

UNIVERZITA PARDUBICE

Využití laseru pro tvorbu
a zušlechťování
polygrafických produktů

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2025

Bc. Barbora Haláková

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická
Katedra polygrafie a fotofyziky

Využití laseru pro tvorbu a zušlechťování
polygrafických produktů
Diplomová práce

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická
Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Barbora Haláková**
Osobní číslo: **C23238**
Studijní program: **N0531A130013 Polygrafie**
Téma práce: **Využití laserů pro tvorbu a zušlechťování polygrafických produktů**
Téma práce anglicky: **The role of lasers for the creation and refinement of printed products**
Zadávající katedra: **Katedra polygrafie a fotofyziky**

Zásady pro vypracování

- Proveďte rešerši v odborné a patentové literatuře na téma využití laserů pro zušlechťovací, a i dalších technické aplikace v rámci polygrafické produkce.
- Zpracujte danou rešerši do uceleného přehledu a uveďte, v jakých typech polygrafických aplikací se lasery a gravírovací technologie využívají.
- Na vybrané materiály připravte za využití dostupného gravírovacího zařízení testy a přípravu vybraných testovacích obrazců.
- Proveďte důkladnou charakterizaci připravených testovacích obrazců. Komentujte vliv volených parametrů gravírovacího procesu na dosažené parametry a diskutujte i vliv vybraných substrátů.
- Z provedených analýz vyvoďte závěry a doporučení.

Rozsah pracovní zprávy:
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Tomáš Syrový, Ph.D.**
Katedra polygrafie a fotofyziky
Oponent diplomové práce: **Ing. Jan Bourek, Ph.D.**

Datum zadání diplomové práce: **19. února 2025**
Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2025**

prof. Ing. Petr Němec, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

doc. Ing. Tomáš Syrový, Ph.D. v.r.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 19. února 2025

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji:

Práci s názvem **Využití laseru pro tvorbu a zušlechťování polygrafických produktů** jsem vypracovala samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využila, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byla jsem seznámena s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 5. 5. 2025

Bc. Barbora Haláková v.r.

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala všem, kteří mě podporovali při psaní této diplomové práce.

Největší dík patří mému příteli za jeho trpělivost, podporu a víru ve mne během celého studia i zpracování této práce. Velmi si vážím také podpory své rodiny, která mi poskytla zázemí a povzbuzení v náročných chvílích.

Zvláštní poděkování si zaslouží vedoucí mé diplomové práce doc. Ing. Tomáš Syrový, Ph.D., za odborné vedení, cenné rady a vstřícnost, kterou mi po celou dobu poskytoval.

ANOTACE

Diplomová práce se zabývá analýzou kvality laserového gravírování šesti druhů dřeva pomocí zařízení xTool D1 Pro s diodovým laserem. Hodnocena je míra kontrastu, drsnost povrchu, měrná světelnost (L^*) a schopnost reprodukce jemných detailů. Pomocí spektrofotometrických měření a měření drsnosti byly stanoveny optimální parametry výkonu a rychlosti pohybu hlavy laseru pro jednotlivé materiály. Součástí vyhodnocení byla i aplikace testovacího motivu Siemensovy hvězdy, která sloužila k určení rozlišovací schopnosti zařízení. Na základě naměřených hodnot v barevných prostorech $L^*a^*b^*$ a RGB byla vytvořena gradační křivka, která znázorňuje rozdílnou reakci dřeva na různé úrovně výkonu a rychlosti pohybu laseru. Výstupem práce je sada doporučení pro efektivní gravírování jednotlivých dřevin.

KLÍČOVÁ SLOVA

laserové gravírování, dřevo, diodový laser, kontrast, spektrofotometrie, gradační křivka

TITLE

The role of lasers for the creation and refinement of printed products

ANNOTATION

The thesis focuses on the analysis of the quality of laser engraving on six types of wood using the xTool D1 Pro device equipped with a diode laser. The evaluation includes contrast level, surface roughness, specific lightness (L^*), and the ability to reproduce fine details. Spectrophotometric and roughness measurements were used to determine the optimal power and head movement speed settings of the laser for each material. The assessment also included the application of a Siemens star test pattern to determine the resolution capability of the device. Based on the measured values in the $L^*a^*b^*$ and RGB colour spaces, a gradation curve was created to illustrate the varying responses of different woods to changes in laser power and speed. The outcome of the study is a set of recommendations for effective engraving of individual wood types.

KEYWORDS

laser engraving, wood, diode laser, contrast, spectrophotometry, tone curve

OBSAH

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK.....	12
SEZNAM GRAFŮ A ROVNIC	13
ÚVOD.....	14
1 TEORETICKÁ ČÁST	15
1.1 Gravírování a jeho význam.....	15
1.2 Historický vývoj gravírování	15
1.2.1 Starověké civilizace	15
1.2.2 Středověk	15
1.2.3 Renesance a nástup knihtisku	15
1.2.4 Průmyslová revoluce.....	16
1.2.5 Moderní éra.....	16
1.3 Moderní metody gravírování	16
1.3.1 Mechanické gravírování	16
1.3.2 Chemické gravírování (leptání)	16
1.3.3 Laserové gravírování	16
1.4 Metody hodnocení kvality gravírování.....	17
1.4.1 Vizuální hodnocení (kontrast, čistota).....	17
1.4.2 Hodnocení rozlišení	17
1.4.3 Hodnocení povrchové textury.....	17
1.5 Laserové gravírování v polygrafii.....	18
1.5.1 Použití laserového gravírování v tiskařských formách.....	18
1.5.2 Význam gravírování v dekorativní polygrafii	18
1.6 Techniky měření použité v praktické části	18
1.6.1 Spektrofotometr a jeho role v hodnocení kvality gravírování	18
1.6.2 Drsnoměr měření drsnosti y povrchu.....	21
1.6.3 Skenování povrchu dřeva a vygravírovaných políček.....	24
1.7 Dřevo	26
1.7.1 Dělení a druhy dřeva.....	27
1.7.2 Vliv botanické příslušnosti na vlastnosti dřeva	29
1.7.3 Vliv tvrdosti na opracování a použití dřeva.....	30
1.8 Lasery a jejich principy.....	30

1.8.1 Princip činnosti laseru.....	30
1.8.2 Typy laserů podle aktivního prostředí	30
1.8.3 Vlastnosti laserového záření	31
1.9 Bezpečnostní aspekty provozu laserové gravírky xTool	31
1.9.1 Klasifikace laserových zařízení	31
1.9.2 Identifikace rizik při používání laserové gravírky xTool	32
1.9.3 Preventivní opatření a doporučení pro bezpečný provoz.....	32
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	34
2.1 Použité zařízení.....	34
2.1.1 Gravírovací stroj xTool D1 Pro	34
2.1.2 Skener Epson Perfection V700 Photo.....	34
2.1.3 Spektrofotometr Eye-One Pro 1	34
2.1.4 Drsnoměr Mitutoyo Surftest SJ-210	35
2.2 Technologie laserového gravírování.....	35
2.3 Měření a vyhodnocení	35
2.3.1 Spektrofotometr Eye-One Pro 1	36
2.3.2 Drsnoměr Surftest SJ-210.....	36
2.3.3 Siemensova hvězda.....	38
2.4 Přehled získaných výsledků.....	39
2.4.1 Michalsonův kontrast pro gravírované dřevěné materiály	40
2.4.2 Drsnost gravírovaných ploch	41
2.4.3 Měrná světlost gravírovaných ploch.....	45
2.4.4 Doporučené nastavení rychlosti posuvu laserové hlavy	49
2.4.5. Mikroskopická analýza povrchu dřeva po laserovém gravírování	50
2.4.6 Vyhodnocení Siemensovy hvězdy.....	51
2.4.7 Gradační křivka.....	61
2.5 Shrnutí výsledků	66
2.5.1 Shrnutí Michalsonův kontrast gravírovaných ploch.....	66
2.5.2 Shrnutí drsnosti gravírovaných ploch	67
2.5.3 Shrnutí měrné světlosti gravírovaných ploch	67
2.5.4 Shrnutí výsledků gradační křivky	68
2.5.5 Shrnutí a vyhodnocení výsledků Siemensovy hvězdy.....	68
2.5.6 Shrnutí subjektivního hodnocení estetické kvality gravírovaných dřevin.....	69

ZÁVĚR	71
POUŽITÁ LITERATURA	72
ZDROJE OBRÁZKŮ	76

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK

Obrázek 1 Schématické znázornění základních řezů kmenem (Balabán, 1955), P – příčný (transversální) řez, R – radiální řez, T – tangenciální řez.....	27
Obrázek 2 Vzorky.....	36
Obrázek 3 Měření spektrofotometrem.....	36
Obrázek 4 Znázornění úhlu měření.....	37
Obrázek 5 Siemensova hvězda LÍPA.....	54
Obrázek 6 Siemensova hvězda DUB.....	55
Obrázek 7 Siemensova hvězda JASAN.....	57
Obrázek 8 Siemensova hvězda MODŘÍN.....	58
Obrázek 9 Siemensova hvězda BALSÁ.....	59
Obrázek 10 Smrk_Siemensovy hvězdy.....	61
Obrázek 11 Přepsané naměřené $L^*a^*b^*$ hodnoty do Photoshopu.....	61
Obrázek 12 Škála převedena do stupňů šedi.....	62
Obrázek 13 Mikroskop SMRK.....	77
Obrázek 14 Mikroskop MODŘÍN.....	78
Obrázek 15 Mikroskop LÍPA.....	79
Obrázek 16 Mikroskop JASAN.....	80
Obrázek 17 Mikroskop DUB.....	81
Obrázek 18 Mikroskop BALSÁ.....	82
Tabulka 1 Směry drsnoměru.....	37
Tabulka 2 Drsnost SMRK.....	41
Tabulka 3 Drsnost JASAN.....	41
Tabulka 4 Drsnost BALSÁ.....	42
Tabulka 5 Drsnost MODŘÍN.....	43
Tabulka 6 Drsnost LÍPA.....	43
Tabulka 7 Drsnost DUB.....	44
Tabulka 8 Měrná světlost (L^*) LÍPA.....	45
Tabulka 9 Měrná světlost (L^*) DUB.....	46
Tabulka 10 Měrná světlost (L^*) JASAN.....	46
Tabulka 11 Měrná světlost (L^*) MODŘÍN.....	47
Tabulka 12 Měrná světlost (L^*) BALSÁ.....	48
Tabulka 13 Měrná světlost (L^*) SMRK.....	48
Tabulka 14 Doporučené nastavení podle kontrastu a měrné světlosti.....	50
Tabulka 15 Vyhodnocením Siemensových hvězd gravírovaných do lípy.....	54
Tabulka 16 Vyhodnocením Siemensových hvězd gravírovaných do dubu.....	55
Tabulka 17 Vyhodnocením Siemensových hvězd gravírovaných do jasanu.....	56
Tabulka 18 Vyhodnocením Siemensových hvězd gravírovaných do modřínu.....	58
Tabulka 19 Vyhodnocením Siemensových hvězd gravírovaných do balsy.....	59
Tabulka 20 Vyhodnocením Siemensových hvězd gravírovaných do smrku.....	61

SEZNAM GRAFŮ A ROVNIC

Graf 1 Michalsonův kontrast	40
Graf 2 Gradační křivka pro modřín	62
Graf 3 Gradační křivka pro smrk	63
Graf 4 Gradační křivka pro balsa.....	63
Graf 5 Gradační křivka pro lípu.....	64
Graf 6 Gradační křivka pro dub	65
Graf 7 Gradační křivka pro jasan.....	65
Rovnice 1 Lambert-Beerův zákon	19
Rovnice 2 Střední aritmetické odchylky (R_a).....	22
Rovnice 3 Maximální výšky profilu (R_z).....	22
Rovnice 4 Michelsonův kontrast C_M	38
Rovnice 5 Přepočteme na počet párů linek / mm podle vzdálenosti od středu	52
Rovnice 6 Rozlišení pro hvězdu s 18 černými paprsky	52
Rovnice 7 Rozlišení pro hvězdu s 12 černými paprsky	52
Rovnice 8 Převod na milimetry	52
Rovnice 9 Rozlišení	53
Rovnice 10 Přepočet na DPI.....	53
Rovnice 11 Nejmenší rozlišitelný detail.....	53

ÚVOD

Laserové gravírování je moderní technologie, která nachází široké uplatnění v průmyslové i umělecké sféře. Tato práce se zaměřuje na zkoumání vlastností různých druhů dřeva při jejich gravírování pomocí gravírovacího stroje xTool D1 Pro. Cílem je porovnat výsledky gravírování u šesti druhů dřevin lípy, dubu, jasanu, smrku, modřínu a balsy a zhodnotit kvalitu vygravírovaných políček z hlediska jejich textury, kontrastu. Zvláštní důraz bude kladen na validaci doporučení výrobce xTool pro gravírování jednotlivých druhů dřeva a na jejich optimalizaci.

Pro měření a hodnocení kvality gravírování budou využity různé techniky, které umožní detailní analýzu struktury a povrchových vlastností materiálu. Výsledkem práce bude soubor doporučení, jak dosáhnout optimálních výsledků gravírování na různých druzích dřeva.

Laserové gravírování je důležitou technologií, která umožňuje přesné a trvalé úpravy povrchů materiálů. Tato metoda, založená na působení koncentrovaného laserového paprsku, má široké uplatnění v řadě odvětví, včetně výroby personalizovaných produktů, značení, dekorací a uměleckého řemesla (Josten, Reiche a Wittchen, 2010).

V případě dřeva je laserové gravírování obzvlášť efektivní díky schopnosti laseru vytvářet kontrastní vzory a jemné detaily, které mohou být dále využity jak v dekorativních, tak funkčních aplikacích. Výhodou této technologie je minimalizace fyzického kontaktu s materiálem a umožňuje vytvářet složité vzory s vysokou přesností (Patričný, 2016, s. 8).

Laserové gravírování zahrnuje několik typů technologií, jako jsou, CO₂ lasery, vláknové lasery a diodové lasery, přičemž každá z nich je vhodná pro specifické materiály a aplikace. Stroj xTool D1 Pro, použitý v této práci, využívá diodový laser o vlnové délce 455 nm, což jej činí vhodným zejména pro práci se dřevem. Jeho vysoké rozlišení (0,01 mm) umožňuje detailní gravírování a flexibilní přizpůsobení nastavení podle typu materiálu (Požgaj a kol., 1997).

Cílem této práce je analyzovat výsledky gravírování s ohledem na rozdílné vlastnosti jednotlivých druhů dřeva, což přinese hodnotná data pro další optimalizaci procesu gravírování a pro lepší pochopení interakce mezi parametry gravírovacího stroje a strukturou materiálu.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Gravírování a jeho význam

Gravírování je jednou z metod zpracování materiálu, která se v průběhu času vyvinula z ručních technik do moderních automatizovaných procesů. V historii šlo především o gravírování mechanické, při němž byl požadovaný motiv vytvářen nástrojem působícím fyzický tlak na povrch. Gravírování lze definovat jako proces, při kterém se do povrchu materiálu mechanicky nebo tepelně vytváří trvalý vzor, nápis nebo značení (Josten, Reiche a Wittchen, 2010, s. 9).

Laserové gravírování patří mezi pokročilejší metody díky své vysoké přesnosti a široké aplikovatelnosti. Tato technologie využívá zaostřený svazek záření, které při interakci s materiálem mění jeho strukturu odpařením, tavením nebo tepelnou reakcí. Tímto způsobem lze vytvářet detailní a trvalé vzory bez fyzického kontaktu s povrchem (Požgaj a kol., 1997, s. 213).

Dřevo je pro laserové gravírování ideální materiál díky své přirozené reakci na teplo, která vytváří kontrastní vzory. Gravírování dřeva je využíváno jak pro estetické účely, jako je výroba dekorací, nábytku či suvenýrů, tak pro technické aplikace, například při výrobě tiskařských forem (Patričný, 2016, s. 75).

1.2 Historický vývoj gravírování

Gravírování, jako technika vytváření dekorativních nebo funkčních vzorů na povrchu materiálů, má hluboké historické kořeny sahající až do starověku. Jeho vývoj lze rozdělit do několika klíčových období.

1.2.1 Starověké civilizace

První doklady gravírování pocházejí ze starověkých civilizací, jako byla Mezopotámie a Egypt, kde byly jednoduché nástroje používány k vytváření symbolů a ornamentů na kameni, kovu a jiných materiálech. Tyto artefakty sloužily jako umělecká díla, amulety, pečete a měly často náboženský nebo rituální význam (Požgaj a kol., 1997, s. 213; Šlezingerová a Gandelová, 1994, s. 87). V antickém Řecku a Římě se gravírování rozšířilo na mince, šperky a zbraně, přičemž zdůrazňovalo symboliku a reprezentaci moci (Desch a Dinwoodie, 1996, s. 92).

1.2.2 Středověk

Ve středověku hrálo gravírování podstatnou roli ve zlatnickém řemesle. Bylo používáno ke zdobení kovových předmětů, jako byly šperky, zbraně a liturgické nástroje. Tato technika umožňovala vytvářet složité vzory a nápisy s vysokou mírou detailů (Požgaj a kol., 1997, s. 213).

1.2.3 Renesance a nástup knihtisku

S příchodem knihtisku v 15. století se gravírování začalo využívat při výrobě tiskových desek. Tento pokrok umožnil masovou reprodukci textů a obrazů, což zásadně ovlivnilo šíření informací a kultury v renesanční Evropě (Desch a Dinwoodie, 1996, s. 92). Známí umělci, jako Albrecht Dürer, používali gravírování k vytváření složitých uměleckých ilustrací (Patričný, 2016, s. 79).

1.2.4 Průmyslová revoluce

Průmyslová revoluce přinesla mechanizaci a nové technologie, které umožnily větší rychlost a přesnost gravírování. Nové stroje, jako například pantografy, umožnily přenos složitých vzorů na různé materiály, což vedlo k masové výrobě dekorativních předmětů, nádobí, hodin nebo identifikačních štítků (Požgaj a kol., 1997, s. 213).

1.2.5 Moderní éra

Ve 20. století se gravírování stalo více průmyslovým procesem díky nástupu chemického leptání a laserových technologií. Tyto inovace umožnily přesnou a rychlou výrobu složitých návrhů na materiály, které by byly manuálním gravírováním obtížně zpracovatelné. Laserové gravírování dnes dominuje v oborech, jako jsou reklama, šperkařství a polygrafie, díky své flexibilitě, rychlosti a vysoké kvalitě výsledků (Patričný, 2016, s. 79; Šlezingerová a Gandelová, 1994, s. 91).

1.3 Moderní metody gravírování

S rozvojem technologií se vyvinuly nové metody gravírování, které zvyšují přesnost a efektivitu tohoto procesu. Mezi hlavní moderní techniky patří:

1.3.1 Mechanické gravírování

Mechanické gravírování využívá rotační nástroje, jako jsou frézy nebo vrtáky, které fyzicky odstraňují materiál z povrchu. Tato metoda je známá svou robustností a spolehlivostí při práci s tvrdými materiály, jako jsou kovy, dřevo nebo kámen. Mechanické gravírování je vhodné pro vytváření hlubokých rytin, které jsou odolné vůči opotřebení, což jej činí ideálním pro průmyslové štítky, identifikační cedule nebo dekorativní předměty (Patričný, 2016, s. 102; Josten, Reiche a Wittchen, 2010, s. 35).

Hlavní výhodou této metody je její jednoduchost a nenáročnost na technologie, což umožňuje její široké použití v dílnách a menších výrobních provozech. Nevýhodou však může být nižší rychlost procesu a omezení u jemných detailů, které jsou obtížně dosažitelné u velmi tvrdých materiálů (Šlezingerová a Gandelová, 1994, s. 85).

1.3.2 Chemické gravírování (leptání)

Chemické gravírování využívá působení specifických chemikálií, které selektivně odstraňují určité oblasti materiálu. Tento proces zahrnuje nanesení ochranné vrstvy na oblasti, které mají zůstat nedotčené, zatímco odkryté části jsou vystaveny chemickému leptání. Chemické gravírování je často využíváno při práci s kovy, jako je měď, mosaz nebo ocel, a nachází uplatnění při výrobě jemných dekorací, obvodových desek a tištěných vzorů (Požgaj a kol., 1997, s. 215; Desch a Dinwoodie, 1996, s. 75).

Tato metoda umožňuje vytvářet velmi jemné a složité vzory, které by byly mechanicky těžko dosažitelné. Na druhé straně vyžaduje opatrné zacházení s chemikáliemi a správnou likvidaci odpadu, což zvyšuje její ekologickou náročnost (Josten, Reiche a Wittchen, 2010, s. 36).

1.3.3 Laserové gravírování

Laserové gravírování patří mezi nejmodernější techniky a využívá vysoce koncentrovaný laserový paprsek k odpařování materiálu z povrchu. Laserové gravírování nabízí

vysokou přesnost a možnost vytvářet jemné detaily, což jej činí ideálním pro složité a personalizované návrhy. Tato metoda se široce uplatňuje v polygrafii, šperkařství, výrobě reklamních předmětů i při personalizaci spotřebního zboží, jako jsou sklenice nebo elektronika (Šlezingerová a Gandelová, 1994, s. 86; Požgaj a kol., 1997, s. 216).

1.3.3.4 Výhody laserového gravírování

Laserové gravírování přináší několik významných výhod oproti tradičním metodám:

- **Vysoká přesnost a detailnost:** Laser umožňuje vytvářet velmi jemné a detailní vzory, které by byly obtížně dosažitelné jinými technikami (Patřičný, 2016, s. 79).
- **Rychlost a efektivita:** Proces je rychlý a umožňuje gravírovat velké množství předmětů v krátkém čase, což je výhodné pro sériovou výrobu (Desch a Dinwoodie, 1996, s. 95).
- **Flexibilita:** Laserové gravírování je vhodné pro širokou škálu materiálů, včetně kovů, dřeva, plastů, skla a keramiky (Josten, Reiche & Wittchen, 2010, s. 120).
- **Ekologičnost:** Tato metoda je šetrná k životnímu prostředí, protože nevyžaduje použití chemikálií a produkuje minimální odpad (Požgaj a kol., 1997, s. 217).

1.4 Metody hodnocení kvality gravírování

Hodnocení kvality gravírování je zásadní pro zajištění vysoké úrovně finálního zpracování a splnění estetických i funkčních požadavků. Pro hodnocení kvality gravírování se využívají různé metody, které se zaměřují na optické vlastnosti, texturu povrchu a jejich vliv na výslednou aplikaci (Josten, Reiche a Wittchen, 2010, s. 9; Požgaj a kol., 1997, s. 212).

1.4.1 Vizuální hodnocení (kontrast, čistota)

Vizuální hodnocení patří mezi základní metody, které se zaměřují na subjektivní posouzení vzhledu gravírovaného povrchu. Posuzuje se především kontrast mezi gravírovanými a negravírovanými oblastmi, ostrost linií a celková čistota provedení. V průmyslovém a polygrafickém prostředí je však důležité toto hodnocení doplnit objektivními metodami, jako je měření optických vlastností povrchu pomocí denzitometrů a spektrofotometrů. Tyto přístroje poskytují kvantitativní data o odrazivosti, kontrastu a barevných vlastnostech povrchu (Josten, Reiche a Wittchen, 2010, s. 105; Šlezingerová a Gandelová, 1994, s. 92).

1.4.2 Hodnocení rozlišení

Rozlišení gravírování určuje schopnost reprodukovat jemné detaily a přesné hrany v gravírovaném obrazu nebo textu. Vyšší rozlišení znamená větší hustotu bodů nebo linií na jednotku plochy, což je klíčové pro složité motivy a jemné značení. Hodnocení rozlišení se provádí optickým porovnáním gravírovaných vzorů s etalonovými šablonami nebo pomocí digitální mikroskopie a softwarové analýzy obrazů. Důležitými parametry jsou minimální šířka čáry, reprodukovatelnost detailů a ostrost hran (Zbožínková, 2022, s. 55).

1.4.3 Hodnocení povrchové textury

Povrchová textura ovlivňuje nejen vzhled, ale také funkční vlastnosti materiálu, jako je adheze nebo tření. Hodnocení textury zahrnuje analýzu drsnosti, která se často vyjadřuje parametrem Ra (průměrná aritmetická odchylka profilu). Tento parametr lze měřit pomocí kontaktních metod, jako jsou profiloměry, nebo bezkontaktních metod, například laserová

konfokální mikroskopie. Bezkontaktní metody umožňují analyzovat povrch bez jeho poškození, což je výhodné při práci s křehkými nebo jemnými materiály (Desch a Dinwoodie, 1996, s. 98; Šlezingerová a Gandelová, 1994, s. 94).

1.5 Laserové gravírování v polygrafii

Laserové gravírování představuje moderní technologii, která nachází široké uplatnění v polygrafickém průmyslu. Její přesnost a flexibilita umožňují vytvářet vysoce detailní a kvalitní tiskové formy, což zvyšuje efektivitu a konzistenci tisku (Gravírování Kavalír, 2023).

1.5.1 Použití laserového gravírování v tiskařských formách

V oblasti hlubotisku je laserové gravírování klíčové pro vytváření mikrobuněk na povrchu tiskových válců. Tyto buňky slouží k zadržení tiskové barvy a jejímu přesnému přenosu na substrát. Přesné řízení laseru umožňuje vytvářet buňky s různou hloubkou a objemem, což ovlivňuje množství přenesené barvy a tím i výsledný obraz (Karhánek, 2014).

Ve flexotisku se laserové gravírování používá k vytváření vyvýšených tiskových prvků na elastomerových nebo fotopolymerních deskách. Laser přesně odstraňuje nepotřebný materiál, čímž vznikají vyvýšené oblasti, které následně přenášejí barvu na tiskový substrát. Tento proces zvyšuje detailnost tisku a zkracuje dobu přípravy tiskových forem (Přaslica, 2014).

Implementace laserového gravírování v přípravě tiskařských forem přináší několik výhod, včetně zvýšené konzistence výsledků, snížení času potřebného pro přípravu a možnosti rychlé úpravy designu bez nutnosti výroby nových forem (Karhánek, 2014).

1.5.2 Význam gravírování v dekorativní polygrafii

V dekorativní polygrafii laserové gravírování umožňuje vytvářet vizuálně atraktivní prvky, jako jsou reliéfy, specifické povrchové textury nebo ornamenty na různých materiálech, včetně papíru, kartonu a plastu. Tato technologie je ceněna pro svou flexibilitu a schopnost přizpůsobit design specifickým požadavkům bez nutnosti výroby nových nástrojů (Gravírování Kavalír, 2023).

Laserové gravírování nachází uplatnění při výrobě luxusních obalů, pozvánek, dekorativních knih a dalších prémiových produktů. Umožňuje snadno a rychle vytvářet povrchové efekty, jako jsou lesklé a matné kontrasty, optické iluze či jemné reliéfy. Tyto vlastnosti jsou obzvláště ceněny v oblasti designu a u produktů vyžadujících vysokou estetickou hodnotu (Gravipro, 2023).

Díky bezkontaktní povaze laserového gravírování je možné dosáhnout vysoké přesnosti a detailnosti, což je zásadní pro splnění náročných požadavků dekorativní polygrafie (TRUMPF, 2023).

1.6 Techniky měření použité v praktické části

1.6.1 Spektrofotometr a jeho role v hodnocení kvality gravírování

Spektrofotometr je přístroj využívaný k měření intenzity světla odraženého, či absorbovaného materiálem při různých vlnových délkách. V oblasti gravírování, zejména laserového, se spektrofotometrie používá k hodnocení optických vlastností povrchů, jako jsou

odrazivost, barevný kontrast a homogenita povrchové úpravy. Tato měření jsou zásadní pro zajištění konzistence a kvality výsledných produktů, kde estetické a funkční vlastnosti hrají klíčovou roli (Pavia, Lampman a Kriz, 2001; Kumar a Singh, 2018).

