



**FAKULTA  
ŠTOJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

## **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

**Použitelnost 2D laserových skenerů pro  
přesná měření**

**Usability of 2D laser scanners for  
measurement**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**2019**

**Bc. Matěj JAROLÍMEK**

**Studijní program:** (N2301) Strojní inženýrství

**Studijní obor:** (3911T035) Výrobní a materiálové inženýrství

**Vedoucí práce:** Ing. Lubomír Štajnochr

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Použitelnost 2D laserových skenerů pro přesná měření“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Lubomíra Štajnohra s použitím zdrojů uvedených na konci této práce v seznamu použité literatury.

V Praze dne \_\_.\_\_.\_\_\_\_\_

.....

Bc. Matěj Jarolímek

## Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat všem, kteří mi při vytváření této práce pomáhali. Především děkuji svému vedoucímu práce, Ing. Lubomíru Štajnochrovi za věnovaný čas, trpělivost a věcné připomínky.

## Abstrakt

Tato práce se v prvních dvou kapitolách zabývá skenováním a především skenováním pomocí laseru. Je zde shrnuto, jak pracuje samotný laser a na jakých principech fungují různé druhy laserového skenování. Součástí je především detailně popsán princip 2D skenování, způsob měření a porovnání konkurenčních výrobků v tomto segmentu a základ 3D skenování. Dále je dopodrobna popsán liniový triangulační senzor TLE1 od firmy Metralight, který je předmětem zkoumání v této práci.

Jak již z názvu vyplývá, byla zkoumána přesnost měření 2D skeneru TLE1 v celém jeho měřicím rozsahu. Nejprve proběhla předběžná měření pro získání znalostí o fungování tohoto přístroje. Následně byly nabyté poznatky využity pro vytvoření způsobu přesného měření délky profilu a šířky mezery za pomoci přesné CNC nástrojové brusky. Dále byl zkoumán vliv odrazivosti různých povrchů na tuto přesnost. Zjištěné výsledky byly aplikovány na návrh měření na konkrétním případě.

Klíčová slova: skener, senzor, 2D, přesnost měření, odrazivost

## Abstract

This master thesis deals with scanning, especially laser scanning in the first two chapters. It summarizes how the laser works itself and on what principles the different types of laser scanning use. Part of the thesis is a detailed description of 2D scanning, measurement method and comparison of competing products in this segment and the basis of 3D scanning. Line triangulation sensor TLE1 from Metralight company is described in details, what is the subject of investigation in this thesis.

As the name implies, the measurement accuracy of the TLE1 2D scanner was examined over its entire measuring range. Initially, preliminary measurements were made to obtain knowledge about the device functionality. Subsequently, the acquired knowledge was used to create a method of accurate profile length measurement and width gap using precise CNC tool grinder. The accuracy and influence of different surfaces reflectivity was investigated furthermore as well. The results were applied to the design of measurement on a particular task.

Keywords: scanner, sensor, 2D, measurement accuracy, reflectance

# Obsah

1. Co je to skenování.....	1
1.1. Cíl práce.....	3
2. Laserového skenování.....	4
2.1. Laser.....	4
2.1.1. Skladba laseru .....	4
2.1.2. Princip laseru .....	5
2.1.3. Vlastnosti laserového paprsku .....	7
2.1.4. Režimy vysílání.....	7
2.2. Triangulace.....	8
2.2.1. Aktivní triangulace .....	8
2.2.1.1. Proces triangulace pro neznámý bod v prostoru .....	10
2.2.2. Pasivní triangulace.....	12
2.2.3. Skenovací triangulační systém .....	13
2.3. 3D skenování .....	14
2.4. 3D laserové skenování .....	15
2.4.1. Využití doby letu laserového paprsku .....	15
2.4.2. Vliv vlnové délky .....	16
2.4.3. Limity při skenování .....	18
2.4.4. Zástupci 3D laserových skeneru .....	19
2.4.4.1. HandyScan 3D.....	19
2.4.4.2. Trimble TX8 .....	21
2.5. 2D laserové skenování .....	22
2.5.1. Metralight - TLE1 .....	23
2.5.1.1. Popis zařízení.....	25
2.5.1.2. Možnosti nastavení skeneru.....	26
2.5.1.3. Měřicí módy.....	28
2.5.2. Konkurenční 2D skenery .....	33
2.5.2.1. Micro-Epsilon - scanCONTROL .....	33
2.5.2.2. Werthmesstechnik GmbH - Werth Laser Line Probe (LLP) .....	36
3. Určení přesnosti měření 2D skeneru Metralight TLE1 .....	39
3.1. Příprava experimentu .....	40
3.1.1. Předběžná měření .....	43
3.1.2. Příprava pracoviště a zkušebních vzorků .....	60
3.2. Vliv odrazivosti .....	62
3.3. Určení přesnosti měřicího pole skeneru .....	69
3.3.1. Měření na objektu.....	71
3.3.1.1. Vyhodnocení ve směru distance .....	73

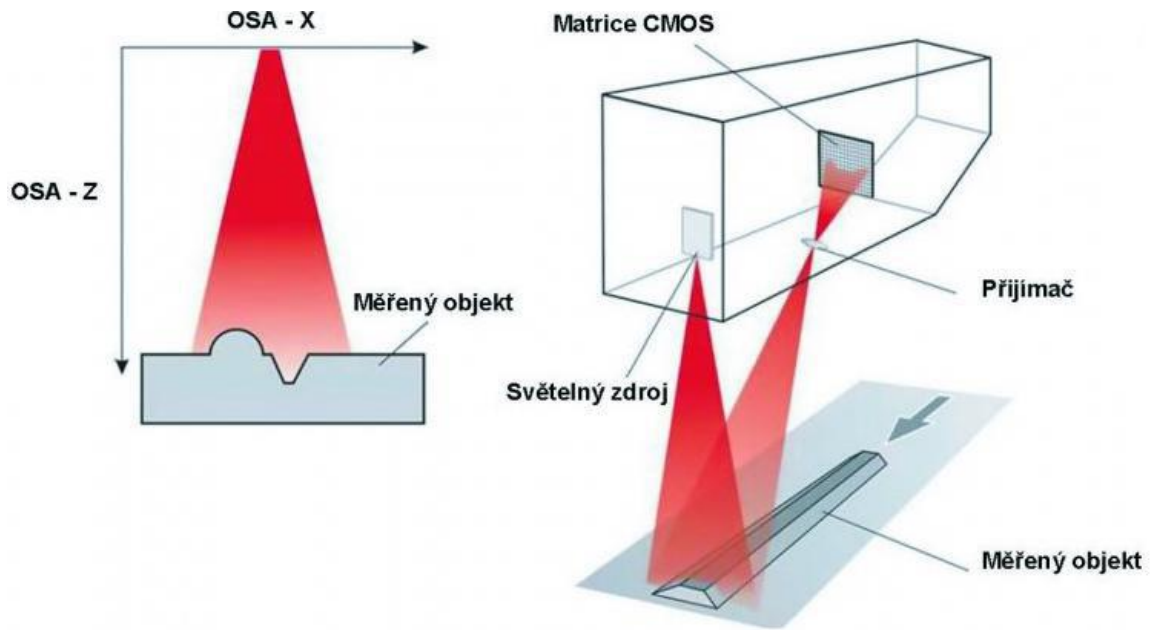
3.3.1.2.	Vyhodnocení dat ve směru height .....	74
3.3.2.	Měření délky mezery mezi objekty .....	77
3.3.2.1.	Vyhodnocení dat ve směru distance .....	80
3.3.2.2.	Vyhodnocení dat ve směru height .....	81
3.4.	Zhodnocení výsledků .....	83
4.	Návrh měření na konkrétní úloze .....	84
5.	Závěr .....	87
	Seznam obrázků.....	89
	Seznam tabulek .....	91
	Seznam použité literatury .....	92
	Přílohy.....	94

# 1. Co je to skenování

Skenování je převedení 2D grafických dokumentů, jako jsou obrázky, texty, fotky, kinofilmové negativy atd., do digitální podoby pomocí snímačů, které dále posílají získaná data do počítačů, tiskáren nebo do dnes již historických faxů. Dále lze pomocí laser skenerů měřit objekty nebo vytvářet 3D modely v CAD systémech. Skenování probíhá různými metodami a technologiemi, které slouží pro různé účely. Ale můžeme říci, že vždy je potřeba nějaký zdroj světla, který osvítí skenovaný objekt a snímač, díky kterému tento objekt dostaneme v digitální podobě. [1, 2]

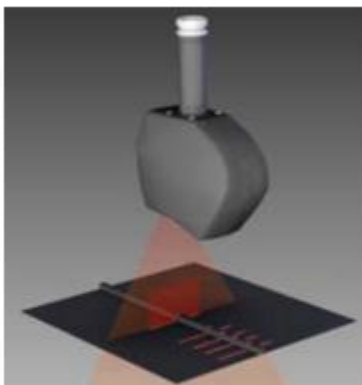
Principů skenování je mnoho, liší se v závislosti na použití. Pro snímání tištěných dokumentů se dříve využívaly zářivky - nebo také "*Chladné katodové lampy*". V tomto případě se nasvítí dokument najednou světlem o vysoké intenzitě, což bylo jeho výhodou. Naopak nevýhodou je nedostatečné nasvícení v krajích dokumentu, které se řešilo pomocí systému zrcadel. Ta odrážela světlo i do míst s nedostatečnou světelnou intenzitou. Dneska zářivku nahradil pásek z luminiscenčních LED diod, které osvítí dokument rovnoměrně po celé délce pásku, jež přejíždí před skenovaný dokument. Bohužel i tento způsob skenování skýtá nevýhody v podobě nižší svítivosti a citlivosti na jemné odstíny barev oproti nasvícení zářivkou. Po nasvícení přichází na řadu snímač, na který dopadá odražené světlo o různé intenzitě, vyvolávající změnu elektrického náboje o různé síle ve snímači. Snímač se skládá z jednotlivých bodů, ze kterých získáváme tři různé informace. Tyto informace udávají tři základní barvy a to červenou, zelenou a modrou. Z toho vyplývá, že každý bod podává informaci ze tří buněk snímače. Možné optické rozlišení skeneru je určeno snímačem. Tedy pro kvalitní skenování dokumentů potřebujeme kvalitní snímač s vysokým počtem buněk. [1, 2]

Další skupinou skenerů jsou laser skenery. Ty využívají laserového paprsku, který dopadá na zkoumaný předmět. Vysoce citlivá kamera zaznamenává odražený paprsek, který se převede na jednotlivé body. Pomocí triangulace se určí jejich poloha v prostoru od skeneru. Skener se může skládat z jedné nebo více skenovacích rovin. Získaná data se následně zpracovávají v počítačovém softwaru, který dokáže z data dopočítávat rozměry pro měření nebo vytváření 3D modelů, které mohou sloužit například pro reverzní inženýrství. [3]



Obr. 1 - Skenovací hlava [25]

3D skenování patří do skupiny nedotkových měřících metod. Tato vlastnost je výhodná pro měření například měkkých součástí, kde nedochází k deformaci součástí. Současně skener dokáže získávat tisíce bodů za sekundu, čímž je vhodný pro skenování velmi velkých součástí. Součtu všech bodů se říká mrak bodů, ze kterého lze složit relativně přesný tvar součástí. V tomto se laserové skenování velmi liší od dotkových měřících technologií. Na druhé straně laserové skenování nedosahuje takové přesnosti oproti dotkovým technologiím. Další nevýhodou je obtížnost zpracování mraku bodů a nenasnímání lesklých ploch ze součástí. V neposlední řadě má tato technologie problém se snímáním hran a následné nesprávné vyhodnocování rozměrů. [3]



Obr. 2 - Porovnání 2D laseru a hlavou se třemi rovinami osvitu (laserový kříž) [3]



Rychlost skenování je mnoho násobně vyšší než už měření dotykového. Snímače obvykle zaznamenávají 50 000 - 75 000 bodů za sekundu. Díky tomu skenery vykazují vysokou produktivitu, která je zaručena také šířkou paprsku pohybující se obvykle v řádech centimetrů. [3]

Jednou z nejdůležitějších činností po získání dat z kamery je jejich zpracování v počítačovém softwaru. Software může dodávat výrobce skeneru nebo lze použít nějaký jiný kompatibilní. Pomocí těchto softwarů dostaneme mrak bodů, který charakterizuje naskenovanou plochu nebo část plochy u 3D skenerů nebo křivky u 2D skenerů. Mrak bodů lze dále využít, ale musíme vědět, co má být výsledkem. Zpracování mraku bodů z 3D skenování můžeme rozdělit do několika kroků: [3]

- Porovnávání mraku bodů s CAD modelem
- Odečítání, filtrace, detekce a spojení mraku bodů do jednoho
- Nahrazování křivek matematicky definovanými plochami

U zpracování mraku bodů při 2D skenování pro měření například vzdálenosti hran od sebe, může docházet pomocí softwaru k matematické filtraci bodů segmentací na úseky, které se následně vyhladí. Zde ale může docházet k nepřesnostem. [3]

## 1.1. Cíl práce

V předešlé kapitole bylo nastíněno, jak obecně skenování funguje a k čemu slouží. V této práci se zaměřím na 2D laserové skenery. Jejím účelem je určení přesnosti u konkrétního 2D laserového skeneru od firmy Metralight (model TLE1) a porovnání tohoto přístroje s konkurencí. Výrobce udává pouze rozlišovací schopnost přístroje v obou osách, která je velmi přesná a to 1  $\mu\text{m}$  a 24  $\mu\text{m}$ . Z praxe je známo, že tyto přístroje nedosahují tak vysoké přesnosti měření vlivem mnoha faktorů, kterými jsou například odrazivost materiálu, hrany zkoumaných dílů, vytváření mraku bodů pomocí softwaru nebo poloha součásti v měřícím poli skeneru. Těmito aspekty se tato práce bude zabývat a její výsledky budou aplikovány na návrhu měření konkrétní úlohy.

## 2. Laserového skenování

### 2.1. Laser

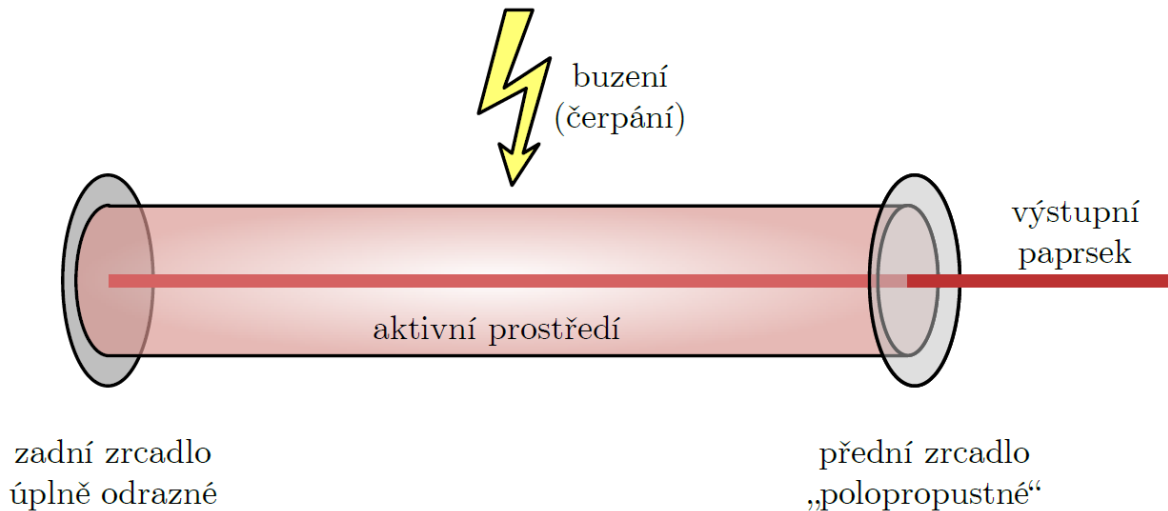
Laser je zařízení, které využívá principů kvantové mechaniky a generuje záření výjimečných vlastností. Záření vycházející z laseru je monochromatické (jednobarevné), má malou divergenci (rozbíhavost) a je koherentní (uspořádané). Laser je přístroj, který přeměňuje dodávanou energii na světlo (laserové světlo). [4]

#### 2.1.1. Skladba laseru

Každý laser je sestaven ze tří základních částí: [5, 6]

1. **aktivní prostředí** - v tomto prostředí se vyskytují pevné, kapalně nebo plynné látky, ve kterých může dojít k inverzní populaci energetických stavů, čímž dochází k zesilování světla stimulovanou emisí,
2. **optický rezonátor** - tvoří jej dutina obklopená odrazovými plochami, v níž je nevodivé prostředí. Nejjednodušší konstrukce je tvořena dvěma rovnoběžnými zrcadly na obou koncích. Jedno ze zrcadel je polopropustné. V optickém rezonátoru se odrazy využívají k získání inverzní populace (fyzikální stav kvantové soustavy, při kterém došlo k takovému obsazení energetických hladin částicemi, které neodpovídá rovnovážnému rozdělení tj. kdy v jistém kvantovém přechodu populace horní energetické hladiny je vyšší než na hladině dolní),
3. **zdroj energie** - zdroj se může lišit podle aktivního prostředí v rezonátoru. V pevnolátkových laserech je zdroj výbojka nebo LED. U polovodičových laserů je zdroj elektrický proud. Pro plynové lasery je zdroj energie napájecí výboj.

U výkonných laserů se ještě používá chladič, který zabraňuje přehřátí zařízení a následnému přerušení probíhajícího procesu záření. V průmyslu se využívá systému čoček, clon a zrcadel, pro zvýšení kvality laserového svazku. Především k dosažení nižší divergence (rozptylu) paprsku, tomuto systému se říká expander. [5]



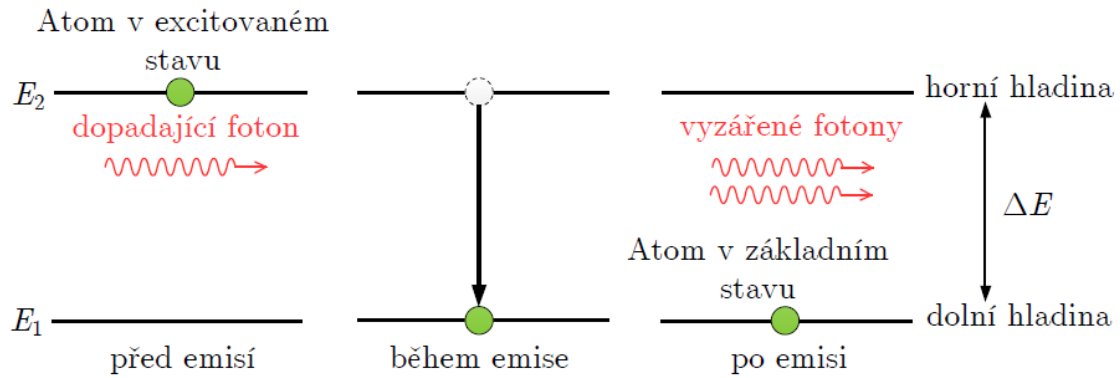
Obr. 3 - Základní schéma laseru [5]

### 2.1.2. Princip laseru

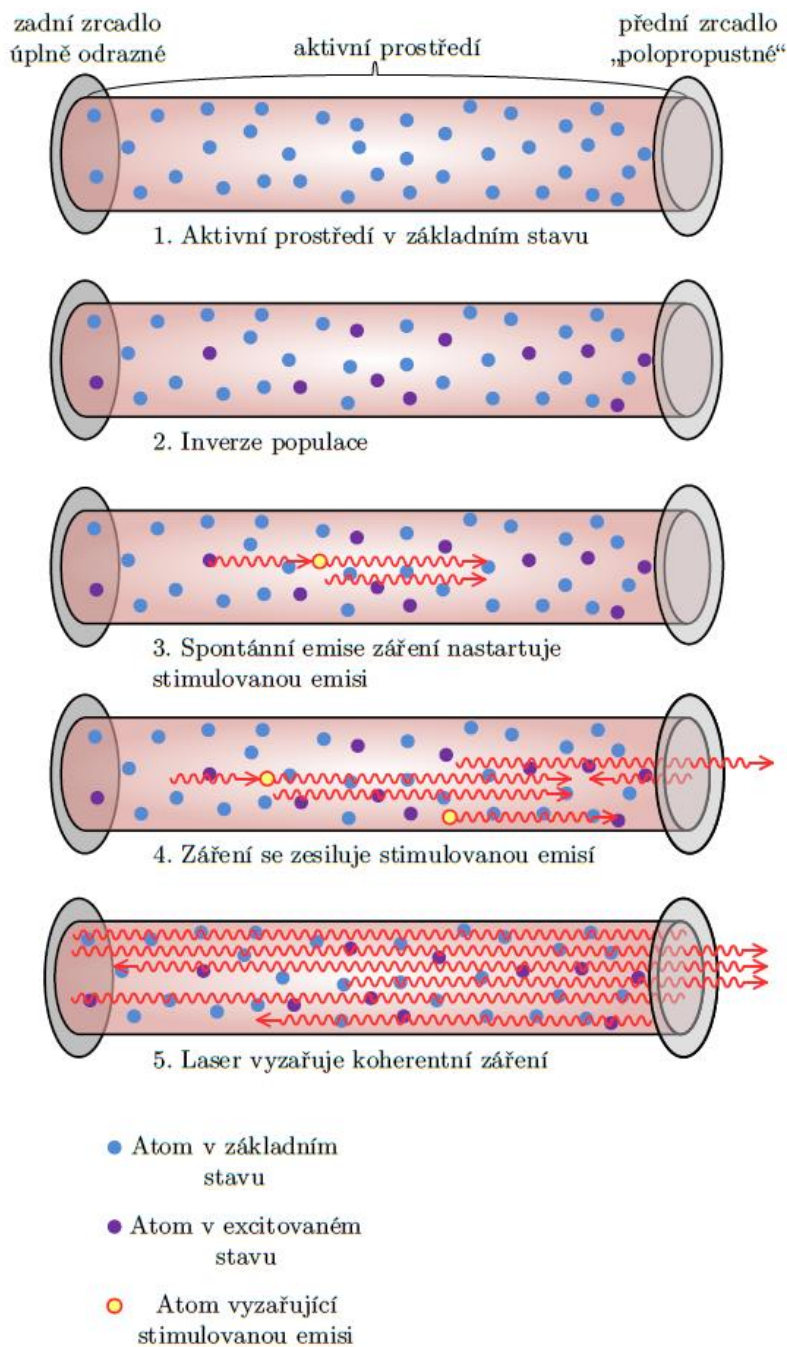
V předešlé kapitole bylo zmíněno, že každý laser musí mít aktivní prostředí. To může být tvořeno samostatnými atomy prvků nebo sloučeninami. Za běžných podmínek jsou částice v klidu a energetické hladiny elektronů jsou na nejnižší hladině. Pomocí vnějšího zdroje jsou elektrony v částicích excitovány na vyšší hladinu orbitalu. Při přechodu elektronu zpět na nižší energetickou hladinu vyzáří nekoherentní světelné záření. K tomuto ději dochází samovolně jen za pomoci vnějšího budícího zdroje. Částice aktivního prostředí se snaží být ve stavu s co nejnižší energetickou hodnotou. Tomuto stavu se říká termodynamická rovnováha. Díky stavu invertní populace v aktivním prostředí dochází k stimulované emisi fotonů. Tohoto stavu lze dosáhnout, když je nadbytek populace ve vyšší energetické hladině, který pokryje ztráty v aktivním prostředí. [5, 7]

V optickém rezonátoru se světelný paprsek odráží od dvou zrcadel, kde jedno je nepropustné a druhé polopropustné. Polopropustné zrcadlo slouží ke dvěma účelům, k unikání laserového paprsku z rezonátoru a k částečnému odražení fotonů zpět, čímž dochází k zesilování laserového záření. [5, 7]

Následující schéma zobrazuje princip stimulované emise, kdy dodaná energie aktivnímu prostředí je přetransformována na proud fotonů respektive laserový paprsek. Stimulací horní energetické hladiny excitovaného atomu dochází k emisi fotonu, který může stimulovat další excitovaný atom a tím dochází k takzvanému lavinovému efektu. [5, 7]



Obr. 4 - Stimulovaná emise [8]

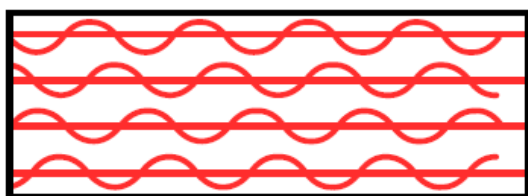


Obr. 5 - Laser generující koherentní záření [5]

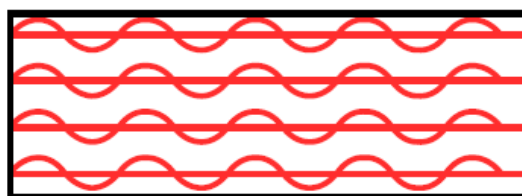
### 2.1.3. Vlastnosti laserového paprsku

Laserový paprsek má unikátní vlastnosti vycházející už ze samotného procesu stimulované emise, kdy dopadající a emitovaný foton má stejnou energii (frekvenci), polarizaci, fázi a stejný směr. Z toho vychází tři základní specifické vlastnosti laseru, odlišující se od běžných světelných zdrojů. Svazek je: [8]

- **monochromatický** - paprsek je "jednobarevný" tedy má stejnou vlnovou délku (frekvenci), podle které se určuje, v jaké části spektra se bude paprsek pohybovat,
- **koherentní** - všechny vlny světelného záření jsou ve stejné fázi v každém bodě,
- **směrový** - všechny vyzařované fotony mají stejný směr.



(a) světelné vlny nejsou ve stejné fázi



(b) světelné vlny jsou ve stejné fázi

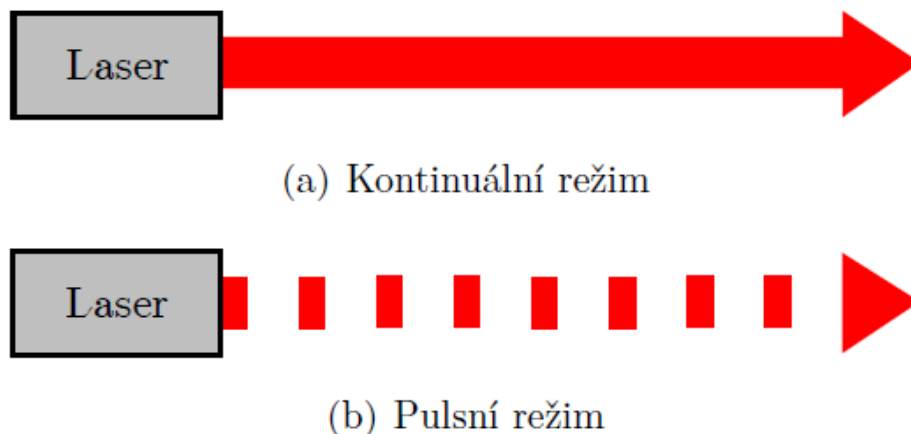
*Obr. 6 - Koherence světelných vln [8]*

### 2.1.4. Režimy vysílání

Ideální zdroj laserového paprsku vyzařuje záření o jisté frekvenci, která se rovná jednak rezonanční frekvenci optického záření, v němž se nachází a jednak frekvenci kvantového přechodu aktivního prostředí v rezonátoru. Laserové zdroje mohou vysílat paprsek různými způsoby. Tyto druhy vyzařování paprsku mají odlišné přednosti, a proto mají i různé uplatnění. Tyto různé způsoby vyzařování se nazývají režimy vysílání a rozdělují se na: [9]

- kontinuální režim - označovaný jako CW (continual wave)
- pulsní režim
- impulsní režim
  - dlouhé impulsy (volně běžící režim laseru)
  - krátké impulsy (režim Q-spínání)
  - velmi krátké impulsy (režim mode-locking)

Rozdíl mezi jednotlivými režimy je v průběhu emise laserové energie v okamžiku aktivace laseru. Klasickým příkladem kontinuálního záření je žárovka. Žárovka vyzařuje světlo neustále při zapnutém stavu, dokud nedojde k jejímu vypnutí. Při pulsním režimu je zařízení také stále zapnuté a vyzařuje záření, ale dochází ke sledu pravidelně se opakujících impulsů. Jako pulsní režim si můžeme představit srdeční puls. Zařízení, které funguje v impulsním režimu, je například blesk fotoaparátu, který je zdrojem jednoho pulsu a nevyzařuje stálé světlo o stálé intenzitě. [9]



Obr. 7 - Způsob vysílání laserového paprsku [9]

## 2.2. Triangulace

Triangulace je zjišťování polohy bodu pomocí trojúhelníku. K jeho určení slouží trigonometrický výpočet. Sestrojením pomyslného trojúhelníku, kde známe jednu vzdálenost s koncovými referenčními body a třetím bodem je místo, jehož souřadnice zjišťujeme. Nejčastěji používané triangulační systémy jsou osazeny laserovým zdrojem a optickými snímači. Tuto metodu snímání dělíme do dvou skupin: [10]

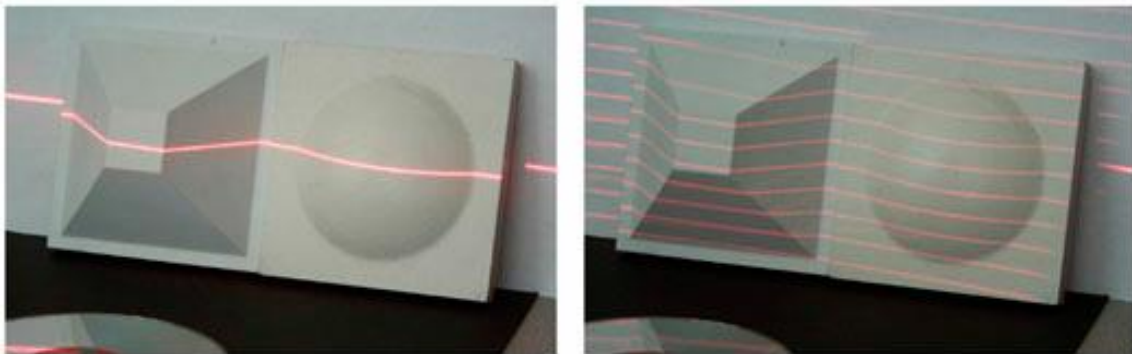
- aktivní triangulace
- pasivní triangulace

### 2.2.1. Aktivní triangulace

Přístroje využívající aktivní triangulaci se skládají z tzv. triangulačního trojúhelníku, který tvoří zdroj záření (obvykle laser), povrch měřeného objektu a snímač sloužící pro zachycování odraženého paprsku. Nejčastěji se používá CCD nebo CMOS čip.

