

Statistické hodnocení obtížně měřitelných povrchů

Tomáš Nekola

Bakalářská práce
2024



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Tomáš Nekola
Osobní číslo:	T210086
Studijní program:	B3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Technologická zařízení
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Statistické hodnocení obtížně měřitelných povrchů

Zásady pro vypracování

- Literární rešerše k problematice hodnocení povrchů.
- Statistické nalezení a stanovení diferencí mezi vyhodnocováním povrchů ve shodě s ISO 21920-1, ISO 21920-2 a ISO 25178.
- Provede se kontrola povrchů pomocí mikroskopu.
- Dále bude udělána analýza povrchů na bezkontaktním profiloměru.
- Následně budou naměřená data drsnosti povrchu statisticky hodnocena.

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. ČSN EN ISO 21920-1: Geometrické specifikace produktu (GPS) – Textura povrchu: Profil – Část 1: Indikace textury povrchu. (2023) (01.06.2023). Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
2. ČSN EN ISO 21920-2: Geometrické specifikace produktu (GPS) – Textura povrchu: Profil – Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu. (2023) (01.06.2023). Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
3. ČSN EN ISO 25178-2. Geometrické specifikace produktu (GPS) – Textura povrchu: Plocha – Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu. Praha: Český normalizační institut, 2012.
4. MELOUN, Milan, Jiří MILITKÝ a Martin HILL. *Statistická analýza vícerozměrných dat v příkladech*. Praha: Academia, 2012. Gerstner. ISBN 978-80-200-2071-0

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Milena Kubišová, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2024**
Termín odevzdání bakalářské práce: **17. května 2024**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 4. března 2024

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:
Tomáš Nekola

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Tématem této práce je statistické hodnocení obtížně měřitelných povrchů. Teoretická část popisuje způsoby obroby povrchu konvenčními a nekonvenčními metodami. Popisuje normy potřebné pro hodnocení drsnosti povrchu, samotné hodnocení drsnosti povrchu a statistické vyhodnocení naměřených dat. V praktické části je popsáno měření vzorků, následné porovnání parametrů Ra, Rz a Rmr a zobrazení nasnímaných povrchů pomocí programu Talymap GOLD.

Klíčová slova: nekonvenční obrábění, drsnost povrchu, statistické vyhodnocení, obtížně měřitelné povrchy

ABSTRACT

The topic of this thesis is statistical evaluation of difficult to measure surfaces. The theoretical part describes the methods of surface machining by conventional and unconventional methods. It describes the norms required for surface roughness evaluation, the surface roughness evaluation itself and the statistical evaluation of the measured data. The practical part describes the measurement of samples, the subsequent comparison of Ra, Rz and Rmr parameters and the display of the imaged surfaces using Talymap GOLD program.

Keywords: unconventional machining, surface roughness, statistical evaluation, difficult to measure surfaces

Chtěl bych moc poděkovat své vedoucí bakalářské práce Ing. Mileně Kubišové, Ph.D. za veškerou pomoc, kterou mi během zpracování nabídla. Za její ochotu, vstřícnost, cenné rady a trpělivost, které občas bylo třeba.

Chtěl bych také poděkovat své rodině, která je mou oporou nejen ve studiu, ale i v životě.

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 ZPŮSOBY OBROBY POVRCHU.....	11
1.1 KONVENČNÍ METODY	11
1.1.1 Soustružení.....	11
1.1.2 Frézování.....	11
1.1.3 Vrtání.....	12
1.1.4 Vyvrtávání.....	12
1.1.5 Hoblování a obrážení	12
1.1.6 Protahování a protlačování.....	13
1.1.7 Broušení	13
1.2 NEKONVENČNÍ METODY	13
1.2.1 Elektroerozivní obrábění	13
1.2.2 Elektrochemické obrábění.....	14
1.2.3 Ultrazvukové obrábění	14
1.2.4 Obrábění laserem	14
1.2.5 Obrábění plasmou	15
1.2.6 Obrábění paprskem elektronů	15
1.2.7 Obrábění vodním paprskem	15
2 POTŘEBNÉ NORMY PRO HODNOCENÍ DRSNOSTI POVRCHŮ	16
2.1 ČSN EN ISO 21920-1.....	16
2.1.1 Bod č. 4 - Toleranční přejímací pravidla	16
2.2 ČSN EN ISO 21920–2.....	16
2.2.1 Bod č. 3 - Termíny a definice.....	16
2.2.2 Bod č. 4 – Parametry pole	17
2.2.3 Bod č. 5 – Parametry prvků.....	18
2.3 ČSN EN ISO 25178–2	18
2.3.1 Bod č. 3 - Termíny a definice.....	18
2.3.2 Bod č. 4 – Parametry pole	19
2.3.3 Bod č. 5 – Parametry prvků.....	19
3 ZPŮSOBY HODNOCENÍ JAKOSTI POVRCHŮ	20
3.1 STRUKTURA POVRCHU	20
3.1.1 Základní profil.....	21
3.1.2 Vlnitost povrchu.....	21
3.1.3 Drsnost povrchu	21
3.2 ZPŮSOBY MĚŘENÍ DRSNOSTI.....	22
3.2.1 Kvalitativní metody.....	22
3.2.2 Kvantitativní metody.....	22
3.2.3 Dotykové metody snímání povrchu	22
3.2.4 Bezdotykové metody snímání povrchu.....	23

4	STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ DAT	24
4.1	METODIKA EDA	24
4.1.1	Histogram.....	24
4.1.2	Box-plot.....	25
4.1.3	Časová řada	25
5	CÍLE PRÁCE	26
II	PRAKTICKÁ ČÁST	27
6	MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJ	28
7	VZORKY	29
7.1	MĚŘENÍ VZORKŮ	29
7.2	HOMOGENITA A HETEROGENITA POVRCHU	30
8	NAMĚŘENÉ VÝSLEDKY	31
8.1	NAMĚŘENÉ HODNOTY RZ	31
8.2	NAMĚŘENÉ HODNOTY RA	38
8.3	NASNÍMANÁ DATA	45
8.3.1	3D pohledy jednotlivých vzorků	55
ZÁVĚR	ZÁVĚR	60
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	63
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	66
SEZNAM OBRÁZKŮ	SEZNAM OBRÁZKŮ	67
SEZNAM TABULEK	SEZNAM TABULEK	69

ÚVOD

Ve strojírenské výrobě je často kladen důraz na přesnost rozměrů, tvaru a drsnosti povrchu. Zejména drsnost má vliv na životnost a správné fungování výrobku. V poslední době se více rozšiřují nekonvenční metody obrábění, které kromě výhod přinášejí i problémy. Kdy u konvenčních metod bývá při stejném nastavení drsnost po celém povrchu stejná, u nekonvenčních metod tomu tak být nemusí.

Tato práce se zabývá hodnocením povrchů obráběných nekonvenčními metodami a statistickým hledáním diferencí jednotlivých hodnot po ploše povrchu se souladem norem ČSN EN ISO 21920-1, ČSN EN ISO 21920-2 a ČSN EN ISO 25178-2.

