr. 19, Obr. 21)
- Laboratorní vývěva KNF LABOPORT N810.3FT.18 (Obr. 21)
- Manometr na měření podtlaku + hadičky z PVC
- Manometr na měření tlaku amoniaku
- Tlakové PU hadičky s průměrem 6 mm
- Systém rychlého spojování tlakových hadiček John Guest
- Kulové ventily s vnitřním závitem 1/4" a spojkami John Guest 6 mm
- Nádoba s vodou
- Měřič teploty Omega DAQ USB 2401 s termočláanky
- Laboratorní váha Mettler Toledo MS1003S



Obr. 21 Pracoviště pro impregnaci dřeva amoniakem vybavené vývěvou, váhou, tlakovou lahví (vpravo) a digestoří s hadicovým autoklávem (vlevo). Na stole leží také ochranná maska.

Vzorky vkládané do hadicového autoklávu byly naskládány radiálními řezy k sobě, obtočeny pruhem tkaniny a vsunuty dovnitř (Obr. 22). Tkanina velmi usnadnila manipulaci se vzorky před i po plastifikaci. Také do skleněných lahví byly vloženy vzorky. Samotné plastifikaci předcházelo odsátí vzduchu laboratorní vývěvou až na podtlak  $-0,94$  bar. To se rovná absolutnímu tlaku  $+6$  kPa. Efekt vakua názorně demonstruje fotografie níže (Obr. 23). Plynný amoniak byl přiváděn měděnou trubičkou z tlakové lahve přes stojan s tlakoměrem k místu spotřeby. Nejprve byl vypouštěn do nádoby s vodou, dokud nedošlo k odvzdušnění rozvodů. V tom okamžiku se změnil zvuk i velikost bublin vlivem rozpouštění amoniaku. Potom byla trubička připojena k autoklávu a tlak plynu uvnitř byl pozvolna zvyšován až na  $0,2$  MPa (Obr. 24).

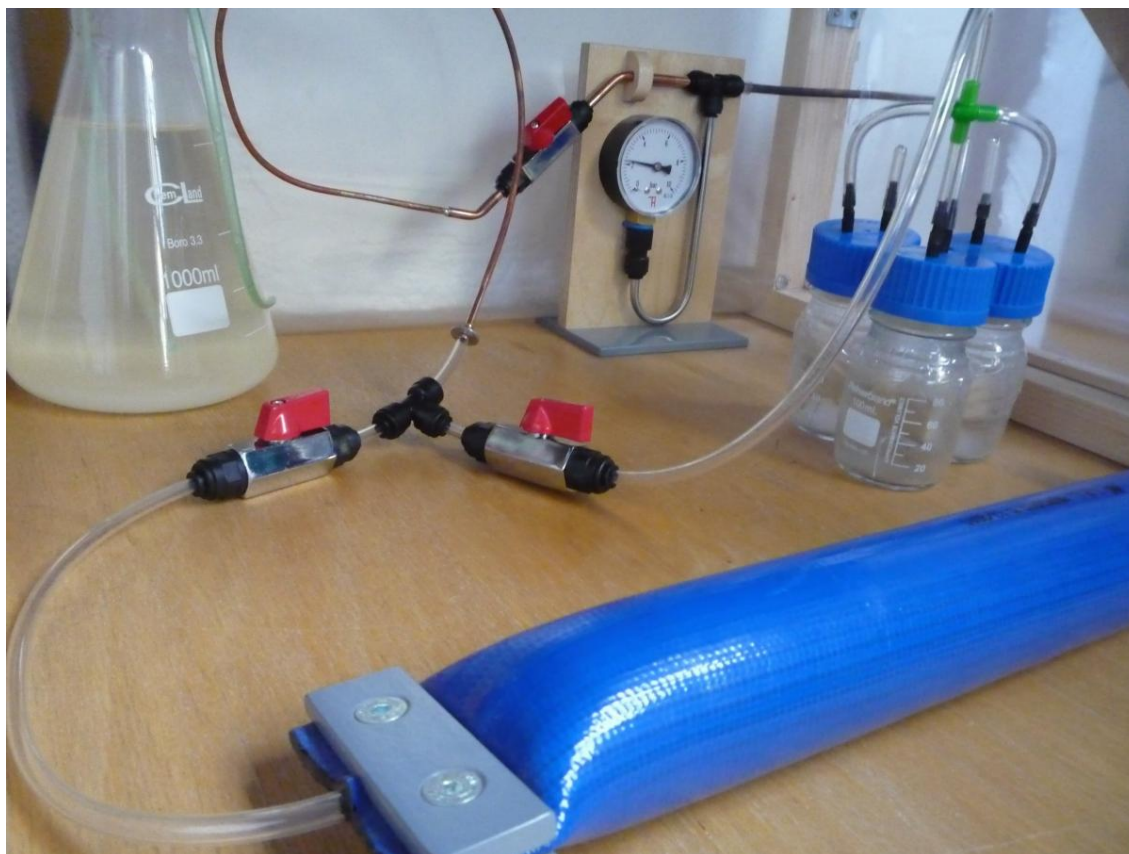


**Obr. 22** Vkládání vzorků do hadicového autoklávu



**Obr. 23** Odsávání vzduchu z hadicového autoklávu

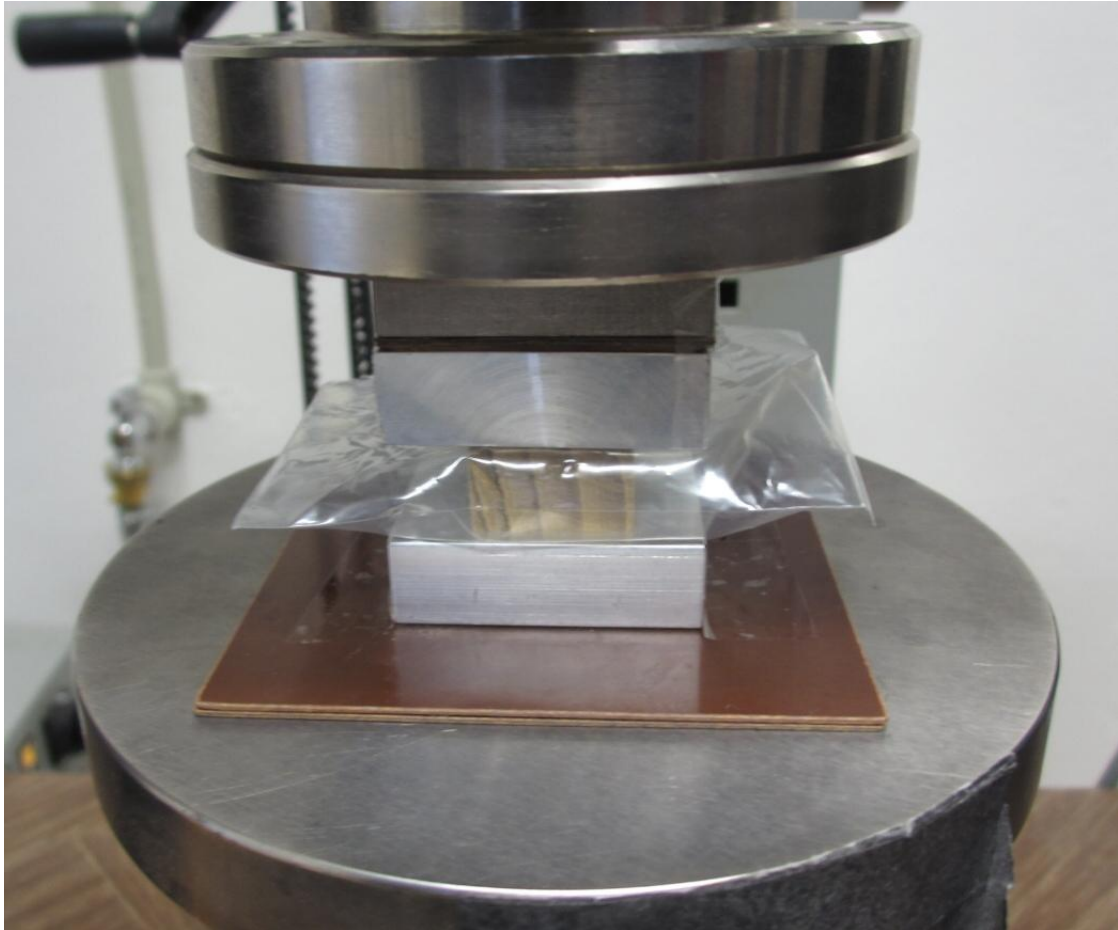




**Obr. 24** Impregnace vzorků plynným amoniakem při tlaku 0,2 MPa s využitím hadicového autoklávu a skleněných laboratorních lahví

Při první plastifikaci vzorků plynným amoniakem proběhlo kontrolní měření teploty uvnitř bukových zkušebních těles. Do jedné skleněné lahve byl vložen kontrolní vzorek s vyvrtaným otvorem. Do jeho středu byl zaveden konec termočlánku a vzduchotěsným průchodem vyveden ven z lahve. Měření teploty probíhalo za pomoci měřicího modulu Omega DAQ a notebooku vybaveným softwarem Omega DAQ Central 1.0.7. Nejvyšší dosažená teplota byla zaznamenána.

Po třech hodinách plastifikace byly vzorky vyjímány z autoklávu a vkládány do uzavíratelných polyethylenových sáčků. Každý vzorek byl zvážen tak, že hmotnost sáčku se odečetla již při vážení. Aby se zabránilo difuzi amoniaku přes tuto tenkou folii (0,06 mm), byl každý vzorek ještě zabalen do hliníkové folie. Balíčky byly ihned přeneseny ke zkušebnímu stroji Zwick Z050 a zahájeno měření. Postupně byly plastifikované vzorky vybalovány z hliníkové folie, byly změřeny jejich rozměry a uzavřené v sáčku byly vkládány mezi tlačné plochy zkušebního stroje (Obr. 25).



**Obr. 25 Lisování bukového vzorku plastifikovaného amoniakem na zkušebním stroji Zwick Z050**

Postup impregnace vzorků plynným amoniakem s následným měřením na zkušebním stroji lze shrnout do těchto základních kroků:

- 1) Zvážení vzorků
- 2) Uzavření vzorků do lahve nebo hadicového autoklávu
- 3) Odsátí vzduchu vývěvou až na podtlak  $-0,94$  bar
- 4) Postupné natlakování plynným amoniakem až na tlak  $0,2$  MPa
- 5) Udržování tlaku  $0,2$  MPa po dobu 3 hodin
- 6) Vyjmutí vzorku a uzavření do uzavíratelných sáčků
- 7) Zvážení vzorků (hmotnost sáčku odečtena již na laboratorní váze)
- 8) Zabalení do hliníkové folie a označení
- 9) Měření rozměrů před lisováním (bez hliníkové folie)
- 10) Lisování napříč vlákna na zkušebním stroji Zwick Z050

Proces lisování byl totožný s lisováním vzorků plastifikovaných horkou párou. Lisování v tangenciálním směru probíhalo rychlostí 8 mm za minutu až do fáze viditelného porušení. Na tlačných deskách byly také připevněny vrstvy Pertinaxu a vzorky byly lisovány mezi hliníkovými bloky (Obr. 25). V tomto případě nebyly ohřáté.

#### **4.4.5 Kombinovaná plastifikace**

Při měření plastifikačních účinků amoniaku byla malá část vzorků plastifikována kombinovaným způsobem. Důvodem byla pouze zvědavost a využití naměřených dat nebylo plánováno. Výsledky měření jsou natolik zajímavé, že byly i přes malý počet měření zahrnuty do výsledků této diplomové práce.

Plastifikace plynným amoniakem probíhala podle postupu popsáno v předchozí kapitole. Vzorky o vlhkosti 12 % byly plastifikovány 3 hodiny při tlaku 0,2 MPa. Poté byly uchovány v uzavíratelném sáčku a hliníkové folii přes noc.

Vzorek plastifikovaný plynným amoniakem byl vložen do pařící nádoby a plastifikován sytou párou při teplotě 100 °C po dobu 10 minut. Plastifikace v páře a následné měření probíhaly podle postupu popsáno v kapitole 4.4.2 na straně 37. Vlivem vysoké teploty se uvolnilo značné množství plynného amoniaku a pracoviště muselo být odvětráváno.

#### **4.4.6 Měření referenčních vzorků na zkušebním stroji**

Referenční vzorky o vlhkosti 12 % byly vkládány mezi tlačné plochy zkušebního stroje Zwick Z050 a lisovány v tangenciálním směru rychlostí 8 mm za minutu až do fáze viditelného porušení. Nastavení stroje bylo stejné pro všechny skupiny vzorků. I v tomto případě byly na tlačných plochách připevněny vrstvy Pertinaxu a vzorky byly lisovány mezi dvěma hliníkovými bloky. Tím bylo zajištěno, že získané výsledky všech skupin bude možné porovnávat mezi sebou.

#### **4.4.7 Bezpečnostní opatření při plastifikaci plynným amoniakem**

Při plastifikaci dřeva plynným amoniakem je třeba dbát na bezpečnostní opatření. Zvláště důležité je to při manipulaci s plastifikovanými vzorky, kdy únik čpavku do ovzduší je nevyhnutelný. Musí být zajištěno dobré větrání. Lze použít digestoř, nebo lze práci provádět venku, a to vždy po směru větru. Je nezbytné používat ochrannou dýchací polomasku (3M série 6000 s filtrem K1), ochranné brýle a rukavice. Je třeba si uvědomit, že při vyšších koncentracích je amoniak dráždivý i na pokožce.