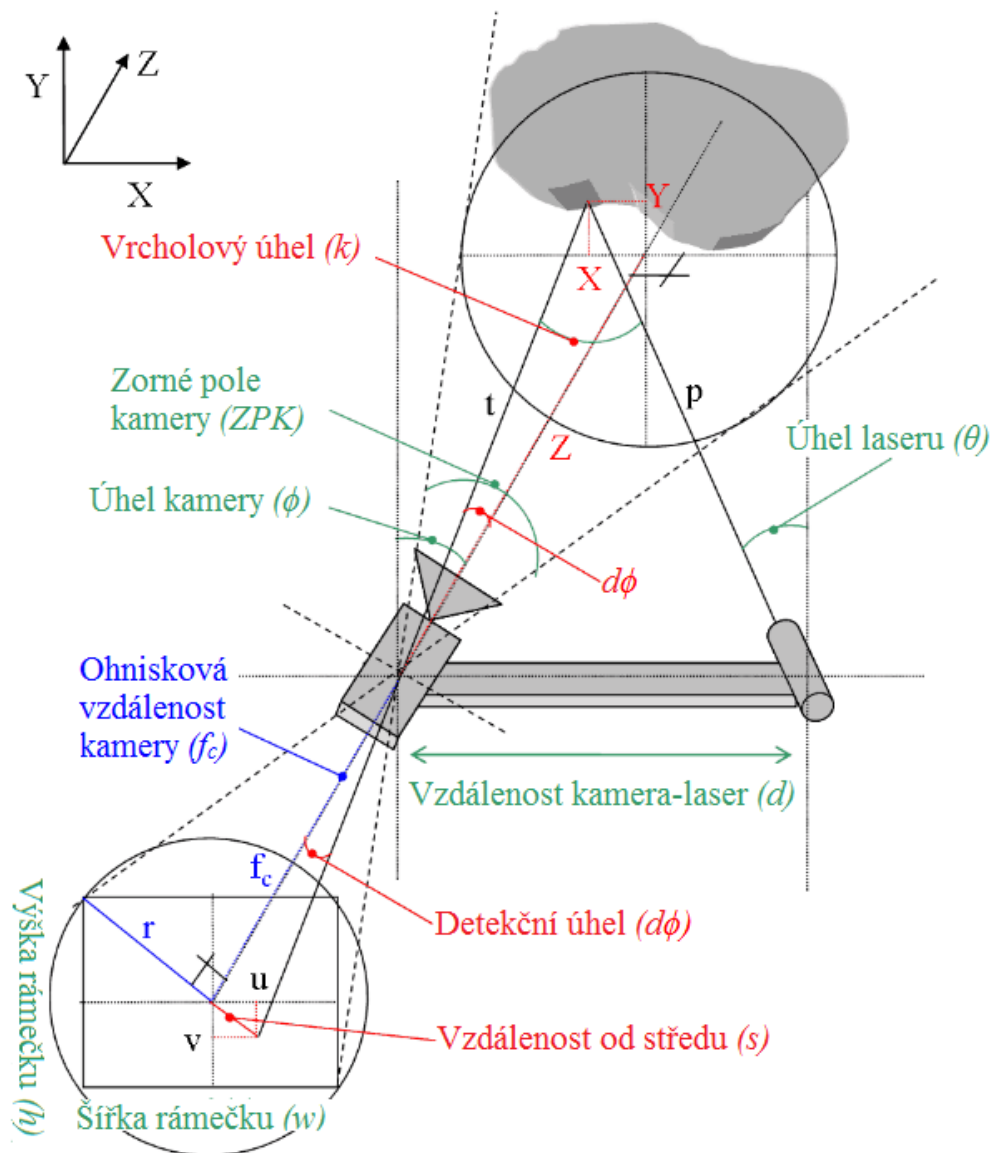
Vzdálenosti mezi zdrojem světla a snímačem se říká triangulační báze a tato vzdálenost se nemění. Úhel svírající paprsek laseru a triangulační báze je neměnný. Oproti tomu úhel, který svírá triangulační báze a paprsek dopadající na snímač, se proměňuje v závislosti na místě odrazu od předmětu. Na druhou stranu víme, v jakém rozmezí se tento úhel může pohybovat, jelikož také víme, v jakém rozmezí kamera přístroje snímá. Pomocí získaných informací můžeme poměrně snadno dopočítat vzdálenost mezi skenerem a místem, kde dopadá laserový paprsek. [10, 11]

Pokud měříme za pomoci jednoho paprsku, zjišťujeme tím vzdálenost pouze jednoho bodu a tím získáme výsledek 1D triangulace. Další možností je využít štěrbinu, pomocí které získáme světelný pruh, pak hovoříme od 2D triangulaci. Tímto způsobem lze měřit například mezery mezi plechy, házení u rotačních dílů nebo vzdálenosti mezi dvěma hranami. Pokud pohybujeme synchronně zkoumaným předmětem nebo skenerem, můžeme použít 2D skener i pro 3D skenování. Poslední z možností je 3D triangulace, kde se využívá pro získání dat několik rovnoběžných čar nebo strukturované světlo, které pokryjí celý měřený objekt. Nasnímání celého povrchu najednou je při dostatečném výpočetním výkonu velkým urychlením a také do jisté míry zpřesněním, pokud scéna není dokonale statická, proto je 3D triangulace oproti 1D a 2D výhodnější. [10, 11]



*Obr. 8 - 2D a 3D laserové skenování objektu [11]*

### 2.2.1.1. Proces triangulace pro neznámý bod v prostoru



Obr. 9 - Schéma triangulace [12]

Základem výpočtu triangulace je sinová věta, pomocí které lze vypočítat vzdálenost neznámého bodu na snímaném objektu od skeneru. Na obrázku je znázorněn geometrický princip snímání. [12]

Základní linie mezi kamerou a laserovou diodou je označena na obr. 10 písmenem  $d$ , kdežto  $\phi$  je úhel kamery a  $\theta$  je úhel laseru, přičemž oba úhly jsou svírány se svislou osou. Tyto statické nebo proměnné parametry jsou známy (pro případ dírkové kamery): [12]

- Zorné pole kamery (úhel, ZPK)
- Rozlišení kamery, tj. šířka rámečku  $w$  a výška rámečku  $h$



- Relativní uspořádání topologie, tj. úhel kamery  $\phi$  a laseru  $\theta$  a vzdálenost mezi nimi
- Klíčovou hodnotu ohniskové vzdálenosti kamery lze odvodit ze známých parametrů: [12]

(1)

$$\left. \begin{aligned} \tan\left(\frac{ZPK}{2}\right) &= \frac{r}{f_c} \\ (2r)^2 &= w^2 + h^2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow f_c = \frac{\frac{\sqrt{w^2 + h^2}}{2}}{\tan\left(\frac{ZPK}{2}\right)} \Rightarrow f_c = \frac{\sqrt{w^2 + h^2}}{2 \cdot \tan\left(\frac{ZPK}{2}\right)}$$

Základem triangulace je sinová věta, která říká, že jestliže strany libovolného trojúhelníku jsou  $a, b, c$  a protější úhly jsou  $\alpha, \beta, \gamma$  pak:

(2)

$$\frac{a}{\sin(\alpha)} = \frac{b}{\sin(\beta)} = \frac{c}{\sin(\gamma)} = 2R$$

kde  $R$  je poloměr kružnice opsané trojúhelníku. Dosazením do rovnice (2) dostaneme:

(3)

$$\frac{d}{\sin(k)} = \frac{p}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi + d\varphi\right)} = \frac{t}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)} = 2R$$

V této topologii je typický geometrický problém, který lze snadno vyřešit:

(4)

$$\begin{aligned} k + \left(\frac{\pi}{2} - \varphi + d\varphi\right) + \left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) &= \pi \Rightarrow \\ k &= \pi - \left(\frac{\pi}{2} - \varphi + d\varphi\right) - \left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) = \varphi + \theta - d\varphi \end{aligned}$$

a neznámá vzdálenost předmětu od laseru  $p$  je:

(5)

$$\frac{d}{\sin(k)} = \frac{p}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi + d\varphi\right)} \Rightarrow p = d \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi + d\varphi\right)}{\sin(\varphi + \theta - d\varphi)}$$

vzdálenost předmětu od kamery  $t$  se spočítá opět přes sinovou větu podobně jako u předešlé rovnice. Jedinou neznámou proměnnou je úhel  $d\varphi$ , který lze snadno odhadnout trigonometricky:

(6)

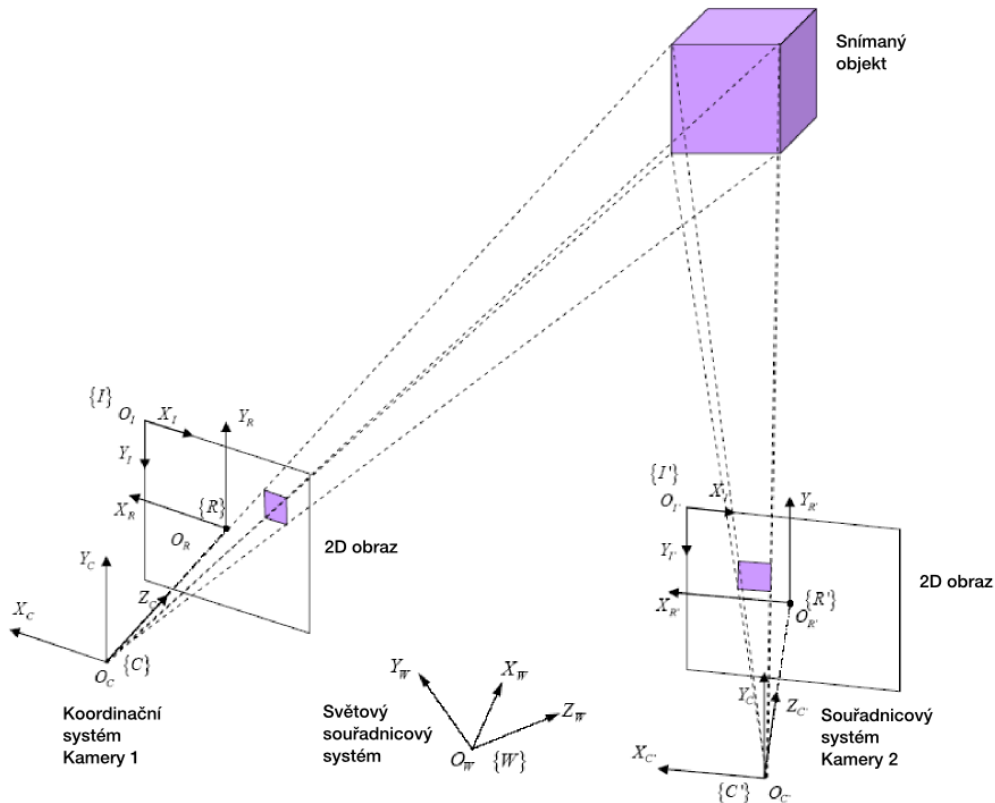
$$\begin{aligned}\tan(d\varphi) &= \frac{s}{f_c} \Rightarrow d\varphi = \arctan\left(\frac{s}{f_c}\right) \Rightarrow \\ d\varphi &= \arctan\left(\frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{f_c}\right) \Rightarrow \\ d\varphi &= \arctan\left(2 \cdot \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{\sqrt{w^2 + h^2}} \cdot \tan\left(\frac{ZPK}{2}\right)\right)\end{aligned}$$

### 2.2.2. Pasivní triangulace

U pasivní triangulace neznáme přesné geometrické uspořádání mezi zdrojem a snímačem, jelikož u této metody nemáme zdroj záření, ale více snímačů najednou. Pasivní triangulace se dělí do tří základních druhů. V jednom případě máme více kamer se samokalibrací, v druhém případě máme jednu kameru se samokalibrací, ale v tomto případě kamera snímá v různých polohách a v posledním případě máme opět více snímačů se známou vzájemnou orientací. Při měření metodami, kde se uplatňuje samokalibrace, není zapotřebí znát vzájemnou polohu kamer/kamery, jelikož jejich vzájemná pozice je určována a odvozována přímo z naměřených dat. Ke kalibraci často slouží i kalibrační artefakty, u kterých známe přesné rozměry, které jsou skenovány současně s měřeným předmětem. Následně jsou z naskenovaných dat a měřítka kalibračního artefaktu odvozeny rozměry a tvar měřené součásti. [10, 11]

Při tomto druhu skenování je zapotřebí si dávat pozor na okolní světelné podmínky, aby skenovaný objekt nebyl přexponovaný nebo naopak nedostatečně nasvícen. U moderních zařízení jsou součástí modulátory intenzity paprsku. Díky tomuto modulátoru lze přístroje využívat v širší škále aplikací i za nepříznivých světelných podmínek. Skenery, které mají integrovaný modulátor intenzity paprsku, mají i vyšší pořizovací cenu. [10, 11]

Dvojce očí u člověka slouží pro odhad vzdálenosti a prostorové vidění. Na stejném principu funguje metoda pasivní triangulace, která využívá principu dvou kamer. Tato metodě se říká stereovize. Dvojce CCD snímačů umístěných v kamerách pořídí dva stereoskopické snímky, které představují dva různé perspektivní obrazy. Následně z úhlu mezi kamerami (tj. úhlová paralaxa) se získá hledaný třetí rozměr, a to vzdálenost povrchu od středu pohledů obou snímačů. [10, 11]

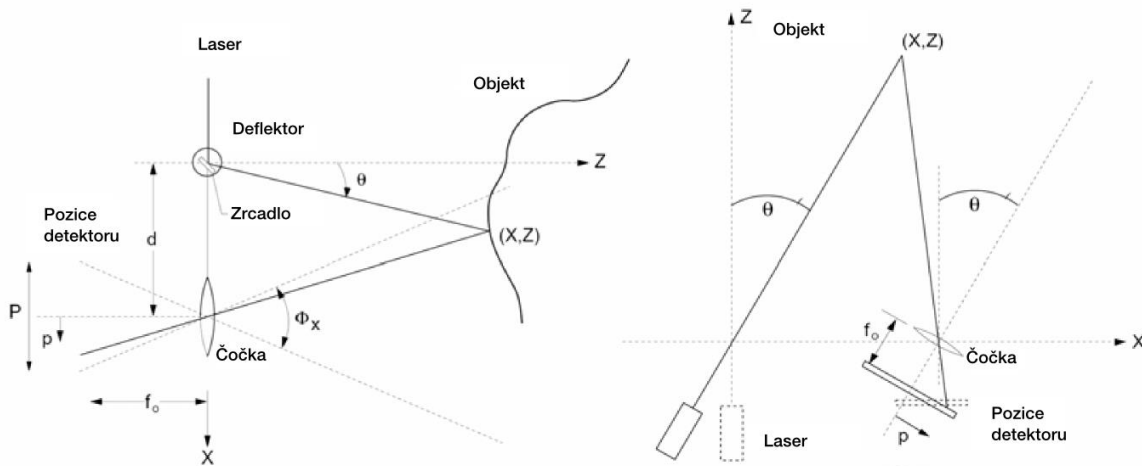


Obr. 11- Typický stereovizní systém [13]

Mezi hlavní nevýhody při měření metodou stereovize je, že občas nesouhlasí některé shodné body ze snímaných obrázků, které jsou například na hranách nebo mají nevýraznou texturu. Výsledkem jsou pak nepřesně naměřené hodnoty. Z tohoto důvodu se stereovize používá spíše jako doplňková metoda k aktivním metodám měření. Výhodou této metody je její velké množství využitelnosti, zvláště v oblastech pokročilých technologií. Dále její výhoda spočívá v pořizovací ceně zařízení, která je relativně nízká v porovnání s ostatními metodami, avšak na úkor přesnosti a kvality měření. [10, 11]

### 2.2.3. Skenovací triangulační systém

Slouží ke skenování relativně malých předmětů na krátké vzdálenosti s vysokou přesností. Používají se například v oblasti archeologie nebo ve strojírenských aplikacích. [13]



Obr. 12 - Schéma triangulačního laserového systému [14]

Princip je založen opět na laserovém koherentním paprsku, který dopadá na zkoumaný předmět. Pomocí jedné nebo více statických detekčních jednotek je snímán odražený paprsek od objektu pod úhlem. Tento princip lze rozšířit o metodu, kdy se synchronní detekční jednotka synchronně pohybuje s paprskem. [10]

Ze zdroje vychází paprsek buď ve tvaru přímky pomocí štěrbinu, což je případ i u 2D skenerů, nebo větší počet rovnoběžných přímek. Pokud známe vzájemnou polohu a orientaci jednotlivých optických komponentů, kterou bychom měli znát z předchozí kalibrace snímačů, pak lze relativně jednoduše dopočítat souřadnice zkoumaného předmětu pomocí triangulace z promítnutého laserového paprsku. [14]

## 2.3. 3D skenování

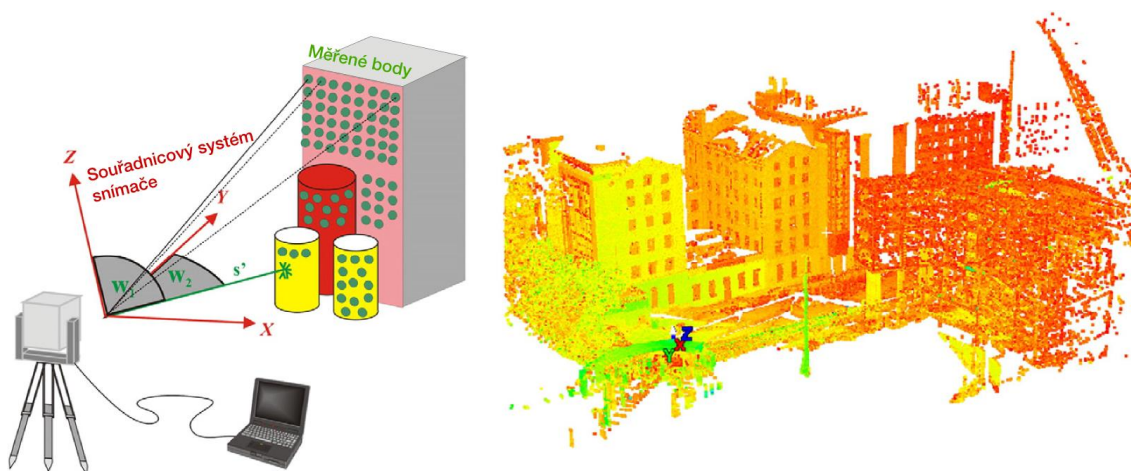
Jak již bylo zmíněno 3D skenery jsou přístroje, která zachycují tvar a textury fyzických objektů a převádějí je pomocí zaznamenaných bodů z povrchu součástí na mrak bodů v počítači. Ten z nich následnou extrapolací z jednotlivých bodů vytváří vhodné polygonové síť, ze kterých se skládá výsledný digitální 3D model. Existuje mnoho metod, kterými můžeme získávat potřebné body jako například laserové, rentgenové, ultrazvukové, optické nebo mechanické 3D skenování. 3D skenování dělíme do dvou základních metod a to destruktivní a nedestruktivní. Nedestruktivní metoda je nejčastější metodou a nedochází při ní ke zničení měřené součásti. Různé metody mají různé uplatnění a s tím spojené i jejich limity, výhody a nevýhody. Ruku v ruce jdou také pořizovací ceny přístrojů a náročnost na obsluhu. Výsledné 3D modely mohou sloužit například při vývoji

počítačových her, průmyslovém designu, dokumentaci architektonických památek, v protetice nebo v oblasti průmyslové kontroly kvality a reverzního inženýrství. [10, 15]

## 2.4. 3D laserové skenování

Laserové skenování je vhodné ke snímání rozsáhlých prostor nebo velkých objektů. Svoji rychlostí, která je v řádech tisíců až statisíců bodů za sekundu a svojí přesností, která se pohybuje v rozpětí milimetrů až centimetrů, předčí nástroje jako totální stanice, měřicí pásma nebo běžné kamery. Ty se prakticky nedají využít při měření rozsáhlých prostor z důvodu časové náročnosti a nepřesnosti. Při skenování může jediný záznam obsahovat několik milionů 3D bodů. Bohužel během jednoho snímání nemůžeme zaznamenat všechny body, musíme objekt zaznamenat z několika úhlů. Pomocí digitální kamery nebo fotoaparátu lze zachytit obraz daného prostředí. Následně můžeme spojit naměřená data s vyfotografovaným prostředím a tím snadněji vytvořit 3D model objektu. V neposlední řadě se 3D skenování využívá ve strojírenství, k vytváření CAD modelů z fyzických součástí, které jsou příliš složité pro klasické dotekové měření a zároveň se získá nesrovnatelně více bodů za krátký čas. Toho se využívá především v reverzním inženýrství. [13, 14, 16]

### 2.4.1. Využití doby letu laserového paprsku

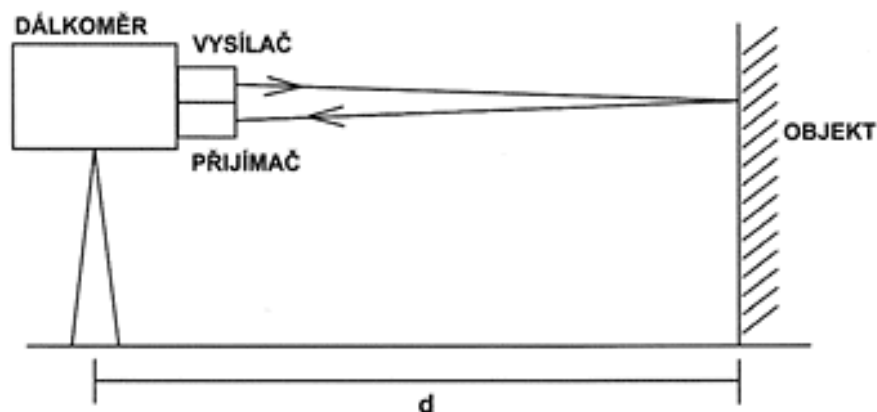


Obr. 13 - Schéma měření a výstup z měření [14]

Laserové skenery pro skenování budov využívají podobného principu jako sonar. Laserový paprsek je vyslán na zkoumaný fyzický objekt, od kterého se paprsek odráží zpět do snímače v laser skeneru. Tento princip se nazývá Time-of-flight (ToF). Z doby letu paprsku od vyslání po příjem se dá dopočítat vzdálenost mezi skenerem a bodem

na měřeném objektu. Tím je plně určena poloha bodů v trojrozměrném prostoru. Pro zaznamenání celého tělesa je zapotřebí rotující paprsek. Obvykle se používá rotující hlava skeneru. V případě dalšího skeneru, rotujících dvou spojených zrcadel nebo dokonalejším rotujícím optickým hnanem ve tvaru pravidelného n-úhelníku. Na kvalitu digitalizovaného tělesa má vliv hustota pokrytí plochy reálného tělesa laserovým paprskem. Součástí skeneru bývá i barevná digitální kamera, která zaznamenává barevnou informaci. Výstup ze skeneru je již zmíněný mrak bodů, který vytváří přesnou napodobeninu skenovaného objektu a za pomoci barevné kamery i stejnou texturu objektu. Následně jsou data převedena do počítače, kde s nimi lze manipulovat a upravovat v CAD softwarech. Pro skenování budov a přírodních objektů se nejčastěji využívají terestrické 3D skenery z důvodu jejich vysoké produktivity z hlediska získávání dat, vysokému rozlišení a vysoké přesnosti. Rychlost získávání dat se obvykle pohybuje od 1 - 6 kHz, délková přesnost od 5 mm do 25 mm a vzorkovací interval je programovatelný. Tímto tato technologie převyšuje běžné měřicí metody, jako jsou EDM, GPS nebo fotogrammetrii, protože má velké rozlišení bez potřeby odrazového zařízení.

Skener poskytuje natolik dostatečné množství bodů pro získání co optimálně nejpřesnějšího digitálního dvojčete, že není zapotřebí povrch dále interpolovat. [10, 13, 16, 17]



Obr. 14 - Schéma měření laserovým skenerem

### 2.4.2. Vliv vlnové délky

Zdrojů laserového paprsku je velká škála. Liší se především ve vlnové délce světla. Ukázalo se, že vhodná vlnová délka zdroje má nízký výkon, a tudíž je bezpečný pro lidský

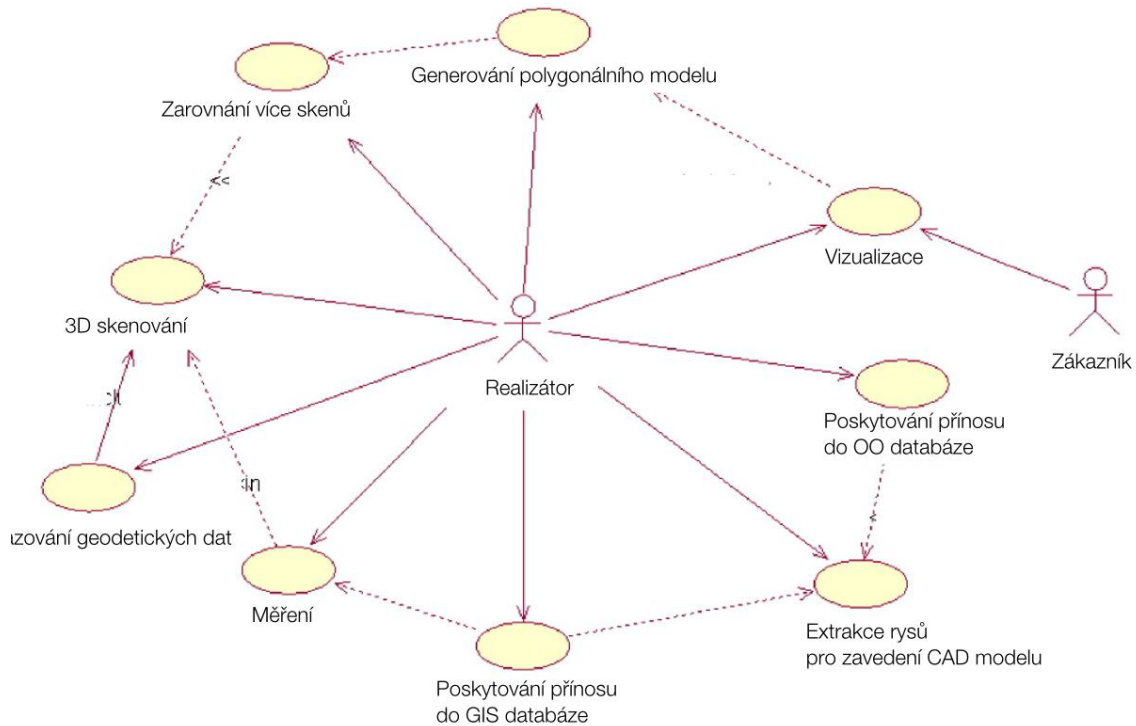
zrak. Nejvhodnější vlnová délka se ukázala 670 nm pro CCD snímače, protože právě při této vlnové délce dosahuje CCD snímač maximální spektrální citlivosti. V tabulce je soupis některých 3D laserových skenerů a jejich porovnání. [7]

*Tab. 1 - Porovnání některých 3D laserových skenerů[14]*

<b>Výrobci</b>	<b>3rdTech</b>	<b>Cyra Tech</b>	<b>MetricVision</b>	<b>Optech</b>	<b>Riegl USA</b>
<b>Vlnová délka laseru [nm]</b>	670	532	1550	1540	904
<b>Výkon laseru [mW]</b>	5	1	4	10	1,2 – 85
<b>Měřitelná délka [m]</b>	0,3–12	1,5–50	0,3–55	1,5–1200	0,3–2500
<b>Přesnost [mm/X m]</b>	10/12	6/50	0,02	6/100	76/2400
<b>Cena [Kč]</b>	1 012 500	2 812 500	8 100 000	3 375 000	787 500 - 1 912 500

#### **Postup při měření budov [18]**

1. 3D skenování
2. Uspořádání naskenovaných dat z různých pozic
3. Generování polygonové sítě a modelu
4. Spojení s geodetickými daty
5. Získávání dat pro CAD implementaci
6. Vizualizace



Obr. 15 - Algoritmus při skenování velkých objektů [19]

### 2.4.3. Limity při skenování

Při zpracování nastává několik problémů se vzniklým 3D modelem vytvořeným ze 3D skenování. Po skenování se nashromáždí miliony informací o vytvořeném modelu, jako jsou souřadnice X, Y, Z a charakteristika RGB každého bodu z mračka bodů. Pro rychlé vytvoření geometricky přesných 3D modelů a i 2D plánů je to příliš mnoho dat. Vytvořený 3D model je tvořen malými trojúhelníky, které vzniknou z polygonální sítě spojením sousedních bodů v mračku bodů. Těchto trojúhelníků je velmi velké množství a nevytváří přesné obrysy a rovné linie pro CAD modelování. K snazšímu modelování slouží automatické algoritmy, které zrychlují vytváření CAD modelu. [18]

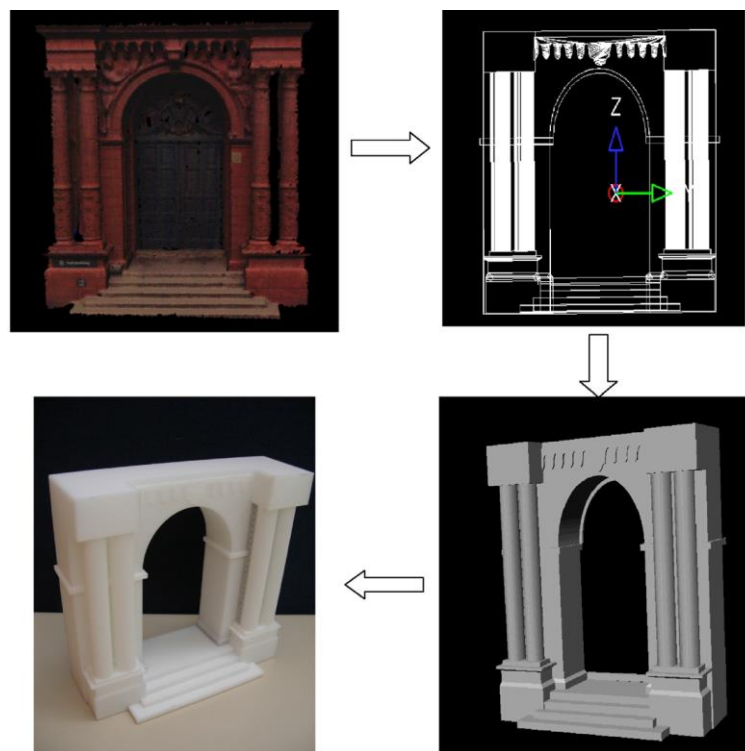
Dalším problémem během zpracování u laserových skenerů jsou lesklé plochy, jako jsou například okna nebo lesklý kov. Částečným řešením je využití fotografických dat a ručního předefinování v postprodukčním procesu u skenování budov. Při skenování lesklých součástí, u kterých nás nezajímá jejich vzhled, se využívá práškového spreje, který snižuje odrazivost, ale zároveň jeho tenká vrstva na objektu nevnáší velké nepřesnosti měření. [18]



## 2.4.4. Zástupci 3D laserových skeneru

### 2.4.4.1. HandyScan 3D

Tento model funguje na principu triangulace, kdy operátor v ruce drží skener a pohybuje s ním nad snímaným objektem. Na objektu nebo na podložce jsou během snímání poziční značky, pomocí kterých HandyScan určuje vzájemnou polohu mezi skenerem a objektem. Použitím dvou kamer snímá laserový kříž na tělese. Přístroj snímá v reálném čase laserový kříž, těleso a zobrazuje ho na počítači. V ten stejný moment se automaticky vytváří polygonová síť. [19]



Obr. 16 - Od 3D skenu přes 3D model po 3D tisk [20]

Tato technologie je uživatelsky jednoduchá, stejně tak vyhodnocování dat je snadné a dají se s ní nasnímat i tvarově složitější předměty. Podle nastaveného rozlišení se výsledná polygonová síť automaticky přepočítává na základě získaných dat. Všechna zaznamenaná data lze ihned upravovat a zpřesňovat díky okamžitému zobrazení aktuální podoby modelu. Z toho vyplývá nesporná výhoda zrychlení procesu vyhledávání vad snímání nebo místa potřebná k detailnějšímu nasnímání. [19]

Skener HandyScan patří mezi skenery, které pracují na principu triangulace. Poziční značky umístěné na objektu nebo na podložce potřebuje skener pro určení přesné polohy objektu v prostoru. Kamery musí současně vidět alespoň tři reflexní značky, aby byla snímaná poloha objektu správně převedena do CAD softwaru. Ten následně automaticky tuto polohu určí. Pokud skenujeme plynulým pohybem, je zapotřebí, aby skener viděl minimálně čtyři reflexní značky. Jelikož je poloha reflexních značek jedinečná, a to z důvodu nepravidelného ručního lepení pozičních značek na objekt nebo podložku, systém může kdykoliv navázat a pokračovat na již nasnímané body. Maximální přesnost je 0,05 mm. [19]



*Obr. 17 - HandyScan 3D [21]*

### 2.4.4.2. Trimble TX8

Laserový skener Trimble® TX8 má výhodu v rychlosti sběru dat. Díky kombinaci zásadních schopností jako je rychlost měření, dlouhý dosah a vysoká přesnost, poskytuje Trimble TX8 kvalitní výsledky měření v průmyslovém, strojírenském a stavebním odvětví a dalších aplikacích, které vyžadují především přesnost a flexibilitu. Pracuje na principu měření doby letu paprsku (ToF). Skenování probíhá pomocí vertikálního rotačního zrcátka na horizontální rotační ose, které se otáčí rychlostí 60 ot/s. Dosah měření je 120 m na většinu povrchů a rozsah šumu je menší než 2 mm. Obvyklá doba skenování je 3 minuty, při které se zaznamená 138 mil. bodů. Třída laseru je 1, tudíž je v souladu s IEC EN60825-1, a paprsek není škodlivý pro oči. Jeho vlnová délka je 1,5  $\mu\text{m}$ , což už je mimo viditelné spektrum barev. [20]



Obr. 18 - Trimble TX8 [22]

## 2.5. 2D laserové skenování

Jak už bylo zmíněno v kapitole 2.2.1, 2D laserové skenování funguje na principu triangulace. Laserový paprsek prochází skrze štěrbinu, a tím vytváří linii na měřeném objektu. Částečně odražený paprsek dopadá na maticový snímač, který vyhodnocuje posunutí všech bodů v jeden okamžik. Tento způsob měření má výhody oproti 3D skenovacím metodám využívajících staticky měřících přístrojů, že jeho součástí není žádná pohybující se mechanická součást typu rotující zrcátko nebo hranol. Tím se zvyšuje jeho životnost a zároveň snižuje poruchovost zařízení a také jeho cena. Další výhodou je, že odpadá problém s pohybujícím se měřeným objektem, jelikož skener snímá všechny body najednou. Z tohoto důvodu lze použít laserový 2D skener za určitých podmínek jako 3D skener, jelikož při snímání není časová prodleva mezi jednotlivými nasnímanými body, a tedy se pohyb objektu nebo skeneru neprojeví deformací obrazu.[21]

Na druhou stranu má tato metoda i negativní vlastností: [21]

- Laserový zdroj musí mít dostatečný výkon, než u bodového měření, protože vyzařující energie se rozptýlí do větší plochy. Energie odraženého světla ovlivňuje dobu expozice, a tedy také frekvenci měření.
- U objektů s povrchem o různé odrazivosti nastává problém, jelikož pro každý pixel snímače skeneru je nastavena stejná expozice, která je daná průměrnou intenzitou odrazu. Důsledkem různé odrazivosti zkoumaného povrchu nastává přeexponování nebo naopak podexponování odlišných oblastí. Pokud dojde k přeexponování, vytvoří se neplatné body okolo přesvíceného bodu a v druhém případě body vůbec nebudou zaznamenány.
- Zaostřený bod může mít různé rozměry v závislosti na expozici, na vzdálenosti skeneru od součásti, nebo na výkonosti skeneru. Průměr bodu může být od 3 mm do několika desetin mm a menší. Následně i stejnou tloušťku má také vytvořená linie. Je však jednodušší určit střed kruhového bodu, než linie, kde jsou body blízko sebe a prolínají se.
- S tím souvisí i vliv rozlišení snímače, kdy z jednotlivých naměřených pixelů se vytváří měřící linie, která je dopočítaná softwarem skeneru. Ta by měla procházet středem

nasnímané linie, avšak je vyhlazovaná pomocí matematiky softwaru, a tím může docházet k nepřesnostem měření. Tento vliv se hlavně projevuje na hranách měřených objektů.

- S rostoucím zorným úhlem je složitější za pomoci optické soustavy rozptýlit paprsek tak, aby bylo dosaženo homogenní intenzity vyzařované linie, tímto je zorný úhel kamery omezen při měření. Je běžné, že při okrajích linie je intenzita záření nižší než uprostřed, a tím dochází k nedostatečné expozici objektu.

### 2.5.1. Metralight - TLE1



*Obr. 19 - 2D laser skener TLE1 [23]*

Senzor TLE1 od firmy Metralight je liniový laserový skener využívající technologie triangulace s ethernetovým rozhraním. Skener projektuje laserový paprsek ve tvaru linie na povrch zkoumaného předmětu na rozdíl od standardního bodového laserového skeneru, který měří vzdálenost skeneru od předmětu. Odražený laserový paprsek dopadá na maticový snímač typu CMOS, který dosahuje lepších detailů pro měření profilu materiálu, otvorů, mezer a hran. Dále dosahuje přesného měření vzdálenosti díky vysokému počtu nasnímaných bodů. Veškeré zpracování dat probíhá přímo v přístroji, tudíž není zapotřebí externí regulátor nebo osobní počítač. [22]

Vybrané informace o senzoru TLE1, které jsou uvedeny z této kapitole, jsou převzaty z katalogu společnosti Metralight. Veškeré informace lze najít na jejich internetové stránce. Odkaz na ni je v seznamu použité literatury pod číslem [22].

