

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE**

**Fakulta lesnická a dřevařská**

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

**VLIV ŘEZÁNÍ LASEROVÝM PAPERSEM NA ZMĚNU  
BARVY A LESKU ŘEZANÝCH PLOCH**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Autor: Bc. Veronika Čiháková, DiS.

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Sedlecký, Ph.D.

Konzultant práce: doc. Ing. Milan Gaff, Ph.D.



Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Vliv řezání laserovým paprskem na změnu barvy a lesku řezaných ploch** vypracovala samostatně pod vedením Ing. Miroslava Sedleckého, Ph.D. a použila jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

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

V Praze dne 20. 4. 2019

.....

podpis

### **Poděkování**

Touto formou bych chtěla poděkovat panu Ing. Miroslavu Sedleckému, Ph.D. za odbornou pomoc při vypracování mé práce, cenné rady a připomínky. Dále bych chtěla poděkovat všem, kteří mi jakýmkoliv způsobem pomohli dokončit tuto diplomovou práci. A v neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině a přátelům za podporu, kterou mi poskytli během mého studia.

## **Abstrakt**

Laserová technologie, respektive její využití k řezání zažívá v posledních padesáti letech obrovský boom. V návaznosti na to vznikla tato diplomová práce, kdy zejména její praktická část, je součástí rozsáhlého výzkumu, který je reakcí na stále větší poptávku po zavedení technologie řezání laserem do dřevozpracujícího průmyslu. Specifikem této metody obrábění dřeva je výrazná změna barvy řezané plochy, a proto z důvodu praktické využitelnosti výsledků práce byla zvolena za sledovanou charakteristiku. Z dalších možných vlastností byl jako druhý zástupce vybrán lesk. Jako referenční materiál byly použity výřezy z dubového řeziva pomocí okružní pily, která je typickým zástupcem konvenčních metod obrábění. Práce si klade za cíl posouzení vlivu použitého stroje na změnu barvy a lesku řezaných ploch, a to v návaznosti na proměnnou, kterou je počáteční vlhkost. Provedená měření potvrdila hypotézu, že počáteční vlhkost (8% a 30%) je významným faktorem změny barvy a lesku dřeva při jeho řezání laserem. Na základě provedených analýz byla posouzena opodstatněnost použití laseru k obrábění masivního tvrdého dřeva v praxi.

## **Klíčová slova**

Laserový paprsek; barva; lesk; vlhkost materiálu

## **Abstract**

The last fifty years laser technology mainly its use for cutting is going through a huge boom. This thesis is a kind of reaction to this fact especially when it comes to its practical section which is a part of a large-scale research that is responding to the increasing demand for the introduction of laser cutting technology into the woodworking industry. A significant change in the colour of cut surfaces is a typical feature of this method in woodworking industry. Because of the practical usability of the results of the work, colour was chosen for the monitored characteristic. Of the other possible features, a gloss was selected as the second representative. Cutouts of oak lumber made by a circular saw were used as a reference material. Circular saw was chosen as a representative of conventional machining methods. The aim of the thesis is to assess the influence of the used machine on the change of colour and gloss of the cut surfaces, following the variable which is the initial humidity. The measurements confirmed the hypothesis that the initial humidity (8% and 30%) is a significant factor in the change of colour and gloss of the wood when it is laser-cut. Based on the analyses the use of laser for the machining of solid hardwood in practice was assessed.

## **Key words**

Laser beam, colour, gloss, moisture content of the wood

# Obsah

<b>Obsah .....</b>	<b>7</b>
<b>Seznam ilustrací .....</b>	<b>9</b>
<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>11</b>
<b>Seznam zkratk .....</b>	<b>12</b>
<b>1 Úvod.....</b>	<b>13</b>
<b>2 Cíle práce .....</b>	<b>14</b>
<b>3 Rozbor problematiky .....</b>	<b>15</b>
3.1 Dubové dřevo .....	16
3.1.1 Dubové dřevo a jeho struktura .....	17
3.1.2 Dubové dřevo a jeho fyzikální vlastnosti.....	20
3.1.3 Dubové dřevo a jeho mechanické vlastnosti.....	23
3.2 Řezání dřeva kotoučovou pilou .....	25
3.2.1 Historický vývoj kotoučové pily.....	25
3.2.2 Technologie kotoučové pily.....	26
3.2.3 Princip řezání kotoučovou pilou .....	27
3.2.4 Výzkumy v oblasti řezání kotoučovou pilou .....	28
3.3 Řezání dřeva laserem.....	29
3.3.1 Historický vývoj laseru .....	30
3.3.2 Technologie laseru .....	31
3.3.3 Princip řezání laserem.....	34
3.3.4 Výzkumy v oblasti řezání laserem.....	37
3.4 Měření barvy .....	37
3.4.1 Teorie barvy .....	38
3.4.2 Způsoby měření barvy .....	40
3.4.3 Výzkumy v oblasti měření barvy .....	41
3.5 Měření lesku .....	42
3.5.1 Teorie lesku.....	42
3.5.2 Způsoby měření lesku .....	42
3.5.3 Výzkumy v oblasti měření lesku.....	44
<b>4 Metodika práce.....</b>	<b>45</b>
4.1 Použitý materiál.....	46
4.2 Strojní vybavení.....	46

4.2.1	Formátovací kotoučová pila.....	46
4.2.2	Laser.....	47
4.3	Přístrojové vybavení.....	48
4.3.1	Spektrofotometr .....	48
4.3.2	Leskoměr.....	49
4.4	Softwarové vybavení .....	49
4.5	Příprava zkušebních vzorků .....	50
4.5.1	Vzorky řezané laserem.....	51
4.5.2	Vzorky řezané kotoučovou pilou .....	51
4.6	Zjištění hustoty a vlhkosti vzorků .....	52
4.6.1	Zjištění hustoty.....	52
4.6.2	Zjištění vlhkosti .....	53
4.7	Metodika měření barvy řezaných ploch vzorků .....	53
4.8	Metodika měření lesku řezaných ploch vzorků.....	55
4.9	Zpracování dat .....	56
<b>5</b>	<b>Výsledky práce a diskuse.....</b>	<b>58</b>
5.1	Barva řezaných ploch .....	59
5.2	Lesk řezaných ploch.....	65
<b>6</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>72</b>
6.1	Přínos pro vědu.....	72
6.2	Přínos pro praxi .....	73
<b>7</b>	<b>Seznam použité literatury.....</b>	<b>74</b>
<b>8</b>	<b>Seznam příloh .....</b>	<b>78</b>



---

## Seznam ilustrací

Obr. 1 Příčný a podélný řez dubového dřeva ( <a href="http://www.lesy.cz">www.lesy.cz</a> , 2019) .....	17
Obr. 2 Srovnání mikroskopické stavby dřevin (Zhu et al., 2017) .....	18
Obr. 3 Mikroskopická stavba listnatých dřevin (Požgaj, 1993) .....	19
Obr. 4 Schéma formátovací kotoučové pily (Dvořák, 2013).....	27
Obr. 5 Schéma silového zatížení obráběného materiálu při řezání kotoučovou pilou (Svoren, 2002) .....	28
Obr. 6 Theodore Maiman a jeho vynález laser ( <a href="http://www.wired.com">www.wired.com</a> , 2019).....	31
Obr. 7 Schéma Nd:YAG laseru (Deepa et al., 2016).....	32
Obr. 8 Schéma CO <sub>2</sub> laseru ( <a href="http://www.comsol.com">www.comsol.com</a> , 2019) .....	33
Obr. 9 Schéma práce laseru (Badoniya, 2018) .....	34
Obr. 10 Barevné spektrum ( <a href="http://www.ox.ac.uk">www.ox.ac.uk</a> , 2019) .....	38
Obr. 11 Srovnání barev světelných (RGB) a pigmentových (CMYK) ( <a href="http://www.creativepro.com">www.creativepro.com</a> , 2019) .....	39
Obr. 12 Prostorové schéma soustavy CIE L*a*b* (Li et al., 2005) .....	40
Obr. 13 Princip fungování spektrofotometru (Panák, 2015) .....	40
Obr. 14 Dráha svazků paprsků v leskoměru (ČSN EN ISO 2813, 2016).....	43
Obr. 15 Úhly měření lesku.....	43
Obr. 16 Kategorizace souborů zkušebních těles .....	45
Obr. 17 Formátovací kotoučová pila Class si 300 (Panas, 2019).....	46
Obr. 18 Laser BLT WoodCut (Biatec Laser Technology, 2019) .....	47
Obr. 19 Spektrofotometr Konica Minolta CM-600d (Konica Minolta, 2019) .....	48
Obr. 20 Leskoměr KSJ MG268-F2 ( <a href="http://www.calright.com">www.calright.com</a> , 2019) .....	49
Obr. 21 Dvě sady vzorků (vlevo 8% vlhkost, vpravo 30% vlhkost) .....	50
Obr. 22 Výroba referenčních vzorků na kotoučové formátovací pile .....	51
Obr. 23 Zjišťování hustoty a vlhkosti vzorků v laboratoři .....	52
Obr. 24 Měření barvy vzorků v laboratoři.....	53
Obr. 25 Schématické znázornění měření barvy (vlevo zkušební vzorek, vpravo referenční vzorek) .....	54
Obr. 26 Měření lesku vzorků v laboratoři.....	55
Obr. 27 Schématické znázornění měření lesku (vlevo zkušební vzorek, vpravo referenční vzorek) .....	56
Obr. 28 Graf závislosti hodnoty L* na typu vzorku .....	59
Obr. 29 Graf závislosti hodnoty a* na typu vzorku .....	60
Obr. 30 Graf závislosti hodnoty b* na typu vzorku.....	61

---

Obr. 31 Graf závislosti hodnoty $\Delta E$ na typu vzorku.....	62
Obr. 32 Graf závislosti lesku na typu řezání.....	65
Obr. 33 Graf závislosti lesku na úhlu měření .....	66
Obr. 34 Graf závislosti lesku na počáteční vlhkosti .....	67
Obr. 35 Graf závislosti lesku na počáteční vlhkosti a úhlu měření .....	68

---

## Seznam tabulek

Tab. 1 Průměrné hodnoty fyzikálních a mechanických vlastností vybraných druhů dubu (Santos et al., 2012) .....	24
Tab. 2 Parametry formátovací kotoučové pily Class si 300 (Itálie) .....	46
Tab. 3 Parametry laserové výrobní linky BLT WoodCut (Slovensko) .....	47
Tab. 4 Parametry spektrofotometru Konica Minolta CM-600d (USA).....	48
Tab. 5 Parametry leskoměru KSJ MG268-F2 (Čína) .....	49
Tab. 6 Vyhodnocení testovaných faktorů na základě průměrné hodnoty „P“ (Gaff a Gáborík, 2009) .....	57
Tab. 7 Vliv typu vzorku na hodnotu $L^*$ .....	59
Tab. 8 Vliv typu vzorku na hodnotě $a^*$ .....	60
Tab. 9 Vliv typu vzorku na hodnotě $b^*$ .....	61
Tab. 10 Vliv typu vzorku na hodnotě $\Delta E$ .....	62
Tab. 11 Duncanův test pro závislost hodnoty $L^*$ na typu vzorku .....	63
Tab. 12 Duncanův test pro závislost hodnoty $a^*$ na typu vzorku .....	63
Tab. 13 Duncanův test pro závislost hodnoty $b^*$ na typu vzorku.....	63
Tab. 14 Duncanův test pro závislost hodnoty $\Delta E$ na typu vzorku.....	63
Tab. 15 Hodnocení změny barvy (Buchelt a Wagenführ, 2007) .....	64
Tab. 16 Vliv typu řezání na lesk .....	65
Tab. 17 Vliv úhlu měření na lesk.....	66
Tab. 18 Vliv počáteční vlhkosti na lesk.....	67
Tab. 19 Vliv počáteční vlhkosti a úhlu měření na lesk.....	69
Tab. 20 Duncanův test pro závislost lesku na typu řezání.....	70
Tab. 21 Duncanův test pro závislost lesku na úhlu.....	70
Tab. 22 Duncanův test pro závislost lesku na vlhkosti.....	70
Tab. 23 Duncanův test pro závislost lesku na typu řezání, vlhkosti a úhlu .....	71

---

## Seznam zkratek

<b>ANOVA</b>	Analysis of variance (analýza rozptylu)
<b>BNV</b>	Bod nasycení vláken
<b>CIE</b>	Commission Internationale de l'éclairage (mezinárodní komise pro osvětlování)
<b>CNC</b>	Computer Numerical Control (počítačem řízený obráběcí stroj)
<b>CIE L*a*b*</b>	Základní barevný prostor pro správu barev
<b>ČSN</b>	Česká státní norma
<b>EN</b>	Evropská norma
<b><i>et al.</i></b>	Et alii (a kolektiv)
<b>GU</b>	Gloss units (jednotka lesku)
<b>ISO</b>	Normy mezinárodní organizace pro normalizaci
<b>LASER</b>	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (zesilování světla stimulovanou emisí záření)
<b>LVL</b>	Laminated veneer lumber (lepené lamelové dřevo)
<b>Nd:YAG</b>	Neodymový laser s krystalem yttrium aluminium granátu
<b>SEM</b>	Standard Error of Mean (střední chyba průměru)

---

# 1 Úvod

S ohledem na skutečnost, že součástí mého zaměstnání je projektování především nábytku ze dřeva, tak se o otázky související se dřevem ráda zabývám. Proto jsem také přijala nabídku na účast ve větším projektu a rozhodla se svojí prací přispět k problematice řezání dřeva laserem.

Mnou prováděný výzkum je součástí v současné době probíhajícího rozsáhlého výzkumu týkajícího se komparace výřezů vytvořených na laserové výrobní lince a těch, které byly zhotoveny konvenční metodou obrábění – zde pomocí kotoučové pily. Tato výrobní linka přináší do odvětví řezání dřeva v dřevozpracujícím průmyslu významný pokrok, a to především proto, že přichází s možností řezání i mokrého řeziva – až 80%. Současně si klade za cíl nabídnout zpracovatelům daleko vyšší kvalitu řezaného povrchu, oproti standardně používaným strojům ([www.lesprom.com](http://www.lesprom.com), 2019). V návaznosti na toto jsou součástí celku i dílčí výzkumy kontaktního úhlu řezaných ploch, aby mohlo být posouzeno smáčení a samozřejmě také analýza kvality povrchu se zaměřením na drsnost a odklon paprsku.

Dílčí otázky, které by měly přispět k objasnění případných komplexních výhod laseru oproti klasickému zpracování dřeva: Má vliv stroj na změnu barvy a lesku? Má počáteční vlhkost dřeva u laseru vliv na změnu barvy a lesku?

Cíle mé práce, jsou v podstatě dílčími cíli a jsou v souladu s výzkumem týkajícího se komparace výřezů vytvořených na laserové výrobní lince. Stanovení cílů a pracovních hypotéz je věnována následující část.

---

## 2 Cíle práce

Hlavním cílem práce je experimentální srovnání účinku řezání dřeva pomocí laseru z hlediska změny barvy a lesku povrchu řezané plochy.

Na základě zjištěných výsledků měření bude posuzována i závislost mezi následujícími proměnnými faktory:

1. Počáteční vlhkost při řezání,
2. Použitý stroj k řezání,

a to v návaznosti na sledované charakteristiky, kterými jsou:

1. Změna barvy řezané plochy,
2. Změna lesku řezané plochy.

V další fázi budou tyto zjištěné výsledky porovnány s naměřenými hodnotami u ploch řezaných pomocí okružní pily.

Cílem provedené komparace je zkoumání změny barvy a lesku řezaných ploch dubového řeziva při řezání laserovým paprskem oproti ploše řezané pomocí okružní pily, kdy základním proměnným faktorem bude (jak již výše uvedeno) počáteční vlhkost řezaného materiálu.

---

### 3 Rozbor problematiky

Dřevo, jako takové, je neodmyslitelně spjata s historií lidstva a již od nepaměti nás doprovází v naší cestě technologického pokroku. Říká se, že nejlepším přítelem člověka je pes, ale pokud bychom tuto úvahu o prospěšnosti člověku rozšířily i do oblasti neživé přírody, dřevo by v tomto pomyslném žebříčku zcela jistě skončilo na předních příčkách. Vždyť právě dřevo stálo po boku člověka během většiny významných milníků jeho historie. Vedle kamene tu bylo při zrodu prvních nástrojů, které kdy člověk sestrojil a začal používat, uplatňovalo se při prvních architektonických výtvořech, které kdy lidem poskytovaly útočiště, a bylo významným médiem pro počátky používání ohně, k čemuž patří i jeho neodmyslitelná role v počátcích tepelné úpravy pokrmů. Za tuto dlouhou společnou historii si lidstvo vytvořilo ke dřevu velmi úzký vztah, což je jistě jedním z důvodů, proč se v dnešní době projevuje stále stoupající oblibou tohoto materiálu.

Ale jaké jsou racionální důvody obliby tohoto materiálu? Je to především kombinace všech jeho vlastností spolu s jeho dobrou dostupností. Ve zkratce se jedná o přírodní obnovitelný materiál, který vyniká zejména výbornou opracovatelností i pružností, zároveň je ale i pevný a houževnatý a v neposlední řadě lze i uvést, že pozitivně působí na lidskou psychiku. Existují samozřejmě i určité nedokonalosti, se kterými se musíme vypořádat, aby nám dřevo dobře sloužilo. Za zmínku stojí například hydrofilnost, anizotropie a biodegradace. A právě proto je důležité dřevo poznat ze všech stran, abychom svou tvorbou vyzdvihli jeho přednosti a vliv jeho slabších stránek ponížili na možné minimum.

Zpracování dřeva je dlouholetou vědní disciplínou, která si klade za cíl nám na otázky, týkající se správného opracování a používání dřeva, odpovědět, a i přes to, že je historie užívání dřeva tak dlouhá, stále přicházíme na nové postupy, vynalézáme nové technologie a hledáme nové způsoby jeho využití. Tyto je třeba následně podrobit dalšímu zkoumání a přehodnocování, abychom se mohli posunout o další kus dál.

S rozvojem technologií se výhradně ruční zpracování dřeva razantně proměnilo a hojně se pro tyto účely začaly využívat stroje. Nejprve jen ty malé ruční, později větší a stále více samostatně pracující obráběcí centra, která jsou dnes již běžně schopna pracovat bez fyzické lidské práce a s nadsázkou řečeno potřebují pouze počítač s vhodným softwarem. Nejmodernějším způsobem opracování dřeva jsou dnes bezkontaktní metody, které využívají jiné druhy energie, než jsou uplatňovány při klasickém řezání. Jedná se především o řezání laserem, plasmou a vodním paprskem.

---

### 3.1 Dubové dřevo

Dub je listnatá kruhovitě pórovitá dřevina, která je tolik typická svou výraznou kresbou a téměř každý, kdy je možno říct že i laik, jej od ostatních dřevin na první pohled rozezná. Je typickou dřevinou mírného pásma severní polokoule, kde můžeme nalézt kolem 450 druhů (Slavík, 1990). Na území naší republiky je jeho dřevo z historického pohledu jedním z nejžádanějších a nejceněnějších vůbec, přesněji hlavně dřevo dubu letního (*Quercus robur* L.) a dubu zimního (*Quercus petraea* Matt.).

Za svoji oblibu dubové dřevo vděčí především svým kvalitám, jejichž kombinace z něj dělá materiál s širokými možnostmi využití. Jedná se sice o poměrně drahý, avšak krásný a trvanlivý materiál, který vyniká výbornými fyzickými a mechanickými vlastnostmi. Uplatnění nachází nejen ve stavebnictví, ale rovněž i v nábytkářství, kdy se také výborně osvědčilo dřevo některých druhů dubu při použití v exteriéru (Santos, 2012). Díky svému chemickému složení je využíváno i pro potřeby koželužského průmyslu nebo v bednářství, a to například pro zrání vína a Brandy.

Z tohoto výčtu je dobře patrné, že kromě jeho výborné opracovatelnosti zde musí hrát roli ještě jeho další přednosti. Za zmínku stojí především trvanlivost a odolnost vůči změnám vlhkosti. Jistě je třeba i dodat, že dub si oblibu získal i díky svému vzhledu, který je jen těžko zaměnitelný s ostatními dřevinami. Má zlatavě medovou barvu, výraznou kresbu a na všech řezech jsou dobře patrné dřevné paprsky.

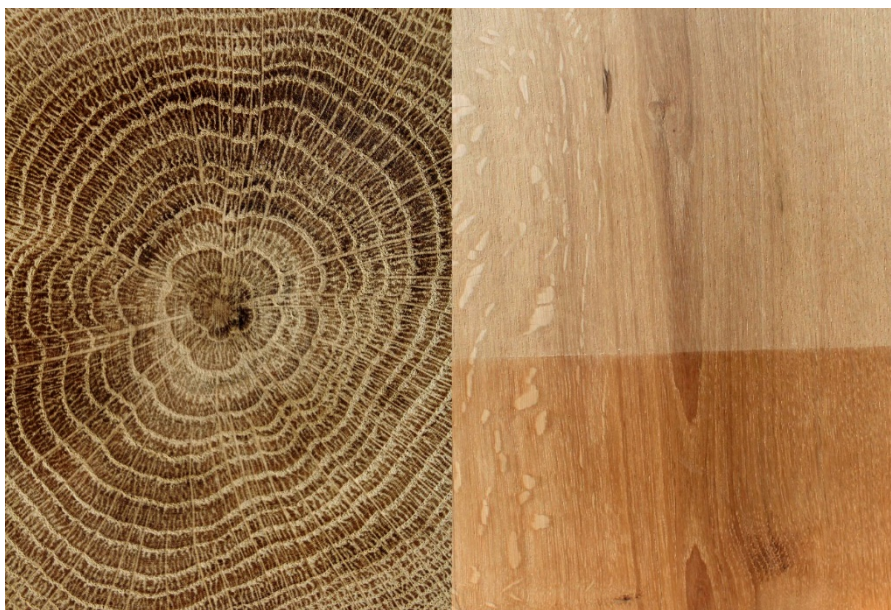
Díky změně zaměření světové politiky posledních let v dřevařském průmyslu lze vyzorovat jistou tendenci stoupající finanční hodnoty dubového dřeva a dá se předpokládat, že tento dlouhodobý trend bude pokračovat i v následujících letech. V České republice je lesnatost 34% (ÚHUL, 2019), což odpovídá zásobě dříví 246 m<sup>3</sup>/ha (Lesy ČR, 2019) a z toho jsou dubové porosty zastoupeny zhruba osmi procenty (ÚHUL, 2019). Spotřeba dřeva na jednoho obyvatele je u nás v porovnání se zbytkem Evropy ale stále ještě nízká, což je přetrvávající trend již od druhé světové války. V této souvislosti vznikají proto různé projekty na podporu využívání dřeva, jakožto obnovitelného materiálu s nízkou uhlíkovou stopou. Nutno dodat, že je náš stát orientován především na jehličnatou surovinu, což odpovídá i trendu Evropy, kde dlouhodobě dochází ke snižování spotřeby tvrdého listnatého dřeva; za poslední rok konkrétně o 3,8% (UNECE, 2018).