## 5 Výsledky

Výsledky jsou členěny na 4 základní podkapitoly podle výzkumného zaměření:

- Vliv odklonu letokruhů na proces lisování dřeva
- Mikroskopická struktura slisovaného dřeva
- Příjem plynného amoniaku v čase
- Porovnání plastifikačních metod

### 5.1 Vliv odklonu letokruhů na proces lisování dřeva

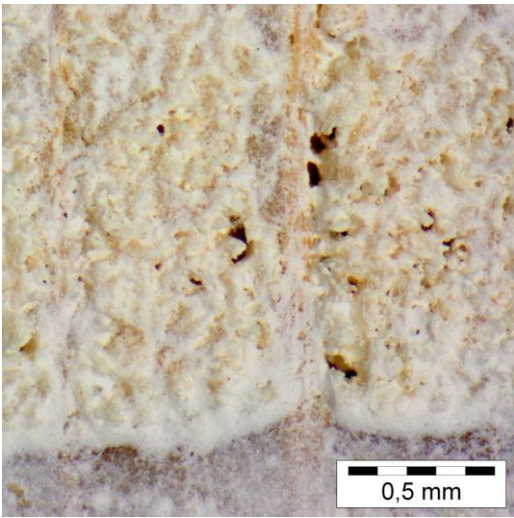
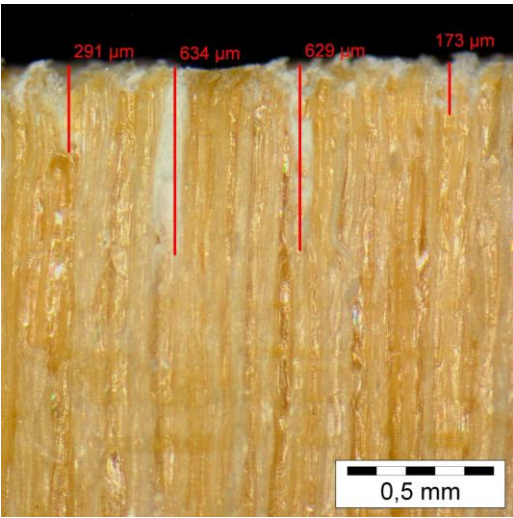
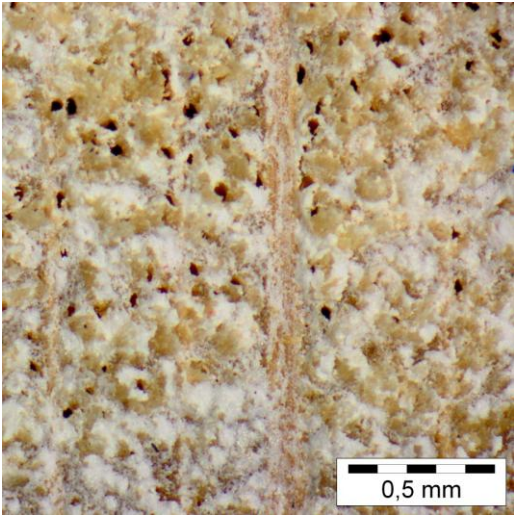
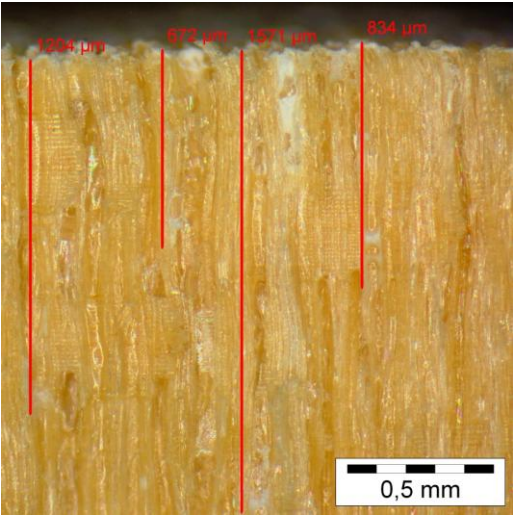
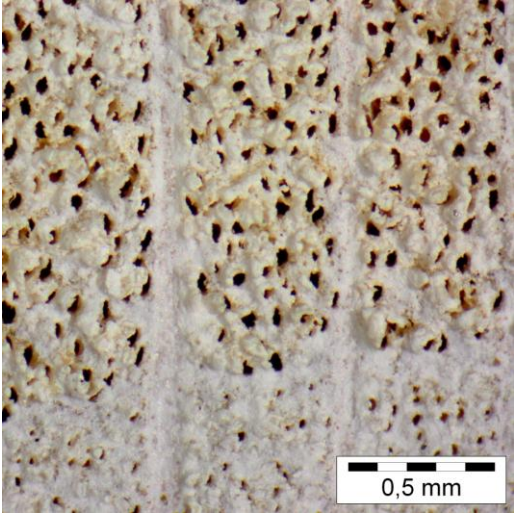
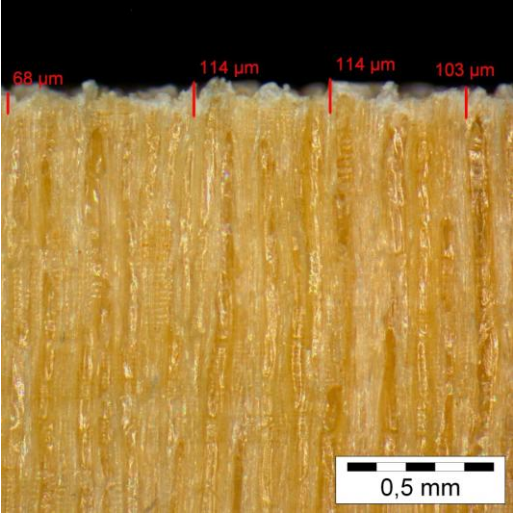
Sada sedmi vzorků na měření vlivu odklonu letokruhů měla průměrnou hustotu  $674,74 \text{ kg.m}^{-3}$  při nulové vlhkosti. Jejich vlhkost před pařením byla 6,5 %. Během prvních deseti minut intenzivního paření se vlhkost zvýšila o 7,5 % a dále se zvyšovala rychlostí 1 % za 15 minut. Bylo také změřeno, že teplota uvnitř zkušebních těles dosáhla  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  již za 3 minuty po vložení do pařící nádoby. Po 90 minutách plastifikace dosáhly vzorky průměrné vlhkosti 19,96 % a hustoty  $709,35 \text{ kg.m}^{-3}$ . Konečná vlhkost byla tedy nižší než bylo očekáváno. Přesto byla tato plastifikace dostatečná pro potřeby lisování s využitím metody digitální korelace obrazu. Výsledky jsou uvedeny v následujících kapitolách.

#### 5.1.1 Stanovení postupu nanášení černobílého vzoru na příčný řez

Tři bukové vzorky nastříkané syntetickou rychleschnoucí barvou za různých podmínek vykazovaly rozdílnou pórovitost povrchu a hloubku průniku barvy do dřeva. Mikroskopické snímky příčného řezu a podélného řezu s naměřenými hodnotami jsou přehledně uspořádány v následující tabulce (Tab. 2).



Tab. 2 Mikroskopické snímky bílé barvy nanášené na bukové vzorky za různých podmínek

	Příčný řez	Podélný řez
Suchý vzorek		
Zvlhčený povrch vzorku		
Horký pařený vzorek		



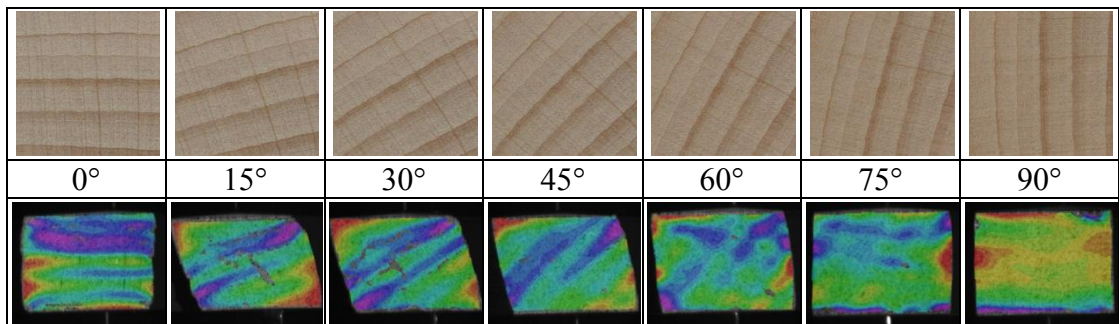
Suchý vzorek byl pokryt souvislou vrstvou barvy s minimálním počtem otevřených pórů (Tab. 2 nahoře). Takováto vrstva brání průniku vlhkosti do dřeva během paření. Nejvyšší naměřená hloubka průniku barvy do dřeva je 634  $\mu\text{m}$ .

Vzorek, který byl před nástřikem navlhčen malým množstvím vody, měl více pórovitý povrch (Tab. 2 uprostřed). Zjištěná hloubka průniku barvy byla nejvyšší ze zkoumaných vzorků, a to 1571  $\mu\text{m}$ . To může mít vliv na chování dřeva při lisování.

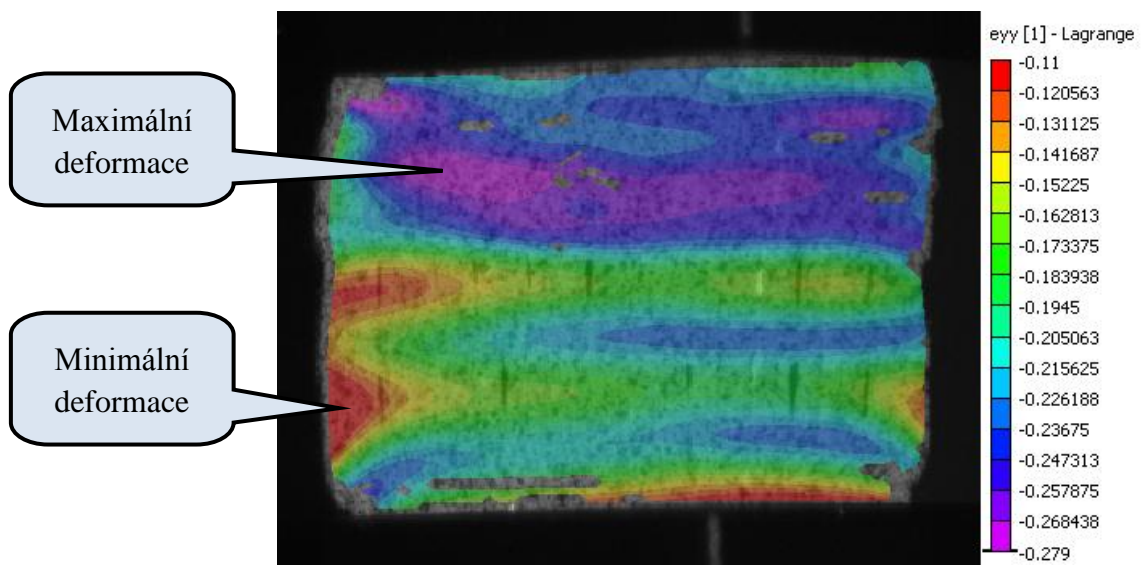
Nejlepších výsledků dosáhl vzorek, který byl před nástřikem barvy plastifikován v horké syté páře. Povrch příčného řezu byl velmi pórovitý (Tab. 2 dole), což umožní lepší průběh paření a zvlhčování dřeva. Vytvořený film prakticky pokryl pouze povrch příčného řezu. Zjištěná hloubka průniku barvy do dřeva 114  $\mu\text{m}$  v podstatě odpovídá drsnosti povrchu. Díky tomu budou deformace zkušebního tělesa ovlivněny minimálně.

### 5.1.2 Vliv odklonu letokruhů na deformaci ve směru síly

Výsledky rozložení poměrných deformací ve směru síly umožňují zhodnotit rovnoměrnost stlačování bukových vzorků s různým odklonem letokruhů. Na sérii snímků (Obr. 26) lze pozorovat více stlačené fialové zóny, které svým průběhem odpovídají pórovitější jarní části letokruhu. Není zde ovšem pouze vliv letokruhů. Rozložení deformací radiálně stlačeného vzorku (úhel  $0^\circ$ ) je nápadně nerovnoměrné (Obr. 27). Deformace v horní části dosahuje téměř dvojnásobku nejvyšších hodnot deformací spodní poloviny. Naproti tomu barevné schéma tangenciálně stlačeného vzorku (úhel  $90^\circ$ ) se jeví rovnoměrnější (Obr. 26 vpravo). To ovšem nelze dobře zhodnotit vizuálně, protože barevná škála je adaptivní. Každý obraz má své maximum (fialová) a minimum (červená).



Obr. 26 Příčné řezy zkušebních vzorků s různým odklonem letokruhů a rozložení poměrné deformace ve směru zatížení  $\epsilon_{yy}$ . Vzorky jsou stlačeny o 26 %.

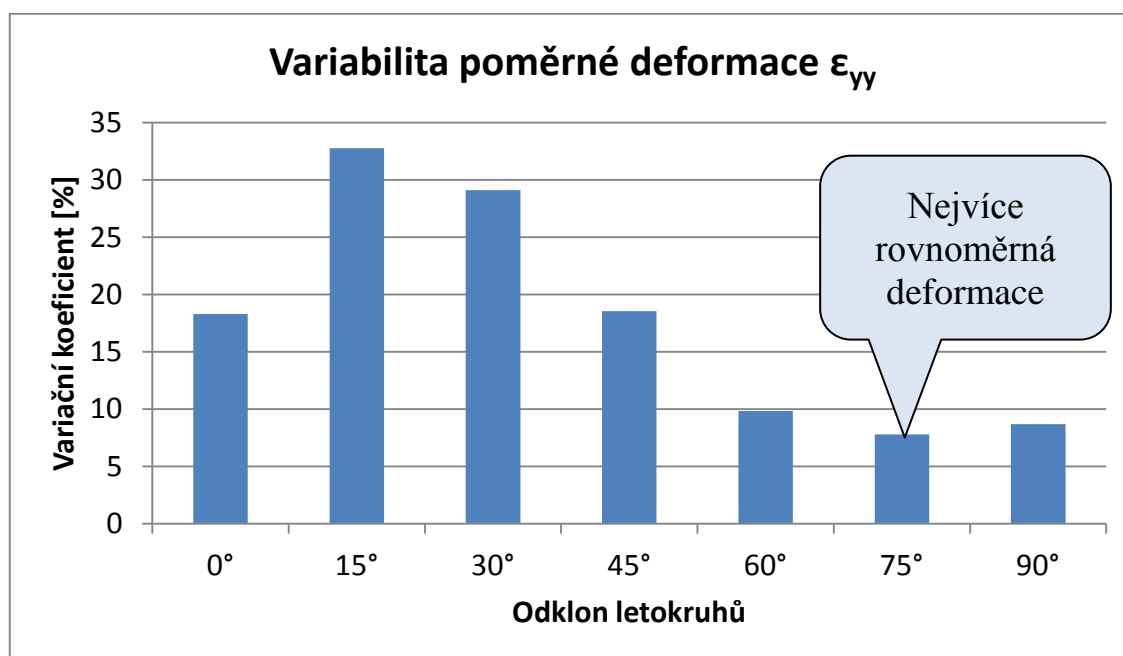


Obr. 27 Rozložení poměrné deformace ve směru zatížení  $\epsilon_{yy}$ . Vzorek je radiálně stlačený o 26 %.