V následující tabulka obsahuje popis a vlastnosti jednotlivých modifikací toho laserového skeneru udávané výrobcem:

Tab. 2 - Vlastnosti jednotlivých modifikací skeneru TLE1 [22]

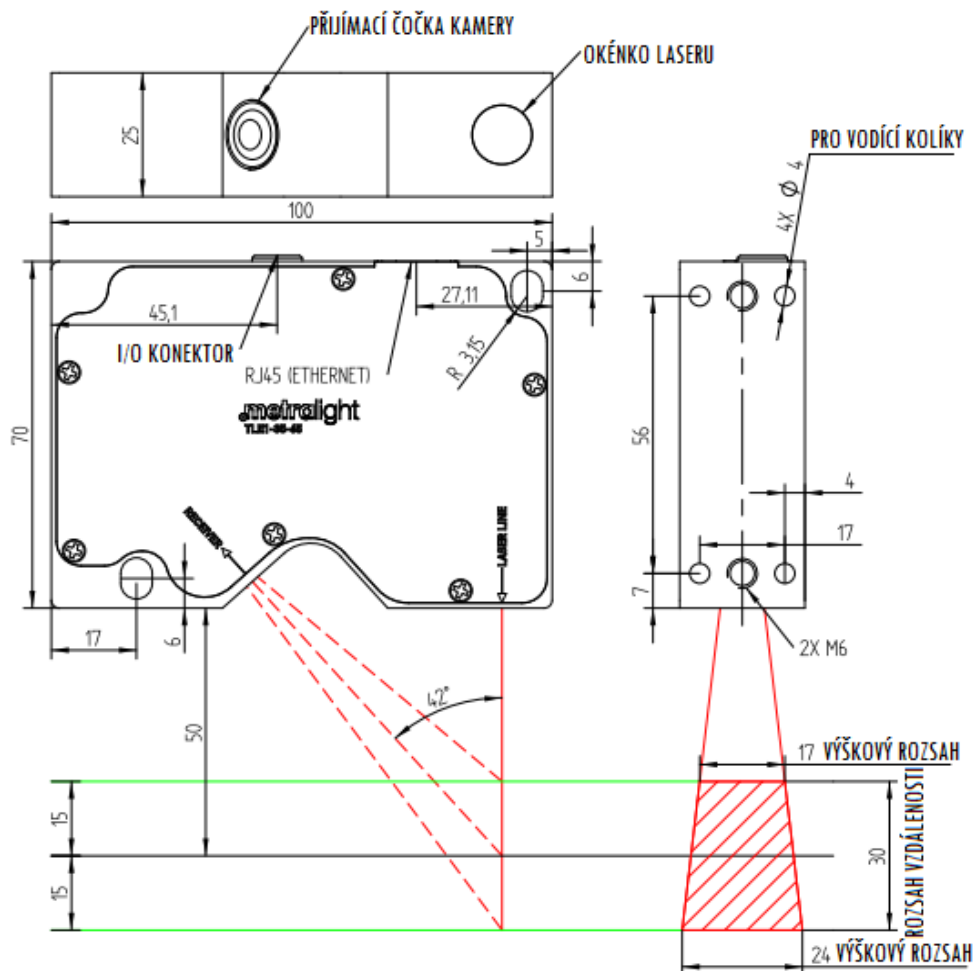
	<b>TLE1-35-65</b>	<b>TLE1-58-122</b>	<b>TLE1-100-300</b>
<b>Rozsah měření vzdálenosti (distance)</b>	od 35 do 65 mm	od 58 do 122 mm	od 100 do 300 mm
<b>Rozsah měření výšky (height)</b>	17 mm ve vzdálenosti 35 mm 24 mm ve vzdálenosti 65 mm	23 mm ve vzdálenosti 58 mm 40 mm ve vzdálenosti 122 mm	30 mm ve vzdálenosti 100 mm 90 mm ve vzdálenosti 300 mm
<b>Rozměr linie*</b>	40 $\mu\text{m}$ x 20,5 mm	60 $\mu\text{m}$ x 31,5 mm	140 $\mu\text{m}$ x 60 mm
<b>Snímač</b>	CMOS (1280x1024 pixelů)		
<b>Rozlišení při měření vzdálenosti</b>	1 $\mu\text{m}$	3 $\mu\text{m}$	6 $\mu\text{m}$
<b>Distanční nelinearita</b>	10 $\mu\text{m}$	25 $\mu\text{m}$	50 $\mu\text{m}$
<b>Rozlišení při měření výšky</b>	24 $\mu\text{m}$	40 $\mu\text{m}$	80 $\mu\text{m}$
<b>Doba odezvy</b>	33,34 ms pro plné odečítání nebo rychleji pro částečné odečítání		
<b>Rozhraní</b>	RJ-45 (Ethernet) - 10/100 Mbit		
<b>Komunikace</b>	TCP protokol, ICMP (ping)		
<b>Napájení</b>	POE (Power over Ethernet), od 12 (150mA) do 24 VDC (80mA)		
<b>Hmotnost</b>	105 g		
<b>Rozměry skeneru</b>	100 x 70 x 25 mm		
<b>Laser</b>	650 nm, Třída 1M P < 3 mW	650 nm, Třída 2M P < 10 mW	650 nm, Třída 2M P < 10 mW

\*uprostřed měřícího rozsahu

Tato práce se v praktické části zabývá určením přesnosti měření toho skeneru, a to konkrétně modifikace TLE1-35-65. Proto je dále pozornost zaměřena na tuto modifikaci.

### 2.5.1.1. Popis zařízení

Následující obrázek zobrazuje schéma laserového skeneru v modifikaci TLE1-35-65, kde je vidět, v jakém rozsahu zařízení měří, základna pro měření, jaké má skener rozměry a v jakých polohách a rozměrech jsou otvory pro uchycení. Důležité je si uvědomit, že laserový paprsek vychází z jednoho bodu a rozptyluje se přes štěrbinu v trojúhelníkovou plochu. Zároveň snímač svým zorným polem zaznamenává jen část laserem vytvořené plochy. Následně snímač kamery snímá tuto plochu jen v určitém výřezu a je pod úhlem k této laserem vytvořené ploše. Z toho vyplývá, že pole pro měření skenerem má tvar lichoběžníku.



Obr. 20 - Rozměry skeneru TLE1-35-65 [mm] [23]

CMOS snímač má tvar obdélníku, ale snímaná plocha laserového paprsku má tvar lichoběžníku. Z toho vyplývá, že vlivem triangulace, a tudíž změny úhlu při změnách vzdálenosti měřeného předmětu od skeneru, musí docházet ke změně rozlišovací schopnosti skeneru. V části zorného pole nejbližší ke skeneru bude mít nejlepší rozlišovací

schopnost (na 1 mm ve směru výškového rozsahu - height je nejvíce pixelů) a se vzdáleností od skeneru se bude zhoršovat. Toto platí i ve směru vzdálenostního rozsahu - distance, kdy na stejnou měřenou vzdálenost vychází různý počet pixelu se změnou polohy v tomto rozsahu. Na druhou stranu jak v nejvzdálenější, tak v nejbližší části snímané plochy, bude docházet k nepřesnostem vlivem nenasnímání bodů nacházející se již už mimo zorné pole kamery. Zároveň je zde vliv optické soustavy, která bývá při krajích zorného pole horší. Tyto nedostatky by měl částečně kompenzovat software (TL Studio) dodávaný výrobcem společně se skenerem. Ověření přesnosti senzoru je součástí této práce a bude to dále podrobněji rozvedeno.

Skener TLE1 je klasifikován jako laserové zařízení třídy 1M (výkon laseru <3mW podle IEC 60825-1 nebo ANSI Z136.1). Třída laseru 1M je bezpečná pro všechny podmínky použití kromě případů, kdy prochází zvětšovací optikou, jako jsou mikroskopy a dalekohledy. Lasery třídy 1M vytvářejí paprsky velkého průměru nebo paprsky, které divergují. [22]

Skener lze ovládat pomocí příkazů. Což znamená, že lze si vytvořit vlastní software k nastavování přístroje nebo k zaznamenávání naměřených dat. Nastavení zařízení se ukládá přímo do zařízení, což znamená, že i když odpojíme skener od zdroje elektřiny a opět ho připojíme, nastavení zůstává stejné, jako před odpojením.

### 2.5.1.2. Možnosti nastavení skeneru

V této kapitole jsou popsány parametry snímače, kterými lze upravovat snímání, zpracování obrazu a pracovní postup. Změny parametrů mají okamžitý vliv na chování senzoru. Nastavení parametrů lze ukládat. [22]

#### 1. Zobrazení

Tab. 3 Parametry zobrazovacího snímače [22]

Popis	Jednotka	Rozsah
<b>Čas expozice (Time of integration)</b>	-	1 - 1049
<b>Síla laseru (Laser power)</b>	-	0 - 255
<b>Vypnutí/Zapnutí laseru (Laser on/off)</b>	-	0 / 1
Aktivní okno na zobrazovacím snímači (ovlivní kmitočet snímače)		
<b>Maximální rozměry aktivního okna</b>	pixel	1024 x 1280



Pomocí parametru Time of integration se nastavuje světelná expozice na snímači, neboli jak citlivý bude snímač na světlo, a tím je ovlivňován jas obrazu. Parametrem Laser power se mění světelná intenzita laserového paprsku. Aktivní okno je oblast obrazového snímače. Díky menší ploše je umožněna vyšší rychlost snímání.

## 2. Vytvořený profil [22]

Tab. 4 - Parametry pro nastavení profilu [22]

Popis	Jednotky	Rozsah
<b>Práh citlivosti (Treshold)</b>		
minimální hodnota pixelů pro detekci špiček na linii	intenzita světla	1 - 255
<b>Zpracování linie (Line processing)</b>		
<b>Režim výběru špiček na linii:</b>		
<b>0 - Prahová hodnota</b>	-	0   1   2   3
<b>1 - Poslední špička (nejbližší k senzoru)</b>		
<b>2 - První špička (nejdál od senzoru)</b>		
<b>3 - Nejvyšší vrchol</b>		
<b>Minimální/Maximální platná výška vrcholu</b>	pixel	1 - 255
Oblast zájmu (Region Of Interest = ROI), (ROI specifikuje oblast v nasnímaném obrazu pro výpočet profilu), ROI musí být uvnitř aktivního okna zobrazovacího snímače		
<b>Rozsah sloupců v ROI</b>	pixel	1 - 1022
<b>Rozsah řádků v ROI</b>	pixel	1 - 1278

Treshold funguje na principu minimálního dopadajícího světla na pixel každém řádku snímače, který má být převzat do algoritmu zpracování profilu. Čím menší tato hodnota je, tím je zapotřebí méně světla napadajícího na pixel v řádku snímače, aby ten pixel byl brán v potaz při zpracování a vytváření profilu sloužícího k následnému měření. Z toho plyne, že pokud je tato hodnota velmi nízká, dochází k rozptylu linie vytvořené zpracováním v softwaru z odraženého paprsku. Naopak pokud je tato hodnota příliš vysoká, může i v celku dobře osvětlený pixel snímače vypadnout z algoritmu zpracování profilu a, pokud takto nezapočítaných pixelů je již větší množství vedle sebe (záleží na segmentaci), dochází k vytváření děr ve vzniklém profilu.

Line processing je metoda výpočtu profilu z pixelů nad prahovou hodnotou - první vrchol, poslední vrchol, největší vrchol nebo prahová hodnota (průměr).

ROI je oblast, kde je profil zpracován. Lze použít k zamezení nežádoucím oblastem na nasnímaném obrazu nebo odrazům atd.

### 3. Zpracování profilu

Tab. 5 - Parametry pro zpracování profilu [22]

Popis	Jednotky	Rozsah
<b>Segment - velikost segmentu pro filtrování profilu</b>	pixel	1 - 255
<b>Subsegment</b>	pixel	Subsegment < Segment
<b>Měřicí módy (Measuring mode)</b>	-	0 - 8
<b>Omezení inklinace (Inclination limit)</b>	-	0 - 255

Segment určuje, kolik pixelů v jednom segmentu bude filtrováno, pokud nějaký pixel vyčnívá nebo naopak chybí. Software onen pixel vyhladí nebo doplní. Subsegmentace slouží k ukončení profilu. Pokud chybí v profilu určitý počet pixelů za sebou, software tento nedostatek vyhodnotí jako konec profilu (například hrana objektu). Čím vyšší toto číslo je, tím je nižší tolerance pro chybějící body profilu. Zařízení dovede měřit v devíti různých modech pro různé situace měření. Od měření vzdáleností až po šířku mezery. Tyto módy budou popsány v následující kapitole. Inclination limit slouží k omezení inklinace pro hledání objektů. [22]

#### 2.5.1.3. Měřicí módy

TLE1 senzor zvládá měřit polohu hran, vzdálenost, profil, velikosti mezer a další tvary profilů. Déle má až 3 vstupy a 3 výstupy (push-pull nebo otevřený kolektor NPN/PNP). Po dohodě s výrobcem lze senzorová data přizpůsobit poloze snímače pro přesné 3D skenování tvaru. Vlastní mód lze vytvořit na míru pro zákazníka. [22]

Standartní odezvu přístroje na datový příkaz udává jedno číslo Distance (vzdálenost) a jedno číslo Height (výška). Každé z nich je ve dvou bytech (číslo o rozsahu 0 až 65535). Obě čísla představují souřadnice bodu v měřící rovině snímače daný paprskem laserové linie. Jedna osa představuje vzdálenost od senzoru, druhá osa je podél linie vytvořené laserovým paprskem. Různé měřicí módy určují, které body na linii, vytvořené

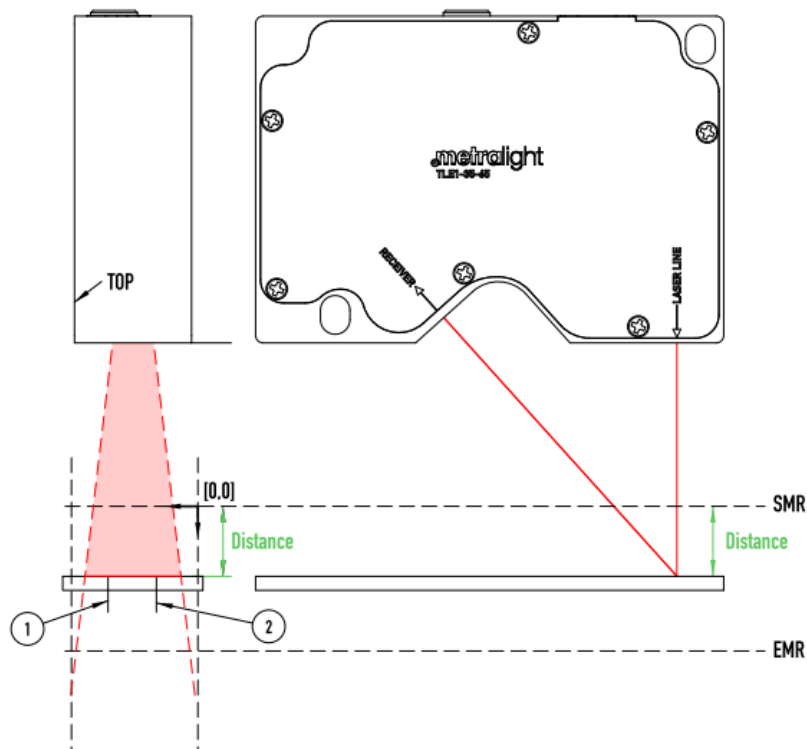
na zkoumaném předmětu, mají být nalezeny a následně po datovém příkazu jejich hodnoty odeslány k jejich zpracování. [22]

### 1. Mód 0 - Střední vzdálenost

Mód 0 slouží k měření vzdálenosti od základní roviny. Měřená rovina může být rovná, ale také zakřivená. Získaná data udávají průměrnou hodnotu všech naměřených bodů. Uživatel si může nastavit délku linie, kterou chce použít pro zpracování. K tomuto účelu slouží parametr ROI, pomocí kterého lze zmenšit oblast pro zpracování odraženého paprsku (značky ① ② v Obr. 22 naznačují, v jakém rozsahu lze například měřit pomocí ROI). Rozsah měření je mezi počátkem měřicího rozsahu (SMR = Start of measuring range) a jeho koncem (EMR = End of measuring range). Začátek je reprezentován jako hodnota 0 na senzoru a konec je představován jako 30 000 (= 30 mm). Počátek měřicího rozsahu je ve skutečnosti 35 mm od přístroje. [22]

Co naměřené body znamenají: [22]

- Bod 1 - Distance - průměrná vzdálenost (vypočítaná z bodů laserové linie vytvořené na objektu a ve vybraném poli ROI)
- Bod 1 - Height - střed vybrané ROI (jen pro referenci, pro Mód 0 je důležitá pouze hodnota vzdálenosti)



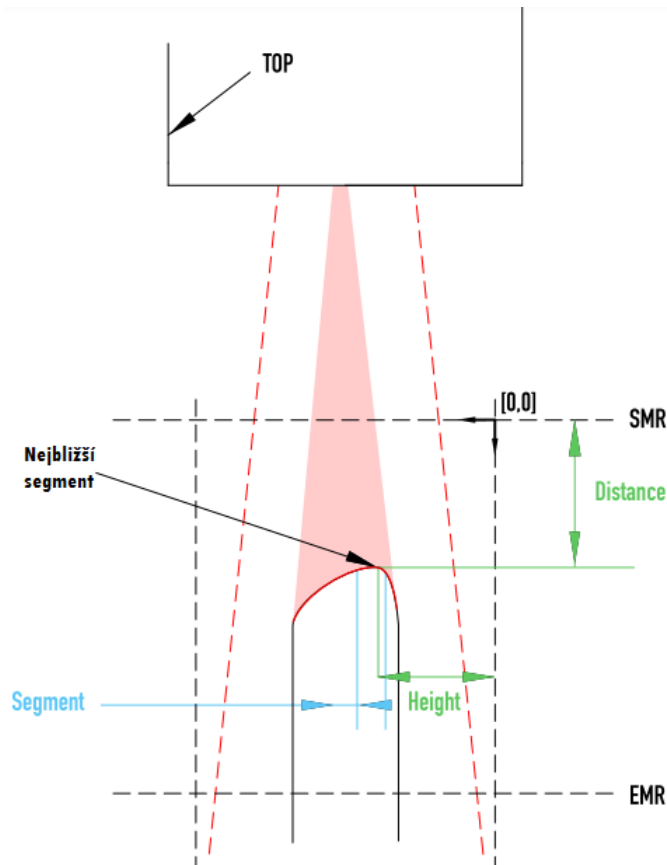
Obr. 21 - Příklad měření vzdálenosti pomocí Módu 0 [23]

## 2. Mód 1 - Nejbližší segment

V tomto režimu senzor nachází nejbližší část měřeného objektu ke snímači. Velikost tohoto objektu (část laserové linie) je dána parametrem SEGMENT. [22]

Co naměřený bod znamená: [22]

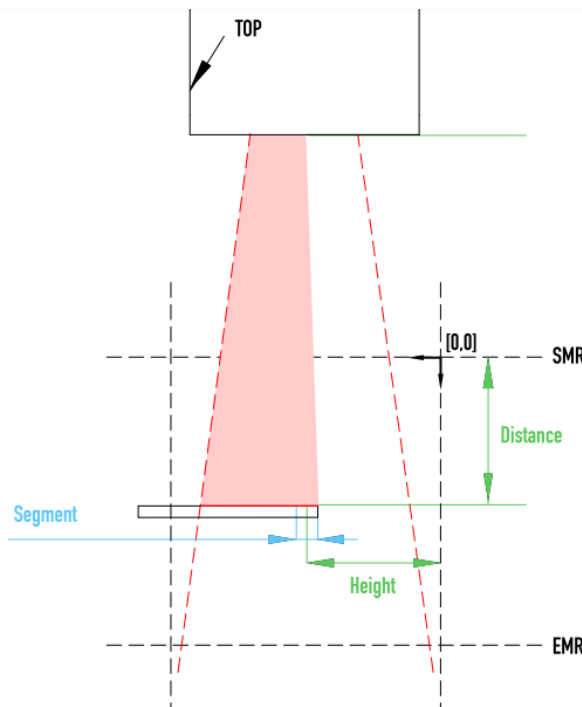
- Bod 1 - koordinace bodu, který je nejbližší k senzoru v nejbližším segmentu



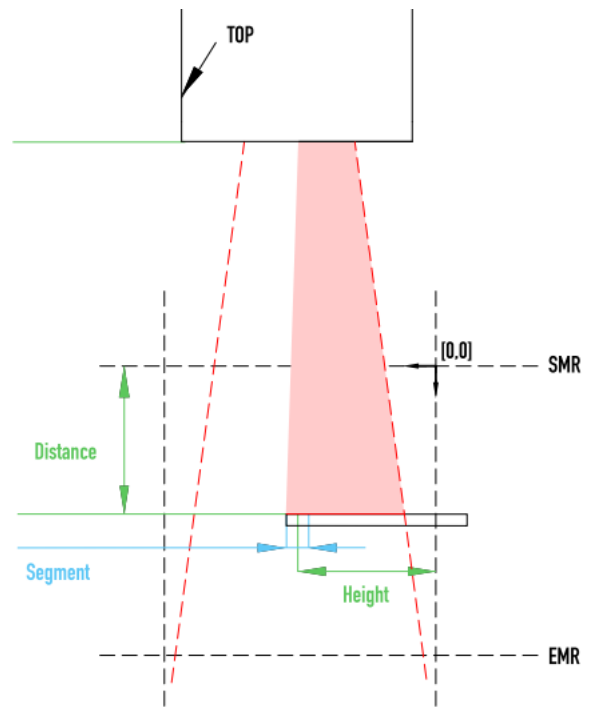
Obr. 22 - Příklad měření nejbližšího segmentu pomocí Módu 1 [23]

## 3. Mód 2 - První světelný segment

Mód 2 se hlavně využívá pro měření hran zkoumaných předmětů. Měřený objekt musí být prezentován z horní strany senzoru. V závislosti na velikosti parametru SEGMENT je určena část, která se dále využívá pro výpočet. [22]



Obr. 24 - Příklad využití Módu 2 [23]



Obr. 23 - Příklad využití Módu 3 [23]

Co naměřený bod znamená: [22]

- Bod 1 - koordinace prvního světelného bodu

#### 4. Mód 3 - Poslední světelný segment

Stejně jako u Módu 2 měří krajní bod hrany, ale měřený předmět se vkládá z druhé strany, a to zezadu od senzoru. [22]

Co naměřený bod znamená: [22]

- Bod 1 - koordinace posledního světelného bodu

#### 5. Mód 4 - Nejvzdálenější segment

Tento mód funguje podobně jako Mód 1, ale opačně. Algoritmus hledá nejvzdálenější část linie od senzoru. Tedy nejvzdálenější segment od zařízení. [22]

Co naměřený bod znamená: [22]

- Bod 1 - koordinace bodu, který je nejdále od senzoru v nejvzdálenějším segmentu

## 6. Mód 5 - Poloha mezery

Pomocí tohoto módu můžeme měřit největší mezeru mezi objekty. [22]

Co naměřené body znamenají: [22]

- Bod 1 - koordinace středového bodu největší spojitě mezery (počítáno jako průměr z hranových bodů)
- Bod 2 - koordinace bodu první hrany
- Bod 3 - koordinace bodu druhé hrany
- Bod 4 - hodnota největší výšky (Height) nalezené mezi hranami; vzdálenost (Distance) je vždy rovna nule

## 7. Mód 6 - Výška mezery (Height gap)

Módem 6 se měří největší mezera mezi objekty. Funguje stejně jako Mód 5, ale má odlišné pořadí vrácených bodů. To se týká především standardního datového režimu, kdy se vrací pouze Bod 1. [22]

Co naměřené body znamenají: [22]

- Bod 1 - hodnota největší výšky (Height) nalezené mezi hranami; vzdálenost (Distance) je vždy rovna nule
- Bod 2 - koordinace bodu první hrany
- Bod 3 - koordinace bodu druhé hrany
- Bod 4 - koordinace středového bodu největší spojitě mezery (počítáno jako průměr z hranových bodů)

## 8. Mód 7 - Poloha objektu

Tento mód slouží k nalezení největšího objektu, což znamená největší spojitý segment (počet řádků) s intenzitou světla přesahující požadovanou prahovou hodnotu. Což znamená, že slouží například k měření schodu. [22]

Co naměřené body znamenají: [22]

- Bod 1 - koordinace středového bodu nejdelší spojitě linie (počítáno jako průměr z bodů v této linii)
- Bod 2 - koordinace bodu první hrany
- Bod 3 - koordinace bodu druhé hrany
- Bod 4 - hodnota největší výšky (Height) nalezené spojitě linie mezi hranami; vzdálenost (Distance) je vždy rovna nule

## 9. Mód 8 - Výška objektu (Object Height)

Pomocí tohoto módu lze měřit nejdelší objekt, což znamená nejdelší spojitý segment (počet řádků) s intenzitou světla přesahující požadovanou prahovou hodnotu. Mód 8 funguje stejně jako Mód 7, ale vrací naměřené body v přeházeném pořadí. To se týká především standardního datového režimu, kdy se vrací pouze Bod 1. [22]

Co naměřené body znamenají: [22]

- Bod 1 - hodnota největší výšky (Height) nalezené spojitě mezi hranami; vzdálenost (Distance) je vždy rovna nule
- Bod 2 - koordinace bodu první hrany
- Bod 3 - koordinace bodu druhé hrany
- Bod 4 - koordinace středového bodu nejdelší spojitě linie (počítáno jako průměr z hranových bodů)

### **2.5.2. Konkurenční 2D skenery**

#### **2.5.2.1. Micro-Epsilon - scanCONTROL**

Konstrukce skeneru má minimální velikost a nízkou hmotnost. Jedná se o laserový, liniový, triangulační senzor, který lze využít pro statické, dynamické i robotické aplikace. Přístroj může být používán jako zdroj dat pro vlastní zákaznickou integraci, tj. generuje profil kalibrovaných bodů a přenáší tento profil do příslušného aplikačního softwaru. Kompletní elektronika je integrována ve snímači, a tudíž senzor nepotřebuje externí řídicí jednotku. Různá programovací rozhraní jsou k dispozici pro integraci do zákaznickova aplikačního softwaru. Získaná data jsou přenášena pomocí FireWire nebo Ethernet rozhraní. [23]

Zařízení je vybaveno multifunkčním portem, který slouží pro napájení, výstup dat, přepínání parametrů, spouštěcí vstup nebo pro synchronizaci několika skenerů ScanCONTROL. Za předpokladu využití 2 a více senzorů najednou, lze ovládat senzory zvlášť nebo synchronně pro překrývající laserovou linii. Je i možnost měřit jedním skenerem, zatímco druhý skener je vypnutý. Skenery mohou být v případě potřeby dodány s rozhraním Ethernet. V tomto případě je pak zařízení opatřeno pouze jedním kabelem, kterým se senzor připojí k jednotce pro zpracování naměřených dat. Skener se dodává v různých třídách. Pro třídy Smart a Gap může být výstup naměřených dat vysílán různými způsoby,

např. přes Ethernet UDP, Modbus TCP nebo sériově. Skenery Micro-Epsilon umožňují přenos dat přes analogové signály, digitální spínací signály, PROFINET, EtherNet/IP nebo EtherCAT. [23]

Skener se dodává ve dvou barvách laserového paprsku. V klasicky červené pro běžná měření nebo v modré barvě. Technologie s modrým paprskem využívá laserovou diodu s kratší vlnovou délkou 405 nm. Vlastnosti tohoto rozsahu vlnové délky umožňují spolehlivé měření, kterého bylo dosud obtížné dosáhnout pomocí červených laserových skenerů. Jeho přednosti se projevují zejména při měření dočervena rozpálených kovů nebo (polo)transparentních a organických materiálů. [23]

Jedna z modifikací tohoto přístroje může měřit do rozsahu laserové linie 10 mm. Tato vlastnost umožňuje spolehlivě detekovat nejmenší detaily, protože rozlišení snímače se soustředí na menší měřicí plochu. V kombinaci s modrým laserem umožňuje přesné měření například v oblasti výroby elektroniky. [23]

Stejně jako u senzoru TLE1 i v této kapitole jsou vybrané informace ze stránek výrobce Micro-Epsilon o skeneru scanCONTROL. Veškeré informace lze najít na jejich internetové stránce, která se nachází v seznamu použité literatury pod číslem [23].

Tab. 6 - Parametry skenerů scanCONTROL [23]

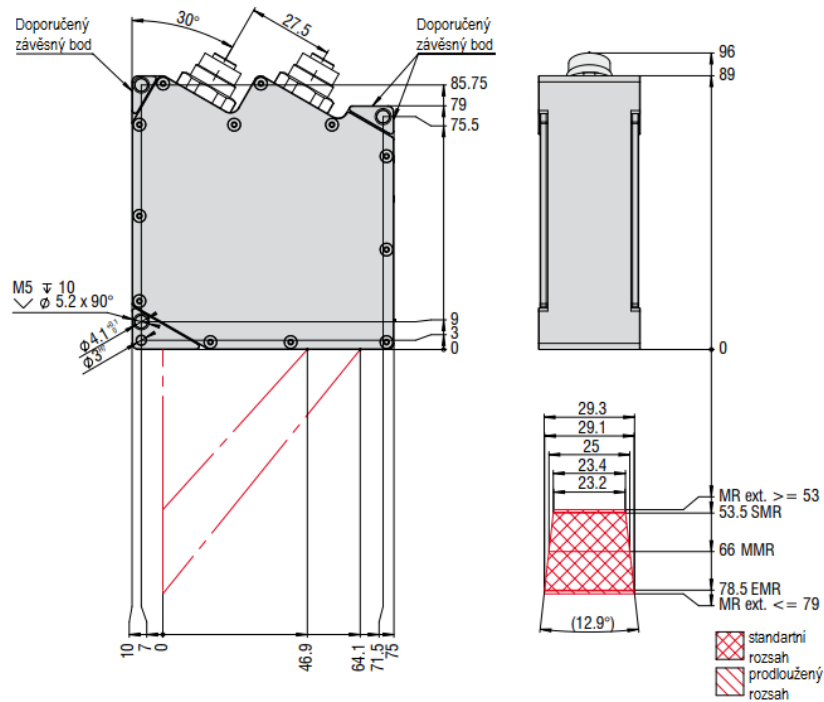
Model		29xx-25	29xx-50	
Osa Z (výška)	Standartní měřicí rozsah	Začátek měřicího rozsahu	53,5 mm	70 mm
		Konec měřicího rozsahu	78,5 mm	120 mm
		Výška měřicího rozsahu	25 mm	50 mm
	Prodloužený měřicí rozsah	Začátek měřicího rozsahu	53 mm	65 mm
		Konec měřicího rozsahu	79 mm	125 mm
	Linearita <sup>1)</sup>	(2 sigma)	±0,10% FSO	±0,10% FSO
Referenční rozlišení <sup>2) 3)</sup>		2 μm	4 μm	





Osa X (šířka)	Standartní měřicí rozsah	Začátek měřicího rozsahu	23,4 mm	42 mm
		Konec měřicího rozsahu	29,1 mm	58 mm
	Prodloužený měřicí rozsah	Začátek měřicího rozsahu	23,2 mm	40 mm
		Konec měřicího rozsahu	29,3 mm	60 mm
Rozlišení osy X		1280 pixelů/profil		
Frekvence snímání profilu	U standartních modelů	až do 300Hz		
	Highspeed model	až do 2 000Hz		
Výstup hodnot z měření		Ethernet (UDP / Modbus TCP); RS422 (ASCII / Modbus RTU) Analog <sup>4)</sup> ; Switch signál <sup>4)</sup> PROFINET <sup>5)</sup> ; EtherCAT <sup>5)</sup> ; EtherNet/IP <sup>5)</sup>		
Světelný zdroj	Standartní	Polovodičový 658 nm (červený)		
	Volitelný	Polovodičový 405 nm (modrý)		
Výkon laseru	Standartní	≤ 8mW (třída laseru 2M)		
	Volitelný	≤ 20 mW (třída laseru 3B)		
Rozměry		96 x 85 x 33 mm		
Hmotnost bez kabelů		380 g		
Zdroj napětí		11-30VDC, 24V, 500mA, IEEE 802.3af třída 2, Power over Ethernet (POE)		

- 1) Pro standartní měřicí rozsah
  - 2) Měřený objekt: Micro-Epsilon standardní objekt (kovový, difuzně odrážející materiál)
  - 3) Podle jednorázového zprůměrování přes měřicí pole (640 pixelů)
  - 4) Pouze s výstupní jednotkou
  - 5) Pouze s bránou ScanCONTROL
- FSO = Full scale output (= výstup na celém měřítku)



Obr. 25 Schema skeneru scanCONTROL 29xx-25 [24]

Firma Micro-Epsilon ještě vyrábí další dvě modifikace tohoto laserového skeneru s rozsahem pro měření výšky 8 mm a 100 mm, ale jelikož jejich rozsah je už vzdálen od rozsahu zkoumaného skeneru TLE1 od firmy Metralight, nezařadil jsem jejich parametry do tabulky (Tab. 6).

### Srovnání skenerů Metralight TLE1 s Micro-Epsilon scanCONTROL

Jedna z výhod senzoru scanCONTROL je možnost zakoupení varianty s modrým laserem. To rozšiřuje možnosti aplikace toho skeneru. Další výhodou je větší množství modifikací skeneru, které lze pak použít pro konkrétnější úlohy. Nevýhodou toho skeneru je horší rozlišovací schopnost ve směru osy Z proti skeneru TLE1.