Teoretická část se zabývá popisem způsobů obrábění povrchu, jak konvenčních, tak nekonvenčních. Zabývá se definováním důležitých pojmů pro hodnocení povrchu, popisem způsobů hodnocení povrchů a následným statistickým vyhodnocením dat.

V praktické části se následně naměřená data na bezkontaktním profiloměru statisticky vyhodnocují, konkrétně se jedná o parametry Rz a Ra, které se navzájem porovnávají. Cílem je zjistit, zda povrchy obrobené nekonvenčně dosahují homogenních povrchů, nebo se dá potenciálně heterogenní povrch rozdělit na pravidelné části.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ZPŮSOBY OBROBY POVRCHU

1.1 Konvenční metody

1.1.1 Soustružení

Jedná se o strojní obrábění vnějších, vnitřních a čelních ploch obrobku, který rotuje dle osy. Hlavní pohyb soustružení koná obrobek, a to pohyb rotační. Co se týče vedlejšího pohybu, posuvu, ten je konán nástrojem-soustružnickým nožem. [1]

Soustruhy se obecně dělí na hrotové, revolverové, svislé, čelní, poloautomatické, automatické a číslicově řízené. Pro obrábění rotačních poloh se nejčastěji používají hrotové soustruhy. [1]

Přesnost jednotlivých rozměrů a jakost obrobené plochy závisí hlavně na řezných podmínkách, obráběným materiálem či geometrií nástroje. [2]

1.1.2 Frézování

Jedná se o obrábění rovinných nebo tvarových ploch, které jsou vnitřní nebo vnější. Frézuje se vícebřítým nástrojem. Hlavní pohyb (rotační) je konán nástrojem. Vedlejší pohyb naopak koná obrobek, většinou posuvný. Řezný proces frézování je přerušovaný, tj. jednotlivé zuby nástroje odebírají třísku rozdílných velikostí. Frézování dělíme podle smyslu otáčení frézy vůči danému směru posuvu, a to na sousledné a nesousledné. [2]

Sousledné frézování

Nástroj se otáčí ve směru posuvu obráběného materiálu. Při vniknutí zubu nástroje do obráběného materiálu vzniká maximální tloušťka třísky a při vycházení z obrobku vytváří obrobenou plochu. [2]

Nesousledné frézování

Nástroj se oproti souslednému frézování otáčí proti směru posuvu obráběného materiálu. Zub při vniknutí do obráběného materiálu vytváří obrobenou plochu a při vycházení vzniká maximální tloušťka. [2]

Frézy se dělí na válcové, čelní, kotoučové, kuželové, tvarové. Frézky na konzolové (vodorovné, svislé, universální), rovinné (stolové, portálové) a speciální (na drážky, na vačky, pantografické). [2]

Stejně jako při soustružení jsou řezné podmínky především závislé na vlastnostech nástroje, stroje, obrobku a prostředí. [2]

1.1.3 Vrtání

Technologická metoda pro výrobu válcových nebo tvarových děr. Používá se dvoubřitého nástroje-vrtáku, který má řezné hrany na hrotě. Nástroj většinou vykonává hlavní rotační pohyb, ale často i pohyb vedlejší přímočarý. Pro zpřesnění rozměru a tvaru díry se používá vícebřítý výhrubník pro vyhrubování a výstružník pro vystružování. [1]

Jako nástroj slouží vrták. Nejčastěji se používá šroubovitý vrták. Mezi další používané vrtáky patří kopinatý, dělový, hlavňový, středící. Pro výkonné vrtání se používají vrtací hlavy. [1]

Řezné podmínky se při vrtání mohou pohybovat v širokém rozsahu. Závisejí zejména na použitém nástroji. Řezné rychlosti jsou v porovnání s předchozími metodami nižší, hlavně díky nepříznivým podmínkám. Zejména se jedná o špatný odvod tepla během vrtání a vrták je velmi tepelně zatížen. Proto se často používají chladící kapaliny. [2]

1.1.4 Vyvrtávání

Jedná se o metodu obrábění předvrtaných litých, předkovaných nebo lisovaných děr. Používá se k dosažení předepsaného přesného průměru a polohy díry. Jako nástroj se používá vyvrtávací nůž, který je upnutý ve vyvrtávací tyči, nebo vyvrtávací nožové hlavě. Nástroj vykonává hlavní rotační pohyb. Vedlejšího posuvného pohybu se dosahuje relativním pohybem nástroje a obrobku ve směru osy rotace. [1]

Pro vyvrtávání se používají vodorovné vyvrtávačky stolové, nebo deskové. [1]

Přesnost rozměrů a jakost obrobené plochy se velmi liší, v závislosti na parametrech obrábění (řezné podmínky, geometrie řezného nástroje). [2]

1.1.5 Hoblování a obrážení

U těchto metod obrábění je hlavní pohyb přímočarý. Při hoblování jej koná obrobek a při obrážení nástroj. Řezný pohyb je přerušovaný, nůž pracuje jen při pracovním zdvihu. Zpětný chod je naprázdno a při něm dochází ke chlazení nástroje. [1]

Jako nástroj se u obou technologií používá hoblovací (obrážecí) nůž. Jedná se o jednobřítový nástroj. Má podobnou konstrukci a geometrii jako soustružnické nože. [1]

Pro hoblování se používají hoblovky jednostranné a dvoustranné. Obrážky se dělí na vodorovné a svislé. [2]

1.1.6 Protahování a protlačování

Jedná se o vysoce produktivní metody obrábění využívané hlavně v hromadné a sériové výrobě. Jedná se o obrábění vnějších nebo vnitřních rovinných či tvarových ploch mnohobřitým nástrojem. Hlavní pohyb (přímočarý) koná nástroj. [2]

Výhoda těchto metod je vysoká přesnost rozměrů i tvaru a jakosti obrobenej plochy. Jakost je ovlivněna řezným prostředím. [2]

1.1.7 Broušení

Jedná se o dokončovací metodu obrábění za pomoci brusného kotouče, jehož břity jsou tvořeny ze zrn tvrdých materiálů. Brouší se rovinné, válcové, nebo tvarově vnější a vnitřní plochy. Zrna brousícího nástroje jsou různých velikostí, náhodně rozmístěna a spojena pojivem. Během procesu broušení je v kontaktu velké množství zrn. Ty odebírají třísky, které jsou velmi malých průřezů a různých velikostí. [2]

Brusky se obvykle dělí na stojanové, hrotové, bezhroté, rovinné, na díry, nástrojářské pásové a speciální. [2]

Broušení je dokončovací operace, takže se požaduje vysoká přesnost rozměrů a jakosti obrobenej ploch. Vlastnosti těchto parametrů závisí na několika vlastnostech brousícího kotouče. Zejména na přesnosti a tuhosti brusky, nebo velikosti zrn. [2]

1.2 Nekonvenční metody

1.2.1 Elektroerozivní obrábění

Používá se elektrická eroze, což je fyzikální jev, při kterém se za tepelného a tlakového působení elektrických výbojů odebírají částičky povrchových vrstev. Doprava těchto částiček z řezu se provádí za pomoci proudění elektrolytu. [1]

Podle druhu elektrické eroze lze uplatnit několik způsobů, a to elektrojiskrový, elektrokontaktní a anodomechanický. [1]