1.6.1.1 Princip činnosti spektrofotometru

Spektrofotometr Eye-One Pro, který je použit v praktické části, pracuje na principu měření spektrální odrazivosti vzorku nebo emitovaného záření zdroje v definovaném rozsahu vlnových délek. Základní komponenty zahrnují zdroj světla (plynem plněnou wolframovou lampu a UV LED), optický systém s kruhovým 45° osvětlením a 0° pozorováním, a spektrální detektor. Světlo ze zdroje je směřováno na povrch vzorku, kde dochází k jeho odrazu a částečné absorpci v závislosti na spektrálních vlastnostech materiálu. Odražené světlo je zachyceno detektorem, který rozloží světlo na jednotlivé vlnové délky a změří jejich intenzitu. Měřená spektrální data jsou využívána k výpočtu barevných charakteristik podle standardizovaných metodik (například podle režimů M0, M1 a M2 dle ISO 13655:2009). Přesnost měření a interpretace dat umožňuje kalibraci a profilaci zobrazovacích a tiskových zařízení (X-Rite, 2010; International Organization for Standardization, 2009).

Lambert-Beerův zákon:

Lambert-Beerův zákon je základním principem v oblasti absorpční spektrofotometrie, který popisuje vztah mezi absorbancí světla a vlastnostmi materiálu, kterým světlo prochází. Tento zákon uvádí, že absorbance (A) je přímo úměrná koncentraci absorpční látky (c) a délce optické dráhy (l), kterou světlo v materiálu urazí. Matematicky je vyjádřen rovnicí:

Rovnice 1 Lambert-Beerův zákon

$$A = \varepsilon \cdot l \cdot c$$

kde:

- A = absorbance (bezrozměrná),
- ε = molární absorpční koeficient [$L \cdot mol^{-1} \cdot cm^{-1}$],
- c = koncentrace látky [$mol \cdot L^{-1}$],
- l = délka optické dráhy [cm].

ε je molární absorpční koeficient, charakteristický pro danou látku při specifické vlnové délce. Tento koeficient vyjadřuje schopnost molekul absorbovat světlo na jednotku koncentrace a délky dráhy (Pavia, Lampman a Kriz, 2001).

V polygrafii se Lambert-Beerův zákon využívá při spektrofotometrickém měření barevnosti tiskových materiálů. Spektrofotometry měří intenzitu světla před a po průchodu vzorkem, což umožňuje stanovit absorbanci a následně analyzovat barevné vlastnosti tiskovin. Tato měření jsou zásadní pro zajištění konzistence barev v tiskových procesech a pro kontrolu kvality výsledných produktů (Kaplanová a kol., 2009).

Je důležité poznamenat, že Lambert-Beerův zákon předpokládá homogenní systém, lineární absorpci a absenci rozptylu světla či fluorescence. V praxi se však mohou vyskytnout odchylky způsobené interakcemi mezi molekulami při vysokých koncentracích nebo přítomností částic

rozptylujících světlo. Proto je nezbytné při spektrofotometrických měřeních v polygrafii pečlivě kontrolovat podmínky měření a být si vědom možných faktorů ovlivňujících přesnost výsledků (Pavia, Lampman a Kriz, 2001).

V polygrafii je při spektrofotometrických měřeních důležité dodržovat podmínky platnosti Lambert-Beerova zákona a být si vědom faktorů, které mohou ovlivnit přesnost měření. Mezi tyto faktory patří například homogenita tiskového materiálu, kvalita a čistota tiskových barev, tloušťka nanesené vrstvy inkoustu či povrchová úprava substrátu. Nerovnoměrnosti v těchto parametrech mohou vést k odchýlkám v absorbanci a tím i k nepřesnostem v měření barevnosti tiskovin. Proto je nezbytné pečlivě kontrolovat a standardizovat podmínky tisku a měření, aby byla zajištěna konzistence a kvalita výsledných produktů (Kaplanová a kol., 2009).

1.6.1.2 Složení spektrofotometru

- **Zdroj světla:** Generuje široké spektrum záření. Pro viditelnou oblast spektra se často používají halogenové žárovky, zatímco pro ultrafialovou oblast jsou vhodné deuteriové výbojky (Kaplanová a kol., 2009).
- **Monochromátor:** Zařízení, které selektuje požadovanou vlnovou délku ze širokého spektra pomocí hranolů nebo difrakčních mřížek (Kaplanová a kol., 2009).
- **Detektor:** Převádí intenzitu prošlého světla na elektrický signál; běžně se používají fotonásobiče nebo detektory s diodovým polem (Kaplanová a kol., 2009).
- **Procesor dat:** Zpracovává elektrický signál z detektoru a poskytuje výsledky ve formě spekter nebo numerických hodnot absorbance (Kaplanová a kol., 2009).

V polygrafii je důležitá také geometrie měření spektrofotometru, která ovlivňuje způsob, jakým je vzorek osvětlen a jak je měřeno odražené světlo. Nejběžnější geometrie jsou:

- **Kulová geometrie ($d/8^\circ$):** Vzorek je difuzně osvětlen ze všech úhlů pomocí integrační koule a detektor měří odražené světlo pod úhlem 8° . Tato geometrie je vhodná pro měření lesklých a reflexních povrchů, protože umožňuje zahrnout nebo vyloučit spekulární (zrcadlovou) složku odrazu (Kaplanová a kol., 2009).
- **Geometrie $45^\circ/0^\circ$:** Vzorek je osvětlen pod úhlem 45° a detektor měří odražené světlo pod úhlem 0° (kolmo k povrchu). Tato geometrie je často používána pro měření barevnosti povrchů s matným nebo texturovaným povrchem, kde je důležité minimalizovat vliv lesku na měření (Kaplanová a kol., 2009).

Výběr vhodné geometrie měření závisí na vlastnostech měřeného vzorku a požadované aplikaci v polygrafickém procesu (Kaplanová a kol., 2009).

1.6.1.3 Použití spektrofotometru v hodnocení gravírování

V kontextu gravírování, zejména při práci s materiály jako je dřevo, kov nebo plast, spektrofotometrie umožňuje:

- **Měření barevného kontrastu:** Spektrofotometrie umožňuje kvantifikovat rozdíly v reflektanci mezi gravírovanými a negravírovanými oblastmi, což je zásadní pro dosažení požadovaného vizuálního efektu (Smith, 2015).

- **Analýza homogenity povrchu:** Detekce nerovnoměrností v povrchové úpravě pomocí spektrofotometrických měření pomáhá identifikovat defekty, které by mohly ovlivnit estetiku a kvalitu finálního produktu (Brown a Green, 2017).
- **Kontrola kvality:** Přesné měření optických vlastností gravírovaných materiálů zajišťuje, že všechny produkty splňují stanovené standardy kvality (Davis a kol., 2019).

1.6.1.4 Význam spektrofotometrie v dekorativní polygrafii

V dekorativní polygrafii je spektrofotometrie nepostradatelná pro:

- **Optimalizace tiskových procesů:** Přesná měření absorbance a odrazivosti materiálů umožňují nastavit parametry tiskových strojů tak, aby bylo dosaženo optimální kvality tisku. Tímto způsobem lze dosáhnout věrného podání barev a efektivního využití tiskových barev, což je zásadní pro produkci vysoce kvalitních tiskovin (Kaplanová a kol., 2009).
- **Vývoj nových materiálů:** Spektrofotometrie hraje důležitou roli při testování a hodnocení nových substrátů a inkoustů. Díky ní lze analyzovat jejich optické vlastnosti a zjistit, jak ovlivňují výsledný tisk. To umožňuje vývoj materiálů s lepšími vizuálními a funkčními vlastnostmi, které splňují náročné požadavky moderní polygrafie (Kaplanová a kol., 2009).
- **Zajištění barevné konzistence:** Udržení jednotnosti barev napříč různými tiskovými sériemi a materiály je klíčové pro zachování kvality a integrity značky. Spektrofotometrie umožňuje monitorovat a kontrolovat barevné odchylky, což zajišťuje konzistentní výsledky i při změnách tiskových podmínek nebo použití různých materiálů (Kaplanová a kol., 2009).

Implementace spektrofotometrie v těchto oblastech přispívá k vyšší efektivitě tiskových procesů, inovaci materiálů a udržení vysokých standardů kvality v dekorativní polygrafii.

1.6.2 Drsnoměr měření drsnosti y povrchu

Drsnoměr je specializovaný přístroj používaný k měření drsnosti povrchu. Tyto parametry jsou zásadní při hodnocení kvality gravírování, protože ovlivňují estetické i funkční vlastnosti finálních produktů. Přesné měření drsnosti umožňuje kontrolovat a optimalizovat proces gravírování, což vede k dosažení požadovaných vizuálních efektů a zajištění funkčních parametrů, jako je například přilnavost či odolnost povrchu. Moderní drsnoměry nabízejí vysokou přesnost měření a jsou schopny analyzovat i složité povrchové struktury, což je nezbytné pro zajištění konzistence a kvality v náročných aplikacích gravírování (ACCURETECH (Europe) GmbH, 2025).

1.6.2.1 Princip činnosti drsnoměru

Drsnoměr je specializovaný přístroj používaný k měření drsnosti povrchu. Tyto parametry jsou zásadní při hodnocení kvality gravírování, protože ovlivňují estetické i funkční vlastnosti finálních produktů. Přesné měření drsnosti umožňuje kontrolovat a optimalizovat proces gravírování, což vede k dosažení požadovaných vizuálních efektů a zajištění funkčních parametrů, jako je například přilnavost či odolnost povrchu. Moderní drsnoměry nabízejí vysokou přesnost měření a jsou schopny analyzovat i složité povrchové struktury, což je nezbytné pro zajištění konzistence a kvality v náročných aplikacích gravírování (ACCURETECH (Europe) GmbH, 2025).

1.6.2.2 Parametry drsnosti povrchu

R_a (střední aritmetická odchylka profilu): Tento parametr představuje aritmetický průměr absolutních hodnot odchylek profilu od střední linie v rámci základní délky měření. R_a poskytuje celkový obraz o drsnosti povrchu, ale nereflektuje jednotlivé výkyvy či anomálie na povrchu (ACCRETECH (Europe) GmbH, 2025).

R_z (průměrná výška nerovnosti): Tento parametr udává průměrnou výšku pěti nejvyšších výstupků a pěti nejhlubších prohlubní v rámci měřené délky. Na rozdíl od R_a se R_z zaměřuje na extrémní hodnoty profilu, což umožňuje lepší detekci výrazných nerovností či defektů na povrchu. Je užitečný při aplikacích, kde jsou kritické maximální výšky nerovností, například při těsnění nebo kontaktních plochách (ACCRETECH (Europe) GmbH, 2025).

1. Výpočet střední aritmetické odchylky (R_a):

Rovnice 2 Střední aritmetické odchylky (R_a)

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |Z_{(x)}| dx$$

kde:

- R_a = střední aritmetická odchylka profilu [μm],
- L = délka měřeného úseku profilu [mm],
- Z_(x) = odchylka profilu od střední linie [μm].

Tento parametr je široce používán v metrologii povrchu pro kvantifikaci drsnosti a hodnocení kvality povrchů. Jeho význam spočívá v poskytování jednoho čísla, které reprezentuje celkovou odchylku povrchu od ideální hladkosti, což je zásadní pro kontrolu výrobních procesů a zajištění požadovaných vlastností finálních produktů (Whitehouse, 1994).

2. Výpočet maximální výšky profilu (R_z):

Rovnice 3 Maximální výšky profilu (R_z)

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 (Z_{max} - Z_{min})$$

kde:

- R_z = maximální výška profilu [μm],
- Z_{max} = nejvyšší bod profilu [μm],
- Z_{min} = nejnižší bod profilu [μm].

Tento parametr poskytuje detailnější pohled na povrchovou strukturu tím, že zdůrazňuje extrémní hodnoty nerovností, což je užitečné při hodnocení funkčních a estetických vlastností povrchu. R_z se často používá v technických specifikacích pro kontrolu kvality povrchů v různých průmyslových odvětvích (Mahr GmbH, 2017).

1.6.2.3 Konstrukce drsnoměru

Drsnoměr je přesný měřicí přístroj určený k hodnocení drsnosti povrchů. Jeho konstrukce zahrnuje několik zásadních komponentů:

- **Snímací hrot:** Obvykle vyrobený z diamantového nebo tvrdokovového materiálu, tento hrot mechanicky kontaktuje povrch a sleduje jeho nerovnosti. Jeho vysoká tvrdost zajišťuje dlouhou životnost a přesnost měření. Některé moderní drsnoměry využívají induktivní sondy s diamantovým dotekem, které umožňují rozlišit až 21 parametrů drsnosti (MB Calibr, 2025).
- **Pohon:** Mechanismus, který zajišťuje přesný a rovnoměrný pohyb snímacího hrotu po povrchu. Tento pohyb je kritický pro získání spolehlivých dat o profilu povrchu. U přenosných drsnoměru je pohon často integrován tak, aby umožňoval intuitivní a rychlé měření přímo na pracovišti nebo ve výrobních strojích (KUBOUŠEK, 2025).
- **Detektor:** Snímač, který převádí vertikální pohyby hrotu na elektrické signály. Běžně se používají indukční nebo kapacitní snímače, které poskytují vysokou citlivost a přesnost při detekci jemných nerovností povrchu. Tyto snímače jsou schopny měřit drsnost povrchu na nastavené délce tak, že se motoricky posouvá měřicí hrot a snímají se jeho příčné pohyby (PROINEX, 2025).
- **Procesor dat:** Elektronická jednotka, která zpracovává signály z detektoru a vypočítává různé parametry drsnosti nebo hloubky, jako jsou R_a , R_z nebo R_t . Tento procesor často obsahuje software pro analýzu a interpretaci naměřených dat. Moderní drsnoměry umožňují ukládat do paměti až 100 výsledků měření a nabízejí možnost připojení k externím zařízením pro další analýzu (MB Calibr, 2025).
- **Displej nebo tiskárna:** Zařízení pro zobrazení nebo tisk výsledků měření, včetně numerických hodnot drsnosti a hloubky nebo grafického znázornění profilu povrchu. Moderní drsnoměry často disponují dotykovými displeji pro intuitivní ovládání a možností připojení k externím zařízením pro ukládání a sdílení dat. Některé modely jsou vybaveny integrovaným připojením Bluetooth pro snadný přenos dat (KUBOUŠEK, 2025).

1.6.2.4 Typy drsnoměru

Drsnoměry jsou specializované přístroje určené k měření drsnosti povrchů. Existuje několik typů drsnoměru, z nichž každý je vhodný pro specifické aplikace:

1. **Mechanické drsnoměry:** Tyto přístroje využívají mechanický kontakt se zkoumaným povrchem pomocí hrotu, který sleduje nerovnosti povrchu. Jsou vhodné pro základní měření drsnosti a hloubky, zejména v případech, kdy je vyžadována jednoduchost a rychlost měření (Shkotova, 2018).
2. **Optické drsnoměry:** Bezkontaktní zařízení, která využívají laserové nebo světelné paprsky k analýze povrchu. Jsou ideální pro měření citlivých nebo křehkých materiálů, kde by mechanický kontakt mohl způsobit poškození. Optické drsnoměry nabízejí vysokou přesnost a jsou schopny měřit i velmi jemné detaily povrchu (Mav.cz, 2025).
3. **Kombinované přístroje:** Moderní profiloměry a konturoměry, které umožňují současné měření drsnosti i hloubky povrchu s vysokou přesností. Tyto přístroje

kombinují výhody mechanických a optických metod a jsou vhodné pro komplexní analýzy povrchových vlastností v průmyslových aplikacích (Shkotova, 2018).

Při hodnocení gravírování hrají drsnoměry důležitou roli v kontrole kvality gravírovaných povrchů. Měření drsnosti je nezbytné pro následující účely:

- **Estetická analýza:** Zajištění konzistence a požadovaného vizuálního efektu gravírovaných produktů. Přesné měření povrchových parametrů umožňuje detekovat a korigovat odchylky, které by mohly ovlivnit vzhled finálního výrobku (Mav.cz, 2025).
- **Funkční testy:** Ověření přilnavosti barev, odrazivosti světla nebo správné funkčnosti technických značení. Například v elektronickém průmyslu je důležité, aby gravírované povrchy měly specifické vlastnosti pro zajištění optimálního výkonu komponent (Shkotova, 2018).
- **Optimalizace procesu gravírování:** Nastavení parametrů gravírovacích strojů na základě měření povrchových charakteristik. Tím lze dosáhnout vyšší přesnosti a efektivity výrobního procesu, což vede k lepší kvalitě finálních produktů (Mav.cz, 2025).

1.6.3 Skenování povrchu dřeva a vygravírovaných políček

Skenování povrchu je metodou pro analýzu kvality gravírování, zejména u dřevěných materiálů. Tato technika umožňuje detailní zobrazení mikrostruktury povrchu, měření hloubky gravírovaných oblastí a hodnocení homogenity povrchové úpravy. Využití moderních skenovacích technologií poskytuje neinvazivní způsob, jak získat přesná data o kvalitě a struktuře povrchu (Cerman.cz, 2024).

1.6.3.1 Princip skenování povrchu pomocí plochého skeneru

Plochý skener je zařízení určené k digitalizaci plochých obrazových předloh, jako jsou dokumenty, fotografie nebo ilustrace. Jeho konstrukce zahrnuje skleněnou desku, pod kterou se pohybuje snímací jednotka složená z optického systému, světelného zdroje a snímače (např. CCD nebo CIS). Při skenování zůstává předloha statická, zatímco snímací jednotka se pohybuje pod ní a postupně zachycuje obraz po řádcích. Světelný zdroj osvětluje předlohu, odražené světlo je zachyceno optickým systémem a převedeno snímačem na digitální signál, který je následně zpracován do výsledného obrazu.

1.6.3.2 Využití skenování pro povrch dřeva

Skenování povrchu dřeva je metodou pro analýzu a kontrolu kvality v dřevozpracujícím průmyslu. Tato technologie umožňuje detailní hodnocení textury a identifikaci defektů, což přispívá k optimalizaci výrobních procesů a zajištění vysoké kvality finálních produktů.

Hodnocení textury: Skenování umožňuje detailní analýzu přirozené struktury dřeva, což je zásadní pro pochopení interakce mezi materiálem a procesy, jako je laserové gravírování. Tato analýza pomáhá při výběru vhodných parametrů pro gravírování a další povrchové úpravy (Kováč, 2013).

Identifikace defektů: Skenování umožňuje detekci vad, jako jsou praskliny, uzly nebo nerovnosti, které mohou ovlivnit kvalitu gravírování. Včasná identifikace těchto defektů umožňuje jejich opravu nebo eliminaci, což vede k vyšší kvalitě finálních produktů (Kačík a Kubovský, 2011).

1.6.3.3 Techniky skenování

1. **2D skenování:** Tato metoda se používá pro základní analýzy povrchu, jako je měření plošných parametrů, například šířky nebo délky gravírovaných oblastí. Je vhodná pro jednodušší aplikace, kde není potřeba detailních informací o hloubce nebo drsnosti povrchu (Keyence, 2025).
2. **3D skenování:** Umožňuje detailní rekonstrukci povrchu včetně informací o hloubce a drsnosti. Tato technika je vhodná pro hodnocení složitých geometrických struktur a poskytuje komplexní data pro analýzu. Podle Tůmy (2010) je 3D skenování proces digitalizace, během kterého dochází k přenosu fyzické podoby předmětu do virtuální trojrozměrné podoby, kterou lze doplnit o vizuální informace (Tůma, Z., 2010.).
3. **Laserové skenování:** Jedná se o vysoce přesnou metodu využívající laserové paprsky k mapování povrchových nerovností bez nutnosti kontaktu. Laserové skenování kombinuje data z laseru, který na objekt svítí, a data z jiného zdroje, aby vytvořilo mračno bodů povrchu objektu (M3Dtisk.cz, 2025).

1.6.3.4 Použití skenování v gravírování

Při hodnocení kvality gravírování na dřevo se skenování používá pro:

- **Kontrola hloubky gravírování:** Skenování umožňuje přesné měření hloubky vygravírovaných oblastí, čímž se ověřuje, zda gravírování odpovídá stanoveným parametrům.
- **Analýza drsnosti povrchu:** Díky skenování lze detailně zkoumat povrchové nerovnosti po gravírování, což je důležité pro následné povrchové úpravy nebo funkční vlastnosti výrobku.
- **Hodnocení estetiky:** Skenovací technologie poskytují detailní obraz vygravírovaných prvků, což umožňuje posoudit jejich jednotnost a shodu s původním návrhem.

1.6.3.5 Výhody skenování při práci s dřevem

- **Neinvazivní metoda:** Skenování nepoškozuje povrch materiálu, což je zvláště důležité u citlivých nebo dokončených dřevěných povrchů.
- **Vysoká přesnost:** Moderní skenovací zařízení dokážou zachytit detaily až do mikrometrové úrovně, což umožňuje velmi přesné měření a analýzy.
- **Rychlost:** Skenování umožňuje rychlé zpracování velkých ploch, což zvyšuje efektivitu při kontrolách kvality a při sériové výrobě.

Podle Johanis a Žemličky (2019) je výhodou skenování rychlost sběru dat, přesnost a komplexní zachycení zaměřovaných prostor (Johanis, V. a Žemlička, M., 2019).

1.6.3.6 Princip fungování skeneru Epson Perfection V700 Photo

Skener Epson Perfection V700 Photo, který je použit v experimentální části je zařízení určené pro digitalizaci fotografií, filmů a diapozitivů s důrazem na kvalitu obrazu. Jeho konstrukce a technologie umožňují přesné a detailní skenování různých typů médií (Epson, 2006).

Jedním z klíčových prvků tohoto skeneru je Dual Lens System, který automaticky volí mezi dvěma objektivy podle požadovaného rozlišení a typu média. Pro skenování reflexních materiálů, jako jsou fotografie, se využívá objektiv s rozlišením 4800 dpi. Pro transparentní média, jako jsou negativy a diapozitivy, se přepíná na objektiv s vyšším rozlišením 6400 dpi. Tato technologie zajišťuje optimální kvalitu obrazu pro různé typy skenovaných materiálů (Epson, 2006).

Skener je vybaven šestiliniovým barevným CCD snímačem s mikročočkami, který poskytuje vysokou přesnost při zachycení detailů a barev. Osvětlení zajišťuje studená katodová fluorescenční lampa (CCFL), která poskytuje rovnoměrné a konzistentní osvětlení během skenování (Epson, 2006).

S optickou hustotou 4,0 Dmax skener dokáže zachytit jemné detaily v tmavých oblastech obrazu, což je zvláště důležité při skenování negativů a diapozitivů. Barevná hloubka 48 bitů umožňuje zachycení širokého spektra barev a jemných odstínů, což přispívá k věrnému zobrazení originálu (Epson, 2006).

Skener využívá technologii DIGITAL ICE, která automaticky detekuje a odstraňuje prach, škrábance a další povrchové nedokonalosti z filmů a fotografií během skenování. Tato technologie výrazně snižuje potřebu následného retušování a zajišťuje čistší a kvalitnější digitální obrazy (Epson, 2006).

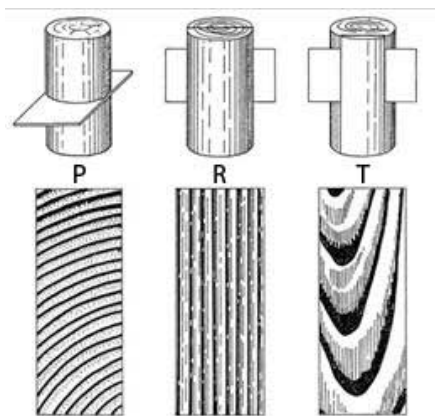
Součástí balení je software Epson Scan, který nabízí různé režimy skenování (automatický, domácí a profesionální) a umožňuje uživatelům přizpůsobit nastavení podle svých potřeb. Dále je k dispozici software LaserSoft Imaging SilverFast SE, který poskytuje pokročilé nástroje pro úpravu a optimalizaci skenovaných obrazů (Epson, 2006).

1.7 Dřevo

Kratochvíl (2019) ve své práci uvádí, že dřevo je velmi oblíbený materiál využívaný v různých průmyslových odvětvích, především díky své univerzálnosti. Pro laserové gravírování je nejvhodnější dřevo s co nejhomogennější strukturou. Na kvalitu výsledného produktu má vliv několik faktorů, například obsah vlhkosti, obsah olejů a pryskyřic nebo hustota dřeva. Při zpracování dřeva často dochází k oxidaci na řezných hranách, což způsobuje jejich zčernání. Přestože tomuto jevu nelze zcela zabránit, správná volba dřeva může snížit míru oxidace. Čím sušší dřevo a nižší obsah pryskyřic, tím světlejší bude řezná hrana (Kratochvíl, 2019).

Pro hodnocení struktury dřeva na základě viditelných charakteristik se používají tři hlavní typy řezů, jak je znázorněno na obrázku 1 (Kratochvíl, 2019).

- **Příčný řez**, který je veden kolmo na podélnou osu kmene.
- **Podélný radiální řez**, který se provádí podél osy kmene a kolmo k příčnému řezu.
- **Podélný tangenciální řez**, který se provádí rovnoběžně s osou kmene, sleduje směr tečny k letokruhům.



Obrázek 1 Schématické znázornění základních řezů kmenem (Balabán, 1955), P – příčný (transversální) řez, R – radiální řez, T – tangenciální řez

Dřevo lze identifikovat na základě makroskopických a mikroskopických znaků, což vyžaduje určitou zkušenost. Proces identifikace začíná od nejzřetelnějších znaků a pokračuje k detailnějším vlastnostem. Při tomto procesu se zkoumají následující prvky (Kratochvíl, 2019):

- Barva dřeva
- Rozdíl v barvě mezi vnější a vnitřní částí (bělové a jádrové dřevo)
- Rozdíl v barvě mezi jarním a letním přírůstkem
- Přejít mezi jarním a letním přírůstkem
- Pryskyřičné kanálky
- Struktura dřeva
- Dřeňové paprsky
- Uspořádání pórů
- Vůně čerstvě řezaného dřeva
- Srovnání tvrdosti a hustoty, k čemuž jsou zapotřebí vzorky se stejným objemem a vlhkostí.

Různé druhy dřeva nabízejí estetické a ekologické výhody, což umožňuje vytvářet produkty kombinující inovaci, vizuální styl a technologii. Gravírování umožňuje výrobu jedinečných a personalizovaných předmětů, které odrážejí osobní styl a preference zákazníka, přičemž každý kus je originál. Proces gravírování zahrnuje výběr a přípravu materiálu, aplikaci ochranných povrchových úprav a samotné gravírování pomocí pokročilých technologií, jako je laser (Potočan, 2015).

1.7.1 Dělení a druhy dřeva

Dřevo, jakožto klíčový materiál v mnoha průmyslových odvětvích, je klasifikováno podle různých hledisek, která ovlivňují jeho vlastnosti a vhodnost pro specifické aplikace. Mezi

základní způsoby dělení dřeva patří klasifikace podle botanické příslušnosti a tvrdosti (Marsálek, 2010).

1.7.1.1 Dělení dřeva podle botanické příslušnosti

Tato klasifikace rozděluje dřeviny na dvě hlavní kategorie, a to na jehličnaté a listnaté dřeviny. Toto rozdělení je důležité zejména z hlediska jejich morfologických vlastností, struktury dřeva a následného využití ve stavebnictví, truhlářství i dalších průmyslových odvětvích (Podroužková, 2011).