---

### 3.1.1 Dubové dřevo a jeho struktura

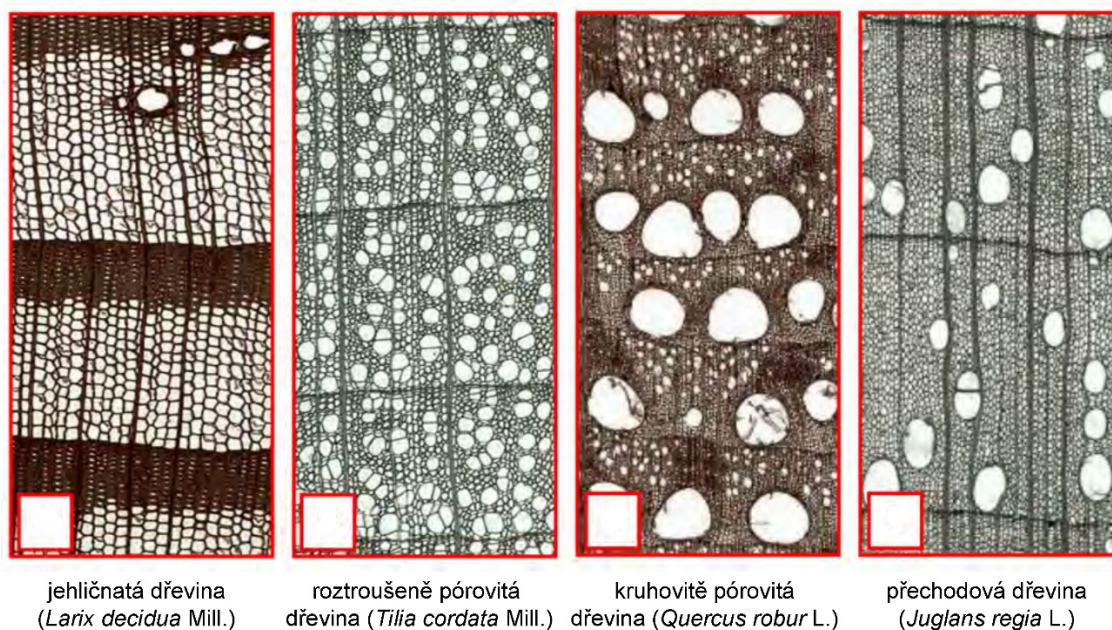
Jak již bylo v předcházející kapitole řečeno, dub řadíme ke kruhovitě pórovitým dřevinám, což se projevuje především v jeho struktuře. Jedná se o jádrovou dřevinu s rovnoměrně hnědě zbarveným jádrem, žlutohnědým vyzrálým dřevem, s úzkou světlehnědou bělí a pro dub tolik typickými dřeňovými paprsky, které v příčném řezu hvězdicovitě protkávají celý průřez kmene. Na příčném řezu jsou zřetelně vidět i jednotlivé vrstvy jarního i letního dřeva, které jsou hustě protkány soustřednými dřeňovými paprsky. Ty je pak možné pozorovat i na řezu podélném a i tangenciálním jako různě dlouhé, shodně orientované podlouhlé skvrny (Obr. 1). Pouhým okem rozlišujeme jarní a letní přírůstky, přičemž jarní dřevo je světlejší s dobře viditelnými cévami, které jsou velmi pravidelně uspořádány do linie při vnitřním obvodu letokruhu a tmavší letní dřevo, které se mimo barvy a drobných cév liší i svými mechanickými vlastnostmi a dodává tak dubovému dřevu na jeho heterogenitě a anizotropii (Santos et al., 2012). Přeřezané cévy jarního dřeva jsou dobře viditelné i na podélných řezech, což pak vytváří onen typický pórovitý povrch, ideální pro impregnaci a moření.



Obr. 1 Příčný a podélný řez dubového dřeva ([www.lesvcr.cz](http://www.lesvcr.cz), 2019)

Co se lesku týče, dubové dřevo má díky výrazným dřeňovým paprskům, které tvoří zrcátkové odlesky velmi pestrou kresbu především na radiálním řezu.

Při pohledu na dřevo dubu pod mikroskopem, uvidíme daleko více, než jen uspořádání letokruhů a cév. Jeho struktura je poměrně složitá, což odpovídá tomu, že je vývojově daleko mladší než například jehličnaté stromy, a proto zde můžeme mluvit o daleko užší funkční specializaci a tím i většímu počtu jeho buněčných elementů, než je tomu u dřevin vývojově straších (Obr. 2). (Požgaj et al., 1993)



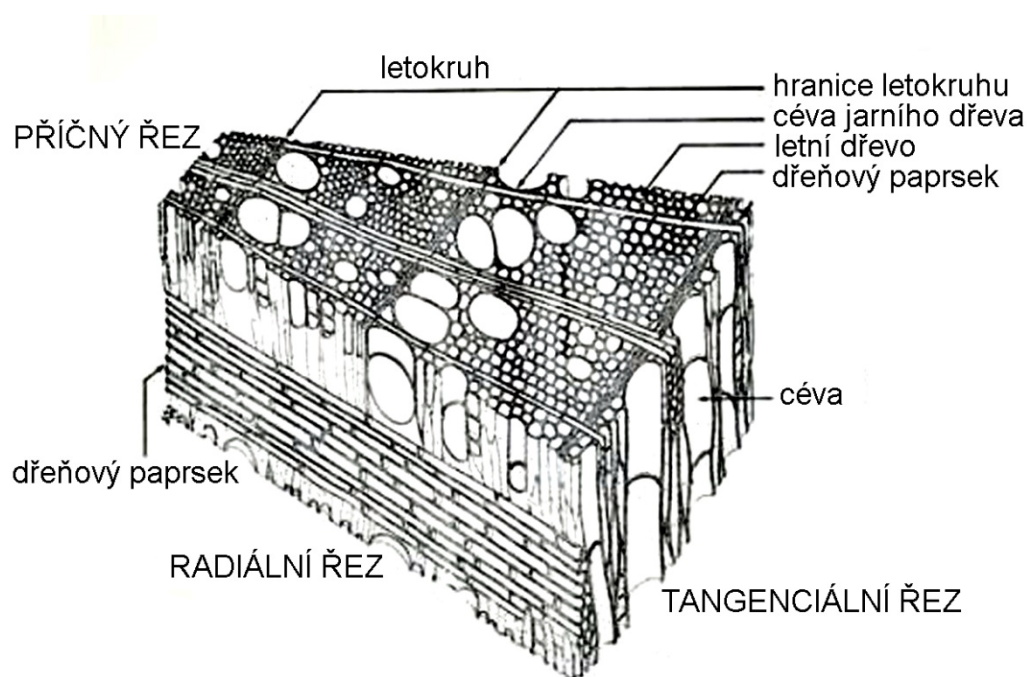
**Obr. 2 Srovnání mikroskopické stavby dřevin (Zhu et al., 2017)**

Cévy neboli trachey, jakožto napohled nejvýraznější prvky dubového dřeva, jsou typickým elementem stavby listnatých dřevin. Mají kruhovitý až oválný průřez a rozlišujeme je na jarní a letní, které se mimo svůj rozměr – jarní mají 10x větší průměr než letní, liší i tloušťkou své stěny. Jejich celková délka může dosahovat i 5 až 18 m a na příčném řezu jsou uspořádány ve shlcích tvaru „plamének“ (Požgaj et al., 1993) a jejich vzájemné propojení je realizováno pomocí jednoduchých perforací v přilehlých stěnách. Hlavní úlohou cév je transport vody a živin v podélném směru kmene. Průměr cév má vliv především na tvorbu a lepení dýh, kdy přerezané cévy vytvářejí v ploše rýhy (Siklienka a Kminiak, 2013a).

Dřevo dubu dále obsahuje **cévice** neboli tracheidy. Vlákenné tracheidy stojí vývojově někde na pomezí cévic a libriformních vláken. Plní především funkci výztuže, ale z části se podílí i na vedení vody a tvorbě zásob. Podobnost s cévami je především v přítomnosti dvojteček. (Požgaj et al., 1993)

Rovněž je nutno se zmínit o **libriformních vlákních**, jež zajišťují především mechanickou pevnost dřeva. Vytvářejí ve dřevě mechanická pletiva a jsou tvořeny odumřelými buňkami. Jejich hlavní úlohou je zajištění mechanické pevnosti dřeva. Jejich obvyklý podíl ve dřevě je 25 – 50%. Tvarově připomínají tlustostěnné trubice jako u cév, avšak jejich průměr i délka jsou výrazně menší. V bělovém dřevě zastávají i funkci vodivou. Pro dub je typický právě rozměr lumenu libriformních vláken, který může dosahovat až 0,0065 mm. Ve struktuře dřeva jsou uložena pod různými úhly, a tato odkloněná vlákna pak způsobují změnu kresby na povrchu dřeva, jejímž následkem může být při řezném procesu vzniklý povrch s vytrhanými vlákny. (Siklienka a Kminiak, 2013a)

Dále je třeba hovořit o **parenchymatických buňkách**, které najdeme převážně v dřeňových paprscích ve formě válečkovitých útvarů. Na rozdíl od libriformních vláken obsahují buňky živé. Kromě funkce vodivé, která je realizována kolmo na směr růstu, mají i funkci zásobní. Dále najdeme tato pletiva v blízkosti cév. Tyto dřevní parenchymatické buňky vytvoří na konci sezóny tyly, které znemožní průchodnosti cév a tím chrání strom před pronikáním konzervačních chemikálií. Tuto vlastnost má především dub letní (*Q. robur* L.), dub bílý (*Q. alba* L.) a dub pyrenejský (*Q. pyrenaica* Wild.), čehož se využívá především v bednářství (Santos et al., 2012). (Obr. 3)



Obr. 3 Mikroskopická stavba listnatých dřevin (Požgaj, 1993)

---

### 3.1.2 Dubové dřevo a jeho fyzikální vlastnosti

Fyzikální vlastnosti dřeva mají velký vliv na jeho obrábění a proto je potřeba si hned na počátku vymezit vztahy mezi nimi a charakterem zvolené metody obrábění.

Jak vyplývá z předcházející kapitoly, dřevo má obecně díky své struktuře rozdílné vlastnosti v různých směrech. Jedná se tedy o materiál heterogenní a anizotropní. Navíc uspořádání a charakter stavebních prvků dřeva jej činí značně pórovitým a tedy i hydrofilním. Hydrofilnost souvisí také s jeho chemickým složením, především pak s celulózou a hemicelulózou, které váží vodu vytvářením vodíkových můstků.

Další významnou fyzikální vlastností, která ovlivňuje obrábění dřeva je tepelná a elektrická vodivost. Protože je dřevo velmi špatný vodič, je třeba teplo, jež vniká třením při řezném procesu, odvádět co nejúčinněji pryč. Důvodem je zejména zabránění zčernání povrchu dřeva, jež je při jeho vystavení vysokým teplotám velmi rychle spálen, ale současně s tím i ochránění řezného nástroje, jehož spálení se zpravidla projevuje zmodráním kovu. U obrábění dřeva laserem toto teplo uniká spolu se zplyněným dřevem (Powell, 1993), kdežto při konvenčních metodách obrábění je přebytečné teplo odváděné přímo tělem zubu řezného nástroje. Mimo to, je trvanlivost nástroje ovlivněna i vznikajícími elektrochemickými jevy, jež při procesu řezání vznikají za přítomnosti vlhkosti (Lisičan et al., 2007).

#### 3.1.2.1 Vztah dubového dřeva k vodě

Důležitou vlastností ovlivňující zpracování dřeva je rovněž jeho vlhkost. Ta vypovídá o množství vody, které je ve dřevě obsaženo a s níž pak přímo souvisí i další charakteristiky dřeva, jako je navlhavost, nasákavost, bobtnání a sesychání. Především jde ale o vlastnost, které je za každé situace potřeba věnovat patřičnou pozornost, protože při určitých hodnotách významně ovlivňuje jak vlastnosti dřeva, tak i náchylnost k biologickému poškození různými škůdci. Autoři Siklienka a Kminiak (2013a) ve své práci uvádí častou komplikaci pro řezný proces při zpracovávání čerstvě poraženého stromu, kdy vlhkost bělového dřeva je v tomto případě o hodně vyšší než vlhkost jádra.

Rozptyl vlhkosti konkrétního kusu dřeva je ovlivněn především podílem dřevní substance, jež dané dřevo obsahuje. Nejen napříč druhy dřevin, ale i mezi jednotlivými druhy dubů nalezneme rozličné chování vůči vlhkosti.

Vodu ve dřevě obsaženou je možno rozdělit na tři kategorie: voda volná, voda vázaná a voda vázaná chemicky. **Voda volná**, neboli kapilární, bývá zpravidla obsažena

---

v lumenech dřevních elementů a její možný obsah je dán právě množstvím těchto volných prostor ve struktuře dřeva, tedy jeho pórovitostí. Jak již ze samotného názvu vyplývá, je ke dřevu poutána kapilárními silami. V kapitole 3.1.1. je popsána anatomická struktura dubového dřeva, tedy i skutečnost, že má opravdu velké průměry jarních cév i libriformních vláken, z čehož lze logicky předpokládat, že takovéto dřevo má potenciál obsahovat velké množství vody volné. To má za následek velký vliv na mechanické vlastnosti dřeva, které jsou právě přítomností vody volné značně ovlivňovány. Kapilární voda je přítomna v čerstvě poraženém dřevě anebo jako následek přímého ponoření dřeva do kapalné vody. (Požgaj et al., 1993)

Jak z názvu vyplývá, tak **voda vázaná** je ve dřevě navázána na volné OH skupiny, kdy se stává součástí dřevní hmoty a její maximální množství označujeme jako bod nasycení vláken, neboli BNV. Proto také literatura často označuje vodu vázanou hygroskopickou. Dřevo v našich podnebných podmínkách může obsahovat 22 - 35% vody vázané, a to v závislosti na druhu a podmínkách. (Požgaj et al., 1993)

**Voda chemicky vázaná** není pro mechanické ani fyzikální vlastnosti dřeva nijak významná a nelze ji ze dřeva odstranit nijak jinak, než jeho spálením. Její obsah se pohybuje v rozmezí 1 – 2% sušiny.

Dřevo má přirozenou vlastnost snažit se vyrovnávat svou vlastní vlhkost s vlhkostí svého okolí. Pokud necháme dřevo v určitých podmínkách dostatečně dlouhou dobu, dřevo dosáhne takzvané rovnovážné vlhkosti, a to sorpcí anebo desorpcí. Pokud dřevo ztrácí pouze vodu volnou, nemá to téměř žádný vliv na jeho rozměry, ale pokud jeho vlhkost klesne pod BNV, začíná dřevo své rozměry zmenšovat, sesychat. Opačný proces pak nazýváme bobtnáním. Hodnoty rozměrů, o které se dřevo zmenšuje, potažmo zvětšuje, jsou závislé na anatomickém směru daného kusu dřeva. To je důsledek právě již zmiňované anizotropie. Nejvyšších hodnot dosahuje ve směru tangenciálním, nejnižších pak v podélném. Míra bobtnání a sesychání roste lineárně s hustotou. (Požgaj et al., 1993)

### 3.1.2.2 Hustota dubového dřeva

Hustotou dřeva vyjadřujeme hmotnost určitého objemu dřeva při jeho konkrétní vlhkosti. Obecně je pro dřevo rozptýl hustoty v absolutně suchém stavu poměrně velký, avšak v rámci jedné dřeviny se většinou pohybuje s drobnými odchylkami kolem hodnoty dohledatelné v tabulkách.

---

Hustota dřeva je úzce spjata s jeho vlhkostí, a to především při hodnotě vyšší než je BNV, protože voda volná zvyšuje hmotnost dřeva. Hustota dřeva závisí nejen na druhu dřeviny, ale také na lokaci růstu a ročním období, kdy bylo vytěženo. Kromě toho se liší i v různých částech jednoho stromu. Z toho vyplývá, že je hustotu potřeba vždy ověřit a nespoléhat se jen na tabulkové hodnoty a to především proto, že má její hodnota následný vliv na sušení, propustnost, mechanickou pevnost a trvanlivost, tedy i na proces obrábění. (Požgaj et al., 1993)

S hustotou dále souvisí i výše zmíněná pórovitost, která udává podíl volných prostor ve hmotě dřeva, které mohou být vyplněny vzduchem anebo kapalnou vodou. Pórovitost tedy úzce souvisí s informací, jaké je maximální možné množství obsahu kapalné vody ve dřevě. (Požgaj et al., 1993)

### 3.1.2.3 Další fyzikální vlastnosti dubového dřeva

Mezi další fyzikální vlastnosti dřeva řadíme jeho vztah k teplu, ke zvuku, k elektřině a magnetismu. Patří sem i jeho povrchové vlastnosti, z nichž je pro tento výzkum nejdůležitější barva a lesk dřeva.

**Barva dřeva**, jako zrakový vjem, je vlastnost povrchu dřeva, kterou hodnotíme převážně subjektivně. Je to většinou první vlastnost, které si u dřeva všimneme a kterou posuzujeme. Mimo to, že předem určuje finální vzhled budoucího výrobku, může nám mnohé prozradit i o jeho vadách.

Ačkoli z vědeckého hlediska patří barva mezi podružné makroskopické vlastnosti dřeva, je v běžném životě velmi důležitým aspektem našeho subjektivního hodnocení výrobků ze dřeva a podléhá zcela našemu vkusu. Do jisté míry tímto způsobem od sebe i jednotlivé dřeviny rozeznáváme. Škála barevnosti dřeva u nás rostoucích stromů se pohybuje na škále od světlých po tmavší tóny krémové, hnědé a žluté, kdežto u dřeva tropických stromů se setkáváme i s daleko výraznějšími a plnějšími tóny.

Na tomto místě je třeba uvést, že barvu dřeva ovlivňuje především jeho chemické složení. Kromě rozdílů mezi jednotlivými dřevinami tak najdeme i variabilitu v rámci druhu, a to především proto, že barvu dřeva ovlivňují obsažené látky, jako je lignin, barviva, třísloviny a pryskyřice. Barvu též ovlivňuje stáří stromu a původní stanoviště růstu. Mimo to může být dřevo zbarveno i nepříznivými vnějšími vlivy, jako je hniloba. V rámci jednoho kmene zase můžeme pozorovat různou barevnost u bělí, zralého dřeva a jádra. Vliv na barvu má, kromě již výše zmíněného, rovněž i čerstvost řezu, vlhkost

---

dřeva a technologické zpracování (sušení, paření, termická modifikace a povrchová úprava). (ČSN 48 0203, 1981; Požgaj et al., 1993)

U hodnocení barvy dřeva je také velmi důležité nezaměnit jeho přirozenou barevnost se zbarvením neorganického původu nebo důsledkem napadení dřeva houbami. V případě neorganického zbarvení za to vděčíme tríslovinám, které na vzduchu oxidují a dřevo tak získává nepřirozený barevný nádech. Pokud dojde ke sloučení tríslovin se solemi železa, vznikají na povrchu dřeva modrošedé až černé skvrny, které se označují jako inkoustové. Ty můžeme najít především na dýhách a dubovém řezivu. Chemické zbarvení dřeva je pouze optická vada a na mechanické vlastnosti dřeva nemá žádný vliv. V případě zbarvení dřeva houbami se jedná o zbarvení jádra, zbarvení běli, zapaření, hniloba a trouchnivost, jak uvádí norma ČSN 48 0203 (1981). V případě hub je třeba hlubší orientace v dané problematice, protože zde je třeba rozlišit, kdy se jedná pouze o zbarvení a kdy jde již o snížení mechanických vlastností dřeva. (Požgaj et al., 1993)

**Lesk dřeva** se dá charakterizovat jako jeho schopnost odrážet světlo. Obecně bývají nejlesklejším prvkem dřeňové paprsky, avšak za samotný lesk dřeva vděčíme odchylnám v průběhu vláken. Nejvýraznější proto bývá u většiny dřevin na radiálním řezu. Přestože je na trhu celá řada přípravků pro povrchovou úpravu zvyšující lesk dřeva, tomu přirozenému se nevyrovná. (Požgaj et al., 1993)

### **3.1.3 Dubové dřevo a jeho mechanické vlastnosti**

Dřevo se pyšní velkým množstvím mechanických vlastností, avšak mezi ty základní řadíme tvrdost, pevnost a pružnost, jež se standardně ověřují laboratorními pokusy.

Dřevo je především výborným konstrukčním materiálem, protože kombinuje vysokou pevnost se svou relativně nízkou hmotností. Pro konstrukční dřevo jsou základními parametry pevnosti v tahu, tlaku a ohybu. Tyto nabyté poznatky ale využíváme i pro další technologické účely, jako je sušení, řezání, ohýbání a lisování dřeva.

Stejně tak jako u fyzikálních vlastností musíme i u těch mechanických brát v potaz, že dřevo je anizotropní materiál, a že je tedy nezbytné vždy zvažovat konkrétní anatomický směr, ve kterém je dřevo zatěžováno. Toto je mimo jiné způsobeno rozdílným druhem chemických vazeb mezi jednotlivými složkami dřeva.

Vliv na mechanické vlastnosti dřeva má hned několik parametrů jeho struktury. Mimo již dříve zmíněné hustoty a vlhkosti dřeva, je to především podíl letního dřeva,

šířka letokruhů, přítomnost dřevných paprsků, bělí a jádra a v neposlední řadě i množství a charakter vad dřeva.

O velmi významném vlivu mechanických vlastností dřeva mluvíme v souvislosti s jeho zpracováním, a to konkrétně na úrovni otázky, jaký vliv mají na řezný proces. Tak kupříkladu: čím vyšší je vlhkost dřeva (jen do BNV), tím nižší jsou hodnoty jeho mechanických pevností. Zde je třeba zdůraznit i významný vliv prostředí, konkrétně teploty, kdy pevnost se zvyšující se teplotou klesá. (Siklienka a Kminiak, 2013a)

V následující tabulce (Tab. 1) z výzkumu Santos et al. (2012) je přehled hodnot fyzikálních a mechanických vlastností vybraných druhů dubu.