1.2.2 Elektrochemické obrábění

Při elektrochemickém obrábění je zapojen nástroj jako katoda a obrobek slouží jako anoda. Při zapojení zdroje stejnosměrného proudu na elektrody v elektrolyzáru začne mezi elektrodami v elektrolytu probíhat elektrochemický proces. Při správně zvolených podmínkách začne rozpuštění materiálu anody (obrobku). [1]

1.2.3 Ultrazvukové obrábění

Ultrazvukové obrábění je založeno na působení nástroje o frekvenci 20-30 kHz kolmo na obráběný povrch. Mezi kmitající nástroj a obrobek se ještě přivádí brousící zrna a vyplavovací kapaliny. Brousící zrna vlivem kmitajícího nástroje dostávají kinetickou energii a naráží na povrch obrobku. Využívá se zejména na obrábění nekovových konstrukčních materiálů, jako keramika nebo sklo. [1,3]

1.2.4 Obrábění laserem

Při obrábění laserem se soustředí energie elektromagnetického záření viditelného světla na velmi malou plochu obrobku. Na dané ploše se energie záření přeměňuje na energii tepelnou, značně přesahující teplotu tavení obrobku. Na daném místě se materiál taví a vypařuje se. Použité záření nazýváme slovem laser. [1,4,5]

Laser

Laser neboli Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation je druh elektromagnetického záření. Obvykle vzniká jakožto výsledek uvolňování energie, která vzniká přechodem elektronu atomu z oblasti vyšší energetické hladiny na oblast nižší. Pro dosahování uvolněné energie je třeba nejprve potřeba dostat elektrony do oblasti vyšší energetické hladiny. Tomuto procesu se říká čerpání. Pro průmyslové lasery se používají dva způsoby čerpání, optické a elektrické. [4,5]

Lasery se dají rozlišit na několik typů, které mají rozličné vlastnosti. Ty závisejí na použitém aktivním médiu. Mezi hlavní typy laserů patří:

- Pevné lasery – jako aktivní médium se využívají krystaly nebo skla
- Plynové lasery – využívají plynná aktivní média
- Polovodičové lasery – jako aktivní médium se využívají polovodiče, jako jsou diody
- Kapalínové lasery – využívají kapalná aktivní média

1.2.5 Obrábění plasmou

Tato metoda je založena na principu postupného odtavování materiálu za pomoci plasmy. Tu lze vytvořit za pomoci tzv. Plasmových pistolí. Mezi anodou (obrobkem) a katodou (elektroda v pistolí) vzniká elektrický oblouk, potřebný k zahřátí plynu a vytvoření plasmy. Plasma je považovaná za čtvrté skupenství. Nachází se hlavně ve vesmíru, na zemi se téměř nevyskytuje. [1]

Obrábění plasmou je náročné, zejména kvůli velikému výkonu obrábění. Vyplatí se zejména u těžko obrobitelných kovů. [1]

1.2.6 Obrábění paprskem elektronů

Využívá se paprsku elektronů, který je soustředěný na velmi malou plochu obráběného materiálu. Na daném místě se energie paprsku přeměňuje na tepelnou energii a materiál obrobku se taví a vypařuje. [1,3]

Výhoda této metody je, že lze bez ohledu na jeho fyzikální vlastnosti obrábět libovolný materiál. Ovšem nevýhoda je, že obrobek musí být umístěn ve vakuové komoře. [1,3]

1.2.7 Obrábění vodním paprskem

Jedná se o vysokorychlostní vodní proud malého průměru, který je vstřikován pod velkým tlakem z trysky. Paprsek může být čistý kapalinový, nebo s příměsí abrazivního materiálu pro podpoření abraze. Následná abraze kovu závisí na rychlosti toku a tlaku kapaliny. [1,3]

2 POTŘEBNÉ NORMY PRO HODNOCENÍ DRSNOSTI POVRCHŮ

2.1 ČSN EN ISO 21920-1

„Tato norma popisuje pravidla pro indikace textury povrchu profilovými metodami v technické dokumentaci produktu pomocí grafických značek.“ [6]

2.1.1 Bod č. 4 - Toleranční přejímací pravidla

Tento bod popisuje toleranční přejímací pravidla. Jedná se o toleranční pravidlo maxima (dále T_{max}), toleranční pravidlo 16 % (dále $T_{16\%}$) a toleranční pravidlo mediánu (dále T_{med}). Pokud není zapsané použité toleranční přejímací pravidlo, použije se T_{max} .

T_{max} určuje toleranční mez, která je zaznamenána na výkrese, nebo výrobní dokumentaci. Hodnoty parametru, které nepřekročí toleranční mez jsou přijatelné.

$T_{16\%}$ umožňuje maximálně 16 % naměřených hodnot překročit toleranční mez, aby byl povrch přijatelný.

T_{med} určuje, že medián všech naměřených hodnot parametru musí splňovat definované toleranční meze. Pro uplatnění tohoto pravidla se použijí alespoň 3 naměřené hodnoty. [6]

2.2 ČSN EN ISO 21920-2

„Tato norma specifikuje definice, termíny a parametry pro texturu povrchu pomocí profilových metod.“ [7]

2.2.1 Bod č. 3 - Termíny a definice

V tomto bodě se nachází definice obecných termínů, termínů geometrických parametrů a termínů geometrických prvků. [7]

Obecné termíny

Souřadnicový systém specifikace, index vložení, profilový filtr, primární profil, profil vlnitosti, profil drsnosti, hodnocená délka, úseková délka, počet úseků [7]

Termíny geometrických parametrů

Parametr pole, P, W, R – parametr, výška, hloubka [7]

Termíny geometrických prvků

Segmentace, výstupek, prohlubeň, vrch, údolí, výškové (hloubkové) rozlišení [7]

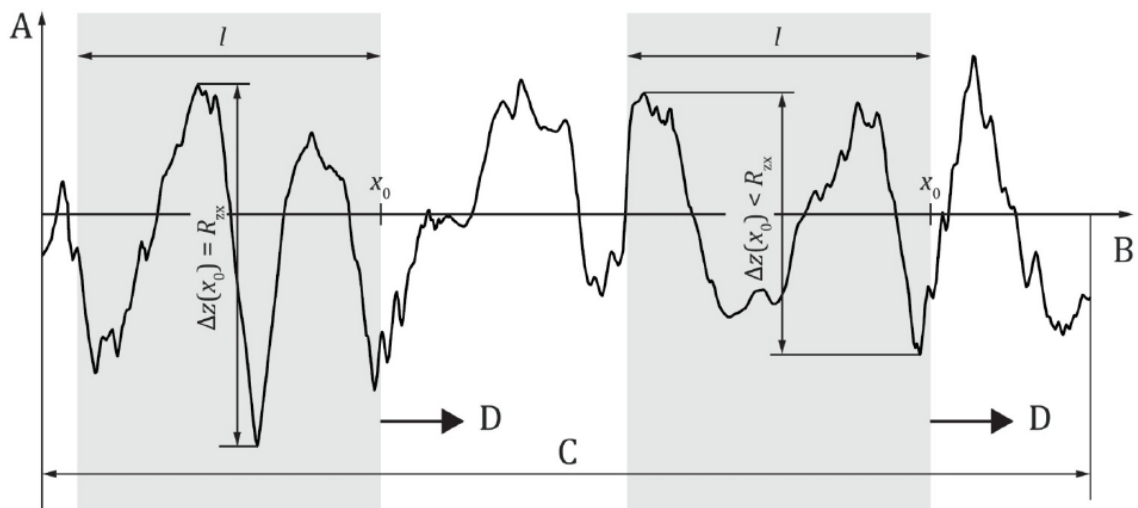
2.2.2 Bod č. 4 – Parametry pole

Tento bod se věnuje definicím parametrům pole vztažené k hodnocené délce. [7]