A. Jehličnaté dřeviny

Jehličnaté dřeviny, označované také jako gymnospermy, jsou charakteristické svými úzkými, jehlicovitými listy, které mají schopnost zůstat na stromech po celý rok, čímž se minimalizuje odpařování vody. Většina jehličnanů má měkké dřvo s přímou vláknitou strukturou, díky čemuž se snadno opracovává a nachází široké uplatnění v dřevozpracujícím průmyslu (Podroužková, 2011, s. 35). Typickými zástupci této skupiny jsou:

- **Smrk (*Picea abies*):** Patří mezi nejdůležitější hospodářské dřeviny v Evropě, vyznačuje se světle žlutobílým dřevem s rovnovláknitou strukturou.
- **Borovice (*Pinus sylvestris*):** Má vyšší obsah pryskyřice, díky čemuž je odolnější vůči vlhkosti, a je často využívána ve stavebnictví.
- **Jedle (*Abies alba*):** Má podobné vlastnosti jako smrk, ale obsahuje méně pryskyřice a je odolnější vůči změnám vlhkosti.

Jehličnaté dřeviny se často využívají na výrobu stavebního řeziva, nábytku, dřevěných panelů, celulózy a papíru. Díky jejich rovnovláknité struktuře se snadno hoblují a lepí (Podroužková, 2011, s. 40).

B. Listnaté dřeviny

Listnaté dřeviny, známé také jako **angiospermy**, mají široké listy, které zpravidla na podzim opadávají. Jejich dřvo je často tvrdší, hustší a vykazuje větší odolnost vůči mechanickému opotřebení. Díky tomu se často využívá na výrobu kvalitního nábytku, podlah nebo hudebních nástrojů (Podroužková, 2011, s. 42). Mezi typické zástupce patří:

- **Dub (*Quercus robur*):** Těžké a tvrdé dřvo s vysokou trvanlivostí, odolné proti vlhkosti a škůdcům, ideální pro výrobu sudů a konstrukčních prvků.
- **Buk (*Fagus sylvatica*):** Homogenní struktura s vysokou pevností, vhodný pro výrobu ohýbaného nábytku.
- **Javor (*Acer pseudoplatanus*):** Jemná textura, světlé dřvo s dobrou opracovatelností, používaný na výrobu hudebních nástrojů.
- **Jasan (*Fraxinus excelsior*):** Houževnaté a pružné dřvo, často se využívá na výrobu sportovního náčiní a násad k nástrojům.

1.7.2 Vliv botanické příslušnosti na vlastnosti dřeva

Botanická příslušnost dřeviny přímo ovlivňuje její hustotu, tvrdost a trvanlivost. Jehličnaté dřevo má zpravidla nižší hustotu a tvrdost než dřevo listnaté, což usnadňuje jeho zpracování, ale omezuje odolnost proti mechanickému opotřebení. Naopak tvrdé listnaté dřevo se vyznačuje vyšší hustotou, což jej činí vhodným pro vysoce namáhané konstrukce a exkluzivní výrobky (Podroužková, 2011, s. 50).

1.7.2.1 Dělení dřeva podle tvrdosti

Tvrdost dřeva je klíčovým parametrem při jeho zpracování a použití. Ovlivňuje nejen odolnost materiálu, ale také vhodnost pro různé typy obrábění a konstrukční využití. Podle Kučery (2007, s. 24) se dřevo obvykle dělí na měkké a tvrdé, přičemž existují i přechodné kategorie.

A. Měkké dřevo

Měkké dřevo zahrnuje převážně jehličnaté dřeviny, které se vyznačují nižší hustotou a snadnější opracovatelností. K typickým zástupcům patří:

- **Smrk (*Picea abies*):** Jedno z nejběžnějších dřev používaných ve stavebnictví a na výrobu papíru. Má rovnoláknitou strukturu a nízkou tvrdost, což umožňuje snadné opracování (Kučera, 2007, s. 25).
- **Borovice (*Pinus sylvestris*):** Má vyšší obsah pryskyřice než smrk, což jí propůjčuje vyšší odolnost proti vlhkosti, ale zároveň může komplikovat opracování kvůli ulpívání pryskyřice na nástrojích (Kučera, 2007, s. 26).
- **Jedle (*Abies alba*):** Podobná smrku, ale s nižším obsahem pryskyřice, díky čemuž je méně náchylná ke znečištění nástrojů při opracování (Kučera, 2007, s. 27).
- **Topol (*Populus spp.*) a lípa (*Tilia spp.*):** Tyto dřeviny jsou extrémně měkké a často se používají pro řezbářské práce, modelářství nebo výrobu dřevěných obalů (Kučera, 2007, s. 29).

B. Tvrdé dřevo

Tvrdé dřevo zahrnuje převážně listnaté dřeviny s vyšší hustotou a pevností. Tyto vlastnosti zajišťují odolnost proti mechanickému opotřebení, což je důležité například při výrobě podlah, nábytku nebo hudebních nástrojů (Kučera, 2007, s. 30). Mezi hlavní zástupce patří:

- **Dub (*Quercus robur*):** Těžké a odolné dřevo s vysokým obsahem tříslovin, které mu dodávají přirozenou ochranu proti škůdcům a vlhkosti. Je vhodné pro výrobu podlah, sudů a nábytku (Kučera, 2007, s. 31).
- **Buk (*Fagus sylvatica*):** Homogenní struktura a vysoká pevnost dělají z buku ideální dřevo pro ohýbaný nábytek. Kvůli nižší přirozené odolnosti se často povrchově upravuje (Kučera, 2007, s. 32).
- **Javor (*Acer pseudoplatanus*):** Tvrdé dřevo s jemnou texturou, které se využívá například při výrobě hudebních nástrojů a sportovního náčiní (Kučera, 2007, s. 33).

- **Jasan (*Fraxinus excelsior*):** Velmi houževnaté a pružné dřevo, často využívané na výrobu násad nástrojů a sportovního vybavení, jako jsou baseballové pálky nebo luky (Kučera, 2007, s. 34).

1.7.3 Vliv tvrdosti na opracování a použití dřeva

Dělení dřeva podle tvrdosti hraje klíčovou roli při volbě vhodného materiálu pro různé aplikace. Měkké dřeviny se snadno opracovávají, ale mají nižší odolnost vůči mechanickému poškození. Tvrdé dřeviny naopak vyžadují ostřejší a odolnější nástroje, avšak poskytují delší životnost výrobků a větší odolnost proti vnějším vlivům (Kučera, 2007, s. 35).

1.8 Lasery a jejich principy

Lasery představují technologii s širokým využitím v průmyslu, medicíně, vědě i komunikačních systémech. Jejich jedinečné vlastnosti, jako je vysoká koherence, monochromaticnost a směrovost, umožňují přesné a efektivní aplikace, které by jinými způsoby nebylo možné realizovat. V této kapitole jsou popsány základní principy laserů, jejich fyzikální podstata a různé typy laserových zdrojů (Šustr, 2019; Čech, 2020; Brožovský, 2014).

1.8.1 Princip činnosti laseru

Základem funkce laseru je proces **stimulované emise záření**, který poprvé popsal Albert Einstein v roce 1917. Tento jev spočívá v tom, že foton interaguje s excitovaným atomem a vyvolá emisi dalšího fotonu se stejnou energií, fází a směrem (Brožovský, 2014, s. 10). Tento princip umožňuje generování intenzivního a koherentního paprsku světla.

Laserová soustava se skládá z následujících částí:

- **Aktivní prostředí:** Látka, ve které dochází k excitaci elektronů a následně stimulované emisi fotonů. Může být plynové, kapalně nebo pevné (Čech, 2020, s. 15).
- **Zdroj energie (čerpání):** Systém, který dodává energii do aktivního prostředí, čímž se elektrony excitují na vyšší energetickou hladinu (Brožovský, 2014, s. 14).
- **Optická rezonátorová dutina:** Dvojice zrcadel, mezi nimiž se světlo odráží a zesiluje, čímž dochází k dalšímu vybuzení aktivního prostředí (Šustr, 2019, s. 23).

V aktivním prostředí laseru probíhá tzv. inverzní populace, kdy více elektronů přechází do excitovaného stavu a dochází ke stimulované emisi fotonů stejné vlnové délky a fáze. Výsledkem je vysoce uspořádaný a směrový paprsek (Čech, 2020, s. 18).

1.8.2 Typy laserů podle aktivního prostředí

Lasery lze rozdělit do několika kategorií podle typu aktivního prostředí, které určuje jejich vlastnosti a možné aplikace:

1.8.2.1 Plynové lasery

Plynové lasery využívají aktivní prostředí tvořené směsí plynů, ve kterých dochází k excitaci elektronů. Mezi nejběžnější patří helium-neonový laser, který generuje monochromatické světlo v červené oblasti spektra (632,8 nm) a často se využívá v měřicích přístrojích a optických systémech (Brožovský, 2014, s. 28). Dalším zástupcem je, CO₂ laser,

pracující v infračervené oblasti spektra (10,6 μm), který nachází široké uplatnění v průmyslovém řezání a gravírování (Šustr, 2019, s. 31).

1.8.2.2 Pevnolátkové lasery

Pevnolátkové lasery mají aktivní prostředí tvořené pevným materiálem, například krystaly s příměsí vzácných kovů. Neodymový YAG laser (Nd:YAG) je jedním z nejrozšířenějších typů v této kategorii a využívá se ve strojírenství k mikroobrábění kovů (Čech, 2020, s. 23).

1.8.2.3 Polovodičové lasery

Polovodičové lasery fungují na principu přechodu elektronů mezi energetickými pásmy v polovodičových materiálech. Jsou malé, efektivní a široce využívané v optických komunikacích, čtečkách čárových kódů a laserových ukazovátkách (Brožovský, 2014, s. 36).

1.8.3 Vlastnosti laserového záření

Laserové světlo se vyznačuje několika vlastnostmi, které jej odlišují od běžného světelného zdroje:

1. **Monochromaticnost:** Laser vyzařuje světlo o jediné vlnové délce, což zajišťuje jeho vysokou spektrální čistotu (Šustr, 2019, s. 41).
2. **Koherence:** Vlny laserového světla jsou fázově synchronizované, což umožňuje jeho efektivní využití v interferometrii a holografii (Čech, 2020, s. 27).
3. **Směrovost:** Laserový paprsek má velmi malý rozptyl a může být přesně zaměřen na velkou vzdálenost (Brožovský, 2014, s. 42).
4. **Vysoká intenzita:** Díky stimulované emisi může mít laserový paprsek extrémně vysokou energii, což umožňuje jeho využití v průmyslovém řezání a svařování (Šustr, 2019, s. 45).

1.9 Bezpečnostní aspekty provozu laserové gravírky xTool

Laserové gravírky, jako je xTool, jsou sofistikovaná zařízení využívající koncentrované světelné paprsky k přesnému gravírování a řezání různých materiálů. Přestože nabízejí široké spektrum aplikací, jejich provoz s sebou nese potenciální rizika, která vyžadují důkladné pochopení a dodržování bezpečnostních opatření. Tato kapitola se zaměřuje na klíčové bezpečnostní aspekty spojené s používáním laserové gravírky xTool, včetně klasifikace laserových zařízení, identifikace možných rizik a implementace preventivních opatření (ČSN EN 60825-1, 2014; IEC 60825-1, 2014).

1.9.1 Klasifikace laserových zařízení

Laserová zařízení jsou klasifikována podle úrovně rizika, které představují pro uživatele a okolí. Tato klasifikace je stanovena mezinárodní normou ČSN EN 60825-1 (2014), která definuje následující třídy:

- **Třída 1:** Lasery bezpečné za všech podmínek běžného použití, včetně použití optických přístrojů pro přímé zobrazení paprsku.
- **Třída 1M:** Lasery bezpečné za běžných podmínek použití, ale mohou být nebezpečné při použití optických přístrojů, které soustřeďují paprsek.
- **Třída 2:** Lasery vyzařující viditelné záření (400–700 nm), které jsou bezpečné pro krátkodobou expozici; ochrana je zajištěna mrknutím oka.
- **Třída 2M:** Podobné třídě 2, ale mohou být nebezpečné při použití optických přístrojů pro soustředění paprsku.
- **Třída 3R:** Lasery s omezeným rizikem; přímé ozáření může být nebezpečné, ale riziko je nižší než u třídy 3B.
- **Třída 3B:** Lasery představující riziko pro oči při přímém nebo zrcadleném ozáření; difúzní odrazy obvykle nejsou nebezpečné.
- **Třída 4:** Nejnebezpečnější lasery; mohou způsobit vážné poškození očí a kůže a představují riziko požáru.

Laserová gravírka xTool D1 Pro je vybavena bezpečnostními prvky, které minimalizují rizika spojená s jejím provozem. Model xTool D1 Pro zahrnuje funkce jako indikátor stavu zařízení a tlačítko pro rychlé vypnutí, což zajišťuje bezpečné používání. Navíc je možné připojit odsávací systém přes výfukový otvor, což pomáhá eliminovat nebezpečné výpary během gravírování (xTool, 2025).

1.9.2 Identifikace rizik při používání laserové gravírky xTool

Při provozu laserové gravírky xTool je třeba věnovat pozornost následujícím potenciálním rizikům (xTool, 2025):

1. **Poškození očí a kůže:** Přímý nebo odražený kontakt s laserovým paprskem může vést k vážnému poškození zraku nebo popáleninám kůže.
2. **Požár:** Nesprávné použití nebo nedostatečný dohled může vést k zapálení hořlavých materiálů v blízkosti zařízení.
3. **Inhalace škodlivých zplodin:** Při gravírování některých materiálů mohou vznikat toxické nebo dráždivé plyny a částice.
4. **Elektrický šok:** Nesprávná manipulace s elektrickými komponenty zařízení může vést k úrazu elektrickým proudem.

1.9.3 Preventivní opatření a doporučení pro bezpečný provoz

Aby byla zajištěna bezpečnost při používání laserové gravírky xTool, je nezbytné dodržovat následující opatření (xTool, 2025):

1. **Používání ochranných pomůcek:** Vždy noste vhodné ochranné brýle určené pro specifickou vlnovou délku laseru, abyste chránili svůj zrak před možným poškozením.

2. **Zajištění bezpečného pracovního prostředí:** Udržujte pracovní prostor čistý a bez hořlavých materiálů. Zajistěte dostatečné větrání nebo použijte odsávací systémy k odstranění škodlivých zplodin vznikajících při gravírování.
3. **Dodržování provozních pokynů:** Pečlivě se seznamte s návodem k obsluze zařízení a dodržujte všechny uvedené bezpečnostní pokyny.
4. **Pravidelná údržba:** Provádějte pravidelnou kontrolu a údržbu zařízení podle doporučení výrobce, aby byla zajištěna jeho správná funkčnost a bezpečnost.
5. **Školení obsluhy:** Zajistěte, aby všichni uživatelé zařízení byli řádně proškoleni v bezpečnostních postupech a byli si vědomi potenciálních rizik spojených s jeho provozem.
6. **Používání vhodných materiálů:** Vyvarujte se gravírování materiálů obsahujících PVC nebo jiných látek, které mohou při zahřívání uvolňovat toxické plyny.
7. **Monitorování provozu:** Nikdy nenechávejte zařízení bez dozoru během provozu a v případě nouze buďte připraveni zařízení okamžitě vypnout.

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

2.1 Použité zařízení

V této kapitole je představeno zařízení použité při realizaci experimentů, konkrétně laserový gravírovací stroj xTool D1 Pro. Tento diodový laser umožnil přesné a opakovatelné zpracování různých typů dřevin, což bylo klíčové pro dosažení spolehlivých a srovnatelných výsledků.

2.1.1 Gravírovací stroj xTool D1 Pro

Gravírovací stroj xTool D1 Pro představuje moderní zařízení využívající diodový laser s vlnovou délkou 455 nm. Díky své univerzálnosti a schopnosti přizpůsobit nastavení různým materiálům je vhodný jak pro profesionální, tak hobby použití. Tento stroj umožňuje gravírování široké škály materiálů, včetně dřeva, kovů, plastů, akrylů a kůže (xTool, 2023).

2.1.1.1 Technické specifikace

Pracovní plocha stroje má rozměry 432 × 406 mm, což umožňuje zpracování středně velkých projektů. Rozlišení laseru dosahuje hodnoty 0,01 mm, což umožňuje vytvářet detailní vzory a texty s vysokou přesností. Možnost nastavení intenzity laseru, rychlosti gravírování a počtu průchodů dává uživateli kontrolu nad kvalitou výsledného gravírování a umožňuje přizpůsobit parametry konkrétním materiálům. Tvrdší materiály, jako je dub nebo kov, vyžadují vyšší intenzitu laseru a pomalejší rychlost, zatímco měkké materiály, například lípa, vyžadují nižší intenzitu a rychlejší pohyb paprsku, aby nedošlo k přepalování (Patričný, 2016, s. 78; xTool, 2023).

2.1.1.2 Funkce a bezpečnostní prvky

Jednou z důležitých funkcí je nastavení výšky hlavy laseru, které zajišťuje optimální zaostření paprsku na povrch materiálu. Kromě toho stroj nabízí kompatibilitu s různými softwary pro návrh vzorů a podporuje soubory formátů SVG, PNG a BMP (xTool, 2023).

Bezpečnostní prvky zahrnují ochranný kryt laseru a systém automatického vypnutí při manipulaci během provozu. Tyto prvky zajišťují ochranu uživatele i materiálu, což je důležité zejména při práci s hořlavými materiály, jako je dřevo nebo akryl (Josten, Reiche a Wittchen, 2010, s. 102).

2.1.2 Skener Epson Perfection V700 Photo

Skener Epson Perfection V700 Photo byl použit k digitalizaci Siemensových hvězd vygravírovaných do dřeva.

Je to vysoce výkonné zařízení určené pro digitalizaci fotografií, filmů a diapositivů s důrazem na vysokou kvalitu obrazu. Jeho konstrukce a technologie umožňují přesné a detailní skenování různých typů médií (Epson, 2006). Více o skeneru Epson Perfection V700 Photo v kapitole 1.6.4.6 strana 26. v teoretické části.

2.1.3 Spektrofotometr Eye-One Pro 1

Spektrofotometr Eye-One Pro byl použit k měření spektrálních odrazových charakteristik vzorků, ze kterých byly následně vypočteny trichromatické hodnoty CIE XYZ,

barevné souřadnice v systému CIE L* a b* a denzita. Měření probíhalo při standardním osvětlení D50. Více o Spektrofotometru Eye-One Pro v kapitole 1.6.1.1 strana 19. v teoretické části.

2.1.4 Drsnoměr Mitutoyo Surftest SJ-210

Drsnoměr Mitutoyo Surftest SJ-210 je přenosné zařízení určené k měření drsnosti povrchu v terénních i laboratorních podmínkách. Umožňuje vyhodnocení různých parametrů drsnosti v souladu s normami ISO, JIS, ANSI a VDA, včetně často používaného parametru R_a , který byl využit při vyhodnocování v této diplomové práci. Přístroj je vybaven LCD displejem a interní pamětí pro uložení výsledků (Mitutoyo Corporation, [bez data]).

2.2 Technologie laserového gravírování

Laserové gravírování je technologie, která využívá vysoce soustředěný paprsek světla k přesnému opracování povrchu materiálu. V případě dřeva dochází k interakci laserového paprsku s povrchem materiálu, což vede k jeho zahřátí a následnému odpaření nebo karbonizaci. Tím se vytvářejí trvalé značky nebo vzory na povrchu dřeva, které jsou výsledkem změny jeho struktury a barvy. Tento proces lze rozdělit na:

- **Povrchové gravírování**, kdy dochází k minimálnímu narušení povrchu.
- **Hluboké gravírování**, které proniká hluboko do materiálu a využívá se například při výrobě razidel.
- **Řezání materiálů**, kdy laser prochází skrz materiál a vytváří precizní tvary (Požgaj a kol., 1997, s. 213–214).

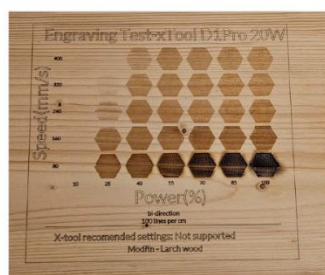
Dřevo je materiál, který se při laserovém gravírování vyznačuje přirozenou změnou barvy a textury v důsledku působení tepla. Správné nastavení parametrů, jako je intenzita laseru a rychlost gravírování, je zásadní pro dosažení požadovaného výsledku. Tvrdé dřeviny, například dub nebo jasan, vyžadují vyšší intenzitu a více průchodů laseru, zatímco měkké dřeviny, jako lípa, jsou náchylnější k přepalování a vyžadují opatrnější přístup (Patričný, 2016, s. 76; Šlezingerová a Gandelová, 1994, s. 47).

Laserové gravírování nachází uplatnění nejen v dekorativních aplikacích, ale také v průmyslových procesech, kde je zásadní přesnost a trvanlivost značení. V polygrafii umožňuje gravírování vytvářet jemné textury povrchu, které ovlivňují přilnavost barvy a kvalitu tisku (Desch a Dinwoodie, 1996, s. 92).

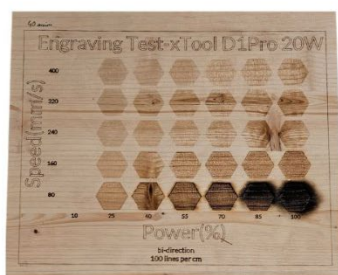
Laserové gravírování hraje zásadní roli v polygrafickém průmyslu, kde je kladen důraz na přesnost, rychlost a kvalitu zpracování. Tato technologie umožňuje vytvářet jemné detaily a složité vzory, což je důležité pro výrobu tiskových forem i dekorativních prvků. Gravírování je široce využíváno jak ve funkčních, tak estetických aplikacích (Josten, Reiche a Wittchen, 2010, s. 112; Požgaj a kol., 1997, s. 213).

2.3 Měření a vyhodnocení

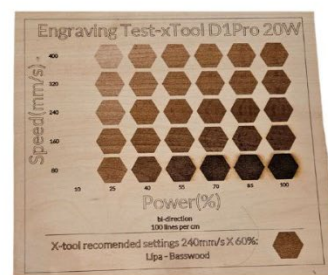
Tato kapitola představuje metody a postupy použité k objektivnímu hodnocení kvality gravírování různých dřevin.



Modřín



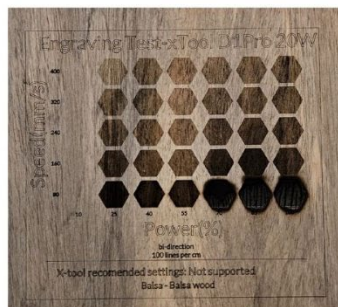
Smrk



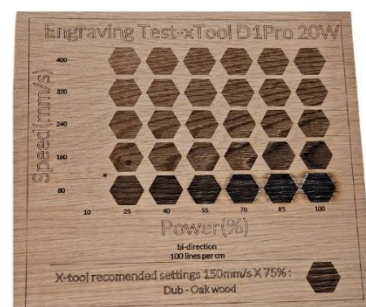
Lípa



Jasan



Balsa

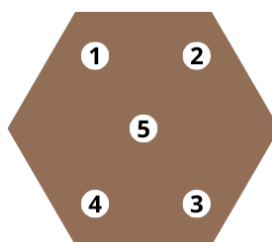


Dub

Obrázek 2 Vzorčky

2.3.1 Spektrofotometr Eye-One Pro 1

V této části práce bylo uskutečněno měření vzorků pomocí spektrofotometru Eye One Pro 1. Měření byla provedeno systematicky (viz. obrázek 3.) za stejných podmínek. Cílem bylo získat objektivní hodnoty spekter, optické hustoty, nárůstu tónové hodnoty a celkového kontrastu.



Obrázek 3 Měření spektrofotometrem

Naměřené hodnoty byly zpracovány statistickou analýzou. Z jednotlivých měření byl vypočítán průměr a směrodatná odchylka, čímž byla zajištěna přesnost a reprodukovatelnost výsledků.

Na základě naměřených dat byla stanovena optická hustota, která vyjadřuje míru absorpance světla v gravírované vrstvě. Dále byl spočítán nárůst tónové hodnoty (TVI – Tone Value Increase), který vyjadřuje rozdíl mezi hodnotou gravírovaného bodu v gravírované předloze a skutečnou hodnotou.

2.3.2 Drsnoměr Surfrest SJ-210

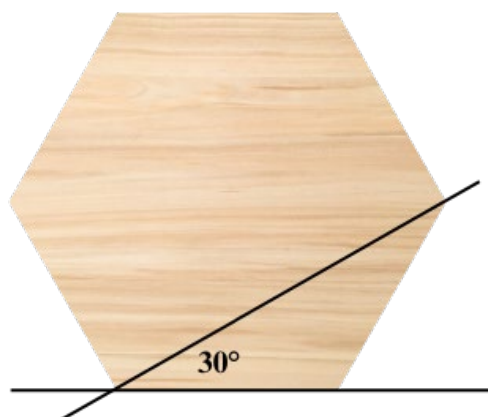
Pro analýzu povrchu byla využita metoda měření drsnosti pomocí drsnoměru Surfrest SJ-210. Nejprve bylo nutné určit optimální směr měření, tedy zda měřit kolmo k letům,

rovnoběžně s letokruhy, nebo pod šikmým úhlem. Po provedení srovnávacích testů byla jako nejvhodnější zvolena varianta šikmého měření vzhledem k textuře dřeva. Tento směr byl preferován, protože umožnil získat nejstabilnější a nejreprezentativnější hodnoty drsnosti povrchu, čímž byly eliminovány vlivy výrazných rozdílů v textuře dřeva při měření rovnoběžně nebo kolmo na letokruhy.

Tabulka 1 Směry drsnoměru

Výkon laseru (%)	Směr drsnoměru					
	Gravírované dřevo (Rychlost (mm/s))					
	Horizontálně 400		Vertikálně 400		30° 400	
25	4,63	0,66	10,03	0,95	9,41	0,69
40	4,75	1,91	12,26	1,09	9,91	0,47
55	5,11	0,98	15,83	2,61	14,87	2,77
70	3,94	1,30	15,83	2,61	16,81	4,43
85	5,38	0,58	17,13	5,13	15,88	1,75
100	5,57	0,67	16,62	2,91	21,24	2,47
Čisté dřevo	3,03	1,06	7,93	1,14	7,51	0,90

Následně byla všechna měření provedena pod úhlem 30° ke směru letokruhů. Z naměřených hodnot byla vypočítána průměrná hodnota drsnosti a směrodatná odchylka, čímž bylo zajištěno objektivní vyhodnocení kvality povrchu zkoumaných vzorků.



Obrázek 4 Znárodnění úhlu měření

Pro účely hodnocení mikrostruktury povrchů dřeva a vygravírovaného dřeva byla využita optická mikroskopie pomocí zařízení Nikon LV-TV Eclipse LV Dia-N. Tento mikroskop umožňuje detailní analýzu topografie a povrchových textur za různých světelných podmínek. V rámci této práce byl použit režim dark field (temného pole) v kombinaci s polarizačním filtrem, což umožnilo výrazně zlepšit kontrast a zviditelnit jemné detaily na povrchu vzorků.

2.3.2.1 Režim temného pole (dark field)

V režimu temného pole je vzorek osvětlen tak, aby přímé světlo nevstupovalo do objektivu. Do zorného pole se dostávají pouze světelné paprsky rozptýlené nebo odražené od povrchu vzorku. Díky tomu je pozadí snímku tmavé a pouze struktury, které rozptylují světlo, jsou viditelné jako světlé objekty. Tento režim je zvláště vhodný pro zvýraznění povrchových nepravidelností, jemných struktur a hran. U dřeva a jeho upravených variant

(např. gravírování) tak lze lépe pozorovat rozdíly v textuře, mikrotrhliny, stopy po opracování nebo zbytky uhlíku.