Průměrná hodnota deformace ve směru síly pochází ze stejného okamžiku lisování a je pro všechny vzorky stejná. Proto nemá význam ji hodnotit. Vliv odklonu letokruhů na deformaci ve směru zatížení lze nejlépe zhodnotit porovnáním její variability. Výsledky popisné statistiky včetně variačního koeficientu jsou shrnuty v tabulce níže (Tab. 3). Rozdíly mezi testovanými vzorky znázorňuje následující sloupcový graf (Obr. 28). Při odklonu letokruhů 15° byla variabilita nejvyšší. Naopak nejrovnoměrněji stlačený vzorek měl odklon letokruhů 75°, tedy téměř tangenciální směr.

**Tab. 3** Popisná statistika poměrné deformace ve směru zatížení  $\epsilon_{yy}$  pro zkušební tělesa s různým odklonem letokruhů změřené pomocí digitální korelace obrazu

Odklon letokruhů	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Průměrná deformace ( $\epsilon_{yy}$ )	-0,211	-0,188	-0,191	-0,210	-0,222	-0,222	-0,219
Medián	-0,216	-0,189	-0,197	-0,213	-0,224	-0,222	-0,215
Směrodatná odchylka	0,04	0,06	0,06	0,04	0,02	0,02	0,02
Variační koeficient [%]	18,31	32,78	29,13	18,54	9,84	7,77	8,68
Šikmost	0,59	0,32	0,51	0,61	0,55	0,14	-1,60
Špičatost	-0,15	-0,10	0,21	0,94	1,01	2,38	3,24
Počet hodnot	5566	5506	5438	5677	5704	5924	5715

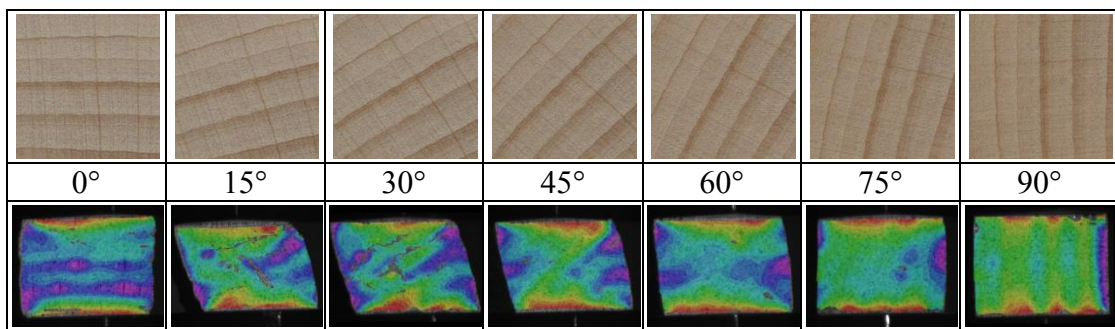


**Obr. 28** Variabilita poměrné deformace ve směru síly  $\epsilon_{yy}$  změřená pomocí digitální korelace obrazu

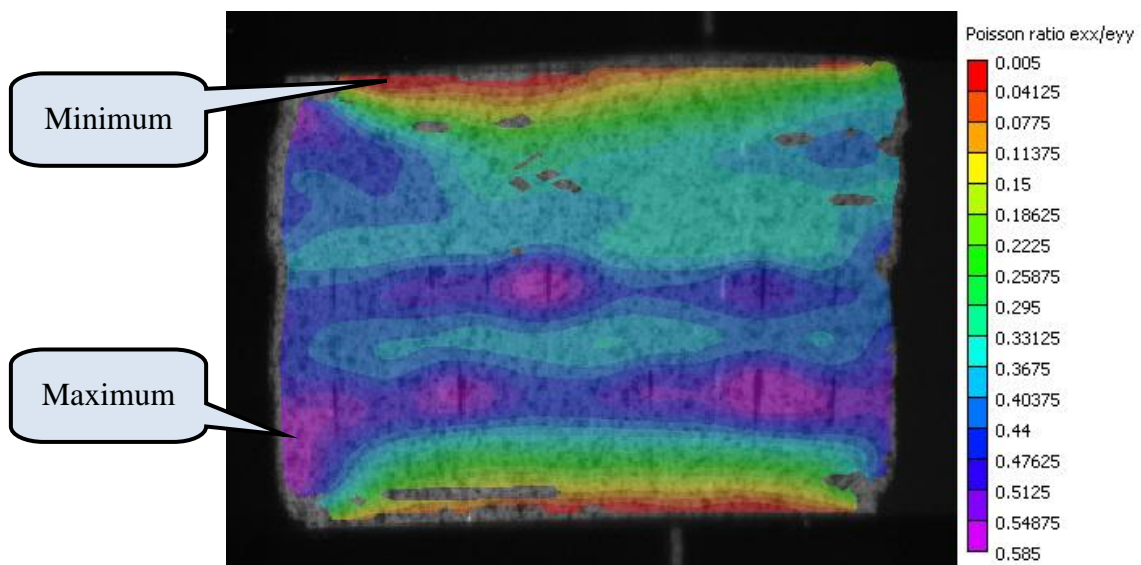
### 5.1.3 Vliv odklonu letokruhů na Poissonovo číslo

Deformace vzorků ve směru kolmém na působící sílu nejlépe vyjadřuje Poissonovo číslo, což je poměr příčné poměrné deformace (ve směru kolmém na působící sílu) a podélné poměrné deformace (ve směru působící síly). Proto je zde uvedeno místo příčné deformace ( $\epsilon_{xx}$ ).

Nejvyšší hodnoty Poissonova čísla (fialové oblasti) odpovídají svým umístěním letní části letokruhů u speciálně ortotropních vzorků (Obr. 29). Důvodem je minimální stlačení ( $\epsilon_{yy}$ ) letní části letokruhu radiálního vzorku (Obr. 26, úhel  $0^\circ$ ) a maximální příčná deformace ( $\epsilon_{xx}$ ) letní části letokruhu u tangenciálního vzorku. U ostatních obecně ortotropních vzorků jsou obvykle obě deformace největší v jarní části letokruhu a v letní naopak nejmenší. To dává průměrné hodnoty Poissonova čísla a vztah s anatomickou stavbou nelze snadno definovat (Obr. 29).



Obr. 29 Příčné řezy zkušebních vzorků s různým odklonem letokruhů a rozložení Poissonova čísla  $\mu_{yx}$  (poměru poměrných deformací) na příčných řezech. Vzorky jsou stlačeny o 26 %.



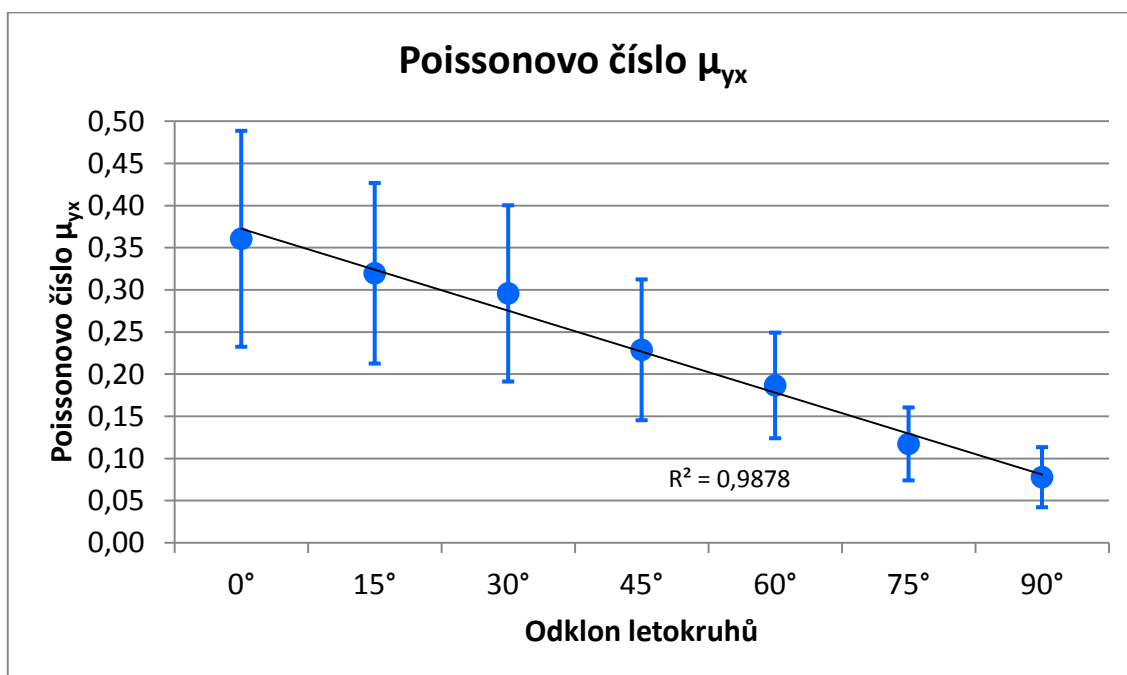
Obr. 30 Rozložení Poissonova čísla  $\mu_{yx}$  na příčném řezu. Vzorek je radiálně stlačený o 26 %

Nejvyšší hodnota Poissonova čísla 0,59 byla zjištěna u radiálně slisovaného vzorku v letní části letokruhů, a to v místech, kde se začínají tvořit trhliny (Obr. 30). Také průměrná hodnota při tomto směru lisování byla nejvyšší, a to 0,361.

Z Výsledků popisné statistiky Poissonova čísla vyplývá, že variabilita zjištěných hodnot je téměř stejná pro všechny měřené vzorky, ale průměrná hodnota se liší v závislosti na odklonu letokruhů (Tab. 4). Následující graf (Obr. 31) znázorňuje silnou lineární závislost s koeficientem determinace  $R^2 = 0,9878$ . Trend je klesající s nejmenší hodnotou u tangenciálně slisovaného vzorku (úhel  $90^\circ$ ), která je  $\mu_{TR} = 0,078$ .

Tab. 4 Popisná statistika Poissonova čísla pro příčně stlačené vzorky s různým odklonem letokruhů

Odklon letokruhů	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Průměr $\mu_{yx}$	0,361	0,320	0,296	0,229	0,187	0,117	0,078
Medián	0,387	0,324	0,302	0,240	0,203	0,122	0,077
Směrodatná odchylka	0,13	0,11	0,10	0,08	0,06	0,04	0,04
Variační koeficient [%]	35,52	33,49	35,34	36,49	33,56	36,91	45,80
Šikmost	-0,98	-0,24	-0,33	-0,27	-0,59	-0,30	0,70
Špičatost	0,60	-0,13	-0,17	-0,49	0,12	0,86	2,57
Počet hodnot	5566	5506	5438	5677	5704	5924	5715

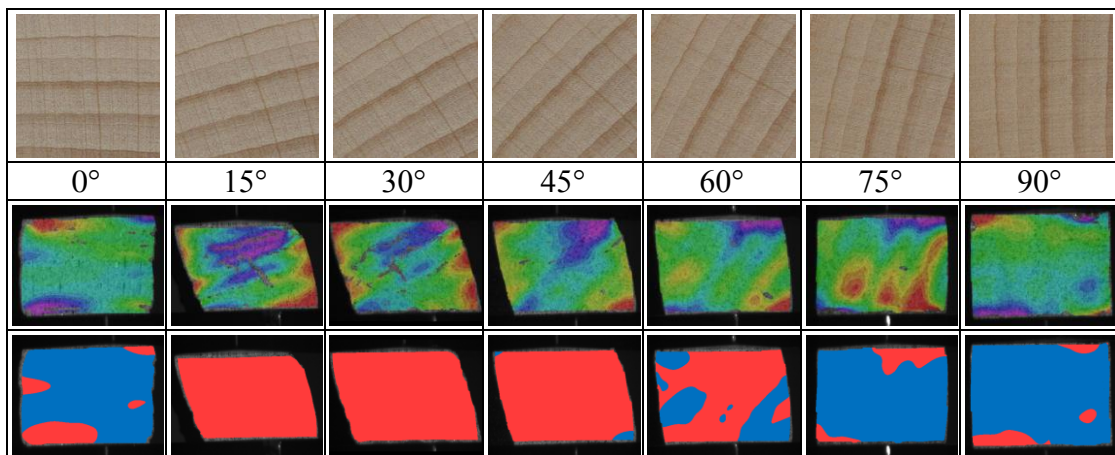


Obr. 31 Závislost Poissonova čísla na odklonu letokruhů. Body představují průměrné hodnoty a délka úseček (vousů) vyjadřuje směrodatnou odchylku. Odklon  $0^\circ$  je radiální směr lisování.