Výškové parametry

Sřední aritmetická výška R_a – jedná se o „aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic“ [7]

Maximální výška úseku R_z – jedná se o „maximální hodnotu rozdílu mezi nejvyšší hodnotou pořadnice a nejnižší hodnotou pořadnice vypočítaná v rámci úseku o délce l pohybujícího se po hodnocené délce l_e “ [7]



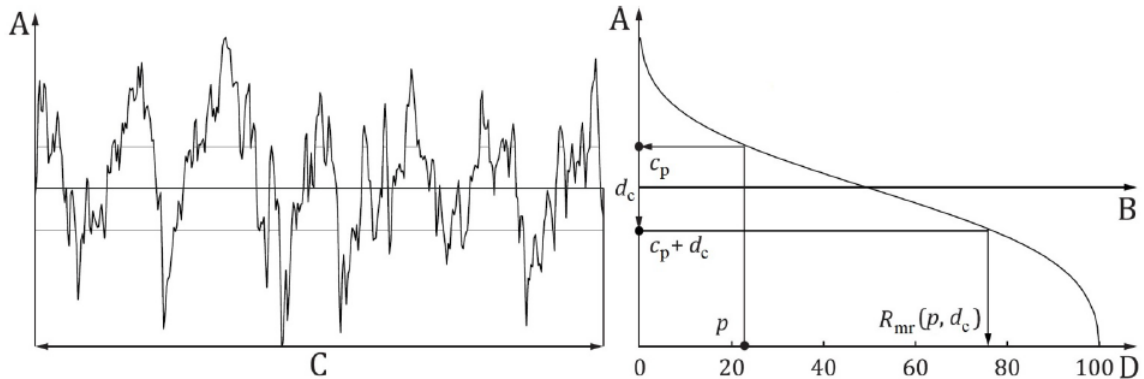
Obrázek 1 Maximální výška úseku [7]

Šikmost, špičatost, celková výška, maximální výška úseku. [7]

Funkce materiálového poměru a souvisící parametry

Materiálový poměr, křivka materiálového poměru, výškový rozdíl materiálového poměru, maximální výška výstupku, maximální hloubka prohlubně [7]

Vztažný materiálový poměr – jedná se o „materiálový poměr určený ve výškové úrovni protnutí $c_p + d_c$, kde c_p je inverzní materiálový poměr při materiálovém poměru p a d_c je vztažná výšková úroveň protnutí“ [7]



Obrázek 2 Vztažný materiálový poměr pro R-profil [7]

2.2.3 Bod č. 5 – Parametry prvků

Tento bod se věnuje definicím parametrů prvků vztažené k hodnocené délce. [7]

Parametry založené na výškách výstupků a hloubkách prohlubní

Maximální výška výstupku, maximální hloubka prohlubně, maximální výška [7]

2.3 ČSN EN ISO 25178–2

„Tato norma se zaměřuje na specifikaci parametrů pro texturu povrchu pomocí plošných metod.“ [8]

2.3.1 Bod č. 3 - Termíny a definice

Tento bod popisuje definice obecných termínů, termínů geometrických parametrů a termínů geometrických prvků. [8]

Obecné termíny

S-F povrch, S-L povrch, hodnocená plocha [8]

Termíny geometrických parametrů

Parametr pole, parametr prvku, V-parametr, S-parametr, výška, hloubka, materiálový poměr, křivka plošného materiálového poměru, autokorelační funkce, Fourierova transformace, úhlové spektrum [8]

Termíny geometrických prvků

Údolní čára, hřebenová čára, sedlo, sedlový bod, vrstevnice, segmentace [8]

2.3.2 Bod č. 4 – Parametry pole

Prostorové parametry

Autokorelační délka, poměr stran textury, směr textury [8]

Funkce materiálového poměru a souvisící parametry

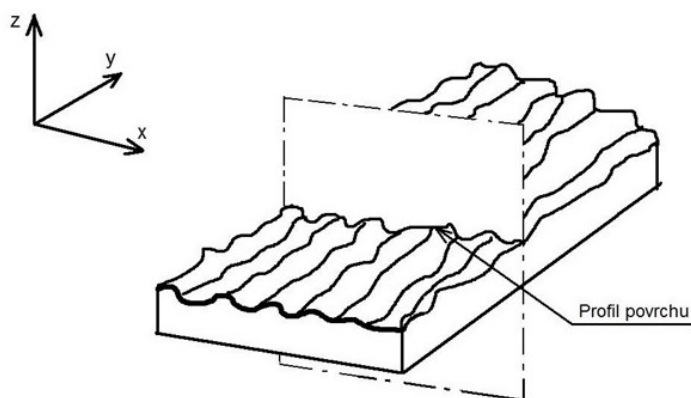
Plocha vrchů, plocha údolí, výběrová směrodatná odchylka plošinky [8]

2.3.3 Bod č. 5 – Parametry prvků

Charakterizace prvku nemá definované specifické parametry prvku. Pro charakterizaci určitých prvků na měřítkem vymezeném povrchu lze použít techniku rozpoznávání vzorů. Daný proces je v pěti etapách: výběr typu textury, segmentace, stanovení významných prvků, výběr atributů prvku a statistická kvantifikace atributů prvku. [8]

3 ZPŮSOBY HODNOCENÍ JAKOSTI POVRCHŮ

Slovo jakost by se dalo přeložit jako kvalita povrchu. Jedná se o míru požadavků, které zákazník vyžaduje. V rámci jakosti povrchů se nejčastěji řeší drsnost povrchu. Její hodnocení se bude provádět za pomoci základního profilu povrchu. Jedná se o průsečnici nerovností skutečného povrchu. [9]

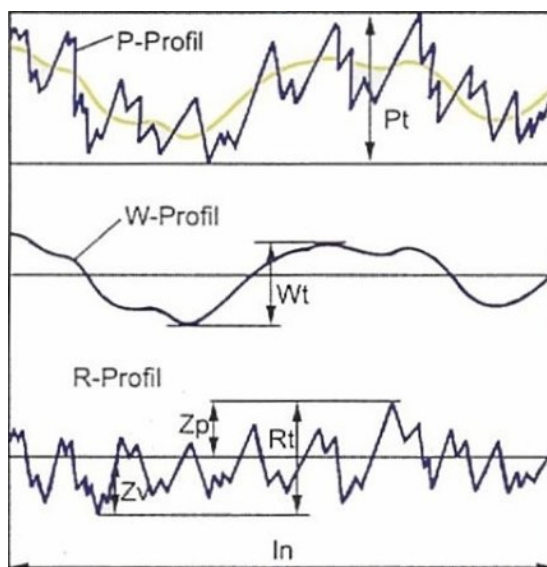


Obrázek 3 Profil povrchu [7]