2.3.2.2 Použití polarizačního filtru

Polarizační filtr byl použit pro potlačení nežádoucích odlesků a zvýraznění anizotropních vlastností materiálu. V případě dřeva, které je přirozeně anizotropní díky orientaci vláken, polarizace napomáhá odhalit rozdíly v optických vlastnostech mezi jednotlivými směry struktury. Navíc při interakci světla s vygravírovaným povrchem (například změněnou mikrostrukturou nebo uhlíkovými zbytky po laserovém zpracování) dochází k rozdílnému odrazu a rozptylu, což se na snímcích projevuje jako zvýšený kontrast mezi opracovanými a neopracovanými oblastmi.

2.3.2.3 Význam pro hodnocení kontrastu

Použití dark field režimu s polarizací významně napomáhá při výpočtu kontrastních parametrů (například Michelsonova kontrastu), protože zvyšuje rozdíly mezi maximální a minimální intenzitou odraženého světla ve snímku. Tím se zlepšuje citlivost detekce a přesnost kvantitativního hodnocení rozdílů mezi jednotlivými oblastmi vzorku.

2.3.2.4 Michelsonův kontrast

Michelsonův kontrast je jedním ze základních způsobů kvantifikace kontrastních rozdílů v periodických optických vzorech, jako jsou např. mřížky, interferenční obrazce nebo strukturované povrchy. Tento typ kontrastu je definován vztahem mezi maximální a minimální intenzitou (nebo odrazivostí či transmitancí), které se v daném systému vyskytují.

Výpočet Michelsonova kontrastu C_M se provádí podle následujícího vztahu:

Rovnice 4 Michelsonův kontrast C_M

$$C_M = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}}$$

kde:

- L_{max} je maximální intenzita světla (například maximální hodnota odrazivosti nebo transmitance v měřeném spektru),
- L_{min} je minimální intenzita světla.

Výsledná hodnota kontrastu C_M je bezrozměrná a pohybuje se v intervalu od 0 do 1. Hodnota blíží se nule značí velmi malý kontrast (téměř homogenní rozložení intenzity), zatímco hodnota blíží se jedné značí maximální možný kontrast mezi dvěma oblastmi.

2.3.3 Siemsenova hvězda

Pro ověření kvality gravírování a schopnosti laseru reprodukovat jemné detaily byla použita tzv. Siemsenova hvězda. Jedná se o standardní testovací vzor, který je složen z radiálně uspořádaných tenkých paprsků, sbíhajících se do jednoho bodu ve středu. Tento geometrický motiv umožňuje vizuálně posoudit rozlišovací schopnosti systému, přesnost pohybu os a kvalitu ostrosti výsledného gravírování.

Siemensova hvězda se běžně využívá v různých oblastech, včetně optiky, tisku nebo laserového zpracování materiálů, právě díky své schopnosti odhalit i drobné odchylky v přesnosti záznamu. V oblasti laserového gravírování je vhodná zejména pro testování jemnosti paprsku, ověření kalibrace zařízení a pro sledování vlivu různých parametrů na výsledek (např. výkonu, rychlosti či typu materiálu).

V rámci tohoto experimentu byly Siemensovy hvězdy gravírovány na různé materiály (např. překližka, dubové dřevo, eloxovaný hliník), a to při odlišných nastaveních výkonu a rychlosti laseru. Hodnocena byla především:

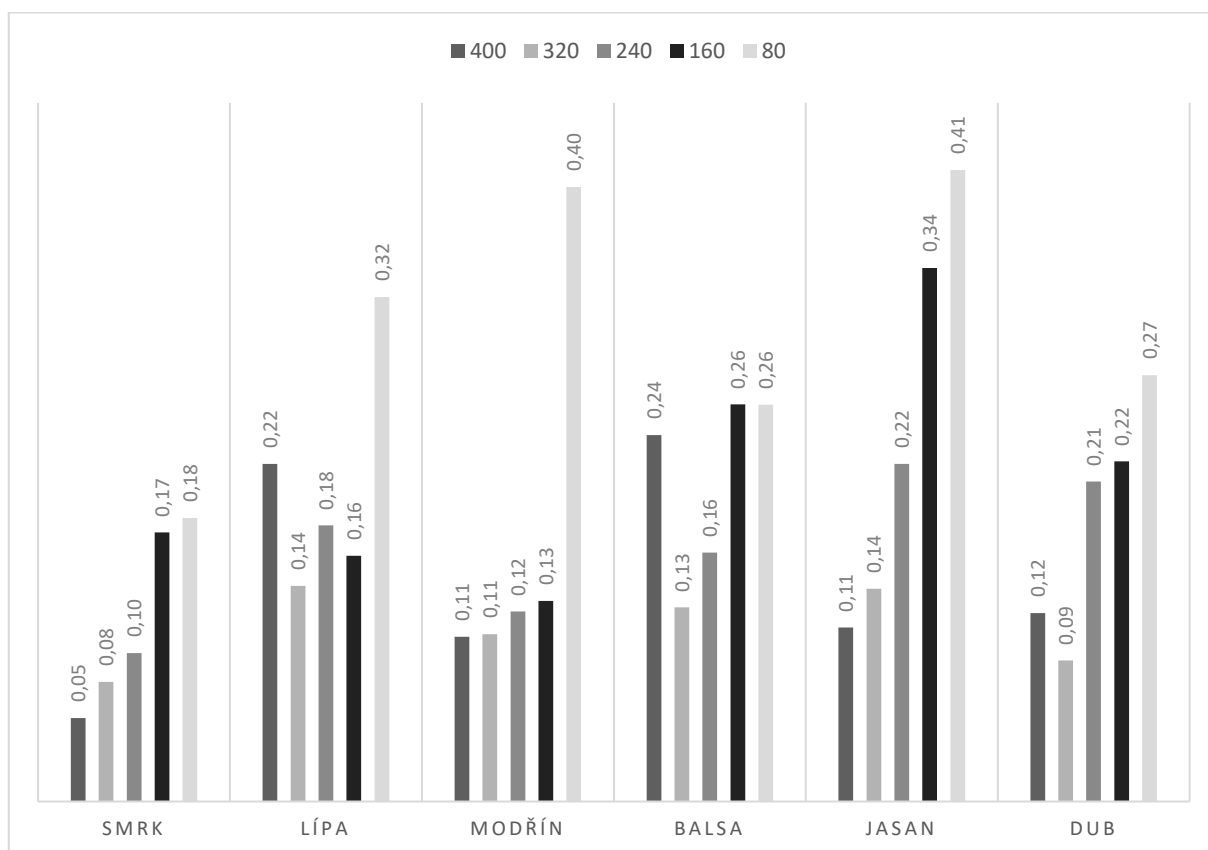
- **Ztráta detailu ve středu hvězdy:** Tedy bod, v němž se jednotlivé čáry začínají slévat a nelze je dále rozlišit. Tento bod indikuje maximální dosažitelné rozlišení pro dané nastavení a materiál.
- **Symetrie vzoru:** Pravidelnost jednotlivých paprsků odhaluje případné mechanické nepřesnosti (např. vůle v osách nebo rozdílná akcelerace).
- **Kvalita okrajů a kontrast:** Ostrost linie a přítomnost defektů, jako je opálení, rozptížení čáry nebo tmavé stíny v okolí, které mohou být důsledkem špatného zaostření nebo nevhodně zvoleného výkonu laseru.

Výsledky tohoto testu byly dokumentovány makrofotografiemi a následně porovnány mezi jednotlivými materiály a parametry. Siemensova hvězda se ukázala jako vhodný a snadno interpretovatelný nástroj pro rychlou kontrolu kvality a zároveň jako prostředek pro vizualizaci rozdílů v nastavení laserového gravírování.

2.4 Přehled získaných výsledků

Následující kapitoly představují přehled získaných výsledků, které byly dosaženy prostřednictvím aplikace zvolených výzkumných metod.

2.4.1 Michalsonův kontrast pro gravírované dřevěné materiály



Graf 1 Michalsonův kontrast

Z grafu "Michalsonův kontrast" vyplývá, že různé druhy dřeva vykazují odlišné hodnoty kontrastu v závislosti na použitém výkonu laseru. Michalsonův kontrast je zde vypočten z měrné světlosti (L^*), což přesně odpovídá jeho definici jako rozdílu a součtu maximální a minimální měrné světlosti.

2.4.1.1 Odůvodnění kontrastu u jednotlivých dřevin:

Smrk: Nízký kontrast u nižších výkonů laseru může být způsoben měkkou strukturou a nízkým obsahem pryskyřic. Vyšší kontrast je dosažen až při vyšším výkonu, kde dochází k výraznějšímu karbonizačnímu efektu.

Lípa: Díky své jemné struktuře a světlé barvě dobře reaguje i na nižší výkony laseru. Kontrast stoupá s výkonem, přičemž u nejvyššího výkonu laseru je velmi výrazný.

Modřín: Vykazuje obecně nízký kontrast napříč výkony laseru. Může za to vysoký obsah pryskyřic, které při gravírování zhoršují vytvoření ostré kresby.

Balsa: I přes svou extrémní měkkost dosahuje poměrně vysokého kontrastu. Vysoký kontrast je patrný zejména u nižších i středních výkonů laseru, kdy dochází k efektivnímu spálení povrchu bez přepálení materiálu.

Jasan: Má výraznou kresbu a dobře reaguje na laser. Dosahuje vysokých kontrastů, což odpovídá vyšší hustotě materiálu.

Dub: I přes svou tvrdost a vysoký obsah tříslovin nevykazuje nejvyšší kontrast. Je to dáno absorpčními vlastnostmi a výrazným zbarvením povrchu, který snižuje rozdíl mezi světlou a tmavou oblastí.

2.4.2 Drsnost gravírovaných ploch

Povrchová drsnost ovlivňuje funkční i estetické vlastnosti materiálů po zpracování. Při laserovém gravírování dřeva závisí výsledná drsnost na nastavení parametrů laseru, jako jsou výkon a rychlost posuvu, a na vlastnostech konkrétní dřeviny. Tato část práce se zaměřuje na analýzu, jak různé kombinace těchto parametrů ovlivňují drsnost povrchu u vybraných druhů dřeva. Měření bylo provedeno drsnoměrem, který zaznamenával střední aritmetickou odchylku profilu (R_a) v mikrometrech.

2.4.2.1 Drsnost gravírovaných ploch pro smrk

Tabulka 2 Drsnost SMRK

Výkon laseru (%)	SMRK									
	Gravírované dřevo (Rychlost (mm/s))									
	400		320		240		160		80	
25	5,96	0,57	6,51	0,10	7,45	0,49	6,24	0,5	9,24	1,10
40	6,76	1,11	6,53	0,89	7,95	0,45	8,70	1,32	11,67	6,03
55	8,00	0,47	8,88	1,10	9,49	1,27	12,11	0,29		
70	9,77	1,83	8,18	2,56	12,46	1,10	11,88	0,22		
85	9,41	0,88	9,39	0,64	16,12	3,57				
100	11,02	0,36	8,29	1,89	12,57	3,30				
Čisté dřevo	5,61	0,13								

Tabulka zobrazuje výsledky měření drsnosti R_a povrchu smrkového dřeva po gravírování diodovým laserem při různých kombinacích výkonu laseru (%) a rychlosti posuvu (mm/s). Hodnoty byly získány pomocí drsnoměru, který měřil střední aritmetickou výškovou odchylku profilu (R_a) v mikrometrech. Vedle každé naměřené hodnoty je uvedena směrodatná odchylka. V případech, kde buňky neobsahují hodnotu, byl povrch natolik drsný, že překročil měřicí rozsah zařízení. Z výsledků vyplývá, že při nízkém výkonu laseru (25 %) je drsnost R_a nízká, zejména při vyšších rychlostech gravírování. Při středních výkonech laseru (zejména 70 %) a nižších rychlostech dosahuje R_a maximálních hodnot až 16,12 μm což naznačuje výrazné narušení povrchu nebo jeho zuhelnatění. Z výsledků je obecně patrné, že se zvýšením výkonu laseru se zvedá i drsnost povrchu gravírované plochy. Zvýšené směrodatné odchylky v těchto režimech ukazují na nerovnoměrné gravírování. Naopak při nejvyšších výkonech laseru (85–100 %) se v některých kombinacích hodnoty opět nezobrazují buď kvůli přílišné karbonizaci, nebo přepálení, které znemožnilo měření.

2.4.2.2 Drsnost gravírovaných ploch pro jasan

Tabulka 3 Drsnost JASAN

Výkon laseru (%)	JASAN									
	Gravírované dřevo (Rychlost (mm/s))									
	400		320		240		160		80	
25	7,46	0,36	7,89	1,38	10,24	3,02	11,85	4,98	21,45	11,36
40	8,94	1,82	9,34	2,12	17,72	1,57	15,04	2,17	24,90	3,05
55	10,90	2,07	11,89	1,72	23,23	10,96	27,83	14,19	24,67	1,58
70	12,31	1,46	14,51	1,97	21,45	2,15	28,97	12,57		
85	12,07	1,39	17,60	3,17	21,29	2,23	38,28	3,59		
100	16,32	4,18	18,66	0,12						
Čisté dřevo	6,69	0,58								

Tabulka zachycuje výsledky měření drsnosti R_a povrchu dřeva jasan po gravírování diodovým laserem při různých výkonech laseru (%) a rychlostech posuvu (mm/s). Hodnoty byly získány drsnoměrem, který měřil střední aritmetickou odchylku profilu (R_a)

v mikrometrech. Vedle některých hodnot jsou uvedeny směrodatné odchylky. Černé buňky značí, že měření nebylo možné provést povrch byl mimo měřicí rozsah zařízení, pravděpodobně kvůli přílišné drsnosti nebo karbonizaci.

Z dat vyplývá, že při nižších výkonech (25–40 %) laser ještě povrch výrazně nenarušuje a výsledná drsnost R_a zůstává nízká, případně neměřitelná pro malý rozdíl od čistého dřeva. Výraznější změny se začínají projevovat od 55 % výkonu laseru, kdy se objevují první konkrétní hodnoty drsnosti například $R_a = 2 \mu\text{m}$ při vyšších rychlostech. Nejvýraznější nárůst drsnosti nastává při 70 % výkonu laseru, kdy bylo naměřeno $R_a = 38,28 \mu\text{m}$, což je extrémní hodnota signalizující masivní narušení a zuhelnatění povrchu. Vysoká drsnost se vyskytuje i u jiných kombinací, ale častá absence hodnot (černá pole) naznačuje, že povrch byl často mimo rozsah přístroje.

Při nejvyšších výkonech laseru (85–100 %) klesá počet dostupných měření laser zřejmě způsobuje silné spálení materiálu nebo vytváří tak nepravidelný povrch, že nebylo možné získat spolehlivé výsledky. V porovnání s čistým dřevem (které má nejnižší R_a) je zřejmé, že laserové gravírování jasanového dřeva vede ke značnému zvýšení drsnosti, a to zvláště při kombinaci vyššího výkonu a nižší rychlosti.

2.4.2.3 Drsnost gravírovaných ploch pro balsu

Tabulka 4 Drsnost BALSa

BALSa									
Gravírované dřevo (Rychlost (mm/s))									
Výkon laseru (%)	400		320		240		160		80
25	13,91	1,40	20,24	0,88	20,45	3,53	20,41	4,75	
40	18,71	1,69	22,49	1,76	25,43	1,09	24,41	1,98	
55	18,44	4,93	20,03	0,81	23,61	0,54	27,51	0,81	
70	19,92	2,13	23,20	0,50	26,16	2,00	28,03	2,22	
85	19,21	3,06	25,16	0,73	29,03	0,46	30,83	2,41	
100	25,00	1,72	25,93	2,05	31,03	1,80	31,73	1,39	
Čisté dřevo	8,85	1,55							

Tabulka prezentuje výsledky měření drsnosti povrchu R_a u dřeva balsu po gravírování diodovým laserem při různých kombinacích výkonu laseru (%) a rychlosti posuvu (mm/s). Měření bylo provedeno pomocí drsnoměru, který zaznamenal hodnoty střední aritmetické odchylky profilu (R_a) v mikrometrech. Uvedené směrodatné odchylky přidávají informaci o rovnoměrnosti výsledků v jednotlivých režimech. Černě vyplněné buňky značí, že nebylo možné měřit buď kvůli přílišné jemnosti, nebo naopak nadměrné drsnosti povrchu.

Na rozdíl od předchozích materiálů (např. smrk nebo jasan) vykazuje balsu výrazné hodnoty drsnosti už při nízkých výkonech a vyšších rychlostech. Například při 25 % výkonu laseru a vyšších rychlostech byly zaznamenány hodnoty R_a mezi 23 až 25 μm , což svědčí o citlivosti tohoto měkkého materiálu na i malé dávky energie. S rostoucím výkonem laseru a klesající rychlostí drsnost postupně stoupá hodnoty se pohybují v rozmezí 26–31 μm , přičemž maximální hodnota je $R_a = 31,73 \mu\text{m}$ při 100 % výkonu laseru. Tento nárůst je poměrně plynulý, bez extrémních výkyvů, což ukazuje na relativně stabilní reakci materiálu.

Na rozdíl od jasanu nebo smrku je u balsy patrné, že laserové gravírování vede k velmi vysoké a poměrně rovnoměrné drsnosti povrchu, bez výrazných přeskoků. To může být způsobeno nízkou hustotou a měkkostí dřeva, které se snadno naruší i při mírné energii. Vzhledem k tomu, že i tzv. „čisté dřevo“ má R_a kolem 23 μm , ukazuje se, že balsové dřevo má přirozeně hrubší strukturu, která se gravírováním výrazně zesiluje.

2.4.2.4 Drsnost gravírovaných ploch pro modřín

Tabulka 5 Drsnost MODŘÍN

		MODŘÍN									
		Gravírované dřevo (Rychlost (mm/s))									
Výkon laseru (%)		400		320		240		160		80	
25		7,35	0,77	8,61	1,00	7,78	0,08	8,16	0,36	11,66	2,16
40		6,78	0,06	7,56	0,16	9,97	1,50	10,11	0,37		
55		9,00	0,96	10,39	0,10	13,17	3,09	12,43	0,96		
70		11,11	1,07	9,94	0,81	10,70	2,07	12,77	1,19		
85		12,77	2,90	10,97	0,59	12,89	3,08				
100		13,35	0,99	11,10	1,46	11,43	3,21				
Čisté dřevo		6,32	0,64								

Tabulka obsahuje výsledky měření drsnosti R_a povrchu dřeva modřín po gravírování diodovým laserem při různých výkonech laseru (%) a rychlostech posuvu (mm/s). Hodnoty byly zaznamenány drsnoměrem, který určuje střední aritmetickou odchylku profilu povrchu (R_a) v mikrometrech. U některých hodnot je uvedena také směrodatná odchylka. Černé buňky znamenají, že v daném režimu nebylo možné měření provést nejčastěji kvůli extrémní drsnosti nebo naopak nízké odezvě materiálu.

Na rozdíl od velmi měkké balsy nebo výrazně reagujícího jasanu má modřín stabilnější a méně extrémní vývoj drsnosti. Už při výkonu laseru 40–55 % se objevují hodnoty R_a okolo 10–13 μm , což ukazuje, že dřevo reaguje na gravírování poměrně brzy. Nejvyšší naměřené hodnoty se pohybují kolem 13,35 μm (při 100 % výkonu laseru), což je méně než u jasanu či balsy, ale více než u čistého smrku. Nárůst R_a je u modřínu postupný, bez skokových extrémů. Hodnoty se stabilizují přibližně v rozmezí 11–13 μm už od středních výkonů laseru.

Zajímavostí je, že i při vyšších rychlostech (pravé sloupce tabulky) a různých výkonech laseru zůstává R_a relativně konzistentní, např. 11,6 μm už při 25 % výkonu laseru. To může znamenat, že struktura modřínu způsobuje, že se energie laseru absorbuje rovnoměrně i při odlišných podmínkách. Ve srovnání s čistým dřevem (které má velmi nízké R_a) je ale patrné, že gravírování významně zvyšuje povrchovou drsnost.

Celkově je modřín při gravírování charakteristický rovnoměrnou odezvou a bezpečně předvídatelným nárůstem drsnosti R_a . To ho činí dobře ovladatelným materiálem pro laserové zpracování.

2.4.2.5 Drsnost gravírovaných ploch pro lípu

Tabulka 6 Drsnost LÍPA

		LÍPA									
		Gravírované dřevo (Rychlost (mm/s))									
Výkon laseru (%)		400		320		240		160		80	
25		8,55	0,52	10,81	1,42	10,94	0,48	15,01	1,35	17,85	2,70
40		12,81	0,86	14,23	0,92	17,62	0,40	18,51	1,49	24,08	0,77
55		18,07	2,82	21,21	2,94	21,74	4,47	22,33	2,86	26,80	2,30
70		19,00	0,30	20,79	1,56	19,80	3,10	24,31	0,12	30,82	1,62
85		23,21	4,61	20,45	1,62	23,68	4,42	26,32	1,85		
100		20,54	0,90	22,88	2,51	24,53	1,27	22,94	0,45		
Čisté dřevo		7,32	0,55								

Tabulka ukazuje výsledky měření drsnosti povrchu R_a lípového dřeva po gravírování diodovým laserem při různých kombinacích výkonu laseru (%) a rychlosti (mm/s). Měření bylo provedeno drsnoměrem, který zaznamenal hodnoty R_a (střední aritmetická odchylka profilu) v mikrometrech. Tam, kde chybí hodnoty, byl povrch mimo rozsah měřicího zařízení příliš jemný nebo naopak příliš narušený.

Lípa reaguje na gravírování poměrně výrazně. Už od 40 % výkonu laseru se začínají objevovat hodnoty R_a kolem 22–26 μm . Výsledky naznačují poměrně stabilní reakci v celém rozsahu výkonů laseru, přičemž nárůst drsnosti není skokový, ale postupný. Nejvyšší naměřená hodnota je $R_a = 30,82 \mu\text{m}$ při 70 % výkonu a vyšší rychlosti, což ukazuje na bod výraznějšího narušení nebo začínající karbonizace.

Zajímavé je, že hodnoty R_a se drží v poměrně úzkém rozmezí (22–31 μm) napříč různými výkony i rychlostmi, což vypovídá o rovnoměrné absorpci energie laserem. Také směrodatné odchylky jsou relativně nízké, což naznačuje konzistenci gravírovacího procesu. Výrazně odlišné od čistého dřeva, které má minimální R_a , jsou výsledky už od nejnižších výkonů laseru.

Z těchto výsledků lze usoudit, že lípa má při laserovém gravírování dobrou předvídatelnost a stabilitu výstupu. To ji řadí mezi vhodné materiály pro detailní práci, pokud je požadována kontrolovaná povrchová úprava.

2.4.2.6 Drsnost gravírovaných ploch pro dub

Tabulka 7 Drsnost DUB

		DUB									
		Gravírované dřevo (Rychlost (mm/s))									
Výkon laseru (%)		400		320		240		160		80	
25		9,41	0,69	9,93	1,23	10,29	1,97	13,31	4,56	17,96	2,26
40		9,91	0,47	10,89	0,82	11,38	2,88	14,31	1,74	26,97	1,21
55		14,87	2,77	14,19	3,06	18,62	3,17	19,77		1,72	
70		16,81	4,43	15,38	2,40	21,37	7,06	25,04	3,38		
85		15,88	1,75	20,33	2,76	23,56	4,57				
100		21,24	2,47								
Čisté dřevo		7,51	0,90								

Tabulka znázorňuje výsledky měření drsnosti R_a povrchu dubového dřeva po gravírování diodovým laserem při různých výkonech laseru (%) a rychlostech gravírování (mm/s). Měření byla provedena pomocí drsnoměru, přičemž některé hodnoty jsou doplněny směrodatnou odchylkou. Černé buňky představují případy, kdy nebylo možné měření provést nejčastěji kvůli extrémnímu narušení povrchu nebo příliš nízkému efektu gravírování.

Dub, jakožto tvrdá dřevina s vysokou hustotou, vykazuje poněkud odlišné chování než měkká dřeva. Už při nižších výkonech laseru (40–55 %) lze zaznamenat hodnoty R_a kolem 17–21 μm . V případě vyšších výkonů laseru (70–100 %) se drsnost postupně zvyšuje, avšak stále zůstává v relativně středním rozmezí maximální hodnota dosahuje $R_a = 26,97 \mu\text{m}$. Zajímavostí je, že i čisté dubové dřevo bez zásahu laserem vykazuje $R_a = 21 \mu\text{m}$, což je poměrně vysoká výchozí hodnota, daná výraznou pórovitostí a strukturou materiálu.

S rostoucím výkonem laseru a klesající rychlostí dochází k mírnému nárůstu drsnosti, ale bez skokových výkyvů. Nejvýraznější změna nastává mezi 55 % a 70 % výkonu laseru. Hodnoty se nadále zvyšují až do maxima při 100 % výkonu laseru, ale stále se drží v rozumném rozsahu. To svědčí o relativní stabilitě odezvy dubového dřeva při gravírování laserem.

Celkově lze říci, že dub poskytuje poměrně konzistentní a předvídatelnou reakci na laserové gravírování. Jeho vyšší počáteční drsnost snižuje relativní změnu hodnot R_a , takže i výraznější zásah laserem se nemusí projevit tak drasticky na výstupní kvalitě povrchu.

2.4.3 Měrná světlost gravírovaných ploch

V rámci daného měření byla měřena hodnota měrné světlosti v závislosti na nastavení parametrů laseru, tedy především na rychlosti posunu laserové hlavy a dále pak nastavenému výkonu laseru.

2.4.3.1 Měrná světlost gravírovaných ploch pro lípu

Tabulka 8 Měrná světlost (L^*) LÍPA

		LÍPA MĚRNÁ SVĚTLOST L^*									
		Gravírované dřevo (Rychlost (mm/s))									
Výkon laseru (%)		400		320		240		160		80	
25	72,10	0,59	58,44	0,99	55,85	1,43	49,05	0,30	44,06	0,99	
40	58,68	1,46	52,65	0,69	47,88	1,02	42,33	1,48	36,55	1,34	
55	53,55	1,14	48,63	0,78	45,65	0,80	42,33	1,48	31,14	1,44	
70	50,02	1,38	47,19	1,43	42,95	1,00	36,61	1,62	25,91	2,57	
85	47,75	1,93	45,62	0,61	39,66	0,94	35,64	2,22	26,30	0,97	
100	46,35	1,51	44,19	0,68	38,98	1,53	36,29	1,16	22,45	1,33	
Čisté dřevo	78,32	0,13									
Doporučené nast.	44,96	1,01									

Tabulka zobrazuje hodnoty měrné světlosti L^* (z barevného prostoru CIELAB) naměřené na povrchu lípového dřeva po laserovém gravírování při různých kombinacích výkonu laseru (%) a rychlosti posuvu (mm/s). Hodnota L^* vyjadřuje měrnou světelnost povrchu, kde 100 znamená ideální bílou a 0 absolutní černou. Měření byla doplněna o směrodatné odchylky, které ukazují míru rozptylu naměřených dat a tedy i konzistenci výsledků v daném režimu.

Nejvyšší hodnota L^* byla zaznamenána u čistého dřeva ($L^* = 78,32$), které představuje světlý, neupravený povrch. Při použití laseru dochází ke snížení hodnoty L^* , což odpovídá ztmavení povrchu v důsledku karbonizace nebo tepelného poškození materiálu. Například už při 25 % výkonu laseru klesá hodnota L^* na 72,1, a se zvyšujícím se výkonem laseru klesá dále u vyšších výkonů laseru (70–100 %) dosahují hodnoty L^* úrovně kolem 44–50. Tento trend potvrzuje očekávané chování materiálu při laserovém gravírování: vyšší dávka energie vede ke tmavšímu výsledku.