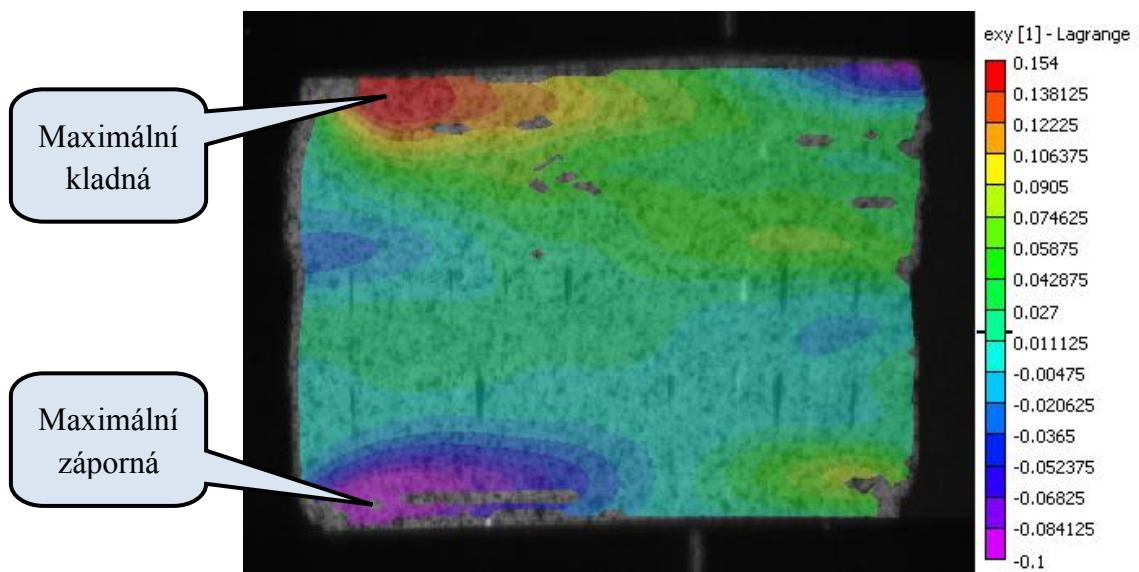


### 5.1.4 Vliv odklonu letokruhů na smykovou deformaci

Při lisování vzorků s různým odklonem letokruhů došlo ke značnému skosení příčného průřezu, což je smyková deformace. Nejmarkantnější změna tvaru je u odklonu letokruhů 15° až 45° (Obr. 32). Vyhodnocení smykové deformace je složitější, protože dochází ke kladné a záporné deformaci. Barevné schéma získané metodou DIC neumožňuje snadno rozlišit tyto dvě deformace. Proto byly příslušné zóny zvýrazněny (Obr. 32 dole). Červená označuje zápornou deformaci a modrá vyplňuje zóny kladné smykové deformace.



Obr. 32 Příčné řezy zkušebních vzorků s různým odklonem letokruhů a rozložení smykových deformací  $\varepsilon_{xy}$  na příčných řezech. Vzorky jsou stlačeny v příčném směru o 26 %. Spodní řada znázorňuje rozložení kladných (modrá) a záporných (červená) smykových deformací.



Obr. 33 Rozložení poměrné smykové deformace  $\varepsilon_{xy}$  na příčném řezu radiálně stlačeného vzorku

Obecně ortotropní vzorek se obvykle deformuje tak, že se zmenšuje zejména v tangenciálním směru. Speciálně ortotropní vzorky vytváří soudkovitý tvar s opačnou smykovou deformací v sousedních rozích (Obr. 33). Při kladné smykové deformaci dochází ke skosení celého tvaru nebo určitých oblastí doprava a při záporné doleva (Obr. 32). Obě deformace byly statisticky vyhodnoceny a výsledky byly shrnuty do dvou tabulek (Tab. 5, Tab. 6). Je zde uvedeno i procentuální zastoupení každé deformace, které odpovídá uvedenému červenomodrému schématu (Obr. 32). Při odklonu letokruhů 15° až 45° dochází převážně nebo zcela ke smykové deformaci na jednu stranu. Ostatní vzorky obsahují velký podíl obou smykových deformací.

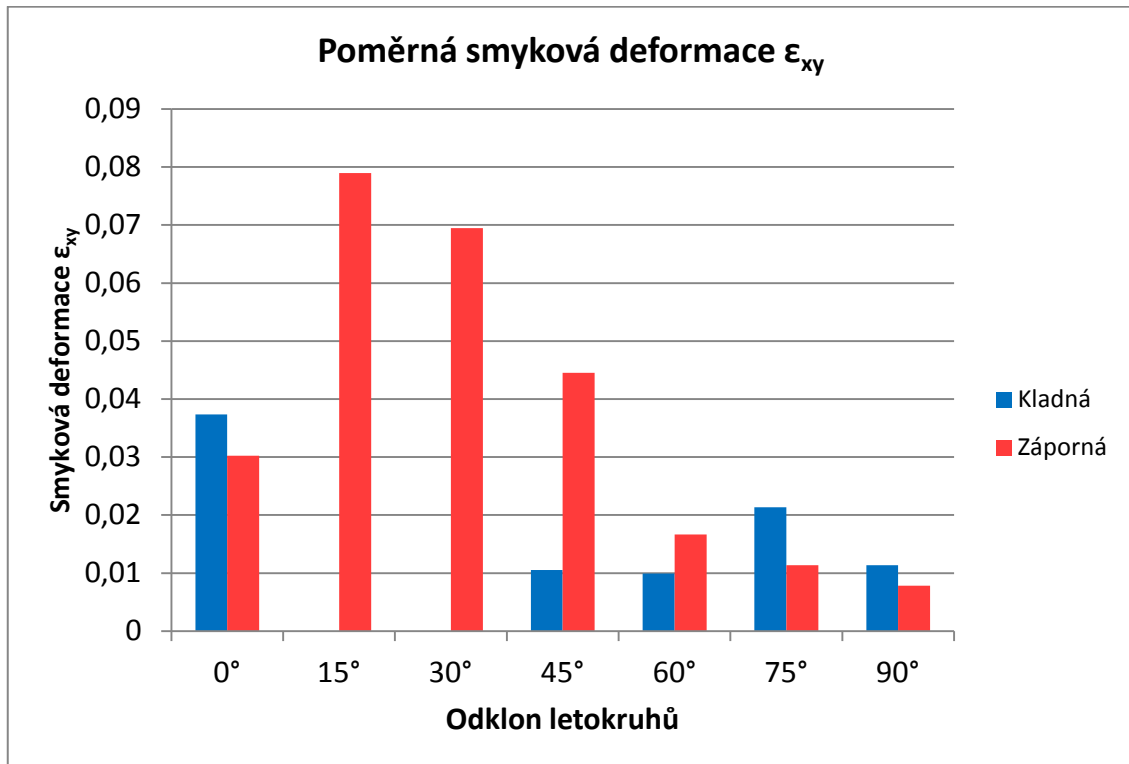
**Tab. 5 Popisná statistika kladné poměrné smykové deformace pro příčně stlačené vzorky s různým odklonem letokruhů. Odklon 0° je radiální směr lisování.**

Kladná smyková deformace (značena modře)							
Odklon letokruhů	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Průměr (+ $\varepsilon_{xy}$ )	0,037			0,011	0,010	0,021	0,011
Medián	0,029			0,008	0,008	0,020	0,010
Směrodatná odchylka	0,034			0,008	0,009	0,011	0,007
Variační koeficient [%]	91,20			77,53	95,61	50,57	64,67
Maximum (+ $\varepsilon_{xy}$ )	0,191			0,032	0,066	0,059	0,053
Počet hodnot	4327	0	0	88	1687	5256	5172
Počet hodnot [%]	77,74	0	0	1,55	29,58	88,72	90,50

**Tab. 6 Popisná statistika záporné poměrné smykové deformace pro příčně stlačené vzorky s různým odklonem letokruhů. Odklon 0° je radiální směr lisování.**

Záporná smyková deformace (značena červeně)							
Odklon letokruhů	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Průměr (- $\varepsilon_{xy}$ )	-0,030	-0,079	-0,069	-0,045	-0,017	-0,011	-0,008
Medián	-0,018	-0,081	-0,070	-0,046	-0,013	-0,009	-0,005
Směrodatná odchylka	0,031	0,033	0,026	0,019	0,014	0,009	0,008
Variační koeficient [%]	103,72	42,32	36,80	42,90	82,60	82,08	100,11
Minimum (- $\varepsilon_{xy}$ )	-0,119	-0,147	-0,159	-0,096	-0,068	-0,043	-0,053
Počet hodnot	1239	5506	5438	5589	4017	668	543
Počet hodnot [%]	22,26	100	100	98,45	70,42	11,28	9,50

Průměrné hodnoty smykových deformací jsou různé pro různé odklony letokruhů (Tab. 5, Tab. 6). Nejlépe tyto rozdíly znázorňuje následující graf (Obr. 34). Nejvyšší hodnoty dosahovaly vzorky deformované na jednu stranu, které měly odklon letokruhů 15° až 45°. Ostatní vzorky obsahovaly obě smykové deformace s nižšími průměrnými hodnotami, z nichž nejvyšší hodnoty dosáhl radiálně slisovaný vzorek (odklon 0°) a°nejnižší výsledky byly zjištěny u tangenciálně slisovaného vzorku (odklon 90°).

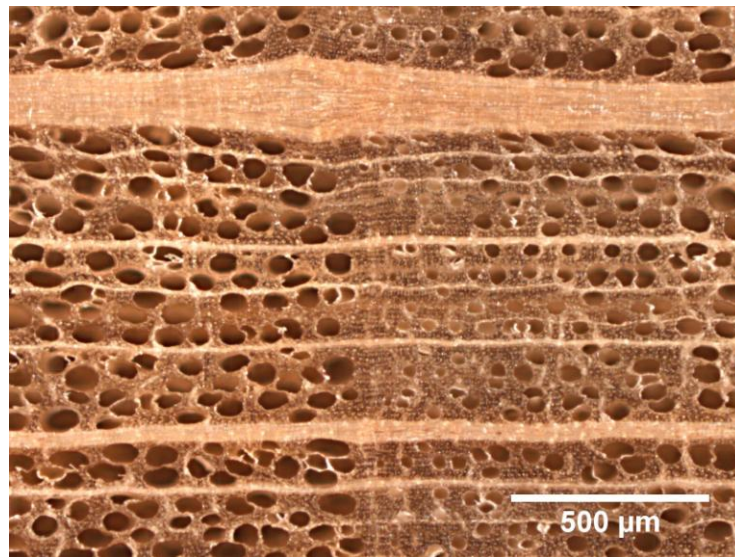


Obr. 34 Průměrné hodnoty poměrné smykové deformace  $\epsilon_{xy}$  při různém odklonu letokruhů. Odklon 0° označuje radiálně slisovaný vzorek.



## 5.2 Mikroskopická struktura slisovaného dřeva

Mikroskopická struktura bukového dřeva není zcela homogenní (Obr. 35). V radiálním směru ovlivňují vlastnosti dřeva velké dřeňové paprsky. Také velikost a množství mikrocév je variabilní. Pórovitost je viditelně nižší v letní části letokruhu, takže zde vzniká pás dřevní hmoty o vyšší hustotě v tangenciálním směru.


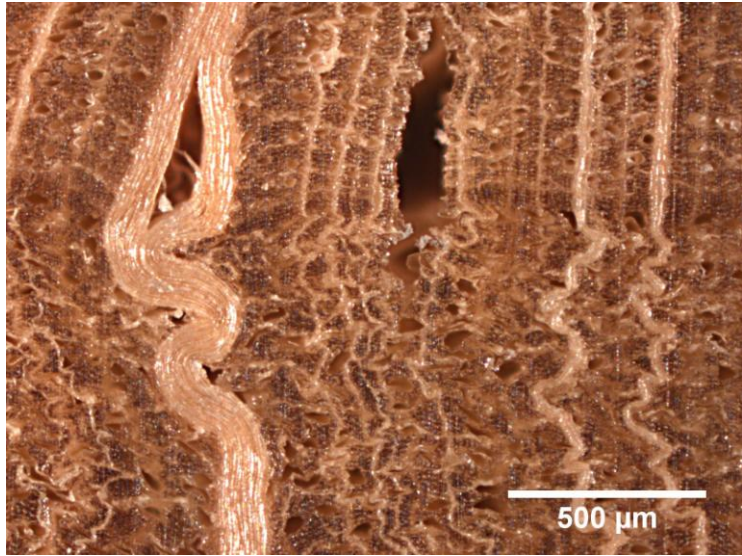

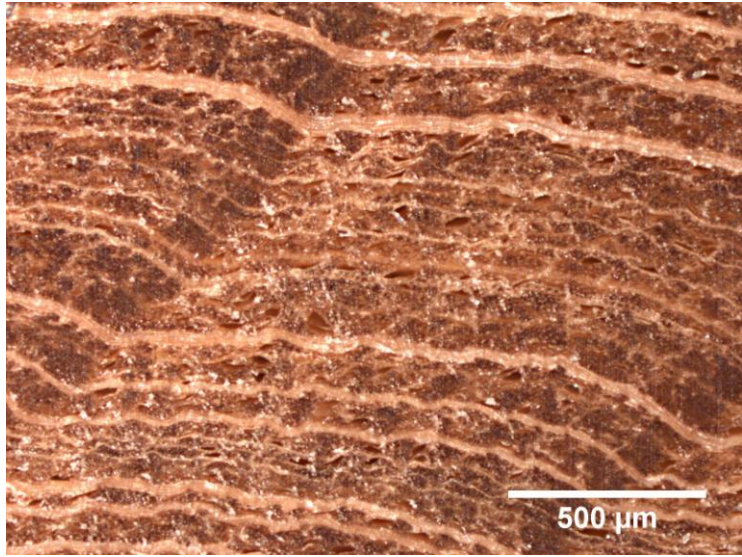

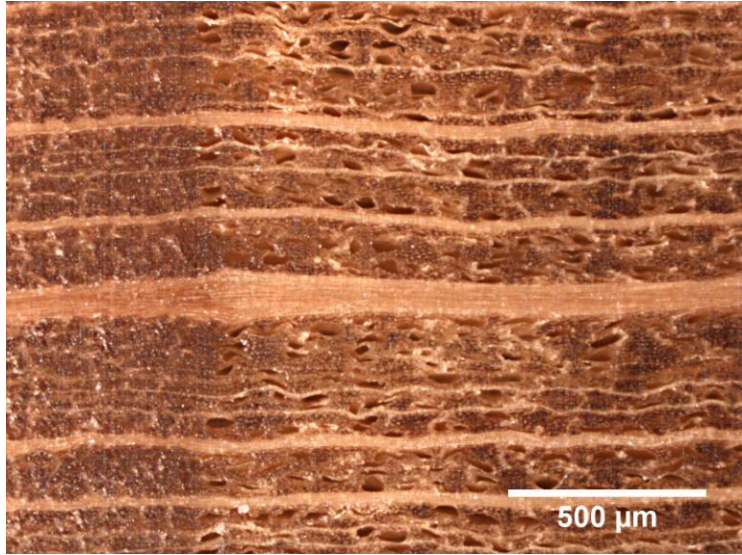


**Obr. 35** Mikroskopický snímek povrchu příčného řezu bukového dřeva – referenční vzorek

Anatomická stavba bukového dřeva a heterogenita v příčném směru má přímý vliv na proces lisování. Následující tabulka (Tab. 7) ukazuje vliv směru lisování na deformaci mikroskopické struktury i celého slisovaného hranolu při stlačení dřeva o 45 %. Při stlačování dřeva v radiálním směru dochází k nerovnoměrnému roztažení celého bloku do šířky. Na mikroskopickém snímku je vidět výrazně zvlněný průběh dřeňových paprsků. V jejich okolí dochází k velkým deformacím buněk v různých směrech. Vyskytují se zde i trhliny v radiálním směru. Všechny lumény cév jsou částečně deformovány.