**Tab. 1 Průměrné hodnoty fyzikálních a mechanických vlastností vybraných druhů dubu (Santos et al., 2012)**

	Q. robur L.	Q. pyrenai -ca Willd.	Q. alba L.	Q. rubra L.	Q. fagine Lam.	Q. ilex L.
<b>Fyzikální vlastnosti</b>						
Hustota (kg/m <sup>3</sup> )	710,0	774,0	680,0	750,0	890,0	900,0
Sesychání v tang. směru (%)	10,7	10,5	8,8	11,0	14,9	9,5
Sesychání v rad. směru (%)	4,9	5,8	4,4	4,4	9,5	5,3
Objemové sesychání (%)	16,8	17,4	12,7	16,3	25,0	16,0
Bod nasycení vláken (%)	31	30	-	32	-	27
<b>Mechanické vlastnosti</b>						
Tlak napříč vláken (MPa)	-	14,5	7,4	-	-	-
Tah napříč vláken (MPa)	3,9	8,3	5,5	4,3	4,9	4,6
Valivý smyk (MPa)	-	12,8	-	-	-	-
Tah podél vláken (MPa)	-	84	-	-	-	-
Ohybová pevnost (MPa)	135	138	105	152	150	147
Modul pružnosti (MPa)	-	11 500	12 300	-	-	-
Smyk podél vláken (MPa)	-	19,1	13,8	-	-	-
Tlak podél vláken (MPa)	50,5	54,3	51,3	54,0	53,0	50,0



---

## 3.2 Řezání dřeva kotoučovou pilou

Kotoučovou pilu řadíme do kategorie dřevoobráběcích strojů, které slouží k dělení a úpravě tvaru dřeva a materiálů na jeho bázi. Je charakteristická vysokou řeznou rychlostí (až 150 m/s) i rychlostí posuvu (až 150 m/min), jednoduchou konstrukcí a snadnou obsluhou, současně při poměrně široké řezné spáře a až 16% odpadu v podobě pilin. Častá a výhodná je vysoká automatizace těchto strojů. (Barcík, 2001)

Kotoučovou pilu můžeme charakterizovat několika parametry: způsob uchycení kotouče, způsob jeho pohonu, umístění vzhledem k pracovnímu stolu a v neposlední řadě i jeho materiál, rozměry a typ ozubení (Lisičan et al., 2007). Volba příslušných parametrů tedy vždy záleží na konkrétním způsobu použití, tedy hlavně na řezaném materiálu a požadovaném výsledku.

Kotoučovými pilami můžeme řezat dřevo podél i napříč vláken. Podle jejich konkrétního použití je dělíme na zkracovací, rozmítací, omítací a formátovací. (Barcík, 2001)

### 3.2.1 Historický vývoj kotoučové pily

Vývoj metod zpracování dřeva zaměstnává lidský mozek již neuvěřitelných osmadvacet století. Při pohledu do historie můžeme v této oblasti identifikovat několik významných milníků, jež celé odvětví posunuly o značný kus dál. Prvním významným obdobím byla doba bronzová a železná, kdy došlo k ohromné revoluci ve výrobě nástrojů, což později podpořil vynález parního stroje, respektive elektromotoru. Avšak počátek řezání dřeva jako takového, jak jej známe dnes, je datován až na konec devatenáctého století (Lisičan et al., 2007). Ačkoliv výzkumy historiků uvádějí, že byla kotoučová pila pravděpodobně vynalezena v 16. století v Holandsku (Ball, 1975), patentovat si ji pro zpracování dřeva nechal Samuel Miller v Londýně až v roce 1777 (Lisičan et al., 2007).

S rozvojem dřevozpracujícího průmyslu v 19. století přicházel požadavek na větší kapacitu kotoučových pil. Požadavkům moderní výroby již nevyhovovala stará konstrukce strojů, které umožňovaly řezání pouze kus po kuse. Kotoučová pila tak postupně a možno říci, že i skokově doznávala podstatných změn. Jednalo se například o různé tvary pilových zubů, dále to byly nové materiály k výrobě pilových kotoučů či vyměnitelné břity na pilových kotoučích. Na kotoučové pily následně navazují rozmítací pily, jejichž vývoj započal tím, že se na klasickou kotoučovou pilu připevnilo víc pilových kotoučů. Tento způsob však nebyl nejšťastnější, neboť byl značně nebezpečný. Řešením

---

se ukázalo klasické válcové podávací zařízení, které v konečném důsledku vedlo i ke zvýšení kapacity strojů. Na konstrukčně jednodušší válcový posun navazují článkové posuvné systémy, jež byly rovnější, umožňovaly kvalitnější řez a současně řezání kratších kusů. V této souvislosti je možno uvést, že tento systém se používá dodnes. Další inovace přinášely například zmenšení řezné spáry, a to použitím pilových kotoučů s menším průměrem. Skládáním kotoučů na samostatný hřídel s drážkami, jež se následně nasadil na hlavní hřídel, se umožnila rychlá výměna pilových kotoučů. Toto mělo samozřejmě za následek zefektivnění sériové výroby a možnosti řezání velkoplošných materiálů. Optimalizace řezání se výrazně zvýšila zavedením zařízení na přestavování pilových kotoučů během řezání (1 až 3 kotouče), což umožňuje operátorovi rozhodovat o schématu pořezu přímo během řezání. Možno zkonstatovat, že toto progresivní odvětví se neustále vyvíjí i v současné době a v reakci na to mimo jiné vzniká bezpočet výzkumných a výukových pracovišť.

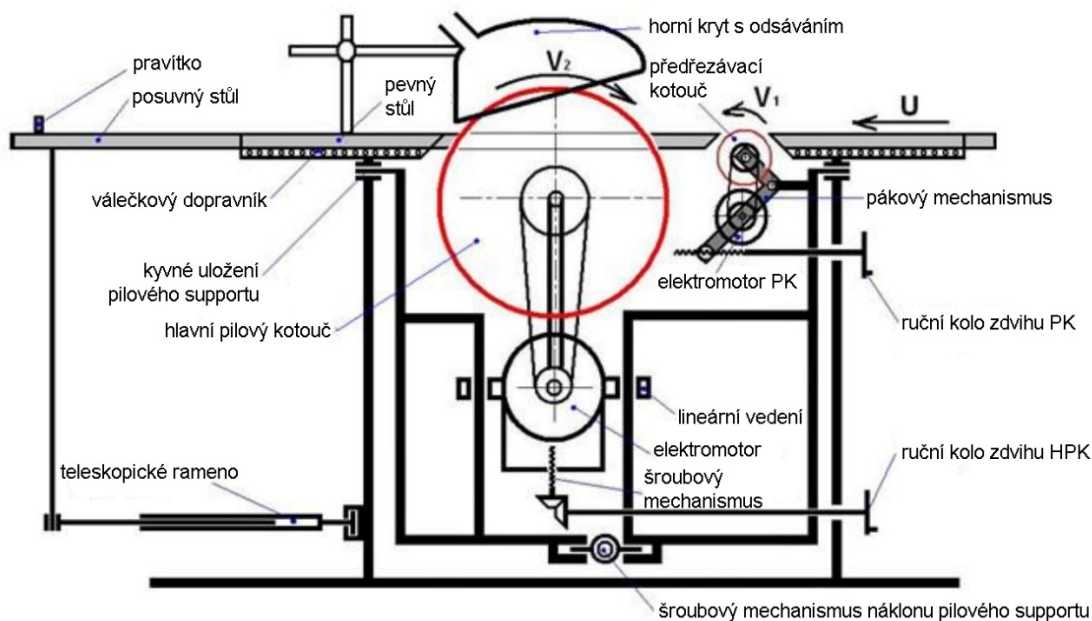
### 3.2.2 Technologie kotoučové pily

Konstrukce kotoučové pily se sestává ze tří skupin mechanismů - hlavní, podávací a pomocné. Všechny tyto součásti jsou uloženy pevně nebo volně ve stojanu, který slouží jako nosný prvek celého stroje. Jeho konstrukce je určena především způsobem použití pily. V praxi se setkáme jak se staršími celolitinovými stojany, tak i moderními stavebnicovými, které jsou vybaveny množstvím bezpečnostních prvků. Z těch za zmínku stojí především rozevírací klíny, jež brání zpětnému vrhu materiálu.

Mezi hlavní mechanismy řadíme **pilový hřídel**, **pilový kotouč** (nebo jejich soustava), **ložiska**, na kterých je hřídel uložen, a **elektromotor**, jež může a nemusí být připojen pomocí **řemenového převodu**.

Typ podávacího mechanismu, respektive druhu použitého dopravníku závisí na charakteru zpracovávaného materiálu. Dopravník může být válečkový, pásový, řetězový, bubnový, vozíkový nebo kombinovaný. (Barcík, 2001)

Mezi pomocné mechanismy řadíme prvky zabezpečující přítlak, fixování materiálu, dále suporty, pomocí kterých lze nastavovat geometrii řezání, dávkovací mechanismy a prvky kontroly a řízení. Ty jsou ještě doplněny o doplňková zařízení, mezi něž patří vodící pravítka, formátovací vozík a optické nebo laserové polohovací prvky. (Obr. 4)



**Obr. 4 Schéma formátovací kotoučové pily (Dvořák, 2013)**

### 3.2.3 Princip řezání kotoučovou pilou

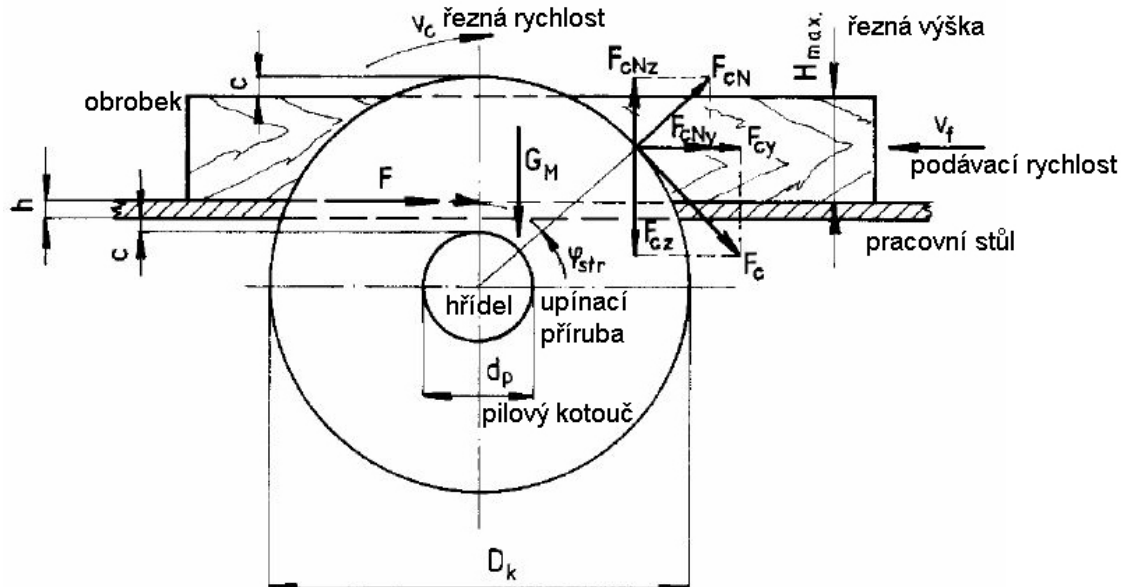
Řezání dřeva kotoučovou pilou řadíme mezi třískové metody mechanického zpracování dřeva. Z názvu tedy vyplývá, že jde o způsob dělení, při kterém se nástroj pohybuje v řezné spáře za vzniku třísky.

Ostří pilového kotouče se pohybuje po kruhové dráze konstantní rychlostí. Výsledný pohyb je ale ještě k tomu spojen s přímočarým posunem obrobku, čímž jako výslednice vzniká křivka zvaná cykloida. Ta je ale pro výpočty zbytečně složitá a proto se v důsledku nepoměru obou rychlostí uvažuje pouze s kruhovým obloukem, který je pro výpočty daleko vhodnější a to jen s minimální odchylkou od reality. (Lisičan et al., 2007)

Řezání dřeva je nevyhnutelnou operací při jeho zpracování. Samotné řezání tak probíhá v několika fázích. Nejprve zpracování kulatiny na pilnici na řezivo a pak následná úprava rozměrů a kvality povrchu řeziva. Pro dub je typické, že pro svou tvrdost vyžaduje speciální zacházení již v této úvodní fázi zpracovatelského procesu. Vhodným nástrojem pro rozřezání kmene dubu je kmenová pásová pila. Dalším úskalím zpracování dřeva dubu je častá křivost jeho kmene, proto je výtěžnost poměrně nízká a dlouhé sortimenty

bývají dosti drahé. Ze všech těchto podmínek vyplývá, že je v této fázi nejdůležitější zvolit správné pořezové schéma, abychom dosáhli co nejoptimálnějších výsledků.

V následujícím obrázku (Obr. 5) je popsáno kinematické schéma řezání kotoučovou pilou, a to spolu se silovým zatížením obráběného materiálu.



Obr. 5 Schéma silového zatížení obráběného materiálu při řezání kotoučovou pilou (Svoren, 2002)

### 3.2.4 Výzkumy v oblasti řezání kotoučovou pilou

Průkopníkem vědy o dělení dřeva byl profesor I. A. Time, který již v roce 1871 nastartoval obrovský zájem o toto odvětví všude po světě.

Na našem území došlo k rozvoji dřevozpracujícího průmyslu v období po konci druhé světové války, kdy v reakci na to bylo založeno několik univerzit, kde byl právě tento obor vyučován (Lisičan et al., 2007).

V dnešní době je zájem vědců v oblasti kotoučových pil upřen především na zkoumání snížení vibrací při řezání. Tímto se zabývali také Bílek a Kovařík (2017), kteří vytvořili algoritmus výkonu potřebného k podélnému řezání dřeva s možností využití k návrhu obráběcího stroje.

---

### 3.3 Řezání dřeva laserem

Je třeba zkonstatovat, že současné mechanické obrábění dřeva má i přes dosaženou vysokou technickou úroveň řadu nedostatků, kvůli kterým je zcela opodstatněné hledání nových, modernějších a tím i vhodnějších metod, které tyto chyby minimalizuje či úplně odstraní. Mluvíme zde především o velkém množství odpadu v podobě pilin, což je dnes s ohledem na velmi diskutovaný dopad průmyslu na životní prostředí opravdu závažný problém. Dále je třeba zmínit nadměrnou hlučnost těchto provozů, která mnohdy několikanásobně převyšuje dovolené hodnoty v okolí takovéto výroby. Nezanedbatelným faktorem je i bezpečnost práce, respektive vysoká úroveň nebezpečí obsluhy dřevoobráběcích strojů.

Z hledání nových nekonvenčních způsobů obrábění dřeva stojí za zmínku výzkum řezání dřeva proudem kapaliny s obsahem křemičitého písku, který tryská proti obráběnému materiálu ultrazvukovou rychlostí a při velmi vysokém tlaku. Dalším inovativním způsobem, jehož využití je zatím v úplných počátcích, je řezání dých plazmovým paprskem o vysoké teplotě. Za nejvýznamnější způsob patřící do této kategorie lze označit použití zařízení na základě optických kvantových generátorů, tedy laserů.

Laser - běžně užívané slovo, avšak originálně jde o zkratku z anglického názvu „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“, což by se dalo přeložit jako „Zesilovač světla pomocí vynucené emise záření“. Jde o elektricky optický přístroj, který vydává koherentní záření, tedy vytváří a následně zesiluje světelný paprsek o vysoké intenzitě (Badoniya, 2018).

Své uplatnění našel laser již v mnoha odvětvích průmyslu, z nichž za zmínku stojí zejména strojírenství, kde se používá k řezání, svaření a vrtání, dále je velice hojně využíván v chirurgii, komunikačních technologiích, měřících zařízeních, v tiskařství, optických čtecích zařízeních a konečně se už začíná zabydlovat i v dřevozpracujícím průmyslu (Badoniya, 2018).

Řezání laserem je dnes stále častějším způsobem obrábění materiálů především ve strojírenství, kde se využívá i jako nástroj pro řezání a svařování, avšak použití v dřevozpracujícím průmyslu je stále ještě v počátcích. Dá se ale předpokládat, že toto tvrzení nebude již brzy platit, protože oproti konvenčním metodám obrábění dřeva nabízí laser řadu významných výhod a inovací. Pochlubit se může svou rychlostí, vysokou flexibilitou pořizovacího schématu a určitě i podmínkami samotné práce s ním. Jde totiž o

---

zařízení, které je pro svou obsluhu poměrně bezpečné, lze jej realizovat za normálních atmosférických podmínek a není potřeba žádného speciálního uchycení řezaného materiálu. Samozřejmě ale jako jakákoliv jiná metoda, má i tato několik nevýhod. Obtížně se opracovávají lesklé a vodivé materiály, kdy u těch syntetických může někdy docházet i k uvolňování jedovatých plynů. Problematická je i realizace řezů, jež neprochází skrz celý materiál. A v neposlední řadě je potřeba dodat, že pořizovací cena takového zařízení není nikterak nízká, ale pokud je výrobní proces dobře naplánován, díky rychlosti a možnosti optimalizace můžeme zvýšit výtěž a tím se tato investice brzy vrátí. (Eltawahni et al., 2016; Radovanovic a Madic, 2011)

### 3.3.1 Historický vývoj laseru

Od šedesátých let minulého století, kdy se laser objevil na scéně průmyslu, pozdvihl několik odvětví o úroveň výše.

Samotnému vzniku patentu na laser předcházela Einsteinova kvantová teorie. Konkrétně tedy jeho tvrzení, že pokud zvýšíme energii atomu nebo molekuly, můžeme tuto energii následně uvolnit stimulací takového atomu nebo molekuly malou dávkou elektromagnetického záření o vhodné frekvenci. Na tomto principu pracují dnešní lasery a využíval ji i předchůdce laseru **master**.

Master vynalezl počátkem padesátých let minulého století Charles H. Townes na Kolumbijské univerzitě v USA. Samotné označení MASTER vzniklo jako zkratka anglického názvu „Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation“, což v překladu znamená „Zesílení mikrovln pomocí stimulace emisí záření“. Toto zařízení poprvé v historii vytvářelo silný koherentní paprsek vysokofrekvenčních vln pomocí stimulace amoniakem. A jak už ve světě vědy bývá zvykem, dva další vědci na úplně jiném místě, avšak v ten samý čas přišli na něco velice podobného. Šlo o sovětské vědce N. C. Basova a A. M. Prokhorova, jejichž molekulový generátor pracoval na takřka stejném principu jako master.

Následný vývoj masteru směřoval k použití jeho principu v oblasti optiky, proto se také těmto zařízením, která leží vývojově mezi masterem a laserem říká **optický master**. První takový sestrojil v roce 1960 T. H. Maiman, který využil křišťál rubínu se zbroušenými a postříbřenými konci (Obr. 6).

Rok poté přišel A. Javan s prvním plynovým laserem, který byl již velice podobný laserům, jaké známe dnes. Ten k řezání využíval směs helia a neonu. Lasery této doby se

---

potýkaly se zásadním problémem nízké účinnosti (<1%), což bylo překonáno až vynálezem CO<sub>2</sub> laseru (15%) a polovodičového laseru (40%). (Szymani a Dickinson, 1975)

V dřevozpracujícím průmyslu se začalo s laserem experimentovat v 70. letech a okamžitě se ukázalo několik výhod oproti doposud používaným metodám. Jde tedy o bezkontaktní metodu řezání s vysokou přesností, nízkou hlučností a úzkou řeznou spárkou. (Barcikowski et al., 2006; Guo, 2014a, b; Mukherjee et al., 1990; Naderi et al., 1990)



**Obr. 6 Theodore Maiman a jeho vynález laser ([www.wired.com](http://www.wired.com), 2019)**

### **3.3.2 Technologie laseru**

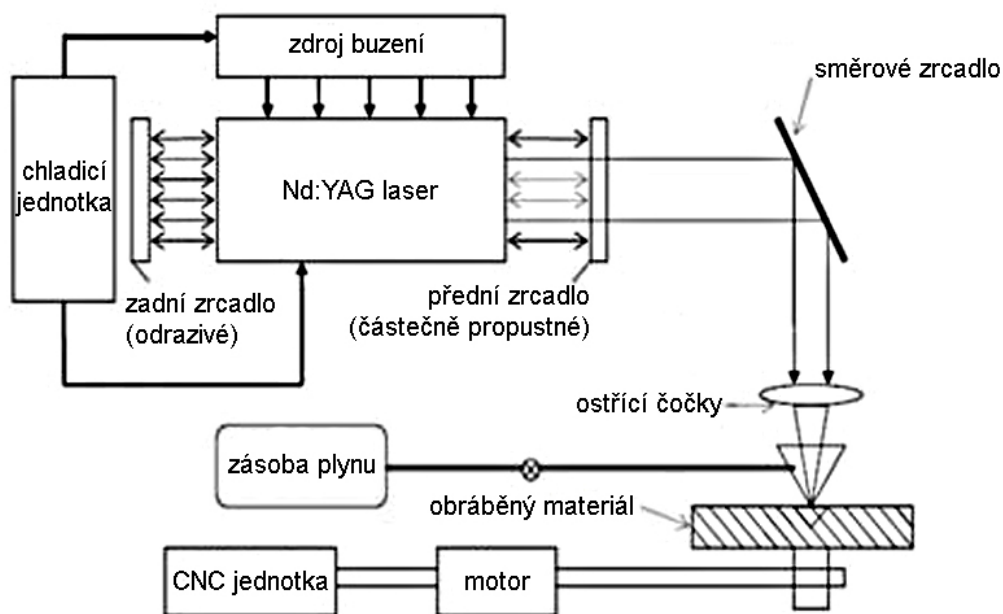
Obecně lze laser definovat jako přeměnu světelné energie v tepelnou. Laser se skládá z optického rezonátoru a budícího zdroje. Aktivní látka postupuje z budícího zdroje jako monochromatické koherentní záření světelné délky do optického rezonátoru, kde dojde k jejímu nahromadění a utvoří se tak usměrněné záření. Vlastnosti laserového paprsku pak umožňují uskutečnit úzce lokalizovaný ohřev řezaného materiálu na velmi vysoké teploty, které vyvolávají jeho rozrušení. Dřevo a materiály na jeho bázi se v oblasti působení přeměňují na zahřáté plyny. (Eltawahni et al., 2016)

Primární rozdělení laserů podle skupenství jejich aktivního prostředí je rozčleňuje do tří základních kategorií – pevné, kapalné a plynné. Podle způsobu práce je dále dělíme na kontinuální a pulzní.