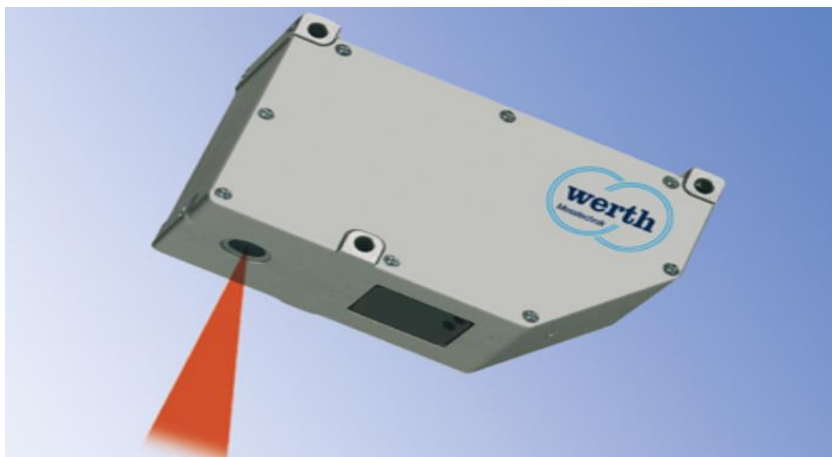
#### 2.5.2.2. Werthmesstechnik GmbH - Werth Laser Line Probe (LLP)

Jak už z názvu vyplývá, jedná se opět o liniový laserový skener, který funguje na principu triangulace. Senzor může být součástí multisenzorových souřadnicových měřících strojů od firmy Werthmesstechnik. Díky této možnosti lze doplnit laserový skener o další snímače jako například o dotykové sondy. Výkon laseru je 15 mW s polovodičovým aktivním prostředím a jeho laserová třída je 2M, což znamená, že není lidskému zraku nebezpečný, pokud oblast průřezu světelného paprsku není redukována lupou, čočkami

nebo teleskopy. Senzor je osazen maticovým CMOS snímačem, na kterém se promítá profil měřeného objektu. Kamera má poměrně vysokou měřicí frekvenci na lesklých a matných površích a disponuje automatickou regulací intenzity. [24, 25]

Tab. 7 - Parametrů skeneru Werth Laser Line Probe [24]

Werth Laser Line Probe (LLP)	
Laser	polovodičový, 655 nm (červený), s výkonem 15mW třída 2M
Snímač	CMOS
Maximální rychlost snímání linií	250 linií/s
Rozsah v ose X (šířka)	15 mm
Rozsah v ose Z (výška)	25 mm
Rozlišení v ose X	1024 pixelů
Vzdálenost skeneru od středu měřícího rozsahu	75 mm
Maximální chyba	0,050 mm



Obr. 26 - Werth Laser Line Probe (LLP) [26]

### Vyhodnocení naměřených dat

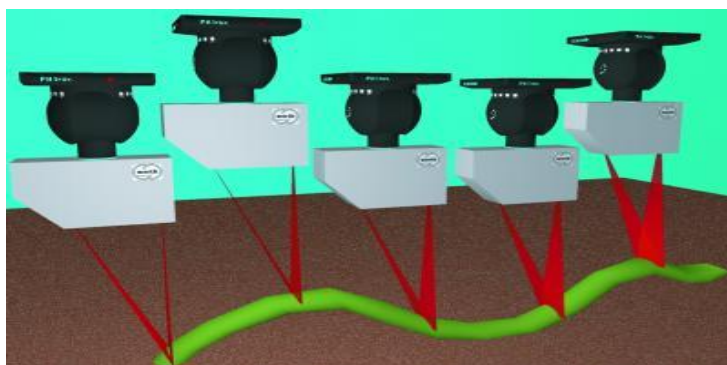
Výrobce poskytuje software Wert 3D Modul, který vyhodnocuje získané obecné plochy kontinuálním měřením a porovnává naskenované hodnoty s nominálními daty z CAD modelu. Firma Wert poskytuje multisenzorové souřadnicové měřicí stroje, na kterých lze digitalizovat předměty za pomoci jak laserových snímačů, tak optických, či s pevným dotykem bez jakéhokoliv dalšího zásahu. Dotykovým a optickým snímačem může obsluha měřit jednotlivé body a současně pomocí laserového skeneru snímat oblasti, kde je zapotřebí podrobnější vyhodnocení, jelikož skener snímá 20 000 bodů za sekundu. Z toho

důvodu nemusí uživatel vyměňovat příslušenství, zapojovat kabely, nebo zabývat se vyhodnocováním dat jiným strojem. Dodavatel poskytuje software, kterým lze zpracovat naměřená data ze všech snímačů jednoho stroje naráz. Senzor Werth Laser Line Probe má využití, stejně jako u všech optických měřících zařízení, při měření měkkých předmětů, kde by kontaktní metody zkreslovaly výsledky. Dále s ní je možné porovnávat naměřená data s CAD modelem, pomáhá při vytváření prototypových dílů, v reverzním inženýrství a při 3D modelování. [24]

### Inspekce objektu LLP skenerem

Skener v kombinaci s otočnou a sklopnou hlavou může měřit místa na objektu, která jsou hůře dostupná, například v závislosti na triangulačním principu. Přístroj lze naklopit a otočit do 720 pozic, které se automaticky kalibrují. LLP senzor umožňuje měření bodů (bod ve středu linie laseru), přímek (jednoduché seřmutí linie laseru), křivek (dráha skenování definovaná nominální křivkou či jednotlivými body) a ploch (obdélníková oblast definovaná startovním/koncovým a směrovým bodem nebo trajektorií generovanou na CAD nominálních datech). Plochy se mohou skenovat za pomoci CAD modelu, kde se navrhne trajektorie, po které se pak hlava se skenerem pohybuje. Tato metoda se nazývá *spline-scanning*. Díky této metodě skener kopíruje povrch v exaktní výšce od objektu a předepsané trajektorii, tím dosahuje dobré přesnosti. Skener přejíždí plynule nad měřeným předmětem a snímá z něho data za pomoci profilu vytvářejícího se na něm. Přístroj má vystavěnou automatickou kalibraci laseru na snímaný materiál pro dosažení kvalitního skenování. Takto se získá síť bodů, která je potřebná pro další zpravování v počítači. [24]

### Srovnání skenerů Metralight TLE1 s Werth Laser Line Probe



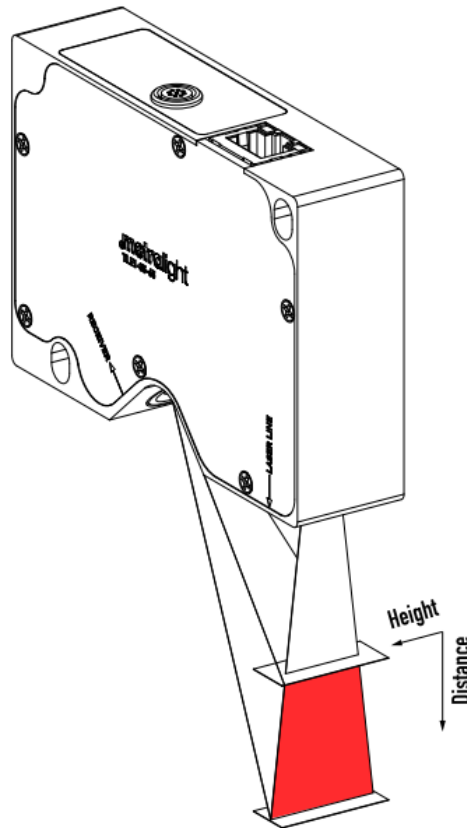
Obr. 27 - Skenovací metoda "spline-scanning" [25]

Bohužel výrobce Werth neposkytuje mnoho informací o zařízení, ale i ze zjištěných parametrů lze usoudit, že jejich liniový laserový skener slouží převážně pro jejich souřadnicové měřicí stroje, a to spíše jako podpůrný senzor, pro získání více dat během jednoho měření. Ale díky této možnosti může senzor s poměrně dobrou přesností sloužit jako 3D skener. Nevýhodu shledávám v menší rozlišovací schopnosti oproti skeneru TLE1 a zároveň v menším rozsahu měření. Další výhodou TLE1 senzoru vidím v možnosti ethernetového rozhraní, přes které procházejí již zpracovaná data, příkazy z počítače a zároveň slouží i jako zdroj elektrického napětí.

### **3. Určení přesnosti měření 2D skeneru Metralight TLE1**

Tato část práce se zaměřuje na konkrétní laserový 2D skener od firmy Metralight a jejich model a modifikaci TLE1-35-65. V kapitole 2.5.1 jsou popsány vlastnosti a parametry tohoto zařízení udávané výrobcem. Například výrobce udává rozlišovací schopnost přístroje, ale už ne jeho přesnost měření. Tato hodnota se mění v závislosti na mnoha faktorech, jako je odrazivost materiálu, poloha předmětu od skeneru nebo nastavení senzoru, a proto není snadné ji jednoznačně stanovit. Cílem práce je se pokusit tuto hodnotu zjistit za optimálních podmínek nastavení laserového skeneru.

Přístroj TLE1 měří ve dvou dimenzích (2D) tedy dvou rozměrech. V tomto případě jedním rozměrem je vzdálenost ve směru od skeneru (distance). Druhým rozměrem je výška paprsku (height) podél, která se zobrazuje na snímači linie odraženého paprsku. Proto je zapotřebí určit v těchto osách přesnost měření. Z toho důvodu musel být nejprve navrhnout způsob měření, kde se ověří vliv změny vzdálenosti předmětu od skeneru a vliv polohy měřené linie v celém měřicím poli skeneru. Dále bylo nutno zjistit, jaký má vliv povrch měřeného materiálu.



Obr. 28 - Vizualizace měřicího rozsahu TLE1 senzoru [23]

### 3.1. Příprava experimentu

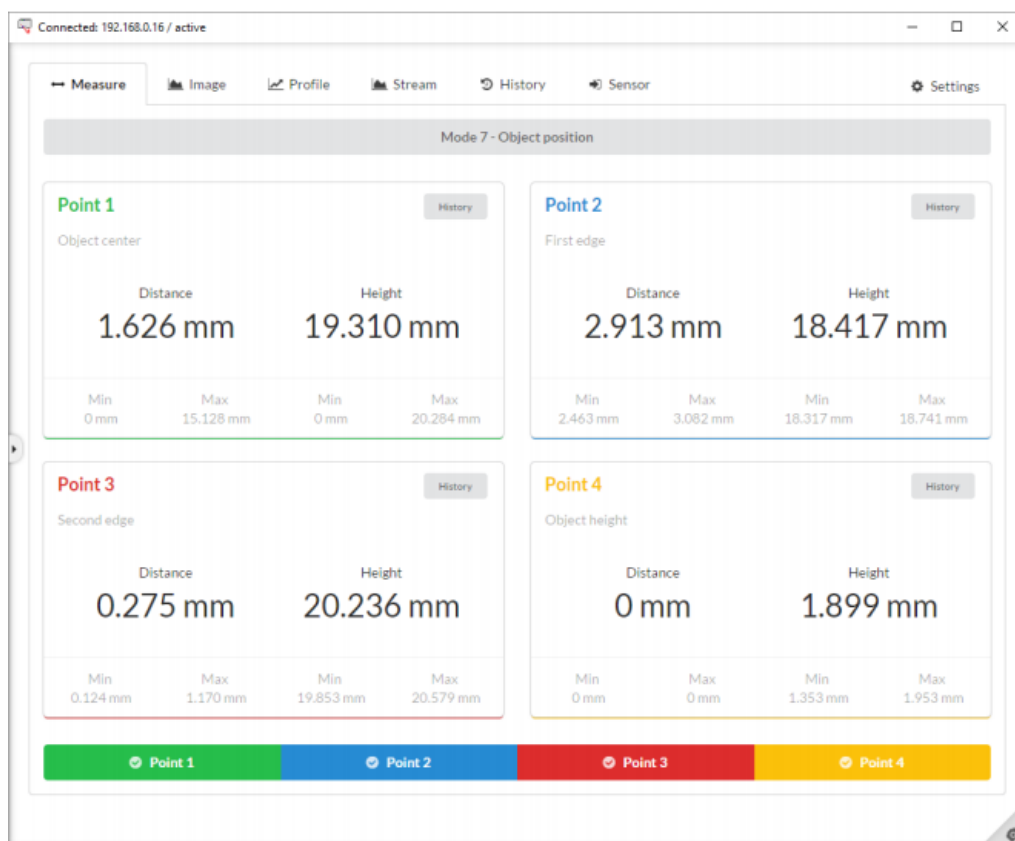
Celému důkladnému zkoumání skeneru předcházela přípravná měření, kdy došlo k seznámení se se zařízením, zjišťování, jak skener pracuje, jaký mají vliv hrany a různé materiály na měření a jak navrhnout zařízení pro určení jeho přesnosti.

Jedna z prvních věcí byla práce se skenerem a softwarem TL Studio dodávaným výrobcem. Software se hlavně využívá k nastavení parametrů senzoru pro konkrétní měřicí aplikace. Takto nastavený senzor se následně integruje do systému zákazníka a hodnoty z měření se získávají pomocí datových příkazů. Zařízení může mít zákazníkem přednastaveno až 8 variant parametrů, mezi kterými lze přepínat datovými příkazy. Každá varianta může být pro 8 různých situací za použití pouze jednoho skeneru. Po připojení senzoru s počítačem lze v TL Studiu využít 6 záložek: Measure (měření), Image (obraz), Profile (profil), Stream, History (historie), Sensor a Settings (nastavení). Nejdůležitější jsou první tři a Settings. [22]

Vybrané informace o TL Studiu jsou převzaty z katalogu výrobce. Veškeré informace jsou dohledatelné na stránce uvedené v seznamu literatury po číslem [22].

### Záložka Measure (měření)

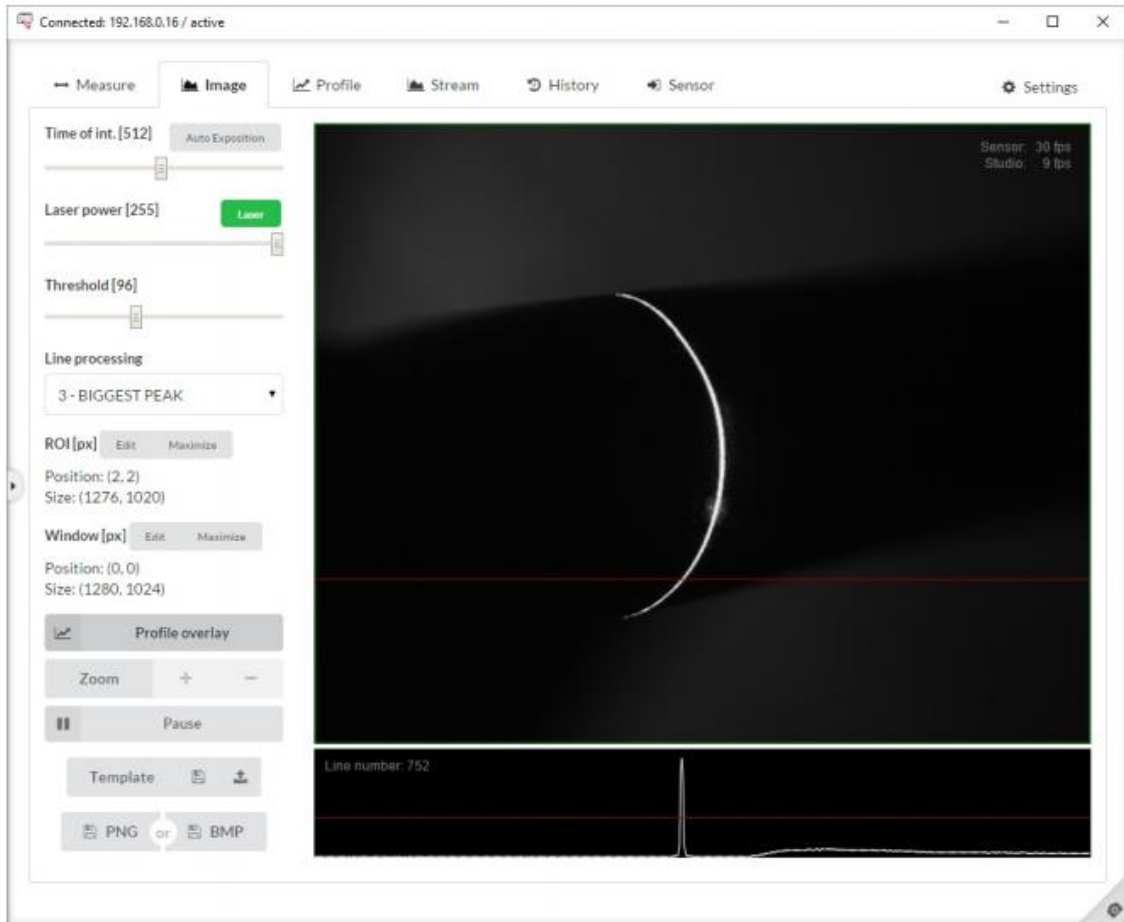
Z záložky měření nalezneme hodnoty distance a height pro 4 naměřené body z nasnímaného profilu. Každý bod může znamenat něco jiného v závislosti na vybraném měřícím módu. [22]



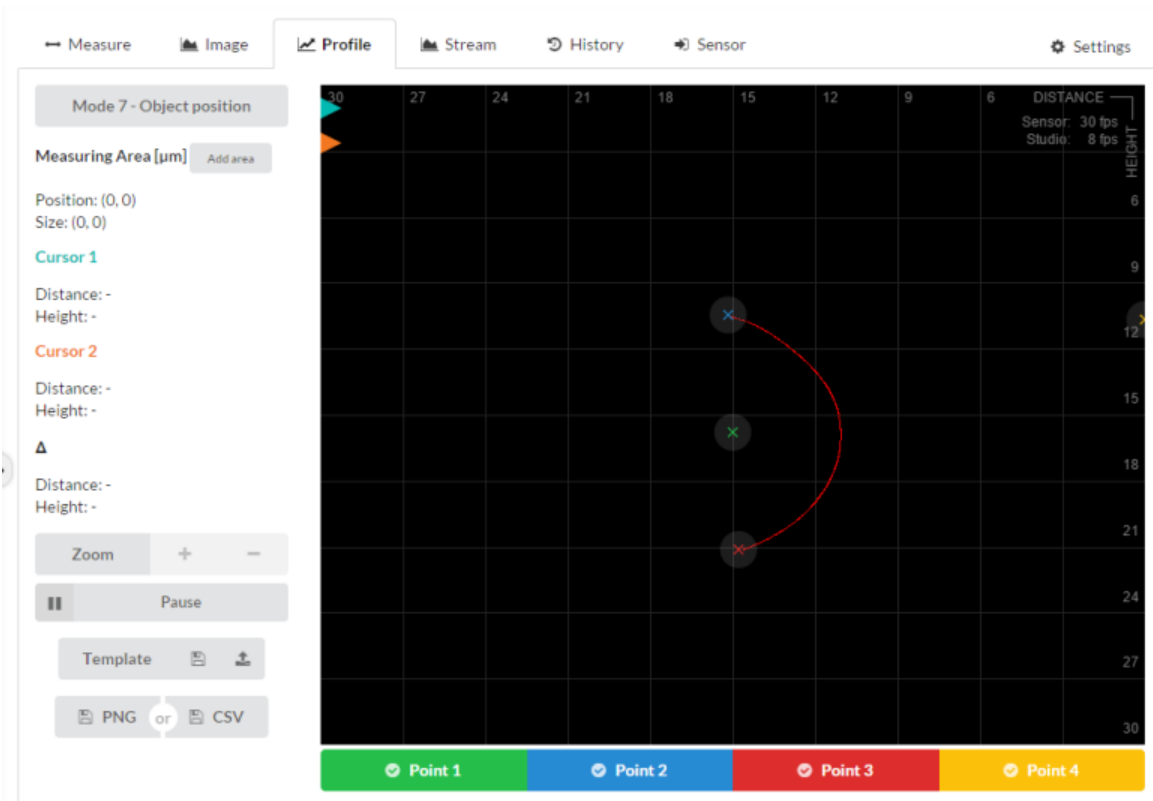
Obr. 29 - Záložka Měření [23]

### Záložka Image (obraz)

Záložka Image zobrazuje nezpracovaná nasnímaná data ze snímače. Nastavení v této záložce ovlivňují sběr dat a zpracování profilu z obrazových dat. Jednotkami dat jsou pixely. Pomocí funkce *Profile overlay* lze vidět aktuální zpracovaný profil softwarem, který se překrývá přes profil zaznamenaný snímačem, takže veškeré přenastavení skeneru se může ihned projevit na zpracovaném profilu. Zde můžeme přenastavit parametry, které jsou popsány v kapitole 2.5.1.2: Time of integration, Laser power, Threshold, Line processing, Window a ROI (Region Of Interest). [22]



Obr. 30 - Záložka Image [23]



Obr. 31 - Záložka Profile [23]



### **Záložka Profile (profil)**

V této záložce se nachází zpracovaný a kalibrovaný profil vycházející ze získaných dat ze snímače. Pro měření lze v TL Studiu nastavit délkové jednotky milimetr, mikrometr a palec. Dále se zde nacházejí dva kurzory sloužící k měření vodorovných a svislých vzdáleností mezi libovolnými dvěma body profilu. Zde se volí měřicí módy. Na základě zvoleného režimu měření se body, které představují aktuální zpracovaný výsledek, zobrazují přes nasnímaný profil. [22]

### **Záložka Stream**

Funkcí Stream (proud) lze analyzovat a číst data pro dynamické snímání. Tedy pro dynamicky měnící se scény a jevy při maximální snímkové frekvenci. [22]

### **Záložka History (historie)**

Představuje všechna proběhlá měření na senzoru za určitý čas při softwarové obnovovací frekvenci. Zde lze sledovat vývoj měření za dané období. [22]

### **Záložka Senzor**

V záložce se nachází všechny dostupné parametry skeneru na jednom místě. Parametry se dají upravovat a odlišná nastavení pro různé aplikace lze ukládat do 8 paměťových bank. Popis jednotlivých parametrů je v kapitole 2.5.1.2 „Možnosti nastavení skeneru.“ [22]

### **Záložka Settings (nastavení)**

Obsahuje nastavení IP adresy senzoru, nástroje pro aktualizaci / čtení firmwaru senzoru a paměti a informace o verzi. [22]

#### **3.1.1. Předběžná měření**

Byly použity různé předměty v různých pozicích jako například transparentní krycí plast, část obráběcího nože nebo zelený plastový hranol, na nich se zkoušela jejich vhodnost pro měření. Jedno z prvních měření proběhlo na koncových měrkách sloužících ke kalibraci posuvných měřidel, jelikož u nich víme jejich přesný rozměr. Ty byly naskládány a upnuty vedle sebe tak, aby vytvářely schody a mezery mezi sebou, které se následně zkoušely

změřit skenerem. Bohužel měřky mají z výroby zkosené hrany, což vnášelo nepřesnosti do měření, a tím se staly nevyhovujícími.

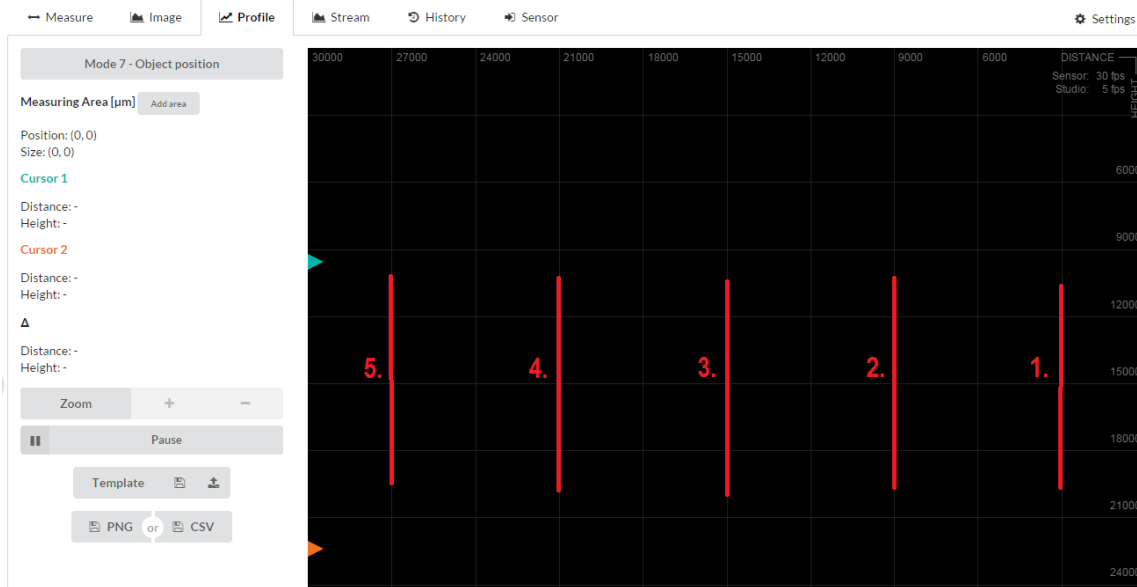
*Tab. 8 - Velikosti koncových měrek*

Tloušťky [mm]										
1	1,004	1,01	1,04	1,08	1,1	1,18	1,2	1,6	1,7	1,8

Dále byly použity předměty, které mají z výroby poměrně slušnou kvalitu tvaru, povrchu a nemají zkosené hrany. Pro měření délky profilu mezi hranami byla použity jiné koncové měrky s poměrně ostrými hranami. Pro měření mezer mezi hranami byly použity ocelové rámečky řezané elektrojiskrovým obráběním. Všechny tyto předměty byly změřeny v jednom místě pomocí mikrometru a v onom místě proběhlo i následné měření. Skener byl nastaven pro každý předmět a jeho měření ve směru distance a height zvlášť tak, aby odrazivost paprsku byla optimální, což znamená, aby obraz nebyl přeexponovaný nebo naopak podexponovaný. Vlivem změny vzdálenosti (distance) předmětu od skeneru se mění intenzita osvětlení, proto je zapotřebí udělat kompromis při nastavení skeneru tak, aby nedocházelo k přesvícení, a tím nepřesnému určení středu linie, nebo naopak podsvícení, kdy by mohlo dojít k výpadku některých bodů. U měření ve směru height byl skener nastaven na optimální hodnoty expozice, jelikož intenzita se výrazně nemění kromě krajních poloh zorného pole.



*Obr. 32 - Vizualizace jednotlivých měření ve směru height pro délku profilu*



Obr. 33 - Vizualizace jednotlivých měření ve směru distance pro délku profilu

U každého vzorku proběhlo několik měření ve směru distance a ve směru height. Takto malý počet měření byl spíše informativní, aby se zjistilo chování skeneru. Po každém měření byl spočítán rozdíl mezi skutečným rozměrem naměřený mikrometrem a rozměrem získaným ze senzoru. Těmito měřeními se získávali pouze hodnoty pro měření délky profilů a mezer, jelikož stojan, na kterém byl skener připevněn, neumožňoval přesné polohování ve směru distance a nezaručil opakovatelnost měření.

Měření probíhala v módech 7 pro délku profilu mezi hranami, 5 pro vzdálenost mezi hranami u mezer. A pro porovnání ručně v módu 0 pomocí dvou kurzorů, které jsou v záložce *Profile*. Mód 0 slouží především pro měření distance, ale nasnímané a zpracované body profilu jsou bez filtrace (tedy bez segmentace), tím se některé body dostanou až na okraj samotné hrany. Existuje zde ale riziko, že zaměřený bod kurzorem se nachází ve skutečnosti již mimo reálnou hranu a dojde ke zkreslení naměřeného výsledku. Před každým měřením se skener a objekt vyrovnaly tak, aby byly vzájemně rovnoběžně a laserový paprsek dopadal kolmo na předmět. Kolmost se zaručí tím, že hodnoty distance krajních bodů profilu musí být co možná nejshodnější.

Parametry segmentace a subsegmentace byly ponechány v továrním nastavení, a to 32 pixelů pro segmentaci a 24 pixelů pro subsegmentaci.



Obr. 34 - Ukázka měření krycího, transparentního plastu

### Měření délky profilu - Koncová měrka



Obr. 35 - Koncová měrka o tloušťce 6,6636 mm

Byla použita koncová měrka o tloušťce 6,6636 mm.

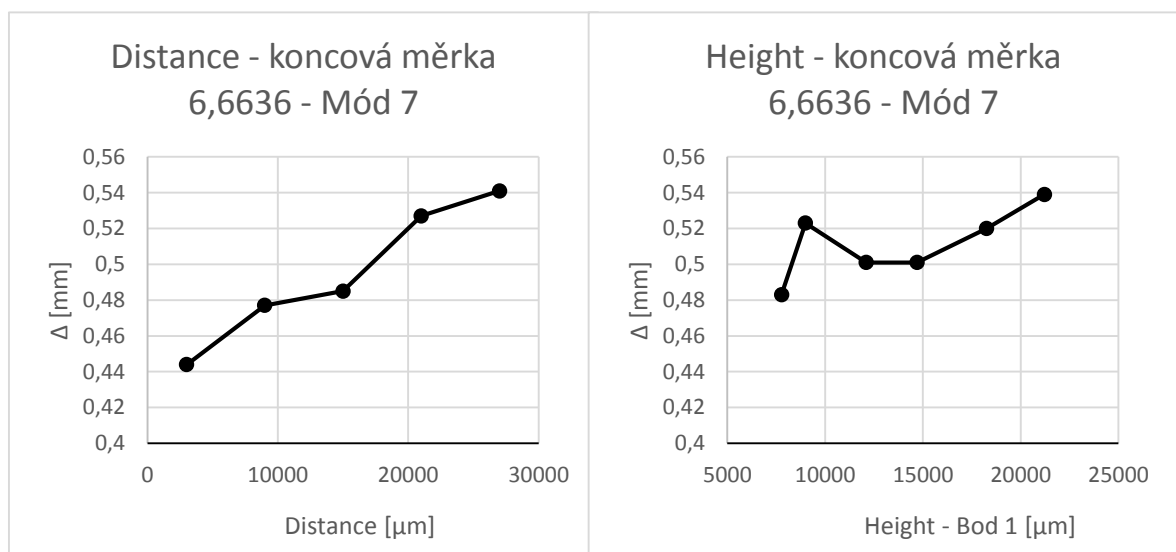
- Mód 7

Tab. 9 - Nastavení skeneru

Měření ve směru	Time of int.	Laser power	Threshold	Povrch
Distance	934	225	46	Broušená lesklá ocel
Height	777	174	59	

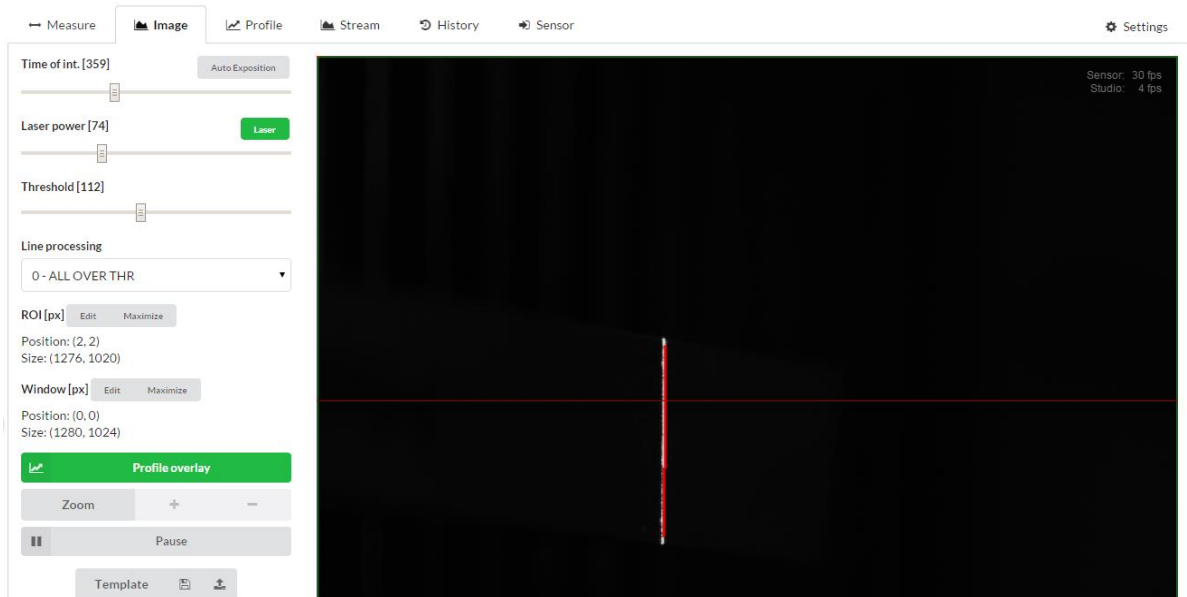
Tab. 10 - Naměřené hodnoty módem 7 pro koncovou měрку 6,6636

Měření ve směru	Pozice bodů			Průměr. hodnota distance [μm]	Naměřená hodnota skenerem [mm]	Δ [mm]
	Height [μm]					
	Bod 1	Bod 2	Bod 3			
Distance	15140	12030	18250	2958	6,22	0,444
	14729	11636	17823	9003	6,187	0,477
	15088	11999	18178	14966	6,179	0,485
	14993	11925	18062	21008	6,137	0,527
	14861	11800	17923	26956	6,123	0,541
Height	7778	4688	10869	15029	6,181	0,483
	8999	5929	12070	15034	6,141	0,523
	12107	9026	15189	15050	6,163	0,501
	14699	11618	17781	15045	6,163	0,501
	18250	15178	21322	15053	6,144	0,520
	21211	18149	24274	15064	6,125	0,539



Z měření je patrné, že rozdíl mezi skutečným rozměrem a rozměrem získaným ze skeneru je přibližně 0,5 mm. Průměrná hodnota tohoto rozdílu je ve směru distance 0,494 mm a ve směru height 0,511 mm. Ve směru distance i height je z grafu zřejmé, že s naměřené hodnoty a vypočteného rozdílu se zvyšují s rostoucí vzdáleností předmětu od senzoru a s rostoucí hodnotou height. Hodnota 0,5 mm je poměrně velký rozdíl, což znamená, že se tato metoda za těchto podmínek nedá použít v aplikacích přesného měření.

Vliv na výsledek mají hlavně hrany předmětu. Patrné je to z Obr. 37, kde je vidět, že zpracovaný profil softwaru nezasahuje až k nasnímaným hranám měřky. Na vině je nejspíše špatně zvolené nastavení segmentu a subsegmentu, který na konci profilu zjistí nedostatek pixelů pro vytvoření dalšího segmentu a o tento krajní segment zpracovaný profil zkrátí.