Při lisování bukového dřeva v tangenciálním směru může dojít k vybočení středové části hranolu na jednu stranu (Tab. 7 dole). Na mikroskopickém snímku je vidět velmi rovnoměrné stlačení dřevní struktury a přímý průběh dřeňových paprsků. Mikrocévy letní části letokruhu jsou již zcela uzavřeny, zatímco větší jarní mikrocévy jsou jen částečně deformovány. Nerovnoměrné rozložení hustoty dřeva zde zůstalo zachováno.

Tab. 7 Příčné řezy slisovaným bukovým dřevem – makroskopické a mikroskopické snímky

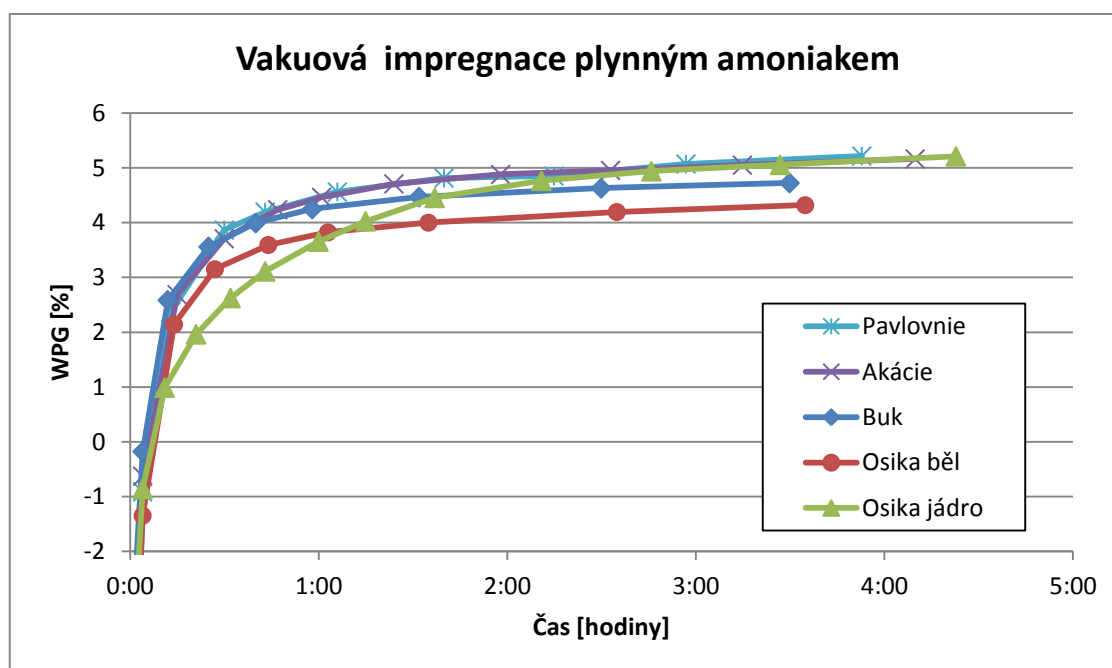
Příčný řez hranolem	Mikroskopický snímek povrchu
<p><b>Radiální směr lisování</b> Odklon letokruhů <math>0^\circ</math></p>  <p>Hustota <math>930 \text{ kg.m}^{-3}</math></p>	
<p><b>Obecný směr lisování</b> Odklon letokruhů <math>75^\circ</math></p>  <p>Hustota <math>1\ 063 \text{ kg.m}^{-3}</math></p>	
<p><b>Tangenciální směr lis.</b> Odklon letokruhů <math>90^\circ</math></p>  <p>Hustota <math>1\ 140 \text{ kg.m}^{-3}</math></p>	



Hranol s odklonem letokruhů 75° si při lisování nejlépe zachoval pravoúhlý tvar (Tab. 7 uprostřed). Mikrocévy se jeví více uzavřené než při tangenciálním lisování, přesto že hustota dřeva je mírně nižší. Dřeňové paprsky opisující stejné křivky ve všech letokruzích svědčí o tom, že více pórovitá část letokruhu byla více stlačena. Lze tedy předpokládat, že rozložení hustoty v rámci jednoho letokruhu je rovnoměrnější než u přírodního dřeva.

### 5.3 Příjem plynného amoniaku v čase

Výsledky příjmu amoniaku v čase při vakuové impregnaci (Obr. 36) ukazují, že vzorky různých dřevin dosáhnou maximálního nasycení za 3 hodiny a množství amoniaku absorbovaného vzorkem (WPG) dosahuje 5 %. Méně propustné jádro osiky přijímá amoniak pozvolna, ale také dosáhne plného nasycení za 3 hodiny.



Obr. 36 Příjem plynného amoniaku (WPG) standardním vzorkem (20×20×30 mm) za normálního tlaku v závislosti na čase

Standardní bukový vzorek o rozměrech 20×20×30 mm absorboval při tomto měření 0,349 gramů amoniaku, což je 4,72 % WPG. Při hustotě plynu 0,7713 kg/m<sup>3</sup> je to 0,27 litrů amoniaku vázaných v jeho dřevní hmotě.

První hodnota každé křivky je okamžik, kdy je z lahve odčerpán vzduch. Proto všechny křivky začínají v záporných hodnotách. Druhá hodnota, která zachycuje okamžik ihned po naplnění lahve amoniakem, je také záporná. Příčinou je skutečnost, že hustota amoniaku je o 40 % nižší než vzduchu. To snižuje výslednou hodnotu WPG asi o 1 %. Dosažený příjem amoniaku bukovým vzorkem je po korekci 5,57 %.

## 5.4 Porovnání plastifikačních metod

Hustota bukového dřeva použitého při porovnávání účinků různých plastifikačních metod byla  $650,78 \text{ kg.m}^{-3}$  při nulové vlhkosti. Byly splněny požadavky na nízkou variabilitu, jak dokládá velmi nízký variační koeficient 0,93 % (Tab. 9). Při 12 % vlhkosti je hustota použitého dřeva  $676 \text{ kg.m}^{-3}$ . Vzorky plastifikované párou dosáhly průměrné vlhkosti 33,28 %. Hodnoty WPG při plastifikaci plynným amoniakem dosáhly v průměru 9,07 %. Při kombinované plastifikaci byl dosažen společný příjem amoniaku a vlhkosti 28,55 % Plastifikační podmínky jednotlivých metod jsou přehledně shrnuty v následující tabulce (Tab. 8). Zjištěné hodnoty byly také statisticky vyhodnoceny (Tab. 9).

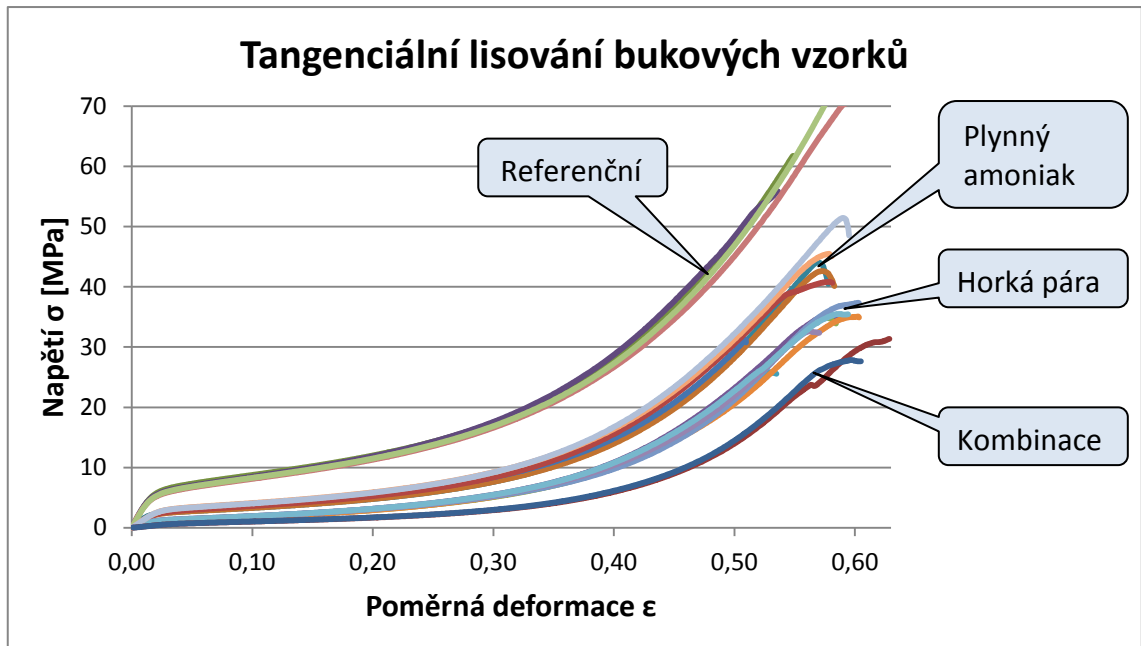
**Tab. 8** Přehled plastifikačních podmínek v průběhu lisování. Hodnota vlhkosti kombinované plastifikace <sup>(1)</sup> zahrnuje příjem amoniaku i vlhkosti.

Úprava	Teplota	Vlhkost	Příjem amoniaku (WPG)
Referenční	24 °C	12,13 %	–
Amoniak	24 °C	12,13 %	9,07 %
Horká pára	100 °C	33,28 %	–
Kombinace	100 °C	28,55 % <sup>(1)</sup>	7,75 %

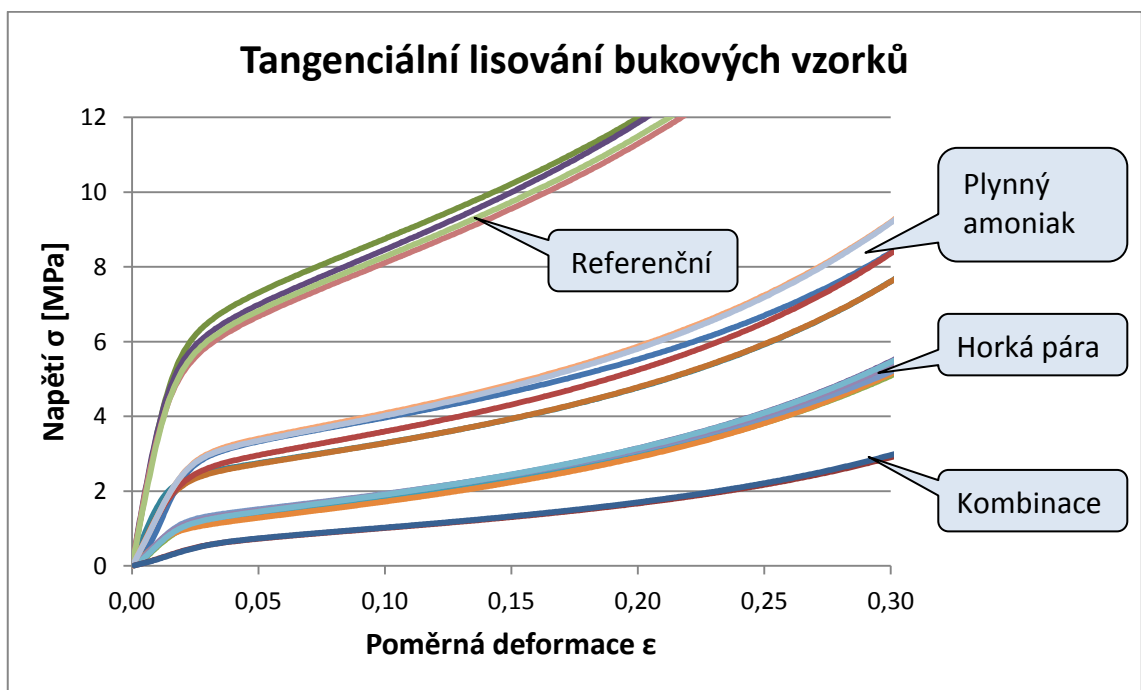
**Tab. 9** Popisná statistika plastifikačních podmínek v průběhu lisování.