3.1 Struktura povrchu

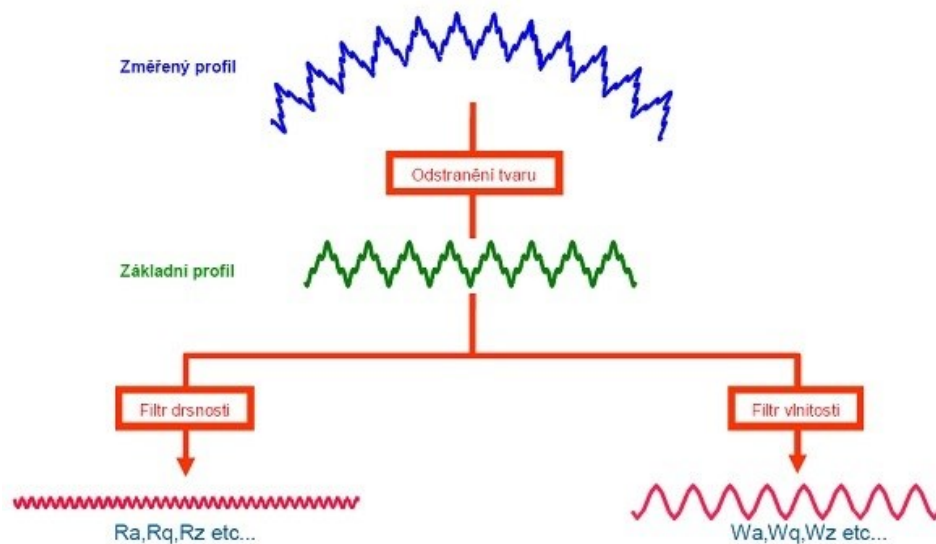
Struktura povrchu je rozdělena na tři části:

- Základní profil (P-profil)
- Vlnitost povrchu (W-profil)
- Drsnost povrchu (R-profil)



Obrázek 4 Parametry P,W,R na profilu povrchu [10]

Jak je na obrázku vidět, pro zobrazení drsnosti či vlnitosti je potřeba eliminovat druhý parametr, tudíž se použije filtr. Pro zobrazení vlnitosti se použije filtr vlnitosti, který odstraní mikronerovnosti profilu. Filtr drsnosti odstraní makronerovnosti, proto je poté profil drsnosti podél vodorovné osy. [9]



Obrázek 5 Dělení povrchu pomocí filtrů [11]

3.1.1 Základní profil

Jedná se o největší typ nerovnosti povrchu. Může vznikat například tepelnou deformací. Vzniká bez ohledu na vlnitost či drsnost. [6,7,8]

3.1.2 Vlnitost povrchu

Jedná se o strukturu, která je ovlivněna makronerovnostmi. Tyto makronerovnosti mohou vznikat chvěním, či kmitáním celé soustavy (stroj, obrobek...). Jedná se o systematický vliv, který lze do jisté míry eliminovat, například pravidelnou kalibrací, nebo správně navrženou životností nástrojů. [6,7,8,12]

3.1.3 Drsnost povrchu

Často se mluví o drsnosti povrchu jako o samotné struktuře, ovšem drsnost je jen jedna ze tří složek struktury povrchu. Tato část struktury je tvořena mikronerovnostmi tvořených jednotlivými vrchy a údolími. Drsnost povrchu velmi závisí na způsobu a zvolené technologii zpracování. Vzniká spíše důsledkem dokončovacích metod než samotného obrábění. [6,7,8,12,13]

3.2 Způsoby měření drsnosti

Drsnost se měří za pomoci dvou metod. Jedná se o způsob kvalitativní a kvantitativní.

3.2.1 Kvalitativní metody

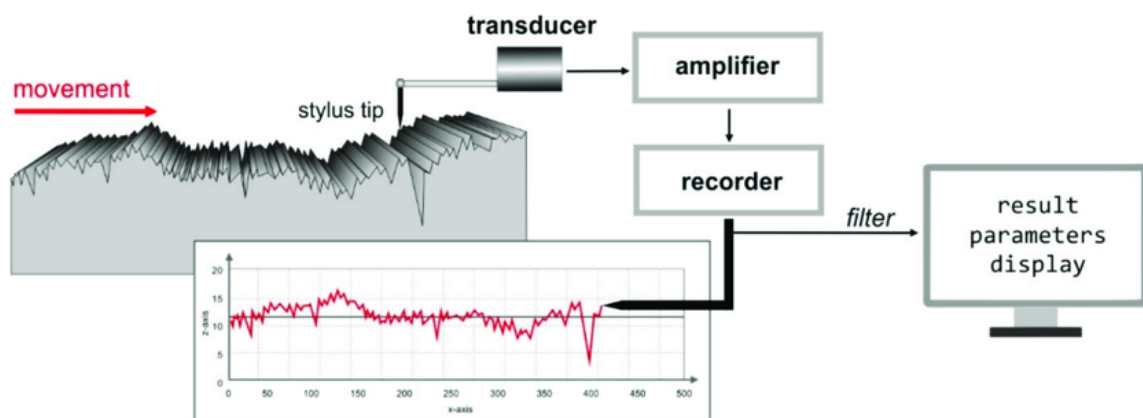
Už se v dnešní době nepoužívá tolik, neb se jedná o časově náročnější a méně přesnější metodu. Nejčastěji se používá tzv. vzorkovnice drsnosti, se kterou se měřený povrch porovnává, nebo komparační mikroskopy. Přesnost tudíž velice závisí na odhadu měřícího pracovníka. [9, 14]

3.2.2 Kvantitativní metody

Jsou založeny na matematickém popisu povrchu. V praxi se pro tuto metodu nejčastěji používají tzv. profilometry. Ty kromě drsnosti často dokáží měřit i vlnitost a tvar. [14]

3.2.3 Dotykové metody snímání povrchu

Při dotykové metodě přejíždí hrot připevněný na rameni se snímačem povrch měřeného materiálu. Jakákoliv změna výšky materiálu je pak následně snímačem zaznamenána. Snímač poté pošle signál do elektrické části přístroje, kde se signály vyhodnocují. [14,15]



Obrázek 6 Dotyková metoda snímání povrchu pomocí jehly [15]