Obr. 36 - Image - Mód7 - Měření koncové měřky

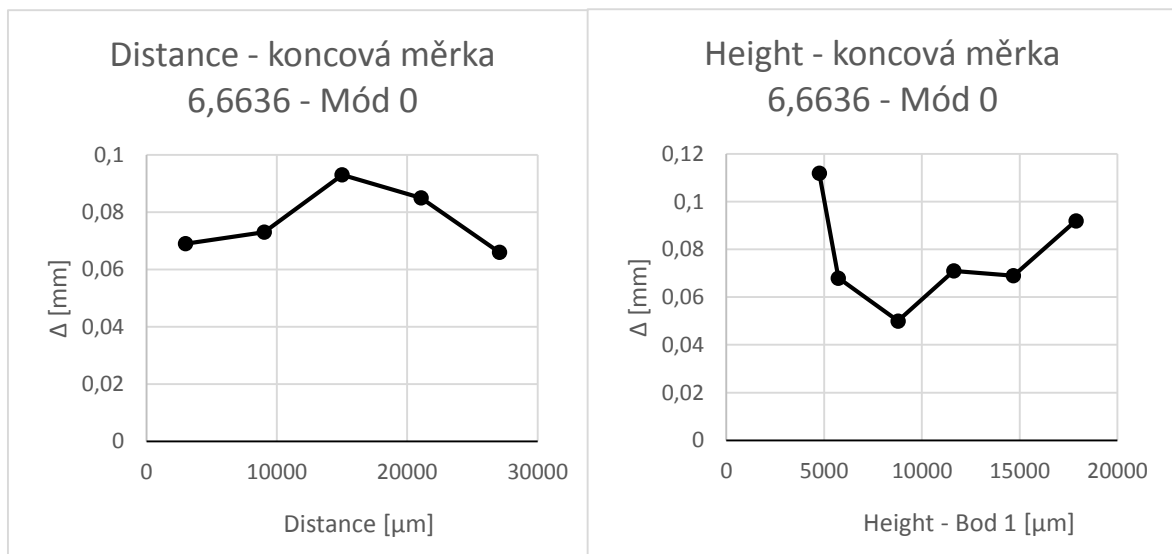
- Mód 0

Tab. 11 - Nastavení skeneru

Měření ve směru	Time of int.	Laser power	Threshold	Povrch
Distance	352	112	141	Broušená lesklá
Height	345	66	120	ocel

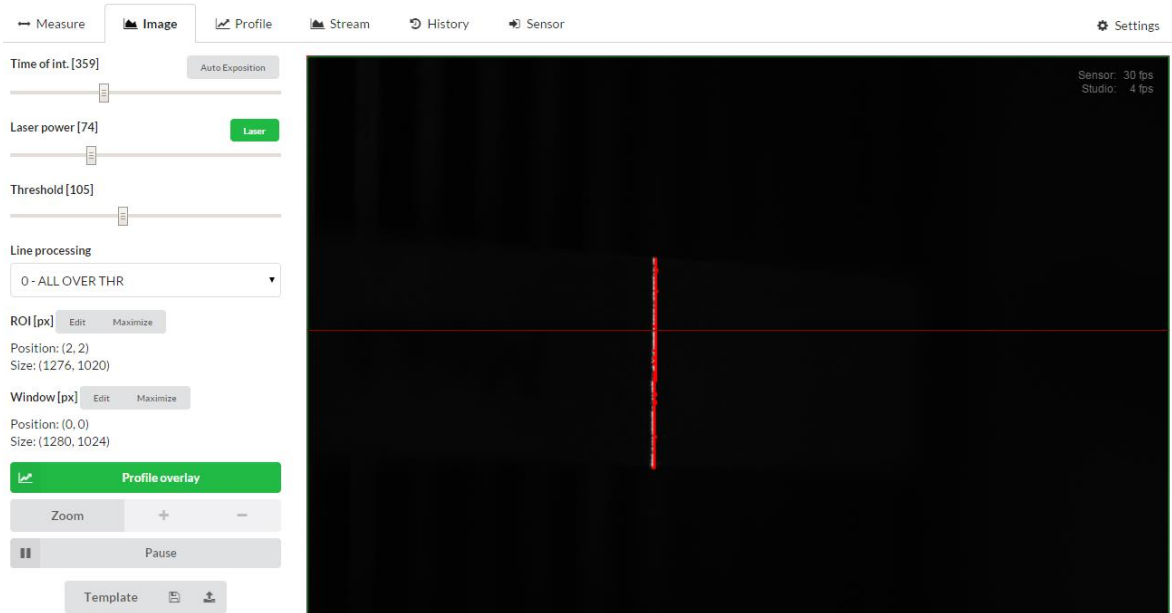
*Tab. 12 - Naměřené hodnoty módem 0 pro koncovou měрку 6,6636*

Měření ve směru	Pozice bodů			Naměřená hodnota skenerem [mm]	$\Delta$ [mm]
	Height [ $\mu\text{m}$ ]		Průměr. hodnota distance [ $\mu\text{m}$ ]		
	Kurzor 1	Kurzor 2			
Distance	12201	18796	2998	6,595	0,069
	12253	18844	9036	6,591	0,073
	12346	18917	15012	6,571	0,093
	12386	18965	21067	6,579	0,085
	12144	18742	27073	6,598	0,066
Height	4759	11311	15058	6,552	0,112
	5729	12325	15015	6,596	0,068
	8786	15400	15016	6,614	0,050
	11630	18223	15025	6,593	0,071
	14683	21278	15044	6,595	0,069
	17885	24457	15009	6,572	0,092

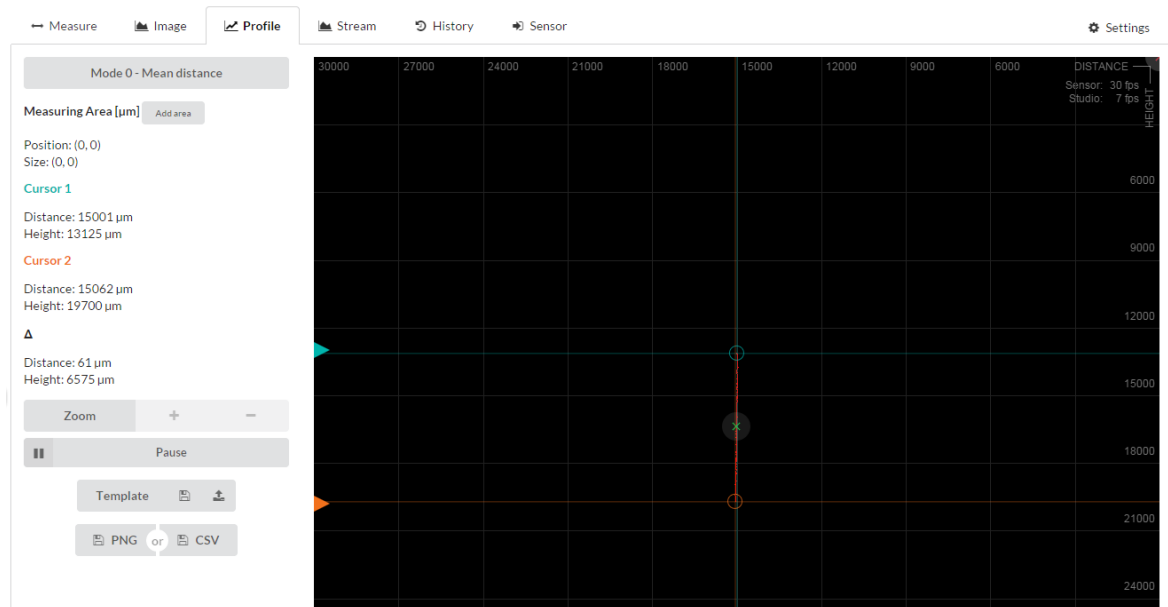


V tomto případě je vidět, že rozdíl mezi skutečnou hodnotou a hodnotou odečtenou ze skeneru se velmi přibližují. Průměrná hodnota oněch rozdílů ve směru distance a height je 0,077 mm. Grafy ukazují, že v hodnotách není žádný trend. To že se tyto hodnoty rovnají, je náhoda. Jelikož jsou všechny rozdíly kladné hodnoty, dá se usuzovat, že by vliv na měření mohly mít lehce zkosené hrany koncové měřky nebo nedostatečné osvětlení hran. Z výsledků není patrný vliv polohy profilu v zorném poli kamery. Na druhou stranu rozdíl mezi reálnou hodnotou a skutečnou není tak velký, a tím by se dalo říci, že je tato metoda poměrně přesná. Velký vliv na to má absence segmentace, protože v režimu 0 se nevyužívá,

a tudíž senzor zpracuje všechny nasnímané body, které jinak vyhodnocuje pro hodnotu distance. V průmyslu je tento ruční postup neaplikovatelný z důvodu časové náročnosti a nemožné automatizace.



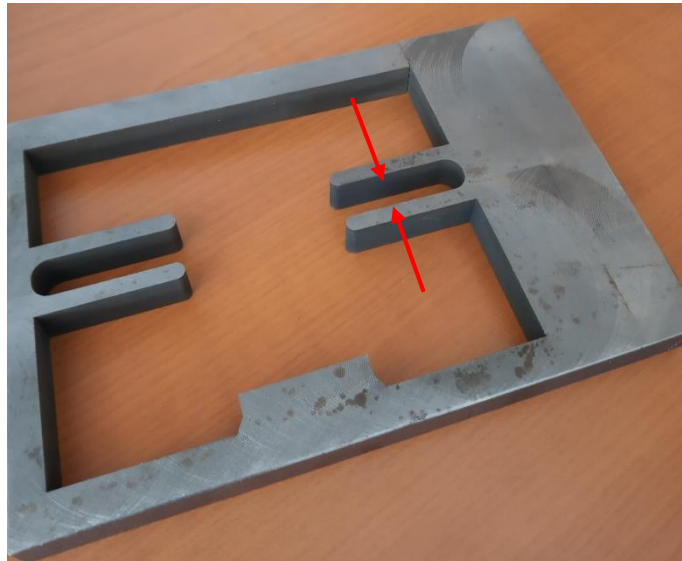
Obr. 38 - Image - Mód0 - Měření koncové měřky



Obr. 37 - Profile - Mód0 - Měření koncové měřky



## Měření délky mezery - Ocelový rámeček



Obr. 39 - Ocelový rámeček

Naměřená vzdálenost mikrometrem mezi výčnělky v rámečku je 9,59 mm.

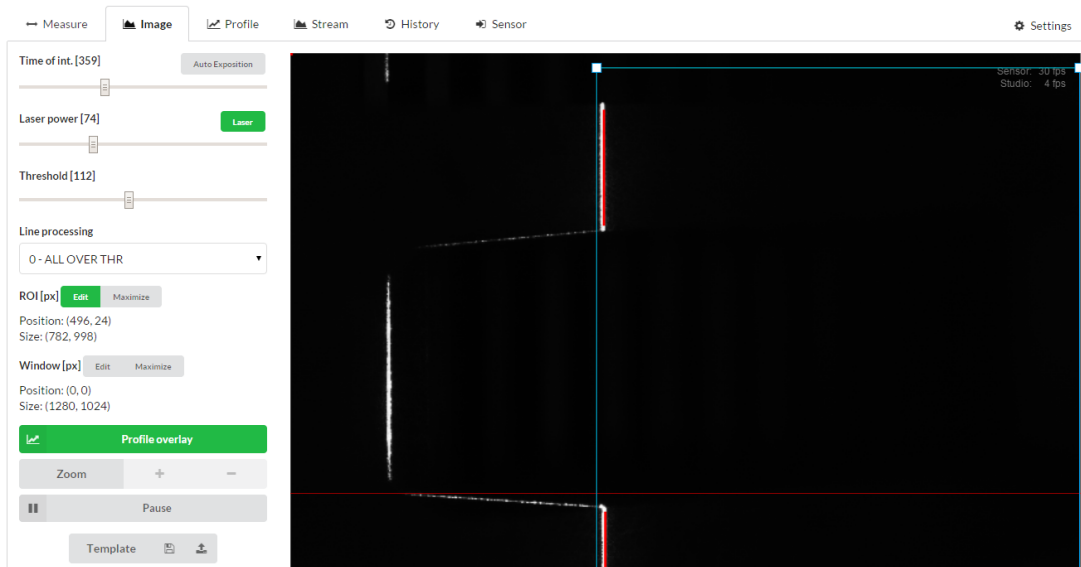
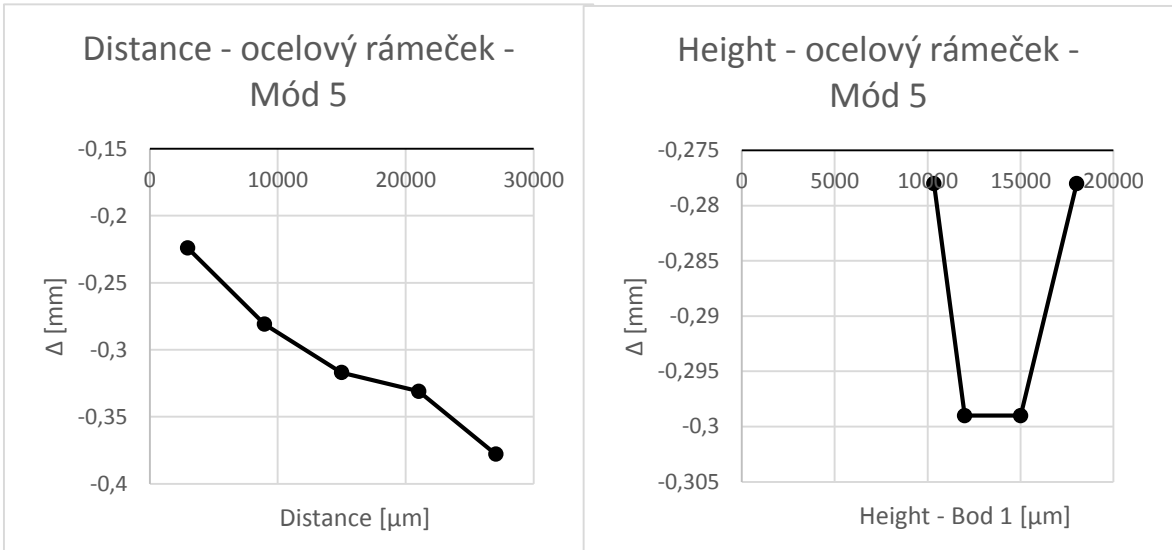
- Mód 5

Tab. 13 - Nastavení skeneru

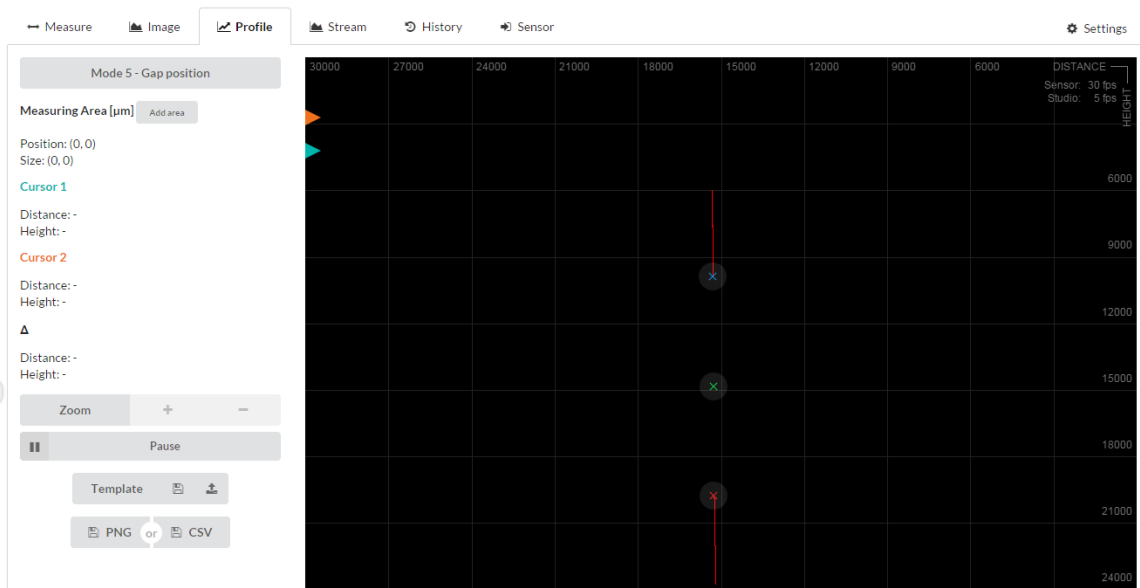
Měření ve směru	Time of int.	Laser power	Threshold	Povrch
Distance	410	47	105	Frézovaná ocel s ostrými hranami
Height	410	47	105	

Tab. 14 - Naměřené hodnoty módem 5 pro ocelový rámeček

Měření ve směru	Pozice bodů				Naměřená hodnota skenerem [mm]	$\Delta$ [mm]
	Height [ $\mu\text{m}$ ]			Průměr. hodnota distance [ $\mu\text{m}$ ]		
	Bod 1	Bod 2	Bod 3			
Distance	14432	9525	19339	2952	9,814	-0,224
	14475	9540	19411	8966	9,871	-0,281
	14530	9577	19484	14980	9,907	-0,317
	14475	9515	19436	21012	9,921	-0,331
	14405	9421	19389	27053	9,968	-0,378
Height	10339	5405	15273	14992	9,868	-0,278
	11993	7050	16936	14990	9,889	-0,299
	15004	10060	19949	15010	9,889	-0,299
	18027	13093	22961	15003	9,868	-0,278



Obr. 40 - Image - Mód5 - Měření ocelového rámečku s použitím ROI



Obr. 41 - Profile - Mód5 - Měření ocelového rámečku s použitím ROI

Z výsledků měření je vidět, že v případě měření mezery dochází k opačnému problému s hranami. Jelikož zpracovaný profil nezasahuje až na úplný kraj hrany, hodnoty rozdílů mezi skutečnou hodnotou mezery a vypočtenou senzorem jsou záporné. Stejně jako u měření délky profilu, zde má velký vliv segmentace a subsegmentace, která v tomto případě mezeru prodlouží. Průměrná hodnota rozdílu mezi skutečnou délkou a získanou skenerem ve směru distance je -0,306 mm a ve směru height je -0,288 mm. Tentokrát vidíme, že ve směru měření height není vidět žádná tendence růstu vypočteného rozdílu v závislosti na poloze mezery, ale z grafu ve směru distance je znovu patrné, že s rostoucí vzdáleností předmětu od skeneru se vypočtený rozdíl zvětšuje.

Při měření mezer se využívá oříznutí pole pro zpracování profilu funkcí ROI (Region Of Interest = oblast zájmu), aby nedocházelo k ovlivnění vyhodnocených bodů stěnami a dnem mezery.

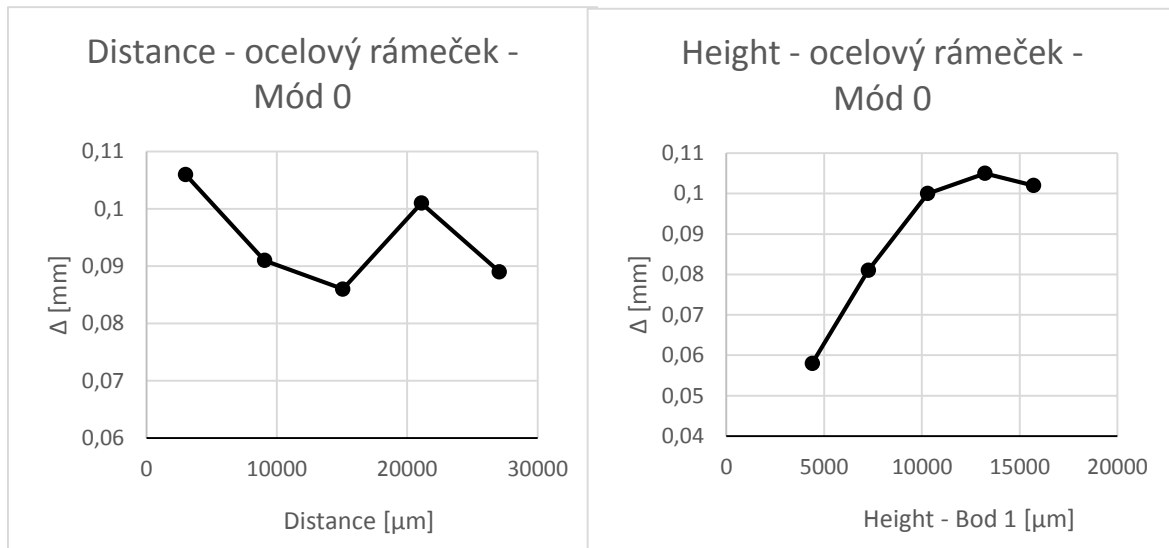
- Mód 0

Tab. 15 - Nastavení skeneru

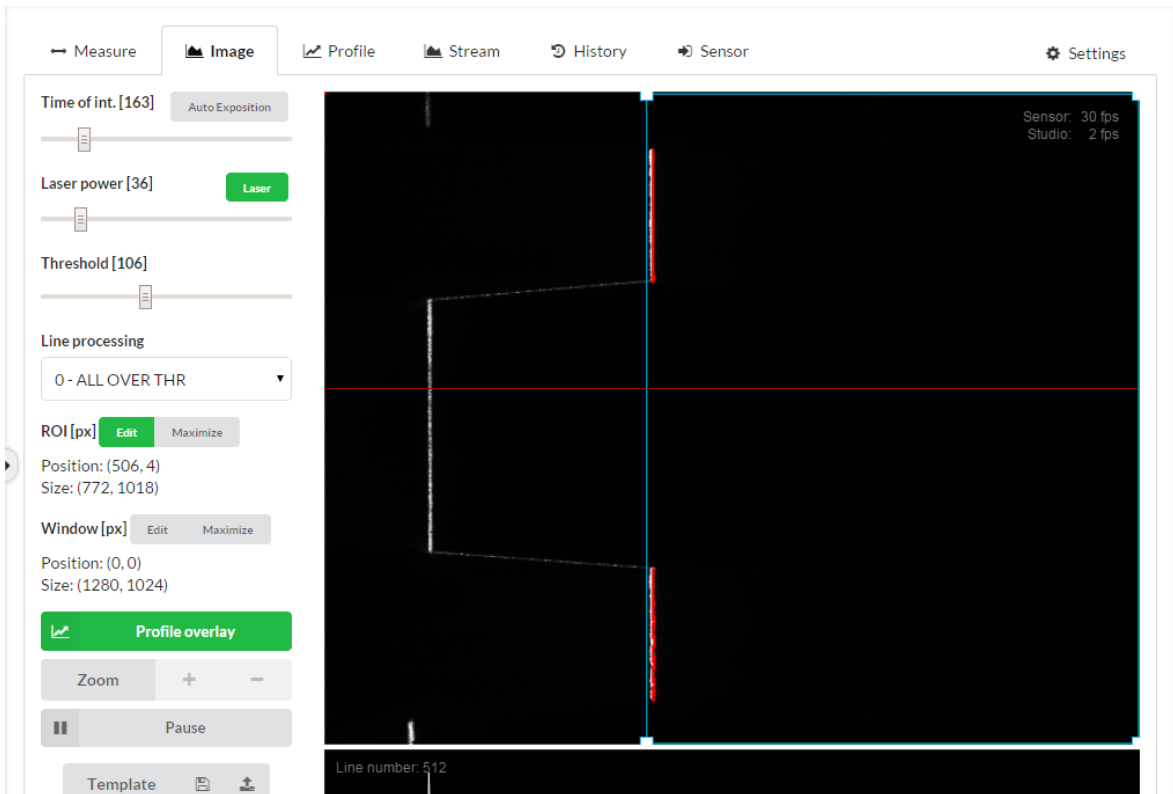
Měření ve směru	Time of int.	Laser power	Threshold	Povrch
Distance	410	47	105	Frézovaná ocel
Height	410	47	105	

Tab. 16 - Naměřené hodnoty módem 0 pro ocelový rámeček

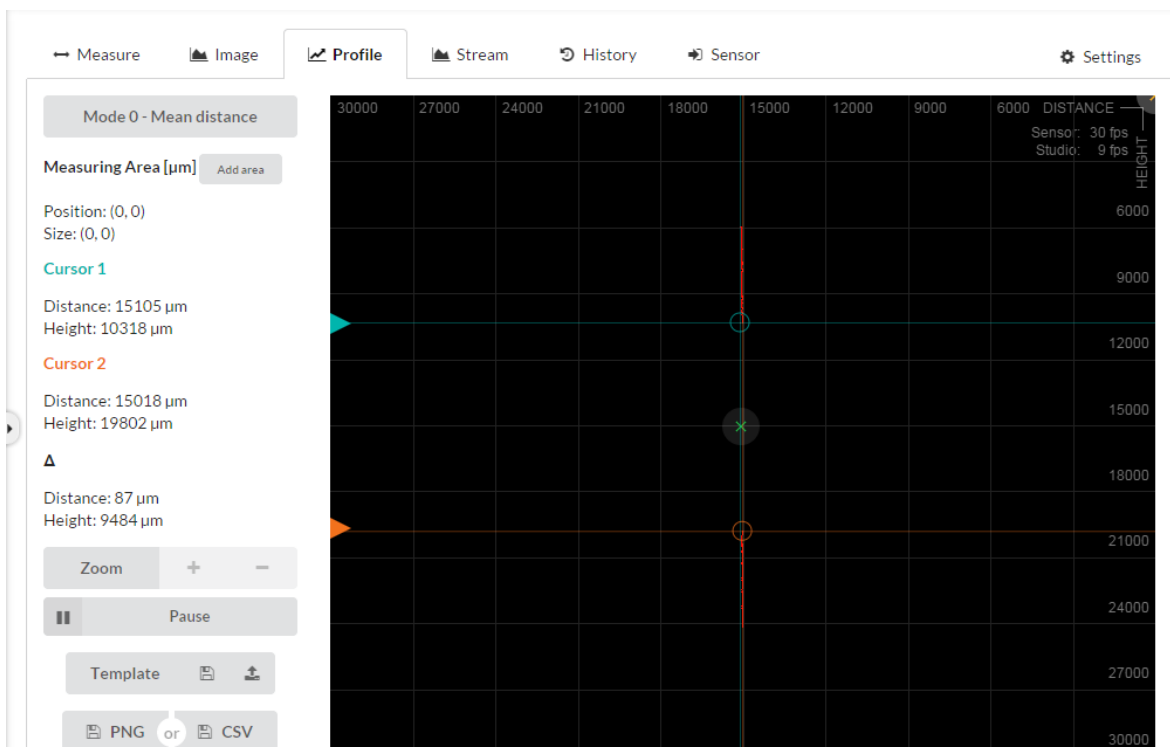
Měření ve směru	Pozice bodů			Naměřená hodnota skenerem [mm]	Δ [mm]
	Height [μm]		Průměr. hodnota distance [μm]		
	Kurzor 1	Kurzor 2			
Distance	10238	19722	2993	9,484	0,106
	10307	19806	9060	9,499	0,091
	9667	19171	15062	9,504	0,086
	9658	19147	21082	9,489	0,101
	9483	18984	27067	9,501	0,089
Height	4393	13925	15077	9,532	0,058
	7261	16770	15092	9,509	0,081
	10296	19786	15124	9,49	0,100
	13229	22714	15074	9,485	0,105
	15717	25205	15415	9,488	0,102



Z naměřených hodnot je patrné, že takto odečtené hodnoty jsou přesnější než v případě hodnot změřených módem 5. Průměrná hodnota z rozdílů vzdáleností mezi reálnou délkou mezery a naměřenou senzorem je ve směru distance 0,095 mm a ve směru height je 0,089 mm. Opět jsou tyto hodnoty velmi podobné a zároveň trend je patrný jen ve směru height, i když nemá stále stejný přírůstek. Z takto málo hodnot není možno vytvářet žádný závěr. Z tohoto lze pouze usoudit, že poloha mezery v zorném poli snímače nemá vliv na naměřené hodnoty. Rozdíl mezi skutečnou vzdáleností mezery a nasnímanou bude pravděpodobně zapříčiněn rozlišovací schopností skeneru, která je ve směru height 0,024 mm. Jelikož se vzdálenost měří ve dvou bodech, musí se tato nepřesnost násobit dvěma. Další nepřesnosti mohou vnášet přesvícené hrany, na kterých vzniká rozptýlení laserového paprsku a snímač určí body mimo skutečnou hranu.



Obr. 42 - Image - Mód0 - Měření ocelového rámečku s použitím ROI



Obr. 43 - Profile - Mód0 - Měření ocelového rámečku s použitím ROI

## Porovnání délky mezery a dna - Ocelový rámeček

Snímač indikuje odražený laserový paprsek od předmětu pod úhlem. Mezera mezi hranami nacházející se blíže k senzoru, se zdá být vlivem perspektivy větší než ve skutečnosti stejně velká mezera, která se nachází dále od senzoru. To souvisí i s rozlišením snímače. Předměty, které se nachází blíže k snímači, mají lepší rozlišení (více pixelů na jedem mm) než předměty vzdálenější od skeneru. Zde nastupuje matematické zpracování softwarem, který musí tento hendikep dorovnat.

Následující měření má za účel nastínit, zda je tato korekce softwarem správná a dostačující. Proto bylo opět zvoleno měření na výčnalcích ocelového rámečku, kde se změřila délka reálné mezery, skenerem se následně měřila vzdálenost mezery mezi hranami a délka profilu dna. Jednotlivými měřeními se měnila poloha objektu ve směru distance a height stejně, jako u předešlých měření. Během jedné polohy objektu se vždy změřila jak mezera mezi hranami, tak délka profilu dna. Změřené hodnoty se porovnály se skutečnou délkou mezery a vypočtené rozdíly pro mezeru a dno se také porovnály.

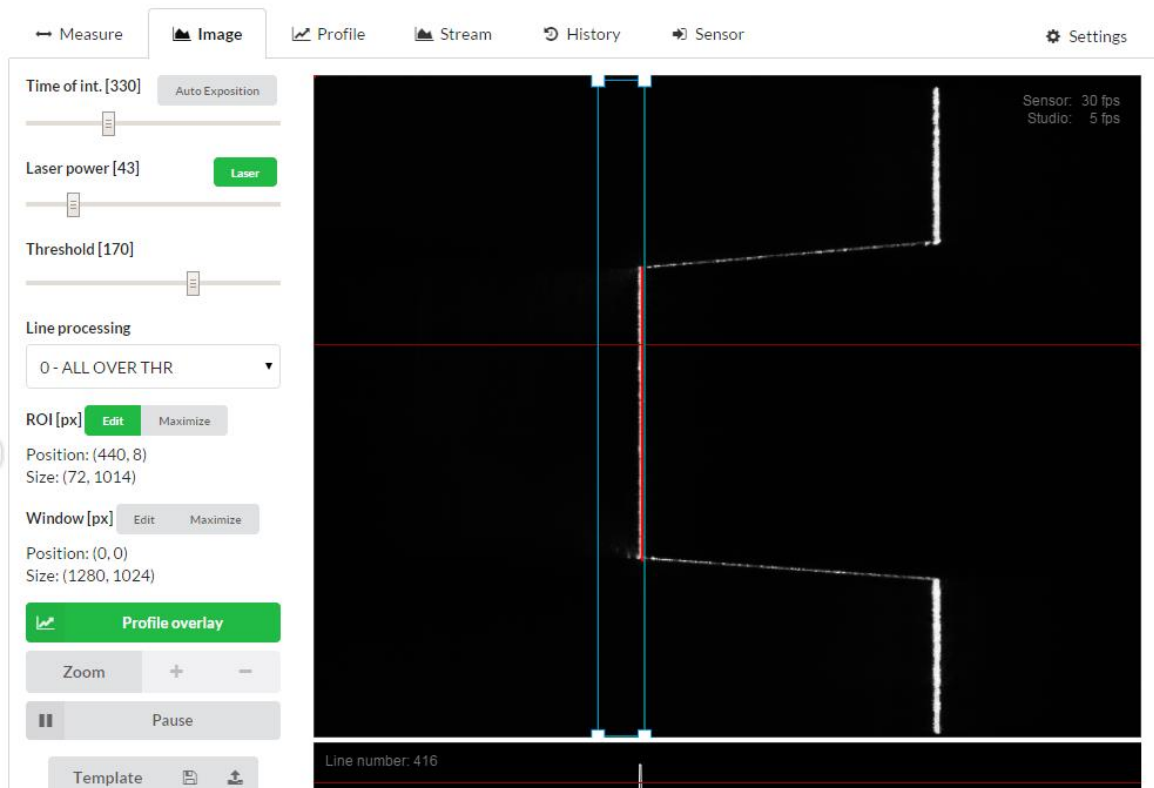
Měření proběhlo pro větší přesnost v módu 0, aby zde nebyl vliv segmentace. Délka mezery naměřené mikrometrem je 9,6 mm a tloušťka rámečku je 12,2 mm. Hodnota se liší od předešlého měření z důvodu změny místa měření na rámečku. Nastavení skeneru bylo z důvodu dostatečného nasvícení jak vrchu rámečku, tak dna mezery.

*Tab. 17 - Nastavení skeneru*

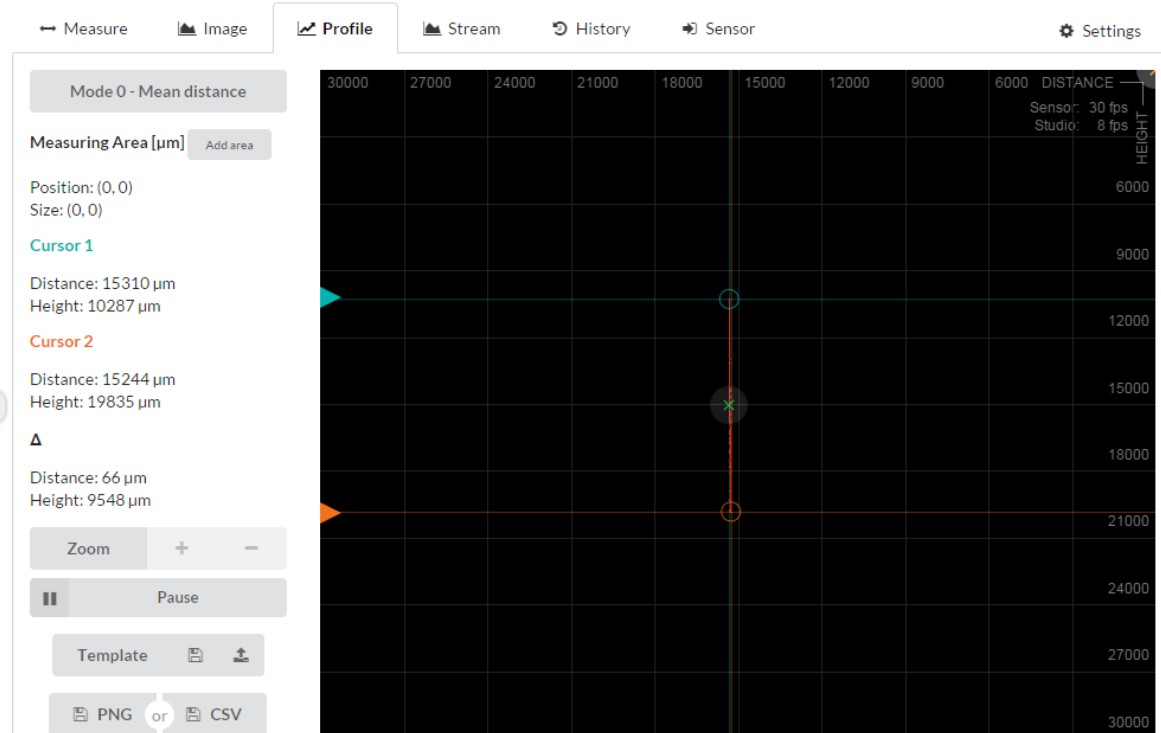
Měření ve směru	Time of int.	Laser power	Threshold	Povrch
Distance	330	43	170	Frézovaná ocel s ostrými hranami
Height	330	43	170	

Tab. 18 - Naměřené hodnoty mezery a dna módem 0 pro ocelový rámeček

Měření ve směru	Měření dna a mezery	Pozice bodů			Naměřená hodnota skenerem [mm]	$\Delta$ [mm]	$\Delta$ M-D [mm]
		Height [ $\mu\text{m}$ ]		Průměr. hodnota distance [ $\mu\text{m}$ ]			
		Kurzor 1	Kurzor 2				
Distance	M	10034	19524	3027	9,49	0,11	0,055
	D	9954	19499	15239	9,545	0,055	
	M	9956	19456	9099	9,5	0,1	0,032
	D	9897	19429	21291	9,532	0,068	
	M	9983	19445	15060	9,462	0,138	0,086
	D	9902	19450	27305	9,548	0,052	
Height	M	5457	14941	8941	9,484	0,116	-0,285
	D	5395	14594	21144	9,199	0,401	
	M	10431	19941	9009	9,51	0,09	0,011
	D	10352	19873	21189	9,521	0,079	
	M	14803	24282	9031	9,479	0,121	0,049
	D	14729	24257	21231	9,528	0,072	



Obr. 44 - Image - Mód0 - Měření dna ocelového rámečku



Obr. 45 - Profile - Mód0 - Měření dna ocelového rámečku

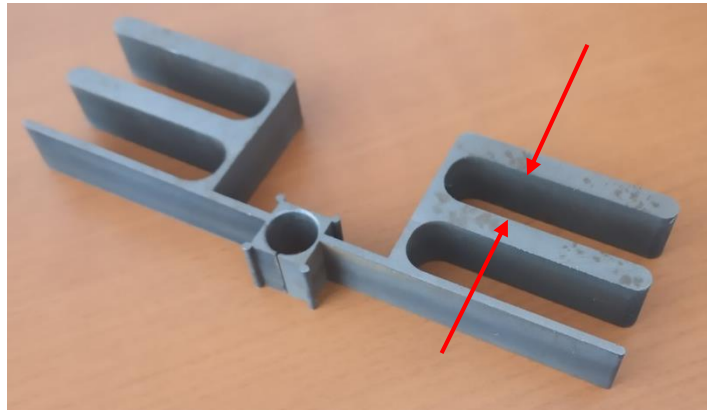
Výsledky měření ukázaly, že při měření mezery mezi hranami je větší odchylka od skutečné vzdálenosti než u měření dna. To může být následkem rozptylu světla na hranách, tím se nasnímaná mezera zmenší a zpracované body se objeví mimo skutečnou hranu. Naopak u dna dochází k nepatrnému prodloužení profilu vlivem stěn, i když jsou odebrané z oblasti zájmu pomocí ROI. Dále zde může mít vliv rozlišení snímače. Průměrná hodnota rozdílů u mezery mezi hranami se skutečnou délkou se rovná 0,113 mm, což je podobná hodnota jako u předešlého měření, a vlivy budou stejně. U měření dna je průměrná hodnota rozdílů se skutečnou délkou rovna 0,054 mm, bez započtení prvního měření ve směru height, kde nejspíše došlo k chybě při měření. To je poměrně nízká odchylka od reálné hodnoty a můžeme říci, že tento postup je přesnější, protože vliv stěn se dá při měření snáze odstranit pomocí ROI, než vliv rozptylu paprsku na hranách. Porovnání rozdílů mezi mezerou a dnem je v průměru 0,038 mm (bez započítání prvního měření ve směru height). Tato hodnota nám toho příliš neřekne, z důvodu malého počtu měření, které bylo spíše orientační. Vliv matematiky v software se nedá jasně prokázat, protože hodnoty nemají v žádném směru měření postupný trend, který by nasvědčovat nesprávnému nastavení výpočtu kompenzace perspektivy při měření.