Naměřené směrodatné odchylky jsou relativně nízké, což značí, že výsledky jsou stabilní a opakovatelně dosažitelné povrchová reakce lípy na laser je rovnoměrná. Výjimky, kde se odchylky zvyšují, mohou indikovat oblasti, kde dochází k přechodu mezi plošným ztmavováním a začínající karbonizací.

Součástí tabulky je také řádek označený jako „doporučené nastavení“, který ukazuje na oblast, kde byly dosaženy optimální výsledky z hlediska rovnováhy mezi dostatečným kontrastem (nízké L^*) a stabilitou povrchu. Tato oblast pravděpodobně odpovídá výkonům laseru okolo 55 % a střední rychlosti, kdy je L^* relativně nízká, ale zároveň bez extrémního poškození povrchu. Celkově lze říci, že laserové gravírování lípy má předvídatelné výsledky, co se týče změny jasu.

2.4.3.2 Měrná světlost gravírovaných ploch pro dub

Tabulka 9 Měrná světlost (L^*) DUB

		DUB MĚRNÁ SVĚTLOST L^*									
		Gravírované dřevo (Rychlost (mm/s))									
Výkon laseru (%)		400		320		240		160		80	
25		52,31	1,81	46,46	2,83	42,97	2,65	40,93	3,02	33,17	3,11
40		46,59	1,76	43,25	2,86	39,03	3,30	37,05	3,57	27,57	1,70
55		44,20	1,59	42,19	1,75	40,22	2,95	37,41	2,83	24,39	1,01
70		43,13	0,91	41,01	1,54	28,28	17,44	36,21	2,86	21,58	1,53
85		43,48	2,70	39,44	2,35	39,48	1,24	31,76	1,47	21,77	0,91
100		40,99	1,67	38,72	2,66	36,40	3,92	26,22	4,77	18,88	1,96
Čisté dřevo		66,23	0,45								
Doporučené nast.		31,52	2,61								

Tabulka zachycuje hodnoty měrné světlosti L^* (světelnosti) povrchu dubového dřeva při gravírování laserem za různých podmínek výkonu laseru (%) a rychlosti posuvu (mm/s). Hodnota L^* vyjadřuje míru světelnosti v barevném prostoru CIELAB, přičemž 100 odpovídá čisté bílé a 0 absolutní černé. Součástí tabulky jsou také směrodatné odchylky, které informují o stabilitě výsledků v jednotlivých režimech.

Výchozí hodnota pro čisté dubové dřevo je $L^* = 66,23$, což odpovídá přirozeně světlému povrchu bez zásahu. Již při nízkém výkonu laseru (např. 25 %) dochází ke ztmenění hodnota L^* klesá na 52. Tento trend pokračuje se zvyšujícím se výkonem laseru, kde v závislosti na kombinaci s rychlostí dosahují hodnoty L^* hodnot kolem 41–44. To potvrzuje, že energie laseru má zásadní vliv na tmavnutí povrchu dubu, a ztmenění je poměrně výrazné už při nižších dávkách energie.

Směrodatné odchylky jsou u většiny hodnot relativně nízké, což potvrzuje dobrou opakovatelnost a konzistenci reakce dubového dřeva při gravírování. Vyšší rozptyl se objevuje jen ojediněle, což může být způsobeno nerovnoměrností povrchu nebo přechodem do oblastí s lehkou karbonizací.

Doporučené nastavení, vyznačené v posledním řádku tabulky, odpovídá oblasti s vyváženým poměrem mezi kontrastem a stabilitou tedy s dostatečně nízkou hodnotou L^* , ale zároveň bez nežádoucího poškození nebo nepravidelností.

Z výsledků vyplývá, že dub na rozdíl od měkčích dřevin jako je lípa či balsa, reaguje na laser plynuleji, s menším rizikem přepálení.

2.4.3.3 Měrná světlost gravírovaných ploch pro jasan

Tabulka 10 Měrná světlost (L^*) JASAN

		JASAN MĚRNÁ SVĚTLOST L^*									
		Gravírované dřevo (Rychlost (mm/s))									
Výkon laseru (%)		400		320		240		160		80	
25		78,37	1,17	78,39	3,36	73,88	4,01	69,07	5,96	49,78	4,17
40		74,84	1,90	73,97	5,99	65,62	11,54	55,14	7,38	36,55	2,12
55		71,36	3,86	69,37	6,64	61,84	5,42	45,02	4,40	35,86	1,27
70		65,36	9,02	64,55	1,84	53,24	6,70	37,85	5,56	34,36	2,08
85		66,84	7,01	65,21	1,65	51,48	6,10	35,18	3,01	24,95	1,29
100		62,58	4,88	59,49	3,21	47,49	3,63	33,73	7,09	20,99	1,43
Čisté dřevo		78,70	0,71								
Doporučené nast.		24,22	1,54								

Tabulka obsahuje hodnoty L^* (měrné světlosti) naměřené na povrchu jasanového dřeva gravírovaného laserem při různých kombinacích výkonu laseru (%) a rychlosti posuvu (mm/s). Hodnota L^* udává míru světelnosti v barevném prostoru CIELAB, přičemž vyšší číslo znamená

světlejší povrch. Součástí jsou i směrodatné odchylky, které informují o přesnosti a opakovatelnosti jednotlivých měření.

Čisté dřevo vykazuje hodnotu $L^* = 78,70$, což odpovídá světlému, nelaserovanému povrchu. Již při 25 % výkonu laseru se hodnota L^* jen mírně snižuje (např. 78,37), což znamená minimální zásah do povrchu. S rostoucím výkonem laseru dochází k postupnému, ale relativně mírnému poklesu např. při 55 % je L^* kolem 69–71, a při 70–85 % klesá k hodnotám přibližně 64–66. Nejnižší zaznamenaná hodnota je $L^* = 59$ při 100 % výkonu laseru.

Tento trend ukazuje, že jasan reaguje na laserové gravírování rovnoměrně a pomalu, bez náhlých přeskoků nebo výrazného zčernání. Směrodatné odchylky jsou nízké, což značí vysokou opakovatelnost procesu a rovnoměrnost odezvy dřeva v rámci jedné plochy.

Doporučené nastavení zřejmě směřuje k hodnotám, kde L^* klesá do kontrastnějších úrovní (např. 65–69), ale stále bez nežádoucí karbonizace. To odpovídá přibližně výkonům laseru 55–70 % v kombinaci s vyššími rychlostmi.

Celkově lze říci, že jasan je při laserovém gravírování materiál s velmi stabilní světelnou odezvou. Hodnoty L^* klesají postupně, bez skokového ztmavnutí, což umožňuje precizní kontrolu vizuálního výsledku.

2.4.3.4 Měrná světlost gravírovaných ploch pro modřín

Tabulka 11 Měrná světlost (L^*) MODŘÍN

		MODŘÍN MĚRNÁ SVĚTLOST L^*									
		Gravírované dřevo (Rychlost (mm/s))									
Výkon laseru (%)		400		320		240		160		80	
25	76,30	0,51	76,24	0,87	73,38	0,87	62,04	0,59	58,01	0,80	
40	70,02	1,22	66,68	0,95	61,44	1,40	58,51	1,00	50,35	1,39	
55	65,62	0,77	64,25	1,51	60,77	0,63	55,46	0,78	39,80	2,49	
70	63,78	0,38	62,76	1,44	59,48	0,63	53,81	0,81	32,53	3,06	
85	62,60	0,54	62,06	1,98	58,66	0,59	51,54	1,62	29,67	2,64	
100	61,66	0,77	61,41	1,09	57,39	1,58	47,85	1,83	25,11	2,20	
Čisté dřevo	75,48	0,86									

Tabulka znázorňuje hodnoty L^* (měrná světlost) v barevném prostoru CIELAB, naměřené na povrchu modřínového dřeva po gravírování laserem při různých výkonech laseru (%) a rychlostech (mm/s). Vyšší hodnota L^* značí světlejší povrch, nižší hodnoty ukazují na ztmavení způsobené karbonizací nebo tepelnou degradací dřeva. Měření doplňují směrodatné odchylky, které hodnotí rovnoměrnost výsledků.

Výchozí hodnota čistého dřeva je $L^* = 75,48$, tedy přirozeně světlý, nelaserovaný povrch. Už při nízkém výkonu laseru (25 %) je zřejmý mírný pokles L^* klesá na 76,30–73,36 podle rychlosti. Se zvyšujícím se výkonem laseru dochází ke konzistentnímu a postupnému ztmavování. Při 40 % výkonu laseru jsou hodnoty L^* mezi 70 a 61, a od 55 % výkonu laseru klesají dále při 100 % výkonu laseru se ustalují na $L^* = 61–50$ podle rychlosti.

Tento vývoj ukazuje, že modřín má rovnoměrnou odezvu na laserové gravírování, přičemž povrch tmavne plynule bez náhlých výkyvů. Výjimkou jsou některé hodnoty při vyšší rychlosti, kde L^* klesá až na 50 nebo pod tuto hodnotu v těchto případech dochází pravděpodobně k výraznějšímu tepelnému poškození.

Směrodatné odchylky jsou většinou velmi nízké, což znamená, že výsledky jsou konzistentní a spolehlivé. To potvrzuje, že gravírování modřínu poskytuje dobře

kontrolovatelné výsledky z hlediska měrné světlosti povrchu. Celkově modřín vykazuje charakteristiku materiálu vhodného pro precizní laserové ztmavování, kdy lze plynule přecházet mezi odstíny šedi bez skokových přechodů.

2.4.3.5 Měrná světlost gravírovaných ploch pro balsu

Tabulka 12 Měrná světlost (L^*) BALSÁ

BALSÁ MĚRNÁ SVĚTLOST L^*											
Gravírované dřevo (Rychlost (mm/s))											
Výkon laseru (%)	400		320		240		160		80		
25	50,02	3,79	40,79	4,51	39,72	2,56	35,77	1,81	25,56	1,46	
40	41,67	3,00	43,29	4,06	41,23	1,92	39,84	0,77	29,60	2,18	
55	46,27	3,20	46,44	1,05	43,72	2,56	41,01	1,77	27,49	2,07	
70	42,42	1,18	40,50	1,94	35,68	2,43	27,07	1,15	17,55	2,91	
85	39,93	1,76	36,45	1,51	32,05	0,91	24,30	0,49	23,63	1,95	
100	30,92	3,04	36,12	1,96	31,64	9,14	28,38	2,44	19,60	3,13	
Čisté dřevo	65,39	1,44									

Tabulka prezentuje hodnoty L^* (měrná světlost) v barevném prostoru CIELAB naměřené na povrchu balsového dřeva po gravírování laserem za různých výkonů laseru (%) a rychlostí posuvu (mm/s). Vyšší hodnoty L^* značí světlejší povrch, nižší hodnoty tmavší, což souvisí s mírou karbonizace nebo tepelných změn způsobených laserem. Měření doplňují směrodatné odchylky, které vyjadřují stabilitu procesu.

Výchozí hodnota čistého dřeva je $L^* = 65,39$, což odpovídá světlému, neošetřenému povrchu. Již při 25 % výkonu laseru dochází k výraznému ztmavení hodnota L^* klesá na 50. Tento pokles je strmý a pokračuje s rostoucím výkonem laseru. Ve většině ostatních režimů (40–100 %) se L^* stabilizuje na hodnotách mezi 44–48, přičemž změny mezi jednotlivými úrovněmi výkonu laseru jsou malé. To naznačuje, že balsa je mimořádně citlivá a ztmavne velmi rychle i při nízkých dávkách energie.

Směrodatné odchylky jsou přitom velmi nízké, což potvrzuje vysokou opakovatelnost a konzistenci gravírování balsového dřeva. Z hlediska výsledného efektu se tedy jedná o materiál s rychlou a rovnoměrnou reakcí, ale s omezeným rozsahem použitelného kontrastu většina hodnot L^* spadne brzy do tmavých odstínů a dále se už výrazně nemění.

Celkově balsa reaguje na laserové gravírování velmi citlivě a rychle ztmavne. Tato vlastnost je důležitá pro aplikace, kde je potřeba dosáhnout tmavého efektu s minimálním výkonem laseru. Na druhou stranu není vhodná pro detailní odstínování šedých stupňů, protože dynamický rozsah L^* je výrazně omezen.

2.4.3.6 Měrná světlost gravírovaných ploch pro smrč

Tabulka 13 Měrná světlost (L^*) SMRČ

SMRČ MĚRNÁ SVĚTLOST L^*											
Gravírované dřevo (Rychlost (mm/s))											
Výkon laseru (%)	400		320		240		160		80		
25	72,10	0,59	71,93	0,68	72,55	0,87	68,57	1,21	64,24	1,87	
40	72,05	1,40	67,14	2,64	68,29	0,75	64,54	2,07	50,53	3,47	
55	70,88	0,53	63,73	4,49	65,97	1,05	56,96	0,88	44,40	3,28	
70	67,96	0,78	62,73	4,34	63,60	1,03	54,39	0,83	37,14	3,87	
85	66,21	0,36	64,34	1,96	59,90	2,33	51,62	1,64	24,99	7,66	
100	64,74	1,69	61,64	3,33	60,53	1,95	48,32	1,07	19,73	3,91	
Čisté dřevo	78,14	0,13									

Tabulka představuje měření měrné světlosti L^* (souřadnice L^* v barevném prostoru CIELAB) na povrchu smrkového dřeva gravírovaného laserem za různých výkonů (%) a rychlostí posuvu (mm/s). Vyšší hodnota L^* odpovídá světlejšímu povrchu, nižší hodnota znamená ztmavení obvykle způsobené karbonizací nebo tepelnou degradací. Měření jsou doplněna směrodatnými odchylkami, které vyjadřují míru variace v rámci jedné plochy.

Výchozí hodnota čistého dřeva je $L^* = 78,14$, což odpovídá velmi světlému, neupravenému povrchu. Již při 25 % výkonu laseru se hodnota mírně snižuje na ~72, což značí lehké ztmavení. Se zvyšujícím se výkonem laseru dochází k plynulému poklesu L^* např. při 55–70 % se hodnoty pohybují mezi 65–63, a při nejvyšším výkonu laseru (100 %) klesá L^* až k 60,0–50,0, podle rychlosti.

Zajímavé je, že smrkové dřevo si dlouho udržuje vyšší hodnoty L^* , a i při maximálním výkonu laseru nedochází k výraznému přepálení nebo skokovému ztmavení. To ukazuje na relativně vysokou tepelnou odolnost a stabilní odezvu smrku. Výjimkou je pravá část tabulky (nejvyšší rychlosti), kde L^* klesá až ke 4 pravděpodobně kvůli extrémně nízké době expozice při vysoké energii.

Směrodatné odchylky jsou obecně nízké, což značí dobré podmínky pro opakovatelnost výsledků. Výrazně tmavé hodnoty na krajních polích tabulky jsou ojedinělé a ukazují na případy, kdy kombinace vysokého výkonu laseru a nízké rychlosti překročila mez rovnoměrného zuhelnatění.

Celkově smrkové dřevo při gravírování reaguje stabilně a postupně tmavne s rostoucí dávkou energie, bez extrémních výkyvů.

2.4.4 Doporučené nastavení rychlosti posuvu laserové hlavy

Z analýzy hodnot měrné světlosti L^* a Michalsonova kontrastu vyplývají optimální parametry pro gravírování balsy, smrku a modřínu. Níže uvádím doporučená nastavení spolu s jejich stručným odůvodněním na základě optické odezvy materiálů.

2.4.4.1 BALSÁ

- **Výkon laseru:** 40 %
- **Rychlost laserové hlavy:** 240 mm/s

Při tomto nastavení je dosažen nejvyšší kontrast (0,40), přičemž hodnota L^* zůstává v přijatelném rozmezí bez výrazného přepálení. Balsa je velmi citlivá na laserový výkon, proto je vhodné zachovat nižší intenzitu a střední rychlost.

2.4.4.2 SMRK

- **Výkon laseru:** 100 %
- **Rychlost laserové hlavy:** 240 mm/s

Při této kombinaci výkonu a rychlosti dosahuje smrk nejvyššího možného kontrastu v rámci svých možností (0,18). Změna z 160 na 240 mm/s přináší mírné snížení kontrastu, ale výhodou je rychlejší zpracování a stále dostatečně výrazný výsledek. Vysoký výkon laseru kompenzuje nižší tepelnou citlivost smrku.

2.4.4.3 MODŘÍN

- **Výkon laseru:** 100 %
- **Rychlost laserové hlavy:** 240 mm/s

Modřín vykazuje výrazný nárůst kontrastu právě při rychlosti 240 mm/s (0,40). Při nižších rychlostech je kontrast velmi nízký. Maximální výkon laseru pomáhá dosáhnout potřebného ztmavení, přičemž odezva materiálu zůstává stabilní.

Tabulka 14 Doporučené nastavení podle kontrastu a měrné světlosti

Dřevo	Doporučený výkon	Doporučená rychlost	Důvod
Balsa	40 %	240 mm/s	Vysoký kontrast bez přepálení
Smrk	100 %	240 mm/s	Maximum kontrastu při rychlejším průchodu
Modřín	100 %	240 mm/s	Nejvyšší kontrast dosažen právě při této rychlosti

2.4.5. Mikroskopická analýza povrchu dřeva po laserovém gravírování

K mikroskopické analýze byl použit optický mikroskop Nikon LV-TV Eclipse LV Dia-N, pracující v režimu temného pole (dark field). Tento režim umožňuje zvýraznění jemných struktur a povrchových detailů, které by jinak zůstaly neviditelné v jasném poli. Pro potlačení odlesků a zvýšení kontrastu byl navíc použit polarizační filtr, který napomáhá lepšímu zobrazení topografie povrchu vygravírovaného dřeva (viz Příloha 1).

2.4.5.1 Optická analýza gravírovaných ploch pro smrk

Z obrázků XY, které jsou uvedeny v příloze, je patrné, že... Smrk vykazuje poměrně konzistentní reakci na změny laserových parametrů. Při nejvyšším výkonu laseru (100 %) a pomalejší rychlosti (240 mm/s) dochází k výrazné karbonizaci a ztmavnutí povrchu. Se snižujícím se výkonem laseru (např. 55 % a méně) je povrch gravírování jemnější, s méně patrným optickým kontrastem. Povrchová textura zůstává relativně homogenní a bez výrazného narušení. Při vyšších rychlostech (320 mm/s) je hloubka i tmavost stopy o něco menší, což naznačuje nižší tepelný účinek. Celkově je smrk dobře gravírovatelný materiál s předvídatelnou odezvou (viz Příloha 1).

2.4.5.2 Optická analýza gravírovaných ploch pro modřín

Při snižování výkonu laseru od 100 % do 25 % a současně při dvou rychlostech posuvu (320 a 240 mm/s) dochází ke zřetelnému úbytku tmavnutí a hloubky gravírování. Vyšší výkon laseru zanechává výrazně kontrastní stopy s patrnou karbonizací. Nižší výkon laseru (zejména 25 %) vede k méně patrným změnám povrchu, s omezenou viditelností struktury. Modřín ukazuje mírnou tendenci k tvorbě vláknitých struktur při nižších rychlostech (viz Příloha 1).

2.4.5.3 Optická analýza gravírovaných ploch pro lípa

Lípa vykazuje velmi rovnoměrné chování. Při vyšších výkonech laseru a pomalejší rychlosti (240 mm/s) dochází k výraznějšímu tmavnutí a karbonizaci, ale bez narušení povrchové integrity. S klesajícím výkonem laseru dochází ke ztrátě kontrastu, přičemž textura zůstává hladká. Gravírování je v tomto dřevu dobře kontrolovatelné a méně náchylné k popálení (viz Příloha 1).

2.4.5.4 Optická analýza gravírovaných ploch pro jasan

Při 100 % výkonu laseru a pomalejším posuvu jsou na povrchu jasanu patrné známky nadměrné karbonizace, s možným narušením struktury buněk. Při nižších výkonech a vyšších rychlostech dochází k jemnějším změnám barvy bez hlubšího poškození. Jasan obecně reaguje výrazněji na změnu parametrů, což naznačuje vyšší tepelnou citlivost (viz Příloha 1).

2.4.5.5 Optická analýza gravírovaných ploch pro dub

Dub vykazuje nerovnoměrnou reakci na gravírování, především kvůli rozdílné hustotě let a pórovitosti. Při vyšším výkonu laseru a pomalejším posuvu je patrné nepravidelné zuhelnatění a zvýraznění cévních struktur. Při 25 % výkonu je stopa laseru sotva patrná, zejména při vyšší rychlosti. Dub vyžaduje pečlivou optimalizaci parametrů (viz Příloha 1).

2.4.5.6 Optická analýza gravírovaných ploch pro balsu

Balsa jako velmi měkké a porézní dřevo reaguje výrazněji na laserové záření. Již při 55 % výkonu laseru jsou patrné znatelné stopy s výraznou karbonizací, a při 100 % dochází ke značnému poškození struktury. Gravírování je zde velmi kontrastní, ale povrch je značně narušen, což snižuje jeho technickou kvalitu (viz Příloha 1).

2.4.6 Vyhodnocení Siemensovy hvězdy

V rámci experimentální části byly vygravírovány tři různé Siemensovy hvězdy, které slouží k posouzení rozlišovací schopnosti zařízení a přesnosti samotného gravírovacího procesu. Siemensova hvězda je osvědčený testovací motiv běžně využívaný v oblasti reprodukční techniky, fotografie nebo optiky, protože vizuálně i výpočtově umožňuje určit hranici, kdy se jednotlivé prvky motivu začínají slévat a tím definovat praktické rozlišení systému.

Každá z hvězd měla stejný poloměr 21,5mm (tj. průměr 42,9 mm) a byla exportována s rozlišením. Lišily se však hustotou paprsků:

- **Hvězda 1:** 12 černých paprsků (nejřidší),
- **Hvězda 2:** 18 černých paprsků (střední hustota),
- **Hvězda 3:** 36 černých paprsků (nejhustší – nejvyšší nárok na rozlišení).

Po vygravírování byly hvězdy digitalizovány pomocí skeneru EPSON Perfection V700 při rozlišení 1200 PPI, což zajišťuje dostatečnou kvalitu pro podrobnou analýzu středové části hvězdy. Právě oblast středu je rozhodující pro hodnocení kvality, protože zde se paprsky sbíhají a při nedostatečném rozlišení dochází k jejich slévání.

Získané skeny byly dále analyzovány z hlediska ztráty detailu ve středu hvězd tedy místa, kde přestávají být jednotlivé černé a bílé paprsky rozlišitelné. Pomocí této hranice a známých

parametrů motivu bylo možné vypočítat praktické rozlišení gravírovacího systému, tedy minimální velikost prvku, který je laser ještě schopen věrně reprodukovat.

Tento postup poskytuje přesný a vizuálně ověřitelný způsob, jak stanovit rozlišovací schopnosti laserového systému v reálných podmínkách.

Hvězda s 36 černými paprsky

- Počet párů linek: 36
- Obvod hvězdy = $\pi \times$ průměr = **134,8 mm**
- Rozlišení = 36 lp / 134,8 mm = **0,267 lp/mm**
- Rozlišení při poloměru (střední vzdálenost, kde jsou linky blízko u sebe):

Rovnice 5 Přepočteme na počet párů linek / mm podle vzdálenosti od středu

$$\frac{lp}{mm} = \frac{36}{2\pi \cdot 21,45} \approx 0,267 \text{ lp/mm}$$

Hvězda s 18 černými paprsky

Rovnice 6 Rozlišení pro hvězdu s 18 černými paprsky

$$\text{Rozlišení} = \frac{18}{2\pi \cdot 21,45} \approx 0,133 \text{ lp/mm}$$

Hvězda s 12 černými paprsky

Rovnice 7 Rozlišení pro hvězdu s 12 černými paprsky

$$\text{Rozlišení} = \frac{12}{2\pi \cdot 21,45} \approx 0,089 \text{ lp/mm}$$

2.4.6.1 Vyhodnocení Siemensovy hvězdy vygravírované do lípy

Detail ve středu hvězdy: Ve středu dochází ke slévání čar o něco dříve než u jasanu. Detaily jsou méně ostré.

Symetrie: Dobrá, ale místy drobné optické deformace (možná nerovnosti materiálu).

Kvalita okrajů: Lehké rozpětí u tmavších čar, kontrast nižší než u dubu nebo jasanu.

Vyhodnocení Siemensovy hvězdy – lípa, 36 paprsků

L1 = 112,66 pixelů (délka od středu k bodu, kde se ještě rozlišují paprsky)

Rozlišení skenu = 1200 DPI

Převod na milimetry:

Rovnice 8 Převod na milimetry

$$mm = \frac{112,66 \cdot 25,4}{1200} \approx 2,384 \text{ mm}$$

Linky jsou rozeznatelné až do vzdálenosti 2,384 mm od středu.

Výpočet rozlišení: Rozlišení v lp/mm

Počet párů linek: 36 (každý černý paprsek má svůj bílý protějšek)

Rovnice 9 Rozlišení

$$lp/mm = \frac{36}{2\pi r} = \frac{36}{2\pi} \cdot 2,384 \approx 2,40 lp/mm$$

Rovnice 10 Přepočet na DPI

$$DPI = 2,40 \cdot 2 \cdot 25,4 \approx 121,92 DPI$$

Tato Siemensova hvězda ukazuje, že gravírka při daném nastavení na lípě dosáhla rozlišení:

- cca 2,40 počet párů linek/mm
- odpovídá přibližně 122 DPI

Rovnice 11 Nejmenší rozlišitelný detail

$$\frac{1}{2 \cdot 2,40} \approx 0,208 mm$$

Z délky úsečky 112,66 pixelů bylo při rozlišení skenu 1200 DPI vypočteno, že linky jsou rozlišitelné do vzdálenosti 2,384 mm od středu. Výsledkem je prostorové rozlišení 2,40 párů linek na milimetr, což odpovídá přibližně 122 DPI. Nejmenší rozlišitelný detail byl v tomto případě přibližně 208 μ m. Tento výpočet ukazuje, že při daném nastavení laseru došlo ke snížení přesnosti, pravděpodobně vlivem vyššího tepelného zatížení materiálu.

Vyhodnocení Siemensovy hvězdy – lípa, 18 paprsků

Při vyhodnocení Siemensovy hvězdy s 18 černými paprsky vygravírované do lípy bylo ve skenu při rozlišení 1200 DPI naměřeno, že jednotlivé linky zůstávají rozlišitelné až do vzdálenosti 24,41 pixelů od středu. Tato hodnota odpovídá reálné délce přibližně 0,517 mm. Na základě této vzdálenosti bylo vypočteno prostorové rozlišení gravírování na úrovni 5,55 párů linek na milimetr, což odpovídá přibližně 282 DPI. Minimální rozlišitelný detail tak dosahuje velikosti přibližně 90 mikrometrů. Tento výsledek naznačuje, že při daném nastavení laseru byla schopnost vykreslení detailů na lípě dobrá, ale nižší než při předchozím vyhodnocení s 36 paprsky, kde bylo dosaženo rozlišení až 455 DPI. Zároveň však šlo o lepší výsledek než u druhého 36 paprskového vzorku, kde kvůli přepalu pokleslo rozlišení na 122 DPI. Výsledky potvrzují, že pro přesné zobrazení jemných struktur je třeba optimalizovat výkon a rychlost laseru podle konkrétní geometrie a hustoty detailu.