Lasery, jejichž aktivní prostředí je tvořeno **pevnou látkou**, jsou nejčastěji vybaveny homogenním krystalem s příměsí cizorodé látky. Ten je vystaven silnému záření, čímž vzniká světelná emise.

Do této skupiny patří lasery rubínové a neodymové, z nichž nejpoužívanějšími v praxi se staly **Nd:YAG laser** (Obr. 7), protože dokáží dosahovat mnohem vyšších výkonů a jsou schopné řezat kontinuálně. Krystal tvoří Yttrium Aluminium Granátu ( $Y_3Al_5O_{12}$ ) s přidanými ionty neodymu ( $Nd_3^+$ ) a díky svému velkému rozptylu výkonu (100 – 4 000 W), má široké uplatnění jak pro vrtání, řezání, svařování a žíhání, ale našel své místo i v klasické chirurgii jako skalpel (kontinuální) a oční mikrochirurgii (pulzní). Pastor et al. (1999) testovali využití tohoto laseru pro svařování lehkých slitin hliníku používaných v automobilovém průmyslu a hodnotí, že má tento typ laseru daleko lepší výsledky než široce používaný  $CO_2$  laser (Eltawahni et al., 2016; Pastor et al., 1999). Tyto typy laserů se však pro obrábění dřeva příliš nepoužívají.

V roce 1963 zkoumal Bryan použití rubínového pulsního laseru k vrtání do různých dřevin a předpověděl, že až dojde k sestrojení kontinuálního laseru, který bude mít dostatečný výkon, bude možné jím dřevo řezat (Szymani a Dickinson, 1975).

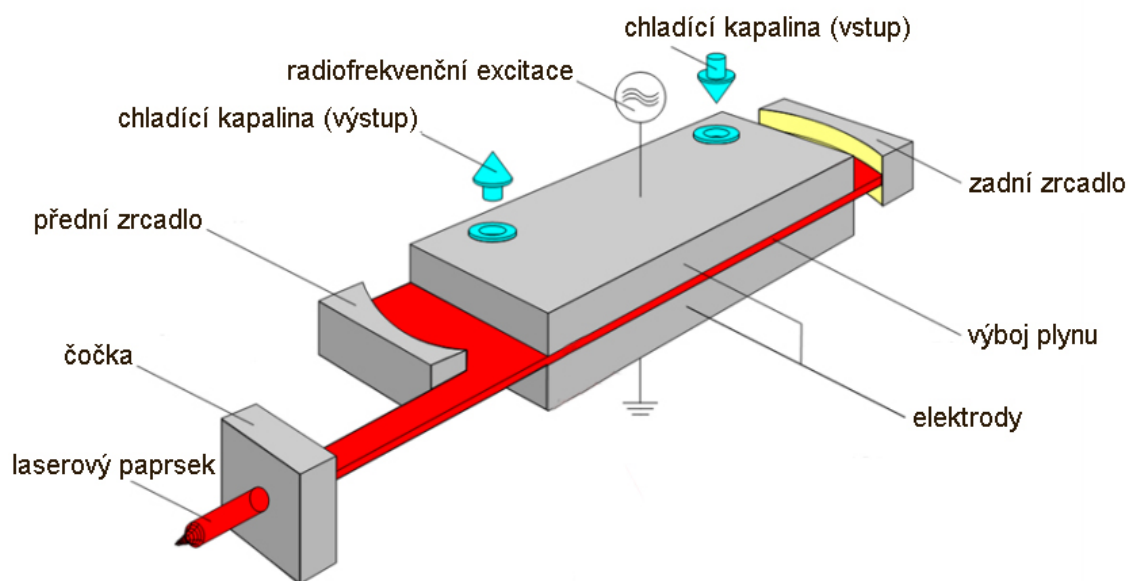


Obr. 7 Schéma Nd:YAG laseru (Deepa et al., 2016)



Za nejvýznamnější skupinu lze označit lasery plynové, tedy ty, u kterých vzniká paprsek v **plynném prostředí** - nejčastěji CO<sub>2</sub>, dusík, vodík nebo helium. Tímto plynem je naplněna trubice, do které je přes elektrodu přivedeno vysoké napětí a tím pak vzniká požadovaná světelná emise. Trubice je po obou stranách opatřena zrcadly, z nichž zadní je zcela nepropustné a přední část světla propouští (Badoniya, 2018). Frekvence laserového paprsku leží v infračerveném spektru (až 10,6 μm), proto je pro lidské oko neviditelný (Riviero et al., 2010). Jednotlivé typy laserů se od sebe navzájem odlišují způsobem buzení a také způsobem chlazení plynné směsi (Powell, 1993). Patří mezi ně helium-neonový laser, který se využívá v měřicí technice, holografii a geodézii, dále argonový laser a excimerový laser, které našly své uplatnění v laserové fotochemii, medicíně, ale i při některých technologických aplikacích, jako je například vrtání a konečně CO<sub>2</sub> laser, jenž se využívá pro řezání, svařování, vrtání, nanášení povlaků a tepelné zpracování (Badoniya, 2018).

**CO<sub>2</sub> laser** (Obr. 8) můžeme považovat za nejpoužívanější typ laseru vůbec, a to díky svému vysokému výkonu (až 1 000 W) a neuvěřitelně všestrannému použití, a to především v oblasti obrábění jiných materiálů, než jsou kovy. Jeho aktivní prostředí je tvořeno směsí plynů, nejčastěji oxidu uhličitého, dusíku a helia v poměru 1:5:20 a tlaku 27 mbar, přičemž dusík a helium se v praxi nejvíce osvědčily pro zvýšení efektivity tvorby laserového paprsku. (Powell, 1993)



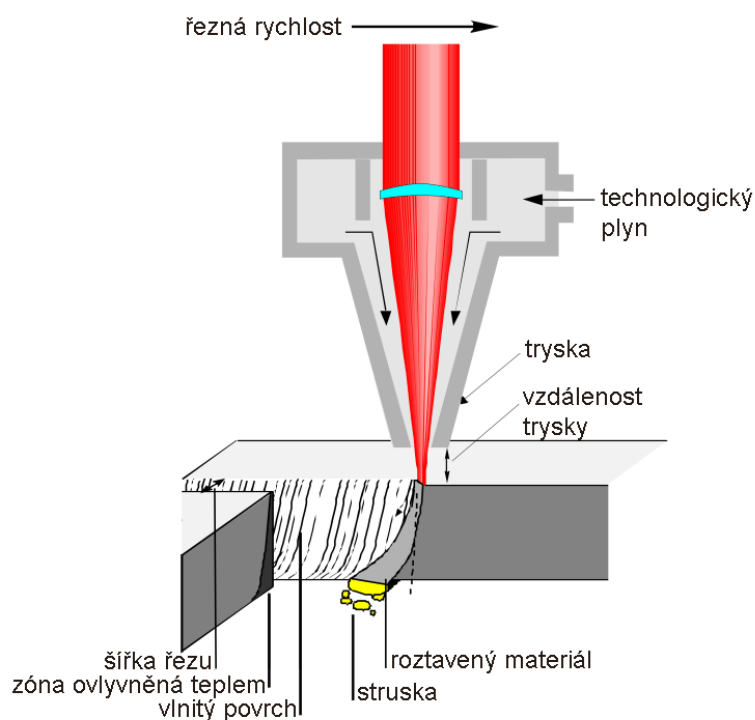
Obr. 8 Schéma CO<sub>2</sub> laseru ([www.comsol.com](http://www.comsol.com), 2019)

---

Jak již bylo řečeno, dosahují CO<sub>2</sub> lasery vysokých výkonů. Důležitou součástí je proto chladicí systém, který slouží k vyrovnávání teploty plynné směsi, respektive především ochlazování helia, které při řezání ochlazuje molekuly oxidu uhličitého. Chlazení je realizováno „slow flow“ metodou, kdy je komora s chladícím olejem nebo kapalinou přímo v kontaktu s trubicí obsahující aktivní plyn nebo „fast flow“ metodou, kdy samotný plyn cirkuluje v trubici, na kterou je přímo napojen okruh s chladicí jednotkou (Powell, 1993).

### 3.3.3 Princip řezání laserem

Laserový paprsek je zaostřen na materiál pomocí ostřících čoček, kdy ohřeje malé množství materiálu (průměr do 0,5 mm) na velmi vysokou teplotu (Powell et al., 1993). V závislosti na řezaném materiálu a parametrech laseru se tato jeho část pouze roztaví, roztaví a vypaří nebo se rovnou vypaří (Eltawahni et al., 2016). Následně je tento přeměněný materiál ze spáry odstraněn pomocí asistenčního plynu, který je namířen oproti obráběnému materiálu souběžně s paprskem laseru. Ten může plnit i úlohu katalyzátoru pro samotný řezný proces (Powell, 1993). Dále se laser pohybuje v ploše nad obrobkem tak, jak bylo předem naprogramováno. Výsledkem je malá řezná spára s velmi vysokou kvalitou povrchu řezu (Obr. 9).



Obr. 9 Schéma práce laseru (Badoniya, 2018)

---

Samotný mechanismus řezání závisí na konkrétní kombinaci tří parametrů, jimiž jsou: typ laseru, druh pomocného plynu a charakter řezaného materiálu. Tímto dostáváme pět základních mechanismů řezání – tavení inertním plynem, tavení aktivním plynem, vypaření, chemická degradace a rýhování. První dva typy jsou typické především pro kovy a slitiny, kdežto metodu vypařování využijeme u řezání nejrůznějších polymerů. Pro obrábění dřeva je charakteristický čtvrtý případ, tedy chemická degradace, při které paprsek laseru naruší integritu materiálu rozrušením jeho chemických vazeb. Konkrétně se jedná o molekuly celulózy, které jsou přeměněny na uhlík a vodní páru. Takto docílíme hladkého a kvalitního povrchu řezné spáry, který je ale třeba očistit od zuhelnatělého prachu. S posledním mechanismem se setkáme u řezání skla a keramiky. (Eltawahni et al., 2016)

Dalo by se říct, že řezání dřeva laserem je především uměním správného nastavení všech tří skupin parametrů, tedy správné nastavení samotného laseru, charakter řezaného materiálu a konečně samotné parametry obrábění tak, aby řez byl co nejkvalitnější. Vzhledem k tomu, že je tu vztah právě mezi nastavenými parametry a vlastnostmi dřeva, které se, jak už bylo řečeno, liší i napříč jednotlivými kusy v rámci jednoho druhu a samozřejmě i v rámci jednoho stromu, jedná se v této oblasti většinou o metodu pokus-omyl, než začne být dosahováno kvalitních výstupů. Důkazem této skutečnosti jsou právě četné výzkumy, které provádějí vědci z celého světa.

### 3.3.3.1 Parametry laseru

Nastavení parametrů laseru je pro řezný proces velice důležité.

1. Výkon: ovlivňuje řeznou rychlost a hloubku penetrace materiálu (pro dřevo 200 – 800 W)
2. Prostorový mód: ovlivňuje hustotu energie ve středu paprsku (nejčastěji Gaussův mód)
3. Časový režim: dle charakteru řezání (kontinuální, pulzní)
4. Vlnová délka: podle absorpce paprsku materiálem (pro dřevo nejčastěji 10,6  $\mu\text{m}$ )
5. Polarizace: orientace elektrického a magnetického pole paprsku (pro dřevo nemá vliv)
6. Umístění ohniska: dle tloušťky řezaného materiálu, vliv na šířku řezné spáry

---

### 3.3.3.2 Parametry materiálu

Obecně jsou nejdůležitějšími charakteristikami pro řezání dřeva laserem jeho absorpce a propustnost. U dřeva, vzhledem k jeho charakteru, potřebujeme znát jeho hustotu, vlhkost a chemické složení. Význam má i orientace vláken.

### 3.3.3.3 Parametry řezání

Na základě zjištění všech výše uvedených parametrů se dostáváme k parametrům samotného řezání.

1. Řezná rychlost: ovlivňuje hloubku řezu (nastavení dle tloušťky materiálu)
2. Asistenční plyn: N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, He - význam především při obrábění kovů (pro dřevo se používá stlačený vzduch)
3. Tvar trysky: vliv na kvalitu řezu, 0,8 – 2 mm otvor podle materiálu
4. Vzdálenost trysky: 0,5 – 1,5 mm
5. Poloha ohniska a ohnisková délka: vliv na rovinnost řezu, krátké ostření do 4 mm, v ostatních případech dlouhé (pro dřevo ostření pomocí jedné čočky)

Pro obrábění dřeva tedy platí, že je zapotřebí vysoká hustota energie paprsku a nízká řezná rychlost, samozřejmě vždy s ohledem na hustotu dřeva, tloušťku materiálu a požadovanou šířku řezné spáry. (Barnekov et al., 1986; Eltawahni et al., 2016; Powell, 1993)

### 3.3.3.4 Vlastnosti řezné spáry:

Řez provedený laserem můžeme charakterizovat následujícími parametry: šířka řezné spáry, hladkost hran, rovinnost hran a šířka oblasti materiálu zasažené teplem.

1. Snaha o dosažení co nejtenčí řezné spáry (výkon, řezná rychlost, pozice ohniska, tlak asistenčního plynu, řezná vzdálenost, průměr trysky)
2. Snaha o co nejméně vlnitý řezaný povrch (odstranění vibrací, stabilní řezný výkon, stabilní proud asistenčního plynu, charakter materiálu)
3. Povrch řezu bez vytvoření strusky ve spodní části spáry (asistenční plyn – především pro obrábění kovů)
4. Snaha o pravoúhlou řeznou spáru (ohnisková délka)
5. Snaha o minimalizaci vlivu tepla na řezaný materiál (výkon, řezná rychlost, tloušťka materiálu)

---

### 3.3.4 Výzkumy v oblasti řezání laserem

Paradoxně i přes to, že využití laseru v praxi není zatím zcela běžnou záležitostí, je toto téma předmětem velkého množství studií a výzkumů.

Velký výzkum laseru, jako nové technologie, provedli v roce 1975 Szymani a Dickinson, kteří srovnávali tři beztrískové metody řezání dýh do tloušťky 2,5 mm a lamel určených k výrobě LVL do tloušťky 6,6 mm. Předmětem komparace byly vibrační nůžky pro stříhání dýh, dále vysokorychlostní vodní paprsek a laser.

Dle výzkumu Yusoff et al. (2008) na tvrdých malajských dřevinách bylo zjištěno, že vlhkost ve dřevě snižuje účinnost CO<sub>2</sub> laseru, protože voda jeho sílu absorbuje. Také byla vyřčena hypotéza, že použití dusíku zlepšuje kvalitu řezu, avšak toto tvrzení by bylo potřeba ověřit ještě dalšími výzkumy.

Barnekov et al. (1986) zase uvádějí, že pro optimální provoz je důležité vzít v úvahu tloušťku řezaného materiálu, jeho hustotu a požadovanou sílu řezu a podle toho zvolit vhodnou kombinaci výkonu laseru, jež by měl pro řezání dřeva být v rozpětí 200 – 800 W, spolu s řeznou rychlostí.

A jaké změny nastávají ve dřevě samotném? Jak uvádí Zhivko (2016), zhruba 88% energie laseru je pohlceno dřevem a následně pak přeměněno v teplo. Tím dochází k degradaci vysokomolekulárních sloučenin, což je důvodem, proč je řezaná plocha laserem řezaného dřeva spálena.

Na toto téma navazují Arai et al. (1977), kteří ve své práci rozdělili laserem opracované dřevo do tří oblastí – pyrolytická zóna, jež je v přímém kontaktu s laserem, pokročilá zóna pyrolýzy a konečně zóna, která není dřevem nijak postižena.

## 3.4 Měření barvy

Ačkoliv jsou barvy kolem nás jedním z nejvýraznějších vjemů, kterým jsme dennodenně vystavováni, zůstávalo jejich pochopení dlouhá léta lidem utajeno a jejich zkoumáním se zabývali pouze malířští Mířtí. Průlomem v této oblasti se stala práce Isaaca Newtona, který experimentálně ověřil, že denní bílé světlo je složeno z několika barevných světelných složek. Ke svému experimentu využil skleněný hranol, který sluneční světlo rozdělil na duhové spektrum sedmi barev – červenou, oranžovou, žlutou, zelenou, modrou, indigo a fialovou (Ohta a Robertson, 2005).

---

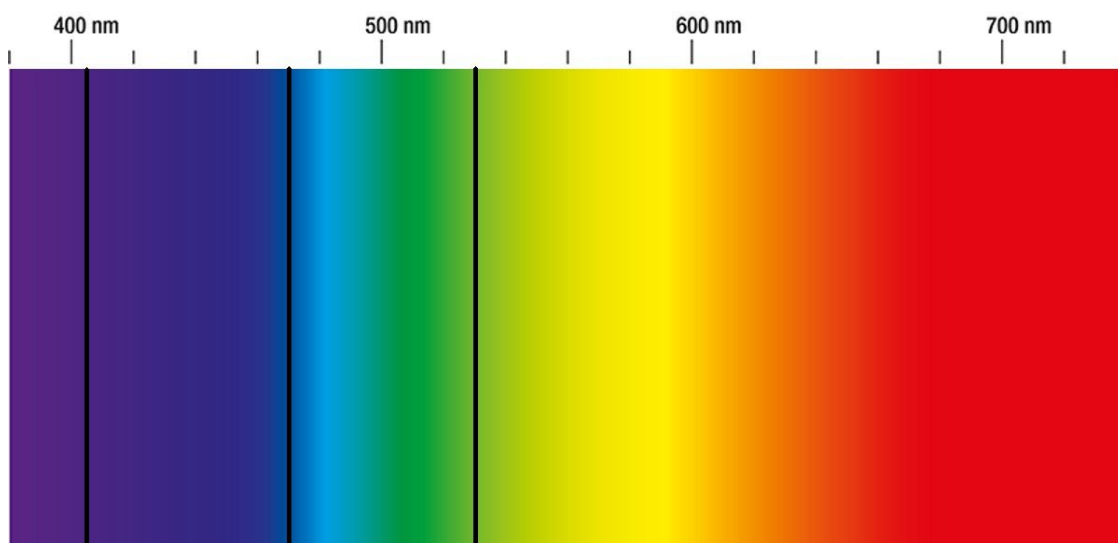
Pokud se na barvu budeme dívat zcela obecně dnešním pohledem, je její zkoumání primárně v zájmu grafiků, malířů a designérů, avšak věda je již dnes mnohem dál a tak se barvou zabývá celá vědní disciplína – kolorimetrie. Ta kromě charakterizování barev řeší i barevné systémy a samotné měření barev.

V dřevozpracujícím průmyslu se se zájmem o barvu setkáme především v oblasti povrchové úpravy dřeva, tedy u nanášení nátěrových hmot. Praktický význam má i pro posuzování světlostálosti a pro identifikaci vad dřeva, jež by mohly být způsobeny právě nepřirozeným zbarvením (Požgaj et al., 1993).

Dalším významným odvětvím zpracování dřeva, které se o barvu intenzivně zajímá, je termická úprava, při které vlivem působení vysoké teploty a vlhkosti dochází někdy k nepatrným, jindy výrazným barevným změnám.

### 3.4.1 Teorie barvy

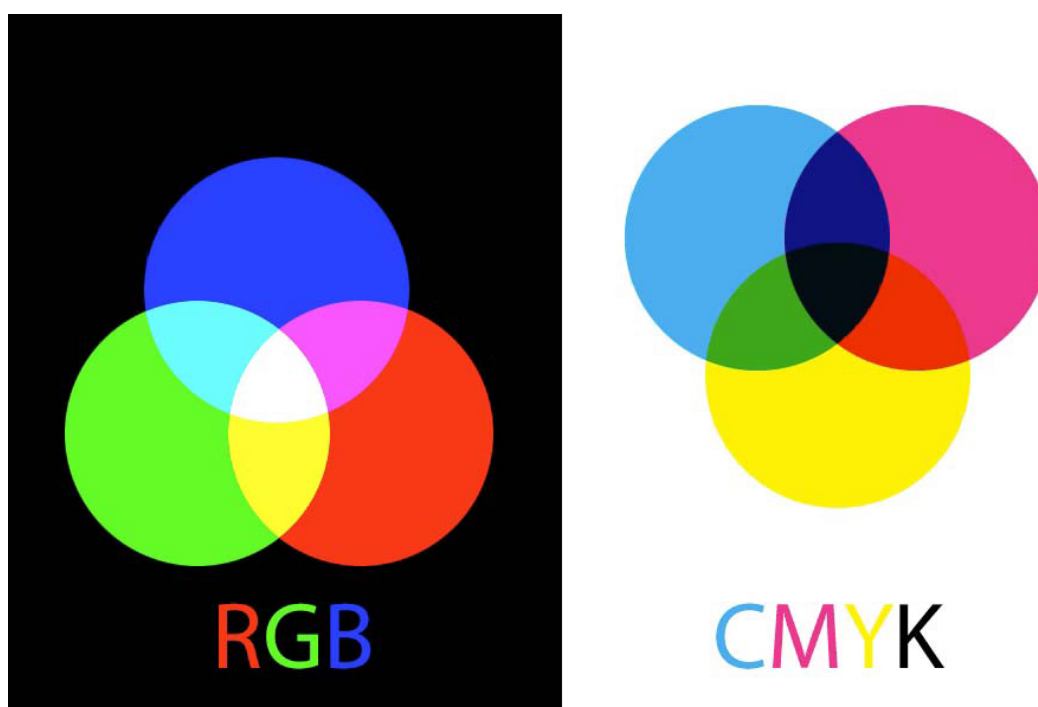
Barvou rozumíme odraženou část světelného spektra elektromagnetického vlnění, jejíž spodní hranice leží mezi 360 a 400 nm a její horní hranice mezi 760 a 830 nm. Tímto je tedy vymezena ta část záření, která je lidským okem viditelná a kterou nazýváme světlo. Barvu předmětu tedy vidíme proto, že světlo, které na jeho povrch dopadá, se částečně odrazí. A právě ta odražená část spektra, podle konkrétní vlnové délky určuje viditelnou barvu (Obr. 10). Extrémním příkladem jsou dokonale bílé předměty, které odrážejí veškeré světlo, naopak ty černé ho všechno pohlcují a přeměňují jej na tepelnou energii. (Ohta a Robertson, 2005)



Obr. 10 Barevné spektrum ([www.ox.ac.uk](http://www.ox.ac.uk), 2019)

---

Před samotným zkoumáním barev je potřeba rozlišit, zda se zabýváme barvami světelnými nebo pigmentovými, protože pro každou z nich totiž platí úplně jiná pravidla a existují k nim rozličné teorie. Zatímco model RGB pro světelné barvy, jež se využívá především v zobrazovací technologii, je složen z červené (R), zelené (G) a modré (B), které společně dávají bílé světlo, CMYK model je sestaven z barev pigmentových a skládá se z azurové (C), purpurové (M) a žluté (Y), potažmo je doplněn o černou (K) (Obr. 11). S tím se nejčastěji setkáváme například u inkoustových tiskáren.