Výhody metody

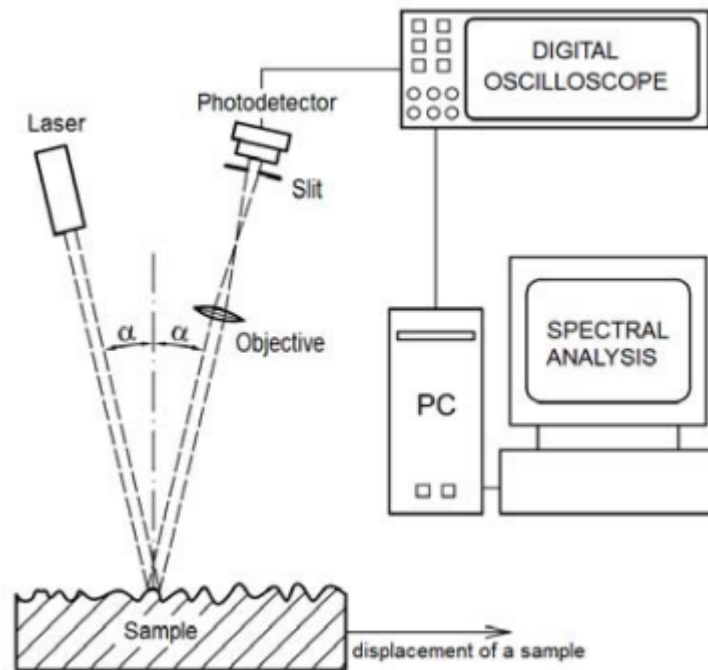
Dotykové měření je jedna z nejpoužívanějších metod měření drsnosti povrchu. Díky přímému dotyku hrotu je vlnový profil velmi zřetelný. Další výhodou je, že lze touto metodou měřit dlouhé vzdálenosti, což u bezdotykového (optického) měření nelze. [14,15]

Nevýhody metody

Díky výše zmíněnému přímému dotyku hrotu se hrot časem opotřebovává a zároveň se povrch měřeného materiálu poškrábe. Přesnost měření je také závislá na poloměru hrotu. Měření je navíc časově velmi náročné a na začátku je potřeba vhodně zvolit umístění hrotu. [14,15]

3.2.4 Bezdotykové metody snímání povrchu

Přístroj vysílá na povrch světelný paprsek, který se odráží. Následná drsnost se vyhodnocuje podle rozptylu vracejícího se paprsku. Hladký povrch bude mít malý rozptyl a drsný naopak. Nejčastěji se využívá snímačů CLA (Chromatic Length Aberration), nebo laserových snímačů.[14,16]



Obrázek 7 Schéma bezdotykové metody pomoci laseru [16]

Výhody metody

Díky tomu, že se přístroj povrchu nedotýká, tak nedochází k opotřebení přístroje, ani k poškrábání povrchu. Jedná se o rychlejší metodu. [14,16]

Nevýhody metody

Při špatně odražených paprscích může docházet k nepřesnostem měření. Špatně odrazivé materiály touto metodou nelze měřit. [14,16]

4 STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ DAT

4.1 Metodika EDA

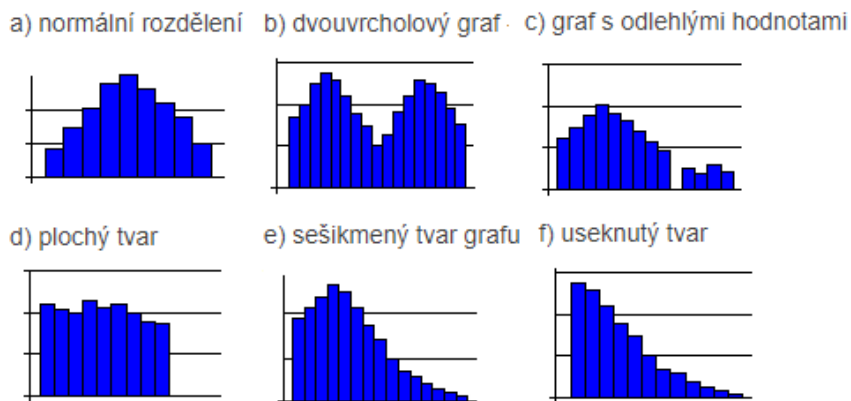
EDA neboli Exploratory Data Analysis je prvotní zkoumání naměřených dat. Hlavním cílem je najít charakteristiky dat a anomálie. Jedná se o první a důležitou část statistického zpracování dat. [18,19]

Důležitým krokem je určit, jak jsou data v souboru rozložena. Graficky si tato data můžeme znázornit ve formě histogramu, box-plotu, nebo časové řady. [18]

4.1.1 Histogram

Jedná se o grafické znázornění četnosti dat. Ty jsou rozdělena do sloupců o určitém intervalu. Výška sloupce znázorňuje právě četnost dat v daném intervalu. Histogramy dělíme na základní tvary: [20]

1. Normální rozdělení
2. Dvouvrcholový graf – často se jedná o dva soubory dat (měření na dvou strojích, dvou pracovníků...)
3. Graf s odlehlými hodnotami – indikuje příčiny ovlivňující proces, které lze snadno vymezit (dočasné použití jiného měřidla apod.)
4. Plochý tvar – proces pravděpodobně špatně nastavený
5. Sešikmený tvar grafu – jedná se o jiné rozložení dat (ne všechna musí být normálová)
6. Useknutý tvar – nebyly zahrnuty všechny hodnoty [20]

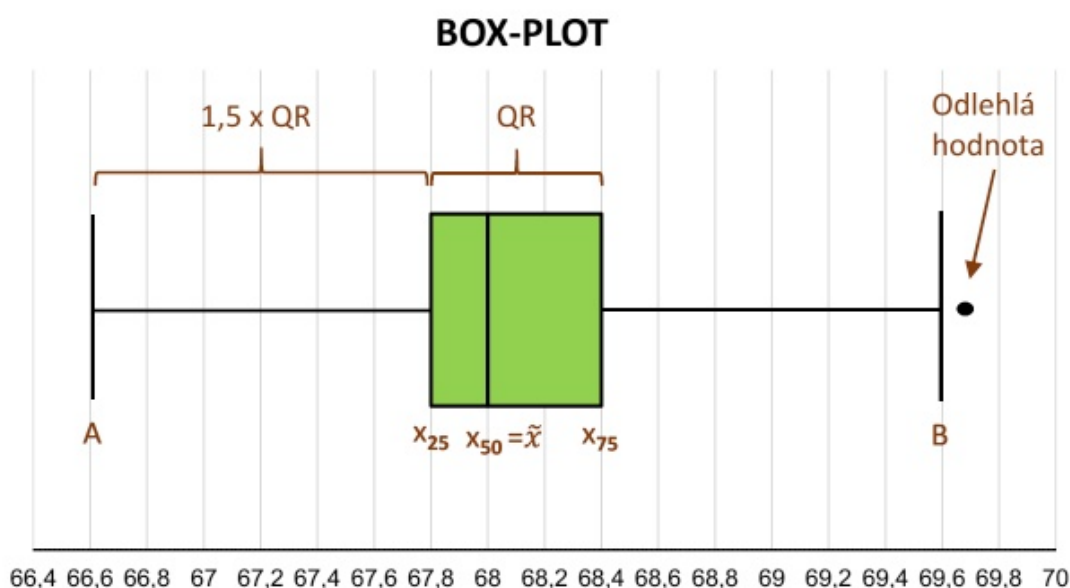


Obrázek 8 Základní rozdělení histogramů [20]

4.1.2 Box-plot

Také se mu říká krabicový graf. Posuzuje data za pomoci tzv. kvartilů. Kvartily jsou označení dat, které rozdělují soubor na 4 části o stejném počtu hodnot. Kvartil x_{25} se nazývá dolní kvartil, a rozděluje nejnižších 25 % dat. Kvartil x_{50} neboli druhý kvartil, nazývaný též medián rozděluje soubor na dvě totožné části. Posledním kvartilem je x_{75} neboli horní kvartil.