Vyhodnocení Siemensovy hvězdy – lípa, 12 paprsků

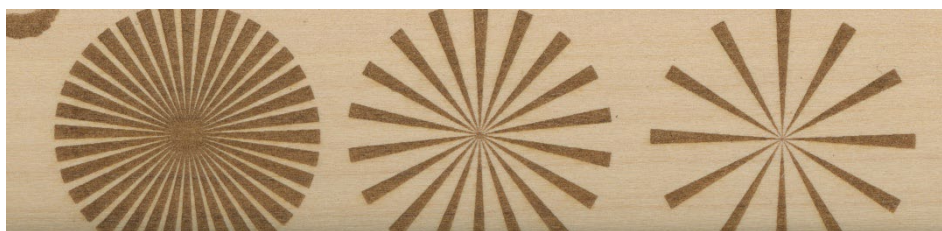
Při vyhodnocení Siemensovy hvězdy s 12 černými paprsky vygravírované do lípy bylo naměřeno, že rozlišitelnost jednotlivých paprsků sahá do vzdálenosti 15,13 pixelů od středu, což při rozlišení skenu 1200 DPI odpovídá 0,32 mm. Na základě této hodnoty bylo vypočteno prostorové rozlišení přibližně 5,96 párů linek na milimetr, tedy zhruba 302 DPI. Nejmenší rozlišitelný detail při tomto nastavení dosahuje velikosti přibližně 84 mikrometrů. Výsledek ukazuje, že i při menším počtu paprsků lze ověřit schopnost gravírovacího systému reprodukovat jemné detaily s dobrou přesností, a to při relativně šetrném zatížení materiálu.

Tabulka 15 Vyhodnocení Siemensových hvězd gravírovaných do lípy

Počet paprsků	L1 (px)	Vzdálenost od středu (mm)	Rozlišení (lp/mm)	Rozlišení (DPI)	Nejmenší rozlišitelný detail (μm)
36	112,66	2,384	2,4	122	208
18	24,41	0,517	5,55	282	90
12	15,13	0,32	5,96	302	84

Tabulka ukazuje, že nejvyššího rozlišení bylo u lípy dosaženo při hvězdách s nižším počtem paprsků až 5,96 lp/mm (302 DPI) u 12 paprsků. Naopak u 36 paprsků došlo ke znatelnému poklesu na 2,40 lp/mm (122 DPI), pravděpodobně vlivem slévání detailů v centrální části. Lípa dobře přenáší jemné struktury, ale je citlivá na přepal, což se projevuje hlavně u hustších motivů.

Tabulka ukazuje, že nejvyššího rozlišení bylo u lípy dosaženo při hvězdách s nižším počtem paprsků až 5,96 lp/mm (302 DPI) u 12 paprsků. Naopak u 36 paprsků došlo ke znatelnému poklesu na 2,40 lp/mm (122 DPI), pravděpodobně vlivem slévání detailů v centrální části. Lípa dobře přenáší jemné struktury, ale je citlivá na přepal, což se projevuje hlavně u hustších motivů.



Obrázek 5 Siemensova hvězda LÍPA

2.4.6.2 Vyhodnocení Siemensovy hvězdy vygravírované do dubu

Detail ve středu hvězdy: Paprsky se sbíhají poměrně ostře, ale v úplném středu dochází k mírnému slévání patrná jemná ztráta detailu.

Symetrie: Vysoká, žádné patrné deformace. Paprsky jsou rovnoměrné.

Kvalita okrajů: Hrany čar působí ostře, bez výrazného rozpětí. Kontrast vůči pozadí je střední až vyšší.

Vyhodnocení Siemensovy hvězdy – dub, 36 paprsků

U Siemensovy hvězdy s 36 paprsky gravírované do dubu byla rozlišitelnost jednotlivých paprsků pozorována až do vzdálenosti 173,5 px od středu, což při skenování s rozlišením 1200 DPI odpovídá 3,67 mm. Na základě této hodnoty bylo vypočteno rozlišení přibližně 1,56 páru linek na milimetr, tedy přibližně 79 DPI. Nejmenší rozlišitelný detail tak dosahuje velikosti přibližně 320 mikrometrů. Tento výsledek ukazuje, že dub při daném nastavení poskytuje výrazně nižší přesnost zobrazení detailů než lípa, což je pravděpodobně dáno jeho tvrdostí a výraznou strukturou pórů, které ovlivňují průnik laserového paprsku a ztěžují reprodukci jemných linií.

Vyhodnocení Siemensovy hvězdy – dub, 18 paprsků

U Siemensovy hvězdy s 18 černými paprsky gravírované do dubu bylo naměřeno, že linky jsou rozlišitelné až do vzdálenosti 43,7 px od středu, což odpovídá reálné vzdálenosti 0,92 mm. Při daném rozlišení skenu 1200 DPI bylo vypočteno prostorové rozlišení přibližně 3,1 párů linek na milimetr, tedy přibližně 157 DPI. Nejmenší rozlišitelný detail tak dosahuje velikosti okolo 161 mikrometrů. Oproti variantě se 36 paprsky zde bylo dosaženo vyšší přesnosti, což odpovídá očekávání nižší hustota čar je pro daný materiál lépe reprodukovatelná. Dub však i nadále vykazuje nižší schopnost přenášet jemné detaily ve srovnání s měkkými dřeviny.

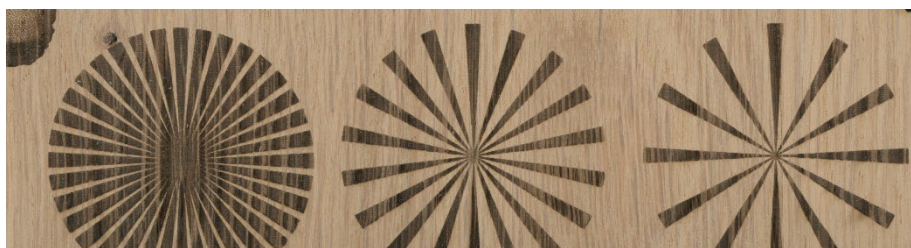
Vyhodnocení Siemensovy hvězdy – dub, 12 paprsků

U Siemensovy hvězdy s 12 černými paprsky gravírované do dubu bylo naměřeno, že rozlišitelnost čar sahá do vzdálenosti 22,2 px od středu, což při rozlišení 1200 DPI odpovídá 0,5 mm. Výpočtem bylo stanoveno prostorové rozlišení přibližně 4,1 párů linek na milimetr, tedy zhruba 207 DPI. Nejmenší rozlišitelný detail v tomto případě činí přibližně 123 mikrometrů. Tato hodnota představuje nejlepší výsledek ze tří testovaných variant pro dub, což odpovídá nižší hustotě paprsků a tím i lepší čitelnosti detailu. Přesto zůstává celkové rozlišení nižší než u měkkých dřevin, což potvrzuje, že tvrdá a porézní struktura dubu omezuje přesnost přenosu jemných linií při gravírování.

Tabulka 16 Vyhodnocením Siemensových hvězd gravírovaných do dubu

Počet paprsků	L1 (px)	Vzdálenost od středu (mm)	Rozlišení (lp/mm)	Rozlišení (DPI)	Nejmenší rozlišitelný detail (μm)
36	173,5	3,7	1,6	79	320
18	43,7	0,9	3,1	157	161
12	22,2	0,5	4,1	207	123

Tabulka ukazuje, že při nižším počtu paprsků bylo dosaženo vyššího rozlišení, což potvrzuje, že dub kvůli své tvrdé a porézní struktuře hůře reprodukuje velmi jemné detaily, ale je schopen zachovat čitelnost u řidších vzorů.



Obrázek 6 Siemensova hvězda DUB

2.4.6.3 Vyhodnocení Siemensovy hvězdy vygravírované do jasanu

Detail ve středu hvězdy: Jasně definovaný střed celkem dobrá čitelnost i v nejtěsnějších čarách.

Symetrie: Paprsky pravidelné, bez eliptických deformací.

Kvalita okrajů: Dobrý kontrast, gravírování čisté. Povrch dřeva dobře reagoval na laser.

Vyhodnocení Siemensovy hvězdy – jasan, 36 paprsků

U Siemensovy hvězdy s 36 paprsky gravírované do jasanu byla zjištěna rozlišitelnost paprsků do vzdálenosti 69,2 px od středu, což při rozlišení 1200 DPI odpovídá 1,5 mm. Z této hodnoty bylo vypočteno prostorové rozlišení přibližně 3,9 párů linek na milimetr, což odpovídá zhruba 199 DPI. Nejmenší rozlišitelný detail je přibližně 128 mikrometrů. Tento výsledek ukazuje, že jasan je schopen přenést poměrně jemné detaily, i když jeho výrazná pórovitost může způsobovat lokální deformace linie. I přesto bylo dosažené rozlišení vyšší než u dubu a celkově ukazuje na dobrou reakci materiálu při přesně nastaveném gravírování.

Vyhodnocení Siemensovy hvězdy – jasan, 18 paprsků

U Siemensovy hvězdy s 18 paprsky gravírované do jasanu byla rozlišitelnost jednotlivých linií patrná až do vzdálenosti 88,4 px od středu, což při rozlišení 1200 DPI odpovídá 1,9 mm. Vypočtené prostorové rozlišení činí přibližně 1,5 párů linek na milimetr, tedy zhruba 78 DPI. Minimální rozlišitelný detail při tomto nastavení dosahuje velikosti okolo 327 mikrometrů. Tento výsledek představuje podstatně nižší přesnost než u varianty se 36 paprsky, což může souviset s odlišným nastavením laseru, nerovnoměrným odpařováním materiálu nebo přítomností výrazných pórů typických pro jasan. Výrazné kolísání kvality tak naznačuje, že jasan je citlivý na jemné změny v parametrech gravírování.

Vyhodnocení Siemensovy hvězdy – jasan, 12 paprsků

U Siemensovy hvězdy s 12 černými paprsky gravírované do jasanu byla rozlišitelnost paprsků patrná až do vzdálenosti 47,4 pixelů od středu, což odpovídá fyzické délce 1,0 mm. Z této hodnoty bylo vypočteno prostorové rozlišení přibližně 1,9 párů linek na milimetr, tedy zhruba 97 DPI. Nejmenší rozlišitelný detail dosáhl velikosti přibližně 262 mikrometrů. Tento výsledek představuje mírné zlepšení oproti variantě s 18 paprsky, ale zůstává za očekáváním ve srovnání s hvězdou s 36 paprsky. Výsledky potvrzují, že i u řídké geometrie může v jasanu docházet k rozpíjení nebo deformaci detailu, pravděpodobně vlivem jeho nerovnoměrné a pórovité struktury.

Tabulka 17 Vyhodnocením Siemensových hvězd gravírovaných do jasanu

Počet paprsků	L1 (px)	Vzdálenost od středu (mm)	Rozlišení (lp/mm)	Rozlišení (DPI)	Nejmenší rozlišitelný detail (μm)
36	69,2	1,5	3,9	199	128
18	88,4	1,9	1,5	78	327
12	47,4	1,0	1,9	97	262

Tabulka ukazuje, že nejlepšího rozlišení bylo v případě jasanu dosaženo u hvězdy s 36 paprsky. Nižší počet paprsků paradoxně nevedl k vyšší čitelnosti, což může souviset s vlastnostmi materiálu zejména pórovitostí a tvrdostí které způsobují nerovnoměrné odpařování materiálu a zkreslení detailů při gravírování.



Obrázek 7 Siemensova hvězda JASAN

2.4.6.4 Vyhodnocení Siemensovy hvězdy vygravírované do modřínu

Detail ve středu hvězdy: Ve středu nejhustší hvězdy dochází ke slévání čar poměrně brzy, dříve než u lípy, ale později než u dubu. Detaily jsou znatelné, ale méně ostré, což může být důsledek smolných kanálků nebo nestejně hustoty dřeva.

Symetrie: Celkově velmi dobrá, čáry jsou pravidelné, bez znatelného mechanického vychýlení. Mírné optické deformace mohou být způsobeny odlišnou absorpcí ve světlých a tmavších létech modřínu.

Kvalita okrajů: Tmavší čáry se místy lehce rozpíjejí, především u jemnější hvězdy vlevo. Kontrast je spíše střední, méně výrazný než u jasanu nebo dubu, ale stále čitelný. Povrch působí rovnoměrně a bez výrazných spálenin.

Vyhodnocení Siemensovy hvězdy – modřín, 36 paprsků

U Siemensovy hvězdy s 36 paprsky gravírované do modřínu byla rozlišitelnost čar zachována až do vzdálenosti 97,0 px od středu, což odpovídá 2,1 mm. Výpočtem bylo stanoveno prostorové rozlišení přibližně 2,8 párů linek na milimetr, tedy zhruba 141 DPI. Nejmenší rozlišitelný detail dosáhl velikosti okolo 179 mikrometrů. Výsledek odpovídá střední přesnosti modřín sice umožňuje poměrně čitelné detaily, ale vzhledem ke své struktuře s hustými letokruhy a obsahem pryskyřice dochází dříve ke slévání čar než např. u lípy nebo modifikovaného jasanu.

Vyhodnocení Siemensovy hvězdy – modřín, 18 paprsků

Při vyhodnocení Siemensovy hvězdy s 18 paprsky gravírované do modřínu byla rozlišitelnost paprsků patrná až do vzdálenosti 53,4 px od středu, což odpovídá 1,1 mm. Vypočtené prostorové rozlišení činí přibližně 2,5 párů linek na milimetr, tedy přibližně 128 DPI. Nejmenší rozlišitelný detail dosáhl velikosti okolo 198 mikrometrů. Oproti variantě se 36 paprsky byl zaznamenán mírně nižší výsledek, což může být ovlivněno lokálními vlastnostmi materiálu nebo mírnou změnou v nastavení laseru. Výsledek stále potvrzuje schopnost modřínu reprodukovat základní detaily s relativní čistotou.

Vyhodnocení Siemensovy hvězdy – modřín, 12 paprsků

U Siemensovy hvězdy s 12 paprsky gravírované do modřínu byla rozlišitelnost čar patrná až do vzdálenosti 42,1 pixelů od středu, což odpovídá 0,9 mm. Vypočtené rozlišení činí 2,1 párů linek na milimetr, tedy přibližně 109 DPI. Nejmenší rozlišitelný detail dosahuje velikosti okolo 234 mikrometrů. Tato varianta ukazuje nejnižší rozlišení ze všech tří provedení,

což může být způsobeno lokální variabilitou struktury modřínu nebo menším kontrastem při nižší hustotě čar. I přesto je reprodukce linií plynulá a symetrická, což naznačuje, že modřín zajišťuje poměrně konzistentní výsledky.

Tabulka 18 Vyhodnocení Siemensových hvězd gravírovaných do modřínu

Počet paprsků	L1 (px)	Vzdálenost od středu (mm)	Rozlišení (lp/mm)	Rozlišení (DPI)	Nejmenší rozlišitelný detail (μm)
36	97,0	2,1	2,8	141	179
18	53,4	1,1	2,5	128	198
12	42,1	0,9	2,1	109	234

Tabulka ukazuje, že nejvyšší rozlišení bylo dosaženo u 36paprskové hvězdy. Snižující se počet paprsků v případě modřínu nevedl k vyšší čitelnosti detailů naopak rozlišení mírně klesalo. Výsledky naznačují, že modřín je schopen stabilně přenášet jemné čáry v celém rozsahu, přičemž při vhodném nastavení lze dosáhnout velmi slušné přesnosti s minimálním přepalem.



Obrázek 8 Siemensova hvězda MODŘÍN

2.4.6.5 Vyhodnocení Siemensovy hvězdy vygravírované do balsy

Detail ve středu hvězdy: Čáry se ve středu hvězdy slévají velmi brzy, téměř okamžitě, zejména u nejhustší hvězdy. Detaily jsou výrazně rozmazané a neostré. Balsa zjevně nezvládá jemné gravírování kvůli své extrémní měkkosti a savosti.

Symetrie: Symetrie vzorů je zachována, ale v některých oblastech jsou patrné lehké deformace způsobené strukturou dřeva. Vlákna balsy reagují nestejně, což může způsobit optické vychýlení některých čar.

Kvalita okrajů: Okraje čar jsou měkce rozpitá, bez ostrého ohraničení. Kontrast je nízký, paprsky jsou spíše rozostřené než přesně definované. Typické pro balsu je silné tmavnutí v místech vyšší expozice a zároveň rychlé slévání linií.

Vyhodnocení Siemensovy hvězdy – balsa, 36 paprsků

U Siemensovy hvězdy s 36 paprsky gravírované do balsy byla rozlišitelnost paprsků pozorována do vzdálenosti 114,9 pixelů od středu, což odpovídá 2,4 mm. Výpočetem bylo

stanoveno prostorové rozlišení přibližně 2,4 párů linek na milimetr, tedy zhruba 119 DPI. Nejmenší rozlišitelný detail dosáhl velikosti přibližně 213 mikrometrů. Balsa jako extrémně měkké dřevo se ukázala jako velmi nevhodná pro vykreslení jemných struktur čáry se slévají brzy a hrany jsou rozmazané. Výsledky odpovídají očekávanému chování materiálu, který je příliš náchylný na přepal i při nízké intenzitě.

Vyhodnocení Siemensovy hvězdy – balsa, 18 paprsků

U Siemensovy hvězdy s 18 paprsky gravírované do balsy bylo možné jednotlivé čáry rozlišit do vzdálenosti 65,1 px od středu, což odpovídá 1,4 mm. Výpočtem bylo určeno prostorové rozlišení přibližně 2,1 párů linek na milimetr, tedy zhruba 106 DPI. Nejmenší rozlišitelný detail dosáhl velikosti okolo 240 mikrometrů. Ve srovnání s hvězdou s 36 paprsky je výsledek mírně horší, což je v rozporu s běžným trendem může to souviset s extrémní savostí a nestejnou strukturou balsy, která gravírování ztěžuje i u jednodušších tvarů.

Vyhodnocení Siemensovy hvězdy – balsa, 12 paprsků

U Siemensovy hvězdy s 12 paprsky gravírované do balsy byla čitelnost linií zachována do vzdálenosti 53,2 px od středu, což odpovídá 1,1 mm. Vypočtené prostorové rozlišení činí přibližně 1,7 párů linek na milimetr, tedy zhruba 86 DPI. Nejmenší rozlišitelný detail dosáhl velikosti přibližně 296 mikrometrů. Ve srovnání s hvězdami s vyšším počtem paprsků šlo o nejnižší rozlišení, což potvrzuje, že balsa jako extrémně měkký a savý materiál poskytuje velmi omezenou přesnost při laserovém gravírování, bez ohledu na složitost nebo hustotu vzoru.

Tabulka 19 Vyhodnocení Siemensových hvězd gravírovaných do balsy

Počet paprsků	L1 (px)	Vzdálenost od středu (mm)	Rozlišení (lp/mm)	Rozlišení (DPI)	Nejmenší rozlišitelný detail (μm)
36	114,9	2,4	2,4	119	213
18	65,1	1,4	2,1	106	240
12	53,2	1,1	1,7	86	296

Tabulka ukazuje, že rozlišení balsy je výrazně nižší než u ostatních dřevin a klesá s nižším počtem paprsků. Balsa vykazuje nízký kontrast, rychlé slévání čar a celkově slabou schopnost přenést jemné detaily, což je důsledkem její měkké a velmi porézní struktury.



Obrázek 9 Siemensova hvězda BALSA

2.4.6.6 Vyhodnocení Siemsenovy hvězdy vygravírované do smrku

Detail ve středu hvězdy: Středová část u nejhustší hvězdy vykazuje mírné slévání čar, ale stále jsou rozlišitelné lépe než u balsy. Detaily jsou poměrně ostré, i když místy lehce narušené směrem k jádru.

Symetrie: Obecně dobrá, čáry jsou rozmístěny pravidelně. Mírné optické deformace jsou patrné u prostřední a pravé hvězdy pravděpodobně vlivem rozdílné tvrdosti letokruhů (jarní letní dřevo).

Kvalita okrajů: Hrany čar jsou měkké, ale stále čitelné. Kontrast mezi čarami je slabší než u tvrdších dřevin, ale výrazně lepší než u balsy. Nejsou patrné výrazné přepaly ani spáleniny, povrch zůstává rovnoměrný.

Vyhodnocení Siemsenovy hvězdy – smrk, 36 paprsků

U Siemsenovy hvězdy s 36 paprsky gravírované do smrku byla rozlišitelnost paprsků zachována do vzdálenosti 125,2 px od středu, což odpovídá 2,7 mm. Výpočtem bylo určeno prostorové rozlišení přibližně 2,2 párů linek na milimetr, tedy přibližně 110 DPI. Nejmenší rozlišitelný detail dosáhl velikosti kolem 231 mikrometrů. Smrk v tomto případě vykázal slušnou schopnost přenést jemnější linie, i když mírné nerovnosti ve struktuře dřeva mohly způsobit drobné deformace. Výsledek ukazuje, že smrk je při správném nastavení laseru schopen zobrazit jemnější struktury s relativní přesností.

Vyhodnocení Siemsenovy hvězdy – smrk, 18 paprsků

U Siemsenovy hvězdy s 18 paprsky gravírované do smrku byla rozlišitelnost linií pozorována do vzdálenosti 51,6 px od středu, což odpovídá 1,1 mm. Výpočtem bylo stanoveno prostorové rozlišení přibližně 2,6 párů linek na milimetr, tedy asi 133 DPI. Nejmenší rozlišitelný detail dosáhl velikosti přibližně 191 mikrometrů. Tento výsledek je mírně lepší než u 36paprskové hvězdy, což odpovídá předpokladu, že méně hustá geometrie je ve smrku snáze gravírovatelná a méně náchylná k tepelnému rozpítí.

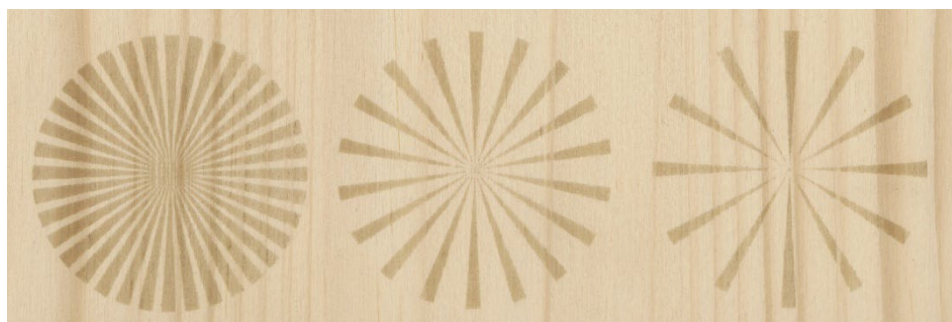
Vyhodnocení Siemsenovy hvězdy – smrk, 12 paprsků

U Siemsenovy hvězdy s 12 paprsky gravírované do smrku byla rozlišitelnost paprsků pozorována do vzdálenosti 63 px od středu, což odpovídá 1,3 mm. Výpočtem bylo stanoveno prostorové rozlišení přibližně 1,4 párů linek na milimetr, tedy zhruba 73 DPI. Nejmenší rozlišitelný detail dosáhl velikosti přibližně 349 mikrometrů. Oproti variantám s vyšším počtem paprsků byl tento výsledek nejméně přesný, což může být způsobeno tím, že při nízké hustotě čar není optická hranice mezi liniemi tak dobře definovaná, případně může jít o místní rozdíly ve struktuře dřeva.

Tabulka 20 Vyhodnocení Siemensových hvězd gravírovaných do smrku

Počet paprsků	L1 (px)	Vzdálenost od středu (mm)	Rozlišení (lp/mm)	Rozlišení (DPI)	Nejmenší rozlišitelný detail (μm)
36	125,2	2,7	2,2	110	231
18	51,6	1,1	2,6	133	191
12	63	1,3	1,4	73	349

Tabulka ukazuje, že nejlepší rozlišení u smrku bylo dosaženo při 18 paprscích, což je mírná odchylka od očekávaného trendu. To může být způsobeno specifickou strukturou smrkového dřeva, kde se střídají měkká jarní a tvrdá letní část letokruhů, což ovlivňuje lokální gravírovací vlastnosti. I přes tuto variabilitu si smrk udržuje relativně konzistentní schopnost přenášet detaily.

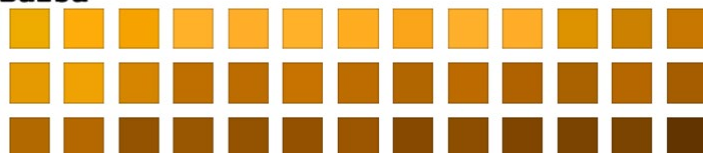


Obrázek 10 Smrk_Siemensovy hvězdy

2.4.7 Gradační křivka

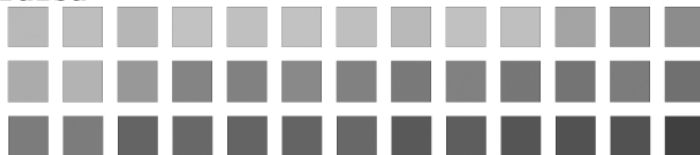
Pro vyhodnocení schopnosti jednotlivých dřevin reprodukovat stupně šedi byla nejprve vytvořena testovací škála složená z 39 polí s plynulým přechodem od černé po bílou. Tato škála byla následně vygravírována na různé typy dřeva pomocí gravírky xTool D1 Pro. Výsledné povrchy byly analyzovány pomocí spektrofotometru, který změřil kompletní hodnoty v barevném prostoru CIELAB (L^* , a^* , b^*) pro každé pole. Tyto hodnoty byly následně převedeny na odpovídající odstíny šedi a aplikovány ve Photoshopu na původní vstupní škálu. Porovnáním vstupních a výstupních dat vznikly gradační křivky, které znázorňují chování konkrétní dřeviny při gravírování a její schopnost přesně reprodukovat tonalitu podle digitální předlohy.

Balsa



Obrázek 11 Přepsané naměřené $L^*a^*b^*$ hodnoty do Photoshopu

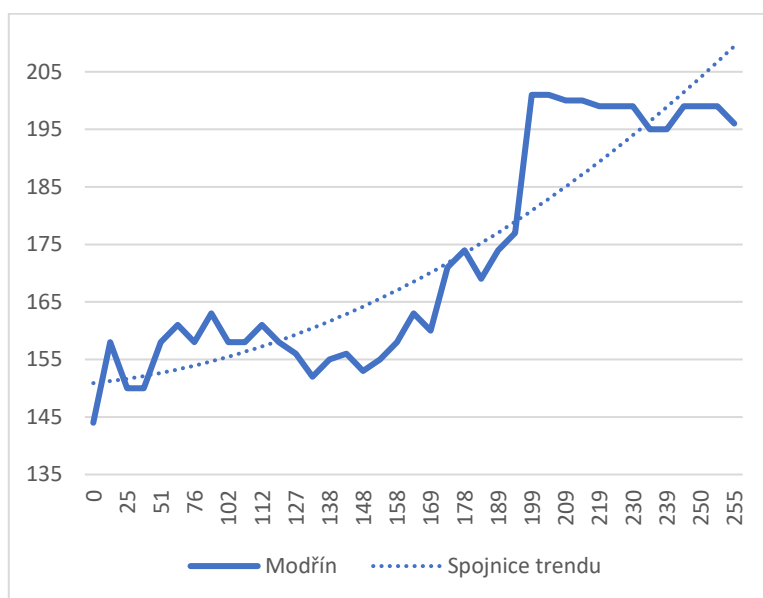
Balsa



Obrázek 12 Škála převedena do stupňů šedi

Gradační křivky jednotlivých dřevin znázorňují, jakým způsobem reálně reaguje materiál na různé úrovně vstupního signálu při laserovém gravírování. Modrá křivka představuje skutečnou odezvu daného dřeva. Na základě těchto dat lze posoudit vhodnost materiálu pro přesné gravírování i odhadnout míru nutné kompenzace pro dosažení požadovaných výsledků.