**Obr. 11 Srovnání barev světelných (RGB) a pigmentových (CMYK)**

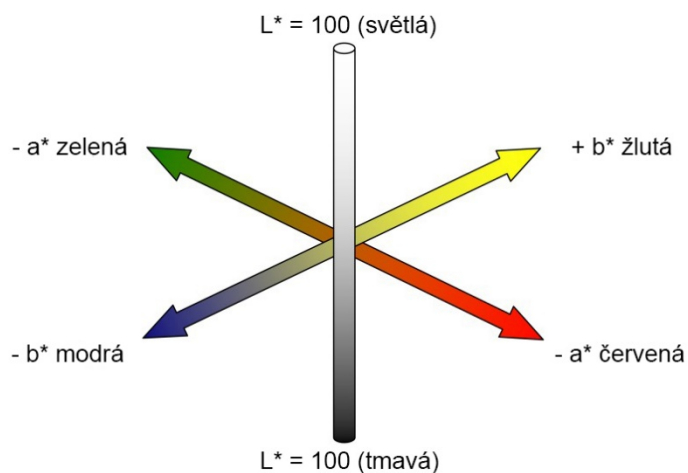
**([www.creativepro.com](http://www.creativepro.com), 2019)**

Podle tradiční teorie barev, kterou v 18. století poprvé sepsal J. W. Goethe, pracujeme s kruhem o dvanácti základních barvách. Nalezneme zde barvy primární (červená, žlutá a modrá), sekundární – jednotlivé kombinace barev primárních (oranžová, zelená a fialová) a terciální – kombinace jedné primární a jedné sekundární barvy (červenooranžová, červenofialová, žlutooranžová, žlutozelená, modrofialová, modrozelená). Díky tomuto kruhu můžeme podle pozice jednotlivých barev snadno vytvářet jejich kombinace podle toho, jaké interakce chceme dosáhnout. Tedy zda chceme vytvořit kontrast nebo harmonii. (Schindler a Goethe, 1970)

### 3.4.2 Způsoby měření barvy

Barva může být hodnocena dvěma základními způsoby, a to subjektivně, tedy vizuálním zhodnocením daného povrchu, anebo pomocí již zmíněné kolorimetrie. U každé barvy lze naměřit její barevný tón, sytost a jas.

Nejčastěji se k měření barvy používá spektrometr nebo kolorimetr a naměřené hodnoty se poté interpretují pomocí vhodné trichromatické soustavy. Těmi nejběžnějšími jsou: Munsell, RGB, XYZ nebo CIE  $L^*a^*b^*$  (Obr. 12).



Obr. 12 Prostorové schéma soustavy CIE  $L^*a^*b^*$  (Li et al., 2005)

Spektrometr funguje na principu rozložení reflexního spektra dle vlnových délek pomocí difrakční mřížky. Toto rozložené světlo dále dopadá na řadu fotodetektorů, jež z obdržené informace vytvoří elektrický signál (Obr. 13).



Obr. 13 Princip fungování spektrofotometru (Panák, 2015)



---

Pro účely laboratorního měření barevnosti je nejdůležitější definovat tři základní elementy – zdroj světla, pozorovaný objekt a pozorovatele. Zdrojem světla rozumíme zdroj standardizovaný CIE, jež je definován parametrem spektrální intenzity vyzařování, což v podstatě znamená teplotu chromatičnosti daného zdroje. V praxi se zpravidla jedná o halogenovou žárovku či LED diody s označením D50. (Hunt, 1998)

Pro zjištění změny barevnosti se používá následující vzorec:

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2}$$

kde:

$\Delta L$  – světlost

$a$  – souřadnice červené barvy

$b$  – souřadnice žluté barvy

### 3.4.3 Výzkumy v oblasti měření barvy

Celá dlouhá léta se věda pokouší vysvětlit barvy, jejich vzájemné působení – kontrast a harmonii, avšak ani snaha o přesné matematické vyjádření barevných zákonitostí se nezdá být plně dostačující. Pravdou tedy zůstává, že barvu nelze zkoumat jen tak izolovaně od jejího nositele. Proto každá vědecká disciplína vyjadřuje barvy podle svých měřítek. Vědci se také shodují, že u barev velice záleží na osobní preferenci pozorovatele, proto je potřeba brát v úvahu například jeho věk, pohlaví, ale i třeba kulturní zvyklosti. (Westland et al., 2007)

Co se týče používání trichrometrické soustavy CIE  $L^*a^*b^*$ , tak ta našla své uplatnění v mnoha odvětvích průmyslu, z nichž za zmínku stojí zejména textilní průmysl, výroba a zpracování plastů, tvorba povrchových úprav (ASTM D2244 – 05 2005).

Tuto soustavu ve svém výzkumu použili i Mosedale et al. (1995). Tento výzkum se opírá o dřívější práce Klumpers et al. (1994) a Janin (1987) a zkoumá přírodní barvu dvou hlavních evropských druhů dubového dřeva, konkrétně *Quercus petraea* Matt. a *Quercus robur* L..

---

## 3.5 Měření lesku

Lesk je jednou z optických vlastností povrchů materiálů, a přestože jej máme na očích každý den, nijak zvláštní pozornost mu samostatně nevěnujeme, protože je náš mozek naučen vnímat každý povrch a veškeré jeho optické vlastnosti jako jeden celek. V běžných podmínkách je lesk závislý na několika okolnostech, mezi něž patří především osvětlení a úhel pohledu (Hunter, 1937).

Co se týče dřevozpracujícího průmyslu, je zkoumání lesku v praxi primárně výsadou oblasti povrchové úpravy dřeva. Jeho měření a posuzování upravuje ČSN EN ISO 2813 z roku 2016.

### 3.5.1 Teorie lesku

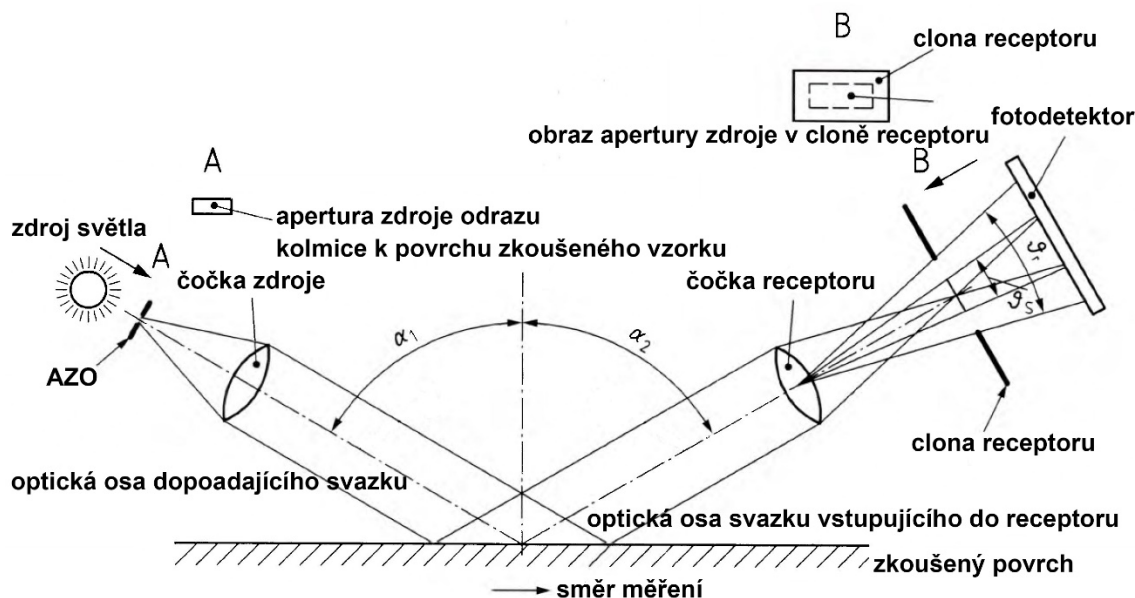
Lesk je dle ČSN EN ISO 2813 (2016) charakterizován jako optická vlastnost povrchu, díky níž je schopen zrcadlově odrazet světlo. Norma uvádí hodnotu lesku jako číslo, konkrétně stonásobek poměru světelného toku, který se odrazí od vzorku a světelného toku, který se odrazí od povrchu skla. Toto sklo má při vlnové délce 587,6 nm index lomu 1,567, a to ve směru zrcadlového odrazu pro specifikovaný úhel odrazu a specifikované úhly apertur zdroje světla a receptoru. Jednotkou lesku je 1 GU (Gloss units) a jeho hodnota je vždy celé zaokrouhlené číslo.

Ačkoliv norma počítá s leskem jako s číselnou hodnotou, uvádí i praktické použití stupnice sedmi stupňů lesku, pro které se používají názvy: vysoký lesk, lesk, hedvábný lesk, pololesk, saténový lesk, mat a hluboký mat (ČSN EN ISO 2813, 2016).

Z fyzikálního hlediska je tedy povrch tím lesklejší, čím méně je světlo v něm odražené rozptýleno a analogicky je povrch tím matnější, čím je difúze světla v něm odražená větší.

### 3.5.2 Způsoby měření lesku

Měření lesku dřeva upravuje ČSN EN ISO 2813 (2016), která uvádí, že lesk měříme vždy pod úhly 20°, 60° a 85°. Dříve se lesk určoval orientačně pomocí vzorníku, dnes jej nejen v laboratorních podmínkách měříme pomocí reflektometrického zařízení – leskoměru. Ten pracuje na principu odražení a opětovném přijetí paprsku světla pod předepsaným úhlem, přičemž vyhodnocení probíhá pomocí fotodetektoru (Obr. 14).

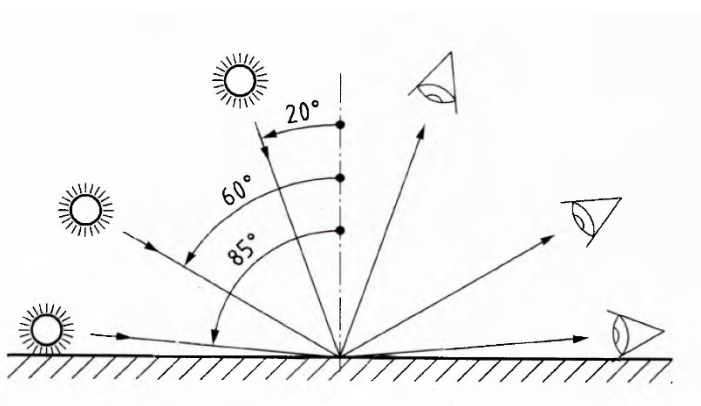


Obr. 14 Dráha svazků paprsků v leskoměru (ČSN EN ISO 2813, 2016)

Norma dále udává doporučení, jaký úhel pro konkrétní měření zvolit. Ideální je začít u zkušebního vzorku s univerzálním úhlem  $60^\circ$  a podle naměřené hodnoty pak zvolit optimální variantu. To se především týká případů, kdy je potřeba měřit povrch vysoce lesklý nebo naopak vysoce matný, kdy krajní úhly poskytují lepší rozlišení a tím i přesnější výsledky.

Tedy to znamená (Obr. 15):

- $20^\circ$  pro měření vysokého lesku
- $60^\circ$  pro měření běžných povrchů
- $85^\circ$  pro měření matného povrchu



Obr. 15 Úhly měření lesku (ČSN EN ISO 2813, 2016)

---

### 3.5.3 Výzkumy v oblasti měření lesku

Obvykle se s měřením lesku, jako součástí výzkumů v rámci dřevozpracujícího průmyslu setkáváme v souvislosti s posuzováním optických vlastností dřeva s aplikovanou povrchovou úpravou nebo pokud bylo termicky modifikováno.

Leskem obecně se zabýval Richard S. Hunter, který ve své práci z roku 1937 píše o metodách, jak lesk určovat. Poskytuje ucelený pohled na jednotlivé typy lesku, způsoby, jak jej měřit a i jednotlivá zařízení, jež byla k těmto měřením historicky používána.

A. Sikora (2016) zabýval měřením lesku v rámci své diplomové práce, ve které zkoumal vliv urychleného stárnutí na kvalitu povrchové úpravy dřeva upraveného nátěrovými látkami.

Baysal et al. (2014) zkoumali fyzikální charakteristiky termicky upraveného dřeva buku východního (*Fagus orientalis* Lipsky), v rámci něhož posuzovali mimo jiné i změnu barvy a lesku testovaných vzorků.

Ve stejném roce provedli Bekhta et al. (2014) výzkum lesku tepelně zhuštěného dřeva olše (*Alnus glutinosa* Goertn.), buku (*Fagus sylvatica* L.), břízy (*Betula verrucosa* Ehrh.) a borovice (*Pinus sylvestris* L.) pro výrobu dých.

## 4 Metodika práce

Na základě stanovených cílů jsem se rozhodla metodiku výzkumu pro mou diplomovou práci rozdělit následujícím způsobem:

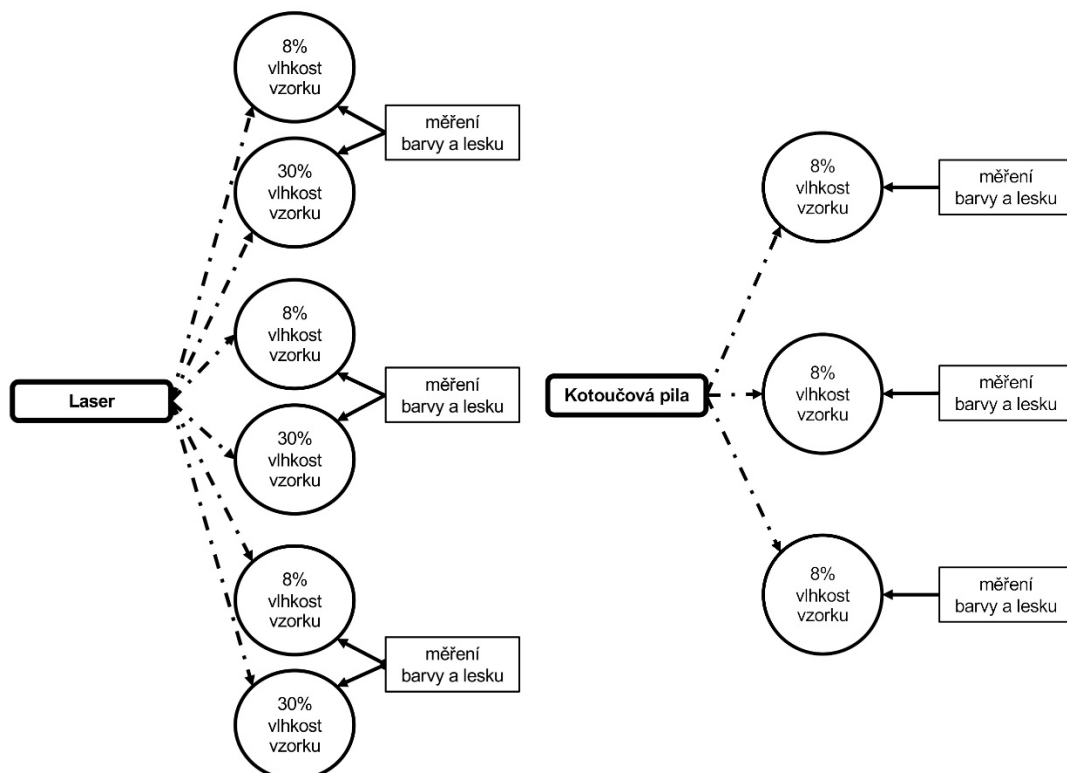
Zjištění vlivu vybraných faktorů:

1. Stroj: Laser, Formátovací kotoučová pila
2. Vlhkost vzorků při řezání: 8%, 30%

Na sledované vlastnosti dřeva, kterými jsou:

1. Barva řezané plochy
2. Lesk řezané plochy

Všechny proměnné faktory jsou znázorněny v následujícím schématu (Obr. 16), ze kterého vyplývá, že v konečné fázi dostaneme 3 varianty.



Obr. 16 Kategorizace souborů zkušebních těles

---

## 4.1 Použitý materiál

Zvoleným materiálem pro výzkum bylo standardní dubové řezivo (*Quercus robur*, L.) bez suků a jiných vad, z něhož bylo nařezáno 40 vzorků o rozměrech 40 x 100 x 30 mm (š x d x v). První sada vzorků při vlhkosti 8% a druhá při vlhkosti 30% (BNV).

## 4.2 Strojní vybavení

Pro možnosti srovnání řezání dřeva konvenčním a nekonvenčním způsobem obrábění byly zvoleny dva zástupci obou skupin strojů. Na straně inovovaného přístupu ke zpracování dřeva je moderní laserová výrobní linka, zatímco na straně druhé stojí mainstreamově používaná kotoučová formátovací pila.

### 4.2.1 Formátovací kotoučová pila

Pro řezání dřeva tradiční metodou byla zvolena formátovací kotoučová pila typu SCM Class si 300 od firmy PANAS, spol. s r.o. (Obr. 17, Tab. 2), která je určena k formátování deskových materiálů jak ze dřeva, tak na bázi dřeva. Výrobce udává přesnost +/- 0,005 mm na celou délku řezu. Pojezdový stůl z lehké hliníkové slitiny má délku 3 200 mm. ([www.panas.cz](http://www.panas.cz), 2019)



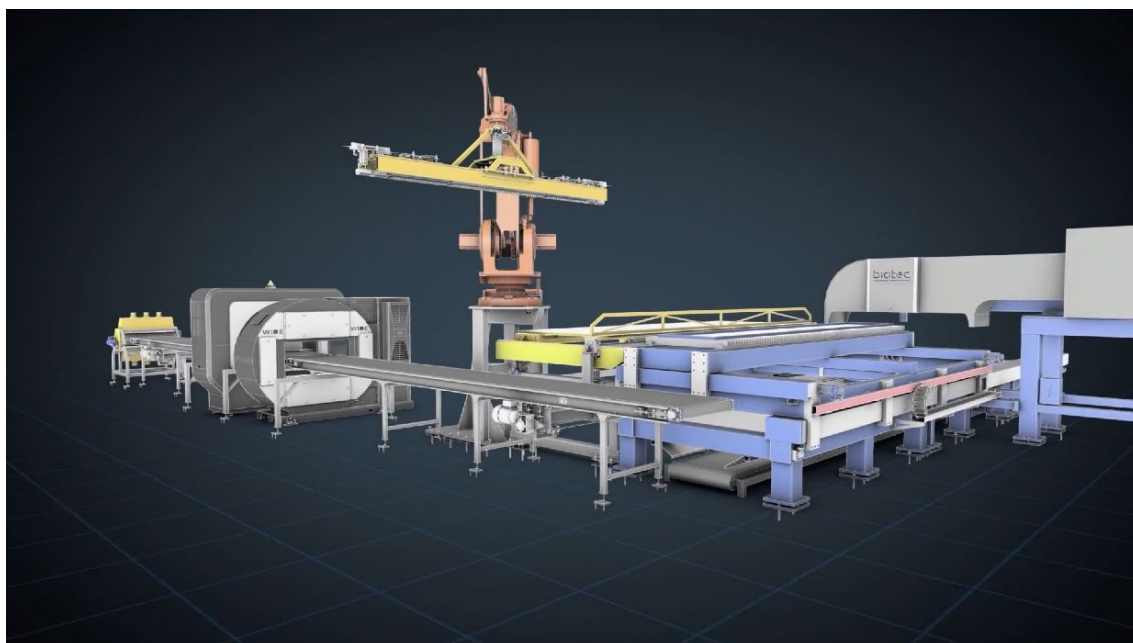
Obr. 17 Formátovací kotoučová pila Class si 300 (Panas, 2019)

Tab. 2 Parametry formátovací kotoučové pily Class si 300 (Itálie)

Výkon motoru [kW]	Otáčky [ot/min]	Maximální výška řezu [mm]	Rok výroby
4 (5)	4 000	100	2012

#### 4.2.2 Laser

Pro řezání dřeva nekonvenční metodou byla zvolena laserová výrobní linka BLT WoodCut od firmy Biatec Laser Technology s.r.o. (Obr. 18, Tab. 3), která se na průmyslová laserová zařízení přímo specializuje ([www.directindustry.com](http://www.directindustry.com), 2019). Byla speciálně navržena pro zpracování suchého i mokrého řeziva (až do 80%) s pokročilou automatizací pořezu. Je vybavena systémem 3D skenování povrchu materiálu včetně hloubkového rentgenového snímání dřeva, a to s maximální možnou úrovní automatizace. Největší důraz je zde kladen na zefektivnění výroby, minimalizaci odpadu a zvýšení kvality výrobků ([www.lesprom.com](http://www.lesprom.com), 2019).



Obr. 18 Laser BLT WoodCut (Biatec Laser Technology, 2019)

Tab. 3 Parametry laserové výrobní linky BLT WoodCut (Slovensko)

Výkon [kW]	Vlhkost řezaného materiálu [%]	Tloušťka řezaného materiálu [mm]	Šířka řezné spáry [mm]	Pracovní rovina	Rok výroby
5	0 - 80	až 80	0,3	X-Y	2017

## 4.3 Přístrojové vybavení

Během prováděných měření, na základě kterých následně proběhla analýza změny barvy a lesku na řezaných plochách dubového dřeva, bylo pracováno s přístrojem pro měření barvy a s přístrojem pro měření lesku. K měření barvy byl použit běžný ruční spektrofotometr, se kterým byly naměřeny potřebné hodnoty CIE  $L^*a^*b^*$ . Pro měření lesku pod úhly  $20^\circ$ ,  $60^\circ$  a  $85^\circ$  byl použit běžný leskoměr. Oba přístroje byly před započítím každého měření zkalibrovány dle pokynů výrobce.