	Hustota při 0% vlhkosti [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]	Vlhkost [%] (ref. + $\text{NH}_3$ )	Vlhkost [%] (pařené)	WPG [%] (amoniak)
Průměr	650,78	12,13	33,28	9,07
Směrodatná odchylka	6,035	0,187	0,021	0,014
Variační koeficient [%]	0,93	1,54	6,28	15,31
Minimum	638,97	11,87	30,47	7,31
Maximum	666,74	12,53	36,56	10,81
Počet hodnot	19	12	7	6

Pracovní diagramy lisovaných vzorků naznačují velké rozdíly v plastifikačních účincích jednotlivých metod (Obr. 37). Při detailním pohledu na první polovinu pracovního diagramu (Obr. 38) je tento rozdíl ještě více zřetelný. Plynný amoniak významně snížil lisovací tlak, ale horká pára dosáhla lepších výsledků. Nejlepších plastifikačních účinků bylo dosaženo skombinováním těchto dvou metod.



Obr. 37 Pracovní diagramy tangenciálně lisovaných vzorků plastifikovaných různými metodami



Obr. 38 Detail pracovních diagramů tangenciálně lisovaných vzorků plastifikovaných různými metodami

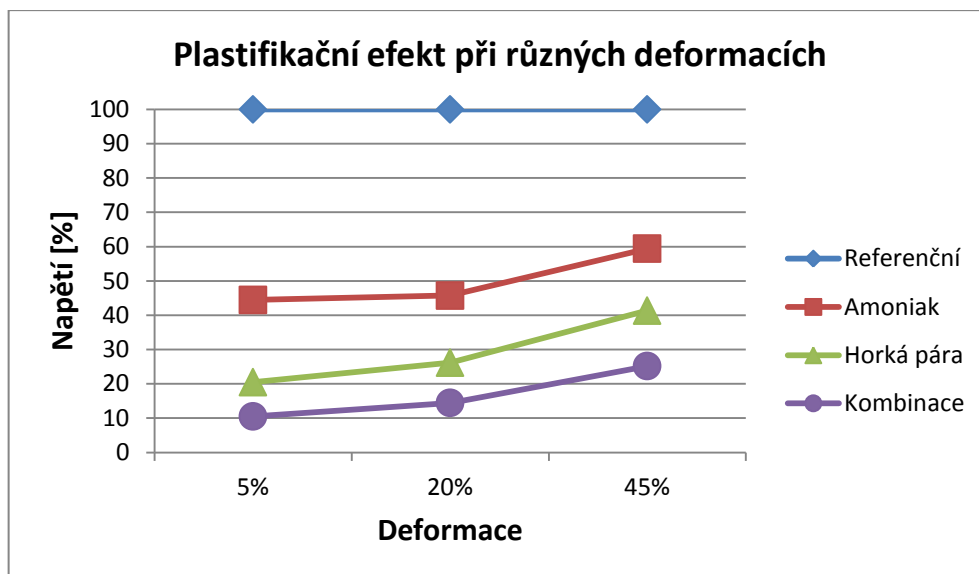
Pracovní diagramy umožňují jednoduché vizuální zhodnocení efektivnosti jednotlivých plastifikačních metod. K přesnému porovnání těchto metod je nutné číselné vyjádření. Proto bylo zjištěno napětí ve třech vybraných bodech plastické deformace (Tab. 10). Deformace 5 % je na začátku konvexní části křivky a deformace 45 % je na jejím konci, ale před viditelnými známkami porušení.

Hodnoty napětí pro zvolené deformace byly zaznamenány a přepočítány na procentuální podíl průměrného napětí referenčních vzorků. Účinky plastifikace se nejvíce projevily při 5% deformaci (Tab. 10). Amoniak snížil lisovací tlak na 44,6 % a horká pára na 20,49 %. Při kombinované plastifikaci dosáhl potřebný lisovací tlak pouze 10,53 %. To je poloviční hodnota v porovnání s účinky horké páry.

**Tab. 10** Plastifikační efekt různých metod při různých deformacích. Průměrné hodnoty napětí jsou vyjádřeny v MPa a také jako procentuální podíl průměrného napětí referenčních vzorků

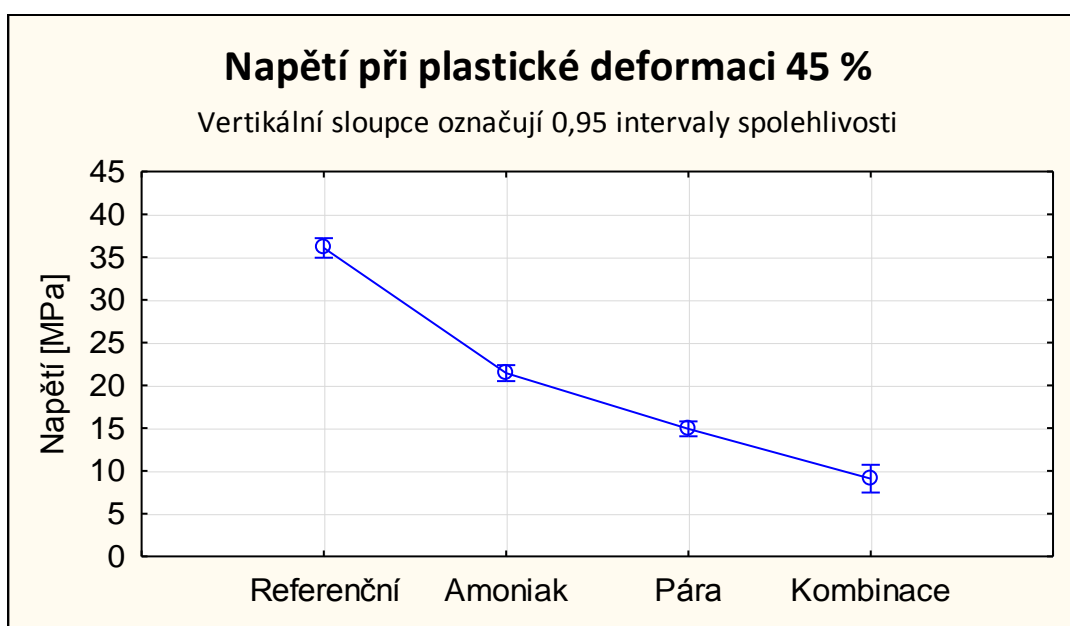
Úprava	Napětí [MPa] při deformaci:			Napětí [%] při deformaci:		
	5 %	20 %	45 %	5 %	20 %	45 %
Referenční	6,94	11,65	36,07	100	100	100
Amoniak	3,09	5,33	21,44	44,46	45,74	59,43
Horká pára	1,42	3,05	14,92	20,49	26,18	41,35
Kombinace	0,73	1,69	9,09	10,53	14,48	25,21

Při deformaci 45 % se plastifikační účinky projevily méně. Tuto skutečnost zachycuje následující graf (Obr. 39), kde mají křivky všech plastifikačních metod rostoucí trend. Pokles lisovacího tlaku na 25,21 % při kombinované plastifikaci je stále výrazně lepší výsledek než 41,35 % pro horkou páru nebo 59,43 % pro plynný amoniak (Tab. 10).



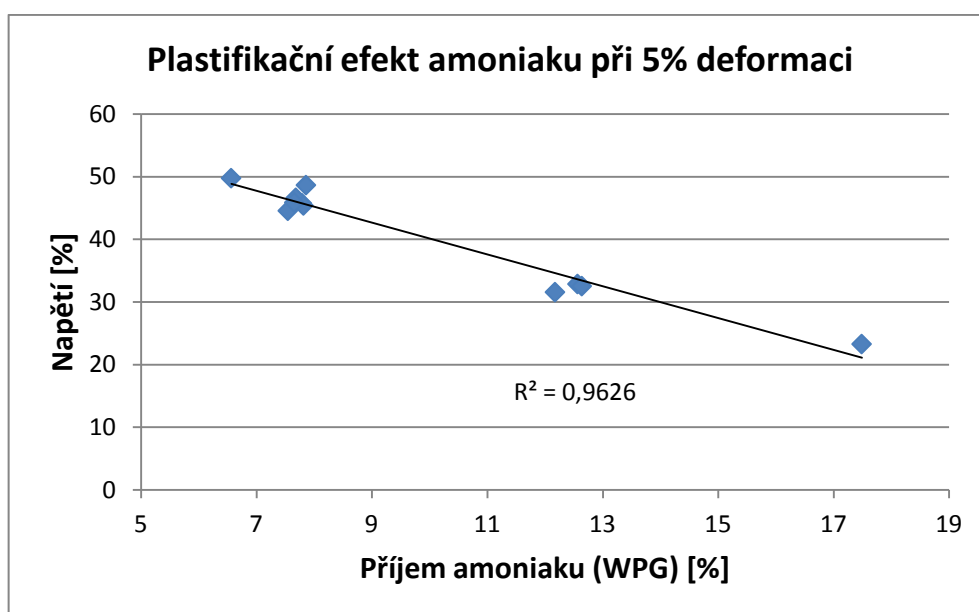
Obr. 39 Plastifikační efekt různých metod při různých deformacích. Průměrné hodnoty napětí jsou vyjádřeny jako procentuální podíl průměrného napětí referenčních vzorků

Pomocí jednofaktorové analýzy variability (ANOVA) byly prokázány statisticky významné rozdíly mezi středními hodnotami napětí zkušebních sad vzorků při deformaci 45 %. Vertikální sloupce na následujícím grafu (Obr. 40), které vyjadřují 95% intervaly spolehlivosti, se svým rozsahem nepřekrývají. Napětí při 45% deformaci tangenciálně lisovaných referenčních vzorků dosáhlo 36,07 MPa. Po kombinované plastifikaci kleslo na 9,09 MPa.



Obr. 40 Porovnání vlivu plastifikační metody na napětí při deformaci zkušební vzorku 45 %, jednofaktorová ANOVA

Plastifikační účinky plynného amoniaku závisí na jeho množství absorbovaného dřevem (WPG) a tato závislost je ve zkoumaném rozsahu lineární (Obr. 41). Podle koeficientu determinace  $R^2$  je tato závislost velká. Regresní model zde vysvětluje více než 96 % variability dat. Příjem amoniaku 6,56 % snížil napětí při 5% deformaci na 49,8 % průměrného napětí referenčních vzorků a při 17,49 % WPG kleslo napětí na 23,3 %. To je téměř úroveň plastifikačních účinků horké páry. Sada vzorků při tomto měření měla průměrnou hustotu v absolutně suchém stavu  $720,06 \text{ kg.m}^{-3}$  při nízké variabilitě dat 0,64 %. Změřené hodnoty WPG v uvedeném rozsahu odpovídají přibližně rozsahu tlaku plynného amoniaku od 0,1 do 0,3 MPa.



**Obr. 41** Vliv příjmu amoniaku (WPG) na plastifikaci dřeva. Hodnoty napětí jsou vyjádřeny jako procentuální podíl průměrného napětí referenčních vzorků.

Při plastifikaci standardních bukových vzorků plynným amoniakem vznikalo značné množství tepla. Maximální dosažená teplota byla  $56,08 \text{ }^\circ\text{C}$  při tlaku 0,2 MPa.



## 6 Diskuze

Diskuze výsledků je členěna na 4 základní podkapitoly podle výzkumného zaměření:

- Vliv odklonu letokruhů na proces lisování dřeva
- Mikroskopická struktura slisovaného dřeva
- Příjem plynného amoniaku v čase
- Porovnání plastifikačních metod

### 6.1 Vliv odklonu letokruhů na proces lisování dřeva

Při lisování masivního dřeva je cílem zlepšit mechanické vlastnosti rovnoměrně v celém průřezu. Proto je důležité, aby bylo dřevo rovnoměrně stlačováno. Těmto požadavkům nejlépe vyhovuje vzorek lisovaný téměř tangenciálně.

Z výsledků vyplývá, že bukové dřevo se nejvíce deformuje v jarní části letokruhu. Zvýšená deformovatelnost může být způsobena cévami, které jsou četnější a větší v jarní části letokruhu (Wagenführ 2000). Při lisování v radiálním směru došlo ke zvýšené deformaci v horní polovině vzorku. Lze to částečně vysvětlovat vyšší pórovitostí, ale zde pravděpodobně ovlivňují výsledek mnohvrstevné dřeňové paprsky. Pevnost bukového dřeva v radiálním směru je vyšší (Požgaj 1993), přesto že v tomto směru se střídají zóny s různou pórovitostí. Nerovnoměrnost radiálního stlačování lze tedy vysvětlit tak, že k porušení dřeňových paprsků došlo nejprve v horní části vzorku.

Hodnoty Poissonova čísla v příčné rovině jsou nejvyšší při radiálním zatížení. To odpovídá údajům v literatuře (Hering et al. 2012). Zjištěná závislost na odklonu letokruhů je lineární, protože to je plynulý přechod mezi dvěma materiálovými konstantami. Změřené hodnoty Poissonova čísla (Tab. 11) jsou nižší, než je uvedeno v literatuře (Hering et al. 2012). Je to pravděpodobně tím, že změnou mikroskopické struktury dřeva během lisování se mění i tyto materiálové konstanty. Nerovnoměrnost deformací může zvyšovat variabilitu naměřených hodnot.

**Tab. 11 Porovnání výsledků Poissonových čísel s literaturou**

Označení	Vlastní výsledky		Hering et al. 2012	
	Průměr	Variační koef.	Průměr	Variační koef.
$\mu_{RT}$	0,361	35,52 %	0,64	6,3 %
$\mu_{TR}$	0,078	45,80 %	0,27	20,3 %

Do výsledků měření je započítána i oblast ovlivněná blízkostí tlačných desek. To může ovlivnit přesnost měření, pokud je cílem zjistit materiálové konstanty (Brabec et al. 2015). V tomto případě je cílem popsat chování celých lisovaných vzorků. Je zřejmé, že při radiálním lisování dochází k většímu rozšíření lisovaného dřeva, což může být nežádoucí. To by bylo možné omezit snížením tloušťky materiálu, protože se více projeví vliv blízkosti tlačných desek.