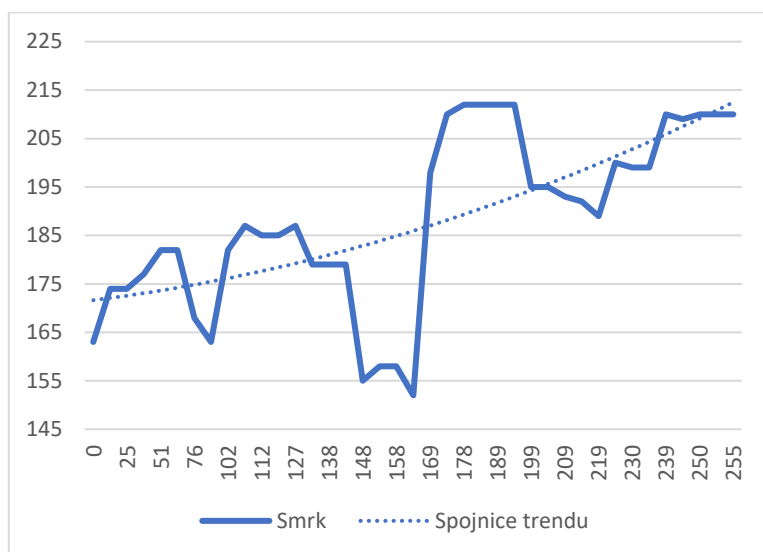
2.4.7.1 Gradační křivka pro modřín



Graf 2 Gradační křivka pro modřín

U modřínu je patrná pozvolná odezva na změny vstupních hodnot šedi. Výstupní odstíny se jen pomalu zvyšují a křivka zůstává nízko nad základní úrovní po většinu rozsahu. Reálný růst je výrazně pomalejší, než odpovídá ideálnímu lineárnímu vstupu. Po dosažení určité hranice (kolem vstupní hodnoty 190) nastává rychlé nasycení, kdy další zvyšování vstupu vede k minimálním změnám výstupu. Tento průběh omezuje možnosti vytváření plynulých tónových přechodů a jemné gradace při gravírování.

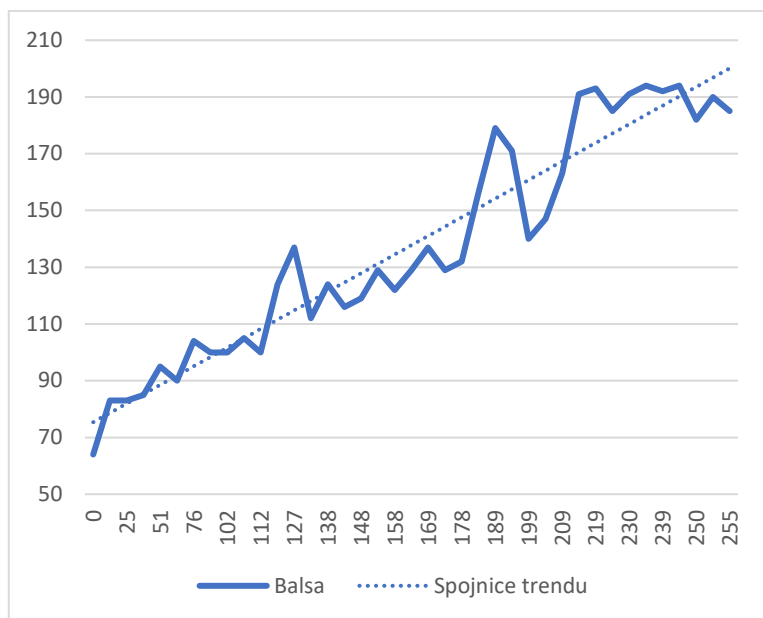
2.4.7.2 Gradační křivka pro smrk



Graf 3 Gradační křivka pro smrk

Graf znázorňuje odezvu smrkového dřeva na gravírování laserem v závislosti na vstupní škále stupňů šedi (0–255). Naměřené hodnoty výstupního odstínu jsou rovněž převedeny do stupňů šedi. Křivka je značně nerovnoměrná, s výraznými skoky a poklesy zejména mezi vstupy 140–180 a 200–230. To ukazuje, že smrk na změny vstupní intenzity reaguje nepředvídatelně a nekonzistentně, což komplikuje dosažení přesného kontrastu a jemného odstínového přechodu při gravírování.

2.4.7.3 Gradační křivka pro balsu

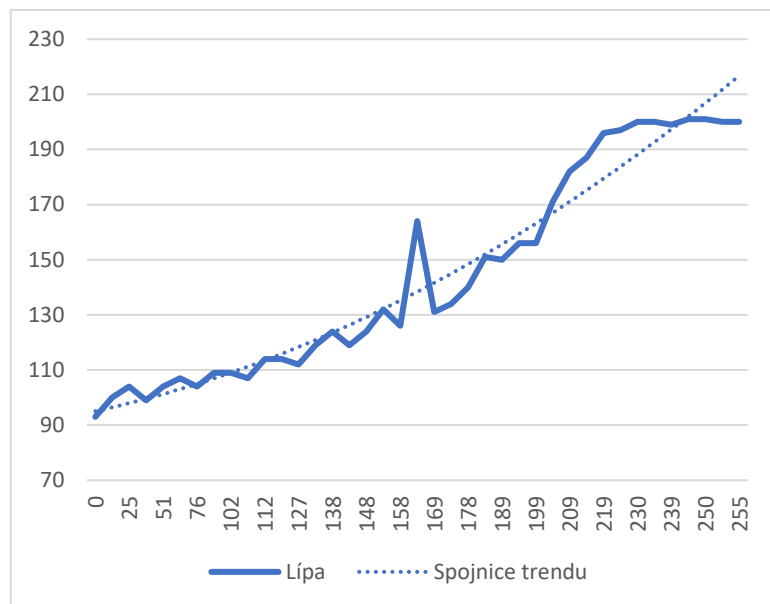


Graf 4 Gradační křivka pro balsu

Balsa je materiál s výraznou strukturou let a nestejnou hustotou, což ovlivňuje interakci s laserovým paprskem. Křivka vykazuje skoky a výkyvy, které jsou spíše důsledkem vnitřní struktury dřeva než nelineární odezvy samotného materiálu. V tmavších a hustších oblastech může dojít k prudším změnám odstínu i při malé změně vstupního výkonu, což může

vést k propadům v kresbě. Jinak má balsa obecně poměrně lineární odezvu. V homogenních částech má křivka téměř rovnoměrný trend. Gravírování je tak čitelné, ale citlivé na drobné nepravidelnosti materiálu.

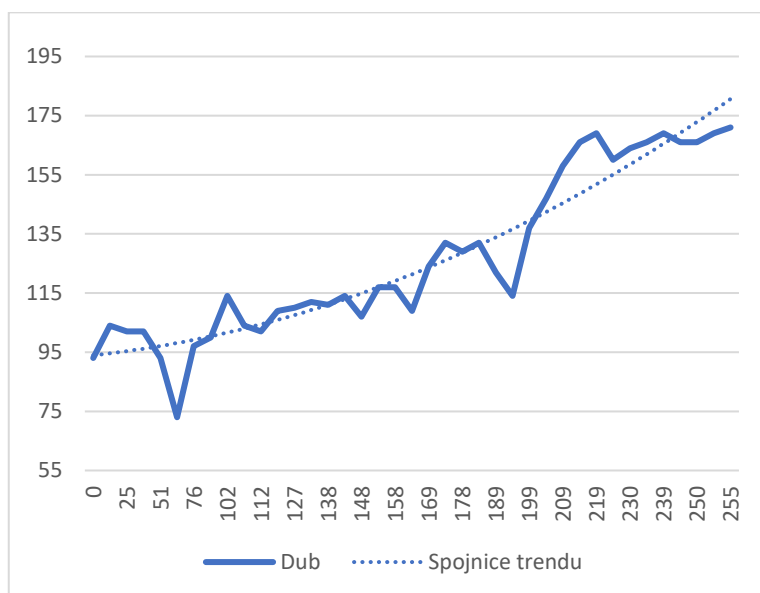
2.4.7.4 Gradační křivka pro lípu



Graf 5 Gradační křivka pro lípu

Lípa vykazuje poměrně pravidelnou odezvu v nižších vstupních hodnotách, avšak ve střední části spektra (kolem vstupů 150–180) dochází k výrazným výkyvům. Vysoké hodnoty (zejména nad úroveň 210) pak ukazují známky saturace. Odezva se zde přestává zvyšovat i při rostoucím vstupu. V závěru křivky (nad 230) se odezva stává méně stabilní, což může být způsobeno limitem materiálu při tmavnutí. Tento průběh ztěžuje přesnou kontrolu nad výsledným kontrastem. Lípa je citlivý materiál, náchylný k náhlým změnám odstínu při úpravě gravírovacích parametrů.

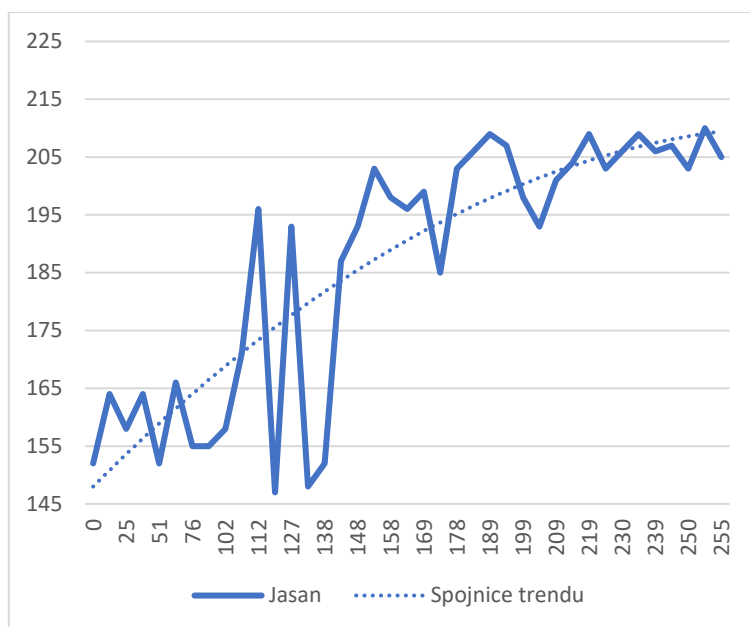
2.4.7.5 Gradační křivka pro dub



Graf 6 Gradační křivka pro dub

Dub nabízí poměrně pravidelnou odezvu s několika odchylkami. Při nižších vstupních hodnotách dochází k mírnému propadu kolem hodnoty 75, ale celkově materiál dobře reaguje a vytváří čitelný výstup. Při vyšších hodnotách se křivka postupně zplošťuje, což ukazuje na nasycení materiálu. Dub vykazuje relativně dobrou stabilitu a je vhodný pro aplikace, kde je požadována konzistence odstínů.

2.4.7.6 Gradační křivka pro jasan



Graf 7 Gradační křivka pro jasan

Jasan vykazuje výrazné nestability a nepravidelnosti v průběhu křivky. V oblasti středních vstupních hodnot (kolem 110–150) dochází k extrémním výkyvům a propadům, kdy křivka prudce klesá a stoupá. Až od vyšších vstupních hodnot (cca 170 a více) se odezva

stabilizuje a stává se plynulejší. Tento materiál je tedy v některých rozsazích velmi nestabilní, což komplikuje gravírování s důrazem na tonalitu a jemné detaily.

Z uvedených gradačních křivek vyplývá, že pro účely přesného a estetického gravírování jsou nejvhodnějšími materiály dub a modřín, které nabízejí relativně stabilní odezvu s omezenými výkyvy.

Jasan sice při vyšších vstupech vykazuje stabilitu, ale ve středním rozsahu (cca 110–150) má extrémní výkyvy, což omezuje jeho použitelnost pro detailní práci bez korekce.

Lípa a balsa trpí výraznými výkyvy a náhlým nasycením, což komplikuje řízení odstínu. Smrk vykazuje prakticky nevhodnou odezvu s minimální změnou odstínu přes celý rozsah, což ho činí problematickým pro kontrastní a detailní gravírování.

Gradační křivky umožňují vytvářet korekční profily, které mohou výrazně zlepšit výslednou kvalitu gravírování i u méně předvídatelných dřevin, zejména u jasanu, lípy a balsy.

2.5 Shrnutí výsledků

V rámci diplomové práce byly analyzovány různé typy dřevin za použití specifických metod zpracování. Následující kapitoly přinášejí přehled dosažených výsledků jednotlivých dřevin.

2.5.1 Shrnutí Michalsonův kontrast gravírovaných ploch

Tato část práce se věnuje vyhodnocení Michalsonova kontrastu, který kvantifikuje rozdíl mezi nejsvětlejšími a nejtmavšími oblastmi gravírované plochy. Kontrast byl vypočten ze spektrofotometricky naměřených hodnot měrné světlosti L^* v barevném prostoru CIELAB. Cílem bylo porovnat odezvu různých dřevin na změny laserového výkonu a posoudit jejich schopnost vytvářet vizuálně výrazné gravury.

Výsledky ukázaly, že kontrast závisí nejen na použitém výkonu laseru, ale především na strukturálních a optických vlastnostech jednotlivých dřevin.

2.5.1.1 Seřazení dřevin podle dosaženého Michalsonova kontrastu

1. Balsa: Překvapivě vysoký kontrast, zejména při nízkých a středních výkonech laseru; výborná schopnost ztmavit povrch bez výrazného přepálení.
2. Lípa: Vysoký kontrast napříč výkony laseru; jemná a světlá struktura dřeva podporuje zřetelnou kresbu.
3. Jasan: Velmi dobrý kontrast, zejména při vyšších výkonech laseru; těží z vyšší hustoty a výrazné kresby.
4. Smrk: Kontrast stoupá s výkonem laseru; nízký u slabých nastavení, ale překvapivě dobrý při vysoké energii.
5. Dub: Střední kontrast; i přes tvrdost a třísloviny není kresba tak výrazná, zřejmě kvůli tmavšímu přirozenému odstínu.
6. Modřín: Nejnižší kontrast; vlivem vyššího obsahu pryskyřic a nestejnomyerného povrchu je kresba méně zřetelná.

2.5.2 Shrnutí drsnosti gravírovaných ploch

Tato část práce se zabývala vlivem parametrů laserového gravírování na povrchovou drsnost (R_a) u šesti druhů dřeva. Měření byla provedena pomocí drsnoměru a ukázala, jak kombinace výkonu a rychlosti ovlivňuje výslednou topografii povrchu. Vysoká drsnost může negativně ovlivnit funkční i estetické vlastnosti výrobků, proto je její kontrola důležitým faktorem při laserovém opracování.

Výsledky potvrdily očekávaný trend: vyšší výkon a nižší rychlost zpravidla vedou k vyšší drsnosti. Kromě parametrů laseru však hraje významnou roli i struktura samotného dřeva, jeho tvrdost, hustota a pórovitost.

2.5.2.1 Seřazení dřevin podle maximálně dosažené drsnosti R_a (od nejdrsnějšího)

1. Jasan až 38,28 μm ; extrémní nárůst drsnosti při vyšším výkonu laseru, časté překročení měřicího rozsahu.
2. Balsa až 31,73 μm ; velmi vysoké hodnoty už při nízkých výkonech laseru, přirozeně hrubý povrch.
3. Lípa až 30,82 μm ; rovnoměrný, ale výrazný nárůst drsnosti; dobrá opakovatelnost.
4. Dub až 26,97 μm ; stabilní, výchozí R_a je vysoké už bez gravírování (cca 21 μm).
5. Smrk až 16,12 μm ; výrazné skoky při středním výkonu laseru, jinak relativně měkký průběh.
6. Modřín až 13,35 μm ; nejnižší dosažené hodnoty, velmi stabilní odezva bez výkyvů.

2.5.3 Shrnutí měrné světlosti gravírovaných ploch

Tato kapitola se zaměřuje na měření měrné světlosti povrchu dřeva (L^* v barevném prostoru CIELAB) po laserovém gravírování. Pomocí spektrofotometrie byly vyhodnoceny odezvy šesti různých dřevin na různé kombinace výkonu laseru a rychlosti posuvu. Výsledky ukazují, jak jednotlivé materiály reagují na tepelnou zátěž, jaký kontrast jsou schopny vytvořit a jak dobře se s nimi dá odstínovat tónová škála.

2.5.3.1 Z měření vyplynuly tyto hlavní poznatky

- Lípa dobře kontrolovatelný materiál s rovnoměrnou odezvou; výborná predikovatelnost, vhodná pro aplikace vyžadující jemnou tonalitu.
- Dub plynulý pokles L^* bez náhlých skoků; materiál odolný vůči přepálení, vhodný pro kontrastní gravírování.
- Jasan stabilní, ale méně výrazná odezva; pomalé tmavnutí i při vyšších výkonech laseru umožňuje přesné řízení výsledného efektu.
- Modřín plynulý pokles světlosti s výjimkou u vyšších rychlostí, kde se objevují náznaky přepalu; jinak velmi stabilní.
- Balsa prudká reakce i při nízkých výkonech laseru, rychlé ztmavení a malý dynamický rozsah; vhodná pouze pro silné kontrasty, nikoliv jemné přechody.

- Smrk rovnoměrný pokles L^{*}, stabilní odezva, ale menší rozdíl mezi jednotlivými úrovněmi výkonu laseru; vhodný pro aplikace, kde není požadována vysoká kontrastnost.

2.5.3.2 Seřazení dřevin podle předvídatelnosti a využitelnosti pro tónové předlohy

1. Lípa dobře úměrná reakce, stabilní kontrast, vysoký rozsah.
2. Modřín plynulé chování, dobře reaguje na výkon laseru, velmi stabilní.
3. Dub konzistentní pokles L^{*}, nižší riziko přepálení.
4. Jasan velmi pozvolná odezva, nízké riziko poškození, ale méně kontrastu.
5. Smrk stabilní, ale málo kontrastní; potřebuje vysoký výkon laseru.
6. Balsa extrémně citlivá, rychle tmavne, nevhodná pro odstínování.

2.5.4 Shrnutí výsledků gradační křivky

Cílem této části bylo posoudit schopnost jednotlivých dřevin přesně reprodukovat stupně šedi při laserovém gravírování. Pomocí spektrofotometrické analýzy vygravírované škály a následného přepisu do odstínů šedi ve Photoshopu vznikly gradační křivky, které odhalují, jak věrně materiál reaguje na různé úrovně vstupního signálu. Křivky poskytují přehled o linearitě odezvy, stabilitě a nasycení jednotlivých dřevin.

2.5.4.1 Z výsledků vyplývá následující hodnocení vhodnosti

1. Dub nejstabilnější odezva, relativně rovnoměrné zobrazení tónů, vhodný pro precizní a opakovatelné gravírování.
2. Modřín mírně nelineární průběh, ale bez výrazných skoků; dobře předvídatelné chování.
3. Jasan vhodný ve vyšších světlostech, ale velmi nestabilní ve střední části škály, vyžaduje výraznou korekci.
4. Lípa dobrý začátek křivky, ale ve střední části a při vyšších hodnotách dochází k výkyvům a nasycení.
5. Balsa extrémně citlivá na vstupní hodnoty, prudké změny a výkyvy, nevhodná pro přesnou tonalitu.
6. Smrk nejméně vhodný materiál, velmi nepravidelná a nevýrazná odezva bez plynulé gradace.

Gradační křivky přinášejí cenný nástroj pro optimalizaci gravírovacích procesů. I méně stabilní dřeviny lze pomocí správně nastavených korekcí použít v aplikacích, kde je důležitá tonalita a vizuální přesnost.

2.5.5 Shrnutí a vyhodnocení výsledků Siemensovy hvězdy

Cílem této části bylo pomocí testovacího motivu Siemensovy hvězdy ověřit rozlišovací schopnosti gravírovacího zařízení při práci s různými druhy dřeva. Gravírováním hvězd

s odlišným počtem paprsků (12, 18, 36) bylo možné kvantifikovat schopnost systému reprodukovat jemné detaily a stanovit nejmenší rozlišitelný prvek. Pro hodnocení byla rozhodující oblast středu hvězdy, kde dochází k optickému slévání linií při nedostatečném rozlišení.

Měření ukázalo, že na přesnost a ostrost gravírování má zásadní vliv struktura dřeva, jeho tvrdost, pórovitost a rovnoměrnost. Měkčí dřeviny zpravidla umožnily lepší rozlišení při nižší hustotě paprsků, zatímco tvrdé nebo pórovité materiály vykazovaly omezení při zobrazení jemných struktur.

2.5.5.1 Seřazení dřevin podle dosaženého nejlepšího rozlišení (nejvyšší lp/mm)

1. Lípa až 5,96 lp/mm (302 DPI); výborné výsledky, citlivá na přepal u hustších motivů.
2. Jasan až 3,91 lp/mm (199 DPI); velmi dobrá odezva, ale silná závislost na lokální struktuře dřeva.
3. Modřín až 2,79 lp/mm (141 DPI); dobrá stabilita, mírně horší ostrost ve středu hvězdy.
4. Smrk až 2,62 lp/mm (133 DPI); překvapivě dobrý výsledek, ale kolísající ostrost při nižší hustotě.
5. Balsa až 2,35 lp/mm (119 DPI); velmi omezená možnost zobrazit detaily, silné rozpítí čar.
6. Dub pouze 1,56 lp/mm (79 DPI); tvrdá struktura výrazně omezila schopnost přenosu jemných detailů.

2.5.6 Shrnutí subjektivního hodnocení estetické kvality gravírovaných dřevin

Pro doplnění technického hodnocení byla provedena jednoduchá anketa, ve které 10 náhodně vybraných respondentů posuzovalo vzhled jednotlivých gravírovaných dřevin. Každý účastník vybral dřevo, které mu přišlo nejestetičtější, a zároveň označil to, které působilo nejméně atraktivně. Hodnotil se vizuální kontrast, čistota linie a celkový dojem.

2.5.6.1 Pořadí dřevin podle subjektivní atraktivity

(1 = nejhezčí, 6 = nejméně atraktivní)

1. Lípa: Jemný kontrast, čisté linie, světlý podklad, působí elegantně a jemně.
2. Dub: Přirozeně tmavší odstín, výrazná textura, gravírování působí robustně a luxusně.
3. Jasan: Velmi zřetelná kresba, moderní dojem, mírně hůře čitelný detail ve světlých částech.
4. Modřín: Působí přirozeně, ale místy nerovnoměrně kvůli smolným kanálkům.
5. Smrk: Méně kontrastní, občas rozpítý vzhled, působí laciněji.
6. Balsa: Velmi měkký dojem, rozmazané kontury, přepaly, celkový vzhled byl nejčastěji označován za „nečitelný“ nebo „amatérský“.

2.5.6.2 Shrnutí subjektivního hodnocení

Z výsledků subjektivního hodnocení vyplývá, že nejlépe působí lípa a dub, které kombinují estetiku s technickou kvalitou výstupu. Naopak balsa a smrk byly vnímány jako vizuálně nejméně atraktivní, a to i přesto, že balsa dosahovala vysokého kontrastu, ten byl však hodnocen jako „nečistý“ a „agresivní“. Pro aplikace, kde hraje estetika hlavní roli (např. dárkové předměty, umělecká tvorba), je tedy vhodné volit lípu, případně dub. Balsa je nevhodná i z hlediska vizuálního dojmu.

ZÁVĚR

Diplomová práce prokázala, že kvalita laserového gravírování na různé druhy dřeva je významně ovlivněna fyzikálními a optickými vlastnostmi daného materiálu. Na základě komplexního měření kontrastu, měrné světlosti (L^*), drsnosti povrchu a reprodukce detailů bylo možné určit optimální nastavení výkonu a rychlosti laseru xTool D1 Pro pro jednotlivé dřeviny.

Výsledky ukázaly, že měkčí dřeviny, jako je lípa a balsa, umožňují dosažení vysokého kontrastu při nižších výkonech laseru, avšak jsou náchylnější k přepalování a karbonizaci při vyšších dávkách energie. Tvrdší materiály, jako dub nebo jasan, vykazovaly stabilnější odezvu napříč širším rozsahem výkonu, ale vyžadovaly vyšší intenzitu laseru k dosažení adekvátního kontrastu.

Pomocí spektrofotometrického měření a konstrukce gradačních křivek v barevných prostorech $L^*a^*b^*$ a RGB bylo možné znázornit rozdílné reakce dřeva na gravírování, čímž se následně podařilo zlepšit přesnost přenosu obrazových dat. Výsledky rovněž potvrdily, že testovací vzor Siemensovy hvězdy je vhodným nástrojem pro hodnocení schopnosti laseru reprodukovat jemné detaily ukázalo se, že dosažitelné rozlišení se liší v závislosti na typu dřeva a použitém nastavení.

Práce přináší konkrétní doporučení pro efektivní gravírování šesti zkoumaných druhů dřeva. Tyto poznatky lze využít jak pro optimalizaci výroby dekorativních a funkčních předmětů, tak pro zajištění konzistentní kvality v profesionální polygrafii či umělecké tvorbě.

Závěrem lze konstatovat, že systematický přístup k volbě materiálu a nastavení parametrů laseru umožňuje výrazně zlepšit jak estetickou kvalitu, tak technickou přesnost laserového gravírování.

POUŽITÁ LITERATURA

- ACCRETECH (Europe) GmbH, 2025. *Měření struktury povrchu*. [online]
Dostupné z: <https://www.accretech.eu/cs/mereni-struktury-povrchu/> [cit. 2025-01-25].
- BROWN, L. a GREEN, K. *Surface Uniformity Assessment in Laser Engraving Using Spectrophotometry*. Applied Surface Science, 2017, sv. 423, s. 45–53. ISSN 0169-4332.
- BROŽOVSKÝ, P. *Napájecí zdroj pro laser*. 2014. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Dostupné z: https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/13958/1/DP_final.pdf
- CERMAN.CZ. *Laserové gravírování do všech materiálů* [online]. 2024 [cit. 2025-01-26].
Dostupné z: <https://www.cerman.cz/gravirovani-do-vsech-mateiralu>
- ČECH, D. *Využití laserů v průmyslu*. 2020. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/89916/F2-BP-2020-Cech-Dominik-BP-Cech.pdf>
- ČSN EN 60825-1 ed. 3 (36 7750). *Bezpečnost laserových zařízení – Část 1: Klasifikace zařízení a požadavky*. Praha: Český normalizační institut, 2014.
- DAVIS, R. a kol. *Quality Control in Wood Engraving: A Spectrophotometric Approach*. Wood Science and Technology, 2019, ročník 53, číslo 4, s. 789–802. ISSN 0043-7719.
- DESCH, H. E. a DINWOODIE, J. M. *Timber. Structure, Conversion and Use*. London: MacMillan Press, 1996.
- EPSON. *Epson Perfection V700 Photo* [online]. 2006 [cit. 2025-05-01].
Dostupné z: <https://epson.com/For-Work/Scanners/Photo-and-Graphics/Epson-Perfection-V700-Photo/p/B11B178011>
- GRAVIPRO. *Nápady pro laserovou gravírku* [online]. 2023 [cit. 2025-05-05]. Dostupné z: <https://www.gravipro.cz/blog/napady-pro-laserovou-gravirku/>
- GRAVÍROVÁNÍ KAVALÍR. *Laserové gravírování: Přehled technologií a aplikací* [online]. 2023 [cit. 2025-05-05]. Dostupné z: <https://gravirovani.kavalir.cz/laserove-gravirovani>
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 13655:2009 – Graphic technology — Spectral measurement and colorimetric computation for graphic arts images* [online]. 2009 [cit. 2025-05-05].
Dostupné z: <https://www.iso.org/standard/44214.html>
- JOHANIS, V. a ŽEMLIČKA, M. *Využití mračen bodů od geodetů pro praxi architektů a projektantů*. EARCH.cz [online]. 20. února 2019 [cit. 2025-01-27]. Dostupné z: <https://www.earch.cz/technologie/clanek/vyuziti-mracen-bodu-od-geodetu-pro-praxi-architektu-a-projektantu>
- JOSTEN, E., REICHE, T. a WITTCHEN, B. *Dřevo a jeho obrábění*. Praha: Grada, 2010. ISBN 978-80-247-2961-9.