### 4.3.1 Spektrofotometr

Pro měření barvy byl použit ruční přenosný spektrofotometr Konica Minolta CM-600d (Obr. 19, Tab. 4), který je vhodný pro měření vzorků středních až větších rozměrů. Povrch takových vzorků může být rovný nebo zakřivený. Pro interpretaci naměřených hodnot využívá mimo jiné i systém souřadnic  $L^*a^*b^*$ . ([sensing.konicaminolta.us](http://sensing.konicaminolta.us), 2019)



Obr. 19 Spektrofotometr Konica Minolta CM-600d (Konica Minolta, 2019)

Tab. 4 Parametry spektrofotometru Konica Minolta CM-600d (USA)

Průměr čočky [mm]	Rozsah vlnové délky [nm]	Oblast měření [mm]	Kolorimetrická data	Rok výroby
40	400 – 700 (po 10)	Ø 8 / Ø 11	$L^*a^*b^*$ , $L^*C^*h$ , Hunter Lab, Yxy, XYZ, Musell	2012



---

### 4.3.2 Leskoměr

Pro měření lesku byl použit leskoměr MG268-F2 od firmy KSJ (Obr. 20, Tab. 5), který měří lesk povrchu pod třemi úhly – 20°, 60° a 85°. Ten je určen pro měření lesků povrchů různých materiálů, z nichž mimo dřevo stojí za zmínku například plasty, mramor, kovy, granit nebo dlaždice. Odraz je měřen v jednotkách GU (Gloss Units) pod třemi zmíněnými úhly. Přístroj je vybaven vnitřní pamětí pro uložení až 10 000 výsledků jednotlivých měření ([www.calright.com](http://www.calright.com), 2019).



Obr. 20 Leskoměr KSJ MG268-F2 ([www.calright.com](http://www.calright.com), 2019)

Tab. 5 Parametry leskoměru KSJ MG268-F2 (Čína)

Rozsah [GU]	Odchylka [%]	Oblast měření [mm]	Úhel dopadu [°]	Rok výroby
0 ~ 199,9 ~ 2000	± 1,5	9x10, 9x16, 5x39	20, 60, 85	2012

### 4.4 Softwarové vybavení

K zaznamenávání údajů z jednotlivých měření byl použit tabulkový procesor Microsoft Excel 2013 (Microsoft, Redmont, Washington, Spojené státy americké).

K vyhodnocení výsledků analýz naměřených hodnot byl použit software STATISTICA 13 (Statsoft Inc., Tulsa, Oklahoma, Spojené státy americké).

---

## 4.5 Příprava zkušebních vzorků

Pro výzkum byly použity 2 sady vzorků po 20 ks. Ty byly všechny nařezány na laserové výrobní lince. První sada byla nařezána ze suroviny o vlhkosti 8%, druhá ze suroviny o vlhkosti 30% (Obr. 21).

Rozměr vzorků byl: 40 x 100 x 30 mm (š x d x v) a všechny byly nejprve pečlivě označeny tak, aby nemohlo dojít k jejich záměně.

U každého vzorku byly před započítím měření zjištěny přesné rozměry (dvě desetinná místa) a hmotnost, aby bylo možné vypočítat jeho hustotu.



**Obr. 21 Dvě sady vzorků (vlevo 8% vlhkost, vpravo 30% vlhkost)**

Po provedení všech potřebných měření byly vytvořeny referenční vzorky rozřezáním stávajících vzorků kotoučovou pilou tak, že bylo z každé strany vzorku odříznuto 5 mm materiálu. Nový rozměr vzorků byl tedy 30 x 90 x 20 mm (š x d x v). Poté se pokračovalo s druhou sérií měření.

Mezi jednotlivými měřeními byly všechny vzorky uchovávány v klimatizační skříni.

---

#### 4.5.1 Vzorky řezané laserem

Vzorky byly nařezány na laserové výrobní lince. První sada vzorků byla nařezána ze suroviny o vlhkosti 8%, druhá při 30% vlhkosti. Řezivo bylo nejprve zkontrolováno rentgenem, aby mohl řídicí systém zaznamenat veškeré vnitřní vady ve dřevě. Následně byl zkontrolován povrch řeziva pomocí 3D skeneru tak, aby byly vyhodnoceny i vady povrchové, a to především suky. Software následně zanalyzoval veškeré dostupné informace o řezivu a sestavil ideální nářezový plán, podle něhož se přířezy požadovaných rozměrů nařezou s maximální možnou výtěží.

Po fázi kontroly přišla na řadu fáze výrobní, tedy nařezání vzorků laserem. Řezání probíhalo při výkonu 5 kW, pohybu hlavičky rychlostí 3 m/min a s ohniskem v horní třetině obráběného materiálu.

#### 4.5.2 Vzorky řezané kotoučovou pilou

Referenční vzorky, byly nařezány formátovací kotoučovou pilou (Obr. 22) výkonu 4 000 ot/min, vybavenou standardním kotoučem pro podélné řezání tvrdého řeziva, ze vzorků nařezaných původně pomocí laseru. Použit byl ruční posuv materiálu tak, aby byla co možná nejvěrněji napodobena běžná praxe v truhlárnách.

Všechny vzorky řezané na kotoučové pile byly řezány při vlhkosti 8%, protože s řezáním mokrého řeziva se u tohoto typu stroje neuvažuje.



Obr. 22 Výroba referenčních vzorků na kotoučové formátovací pile

---

## 4.6 Zjištění hustoty a vlhkosti vzorků

V první fázi práce byla provedena měření ke zjištění hustoty a vlhkosti vzorků. K tomu bylo použito standardního laboratorního měřicího vybavení (Obr. 23). Vždy byla nejprve změřena první sada vzorků a posléze druhá v pořadí, v jakém byly vzorky na počátku označeny. Po skončení měření byly vzorky uloženy zpět do klimatizační komory.



Obr. 23 Zjišťování hustoty a vlhkosti vzorků v laboratoři

### 4.6.1 Zjištění hustoty

Ke zjištění hustoty vzorků byla použita norma ČSN EN 323 (1994), tedy jako podíl hmotnosti a objemu vzorku při dané vlhkosti. **Hustota byla stanovena na 690 kg/m<sup>3</sup>.**

Výpočet a vyjádření výsledků:

$$\delta_w = \frac{m_w}{a_w \cdot b_w \cdot l_w} = \frac{m_w}{V_w} \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Kde:

$m_w$  – hmotnost zkušební tělesa při dané vlhkosti  $w$  [kg]

$V_w$  – objem zkušební tělesa při dané vlhkosti  $w$  [m<sup>3</sup>]

$\delta_w$  – hustota zkušební tělesa při dané vlhkosti  $w$  [kg/m<sup>3</sup>]

$a_w, b_w, l_w$  – rozměry zkušební tělesa při dané vlhkosti  $w$  [m]

---

#### 4.6.2 Zjištění vlhkosti

Ke zjištění vlhkosti vzorků byla použita norma ČSN EN 322 (1994), tedy jako procentuální podíl hmotnosti vody, jež je ve vzorku obsažena a hmotnosti vzorku ve vysušeném stavu. **Vlhkost při měření byla 7,8%.**

Výpočet a vyjádření výsledků:

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

Kde:

$m_w$  – hmotnost zkušebního tělesa ve vlhkém stavu [g]

$m_0$  – hmotnost zkušebního tělesa ve vysušeném stavu [g]

$W$  – vlhkost [%]

(výsledek byl vyjádřen s přesností na 0,1%)

#### 4.7 Metodika měření barvy řezaných ploch vzorků

Poté, co byla zjištěna hustota a vlhkost vzorků, následovalo měření barvy. K měření byl použit ruční spektrofotometr Konica Minolta CM600d (Obr. 24). K interpretaci výsledků byla zvolena trichrometrická soustava CIE L\*a\*b\*. Záznamy byly zapisovány do tabulky v MS Excel. Veškeré měření probíhalo za standardních podmínek v laboratoři.

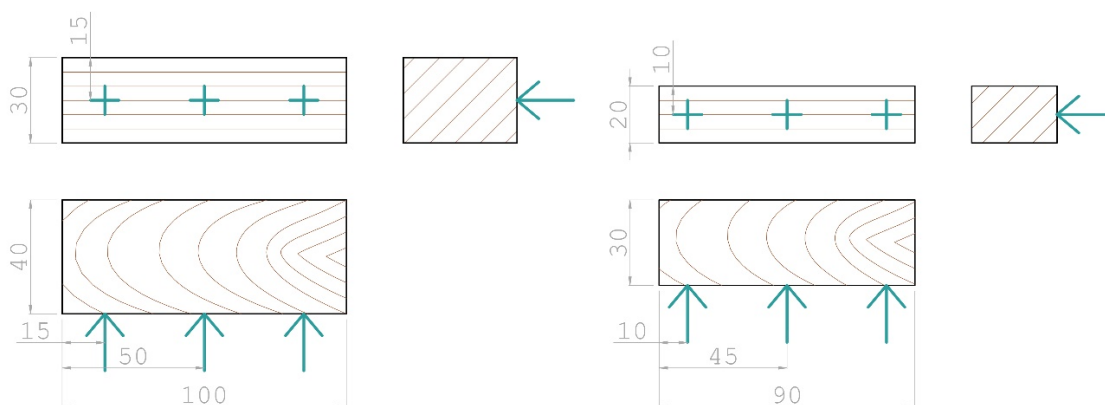


Obr. 24 Měření barvy vzorků v laboratoři

---

Postup měření barvy:

1. Vyjmutí vzorků z klimatizační skříně
2. Kalibrace přístroje (bílá barva)
3. Nastavení potřebných parametrů přístroje (CIE L\*a\*b\*)
4. Provedení série měření
  - a. měření byla prováděna vždy na jedné delší boční ploše vzorku
  - b. vždy byla provedena 3 jednotlivá měření – jedno na levé straně, druhé ve středu a třetí na pravé straně vzorku, vždy na podélné ose plochy (Obr. 25).
5. Zaznamenání všech naměřených dat
6. Následuje série měření lesku
7. Měření barvy se poté znovu opakuje s referenčními vzorky



**Obr. 25 Schématické znázornění měření barvy (vlevo zkušební vzorek, vpravo referenční vzorek)**

---

## 4.8 Metodika měření lesku řezaných ploch vzorků

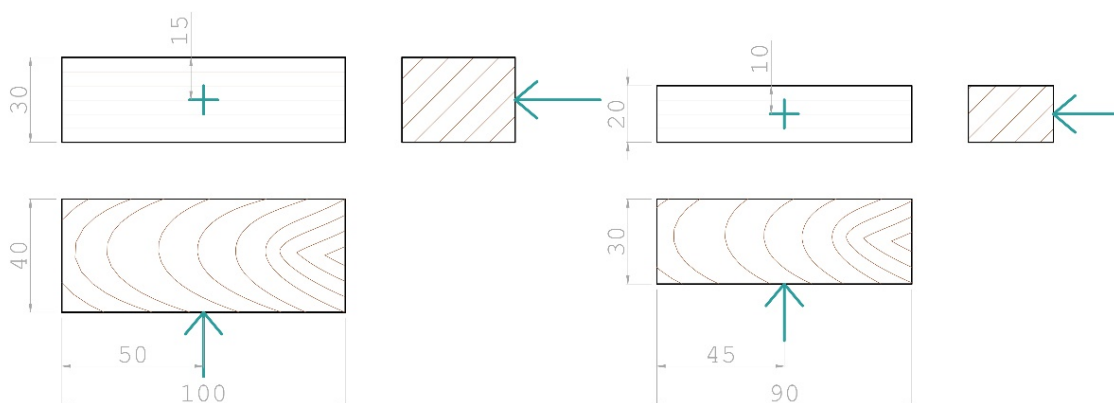
Po zjištění hustoty a vlhkosti vzorků, následovalo měření lesku jedné řezané plochy. K měření byl použit leskoměr KSJ MG268-F2 (Obr. 26). Lesk byl vždy měřen pod všemi úhly (20°, 60°, 85°) s respektováním doporučení uvedených v ČSN EN ISO 2813 (2016). Veškeré měření probíhalo za standardních podmínek v laboratoři.



**Obr. 26 Měření lesku vzorků v laboratoři**

Postup měření lesku:

1. Započetí měření po dokončení měření barvy
2. Kalibrace přístroje (černé sklo dle ČSN EN ISO 2813 (2016))
3. Nastavení potřebných parametrů přístroje (úhly 20°, 60°, 85°)
4. Provedení série měření
  - a. měření byla prováděna vždy na jedné delší boční ploše vzorku
  - b. měření bylo provedeno ve středu os plochy vzorku (Obr. 27).
  - c. měření bylo provedeno pro všechny tři úhly (20°, 60°, 85°)
5. Zaznamenání všech naměřených dat
6. Následuje vyhodnocení všech naměřených hodnot
7. Měření lesku se poté znovu opakuje s referenčními vzorky



**Obr. 27** Schématické znázornění měření lesku (vlevo zkušební vzorek, vpravo referenční vzorek)

## 4.9 Zpracování dat

Po dokončení všech měření bylo přistoupeno ke zpracování získaných hodnot. Veškeré údaje byly po celou dobu průběžně zapisovány do tabulek MS Excel 2013. Ke statistickým výpočtům byl použit software STATISTICA 13.

Podmínky zpracování dat:

- Pro výpočet hustoty vzorků dřeva byla použita ČSN EN 323 (1994).

$$\delta_w = \frac{m_w}{a_w \cdot b_w \cdot l_w} = \frac{m_w}{V_w} \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

- Pro výpočet vlhkosti vzorků dřeva byla použita ČSN EN 322 (1994).

$$W = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100 \text{ [%]}$$

- Pro výpočet změny barvy řezaných ploch dle vzorce (viz kapitola 3.4.2) byl použit vzorec:

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2}$$

- Rozdělení četností a následné potvrzení normality rozdělení bylo provedeno na hladině významnosti  $\alpha = 0,05 = 5\%$  pomocí Shapiro–Wilksova testu.
- K vyloučení odlehlých hodnot byl použit Dean-Dixonův test.



- Ke statistickému zhodnocení naměřených hodnot byla použita vícefaktorová analýza rozptylu ANOVA, která je součástí programu STATISTICA 13.
- Provedení Duncanova testu uspořádání průměrů a rozhodnutí o statistické významnosti rozdílů (pro  $p = 0,05$ )

Vyhodnocení statistické významnosti proběhlo podle následující tabulky (Tab. 6) od autorů Gaff a Gáborík (2009).

**Tab. 6 Vyhodnocení testovaných faktorů na základě průměrné hodnoty „P“ (Gaff a Gáborík, 2009)**

Hodnota P	Statistická významnost faktoru
$\emptyset P < 0,05$	vliv faktoru je statisticky významný
$\emptyset P > 0,05$	vliv faktoru není statisticky významný
$\emptyset P = 0,05$	vliv faktoru se nachází na hranici statistické významnosti
$\emptyset P = 0$	faktor působí
$\emptyset P < 0,001$	vliv faktoru je statisticky velmi významný
$0,001 < \emptyset P < 0,01$	vliv faktoru je statisticky středně významný
$0,01 < \emptyset P < 0,05$	vliv faktoru je statisticky málo významný

---

## 5 Výsledky práce a diskuse

Po provedených měření je možno konstatovat, že tato splnila svůj účel. Celé měření probíhalo za standartních podmínek a je třeba uvést, že během vyhodnocení celé práce nebyly zjištěny žádné odlehlé hodnoty. Rovněž možno uvést, že naměřené výsledky směřovaly k potvrzení hypotéz, tak jak jsou uvedeny v úvodu práce.

Postup vyhodnocení dat:

1. Výpočet hustoty vzorků dřeva (ČSN EN 323, 1994).

$$\delta_w = \frac{m_w}{a_w \cdot b_w \cdot l_w} = \frac{m_w}{V_w} \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

2. Výpočet vlhkosti vzorků dřeva (ČSN EN 322, 1994).

$$W = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100 \text{ [%]}$$

3. Výpočet změny barvy řezaných ploch dle vzorce (viz kapitola 3.4.2):

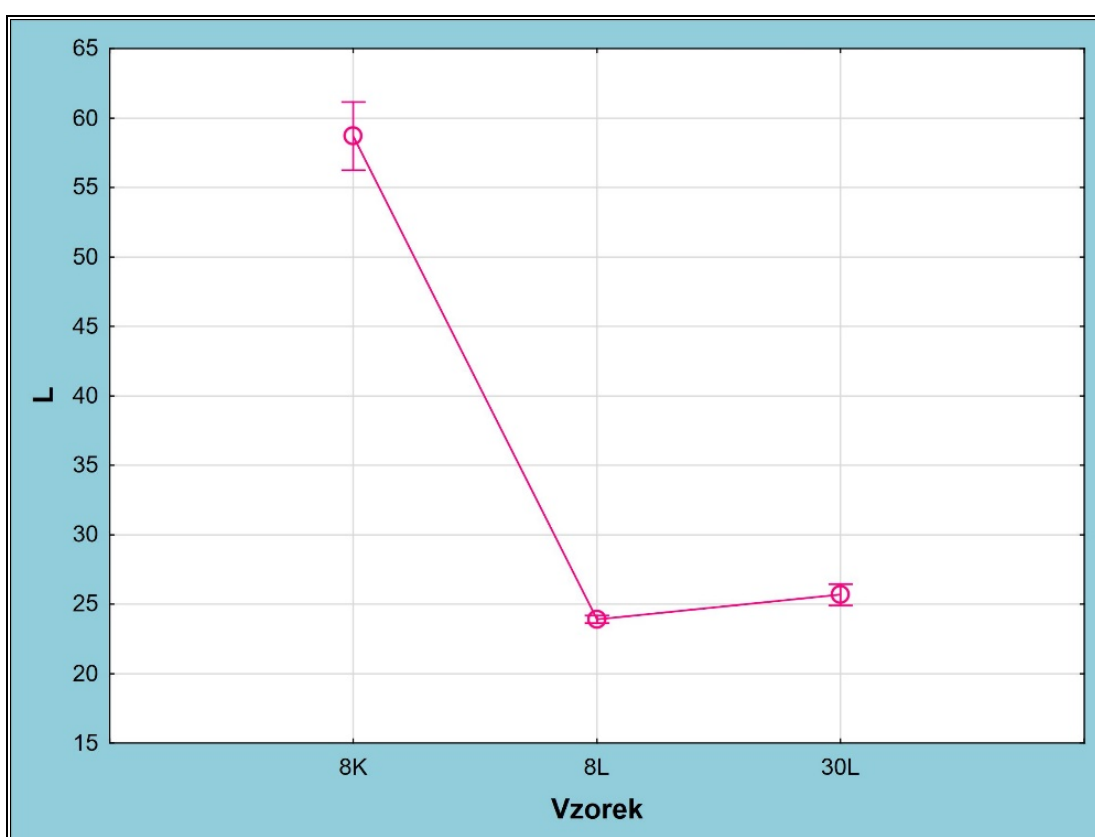
$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2}$$

4. Výpočet průměrných hodnot z jednotlivých měření
5. Přenos tabulek z MS Excel 2013 do programu STATISTICA 13.
6. Rozdělení četností – potvrzení normality rozdělení bylo provedeno na hladině významnosti  $\alpha = 0,05 = 5\%$  (Shapiro–Wilksův test)
7. Vyloučení odlehlých hodnot (Dean-Dixonův test)
8. Provedení vícefaktorové analýzy ANOVA pro srovnání jednotlivých typů řezání (8K, 8L, 30L) pro barvu
9. Provedení vícefaktorové analýzy ANOVA pro 3 faktory (řezný stroj, počáteční vlhkost, úhel) pro lesk
10. Duncanův test (všechny výsledky jsme vyhodnocovali na hladině významnosti  $p = 0,05$ )
11. Export vytvořených tabulek a grafů

## 5.1 Barva řezaných ploch

Z výsledků uvedených dále vyplývá, že na změnu barvy řezaných ploch vzorků měl nejvýznamnější vliv především typ řezání. Vliv byl prokázán i u dřeva řezaného laserem při různých vlhkostech. Na následujících obrázcích (Obr. 28 - 30) a tabulkách (Tab. 7 – 9) můžeme vidět změnu jednotlivých souřadnic v trichrometrické soustavě CIE L\*a\*b\*.

U hodnot souřadnice L\* můžeme pozorovat především velmi významný rozdíl mezi typem řezání, kdy pro kotoučovou pilu vykazují nejvyšší hodnoty. Oproti tomu počáteční vlhkost vzorků řezaných laserem se zde jeví jako téměř zanedbatelná.

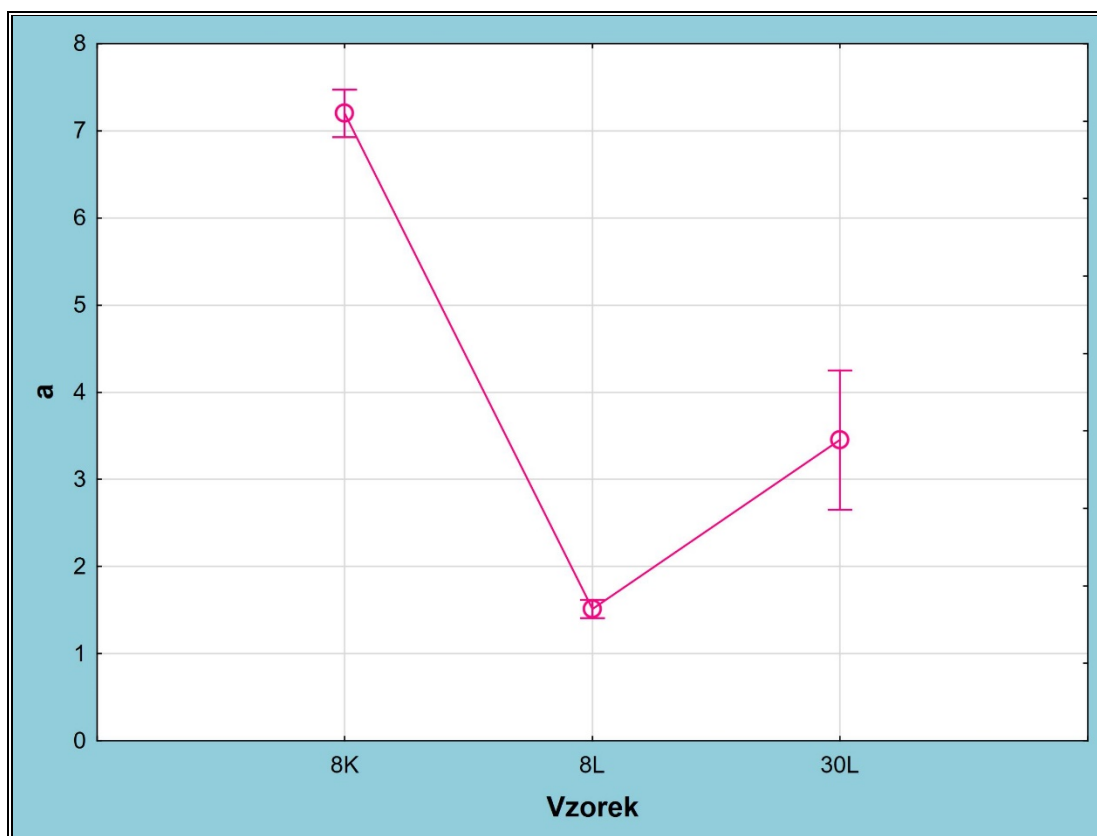


Obr. 28 Graf závislosti hodnoty L\* na typu vzorku

Tab. 7 Vliv typu vzorku na hodnotu L\*

Č:	Typ řezání	L průměr	L SEM	L -95,00 %	L +95,00 %	N
1	8K	58,709	1,177	56,245	61,172	20
2	8L	23,903	0,133	23,626	24,181	20
3	30L	25,678	0,366	24,913	26,443	20

Z hodnot souřadnice  $a^*$  je již jasně patrný rozdíl mezi řezáním suchého a mokrého dřeva laserem, zatím co u 8% vlhkosti jsou výsledky hodně podobné, u vlhkosti 30% je patrný veliký rozptyl naměřených hodnot. Nejvýše i v tomto případě leží hodnoty naměřené u vzorků řezaných kotoučovou pilou.