## Porovnání délky mezery a dna - Ocelová vidlička

Toto měření proběhlo stejným způsobem a za stejným účelem jako předešlé měření. Jeho důvod byl získání více dat a možnost porovnání.

Mikrometrem byla změřena mezera mezi hranami vidličky o délce 9,57 mm. Tloušťka vidličky je 12,2 mm. Předmět má ostré hrany bez zkosení.



Obr. 46 - Ocelová vidlička

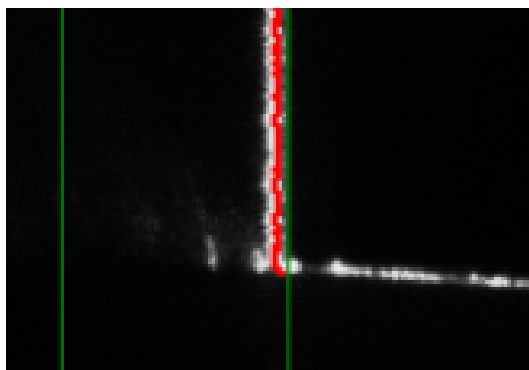
Tab. 19 - Nastavení skeneru

Měření ve směru	Time of int.	Laser power	Threshold	Povrch
Distance	268	40	80	Frézovaná ocel
Height	137	68	124	

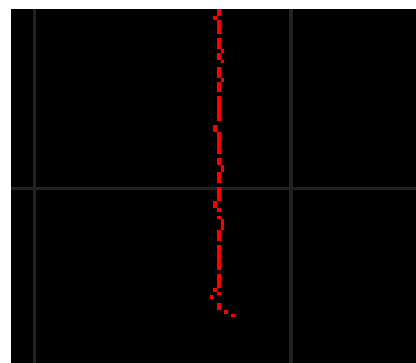
Tab. 20 - Naměřené hodnoty mezery a dna módem 0 pro ocelovou vidličku

Měření ve směru	Měření dna a mezery	Pozice bodů			Naměřená hodnota skenerem [mm]	$\Delta$ [mm]	$\Delta$ M-D [mm]
		Height [ $\mu\text{m}$ ]		Průměr. hodnota distance [ $\mu\text{m}$ ]			
		Kurzor 1	Kurzor 2				
Distance	M	9614	19021	3125	9,407	0,163	0,190
	D	9609	19206	15328	9,597	-0,027	
	M	9323	18748	9095	9,425	0,145	0,172
	D	9265	18862	21250	9,597	-0,027	
	M	9344	18774	15139	9,43	0,14	0,125
	D	9293	18848	27369	9,555	0,015	
Height	M	5858	15274	9013	9,416	0,154	0,018
	D	5836	15270	21192	9,434	0,136	
	M	9921	19355	9009	9,434	0,136	0,065
	D	9921	19420	21189	9,499	0,071	
	M	14392	23820	8970	9,428	0,142	0,023
	D	14435	23886	21166	9,451	0,119	

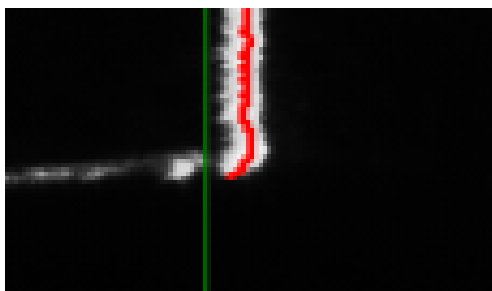
Měření ukázalo podobné výsledky jako u ocelového rámečku. Jen při měření dna ve směru distance byla délka profilu delší než reálná délka dna. To je pravděpodobně zapříčiněno vlivem stěn mezery, které se nepovedlo dokonale odfiltrovat i za použití ROI. Ale, jelikož je tato hodnota velmi malá 0,027 mm přes skutečnou délku mezery, můžeme to zanedbat. Příklad takové chyby je vidět na obrázcích Obr. 48 a Obr. 49. Zelený rámeček na Obr. 48 je oblast ROI. Na obrázcích Obr. 49 a Obr. 48 je vidět vliv rozptylu světla na hranách, kde jsou nasnímané i body, který v realitě už neexistují. Dále je vidět, jak mód 0 nevytváří spojitý profil, ale bere jen jednotlivé zpracované body, protože zde není vliv segmentace.



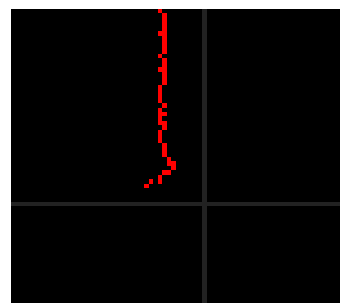
Obr. 50 - Image - Mod0 - Přiblížení při měření dna ocelové vidličky



Obr. 47 - Image - Mod0 - Přiblížení při měření dna ocelové vidličky



Obr. 48 - Profile - Mod0 - Přiblížení při měření mezery ocelové vidličky



Obr. 49 - Image - Mod0 - Přiblížení při měření mezery ocelové vidličky

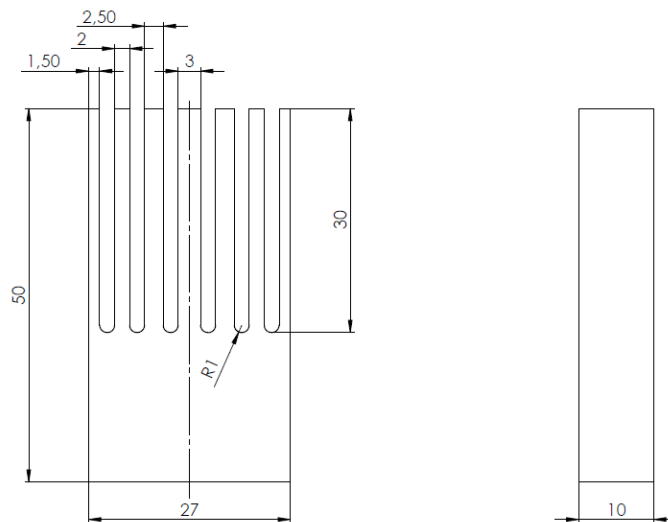
### 3.1.2. Příprava pracoviště a zkušebních vzorků

Po předběžných měřeních bylo na řadě navrhnout způsob, jak ověřit přesnost měření senzoru TLE1. Podmínkou byla nízká cena provedení, jednoduchost, exaktnost měřených artefaktů, přesná odměřovací technika a využití univerzitního vybavení.

## 1. Návrh - Žebrování

První návrh byl vytvořit předmět, který by měl přesné rozměry a dalo by se pomocí něho zmapovat celé zorné pole kamery jen pohybem skeneru, nebo předmětu ve směru distance. Bylo navrženo žebrování, které by bylo svrchu broušené (z důvodu vytvoření ostrých hran) s délkou žeber vyšší než rozsah ve směru distance, aby nebylo měření ovlivněno dnem mezery. Dál vznikl návrh desky, která se měla přišroubovat ke stojanu skeneru, který byl použit při předběžných měřeních. Na tuto desku by se pomocí důlků a kolíků usadil ruční souřadnicový stolek.

Od tohoto návrhu se upustilo z důvodu náročnosti výroby žebrování a zaručení kvality zpracování a přesnosti.



Obr. 51 - Návrh žebrování

## 2. Návrh - Použití CNC brusky

Další možností bylo využití přesné nástrojové CNC brusky (BN 102 CNC), která zvládá poměrně přesný pohyb po jednom mikrometru ve třech osách. Bruska byla plně k dispozici jen pro toto měření, zároveň její přesnost je zaručeně vyšší, než výroba jakéhokoliv artefaktu a disponuje variabilitou, kterou by vyrobené žebrování nemohlo nikdy disponovat. Bylo rozhodnuto použít návrh s CNC bruskou.

Pro tento návrh byl vyroben jednoduchý ocelový přípravek ve tvaru L s otvory pro fixaci skeneru k brusce. Dále byl použit svěrák, který byl připevněn pomocí upínačů do pracovního prostoru brusky, břitové destičky jako artefakty pro měření délky profilu mezi hranami a mezery a zároveň pro měření změny distance. Pro měření odrazivosti byly

použity plechy různých materiálů a povrchových úprav a upínky pro jejich upevnění. Pro ovládání brusky byl použit software od firmy Mironex, kde byl vytvořen jednoduchý G kód pro krokování pohybů. Pan ing. Lubomír Štajnochr naprogramoval software SKENER-Pok, který slouží k zapisování naměřených dat senzorem do souboru. TL Studio bylo použito pro nastavování skeneru před měřeními a pro získání obrazové dokumentace z měření.

Měření bylo rozděleno do dvou hlavních částí. První část byla zaměřena na odrazivost a druhá část na mapování měřicího pole skeneru pomocí schodu vytvořeným břitovou destičkou a upnutím tří destiček byla vytvořena mezera.



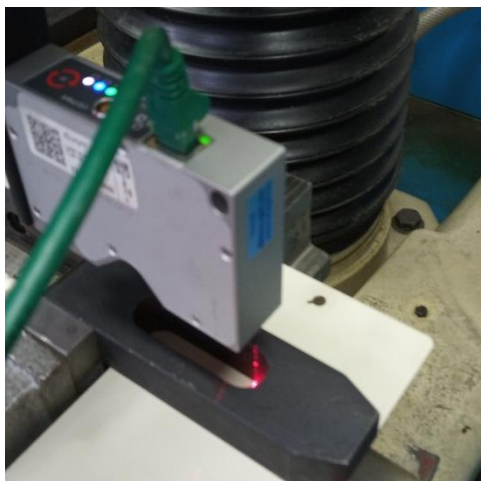
*Obr. 52- Pracoviště*

### **3.2. Vliv odrazivosti**

Povrch a zvolený materiál mají velký vliv na měření optickými metodami. Ani měření pomocí laserových skenerů není výjimkou. Při měření předmětů s lesklým nebo hrubě broušeným povrchem se vytváří odlesky nebo rozptyl paprsku. To vytváří falešné body, které senzor vyhodnotí špatně jako body profilu a dochází ke zkreslení výsledků.

Při tomto měření bylo zjišťováno, jak velký může vzniknout rozptyl zpracovaných bodů senzorem na různých površích. Měření probíhalo u každého vzorku ve třech hladinách distance co možná nejbližší v zorném poli kamery, uprostřed a co nejdále od přístroje

v zorném poli. Odečítání dat proběhlo pomocí módu 0, který slouží pro určení vzdáleností a nevytváří spojitou linii, ale bere jednotlivé pixely tak, jak jsou bez filtrace. Pro zaručení stejné vzdálenosti vzorku od senzoru byla do svěráku upnuta velká upínka a skrz její drážku snímal skener odražený paprsek od objektu. Vzorky se následně přikládaly zespod upínky. Výchozí hodnota distance, od které započalo měření na vzorcích, bylo při optimálním nastavením skeneru na uhlíkaté oceli, protože ta má nízkou odrazivost, a tudíž nedochází na ni k odleskům nebo k rozptylu paprsku.



Obr. 53 - Snímání vzorku ošetřeného práškovou nátěrovou hmotou

Na začátku měření v každé hladině distance se skener nejdříve nastavil na maximální hodnotu expozice a maximální výkon laseru tak, aby došlo k přesvícení povrchu a odečetly se hodnoty z každého vzorku. Pak se naopak nastavil skener na co nejnižší možné hodnoty expozice a nejnižší hodnotu výkonu laseru tak, aby byl odražený paprsek ještě zpracovatelný. Následně se odečetly hodnoty z každého vzorku. V posledním kroku se u každého vzorku zvlášť nastavily parametry skeneru na optimální odrazivost a opět se odečetly hodnoty distance. Toto proběhlo ve všech třech měřených hladinách distance.

Bylo použito těchto deset různých povrchů:

Tab. 21 - Vzorky pro měření odrazivosti

Matné povrchy	Lesklé povrchy
Epoxidová pryskyřice s 8% jemného grafitu	Žárový zinek
Bílá prášková nátěrová hmota	Fialový elox*
Fialový elox*	Měď
Uhlíková ocel	Hliník - hrubě broušený
-	Mosaz
Kompozit z uhlíkových vláken a pryskyřicové matrice (část dveří dopravního letadla) kombinace lesklého a matného povrchu	

\*jde o jeden plech, který je z jedné strany matný a z druhé lesklý



Obr. 62 - Epoxidová pryskyřice s  
8% jemného grafitu



Obr. 61 - Prášková  
nátěrová hmota



Obr. 60 - Fialový elox -  
matný



Obr. 59 - Uhlíková ocel



Obr. 63 - Žárový zinek



Obr. 54 - Fialový elox - lesklý



Obr. 57 - Měď



Obr. 58 - Kompozit z  
uhlíkových vláken



Obr. 55 - Borušený hliník



Obr. 56 - Mosaz

Následně byl z naměřených hodnot spočítán rozdíl mezi hodnotami distance pro optimální nastavení a přeexponované nastavení a potom mezi hodnotami pro optimální nastavení a podexponovanými. To bylo provedeno pro každou hladinu distance a každý vzorek. Tím byl získán možný rozptyl od hodnoty distance při optimálním nastavení. Naměřené hodnoty a parametry nastavení skeneru jsou součástí příloh.

Tab. 22 - Zpracovaná data z měření odrazivosti

Povrch	Vzorky	Distance1 [mm]	Distance2 [mm]	Distance3 [mm]	Expozice
Matný	Epoxidová pryskyřice	-0,009	0,006	0,008	přeexp.
		-0,027	0,003	-0,01	podexp.
	Bílá prášková nátěrová hmota	-0,125	-0,022	-0,041	přeexp.
		-0,027	0,013	0,001	podexp.
	Fialový elox	0,048	0,012	0,009	přeexp.
		0,02	0,01	-0,009	podexp.
	Uhlíková ocel	0,007	0,016	0,027	přeexp.
		0,012	0,007	0,009	podexp.
	Žárový zinek	0,039	0,014	0,013	přeexp.
		0,03	0,003	-0,012	podexp.
Lesklý	Fialový elox	0,054	0,016	0,009	přeexp.
		0,009	0,008	-0,009	podexp.
	Měď	0,024	0,042	0,03	přeexp.
		0,008	0,004	0,005	podexp.
	Hliník	0,032	0,163	0,054	přeexp.
		0,034	0,044	0,01	podexp.
	Mosaz	0,026	0,532	0,016	přeexp.
		0,019	0,026	0,015	podexp.
Kombinace	Kompozit z uhlíkových vláken	-0,006	0,019	0,009	přeexp.
		0,001	0,003	-0,011	podexp.

*Tab. 23- Nejistoty měření na různých površích*

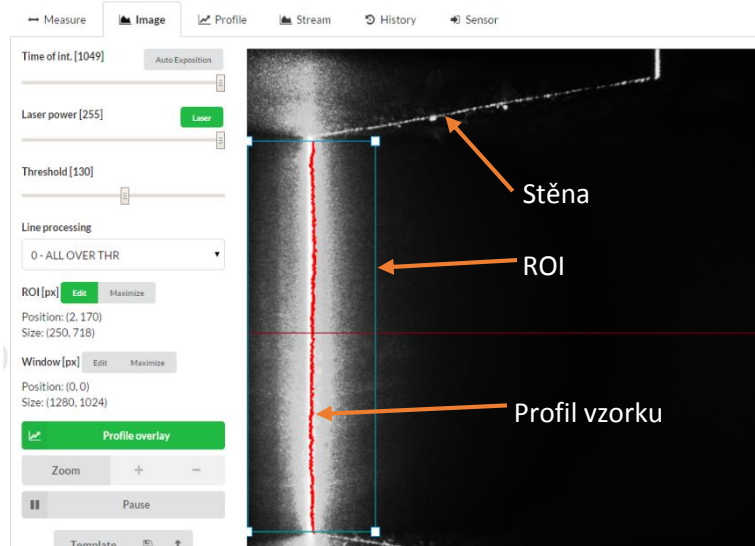
Povrch	Vzorky	Chyba měření [mm]
<b>Matný</b>	Epoxidová pryskyřice s 8% jemného grafitu	$X_R = X_N - (-0,005 \pm 0,0121)$
	Bílá prášková nátěrová hmota	$X_R = X_N - (-0,033 \pm 0,0446)$
	Fialový elox	$X_R = X_N - (0,015 \pm 0,0174)$
	Uhlíková ocel - modré okuje	$X_R = X_N - (0,013 \pm 0,0070)$
<b>Lesklý</b>	Žárový zinek	$X_R = X_N - (0,014 \pm 0,0167)$
	Fialový elox	$X_R = X_N - (0,014 \pm 0,0192)$
	Měď	$X_R = X_N - (0,019 \pm 0,0142)$
	Hliník - hrubě broušený	$X_R = X_N - (0,056 \pm 0,0496)$
	Mosaz	$X_R = X_N - (0,106 \pm 0,1907)$
<b>Kombinace</b>	Kompozit z uhlíkových vláken	$X_R = X_N - (0,003 \pm 0,0098)$

Nejistoty měření byly spočítány z rozdílů mezi optimálním nastavením parametrů skeneru a extrémními nastaveními pro jeden vzorek. Ze zpracovaných dat nelze jednoznačně usoudit, jestli lesklé materiály jsou horší než matné. Důvodem je, že i u matných materiálů může dojít k rozptylu odraženého paprsku, a tím k vytváření šumu při zpracování bodů. Tento případ je znázorněn na bílé práškové nátěrové hmotě. Při přesvícení jejího povrchu docházelo k velkému rozptylu paprsku. Stejně tak u broušeného hliníku, který měl povrch poměrně lesklý a současně jeho broušení způsobovalo velký rozptyl laserového paprsku. Dalším vzorkem s vysokou chybovostí je vyleštěná mosaz. U té docházelo k dvojitému odrazu paprsku od bočních stěn upínky, kdy jeden odraz byl přímo od upínky. Ten se dal eliminovat pomocí ROI, ale druhý odraz je promítnut na mosazi, ten se nedá dobře odstranit bez toho, aby nedocházelo k ovlivnění snímaného paprsku. U podexponování docházelo k nedostatečnému osvětlení povrchu a k malému počtu zpracovaných bodů.

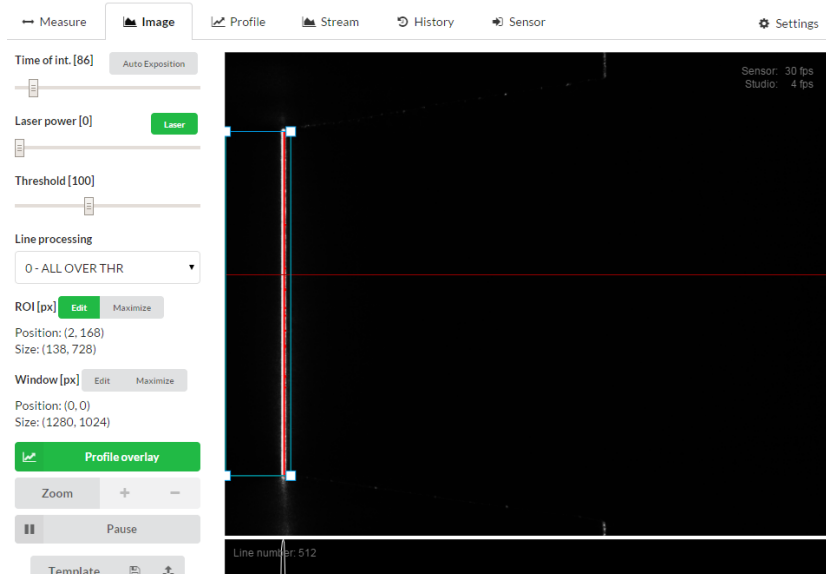
Naopak poměrně kvalitních výsledků dosahovaly vzorky uhlíkové oceli a epoxidové pryskyřice, kde průměrná odchylka od měření s optimálním nastavením skeneru je relativně malá a rozptyl hodnot také. Ačkoliv je kompozitní materiál ze dvou složek a každá má jinou odrazivost, ze získané chyby měření můžeme konstatovat, že i tento povrch je použitelný pro další měření pomocí senzoru TLE1.



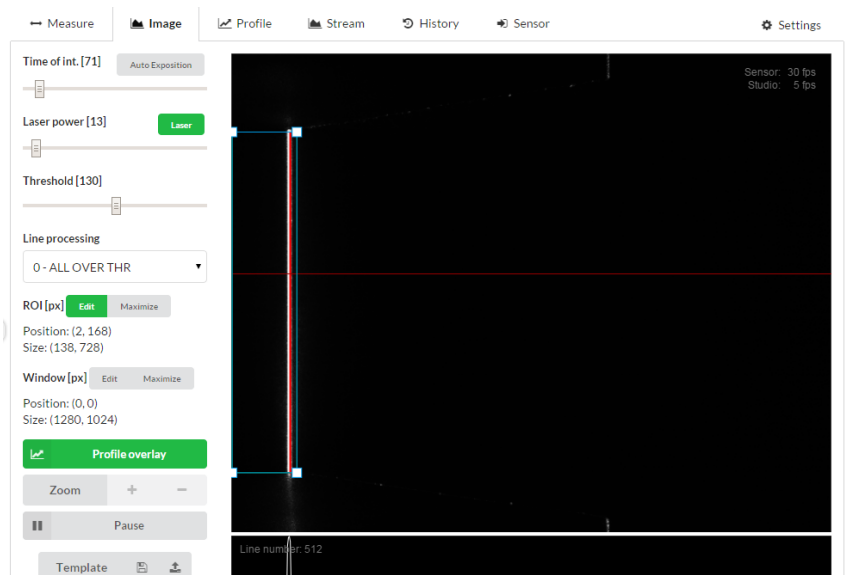
Měření dále ukázalo, že při snímání podexponovaných povrchů nedocházelo k tak velkým vychýlením hodnot od optimálního nastavení skeneru. Avšak při přexponování zkoumaných povrchů byla odchylka i často několikanásobně větší než u podexponování.



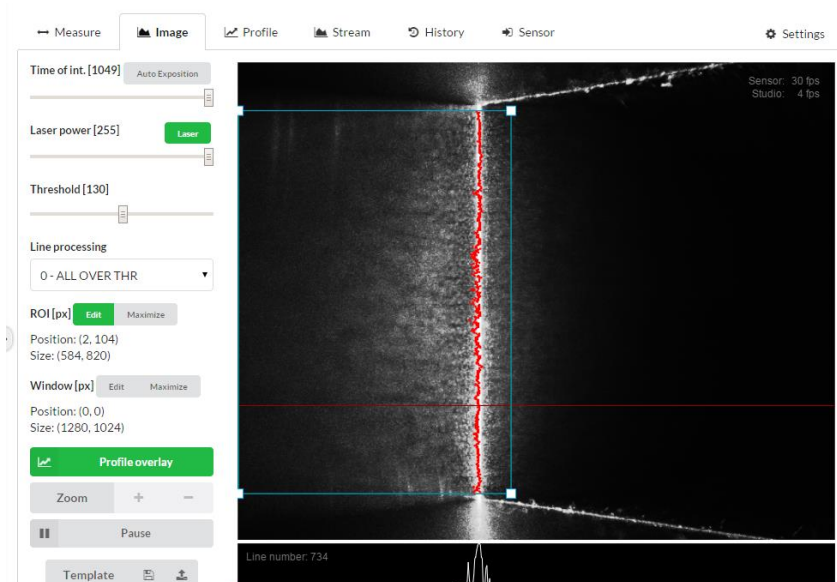
Obr. 65 - Bílá prášková nátěrová hmota - přexponováno - Distance 3



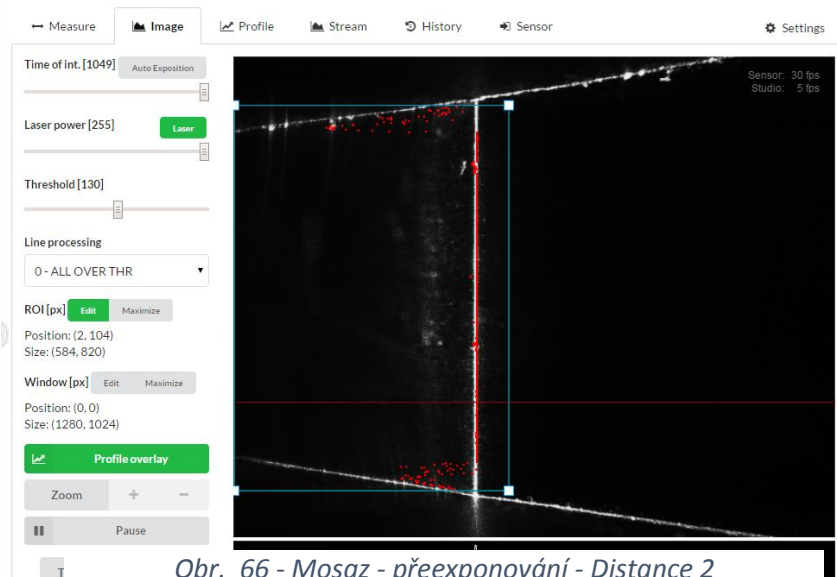
Obr. 64 - Bílá prášková nátěrová hmota - podexponováno - Distance 1



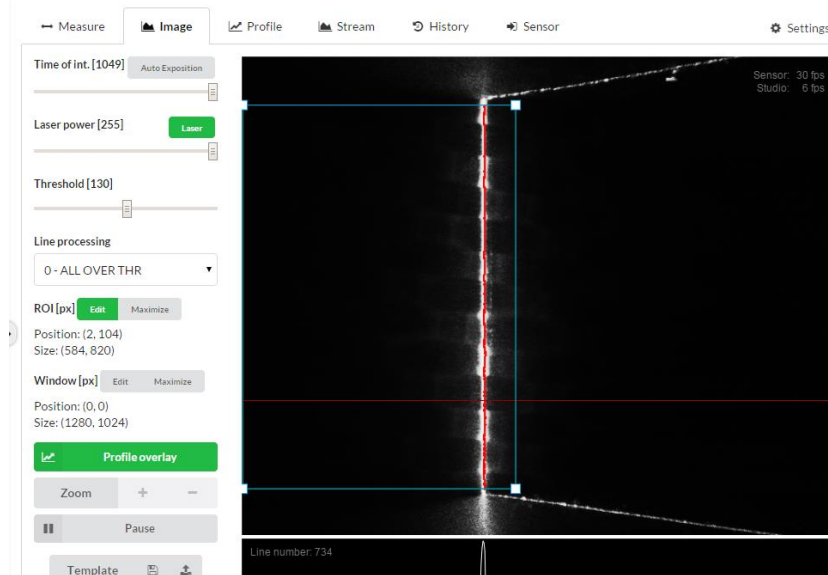
*Obr. 68 - Bílá prášková nátěrová hmota - ideální expozice - Distance 1*



*Obr. 67 - Broušený hliník - přexponování - Distance 2*



*Obr. 66 - Mosaz - přexponování - Distance 2*



Obr. 69 - Kompozit - přeexponování - Distance 2

### 3.3. Určení přesnosti měřícího pole skeneru

Stěžejní částí experimentu bylo určení měřící přesnosti zorného pole senzoru TLE1. Jelikož přístroj měří ve dvou rozměrech, byl zkoumán vliv polohy měřeného předmětu vždy ve dvou směrech (ve směru *distance* a *height*). Pro tento účel byla vytvořena síť přes celé měřící pole skeneru. Ve směru *distance* byl zvolen krok 0,5 mm a ve směru *height* 0,4 mm. Tím bylo zaručeno dostatečné množství dat pro vyhodnocení přesnosti měření celého měřícího pole.

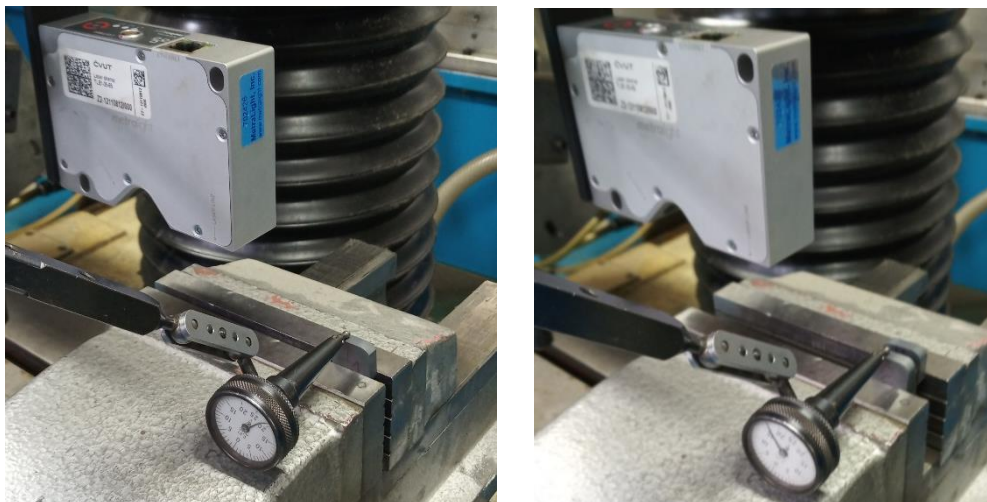
Cílem experimentu je zjištění, jakou má senzor přesnost měření za určitých podmínek, v určitých místech měřícího pole, je-li ve všech místech stejná a jestli se se změnou polohy měřeného objektu nemění naměřený rozměr. Tuto informaci může následný uživatel využít při svých měření.

Měření probíhalo opět na nástrojové brusce BN 102 CNC. Zkoumanými předměty byly tři břitové destičky z důvodu přesných rozměrů, ostrých hran a kvalitního povrchu pro odrazivost. Byly použity pro měření délky profilu na schodu, délky mezery mezi destičkami a vlivu změny vzdálenosti senzoru od těchto objektů. Před samotným experimentem byly horní plochy destiček horizontálně vyrovnány tak, aby byla vnášena lineární chyba vlivem změny vzdálenosti skeneru od předmětu při měření co možná nejmenší. Lineární horizontální odchýlení plochy schodu byla 0,004 mm na 1 mm. Při použití všech třech destiček pro vytvoření mezery bylo toto odchýlení na dvou

destičkách vytvářejících mezeru 0,01 mm na 1 mm. Jelikož laserový paprsek směřoval přesně kolmo na objekty a tyto byly poměrně přesně vyrovnané, mělo by být měření zatížené touto chybou absolutně minimálně. Kolmost paprsku se zkoumala na hraně koncové měrky, kde svítil rovnoběžně paprsek přímo na hranu. Následně se pohybovalo se skenerem, co nejbližší k měrce a co nejdále od ní, a sledoval se pohyb paprsku. Přibližně na 25 centimetrech se paprsek pohnul o 0,1 mm. Tím pádem lze prohlásit, že laserový paprsek svítil kolmo na objekt. Poslední potřebou pro fixaci senzoru bylo zabránění jeho natočení. K tomu stačilo snímat skenerem delší profil nepřesahující zorné pole kamery a zjistit hodnoty distance v krajních bodech. Tyto hodnoty by se měli rovnat, nebo aspoň být co nejpodobnější s rozdílem v řádech jednotek mikrometrů.



*Obr. 70 - Břitové destičky*



*Obr. 71 - Vyrovnávání objektů*



*Obr. 72 - Kontrola kolmosti laserového paprsku*

### 3.3.1. Měření na objektu

Po odmaštění, vyrovnání a upevnění břitové destičky do svěráku byly nastaveny optimální parametry senzoru pro měření délky profilu na objektu. Toto nastavení bylo provedeno ve středu zorného pole kamery z důvodu odrazivosti paprsku od destičky a následně toto nastavení bylo porovnáno v krajních polohách zorného pole a optimalizováno. Tentokrát byly optimalizovány i hodnoty segmentace a subsegmentace.