Pro samotný Box-plot musíme určit a vypočítat jednotlivé kvartily, kvartilové rozpětí QR ($x_{75} - x_{25}$) a konce paprsků A a B. [21]



Obrázek 9 Box-plot [21]

Box-plot lze využít pro identifikování odlehlých hodnot. Pro toto je nutné nepoužívat hodnoty A a B jako minimum a maximum. Můžeme také posuzovat symetrii rozdělení podle toho, na jakou stranu se vychyluje prostřední kvartil (medián) v boxu. [21]

4.1.3 Časová řada

Graf časové řady je zobrazením hodnot v časové posloupnosti. Čas je zachycen na ose X. Osa Y je veličina, která se v průběhu daného času měří. Díky tomuto grafu lze vidět změny hodnot na základě času. [22]

5 CÍLE PRÁCE

Téma této práce se zabývá problematikou hodnocení povrchů, přičemž cílem této práce je provést literární rešerši na toto téma a statistickou analýzu diferencí mezi hodnocením povrchů podle norem ISO 21920-1, ISO 21920-2 a ISO 25178.

Literární rešerši se zabývá teoretická část práce, kde se nejdříve objasňují základy problematiky obrábění povrchů. Následně se popisují potřebné termíny z jednotlivých norem. Dále se popisují metody hodnocení povrchů, konkrétně dotykovými a bezdotykovými metodami. Na závěr teoretické části je popis některých způsobů statistického vyhodnocení dat.

V praktické části je nejprve popsán měřicí přístroj a použité vzorky. Následně po provedení měření budou získaná data statisticky vyhodnocena s cílem porovnat výsledky získané pomocí jednotlivých metod. To umožní identifikovat případné rozdíly či konzistence mezi hodnocením povrchů podle jednotlivých norem.

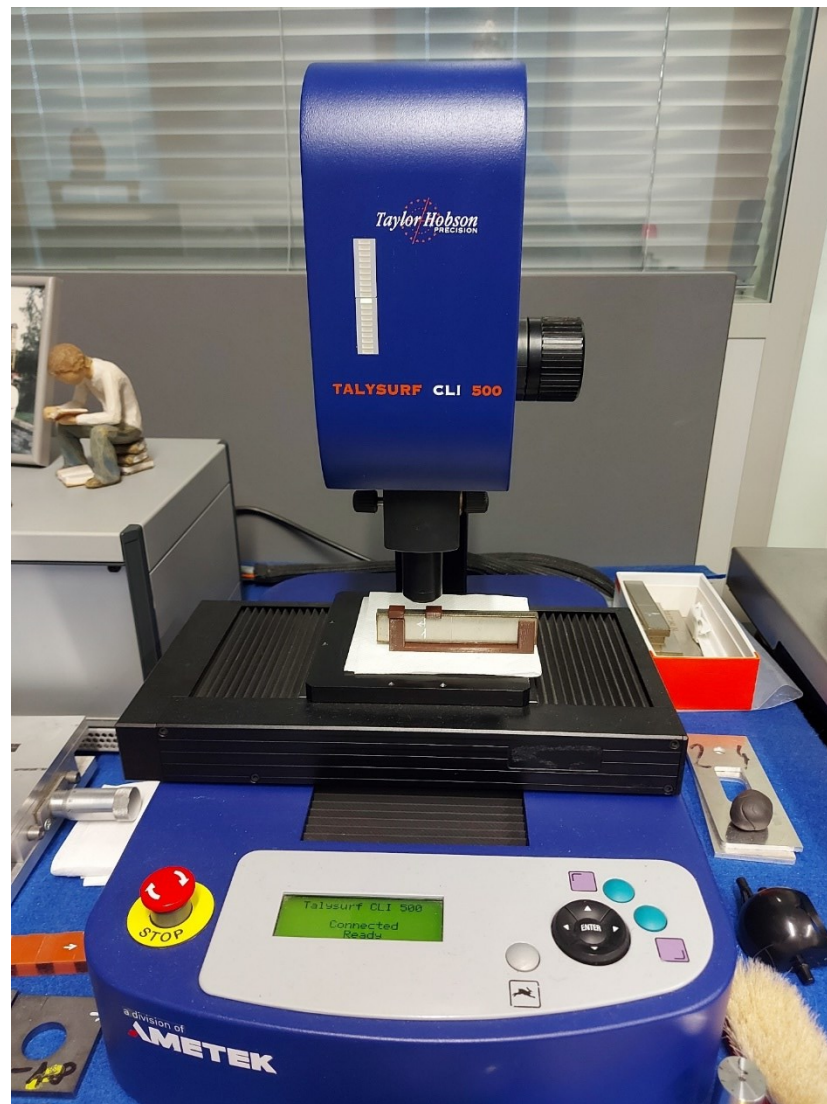
II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJ

Přístroj, na kterém bylo měření vzorků provedeno se jmenuje **Talysurf CLI 50**. Je to bezkontaktní 3D profilometr s CLA konfokální hlavou, který má jeden snímač a malou kapacitu. Měřicí přístroj používá software **Talymap GOLD**, který dokáže zpracovat měření ve 2D a 3D. [24]

Tabulka 1 Parametry měřicího přístroje Talysurf CLI 50 [24]

Pracovní prostor:	50 x 50 x 50 mm
Nosnost:	10 kg
Osové rozlišení:	0,5 μm
SW:	Talymap GOLD
Rok pořízení:	2009



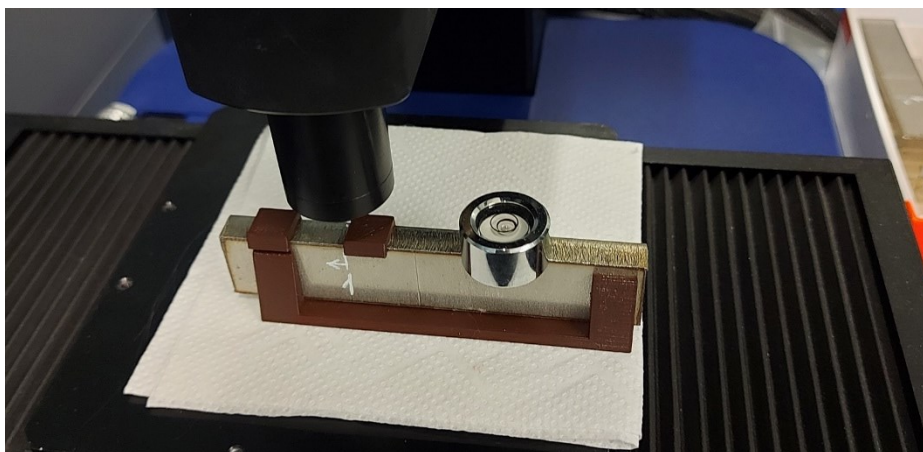
Obrázek 10 Talysurf CLI 50

7 VZORKY

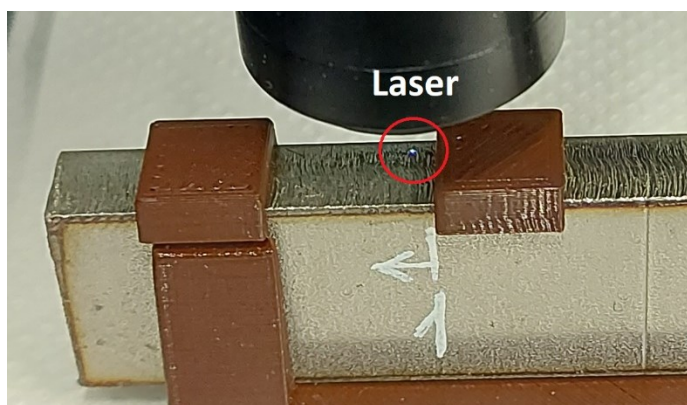
Pro měření drsnosti povrchu bylo použito 10 vzorků. Jedná se o ocelové kvádry obrobené laserem.