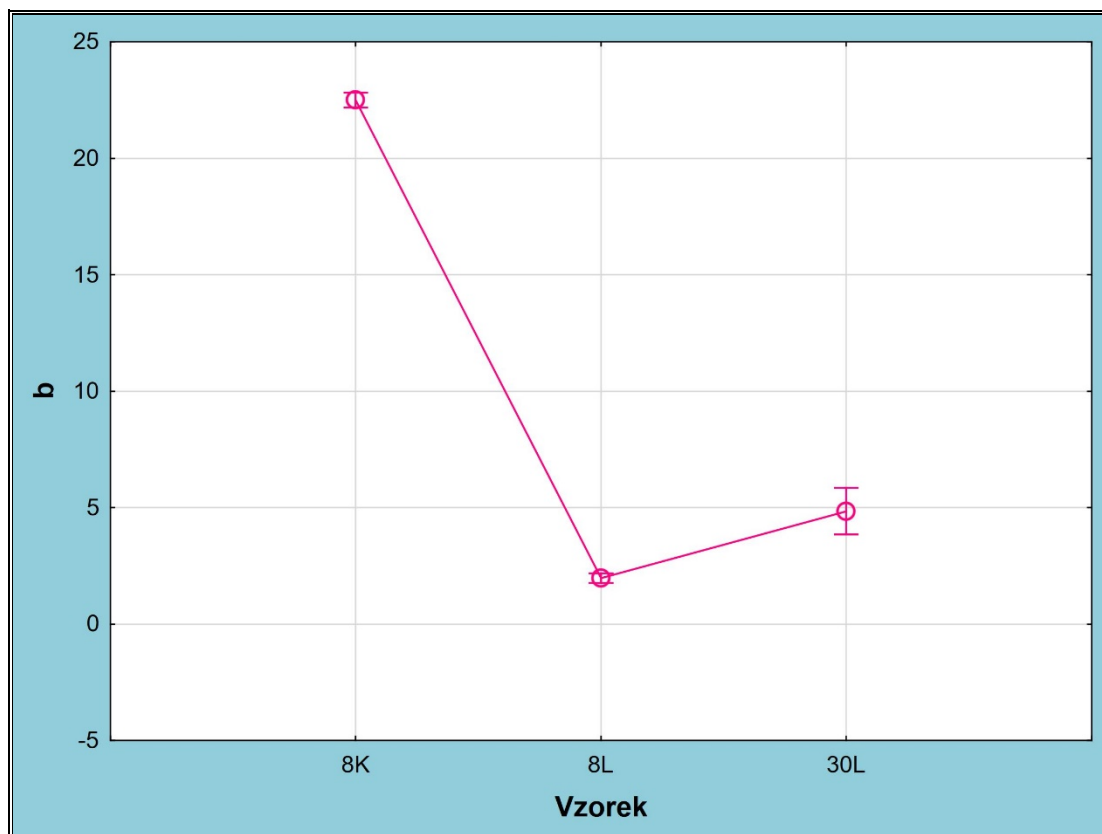


Obr. 29 Graf závislosti hodnoty  $a^*$  na typu vzorku

Tab. 8 Vliv typu vzorku na hodnotě  $a^*$

Č:	Typ řezání	a průměr	a SEM	a -95,00 %	a +95,00 %	N
1	8K	7,202	0,130	6,930	7,474	20
2	8L	1,514	0,050	1,409	1,619	20
3	30L	3,452	0,382	2,653	4,252	20

Pro hodnoty souřadnice  $b^*$  je opět charakteristické, že nejvyšších hodnot dosahují u kotoučovou pilou řezaných vzorků. Rozdíl mezi oběma vlhkostmi u vzorků řezaných laserem je znatelný, avšak nijak výrazný.

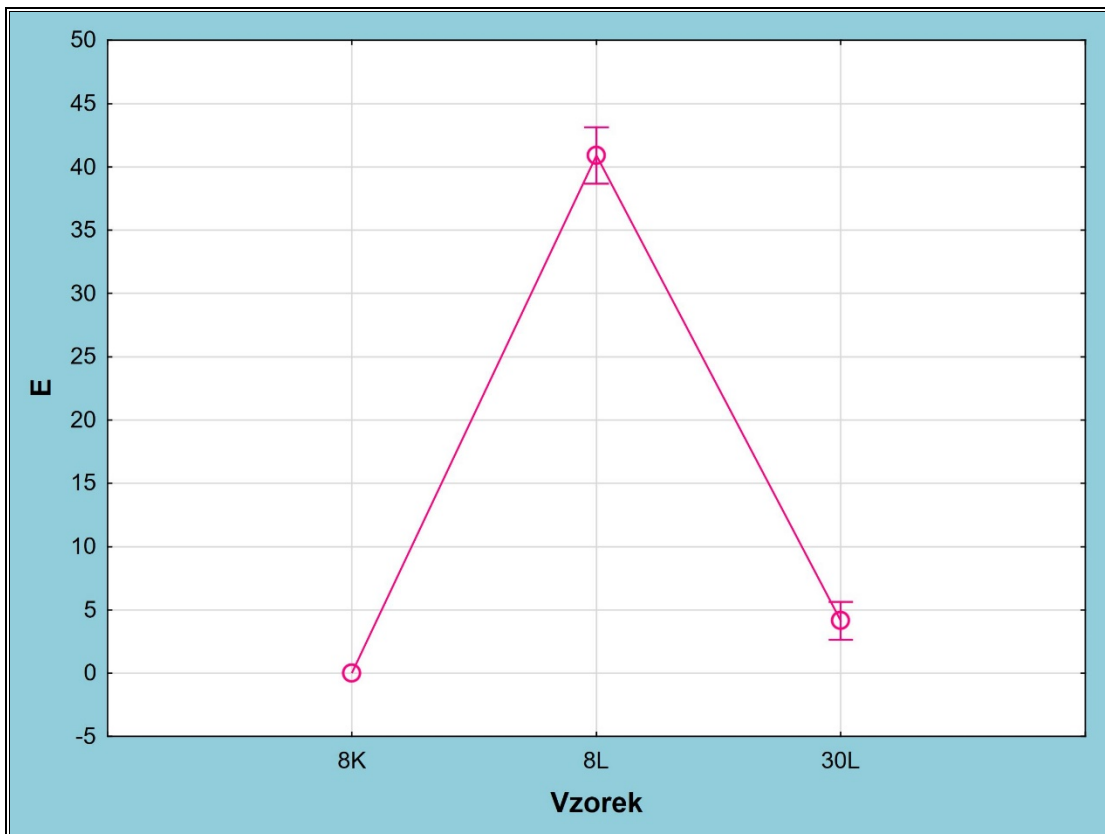


Obr. 30 Graf závislosti hodnoty  $b^*$  na typu vzorku

Tab. 9 Vliv typu vzorku na hodnotě  $b^*$

Č:	Typ řezání	b průměr	b SEM	b -95,00 %	b +95,00 %	N
1	8K	22,505	0,153	22,184	22,826	20
2	8L	1,977	0,101	1,766	2,187	20
3	30L	4,849	0,478	3,848	5,849	20

Celková změna barvy řezané plochy  $\Delta E$  je znázorněna v následujícím obrázku (Obr. 31) a tabulce (Tab. 10), kdy lze zkonstatovat, že nejvyšších hodnot dosahuje u vzorků řezaných laserem při vlhkosti 8%. Oproti tomu nebyly překvapivě zjištěny výrazné rozdíly změny barvy při řezání kotoučovou pilou a laserem při vlhkosti 30%.



Obr. 31 Graf závislosti hodnoty  $\Delta E$  na typu vzorku

Tab. 10 Vliv typu vzorku na hodnotě  $\Delta E$

Č:	Typ řezání	E průměr	E SEM	E -95,00 %	E +95,00 %	N
1	8K	0,000	-	-	-	20
2	8L	40,907	1,064	38,680	43,135	20
3	30L	4,150	0,711	2,663	5,637	20

V následujících tabulkách (Tab. 11 – 14) můžeme vidět, že se u většiny sledovaných parametrů projevil typ řezání jako statisticky velmi významný rozdíl. Výjimkou je již výše zmíněná hodnota  $L^*$ , která dosahuje při řezání suchého i mokrého dřeva laserem podobných hodnot. Jako statisticky dokonce velmi významný rozdíl se projevuje typ řezání při vlhkostech 8%.

**Tab. 11 Duncanův test pro závislost hodnoty  $L^*$  na typu vzorku**

Č:	Typ řezání	{1} 58,709	{2} 23,903	{3} 25,678
1	8K	-	0,000	0,000
2	8L	0,000	-	0,085
3	30L	0,000	0,085	-

**Tab. 12 Duncanův test pro závislost hodnoty  $a^*$  na typu vzorku**

Č:	Typ řezání	{1} 7,2017	{2} 1,5138	{3} 3,4523
1	8K	-	0,000	0,000
2	8L	0,000	-	0,000
3	30L	0,000	0,000	-

**Tab. 13 Duncanův test pro závislost hodnoty  $b^*$  na typu vzorku**

Č:	Typ řezání	{1} 22,505	{2} 1,9768	{3} 4,8485
1	8K	-	0,000	0,000
2	8L	0,000	-	0,000
3	30L	0,000	0,000	-

**Tab. 14 Duncanův test pro závislost hodnoty  $\Delta E$  na typu vzorku**

Č:	Typ řezání	{1} 0,0000	{2} 40,907	{3} 4,1502
1	8K	-	0,000	0,000
2	8L	0,000	-	0,000
3	30L	0,000	0,000	-

---

Změnou barvy se ve své práci zabývali i Buchelt a Wagenführ (2012), kteří uvádějí, jak je možné dosažený výsledek interpretovat (Tab. 15), a to dle práce Bieske (2007).

**Tab. 15 Hodnocení změny barvy (Buchelt a Wagenführ, 2007)**

	Hodnota $\Delta E$	Výsledný rozdíl
1	$\Delta E < 0,5$	Neviditelný rozdíl
2	$0,5 < \Delta E < 1$	Pozorovatelný rozdíl pouze pro cvičené oko
3	$1 < \Delta E < 2$	Pozorovatelný rozdíl, který je sotva postřehnutelný
4	$2 < \Delta E < 4$	Pozorovatelný rozdíl, který je jasně zřetelný
5	$4 < \Delta E < 5$	Výrazný barevný rozdíl
6	$5 < \Delta E$	Rozdíl vyhodnocen jako odlišná barva

Z tabulky vyplývá, že výsledná hodnota změny barvy pro suché dřevo  $\Delta E = 40,907$  značí, že vzorky řezané laserem se svou barvou liší od referenčních velmi významně, tedy zcela změnily svou barvu.

Oproti tomu vzorky řezané laserem za mokra dosáhly hodnoty změny barvy pouze na  $\Delta E = 4,150$ , tedy barevná změna je menší, avšak stále poměrně výrazná.

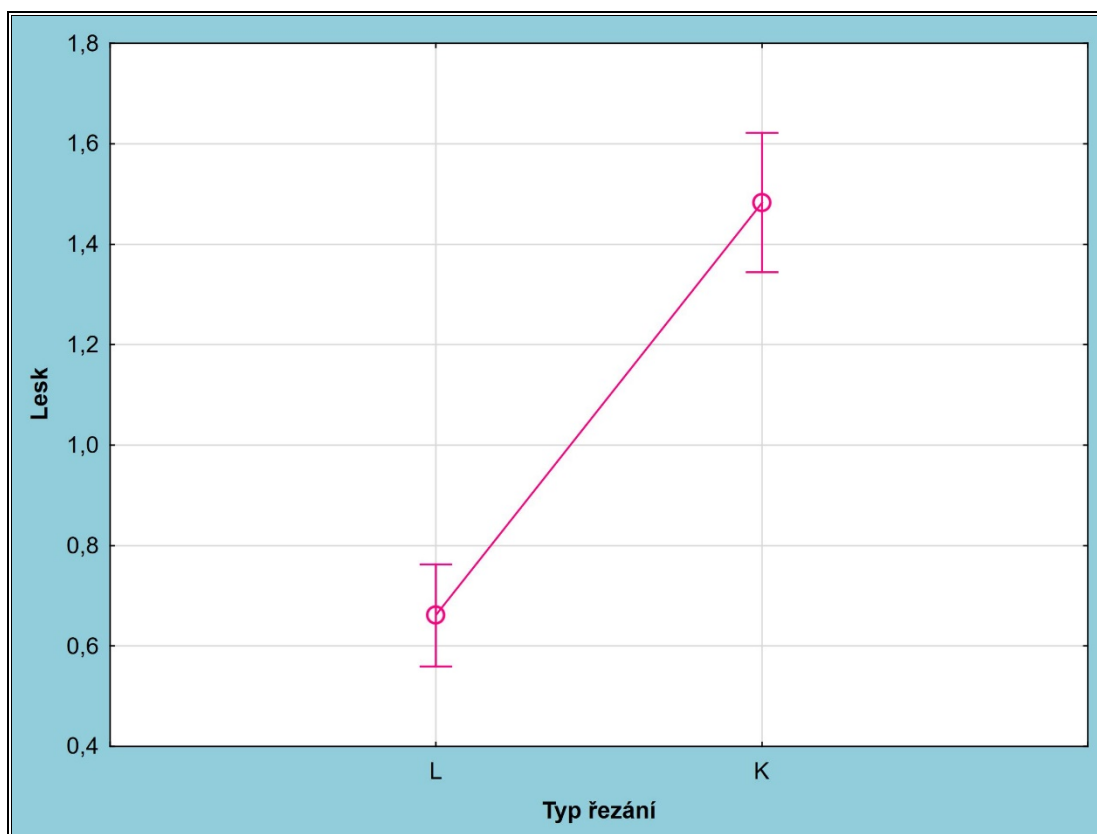
Dle zjištěných výsledků hodnoty  $L^*$ , která značí světlost, můžeme zhodnotit, že barevná změna u laserem řezaného dřeva je opravdu výrazná, tedy dřevo tmavne. Toto potvrzují i práce jiných autorů, které jsou k této problematice k dispozici.

Podobným tématem týkajícím se změnou barvy při řezání laserem se zabývali i Stepanov et al. (2010), kteří zkoumali změnu barvy papíru. Provedli sérii měření, ve které porovnávali různá nastavení laseru, aby byli schopni určit ideální konfiguraci.



## 5.2 Lesk řezaných ploch

Provedené měření potvrzuje závislost lesku na použitém stroji k řezání, jak je vidět na následujícím obrázku (Obr. 32) a v tabulce (Tab. 14). Hodnoty lesku vzorků vytvořených řezáním kotoučovou pilou dosahují více než dvojnásobku hodnot oproti vzorkům řezaných laserem.

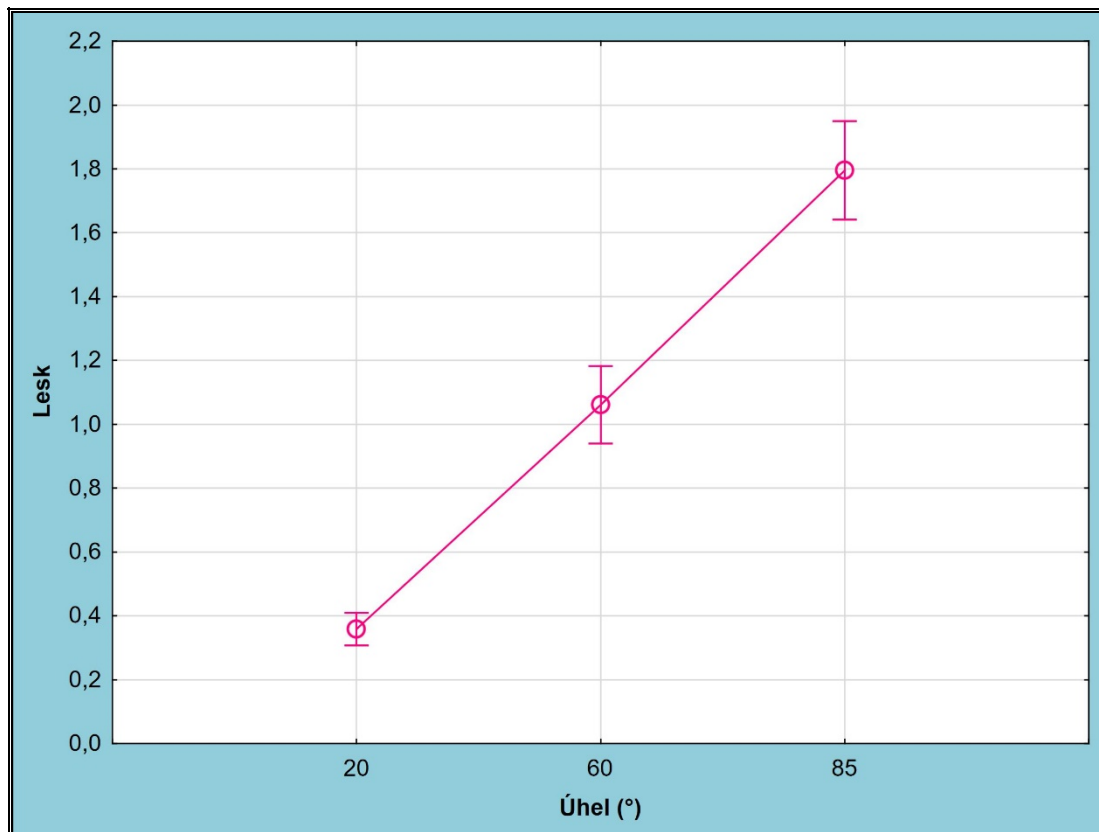


Obr. 32 Graf závislosti lesku na typu řezání

Tab. 16 Vliv typu řezání na lesk

Č:	Typ řezání	Lesk průměr	Lesk SEM	Lesk -95,00 %	Lesk +95,00 %	N
1	L	0,661	0,051	0,560	0,762	120
2	K	1,483	0,070	1,344	1,622	120

Na základě provedených měření lze také zkonstatovat, že hodnoty lesku jsou přímo úměrné úhlu jeho měření. Při měření pod úhlem 20° byly hodnoty nejnižší, zatímco měření pod úhlem 85° měření vykazovalo hodnoty až čtyřnásobné (Obr. 33, Tab. 17).

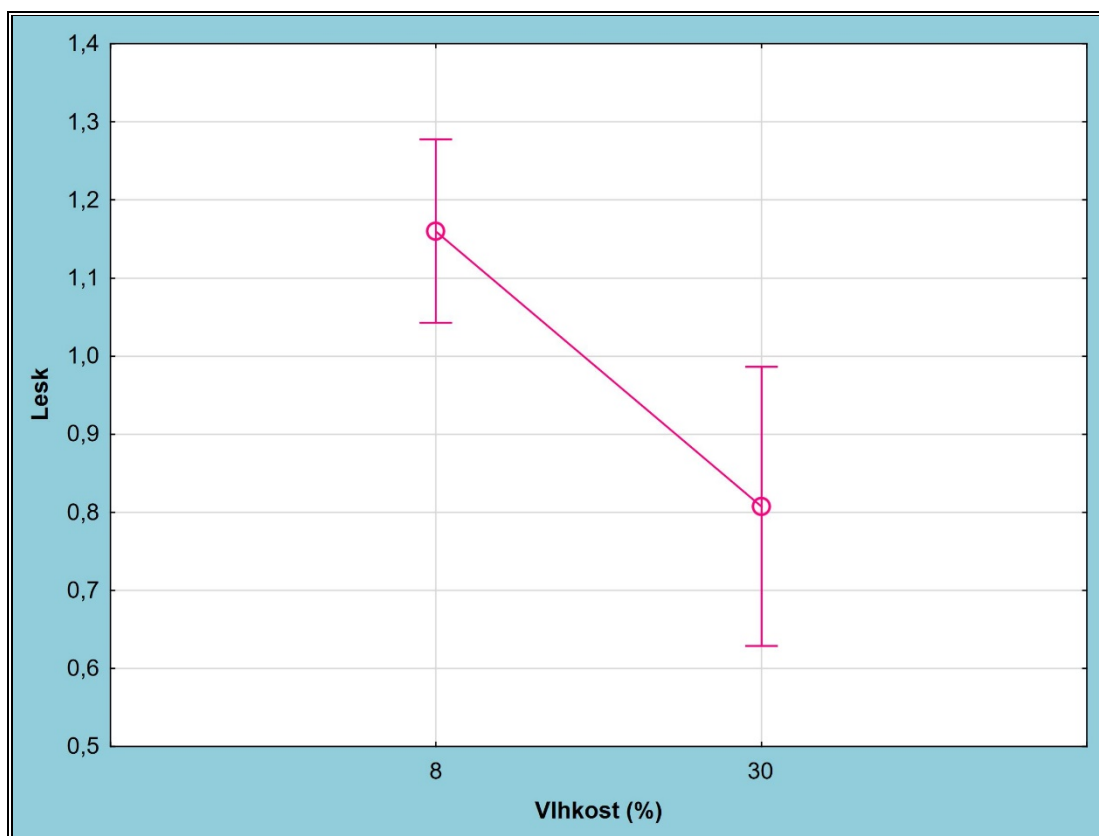


**Obr. 33 Graf závislosti lesku na úhlu měření**

**Tab. 17 Vliv úhlu měření na lesk**

Č:	Úhel [°]	Lesk průměr	Lesk SEM	Lesk -95,00 %	Lesk +95,00 %	N
1	20	0,358	0,026	0,307	0,410	80
2	60	1,061	0,061	0,940	1,182	80
3	85	1,796	0,077	1,642	1,950	80

Závislost lesku na počáteční vlhkosti dřeva při jeho řezání prokazatelně vyplývá z provedených měření (Obr. 34, Tab. 18). Zcela jednoznačně je dosahováno nejvyšších hodnot lesku při vlhkosti 8%, kdy hodnoty lesku při vlhkosti 30% vykazují výrazný pokles.