*Obr. 73 - Měření tloušťky břitové destičky*

Jelikož senzor nedokáže zpracovávat body v minimální a maximální hodnotě distance, byla nulová hodnota na svislé ose brusky natavena v místě, kde středový bod profilu (bod 4 pro mód 8) měl souřadnice height = 15 0003  $\mu\text{m}$  (tedy střed rozsahu ve směru height) a distance = 50  $\mu\text{m}$ . Následně se objektem odjelo mimo zorné pole kamery v záporném

směru height tak, aby software nevyhodnocoval žádná data, a to i v případě, že se objekt dostane do maximální hladiny distance, kde je rozsah měření ve směru height největší. V této poloze byla zvolena nula na ose brusky ve směru rovnoměrném s profilem paprsku.

Poté byl napsán jednoduchý G kód pro krokování brusky ve směru height o 0,4 mm. Po každém tomto kroku byly zaznamenány souřadnice všech bodů generované skenerem v módu 8, dokud nebyly tyto souřadnice nulové. To znamenalo, že se destička dostala mimo zorné pole kamery. Pro jednodušší zápis těchto bodů pan ing. Štajnochr naprogramoval počítačový software s názvem SKENER-Pok, který zapisoval naměřené hodnoty do souboru. Po naměření hodnot v jedné hladině distance se vrátila bruska na původní místo, ze kterého byl spuštěn krokovací program, skener se posunul o 0,5 mm vždy jen ve směru distance (dál od předmětu), aby bylo zamezeno vlivu vůle brusky a spustil se krokovací program znovu. Program byl napsán pro jeden krok, což znamenalo ručně spouštět program pro každý krok a zároveň ho zaznamenat jednotlivě kliknutím v SKENER-Pok. Tento postup byl zvolen pro možnost dohledu nad naměřenými hodnotami a případně pro možnost provést měření znovu, a to i za cenu časové náročnosti. Tímto způsobem byla naměřena tloušťka břitové destičky ve všech hladinách distance po celém rozsahu ve směru height za použití měřícího módu 8 a bylo naměřeno 22 666 hodnot.

Břitová destička byla změřena pasametrem a její tloušťka je  $5,030 \pm 0,001$  mm.

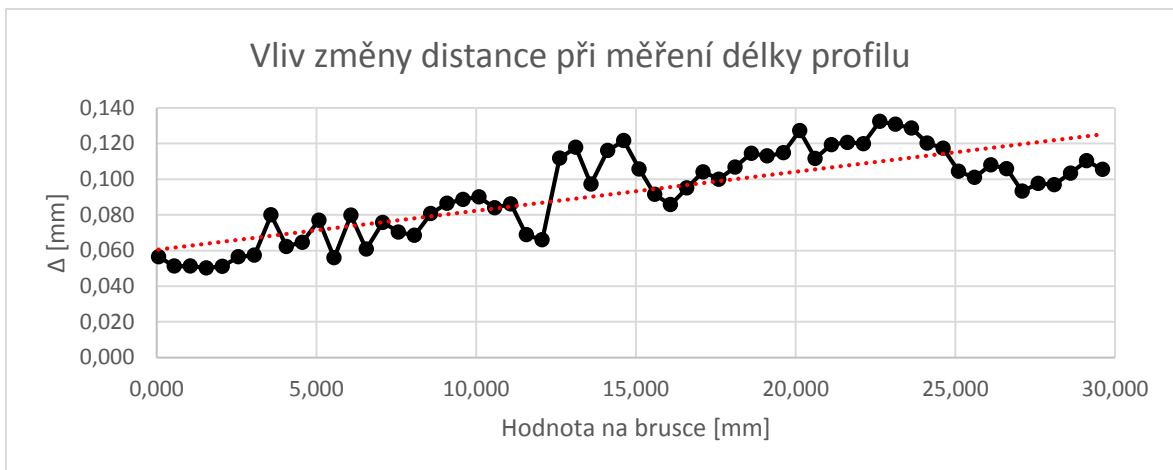
*Tab. 24 - Nastavení skeneru pro měření délky profilu*

<b>Nastavení laser skeneru</b>	
	<b>Time of int.</b> 143
	<b>Laser power</b> 22
	<b>Threshold</b> 100
	<b>Line processing</b> 0
<b>Profile processing</b>	<b>Segment</b> 12 pixelů
	<b>Subsegment</b> 9 pixelů
	<b>Measuring mode</b> 8
	<b>Inclination limit</b> 255

V elektronické příloze je k nalezení tabulka v softwaru Misrosoft Excel se všemi naměřenými hodnotami. Z důvodu velkého množství dat jsou uvedena již tato data zpracovaná.

### 3.3.1.1. Vyhodnocení ve směru distance

Nejprve byly zpracována data ve směru distance. Ze znalosti o měřícím módu 8 víme, že bod 4 je středový bod snímaného profilu a jeho souřadnice distance je vlastně průměrná hodnota distance celého měřeného profilu. Proto se v každé hladině distance udělal aritmetický průměr ze všechna naměřených souřadnic distance pro tento bod. Tyto průměrné hodnoty se porovnály s hodnotami polohy brusky ve svislé ose a vypočítaly se rozdíly mezi nimi s tím, že nulová hodnota na brusce ve svislé ose není nulová na skeneru ve směru distance, což pro další zpracování není překážkou. Ze spočítaných rozdílů byl vytvořen graf:



Z grafu je patrný lineární trend růstu rozdílů mezi naměřenými průměrnými hodnotami a hodnotami udávané bruskou. Hodnoty postupně rostou s lineární závislostí dané přímkou:

$$y = 0,0022x + 0,0604 \text{ mm}$$

Z naměřených dat byla vyhodnocena nejistota měření v celém měřícím rozsahu ve směru distance při zjišťování délky profilu (tloušťky destičky) vytvořeném břitovou destičkou s ostrými hranami za určitého nastavení parametrů skeneru. Chyba měření byla určena z rozdílů mezi naměřenými průměrnými hodnotami distance u bodu 4 v měřícím módu 8 v jednotlivých hladinách distance zorného pole a hodnotami polohy brusky ve svislé ose. Pro její výpočet byla použita směrodatná odchylka 2 sigma pro odstranění hrubých chyb v měření. Po odečtení vlivu posunutí počátečního bodu měření vychází chyba měření

$$X_R = X_N - (0,031 \pm 0,0238) \text{ mm}$$

kde  $X_R$  je reálná naměřená vzdálenost a  $X_N$  je naměřená vzdálenost skenerem. S takovouto přesností a za těchto podmínek můžeme měřit vzdálenosti ve směru distance v celém rozsahu.

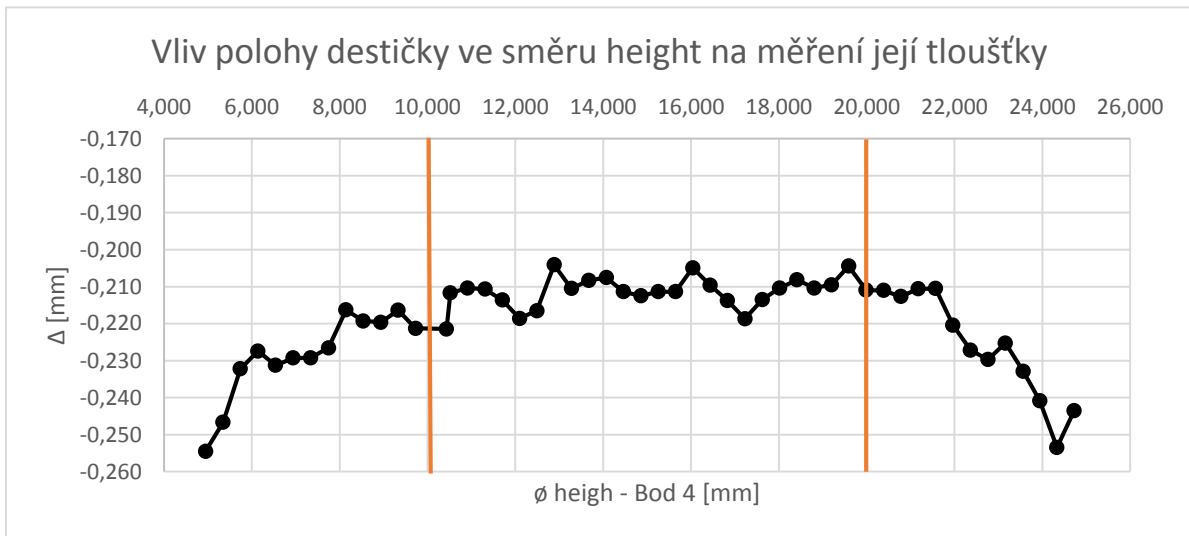
Rostoucí trend ze zpracovaných hodnot bude pravděpodobně zapříčiněn klesající rozlišovací schopností snímače ve směru dál od zkoumaného objektu a vlivem matematické korekce softwaru v senzoru při měření v módu 8, kde dochází k filtraci bodů.

### **3.3.1.2. Vyhodnocení dat ve směru height**

Pro měření přesnosti ve směru height byly použity naměřené hodnoty šířek břitové destičky v jednotlivých hladinách height, které jsou od sebe vzdáleny 0,4 mm, a porovnány s reálnou šířkou destičky změřenou pasametrem. Pro určení polohy těchto šířek v zorném poli byl opět zvolen středový bod profilu bod 4 v módu 8, který pomocí průměrné hodnoty souřadnice height v dané hladině height udával polohu měřené šířky. Dále byly spočítány aritmetické průměry ze všech naměřených šířek v jednotlivých hladinách height. Jelikož má měřicí pole skeneru tvar lichoběžníku, aritmetické průměry spočítány v krajích rozsahu jsou z menšího počtu hodnot než spočtené průměry ve středu rozsahu. Tento vliv může vnášet chybu do spočtených hodnot, a to především pro průměry spočtené na samotných koncích rozsahu ve směru height, které jsou spočteny jen z dvou hodnot. Průměry spočtené ze šířek jen o jednu hladinu blíže ke středu již jsou spočteny z devíti hodnot a o další krok už ze 14 hodnot, což už svou vypovídající hodnotu má. Prostřední hodnoty jsou spočteny z 61 hodnot.

Následně byly spočítány rozdíly mezi naměřenými aritmetickými průměry šířek z jednotlivých hladin height a skutečnou šířkou destičky. Výsledky jsou k nalezení v elektronické příloze a použité pro následující graf.





Z grafu je jasně patrné, že všechny naměřené šířky destičky jsou kratší než její reálná šířka. To je způsobeno vlivem segmentace a hlavně subsegmentace, která udává, kolik pixelů musí za sebou chybět, aby byla při zpracování profilu určena hrana, a tím se krajní segment vypustí. To způsobí zkrácení naměřené délky. I přesto je subsegmentace důležitá, protože může dojít k přesvícení hrany, a tím se určí falešné body mimo skutečnou hranu a došlo by naopak k prodloužení, pokud by byla subsegmentace nastavena na nulu.

Dále je vidět, že křivka má tvar oblouku. To je způsobeno nedokonalostí optiky u krajů zorného pole a vlivem paralaxy laserového paprsku, který při nasvícení předmětu na kraji zorného pole osvítí bližší konec profilu pod jiným úhlem než na vzdálenějším kraji. Proto pro výpočet nejistoty měření se vyčlenily krajní oblasti, které jsou přibližně široké 5 mm z každé strany měřeného rozsahu, a středové, kde podle grafu mají zpracované hodnoty relativně lineární průběh. Pro úplnost byla chyba měření spočítána v celém rozsahu měření.

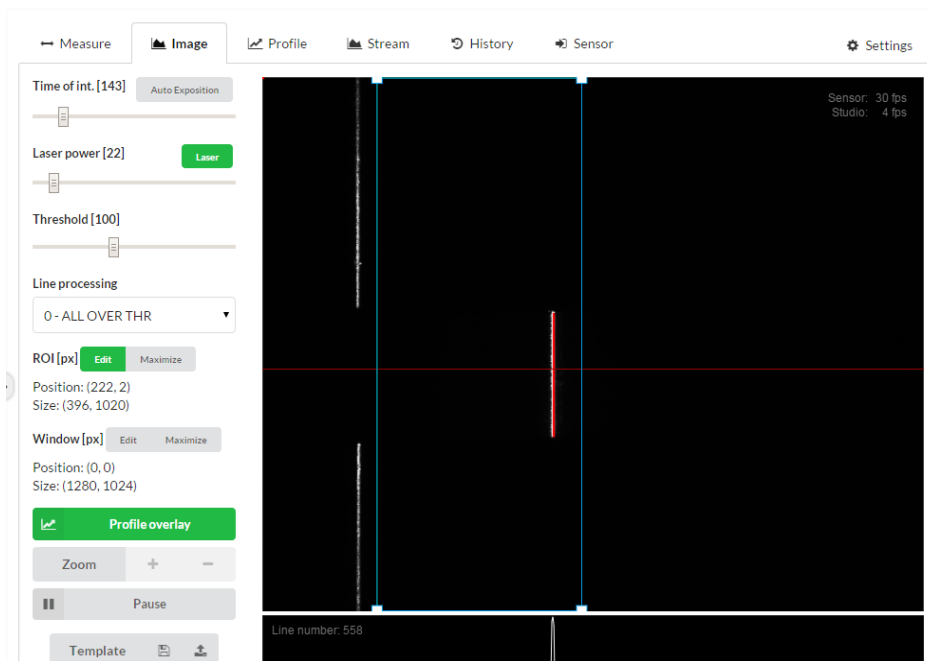
Spočtené chyby měření jsou pro konkrétní nastavení parametrů skeneru v určitém rozsahu ve směru height a na ostrohranných břitových destičkách. Při změně některých z těchto podmínek může být nejistota měření rozdílná.

Tab. 25 - Nejistoty měření ve směru height při měření objektu

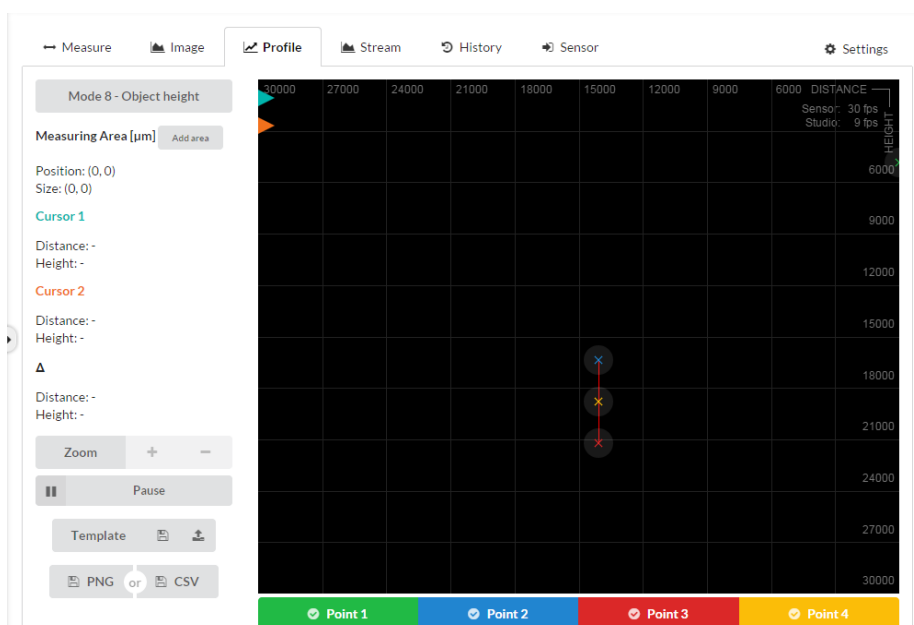
<b>Krajní oblast</b>	$X_R = X_N - (-0,228 \pm 0,0124)$ mm
<b>Středová oblast</b>	$X_R = X_N - (-0,211 \pm 0,0041)$ mm
<b>Celý rozsah</b>	$X_R = X_N - (-0,219 \pm 0,0122)$ mm

Kde  $X_R$ , je reálná hodnota délky měřeného profilu a  $X_N$  je naměřené délka profilu skenerem.

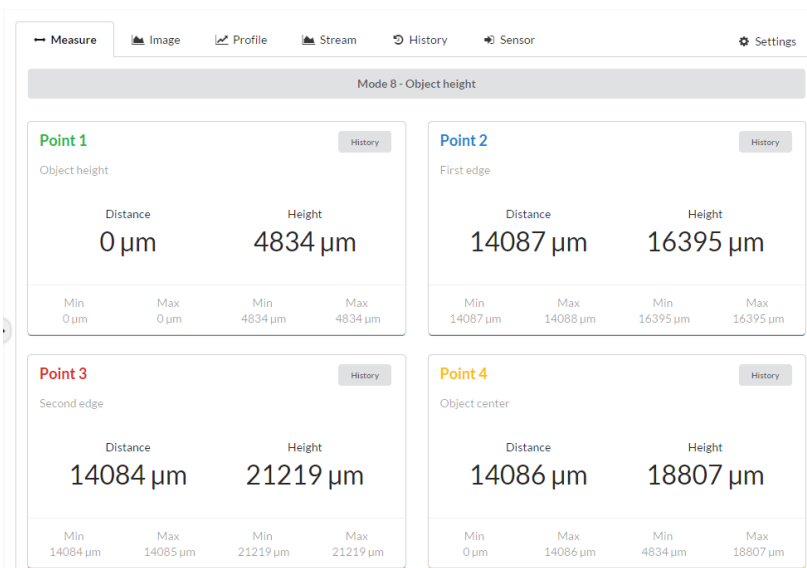
Z nejistoty měření je vidět, že, abychom se dostali na reálnou naměřenou délku profilu, je zapotřebí přičíst k naměřeným hodnotám více než 0,2 mm. Toto není takový problém, do měření v průmyslu je třeba zahrnout korekci chyby a s touto hodnotou počítat, jen je vždy potřeba provést kalibraci na konkrétním objektu. Při porovnání odchylek mezi středovou oblastí a krajními oblastmi je vidět, že středová oblastně je třinásobně přesnější než krajní oblasti, a to už není zanedbatelný poměr. To stejné platí v porovnání s celým rozsahem ve směr height. Proto pokud chce uživatel měřit délku profilu s co nevyšší přesností, musí měřit ve středové oblasti.



Obr. 75 - Image - Měření délky profilu



Obr. 74 - Profile - Měření délky profilu



Obr. 76 - Measure - Měření délky profilu

**SKEN SOUČÁSTI:**

Time	P1	P2	P3	P4
15:48:55	0.000	4.826	13.564	9.303
15:48:56	0.000	4.826	13.566	9.697
15:48:58	0.000	4.826	13.574	10.090
15:48:59	0.000	4.827	13.576	10.483
15:49:01	0.000	4.826	13.574	10.877
15:49:02	0.000	4.827	13.578	11.270
15:49:04	0.000	4.848	13.579	11.664
15:49:05	0.000	4.826	13.576	12.058
15:49:07	0.000	4.806	13.579	12.472
15:49:08	0.000	4.828	13.584	12.844
15:49:10	0.000	4.827	13.585	13.238
15:49:11	0.000	4.848	13.603	13.611
15:49:13	0.000	4.827	13.585	14.025
15:49:14	0.000	4.827	13.581	14.419
15:49:15	0.000	4.807	13.582	14.833
15:49:17	0.000	4.827	13.581	15.206
15:49:18	0.000	4.848	13.580	15.600
15:49:20	0.000	4.826	13.585	15.994
15:49:21	0.000	4.828	13.586	16.387
15:49:23	0.000	4.806	13.586	16.802
15:49:24	0.000	4.828	13.584	17.174
15:49:26	0.000	4.826	13.704	17.569
15:49:27	0.000	4.825	13.707	17.964
15:49:28	0.000	4.875	13.956	18.328
15:49:30	0.000	4.874	13.953	18.723
15:49:31	0.000	4.851	13.962	19.119
15:49:33	0.000	4.840	13.837	19.524
15:49:35	0.000	4.824	13.717	19.933
15:49:36	0.000	4.806	13.595	20.345

Poloha: X= Y= Rychl: R=0 xox: r= xoxox:

Konec	ZOOM plus	ZOOM minus	Data	Start	Stop	Reset	Generuj	Enter
Esc	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9

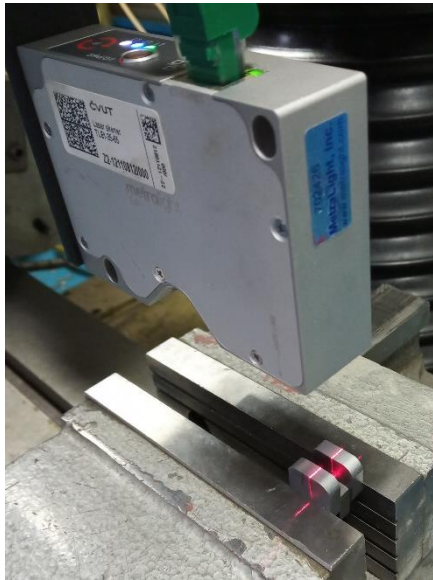
Obr. 77 - Zaznamenané souřadnice bodů softwarem SKENER-Pok

### 3.3.2. Měření délky mezery mezi objekty

Měření délky mezery bylo provedeno za pomoci tří břitových destiček, které byly upnuty do svěráku. Dvě z těchto destiček mají shodné rozměry a třetí je menší. Ta sloužila pro vytvoření mezery mezi oněmi shodnými destičkami.

Pracovní postup byl podobný jako u měření tloušťky destičky. Došlo k jejich vyrovnání, odmaštění a nalezení optimálního místa na destičkách pro měření tak, aby byl co nejmenší šum při měření vlivem stěn. Nastavení parametrů skeneru zůstalo stejné jako pro měření šířky jedné destičky z důvodu možného porovnání výsledků měření a také z důvodu, že použité destičky byly stejné v obou měřeních, takže jejich odrazivost byla shodná.

Pro nastavení počáteční hladiny distance, tedy nastavení nuly na svislé ose brusky, byl opět použit bod 4 v módu 6, který stejně jako v módu 8 je středovým bodem, ale tentokrát ve středu snímané mezery. Počáteční souřadnice tohoto bodu byly zvoleny stejně jako u měření tloušťky destičky, a to distance = 0,05 mm a height = 15,003 mm. Následně se destičkami odjelo mimo zorné pole kamery v záporném směru height tak, aby senzor nevyhodnocoval žádná data, a to i v koncové hladině distance, kde je zorné pole kamery ve směru height širší. V tomto místě byla zvolena nula pro osu brusky rovnoběžnou s profilem laserového paprsku.



*Obr. 78 - Měření mezery mezi břitovými destičkami*

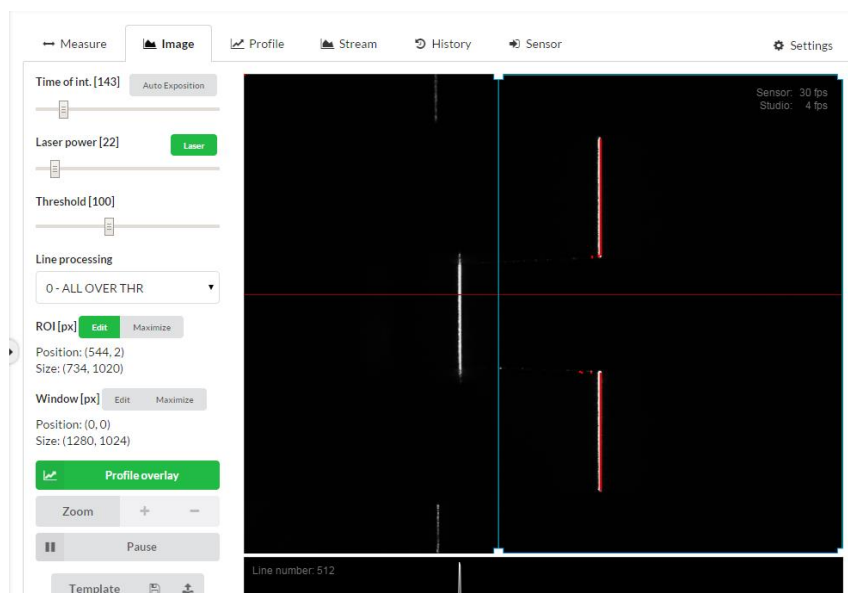
Pro krokování brusky byl použit stejný G kód s krokem 0,4 mm jako u měření šířky destičky. Generované souřadnice bodů skenerem v módu 6 byly opět zaznamenávány softwarem SKENER-Pok, dokud tyto hodnoty nebyly nulové, což znamenalo, že se měřená mezera dostala mimo zorné pole snímače. Po naměření zkoumané mezery v celém rozsahu height s krokem 0,4 mm v dané hladině distance se vrátila bruska do výchozí polohy ve směru height, skener se pohnul o krok 0,5 mm ve směru distance a měření mezery se na další hladině distance opakovalo. Tento postup se opakoval do doby, než se mezera dostala mimo zorné pole kamery ve směru distance. Tím se vytvořila síť přes celé měřicí pole snímače. Bylo naměřeno 22 594 hodnot, které byly dále zpracovány. Všechny tyto hodnoty jsou v elektronické příloze.

Vytvořená mezera měla šířku rovnou tloušťce malé břitové destičky, která byla měřena pasametrem s výsledkem 4,760 ± 0,001 mm.

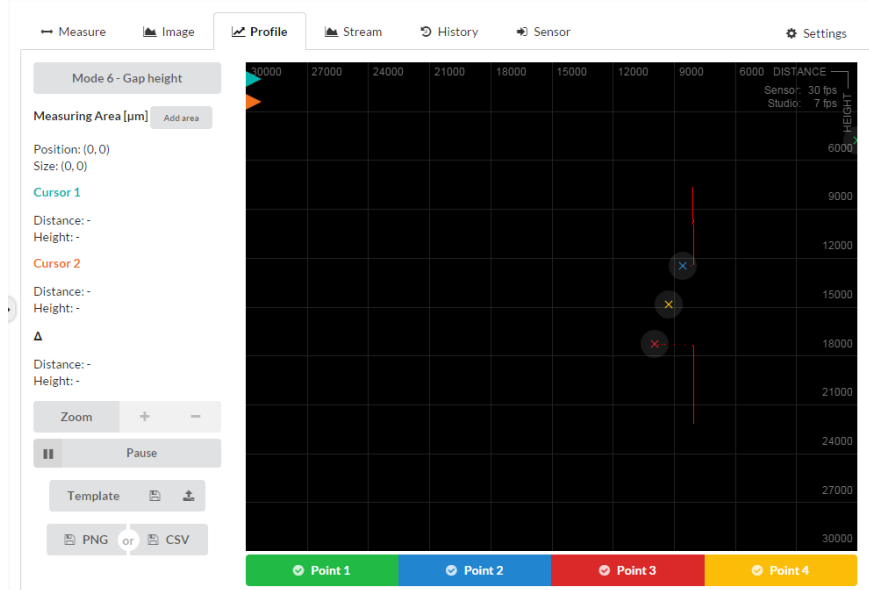
Tab. 26 - Nastavení skeneru pro měření šířky mezery

Nastavení laser skeneru		
<b>Time of int.</b>	143	
<b>Laser power</b>	22	
<b>Threshold</b>	100	
<b>Line processing</b>	0	
<b>Profile processing</b>	<b>Segment</b>	12 pixelů
	<b>Subsegment</b>	9 pixelů
	<b>Measuring mode</b>	6
	<b>Inclination limit</b>	255

Při pozorování dat během měření byly odhaleny hrubé chyby způsobené vlivem stěn mezery. Tyto hodnoty nebyly při vyhodnocování zahrnuty do výpočtů. Jejich vliv byl částečně eliminován menším nastavením oblasti ROI, což nešlo úplně dokonale nastavit z důvodu časové náročnosti. I přes toto je zajímavé pozorovat výsledky, kde se tyto chyby objevily, a to jen uprostřed zorného pole kamery. Pravděpodobně je to způsobeno příliš vysokým prahem citlivosti (Threshold) ve spojení s laserovým paprskem, který je emitován z jednoho bodu a rozptyluje se v trojúhelník, a když je tento paprsek zrovna uprostřed zorného pole, osvítí obě stěny rovnoměrně. Ačkoliv tyto hodnoty nebyly dále zpracovány, na výsledky měření to nemělo příliš veliký vliv. Naměřených hodnot ke zpracování byl i tak dostatek. V excelové tabulce v elektronické příloze jsou tyto hodnoty označeny žlutě.



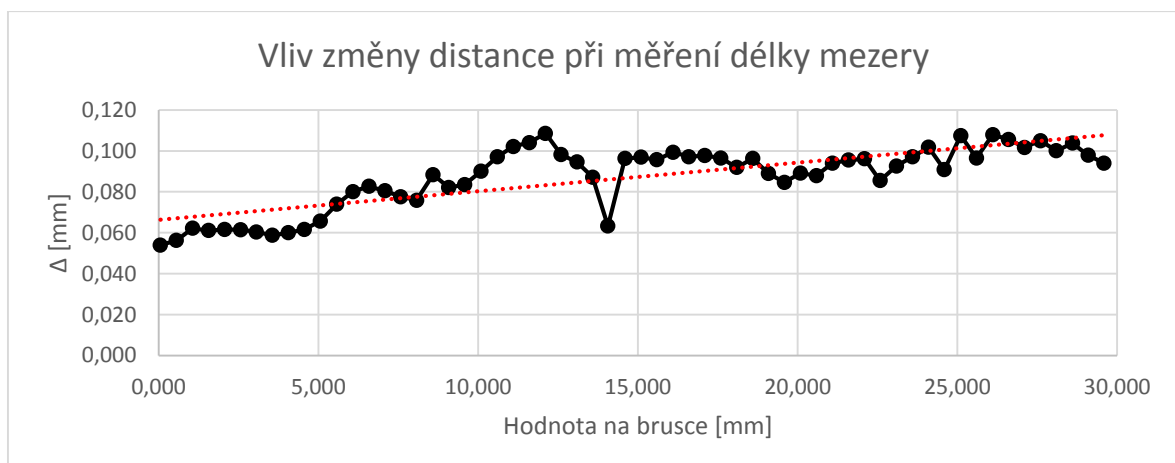
Obr. 79 - Image - Vliv stěn



Obr. 80 - Profile - Vliv stěn

### 3.3.2.1. Vyhodnocení dat ve směru distance

Stejně jako v módu 8 je i v módu 6 bod 4 středovým bodem měřené mezery a jeho souřadnice distance je průměrná hodnota distance celé měřené šířky mezery. Postup vyhodnocování vlivu distance na měření probíhal stejně jako u měření tloušťky destičky. V každé hladině distance se udělal aritmetický průměr z naměřených souřadnic distance pro bod 4. Spočítal se rozdíl mezi těmito aritmetickými průměry a hodnotami polohy brusky ve svislé ose pro jednotlivé hladiny distance. Nulová hodnota na brusce není nulová na počáteční hladině distance z důvodu nastavení počátečního bodu. Toto na zpracování dat nemá vliv, jen se s tím musí počítat, protože to posune výsledný graf, a musíme toto posunutí pak odečíst od spočítané nejistoty měření. Ze spočítaných rozdílů byl vytvořen graf:



Stejně jako u předešlého měření distance je i zde vidět rostoucí trend rozdílů mezi naměřenými průměrnými hodnotami a hodnotami udávané bruskou. Trend má lineární závislost danou přímkou:  $y = 0,0014x + 0,0663 \text{ mm}$

Z naměřených dat byla vyhodnocena nejistota měření v celém rozsahu distance při zjišťování šířky mezery mezi břitovými destičkami s ostrými hranami za určitého nastavení parametrů skeneru. Chyba měření byla určena z rozdílů mezi naměřenými průměrnými hodnotami distance u bodu 4 v měřícím módu 6 v jednotlivých hladinách distance zorného pole kamery a hodnotami polohy brusky ve svislé ose. Pro její výpočet byla použita směrodatná odchylka 2 sigma pro odstranění hrubých chyb v měření. Po odečtení vlivu posunutí počátečního bodu měření vychází chyba měření:

$$X_R = X_N - (0,016 \pm 0,0161) \text{ mm}$$

kde  $X_R$  je reálná naměřená vzdálenost a  $X_N$  je naměřená vzdálenost skenerem. S takovou přesností a za těchto podmínek můžeme měřit vzdálenosti ve směru distance v celém rozsahu.

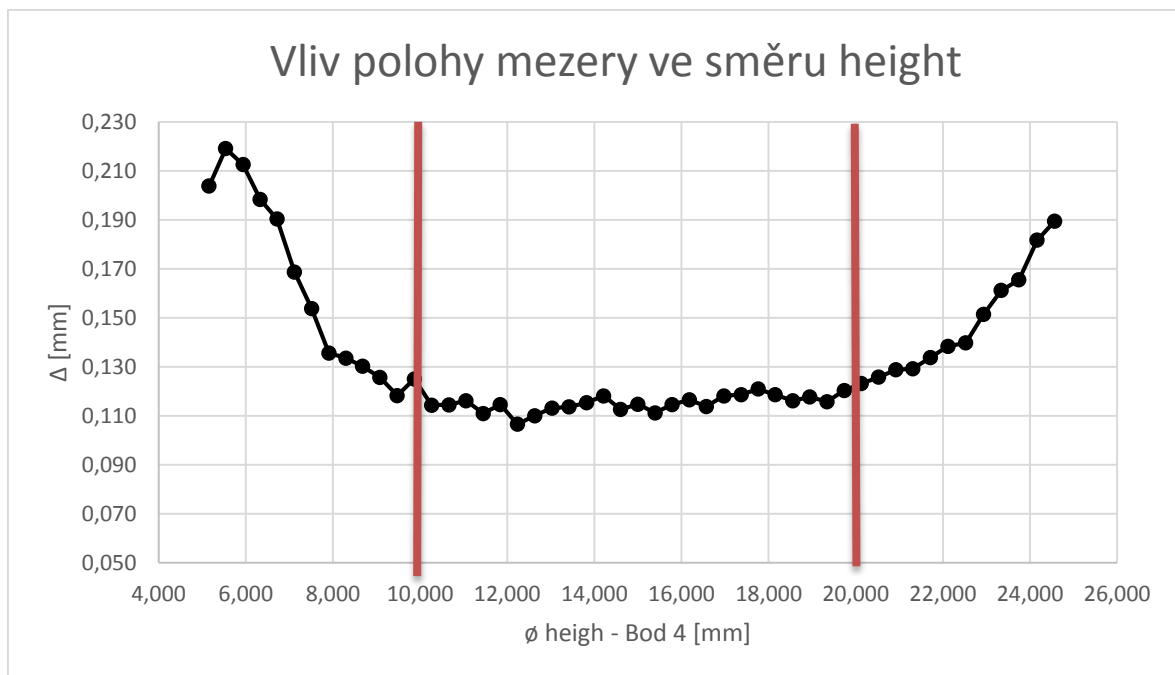
Stejně jako u měření šířky břitové destičky i zde je rostoucí trend ve zpracovaných hodnotách, který bude pravděpodobně zapříčiněn klesající rozlišovací schopností snímače ve směru distance (dál od zkoumaného objektu) a vlivem matematické korekce softwaru v senzoru při měření v módu 6, kde dochází k filtraci bodů.