Z hlediska smykové deformace je nejvhodnější lisovat v tangenciálním směru. Hodnoty jsou nejnižší a pravoúhlý tvar zůstává zachován. Vzorek lisovaný téměř tangenciálně měl také nízké hodnoty smykové deformace. Pravděpodobně je zde vliv dřevných paprsků a s tím související snadnější stlačitelnost bukového dřeva v tangenciálním směru.

Vzorky plastifikované v horké syté páře zvýšily vlhkost o 7,5 % během prvních deseti minut a dále se jejich vlhkost zvyšovala rychlostí 1 % za 15 minut. To nesouhlasí s doporučenými časy. Vaněk (1952) počítá s přírůstkem vlhkosti 1 % za 5 minut. Je možné, že v pařících retortách za vyššího tlaku je nárůst vlhkosti rychlejší. Počáteční vyšší příjem vlhkosti může být způsoben tím, že kromě gradientu vlhkosti zde působí i gradient teploty.

## 6.2 Mikroskopická struktura slisovaného dřeva

Při lisování v radiálním směru dochází k namáhání dřevných paprsků v jejich podélném směru, což se projeví jejich zvlněným průběhem. Dochází k velkým deformacím buněk v blízkosti dřevných paprsků a mohou vznikat trhliny. Tvorbu trhlín lze vysvětlit i jiným způsobem. Při radiálním lisování vzniká tahové napětí v tangenciálním směru a v tomto směru je tahová pevnost bukového dřeva nejnižší (Gandelová et al. 2002).

Při slisování dřeva v tangenciálním směru o 45 % již dochází k uzavření lumenů v letní části letokruhu a cévy jarní části jsou stlačené jen částečně. Letní část letokruhu se již nemůže dále stlačovat, a dochází k jejímu vybočení (Tab. 7 na straně 58). V této fázi již není žádoucí rovnoměrné stlačování. Při mírném odklonu letokruhů od tangenciálního směru se obě části letokruhů mohou stlačovat podle svých možností a pórovitost slisovaného dřeva je rovnoměrnější. Také slisovaný tvar hranolu je více pravoúhlý. Na rozdíl od radiálního lisování jsou všechny anatomické elementy stlačeny v příčném směru.

Výsledky zkoumání mikroskopické struktury lisovaného buku potvrzují výsledky měření deformací pomocí DIC metody. Tangenciální směr lisování je vhodnější než radiální. Tento směr doporučují například Kúdela a Rešetka (2011). Nejlepší výsledky lze dosáhnout při odklonu letokruhů 15° od tangenciálního směru.

### **6.3 Příjem plynného amoniaku v čase**

Cílem tohoto měření bylo stanovit optimální dobu nutnou pro plastifikaci plynným amoniakem. Použitím různých druhů dřev bylo dosaženo velké variability v hustotě i propustnosti. Stanovená doba 3 hodiny může být považována za optimální čas nutný k plastifikaci standardních zkušebních vzorků běžných listnatých dřev. Ke stejnému závěru došel Pandey et al. (1991) když ohýbal různé druhy dřev plastifikované různě dlouhou dobu. Použil při tom větší hranoly, ale plastifikoval je při vyšším tlaku. Doba plastifikace je pravděpodobně ovlivněna reakčním teplem. Během absorpce amoniaku se dřevo ohřívá až o 30 °C (Stojčev 1979), a teplotní gradient brání dostatečnému nasycení dřeva amoniakem. Doba plastifikace může být čas, který je nutný k vychladnutí plastifikovaného dřeva.

### **6.4 Porovnání plastifikačních metod**

Porovnání plastifikačních metod proběhlo na bukových vzorcích s hustotou odpovídající průměrným hodnotám uváděným v literatuře (Požgaj 1993). Variabilita hustoty byla velmi nízká s variačním koeficientem 0,9 %. Rozdíly v plastifikačních účincích různých metod tak mohly být vyhodnoceny i při malém počtu měření.

Vzorky plastifikované horkou sytou párou dosáhly potřebné teploty 100 °C a vlhkosti 33 %. To odpovídá optimálním hodnotám uváděným v literatuře (Kafka 1989, Kúdela 1996). Plastifikace párou se ukázala být lepší než plynným amoniakem, přesto že amoniak je považován za účinnější (Bariska, Schuerch 1977, Kafka 1989, Stojčev 1979). Může to být způsobeno nízkým příjmem amoniaku, který při 0,2 MPa dosáhl průměrné hodnoty 9,07 %. Výsledky ukazují, že s rostoucím příjmem amoniaku lineárně klesá lisovací tlak. Sharma et al. (1988) dosáhli hodnot 10,8–25,5 % při vyšším plastifikačním tlaku 0,5 MPa.

Na výsledky má velký vliv také vlhkost dřeva (Sharma et al. 1988). Ta byla v doporučeném rozsahu, ale při plastifikaci malých vzorků mohlo dojít ke ztrátě vlhkosti. Teplota dřeva se zvyšuje přibližně o 30 °C vlivem reakčního tepla amoniaku (Stojčev 1979). Nejvyšší naměřená teplota byla 56 °C. Velký gradient teploty a nulová vlhkost plynu mohly způsobit velký úbytek vlhkosti a snížení plastifikačního účinku amoniaku.

Při zkombinování obou metod byly dosaženy nejlepší výsledky. To potvrzuje význam vlivu vlhkosti, který uvádějí Sharma et al. (1988). Při plastifikaci párou docházelo k značnému uvolňování plynného amoniaku. Lze tedy předpokládat, že ve dřevě zůstalo minimální množství. Amoniak pravděpodobně usnadnil průnik molekul vody do buněčné stěny, protože má větší schopnost uvolňovat vodíkové vazby (Schuerch 1963).

Pro stanovení optimální kombinace vlhkosti a amoniaku by byl potřeba další výzkum. Problémy se ztrátou vlhkosti mohou být vyřešeny použitím dřeva s vyšší vlhkostí, aby v důsledku zvýšené teploty klesla na optimální hodnotu. Druhou možností je použít podchlazené dřevo. To by mohlo nejen zabránit ztrátě vlhkosti, ale také zkrátit potřebný čas plastifikace.

Při výzkumu bylo pozorováno, že amoniak snadno proniká přes plasty. Plastifikované vzorky lze uchovávat v uzavřeném sáčku jen krátkou dobu. Řádově jsou to minuty až několik hodin podle tloušťky folie. Při vyšším tlaku se to projevuje ještě více. Tenká polyuretanová hadice na rozvod stlačených plynů do 0,11 MPa je schopna udržet amoniak při tlaku nad 0,5 MPa jen krátkodobě. Při vysokém tlaku může amoniak procházet v takovém množství, že celá hadice vydává slabý zvuk připomínající komára. Pro plastifikaci amoniakem při vyšším tlaku je tedy nezbytné používat kovové rozvody.

## 7 Závěr

V první části této diplomové práci je vyhodnocen vliv odklonu letokruhů na proces lisování bukového dřeva (*Fagus sylvatica*) v příčném směru. V druhé části jsou srovnávány plastifikační účinky horké syté páry a plynného amoniaku za zvýšeného tlaku.

Bylo zjištěno, že proces lisování bukového dřeva je významně ovlivněn orientací dřeňových paprsků a letokruhů. Radiálně lisované dřevo je stlačováno nerovnoměrně a více se roztahuje do šířky. Na mikroskopické úrovni je viditelný složitě zakřivený průběh dřeňových paprsků a mohou vznikat trhliny.

Tangenciální lisování je velmi rovnoměrné a lisované dřevo zachovává pravoúhlý tvar. Při vysokém stupni stlačení je nedostatečně zhuštěná jarní část letokruhu ikdyž letní část dosahuje svého maxima. Může dojít vybočení do strany, čímž se poruší pravoúhlý tvar.

Bukové dřevo lze nejlépe stlačovat, pokud je odklon letokruhů  $15^\circ$  od směru lisování (téměř tangenciální). Dřevo si zachovává pravoúhlý tvar, stlačování je nejvíce rovnoměrné, a při vysokém stupni stlačení se různě pórovité části letokruhu mohou stlačit podle svých možností. Výsledný produkt tak může být velice homogenní.

Bylo také zjištěno, že skvrnitý vzor pro potřeby DIC metody je nejlepší nanášet na příčný řez po krátkém napaření dřeva. Nátěrová hmota pokryje pouze povrch, neproniká do dřeva, a příčný řez zůstává pórovitý.

V druhé části této práce byla stanovena optimální doba 3 hodiny pro plastifikaci standardních zkušebních vzorků plynným amoniakem. Napětí při 5% tangenciální deformaci plastifikovaných vzorků je v porovnání s neupraveným dřevem následující: 44,5 % při plastifikaci plynným amoniakem, 20,5 % při plastifikaci horkou sytou párou a 10,5 % při kombinované plastifikaci. Z výsledků vyplývá, že plynný amoniak při tlaku 0,2 MPa je méně účinný než horká sytá pára. Nejlepších plastifikačních účinků bylo dosaženo skombinováním obou metod.

## 8 Summary

In this thesis the influence of growth ring angle on densification process of European beech wood (*Fagus sylvatica*) was evaluated. Two different methods of wood plasticization were compared. Specimens were plasticized by hot steam or gaseous ammonia and then compressed in the transverse direction.

Results show that densification process of European beech wood is significantly influenced by the direction of thick rays and growth rings. Radial compression showed low uniformity in strain. Expansion of a specimen in the direction perpendicular to applied force was the highest. Rays were distorted into complicated shapes and few small cracks were found.

The best direction for densification of European beech wood was nearly tangential (inclined by 15°). Compression was very uniform and the rectangular shape was not distorted. It was possible to compress both earlywood and latewood to their maximum without any problem. The structure and porosity of highly densified product was very uniform.

Compression test of plasticized specimens showed big differences in plasticization methods. Stress at strain of 5% was evaluated and compared with untreated specimen. The percentage values were: 44.5% for ammonia gas, 20.5% for hot saturated steam and 10.5% for combined method. Ammonia plasticization effect at 0.2 MPa gas pressure reduces the compression force significantly and it is sufficient for densification. Compared to hot steam, it was less efficient. The best plasticizing effect was reached by combining these two methods.

## 9 Použitá literatura

**Bach, L., Hastrup, K. 1973.** *Compression densitification of beech wood plasticized with anhydrous ammonia.* *Matériaux et Construction*, 6(2), 137-139.

**Bariska, M., Schuerch, C., 1977.** *Wood Softening and Forming with Ammonia.* *Wood Technology: Chemical Aspects*, Chapter 21, pp 326–347

**Bendywood 2015.** *Bendywood® the first and unique solid wood bendable by hand.* [online] citováno 27. března 2015 Dostupné na World Wide Web: < <http://www.bendywood.info> >

**Brabec, M., Tippner, J., Sebera, V., Milch, J., Rademacher, P. 2015.** *Standard and non-standard deformation behaviour of European beech and Norway spruce during compression.* *Holzforschung*, January 2015

**Correlated Solutions 2013.** *Digital image correlation* [online] citováno 23. března 2015 Dostupné na World Wide Web: < <http://www.correlatedsolutions.com> >

**Compwood 2015.** *Compwood Products Company* [online] citováno 30. března 2015 Dostupné na World Wide Web: < <http://www.compwood-products.com> >

**Český statistický úřad 2015.** *Tab. 09.04 Těžba dřeva v České republice podle druhů dřevin* [online] citováno 18. března 2015 Dostupné na World Wide Web: < [https://www.czso.cz/documents/10180/25385875/13340031+3201814\\_0904.pdf](https://www.czso.cz/documents/10180/25385875/13340031+3201814_0904.pdf) >

**Dömény, J., Koiš, V., Dejmal, A. 2014.** Microwave radiation effect on axial fluid permeability in false heartwood of beech (*Fagus sylvatica* L.). *BioResources*, 9(1), 372-380.

**Gandelová, Libuše, Petr Horáček, Jarmila Šlezingerová 2002.** *Nauka o dřevě.* 2. vyd. / . Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 176 s. ISBN 80-7157-577-1.

**Hering, S., Keunecke, D., Niemz, P. 2012.** *Moisture-dependent orthotropic elasticity of beech wood.* *Wood Science and Technology*, 46(5), 927-938.

**Hung, P. C., Voloshin, A. S. 2003.** *In-plane strain measurement by digital image correlation.* *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 25(3), 215-221.

**Kafka, Emanuel 1989.** *Dřevařská příručka 1.část.* 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury. 483 s. ISBN 80-03-00009-2

**Kamke, F.A., Sizemore, H. 2005.** *Viscoelastic thermal compression of wood.* U.S. Patent No. US2005/0006004A1, Dostupné na World Wide Web:  
<<http://www.freepatentsonline.com/20050006004.pdf>>

**Killmann, W., Koh, M.P. 1988.** *Oil palm stem densification using ammonia treatment: a preliminary study.* Journal of Tropical Forest Science 1(1), 1-10.

**Kúdela, J. 1996.** *Influence of moisture and temperature loading on strength of beech wood loaded in compression.* Drevársky výskum, 41(2), 3-17.

**Kúdela, J., Rešetka, M. 2011.** *Influence of high pressing temperature on dimensional stability of beech wood.* Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Forestry and Wood Technology No 75, 19-25

**Lábský, O., Mahdalík, M. 1972.** *Modifikácia dreva amoniakom, Výzkumná zpráva.* Bratislava: Štátny drevársky výskumný ústav (nepublikováno)

**Lignostone 2015.** *Lignostone® basic products.* [online] citováno 27.března 2015  
Dostupné na World Wide Web: < <http://www.lignostone.com> >

**Mahdalík, M., Rajčan, J., Mlčoušek, M., Lábský, O. 1971.** *Changes of some physical, mechanical, and chemical properties of wood treated with liquid ammonia.* In Journal of Polymer Science Part C: Polymer Symposia (Vol. 36, No. 1, pp. 251-263). Wiley Subscription Services, Inc., A Wiley Company.