- KAČÍK, F. a KUBOVSKÝ, I. *Spektroskopické metody v analýze dřeva*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2011.
- KAPLANOVÁ, Marie a kol. *Moderní polygrafie*. 1. vydání. Praha: Svaz polygrafických podnikatelů, 2009. 391 s. ISBN 978-80-254-4230-2.
- KARHÁNEK, Milan. *Aplikace laserů v polygrafii*. Online, bakalářská práce. Univerzita Pardubice, 2014-09-22T12:28:45Z. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10195/58065>. [cit. 2025-05-05].
- KEYENCE. *Metoda pro přesné a snadné měření plochy povrchu* [online]. 2025 [cit. 2025-01-27]. Dostupné z: <https://www.keyence.eu/cscz/ss/products/microscope/measurement-solutions/surface-area.jsp>
- KOVÁČ, J. *Využití 3D skeneru při hodnocení kvality povrchu dřeva*. Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen, 2013, roč. 55, č. 1, s. 77–84. ISSN 1336-3824.
- KRATOCHVÍL, Michal. *Laserové obrábění přírodního materiálu s použitím rotační osy*. 2019.
- KUBOUŠEK, 2025. Měření tvrdosti, drsnosti a profilu. [online] Dostupné z: https://shop.kubousek.cz/kubousek-selection-2024_c570019469590549/mereni-tvrdosti-drsnosti-a-profilu_c619544737484284 [cit. 2025-01-26].
- KUČERA, Petr. *Využití dřeva v technické výchově na základní škole*. Brno, 2007. Bakalářská práce. Masarykova univerzita, Pedagogická fakulta. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/gokxy/Bakalarska_prace.pdf
- KUMAR, D. a SINGH, A. *Surface characterization of laser engraved stainless steel*. Materials Today: Proceedings, 2018, roč. 5, č. 9, s. 18684–18690. ISSN 2214-7853.
- M3DTISK.CZ. *3D skenování: Jak využít tuto technologii* [online]. 2025 [cit. 2025-01-27]. Dostupné z: <https://m3dtisk.cz/blog/3d-skenovani-jak-vyuzit-tuto-technologie/>
- MAHR GMBH. *Měření drsnosti povrchu: Volba správného filtru* [online]. 2017 [cit. 2025-01-26]. Dostupné z: <https://www.mahr.com/cs/novinky-a-udalosti/zobrazeni-clanku/mereni-drsnosti-povrchu-volba-spravneho-filtru>
- MARSÁLEK, Rostislav. *Výuka pracovních činností na základní škole jako prostředek pro rozvoj polytechnické výchovy*. Brno, 2010. Diplomová práce. Masarykova univerzita, Pedagogická fakulta. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/pe7o0/DIPLOMOVA_PRACE_-_Bc._Rostislav_Marsalek.pdf
- MAV.CZ. *Měřicí přístroje* [online]. 2025 [cit. 2025-01-26]. Dostupné z: https://www.mav.cz/data/katalog/ostatni/Sartorius_2018-2019_CZ/Měřicí%20přístroje.pdf
- MB CALIBR. *Drsnoměry* [online]. 2025 [cit. 2025-01-26]. Dostupné z: <https://eshop.mbcaltibr.cz/drsnomery/>
- MITUTOYO CORPORATION. *Surftest SJ-210 Series Portable Surface Roughness Tester* [online PDF dokument]. [cit. 2025-05-05]. Dostupné z: https://www.mitutoyo.com/webfoo/wp-content/uploads/Surftest_SJ210.pdf

- PATŘIČNÝ, M. *Velká kniha o dřevě*. Praha: Fortuna Libri, 2016. ISBN 978-80-7546-053-0.
- PAVIA, Donald L., LAMPMAN, George M. a KRIZ, Gary S. *Introduction to Spectroscopy*. Belmont: Brooks/Cole, 2001. ISBN 978-0030319617.
- PODROUŽKOVÁ, Veronika. *Jehličnany ve výuce přírodopisu a biologie*. 2011. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze. Dostupné z: https://dspace.cuni.cz/bitstream/handle/20.500.11956/48847/DPTX_2010_1_0_290580_0_97178.pdf
- POTOČAN, Jozef. *Vizuální styl a propagace produktu/značky*. 2015.
- POŽGAJ, A., CHOVANEC, D., KURJATKO, S. a BABIAK, M. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. Bratislava: Príroda, 1997.
- PROINEX, 2025. Čistota povrchu, profil a drsnost. [online] Dostupné z: <https://www.proinex.cz/cistota-povrchu-profil-a-drsnost> [cit. 2025-01-26].
- PŘASLICA, Martin. *Technologie gravírování laserem*. Online, Bakalářská práce. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2014. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/104930>. [cit. 2025-05-05].
- SHKOTOVA, Viktoriia. *Využití laserů v průmyslu* [online]. Brno, 2018. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce: doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D. [cit. 2025-01-26]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=174779
- SMITH, J. *Spectrophotometric Analysis of Engraved Metal Surfaces*. Journal of Materials Science, 2015, roč. 50, č. 12, s. 4000–4010. ISSN 0022-2461.
- ŠLEZINGEROVÁ, J. a GANDELOVÁ, L. *Stavba dřeva*. Brno: Vysoká škola zemědělská, 1994.
- ŠUSTR, M. *Laserový paprsek ve strojírenství*. 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=217513
- TRUMPF. (2023). *Gravírování laserem – Aplikace a možnosti*. [Online]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/reseni/aplikace/laserove-oznacovani/gravirovani-laserem/
- TŮMA, Martin. *Porovnání vybraných typů 3D skenerů* [online]. České Budějovice, 2016. Bakalářská práce. Vysoká škola technická a ekonomická v Českých Budějovicích, Ústav technicko-technologický. Vedoucí práce: Ing. Monika Karková, Ph.D. [cit. 2025-05-05]. Dostupné z: https://is.vstecb.cz/th/w2fvr/BAK_3Dskenovani_Tuma_01_10.pdf
- WHITEHOUSE, D. J. *Handbook of Surface Metrology*. Bristol: Institute of Physics Publishing, 1994. 988 s. ISBN 0-7503-0039-6.
- X-RITE, Incorporated. *i1 Pro Spectrophotometer Technical Specifications* [online]. 2010 [cit. 2025-05-05]. Dostupné z: https://www.xrite.com/-/media/xrite/files/manuals/0/0x/0x001/0x0012e/eye-one_pro_specifications_en.pdf

XTOOL. *D1 Pro Golden Red with RA2: Quick Start Guide*. Verze D1.1.2_KD010531000. 2025.

XTOOL. *Produktová dokumentace xTool D1 Pro*. 2023.

XTOOL. *xTool D1 Pro Golden Red: Instructions Manual*. Verze D1.1.1_KD010467000. 2025.

ZBOŽÍNKOVÁ, Eva. *Gravírování fotografií pomocí laseru*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2022. Bakalářská práce. Vedoucí práce Ing. Adam Škrobák, Ph.D.

ZDROJE OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Nábytkářský informační systém. Makroskopická stavba dřeva [online]. [cit. 2025-04-30]. Dostupné z: <https://www.n-i-s.cz/cz/makroskopicka-stavba-dreva/page/318/>

Obrázek 2: Vlastní fotografie

Obrázek 3: Vlastní tvorba

Obrázek 4: Vlastní tvorba

Obrázek 5: Vlastní fotografie

Obrázek 6: Vlastní fotografie

Obrázek 7: Vlastní fotografie

Obrázek 8: Vlastní fotografie

Obrázek 9: Vlastní fotografie

Obrázek 10: Vlastní fotografie

Obrázek 11: Vlastní fotografie

Obrázek 12: Vlastní tvorba

Obrázek 13: Vlastní tvorba

Obrázek 14: Vlastní tvorba

Obrázek 15: Vlastní fotografie

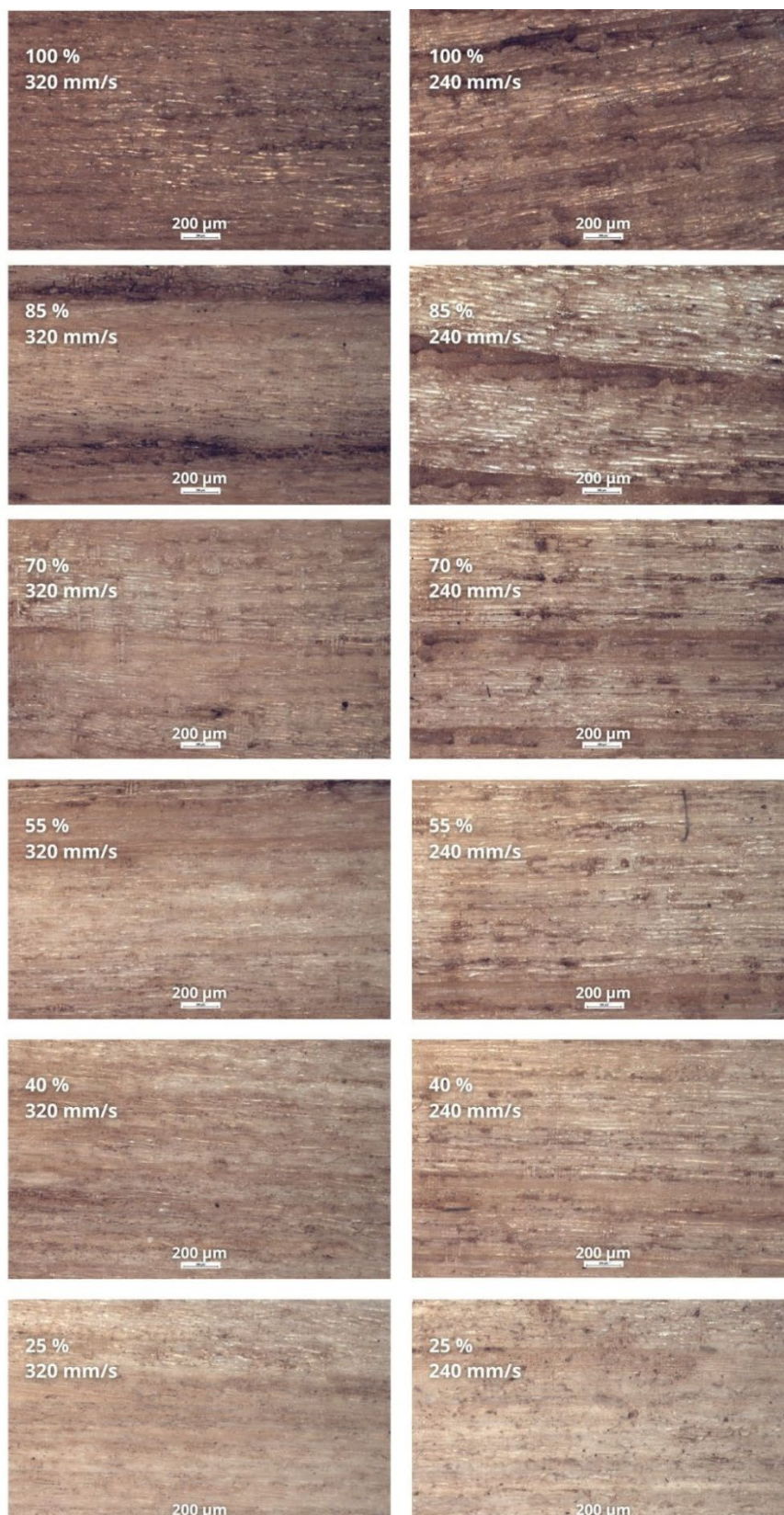
Obrázek 16: Vlastní fotografie

Obrázek 17: Vlastní fotografie

Obrázek 18: Vlastní fotografie

PŘÍLOHY

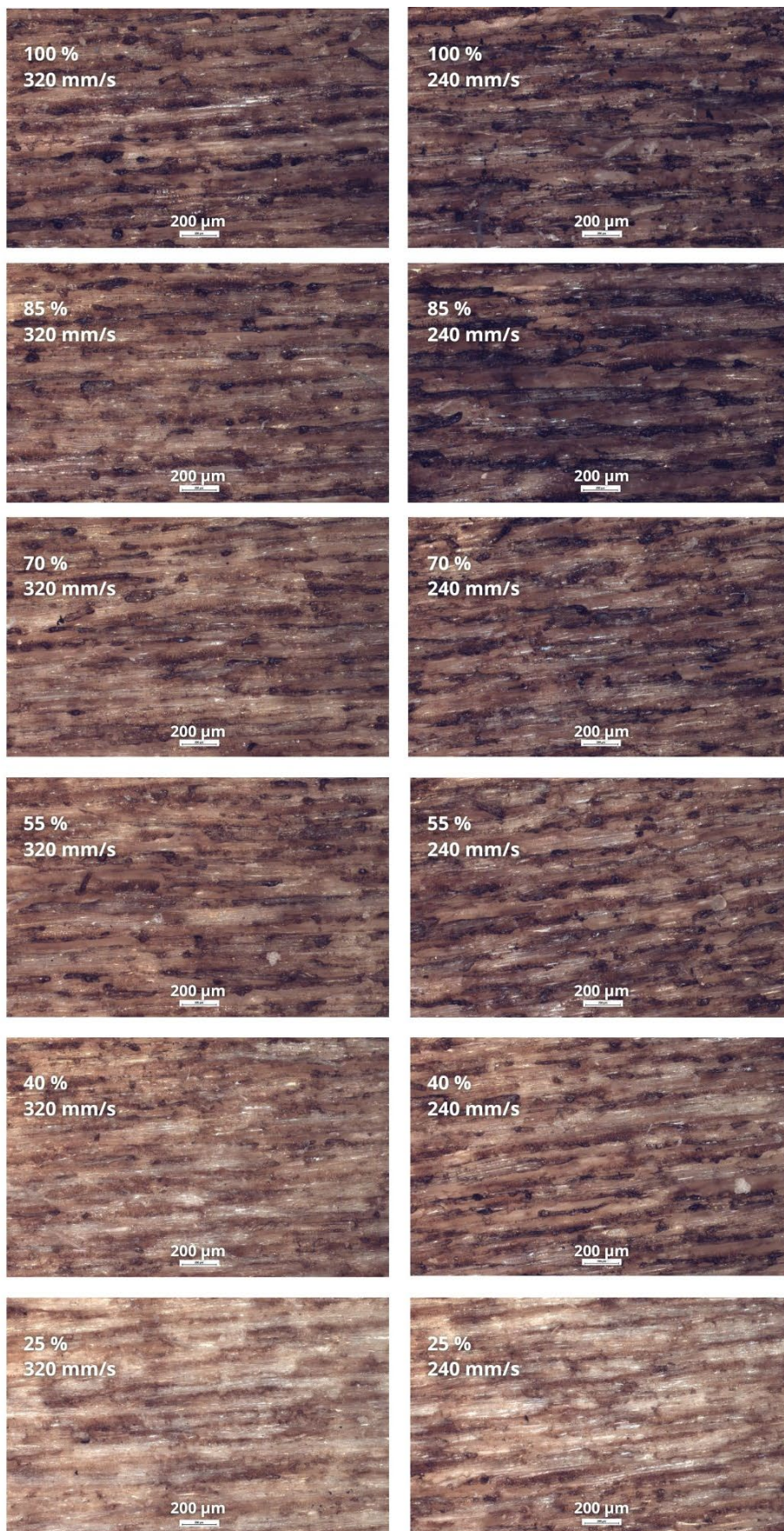
[1] Mikroskopická fotografie gravírovaného povrchu



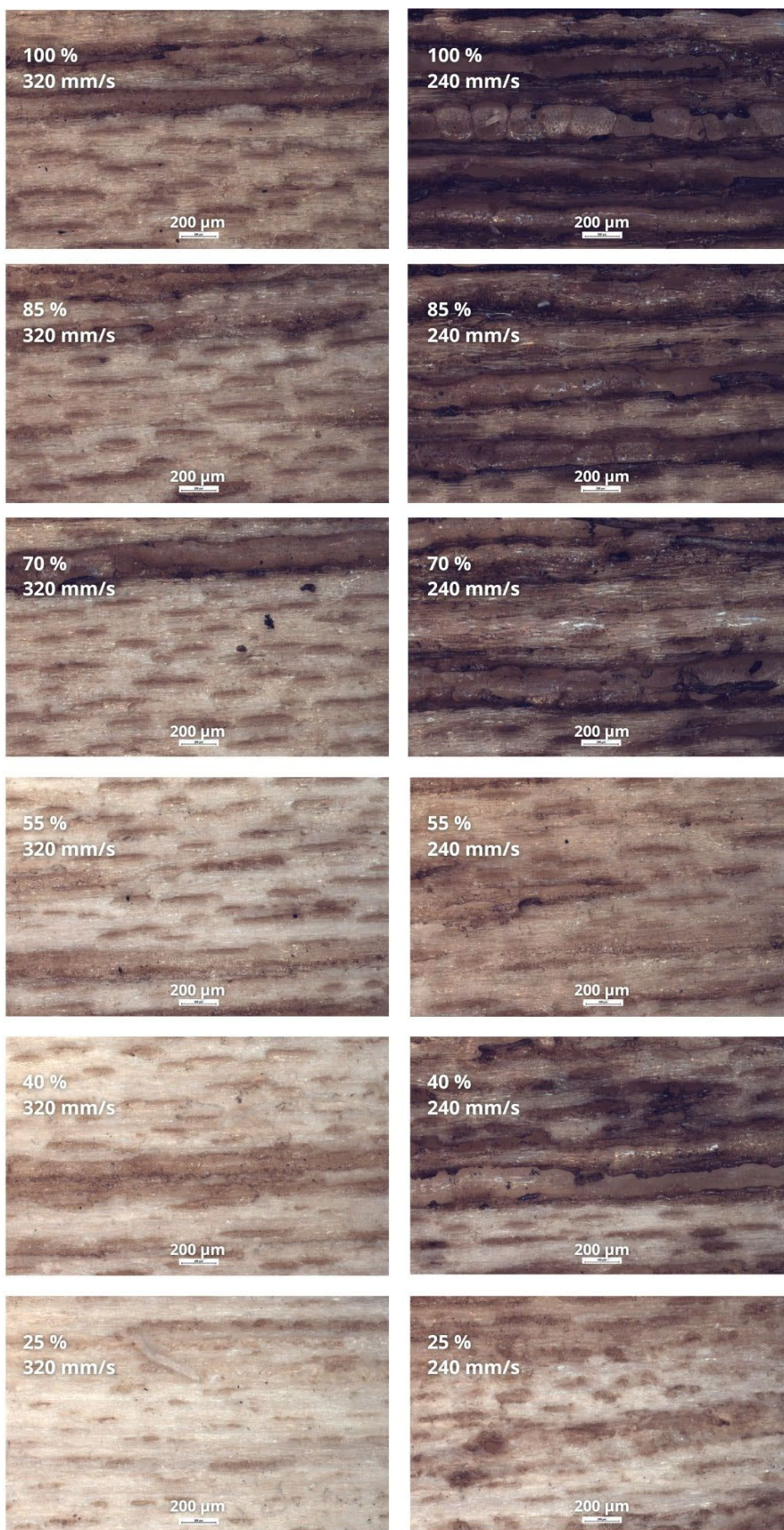
Obrázek 13 Mikroskop SMRK



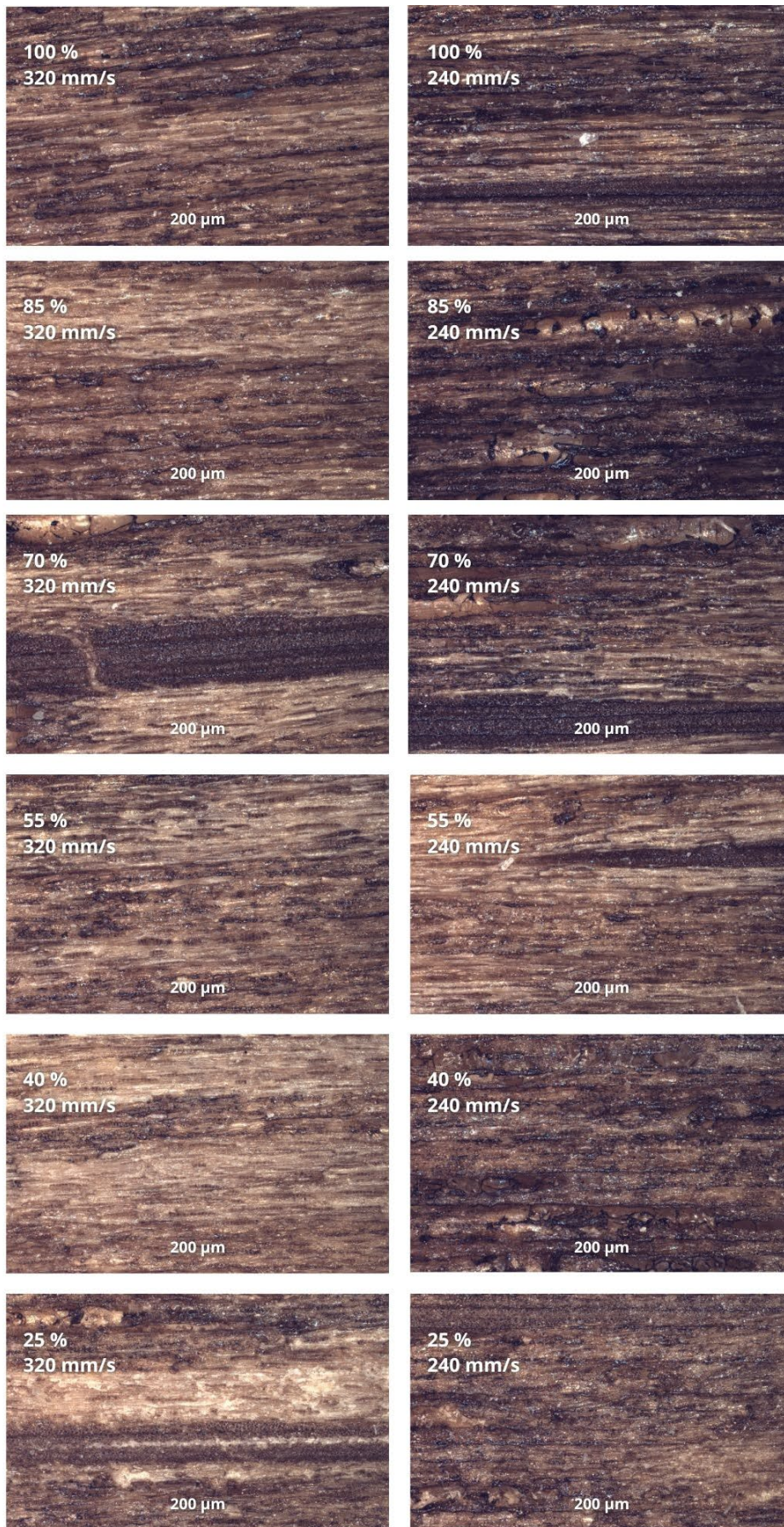
Obrázek 14 Mikroskop MODŘÍN



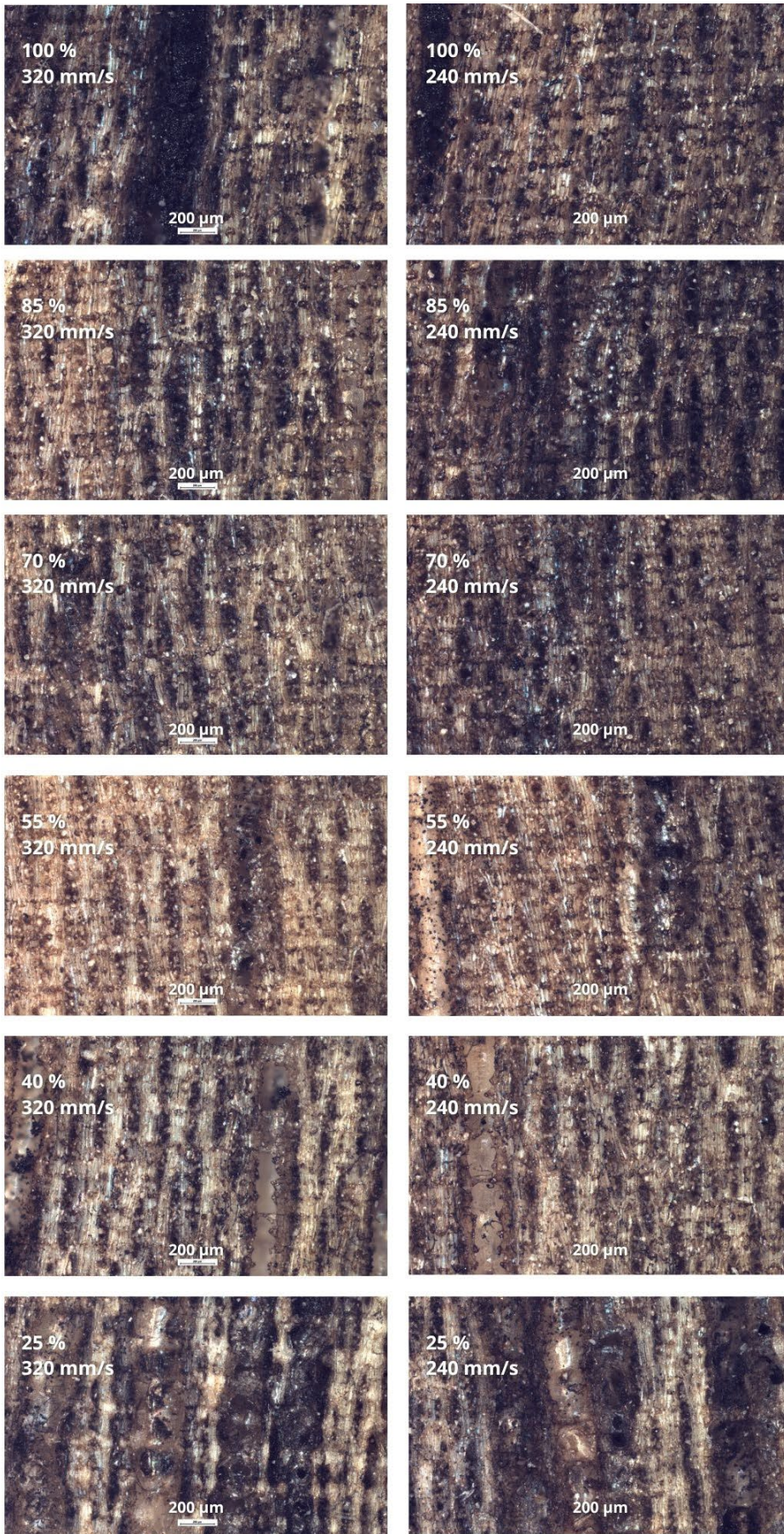
Obrázek 15 Mikroskop LÍPA



Obrázek 16 Mikroskop JASAN



Obrázek 17 Mikroskop DUB



Obrázek 18 Mikroskop Balsa