### 3.3.2.2. Vyhodnocení dat ve směru height

Pro vyhodnocení dat ve směru height byly použity naměřené hodnoty šířek mezer mezi břitovými destičkami. Vzdálenost mezi hranami mezery generuje bod 1 v módu 6. Z těchto šířek byly spočítány aritmetické průměry po jednotlivých hladinách height, které jsou od sebe vzdáleny 0,4 mm, a byly porovnány se skutečnou tloušťkou nejmenší destičky. Pro určení polohy šířek mezer v zorném poli byl opět zvolen středový bod profilu bod 4 v módu 6, který pomocí průměrné hodnoty souřadnice height v dané hladině height udával polohu měřené velikosti mezery. Stejně jako u předešlého zkoumání vlivu změny souřadnice height i zde se projevil lichoběžníkový tvar snímaného pole. Aritmetické průměry spočítány v krajích rozsahu jsou z menšího počtu hodnot než spočtené průměry ve středu rozsahu. Tento vliv může vnášet chybu do spočtených hodnot, a to především

pro průměry spočtené na samotných koncích rozsahu ve směru height, které jsou spočteny jen z pěti hodnot na jednom kraji a ze čtyř hodnot na druhém kraji. Průměry spočtené jen o jeden krok blíže se středu zorného pole již jsou počítány z devíti hodnot a o další krok z devatenácti hodnot. Takový počet hodnot už statistickou hodnotu má. Prostřední hodnoty jsou z 59 hodnot.

Spočítané rozdíly mezi naměřenými aritmetickými průměry mezer z jednotlivých hladin height a skutečnou mezerou vytvořenou šířkou destičky byly vneseny do grafu.



Z grafu je vidět, že všechny naměřené mezery byly větší, než skutečná mezera byla. I zde je na vině segmentace a především subsegmentace, která ovlivňuje konec zkoumaného profilu. V tomto případě způsobuje opačný efekt než v případě měření šířky destičky a měřenou mezeru prodlužuje.

Obloukovitý tvar křivky je i v tomto případě způsoben nedokonalostí optiky na krajích zorného pole a vlivem paralaxy laserového paprsku, který při nasvícení předmětu na kraji zorného pole osvítil bližší konec profilu pod jiným úhlem než na vzdálenějším kraji. Jelikož se v tomto měření použila jako zkoumaný objekt mezera, je tento oblouk otočen na druhou stranu vlivem prodlužování mezery při jejím snímání na krajích zorného pole. Proto pro výpočet nejistoty měření se vyčlenily krajní oblasti, které jsou přibližně široké 5 mm z každé strany měřeného rozsahu, a středovou oblast, kde podle grafu mají zpracované



hodnoty relativně lineární průběh. Pro úplnost byla chyba měření spočítána v celém rozsahu měření.

Spočtené chyby měření jsou pro konkrétní nastavení parametrů skeneru v určitém rozsahu ve směru height a na ostrohranných břitových destičkách. Při změně některých z těchto podmínek může být nejistota měření odlišná.

*Tab. 27 - Nejistoty měření ve směru height při měření šířky mezery*

<b>Krajní oblast</b>	$X_R = X_N - (0,155 \pm 0,0309)$ mm
<b>Středová oblast</b>	$X_R = X_N - (0,115 \pm 0,0032)$ mm
<b>Celý rozsah</b>	$X_R = X_N - (0,135 \pm 0,0295)$ mm

Kde  $X_R$ , je reálná hodnota délky měřeného profilu a  $X_N$  je naměřené délka profilu skenerem.

Vyhodnocené nejistoty měření ukazují, že, pokud se chceme dostat při měření mezery na její skutečnou šířku, musíme od naměřeným hodnot odečíst přibližně 0,14 mm. S touto absolutní chybou musíme v aplikacích tohoto skeneru počítat a k výsledkům měření ji připočít. Samozřejmě se tato chyba bude měnit s různými podmínkami nastavení skeneru nebo měřeným předmětem. Proto musí zákazník před začleněním senzoru do provozu přístroj kalibrovat na konkrétní úloze. Při porovnání odchylek měření mezi krajovými oblastmi a středovou oblastí je jasně vidět, že přesnost je v krajích až desetkrát horší než ve středu. Stejný poměr je i mezi středovou oblastí a celým rozsahem zorného pole, který je ovlivněn krajovými oblastmi. To už je pro měření velmi znatelný rozdíl, a proto je nejvýhodnější měřit uprostřed zorného pole skeneru, pokud chceme mít přesné výsledky měření.

### 3.4. Zhodnocení výsledků

Ze všech získaných výsledků můžeme určit nejlepší způsob, jak měřit pomocí senzoru TLE1 od společnosti Metralight. Nejvýhodnější je měření na površích s nízkou odrazivostí, jako je třeba uhlíková ocel, protože u tohoto materiálu nedochází k rozptylu paprsku, ani k jeho přílišnému odrazu, který by vytvářel falešné body. Nejistota měření je na takovém povrchu  $X_R = X_N - (0,013 \pm 0,0070)$  mm ve směru distance. Pokud chceme využít tento přístroj k měření právě ve směru distance, musíme kalibrovat přístroj na konkrétním předmětu za konkrétních podmínek nastavení skeneru. Pokud měříme předmět s ostrými hranami s kvalitním povrchem, můžeme se dostat na nejistotu měření ve směru distance

v měřícím módu 8 pro měření délky profilu na  $X_R = X_N - (0,031 \pm 0,0238)$  mm a v módu 6 pro mezeru na  $X_R = X_N - (0,016 \pm 0,0161)$  mm v celém snímaném rozsahu přístroje. Avšak pokud chceme dosáhnout co možná nejpřesnějších výsledků, budeme předmět měřit nejbližší k senzoru, protože v této části zorného pole má skener nejlepší rozlišovací přesnost. Pokud jen chceme měřit vzdálenost skeneru od předmětu, použijeme mód 0, který je pro tuto funkci uzpůsobený.

Pro přesné měření délky profilu a šířky mezery je podstatné měřit uprostřed zorného pole kamery, kde může být přesnost měření u předmětů s kvalitním povrchem a ostrými hranami  $X_R = X_N - (-0,211 \pm 0,0041)$  mm pro měření délky profilu a  $X_R = X_N - (0,115 \pm 0,0032)$  mm pro měření šířky mezery. Odchytky měření jsou v obou případech velmi dobré a s absolutními chybami se musí počítat jako s korekcí pro naměřené hodnoty. Dále je důležité dobře nastavit oblast ROI, aby se do měření nevnášely chyby způsobené odraženým paprskem od stěn.

Na chyby měření má také vliv okolní prostředí při snímání. Je důležité, aby na měřený objekt nedopadalo přímé sluneční ani jiné silné světelné záření. Dále se mohou výsledky lišit přístroj od přístroje, ale předpokládá se, že tento vliv bude minimální.

## 4. Návrh měření na konkrétní úloze



*Obr. 81 - Trubička*

Výrobce produkuje speciální nerezové trubičky se specifickým tvarem. Profil této trubičky má tvar zploštělého oválu. Prolisy na trubičce jsou pod úhlem  $35^\circ$  s pravidelným rozestupem, ale s jejich rozdílnou hloubkou, která se pozvolna lineárně mění.

Zákazník si přeje pro kontrolu namátkově změřit hloubku jednotlivých prolisů tak, aby měření probíhalo automatizovaně. K tomuto účelu by se mohl hodit liniový laserový senzor TLE1.

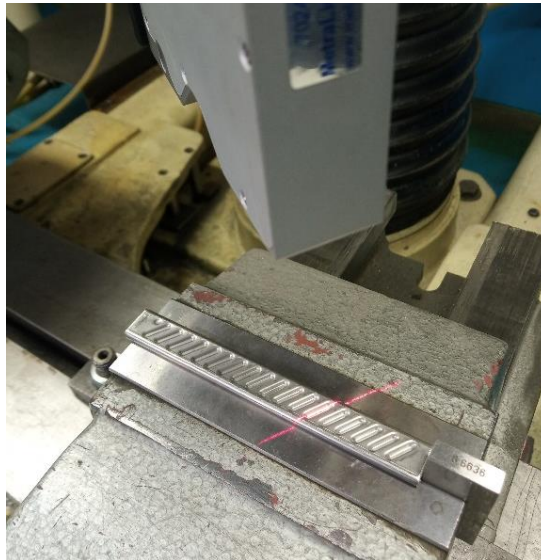
Takové zadání by šlo řešit tak, že by senzor byl upnut na konzolu pod úhlem 35° tak, aby byl paprsek rovnoběžný s tvarem prolisu. Konzola by se pohybovala jen v jedné ose pomocí přesného kuličkového šroubu nebo lineárního motoru. Tudiž skener by se pohyboval také jen v jedné ose po jednotlivých krocích tak, aby se pohyb zastavil vždy na prostředku dna prolisu. Trubička by se položila na přípravek, který by zaručil rovnoběžnost s osou pohybu skeneru. Zároveň by se trubička vyrovnala. Jelikož má nerezová ocel lesklý povrch, a tedy vysokou odrazivost, musí se nastavit parametry skeneru na co nejnižší hodnoty, aby nedocházelo k odleskům a minimalizoval se tak rozptyl, ale zároveň dostatečné pro vytvoření dostatku bodů ke zpracování. Pro filtraci bodů může být zvolen kterýkoliv měřící mód kromě módu 0, jelikož ten je bez filtrace.

*Tab. 28 - Nastavení skeneru*

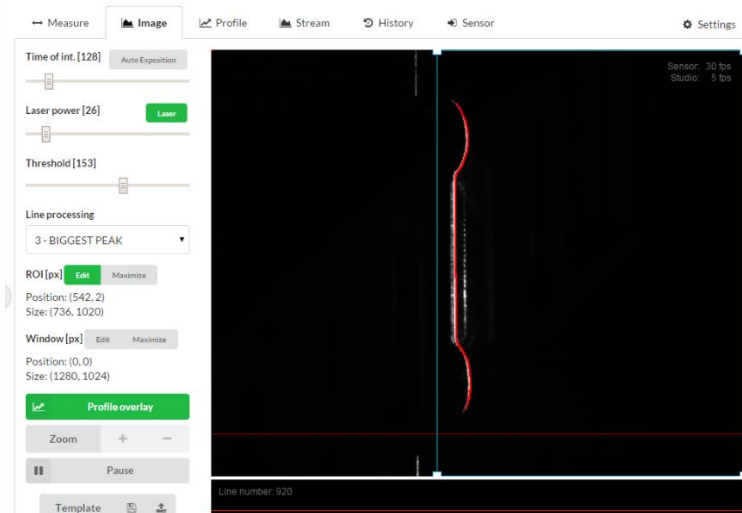
Nastavení laser skeneru		
	<b>Time of int.</b>	128
	<b>Laser power</b>	26
	<b>Threshold</b>	153
<b>Profile processing</b>	<b>Segment</b>	15 pixelů
	<b>Subsegment</b>	10 pixelů
	<b>Measuring mode</b>	1 - 8
	<b>Inclination limit</b>	255

Před samotným měřením ve výrobě by muselo dojít ke kalibraci, kde by se zjistila nejistota měření a její absolutní chyba se musela odečítat nebo přičítat z naměřeným hodnotám. Měření by probíhalo uprostřed měřícího pole nejen z důvodu přesnosti ve směru height, která ale není v tomto případě tak podstatná, ale především z důvodu přesvícení jednotlivých částí profilu, snazšího vhledu kamery do prolisu a zároveň dostatečné rozlišovací schopnosti snímače.

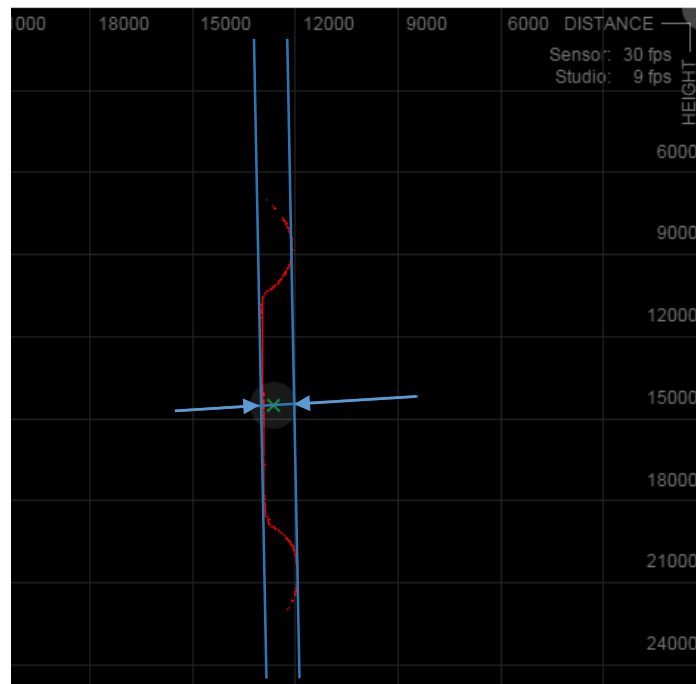
Následně by se vytvořil software, který by prokládal mrakem zpracovaných bodů vytvořených na dně prolisu přímku a zároveň by vytvářel tečnou přímku k bodům vytvořených na vršku trubičky. Dopočítala by se vzdálenost mezi těmito přímkami v těžišti mrak bodů ze dna prolisu, porovnála se s výkresovou hodnotou a výsledky by se zapisovaly do protokolu. Software, který by pracoval na takovémto principu, vytváří paning. Štajnochr, ale zatím je ve fázi vývoje. TL Studio takovou funkci nemá.



Obr. 83 - Měření hloubky prolisu



Obr. 82 - Snímání trubičky dna prolisu



Obr. 84 - Způsob měření hloubky prolisu

## 5. Závěr

Tato práce se v úvodu zabývá obecně skenováním, které slouží k digitalizaci textů, filmů nebo předmětů. Konkrétně se zaměřuje na laserové skenování. Základem celé technologie je laserový paprsek, o kterém je zde dopodrobna napsáno, jak pracuje. Jeho výhoda tkví v koherentnosti, směrovosti a monochromatickosti světelného záření. Laserové skenování se dále dělí do dvou nejdůležitějších odvětví, a to na 3D a 2D skenování. Pro 3D skenování se například využívají metody výpočtu doby dráhy letu laserového paprsku nebo použití dvou paprsků tvořících kříž. V druhém případě se pomocí dvou kamer snímá povrch skenovaného objektu a z něho odražené laserové paprsky. Pro tuto metodu je důležitý jednoduchý matematický princip triangulace, kterým dopočítává software polohy nasnímaných bodů a vytváří z nich takzvaný mrak bodů, ze kterého se skládá matematický 3D model.

Na stejném principu funguje i 2D skenování, kde nevzniká 3D model, ale pouze profil vytvořený odraženým paprskem od objektu. Nasnímaný profil se zpracuje softwarem na mrak bodů, který se dále vyhodnocuje pro měření délky profilu, šířek mezer, velikosti děr nebo k měření hloubek. Jsou zde vybráni různí výrobci těchto skenovacích senzorů

a popsány jejich zařízení se zaměřením především na přístroj TLE1 v modifikaci TLE1-35-65 od firmy Metralight, který byl předmětem hlubší analýzy.

Na tomto skeneru proběhla řada měření, která byla za účelem seznámení se s vlastnostmi zařízení. Posléze bylo navrženo přesné zařízení pro určení vlivu různých materiálů a jejich povrchů a na určení přesnosti měření v celém měřicím rozsahu senzoru. Z analýzy odrazivosti se zjistilo, že nejlepší povrchy jsou s nízkou odrazivostí a nízkým rozptylem paprsku, jako je například surová uhlíková ocel. Nevyhovující vlastnosti má například lesklá mosaz nebo broušený hliník. Dále byly určeny nejistoty měření v celém měřicím rozsahu senzoru TLE1 na ostré břitové destičce, na které se měřila délka profilu. Upnutím třech břitových destiček se vytvořila mezera a opět bylo provedeno měření nejistot v měřicím rozsahu skeneru. Výsledky ukázaly, že při změně vzdálenosti senzoru od předmětu (osa distance) se rozdíl mezi skutečnou vzdáleností a vzdáleností uvedenou skenerem lineárně mění. Vyhodnocená lineární funkce je závislá na nastavení skeneru, použitém zkoumaném objektu a podmínkách při měření. To stejné platí pro chybu měření ve zkoumaném směru měření. Při zjišťování vlivu polohy v měřicím rozsahu přístroje na délku profilu nebo délku mezery bylo zjištěno, že nejlepší výsledky měření jsou uprostřed rozsahu ve směru výšky paprsku (osa height), tedy ve směru podélném s profilem paprsku. Krajní oblasti v šířce 5 mm mají třikrát horší měřicí přesnost při měření délky profilu a až desetkrát horší při měření šířky mezery. Toto platí pro měření s konkrétním senzorem a jeho nastavených parametrů, za dobrých okolních podmínek a při měření na konkrétních břitových destičkách.

Z toho vyplývá, že pokud chceme skener použít v průmyslové aplikaci, je vždy zapotřebí nejdříve provést kalibraci na konkrétním výrobku a stanovit nejistoty měření.

Získané poznatky byly nakonec aplikovány na návrhu konkrétní úlohy, kdy zákazník chce změřit hloubku prolisů u jím vyráběné trubičky, které se pozvolna mění, a požadoval automatizaci tohoto měření.

## Seznam obrázků

Obr. 1 - Skenovací hlava [25] .....	2
Obr. 2 - Porovnání 2D laseru a hlavou se třemi rovinami osvitu (laserový kříž) [3].....	2
Obr. 3 - Základní schéma laseru [5] .....	5
Obr. 4 - Stimulovaná emise [8] .....	6
Obr. 5 - Laser generující koherentní záření [5] .....	6
Obr. 6 - Koherence světelných vln [8].....	7
Obr. 7 - Způsob vysílání laserového paprsku [9].....	8
Obr. 8 - 2D a 3D laserové skenování objektu [11] .....	9
Obr. 9 - Schéma triangulace [12] .....	10
Základní linie mezi kamerou a laserovou diodou je označena na obr. 10 písmenem $d$ , kdežto $\phi$ je úhel kamery a $\theta$ je úhel laseru, přičemž oba úhly jsou svírány se svislou osou. Tyto statické nebo proměnné parametry jsou známé (pro případ dírkové kamery): [12] .....	10
Obr. 11- Typický stereovizní systém [13].....	13
Obr. 13 - Schéma triangulačního laserového systému [14].....	14
Obr. 14 - Schéma měření a výstup z měření [14] .....	15
Obr. 15 - Schéma měření laserovým skenerem.....	16
Obr. 16 - Algoritmus při skenování velkých objektů [19].....	18
Obr. 17 - Od 3D skenu přes 3D model po 3D tisk [20] .....	19
Obr. 18 - HandyScan 3D [21] .....	20
Obr. 19 - Trimble TX8 [22] .....	21
Obr. 20 - 2D laser skener TLE1 [23] .....	23
Obr. 21 - Rozměry skeneru TLE1-35-65 [mm] [23] .....	25
Obr. 22 - Příklad měření vzdálenosti pomocí Módu 0 [23].....	29
Obr. 23 - Příklad měření nejbližšího segmentu pomocí Módu 1 [23] .....	30
Obr. 24 - Příklad využití Módu 3 [23] .....	31
Obr. 25 - Příklad využití Módu 2 [23] .....	31
Obr. 26 Schema skeneru scanCONTROL 29xx-25 [24] .....	36
Obr. 27 - Werth Laser Line Probe (LLP) [26] .....	37
Obr. 28 - Skenovací metoda "spline-scanning" [25] .....	38
Obr. 29 - Vizualizace měřicího rozsahu TLE1 senzoru [23] .....	40
Obr. 30 - Záložka Měření [23].....	41
Obr. 31 - Záložka Image [23] .....	42
Obr. 32 - Záložka Profile [23] .....	42
Obr. 33 - Vizualizace jednotlivých měření ve směru height pro délku profilu .....	44
Obr. 34 - Vizualizace jednotlivých měření ve směru distance pro délku profilu.....	45
Obr. 35 - Ukázka měření krycího, transparentního plastu.....	46
Obr. 36 - Koncová měřka o tloušťce 6,6636 mm .....	46
Obr. 37 - Image - Mód7 - Měření koncové měřky .....	48
Obr. 39 - Profile - Mód0 - Měření koncové měřky.....	50
Obr. 38 - Image - Mód0 - Měření koncové měřky .....	50
Obr. 40 - Ocelový rámeček .....	51
Obr. 41 - Image - Mód5 - Měření ocelového rámečku s použitím ROI .....	52
Obr. 42 - Profile - Mód5 - Měření ocelového rámečku s použitím ROI .....	52
Obr. 43 - Image - Mód0 - Měření ocelového rámečku s použitím ROI .....	55
Obr. 44 - Profile - Mód0 - Měření ocelového rámečku s použitím ROI .....	55
Obr. 45 - Image - Mód0 - Měření dna ocelového rámečku .....	57
Obr. 46 - Profile - Mód0 - Měření dna ocelového rámečku.....	58
Obr. 47 - Ocelová vidlička .....	59
Obr. 49 - Image - Mod0 - Přiblížení při měření dna ocelové vidličky.....	60
Obr. 50 - Profile - Mod0 - Přiblížení při měření mezery ocelové vidličky.....	60



Obr. 51 - Image - Mod0 - Přiblížení při měření mezery ocelové vidličky .....	60
Obr. 48 - Image - Mod0 - Přiblížení při měření dna ocelové vidličky .....	60
Obr. 52 - Návrh žebrování.....	61
Obr. 53- Pracoviště .....	62
Obr. 54 - Snímání vzorku ošetřeného práškovou nátěrovou hmotou .....	63
Obr. 60 - Fialový elox - lesklý .....	64
Obr. 63 - Borušený hliník .....	64
Obr. 64 - Mosaz .....	64
Obr. 61 - Měď .....	64
Obr. 62 - Kompozit z uhlíkových vláken.....	64
Obr. 58 - Uhlíková ocel .....	64
Obr. 57 - Fialový elox - matný.....	64
Obr. 56 - Prášková nátěrová hmota.....	64
Obr. 55 - Epoxidová pryskyřice s 8% jemného grafitu .....	64
Obr. 59 - Žárový zinek.....	64
Obr. 67 - Bílá prášková nátěrová hmota - podexponováno - Distance 1 .....	67
Obr. 65 - Bílá prášková nátěrová hmota - přeexponováno - Distance 3 .....	67
Obr. 70 - Mosaz - přeexponování - Distance 2.....	68
Obr. 68 - Broušený hliník - přeexponování - Distance 2 .....	68
Obr. 66 - Bílá prášková nátěrová hmota - ideální expozice - Distance 1 .....	68
Obr. 69 - Kompozit - přeexponování - Distance 2.....	69
Obr. 70 - Břítové destičky .....	70
Obr. 71 - Vyrovnávání objektů.....	70
Obr. 72 - Kontrola kolmosti laserového paprsku.....	71
Obr. 73 - Měření tloušťky břitové destičky .....	71
Obr. 78 - Profile - Měření délky profilu.....	76
Obr. 75 - Image - Měření délky profilu .....	76
Obr. 76 - Measure - Měření délky profilu .....	77
Obr. 77 - Zaznamenané souřadnice bodů softwarem SKENER-Pok.....	77
Obr. 79 - Měření mezery mezi břitovými destičkami .....	78
Obr. 81 - Image - Vliv stěn .....	79
Obr. 80 - Profile - Vliv stěn.....	80
Obr. 82 - Trubička .....	84
Obr. 85 - Snímání trubičky dna prolisu .....	86
Obr. 83 - Měření hloubky prolisu.....	86
Obr. 84 - Způsob měření hloubky prolisu .....	87



## Seznam tabulek

Tab. 1 - Porovnání některých 3D laserových skenerů [14] .....	17
Tab. 2 - Vlastnosti jednotlivých modifikací skeneru TLE1 [22].....	24
Tab. 3 Parametry zobrazovacího snímače [22].....	26
Tab. 4 - Parametry pro nastavení profilu [22] .....	27
Tab. 5 - Parametry pro zpracování profilu [22] .....	28
Tab. 6 - Parametry skenerů scanCONTROL [23] .....	34
Tab. 7 - Parametrů skeneru Werth Laser Line Probe [24] .....	37
Tab. 8 - Velikosti koncových měrek .....	44
Tab. 9 - Nastavení skeneru .....	46
Tab. 10 - Naměřené hodnoty módem 7 pro koncovou měrku 6,6636 .....	47
Tab. 11 - Nastavení skeneru .....	48
Tab. 12 - Naměřené hodnoty módem 0 pro koncovou měrku 6,6636 .....	49
Tab. 13 - Nastavení skeneru .....	51
Tab. 14 - Naměřené hodnoty módem 5 pro ocelový rámeček.....	51
Tab. 15 - Nastavení skeneru .....	53
Tab. 16 - Naměřené hodnoty módem 0 pro ocelový rámeček.....	53
Tab. 17 - Nastavení skeneru .....	56
Tab. 18 - Naměřené hodnoty mezery a dna módem 0 pro ocelový rámeček .....	57
Tab. 19 - Nastavení skeneru .....	59
Tab. 20 - Naměřené hodnoty mezery a dna módem 0 pro ocelovou vidličku.....	59
Tab. 21 - Vzorky pro měření odrazivosti .....	63
Tab. 22 - Zpracovaná data z měření odrazivosti .....	65
Tab. 23- Nejistoty měření na různých površích .....	66
Tab. 24 - Nastavení skeneru pro měření délky profilu .....	72
Tab. 25 - Nejistoty měření ve směru height při měření objektu .....	75
Tab. 26 - Nastavení skeneru pro měření šířky mezery .....	79
Tab. 27 - Nejistoty měření ve směru height při měření šířky mezery.....	83
Tab. 28 - Nastavení skeneru .....	85
Tab. 29 - Naměřené hodnoty distance a nastavení skeneru pro jednotlivé vzorky .....	94

## Seznam použité literatury

- [1] KNOTEK, Pavel. *Velká kniha o skenování*. Brno: Unis, 1999. ISBN 978-80-86097-37-4.
- [2] PECINOVSKÝ, Josef. *Skenery a skenování: jak vybíráme skener, jak skenery fungují, jak ukládáme obrázky, jak svá díla upravujeme, jak třídíme obrázky*. Praha: Grada, 2003. ISBN 978-80-247-0544-6.
- [3] SLÁMA, Lukáš. *Měření laserovým 3D skenerem* [online]. [vid. 2019-06-28]. Dostupné z: <https://stc.fs.cvut.cz/history/2011/sbornik/papers/pdf/1100079-1.pdf>
- [4] VRBOVÁ, Miroslava, Petr GAVRILOV a Helena JELÍNKOVÁ. *Úvod do laserové techniky*. Praha: České vysoké učení technické, 1994. ISBN 978-80-01-01108-9.
- [5] LAPŠANSKÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi* [online]. [vid. 2010-12-13]. .. Dostupné z: <http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>.
- [6] STRUMBAN, Emil J. *Lasery a optoelektronika*. 1. vyd. Praha: Panorama, 1989.
- [7] VYUŽITÍ LASERŮ V PRŮMYSLU, Stanislav NĚMEČEK a MATEX PM (FIRMA), ed. *Využití laseru v průmyslu: MATEX PM: [Plzeň 29.-30.3.2011]*. Brno: Tribun EU, 2011. ISBN 978-80-7399-379-5.
- [8] *Properties of Lasers - WorldOfLasers.com* [online]. [vid. 2019-07-03]. Dostupné z: <http://www.worldoflasers.com/laserproperties.htm>
- [9] *Rozdělení a klasifikace laserů* [online]. [vid. 2019-07-03]. Dostupné z: [http://people.fjfi.cvut.cz/sulcjan1/ult/08\\_trideni\\_laseru.pdf](http://people.fjfi.cvut.cz/sulcjan1/ult/08_trideni_laseru.pdf)
- [10] URBÁNEK, Aleš. *Kontrola součástí pomocí metod reverzního inženýrství* [online]. [vid. 2019-06-30]. Dostupné z: [https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/1813/2008\\_BP\\_Ales\\_Urbaneck\\_77621.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/1813/2008_BP_Ales_Urbaneck_77621.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [11] KÁLOVÁ, Ilona. *Optické metody měření 3D objektů* [online]. [vid. 2019-07-11]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05023/index.html>
- [12] *Laser scanning and Triangulation* [online]. [vid. 2019-07-12]. Dostupné z: <http://georgepavlides.info/research/LaserScanningAndTriangulation.php>
- [13] ŘÍHA, Jan. *Laserové skenování* [online]. [vid. 2013]. 2013, Dostupné z: <http://spszem.cz/storage/files/67/3D-skenovani-2013.pdf>.
- [14] JECIC, Stjepan. *THE ASSESSMENT OF STRUCTURED LIGHT AND LASER SCANNING METHODS IN 3D SHAPE MEASUREMENTS* [online]. [vid. 2003-9-20]. 2003, Dostupné z: <https://bib.irb.hr/datoteka/170686.p126.pdf>.
- [15] *3D Skenování | 3DSCAN* [online]. [vid. 2019-06-30]. Dostupné z: <https://www.3d-skenovani.cz/>

- [16] TANG, Pingbo, Daniel HUBER, Burcu AKINCI, Robert LIPMAN a Alan LYTLE. Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques. *Automation in Construction* [online]. 2010, **19**(7), 829–843. ISSN 0926-5805. Dostupné z: doi:10.1016/j.autcon.2010.06.007
- [17] *Bezkontaktní digitalizace předmětů pomocí 3D scanneru Minolta Vivid VI-700* [online]. [vid. 2019-07-02]. Dostupné z: [http://www.elektrorevue.cz/clanky/03013/kap\\_2.htm](http://www.elektrorevue.cz/clanky/03013/kap_2.htm)
- [18] ARAYICI, Yusuf. An approach for real world data modelling with the 3D terrestrial laser scanner for built environment. *Automation in Construction* [online]. 2007, **16**(6), 816–829. ISSN 0926-5805. Dostupné z: doi:10.1016/j.autcon.2007.02.008
- [19] *3D skenery - skenování reálných objektů do virtuálních 3D modelů | SolidVision* [online]. [vid. 2019-07-02]. Dostupné z: <https://www.solidvision.cz/3d-skenery/>
- [20] TRIMBLE TX8 LASEROVÝ SKENER. 2013, [online]. [vid. 2019-07-02]. Dostupné z: [https://geotronics.cz/wp-content/uploads/2016/06/DS\\_TX8.pdf](https://geotronics.cz/wp-content/uploads/2016/06/DS_TX8.pdf).
- [21] PODEŠVA, Petr. Návrh a ověření metodiky kalibrace 2D triangulačních skenerů [online]. 2017 [vid. 2019-07-15]. Dostupné z: <http://dspace.vsb.cz/handle/10084/127392>
- [22] TLE1. *Metralight* [online]. [vid. 2019-07-15]. Dostupné z: <https://www.metralight.com/our-products/reflective-laser-sensors/tle1/?lang=cs>
- [23] *Laserové skenery - výběr modelů | Micro-Epsilon* [online]. [vid. 2019-07-18]. Dostupné z: [https://www.micro-epsilon.cz/2D\\_3D/laser-scanner/model-selection/](https://www.micro-epsilon.cz/2D_3D/laser-scanner/model-selection/)
- [24] KADLČÍK, Rostislav. MM [online]. [vid. 2007-06-20]. 2007, (6), 070640, Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/senzor-pro-presnou-a-komplexni-inspekci-ci-reverzni-inzenyrstvi.html>.
- [25] Laser Line Probe. *Werth, Inc* [online]. [vid. 2019-07-20]. Dostupné z: <http://werthinc.com/products/laser-line-probe/>

## Přílohy

### 1. Naměřené hodnoty distance a nastavení skeneru pro jednotlivé vzorky z měření odrazivosti

Tab. 29 - Naměřené hodnoty distance a nastavení skeneru pro jednotlivé vzorky

Vzorky	Distance1 [mm]	Distance2 [mm]	Distance3 [mm]	Nastavení skeneru			Nasvícení
				Time of int.	Laser Power	Threshold	
Epoxidová pryskyřice	29,001	14,978	0,992	1049	255	130	Přesvícené
	28,983	14,975	0,974	86	0	100	Podsvícené
	29,01	14,972	0,984	324	81	130	Optimální
Kompozit z uhlíkových vláken	28,967	14,964	0,974	1049	255	130	Přesvícené
	28,974	14,948	0,954	86	0	100	Podsvícené
	28,973	14,945	0,965	329	57	130	Optimální
Prášková nátěrová hmota	28,88	14,93	0,937	1049	255	130	Přesvícené
	28,978	14,965	0,979	86	0	100	Podsvícené
	29,005	14,952	0,978	71	13	130	Optimální
Žárový zinek	29,022	14,995	1,01	1049	255	130	Přesvícené
	29,013	14,984	0,985	86	0	100	Podsvícené
	28,983	14,981	0,997	293	18	130	Optimální
Fialový elox - matný	28,989	14,937	0,963	1049	255	130	Přesvícené
	28,961	14,935	0,945	86	0	100	Podsvícené
	28,941	14,925	0,954	133	18	130	Optimální
Fialový elox - lesklý	28,988	14,941	0,957	1049	255	130	Přesvícené
	28,943	14,933	0,939	86	0	100	Podsvícené
	28,934	14,925	0,948	190	41	130	Optimální
Uhlíková ocel	29,012	15,002	1,021	1049	255	130	Přesvícené
	29,017	14,993	1,003	86	0	100	Podsvícené
	29,005	14,986	0,994	241	48	130	Optimální
Měď	28,959	14,96	0,956	1049	255	130	Přesvícené
	28,943	14,922	0,931	86	0	100	Podsvícené
	28,935	14,918	0,926	159	32	130	Optimální
Hliník	28,975	15,095	0,997	1049	255	130	Přesvícené
	28,977	14,976	0,953	86	0	100	Podsvícené
	28,943	14,932	0,943	148	23	130	Optimální



Mosaz	28,969	15,476	0,967	1049	255	130	Přesvícené
	28,962	14,97	0,966	86	0	100	Podsvícené
	28,943	14,944	0,951	629	157	170	Optimální

## 2. Elektronické přílohy

Na kompaktním disku, který je součástí i tištěné diplomové práce, jsou k prohlédnutí tabulky v softwaru Microsoft Excel s naměřenými a zpracovanými hodnotami z měření odrazivosti, délky profilu a šířky mezery. Tyto tabulky jsou uloženy po názvy:

1. Vliv\_Distance.xlsx
2. Delka\_profilu-Height.xlsx
3. Sirka\_mezery-Height.xlsx
4. Odrazivost.xlsx