**Ministerstvo zemědělství 2014.** *Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2013.* Praha: Ministerstvo zemědělství, 136s. ISBN 978-80-7434-153-3  
Dostupné na World Wide Web:  
< <http://www.uhul.cz/ke-stazeni/informace-o-lese/zelene-zpravy-mze> >

**Morsing, N., Hoffmeyer, P. 1998.** *Densification of Wood.: The influence of hygrothermal treatment on compression of beech perpendicular to grain.* PhD Thesis. Denmark: Technical University of Denmark (DTU)

**Navi, P., Girardet, F. 2000.** *Effects of thermo-hydro-mechanical treatment on the structure and properties of wood.* Holzforschung, 54(3), 287-293.



- Navi, P., Sandberg, D. 2012.** *Thermo-hydro-mechanical wood processing*. Boca Raton: CRC Press, 360 s. ISBN 978-1-4398-6042-7.
- Nečesaný, V. 1958.** *Jádro buku, struktura, vznik a vývoj*. SAV, Bratislava 256s.
- Pandey, C.N., Kanoh, H.C., Mani Ram 1991.** *Trials on bending of vapour phase ammonia plasticized wood II*. Journal Timb. Dev. Assoc. (India) 37(4):5-12.
- Pařil, P., Brabec, M., Maňák, O., Rousek, R., Rademacher, P., Čermák, P., Dejmal, A. 2014.** *Comparison of selected physical and mechanical properties of densified beech wood plasticized by ammonia and saturated steam*. European Journal of Wood and Wood Products, 72(5), 583-591.
- Porter, Terry 2008.** *Wood: identification & use*. Rev. & expanded. Lewes: Guild of Master Craftsman Publications, 287 s. ISBN 978-1-86108-436-1.
- Pollisco, F. S., Skaar, C., Davidson, R. W. 1971.** *Some physical properties of maple treated with ammonia vapor*. Wood science, 4(2), 65-70.
- Pouchanič Jan 2011.** *Porovnání vybraných vlastností bělového dřeva a dřeva nepravého jádra buku*. Bakalářská práce. Brno: Mendelova univerzita, Lesnická a dřevařská fakulta. 62 s.
- Požgaj, Alexander, et al. 1993.** *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 1.vyd. /. Bratislava: Príroda, 485 s. ISBN 80-07-00600-1.
- Puretimber 2015.** *Cold-Bend™ hardwood* [online] citováno 30.března 2015 Dostupné na World Wide Web: < <http://www.puretimber.com/cold-bend-hardwood/> >
- Remy Heinrich 1972.** *Anorganická chemie, I. díl*. 2.vyd. Praha: SNTL, 936 s.
- Schuerch, C. 1963.** *Plasticizing wood with liquid ammonia*. Industrial Engineering Chemistry, 55.
- Schuerch, C., Burdick, M.P., Mahdalik, M. 1966.** *Liquid ammonia-solvent combinations in wood plasticization. Chemical treatments*. Industrial & Engineering Chemistry Product Research and Development, 5(2), 101-105.
- Seborg, R. M., Millett, M. A., Stamm, A. J. 1956.** *Heat-stabilized compressed wood (Staypak)*. FPL, Report, (1580).
- Sharma, S. N., Pandey, C. N., Kanojia, H. C., & Ram, M. 1988.** *Wood bending by vapour phase ammonia plasticization*. Indian Forester, 114(11), 752-760.

**Stamm, A. J., Seborg, R. M. 1960.** *Resin-treated, laminated, compressed wood (compreg)*. Forest Products Laboratory. Report 1381 (reviewed)

**Stojčev A, Kleparník V, Černý R, Valášek V, Chadžiev N 1979.** *Lignamon – zušlechtěné dřevo, výroba, vlastnosti a použití*. Praha: SNTL, 98 s.

**Šlezingerová Jarmila a Gandelová Libuše 1999.** *Stavba dřeva: cvičení*. 1.vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 129 s. ISBN 80-7157-400-7.

**Vaněk Jaroslav 1952.** *Ohýbaný nábytek*. Průmyslové vydavatelství, Praha 110 s.

**Wagenführ, Rudi 2000.** *Holzatlas*. 5. Aufl. /. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 707 s. ISBN 3-446-21390-2.

**Weigl, M., Pöckl, J., Müller, U., Pretzl, H., Grabner, M. 2007.** *UV-resistance of ammonia treated wood*. In 3rd European Conference on Wood Modification. 15th–16th October.

**Wikipedia 2015a.** *Amoniak* [online] citováno 1.dubna 2015 Dostupné na World Wide Web: < <http://cs.wikipedia.org/wiki/Amoniak> >

**Wikipedia 2015b.** *Digital image correlation* [online] citováno 23.března 2015 Dostupné na World Wide Web: < [http://en.wikipedia.org/wiki/Digital\\_image\\_correlation](http://en.wikipedia.org/wiki/Digital_image_correlation) >

**Zajíček Vít 2011.** *Porovnání deformací stanovených metodou konečných prvků a optickým měřicím zařízením*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství. 81 s.

## **Normy**

**ČSN 49 0103:** Dřevo. Zisťovanie vlhkosti pri fyzikálnych a mechanických skúškach (1979)

**ČSN 49 0112:** Dřevo. Tlak naprieč vlákien (1979)

**ČSN 49 0108:** Dřevo. Zisťovanie hustoty (1993)

## 10 Seznam obrázků

Obr. 1	Těžba listnatého dřeva v ČR v roce 2013 (Český statistický úřad 2015).....	11
Obr. 2	Vývoj objemu těžby dřeva v České republice od roku 1990 (Český statistický úřad 2015).....	12
Obr. 3	Diagram pro stanovení potřebné doby paření dřeva (Vaněk 1952).....	16
Obr. 4	Schematické znázornění působení amoniaku na buněčnou stěnu: (1) suchá buňka před plastifikací, (2) první fáze adsorpce, lumen se zmenšuje, (3) kompletně nabobtnalá buňka, (4) první fáze desorpce,(5) vysušená buňka se zmenšeným průměrem (Pollisco et al. 1971) .....	18
Obr. 5	Fotografie středně tmavého lignamonu vyrobeného z bukového dřeva.....	22
Obr. 6	Princip sledování polohy bodu na tělese během deformace (Correlated Solutions 2013).....	25
Obr. 7	Polotovar na výrobu sady vzorků s různým odklonem letokruhů .....	27
Obr. 8	Zhotovená sada zkušebních vzorků s různým odklonem letokruhů.....	27
Obr. 9	Stereomikroskop Olympus SZH10 ve výzkumném centru Thünen-institut für Holzforschung v Hamburku .....	28
Obr. 10	Vzorky slisovaného bukového dřeva připravené na snímání mikroskopické struktury.....	31
Obr. 11	Detail sestavy na impregnaci dvou vzorků plynným amoniakem .....	33
Obr. 12	Zazátkovaná lahev před vážením (vlevo) a vážení na laboratorní váze (vpravo) .....	34
Obr. 13	Celkový pohled na pracoviště s lahvemi, zásobním vakem, vývěvou a počítačem.....	34
Obr. 14	Nákres dělení hranolu na vzorky pro jednotlivé úpravy – referenční (Ref.), plastifikace amoniakem (NH <sub>3</sub> ) a plastifikace horkou párou (H <sub>2</sub> O).....	35
Obr. 15	Zvlhčování zkušebních vzorků v exsikátoru s destilovanou vodou .....	36
Obr. 16	Pracoviště pro plastifikaci vzorků horkou párou, měření a vážení vzorků, ohřev hliníkových bloků a přípravu souboru pro měření ve zkušebním stroji Zwick Z050 .....	38

Obr. 17 Lisování vzorku plastifikovaného horkou párou ve zkušebním stroji Zwick Z050. Na fotografii je zachycen držák, který kromě přenášení vzorku s horkými hliníkovými bloky slouží také k vlhkostní a tepelné izolaci celého souboru.....	39
Obr. 18 Prototyp jednoduchého impregnačního vaku, který byl vyvinut pro vakuovou impregnaci vzorků plynným amoniakem. Na fotografii je zachycena fáze odsávání vzduchu vývěvou. Tato technologie impregnace nebyla využita k plastifikaci vzorků pro potřeby zde prezentovaného výzkumu.....	40
Obr. 19 Laboratorní hadicový autokláv pro vakuovo-tlakovou impregnaci vzorků plynným amoniakem. Základem je na plocho svinovatelná hadice MERCURIO M o průměru 45 mm.....	40
Obr. 20 Ocelové svorky pro uzavření konců hadicového autoklávu. Díly nalevo slouží k trvalému uzavření konce s upevněním přívodní hadičky. Napravo jsou díly odnímatelné svorky.....	41
Obr. 21 Pracoviště pro impregnaci dřeva amoniakem vybavené vývěvou, vahou, tlakovou lahví (vpravo) a digestoří s hadicovým autoklávem (vlevo). Na stole leží také ochranná maska.....	42
Obr. 22 Vkládání vzorků do hadicového autoklávu .....	43
Obr. 23 Odsávání vzduchu z hadicového autoklávu.....	43
Obr. 24 Impregnace vzorků plynným amoniakem při tlaku 0,2 MPa s využitím hadicového autoklávu a skleněných laboratorních lahví.....	44
Obr. 25 Lisování bukového vzorku plastifikovaného amoniakem na zkušebním stroji Zwick Z050 .....	45
Obr. 26 Příčné řezy zkušebních vzorků s různým odklonem letokruhů a rozložení poměrné deformace ve směru zatížení $\epsilon_{yy}$ . Vzorky jsou stlačeny o 26 %.....	50
Obr. 27 Rozložení poměrné deformace ve směru zatížení $\epsilon_{yy}$ . Vzorek je radiálně stlačený o 26 %.....	50
Obr. 28 Variabilita poměrné deformace ve směru síly $\epsilon_{yy}$ změřená pomocí digitální korelace obrazu.....	51
Obr. 29 Příčné řezy zkušebních vzorků s různým odklonem letokruhů a rozložení Poissonova čísla $\mu_{yx}$ (poměru poměrných deformací) na příčných řezech. Vzorky jsou stlačeny o 26 %.....	52

Obr. 30 Rozložení Poissonova čísla $\mu_{yx}$ na příčném řezu. Vzorek je radiálně stlačený o 26 %.....	52
Obr. 31 Závislost Poissonova čísla na odklonu letokruhů. Body představují průměrné hodnoty a délka úseček (vousů) vyjadřuje směrodatnou odchylku. Odklon 0° je radiální směr lisování. ....	53
Obr. 32 Příčné řezy zkušebních vzorků s různým odklonem letokruhů a rozložení smykových deformací $\varepsilon_{xy}$ na příčných řezech. Vzorky jsou stlačeny v příčném směru o 26 %. Spodní řada znázorňuje rozložení kladných (modrá) a záporných (červená) smykových deformací.....	54
Obr. 33 Rozložení poměrné smykové deformace $\varepsilon_{xy}$ na příčném řezu radiálně stlačeného vzorku .....	54
Obr. 34 Průměrné hodnoty poměrné smykové deformace $\varepsilon_{xy}$ při různém odklonu letokruhů. Odklon 0° označuje radiálně slisovaný vzorek.....	56
Obr. 35 Mikroskopický snímek povrchu příčného řezu bukového dřeva – referenční vzorek .....	57
Obr. 36 Příjem plynného amoniaku (WPG) standardním vzorkem (20×20×30 mm) za normálního tlaku v závislosti na čase .....	59
Obr. 37 Pracovní diagramy tangenciálně lisovaných vzorků plastifikovaných různými metodami.....	61
Obr. 38 Detail pracovních diagramů tangenciálně lisovaných vzorků plastifikovaných různými metodami .....	61
Obr. 39 Plastifikační efekt různých metod při různých deformacích. Průměrné hodnoty napětí jsou vyjádřeny jako procentuální podíl průměrného napětí referenčních vzorků.....	63
Obr. 40 Porovnání vlivu plastifikační metody na napětí při deformaci zkušebního vzorku 45 %, jednofaktorová ANOVA.....	63
Obr. 41 Vliv příjmu amoniaku (WPG) na plastifikaci dřeva. Hodnoty napětí jsou vyjádřeny jako procentuální podíl průměrného napětí referenčních vzorků.....	64

## 11 Seznam tabulek

Tab. 1	Základní fyzikální a mechanické vlastnosti bukového dřeva podle Požgaje (1993) .....	13
Tab. 2	Mikroskopické snímky bílé barvy nanášené na bukové vzorky za různých podmínek .....	48
Tab. 3	Popisná statistika poměrné deformace ve směru zatížení $\varepsilon_{yy}$ pro zkušební tělesa s různým odklonem letokruhů změřené pomocí digitální korelace obrazu	51
Tab. 4	Popisná statistika Poissonova čísla pro příčně stlačené vzorky s různým odklonem letokruhů .....	53
Tab. 5	Popisná statistika kladné poměrné smykové deformace pro příčně stlačené vzorky s různým odklonem letokruhů. Odklon $0^\circ$ je radiální směr lisování .....	55
Tab. 6	Popisná statistika záporné poměrné smykové deformace pro příčně stlačené vzorky s různým odklonem letokruhů. Odklon $0^\circ$ je radiální směr lisování .....	55
Tab. 7	Příčné řezy slisovaným bukovým dřevem – makroskopické a mikroskopické snímky .....	58
Tab. 8	Přehled plastifikačních podmínek v průběhu lisování. Hodnota vlhkosti kombinované plastifikace <sup>(1)</sup> zahrnuje příjem amoniaku i vlhkosti .....	60
Tab. 9	Popisná statistika plastifikačních podmínek v průběhu lisování .....	60
Tab. 10	Plastifikační efekt různých metod při různých deformacích. Průměrné hodnoty napětí jsou vyjádřeny v MPa a také jako procentuální podíl průměrného napětí referenčních vzorků .....	62
Tab. 11	Porovnání výsledků Poissonových čísel s literaturou .....	66