Obr. 34 Graf závislosti lesku na počáteční vlhkosti

Tab. 18 Vliv počáteční vlhkosti na lesk

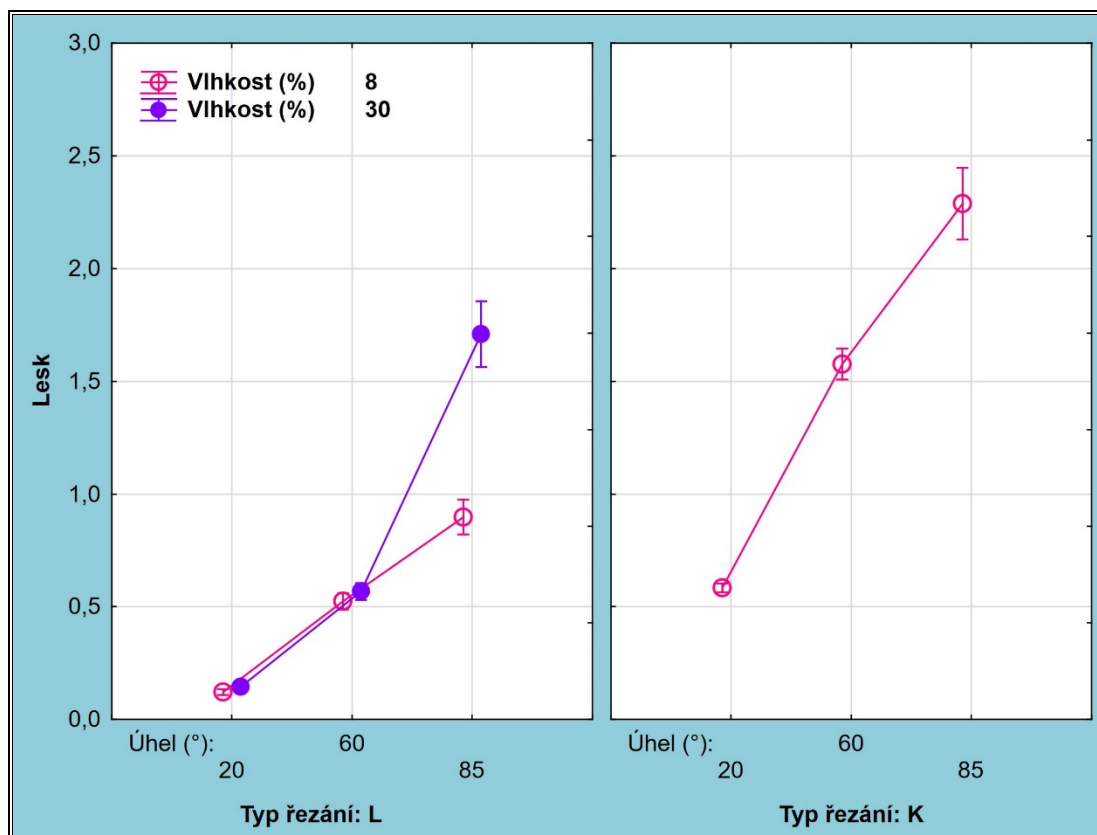
Č:	Vlhkost [%]	Lesk průměr	Lesk SEM	Lesk -95,00 %	Lesk +95,00 %	N
1	8	1,160	0,060	1,043	1,278	180
2	30	0,807	0,089	0,629	0,986	60

Při řezání laserem jsou hodnoty lesku v podstatě zcela totožné při obou vlhkostech (8% a 30%), a to při měření pod úhlem 20° a 60°. Oproti tomu provedená měření vykazala významný rozdíl hodnot lesku při jeho měření pod úhlem 85° v závislosti na vlhkosti dřeva. Hodnoty lesku při vlhkosti 30% byly až dvojnásobné oproti hodnotám při vlhkosti 8%. Výsledky zjištěné u vzorků řezaných kotoučovou pilou prokázaly velice významný nárůst hodnot lesku, a to postupně od úhlu 20°, přes úhel 60° až po úhel 85° a to v tomto vzestupném pořadí (Obr. 35, Tab. 19).

Nejvyšších hodnot lesku dosahují vzorky řezané pomocí kotoučové pily, a to pod všemi měřenými úhly.

Celkově nejnižšího lesku dosahuje dřevo, jež bylo nařezané laserem při jeho počáteční vlhkosti 8%.

Největšího rozptylu naměřených hodnot bylo dosaženo při měření lesku pod úhlem 85° u obou typů řezání, naopak nejmenší rozptyl pak vykazovaly hodnoty naměřené pod úhlem 20°.



Obr. 35 Graf závislosti lesku na počáteční vlhkosti a úhlu měření

**Tab. 19 Vliv počáteční vlhkosti a úhlu měření na lesk**

Č:	Typ řezání	Vlhkost [%]	Úhel [°]	Lesk průměr	Lesk SEM	Lesk -95,00 %	Lesk +95,00 %	N
1	L	8	20	0,122	0,006	0,109	0,134	20
2	L	8	60	0,524	0,017	0,488	0,560	20
3	L	8	85	0,898	0,037	0,821	0,976	20
4	L	30	20	0,145	0,010	0,125	0,165	20
5	L	30	60	0,568	0,018	0,530	0,605	20
6	L	30	85	1,709	0,070	1,564	1,855	20
7	K	8	20	0,583	0,009	0,565	0,602	40
8	K	8	60	1,577	0,034	1,508	1,646	40
9	K	8	85	2,288	0,078	2,130	2,447	40

Vliv vlhkosti se projevilo u všech zjišťovaných parametrů jako statisticky velmi významný, a to jak při řezání laserem, tak i kotoučovou pilou. Rovněž rozdíly zjištěné při měření lesku pod různými úhly se prokázaly jako statisticky relevantní.

Při vyhodnocení výsledků lesku řezaných ploch naměřených na vzorcích řezaných různými typy strojů se prokázal statisticky významný rozdíl s hodnotou  $P = 0,000$  při různých vlhkostech řezaného dřeva a úhlech měření (Tab. 20 – 22).

**Tab. 20 Duncanův test pro závislost lesku na typu řezání**

Č:	Typ řezání	{1} 0,66098	{2} 1,4829
1	L	-	0,000
2	K	0,000	-

**Tab. 21 Duncanův test pro závislost lesku na úhlu**

Č:	Úhel [°]	{1} 0,35833	{2} 1,0614	{3} 1,7961
1	20	-	0,000	0,000
2	60	0,000	-	0,000
3	85	0,000	0,000	-

**Tab. 22 Duncanův test pro závislost lesku na vlhkosti**

Č:	Vlhkost [%]	{1} 1,1601	{2} 0,80740
1	8	-	0,000
2	30	0,000	-

Po vyhodnocení závislosti všech proměnných faktorů, tedy typu řezání (laser nebo kotoučová pila), vlhkosti při řezání (8% a 30%) a úhlech měření (20°, 60°, 85°) ve vzájemné souvislosti lze učinit některé závěry. Zatímco při měření lesku řezané plochy vzorků řezaných laserem pod úhly 20° a 60° vykazuje proměnná (vlhkost) zanedbatelný vliv, tak pod úhlem 85° se prokázal statisticky významný rozdíl s hodnotou  $P = 0,000$  (Tab. 23).

**Tab. 23 Duncanův test pro závislost lesku na typu řezání, vlhkosti a úhlu**

Č:	Typ řezání	Vlhkost [%]	Úhel [°]	{1} 0,12167	{2} 0,52381	{3} 0,89823	{4} 0,14500	{5} 0,56786	{6} 1,7094	{7} 0,58333	{8} 1,5769	{9} 2,2884
1	L	8	20	-	0,000	0,000	0,744	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	L	8	60	0,000	-	0,000	0,000	0,538	0,000	0,437	0,000	0,000
3	L	8	85	0,000	0,000	-	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
4	L	30	20	0,744	0,000	0,000	-	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5	L	30	60	0,000	0,538	0,000	0,000	-	0,000	0,829	0,000	0,000
6	L	30	85	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-	0,000	0,064	0,000
7	K	8	20	0,000	0,437	0,000	0,000	0,829	0,000	-	0,000	0,000
8	K	8	60	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,064	0,000	-	0,000
9	K	8	85	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-

---

## 6 Závěr

Závěrem je možno jednoznačně zkonstatovat, že provedený výzkum splnil svůj účel, čímž bylo přispěno k závěrům celého rozsáhlého výzkumu. Na základě zpracování naměřených výsledků byly v podstatě zodpovězeny vytyčené otázky a potvrzeny pracovní hypotézy.

Potvrdilo se, což se možná dalo i očekávat, že použití laseru ve srovnání s klasickou kotoučovou pilou ve vztahu k barvě a lesku přináší velice zajímavé možnosti a inovace do problematiky řezání dřeva, což má samozřejmě podstatný vliv na výsledky celého výzkumu, který, troufám si říct, má a současně i bude mít do budoucna vliv na celý dřevozpracující průmysl.

Tak, jak je podrobně uvedeno v kapitolách věnovaných konkrétním výsledkům, dosažená „čísla“ prokazují, že je to právě laser, který je schopen cum grano salis řečeno se lehce vypořádat s otázkou vyšší vlhkosti dřeva, což je pro kotoučovou pilu svým způsobem nepřekonatelný problém. I když se to může zdát málo, tak tato skutečnost je základní a tou nejpodstatnější odpovědí na otázky, které byly vytyčeny v úvodu této mé práce.

Fakt, že laser lze použít s ohledem na výslednou barvu a lesk k řezání dřeva s vyšší vlhkostí než je schopna pila kotoučová, je zásadní informací pro praktické využití nejen závěrů této práce, ale věřím, že i pro využití celého výzkumu.

Jsem si vědoma skutečnosti, že mnou prováděný výzkum je jen dílčí součástí mnohem rozsáhlejšího výzkumu, což mne ale nemůže odradit od naznačení dalšího výzkumu v tomto směru. Jsem přesvědčena, že je nezbytné se ve vztahu k vlhkosti dřeva v návaznosti na stávající výzkum, věnovat praktickým dopadům problematice nasákavosti dřeva. Tento jev s otázkou vlhkosti dřeva přímo souvisí a jeho zkoumání může přinést další zajímavá zjištění a pro praxi důležité výsledky.

### 6.1 Přínos pro vědu

Tak jak je již výše uvedeno, mnou provedený výzkum potvrdil pracovní hypotézy, jež souvisí s otázkou změny barvy a lesku řezné plochy dřeva. S ohledem na skutečnost, že laser jako metoda řezání, jež je možno říci pořád ve svých počátcích, tak každý byť i drobný krok při zkoumání této metody přispívá k celkovému stále velice teoretickému výzkumu. Tak jak to nejen u nových věcí bývá, tak čím více toho o laseru zjišťujeme, tím



---

dospíváme k závěru, že toho stále více nevíme. Samozřejmě, že výše naznačená problematika nasákavosti je pouze jeden směr, kterým se určitě věda bude nadále ubírat.

## **6.2 Přínos pro praxi**

Zde je určitě na místě zkonstatování, že metoda řezání dřeva laserem je určitě mnohem finančně náročnější než metody klasické, tedy včetně řezání kotoučovou pilou. Jsem ale toho názoru, že již stávající poznatky potvrzují, že zejména při hromadné sériové výrobě se náklady vynaložené na pořízení laserové výrobní linky začínají brzo vracet. Byla by určitě na nejjeden samostatný výzkum otázka komparace metody řezání laserem a kotoučovou pilou z hlediska čistě ekonomického, ale jak už to u nových a super moderních zařízení bývá, pořizovací náklady a náklady na provoz a údržbu začínají poměrně rychle klesat v relativně krátkém čase. Je tedy pouze otázkou času, kdy si tato moderní zařízení budou moci „dovolit“ i střední či drobní podnikatelé v tomto oboru.

Nelze v žádném případě pominout i další nemalé výhody metody řezání laserem, kam zcela jistě můžeme zařadit na jedno z čelních míst otázku bezpečnosti práce.

---

## 7 Seznam použité literatury

ARAI T., H. KAWASUMI, D. HAYASHI, 1977: Studies on Laser Machining of Wood, *Mokuzai Gakkaishi*, № 23(7), pp. 317÷321.

BADONIA, P., CO2 Laser Cutting of Different Materials – A Review, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, e-ISSN: 2395-0056, Volume: 05, Issue: 06, June 2018.

BALL, N. "Circular Saws and the History of Technology." *Bulletin of the Association for Preservation Technology*, vol. 7, no. 3, 1975, pp. 79–89. *JSTOR*, [www.jstor.org/stable/1493506](http://www.jstor.org/stable/1493506).

BARCÍK, Š. Stroje a zariadenia. Návody na cvičenia. Zvolen. 2001

BARNEKOV, V. G., McMILLIN, C. W., and HUBER, H. A. Factors influencing laser cutting of wood. FAO: N. p., 1986. Web.

BAYSAL, E., DEGIRMENTEPE, S., TOKER, H.: 2014. Some mechanical and physical properties of AD-KD 5 Impregnated and thermally modified scots pine Wood. In: *Wood Research* 59/2, pp. 283-296, ISSN 1336-4561.

Bekhta, P., Proszkyk, S., Lis, B. et al. *Eur. J. Wood Prod.* (2014) 72: 799. <https://doi.org/10.1007/s00107-014-0843-3>

BÍLEK, O., KOVAŘÍK, M., Stress analysis of the rotating circular saw blade, *článek ve sborníku (angličtina), SolidState Phenomena* 2017, vol. 261 SSP, p. 259-266, ISSN: 1992-9779 (Sherpa/RoMEO, JCR)

BUCHELT, B., WAGENFÜHR, A. (2012). Evaluation of colour differences on wood surfaces. *European Journal of Wood and Wood Products*. 70. [10.1007/s00107-011-0545-z](https://doi.org/10.1007/s00107-011-0545-z).

DEEPA, A., PADMANABHAN, K. a KUPPAN, P. Impact on structural and mechanical properties os composites during machining and cutting. Review. 2016

GOCHEV, Z. Laser Wood Cutting And Modifications In Its Structure. 2016.

ELTAWAHNI, H.A. - BENYOUNIS, K - OLABI, A. G. (2016). High Power CO2 Laser Cutting for Advanced Materials – Review. [10.1016/B978-0-12-803581-8.04019-4](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.04019-4).

GAFF, M.; GÁBORÍK, J. Vlastnosti povrchu dreva modifikovaného reliéfovaním, Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2009.-80 s. 2009.

HUNTER, R. S., "Methods of Determining Gloss "Journal of Research, National Bureau of Standards, JRNBA, Vol. 18, 1937, pp. 19–39

---

HUNT, R.W.G. *Measuring colour: fundamentals and applications*. 3rd ed. Kingston-upon-Thames: Fountain, 1998, ISBN 08-634-3387-1.

LI, B.; LIEW, O. W.; ANAND A. K. Use of reflectance spectroscopy for early detection of calcium deficiency in plants. In *Proceeding of SPIE Vol. 5882, Third International Conference on Experimental Mechanics and Third Conference of the Asian Committee on Experimental Mechanics*; Quan, C.; Chou, F.S.; Asundi, A.; Wong, B.S.; Lim, C.T., Ed.; SPIE, Bellingham, WA, 2005; pp 693-697.

LISIČAN, J. *Teória a technika spracovania dreva*. 2. vyd. Zvolen: MATCENTRUM. 1996. 626 s. ISBN 80-967315-6-4.

MOESDALE J.R., CHARRIER, JANIN G., HALUK J.P.. Colour and chemical characteristics of moon rings in oakwood. *Holzforschung-International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood*. 1995. 287 – 292s.

OHTA, Noboru a ROBERTSON, Alan. *Colorimetry: fundamentals and applications*. Chichester, West Sussex: J. Wiley, 2005, ISBN 04-700-9472-9.

PASTOR M., ZHAO H., MARTUKANITZ R. P. a DEBROY T., (1999), Porosity, underfill and magnesium loss during continuous wave Nd:YAG laser welding of thin plates of aluminium alloys 5182 and 5754, *Welding Journal* 78: 207s-216s.

POWELL, J. *CO2 Laser Cutting*. Springer Science & Business Media, 2012. ISBN 1447133846. 246 s.

POŽGAJ, Alexander, Dušan CHOVANEC, Stanislav KURJATKO a Marián BABIAK. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. Bratislava: Príroda, 1993. ISBN 80-07-00600-1. str. 84-96, 99-101, 157-178, 287-290, 295-308

RADOVANOVIC, M., MADIC, M. *Experimental Investigations Of CO2 Laser Cut Quality: A Review*. University of Nis, Faculty of Mechanical Engineering in Nis, Serbia. 2011. 8s.

RIVEIRO A., QUINTERO F., LUSQUINOS F., COMESANA R., POU J., Parametric investigation of CO2 laser cutting of 2024-T3 alloy, *Journal of Materials Processing Technology* 210 (2010) 1138–1152.

SANTOS, J. A., CARVALHO, J. P. F., and SANTOS, J. (2012). Oak wood. In *Oak: Ecology, Types and Management*. pp. 119–150. Chuteira, C. A. and Grão, A. B., Eds., Nova Science Publishers, Inc, New York.

---

SCHINDLER, M., & GOETHE, J. W. V. (1970). *Goethe's theory of colour*. London, New Knowledge.

SIKLIENKA, M.; KMINIAK, R. *Delenie a obrábanie dreva*. Technická univerzita vo Zvolene. 2013a. 207 s. ISBN 978-80-228-2618-1.

SIKORA, A. 2016. Vliv urychleného stárnutí na kvalitu povrchové úpravy dřeva upraveného nátěrovými látkami: diplomová práce. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene. Drevárská fakulta. 2016. 78 s.

SLAVÍK, Bohumil. *Květena České republiky 2*. Praha: Academia, 1990. ISBN 80-200-1089-0. str. 568

SVOREŇ, Ján. *Drevárske stroje*. Časť I. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2002. ISBN 80-228-1188-2.

SZYMANI, R. & DICKINSON, F.E. *Wood Science and Technology* (1975) 9: 113. <https://doi.org/10.1007/BF00353390>

WESTLAND, S. - LAYCOCK, K. - CHEUNG, V. - HENRY, P - MAHYAR, F. 2007. *Colour Harmony*. *Color: Design & Creativity*. 1. 1-15.

YUSOFF, N. et al., Selected Malaysian Wood CO<sub>2</sub>-Laser Cutting Parameters And Cut Quality, Department of Engineering Design and Manufacture, Faculty of Engineering, Universiti Malaya, 50603 Kuala Lumpur, Malaysia, *American Journal of Applied Sciences* 5 (8): 990-996, 2008 ISSN 1546-9239

ZHU Liang-Jun, LI Zong-Shan, WANG Xiao-Chun. Anatomical characteristics of xylem in tree rings and its relationship with environments[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2017, 41(2): 238-251.

### **Internetové zdroje**

LESY ČR. <https://lesycr.cz/drevo/> 20.4.2019

RUBY LASER. <https://www.wired.com/2011/05/0516mairman-creates-first-laser-ruby-crystal/> 20.4.2019

CO<sub>2</sub> LASER. <https://www.comsol.com/blogs/a-multilevel-approach-to-modeling-planar-discharge-in-co2-lasers/> 20.4.2019

COLOUR SPECTRUM. <http://www.ox.ac.uk/news/2016-06-09-lighting-colour-affects-sleep-and-wakefulness> 20.4.2019

---

KOTOUČOVÁ PILA. DVOŘÁK, 2013. <https://slideplayer.cz/slide/3220870/>

RGB – CMYK. <https://creativepro.com/understanding-difference-between-rgb-cmyk/> 20.4.2019

PANAS S.R.O. <http://www.panas.cz/katalog/class/produkt/si-300-class> 20.4.2019

BIATEC LASER TECHNOLOGY. <http://www.directindustry.com/soc/biatec-laser-technology-s-r-o-182215.html> 20.4.2019

BIATEC. [https://www.lesprom.com/en/members/Biatec\\_Laser\\_Technology\\_40467/press-releases/](https://www.lesprom.com/en/members/Biatec_Laser_Technology_40467/press-releases/) 20.4.2019

SPECTROPHOTOMETER. <https://sensing.konicaminolta.us/products/cm-600d-spectrophotometer/> 20.4.2019

GLOSS METER. <https://www.calright.com/product/ksj-mg268-f2-multi-angle-gloss-meter-20-60-85o/> 20.4.2019

### **Zákony, normy a vyhlášky**

ASTM D2244-05, Standard Practice for Calculation of Color Tolerances and Color Differences from Instrumentally Measured Color Coordinates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005.

ČSN EN ISO 322. *Dosky z dreva: Zisťovanie vlhkosti*. Praha: Český normalizační institut, 1994. 7 s.

ČSN EN ISO 323. *Dosky z dreva: Zisťovanie hustoty*. Praha: Český normalizační institut, 1994. 7 s.

ČSN 48 0203 (480203) A Surové dříví. Kulatina. Třídění vad. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1983. 10s.

ČSN 48 0204 (480204) A Surové dříví. Kulatina. Měření vad. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1983. 20s.

ČSN EN ISO 2813 (673066) Nátěrové hmoty - Stanovení lesku nátěru při úhlu 20°, 60° a 85°. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 2016. 24s.

---

## **8 Seznam příloh**

Príloha A: CD médium – diplomová práce v elektronické podobě