7.1 Měření vzorků

Nejprve je potřeba vzorek správně připravit, aby měření plocha byla vodorovná. Na obrázku 4 je vidět vzorek již správně postavený s vodoměrkou. Poté je třeba nastavit začátek měření, ideálně do rohu měřené plochy. Na obrázku 5 je vidět připravený laser na vzorku před samotným měřením.

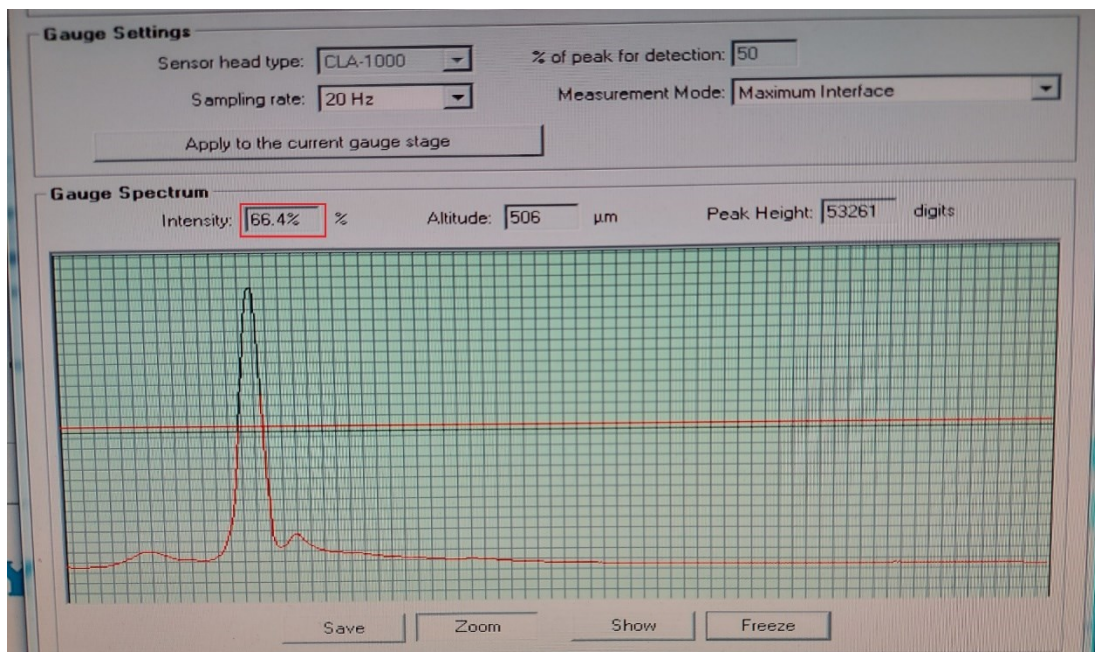


Obrázek 11 Připravení vzorku pro měření



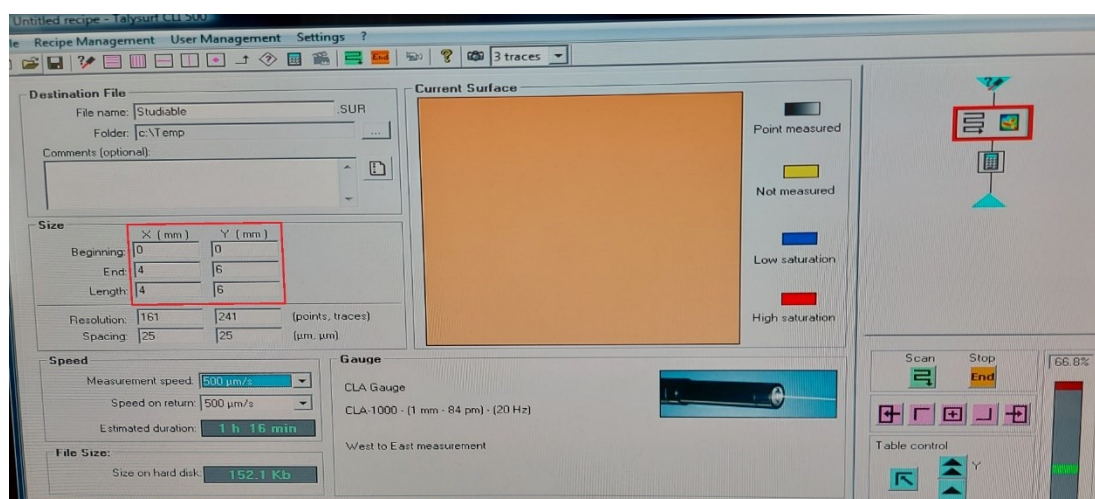
Obrázek 12 Detail laseru před měřením

Následně je potřeba v softwaru Talymap GOLD nastavit parametry měření. Nejprve je potřeba nastavit intenzitu odrazivosti. Ta je důležitá pro měření. Neměla by klesnout pod 40 %, jinak by došlo na základě nesprávných údajů ke špatnému vyhodnocení drsnosti povrchu. V tomto případě se jedná o intenzitu odrazivosti 66,4 %.



Obrázek 13 Nastavení odrazivosti

Nakonec je třeba nastavit měřící délku. V tomto případě 4 mm pro osu X a 6 mm pro osu Y.



Obrázek 14 Nastavení měřící délky

7.2 Homogenita a heterogenita povrchu

V rámci praktické části se bude zjišťovat, zda jsou povrchy jednotlivých vzorků po obrábění laserem homogenní či heterogenní. Heterogenní povrch je takový, kde se vlastnosti povrchu mohou na různých místech drasticky lišit. Může být dávat vlastnostmi materiálu a způsobem obroby povrchu. Homogenní materiál má naopak vlastnosti povrchu a jeho struktury po celé ploše neměnný. [25, 26]

8 NAMĚŘENÉ VÝSLEDKY

Naměřila se data z 10 vzorků. Z těchto dat byly extrahovány data dvou parametrů, a to parametrů **Rz** (maximální výška profilu) a **Ra** (střední aritmetická výška profilu). Data byla následně převedena do tabulky. V tabulce jsou hodnoty, které jsou potřeba na následující grafické znázornění dat. V rámci hodnocení naměřených dat byla provedena explorativní datová analýza s cílem jejich utřídění a charakterizace.

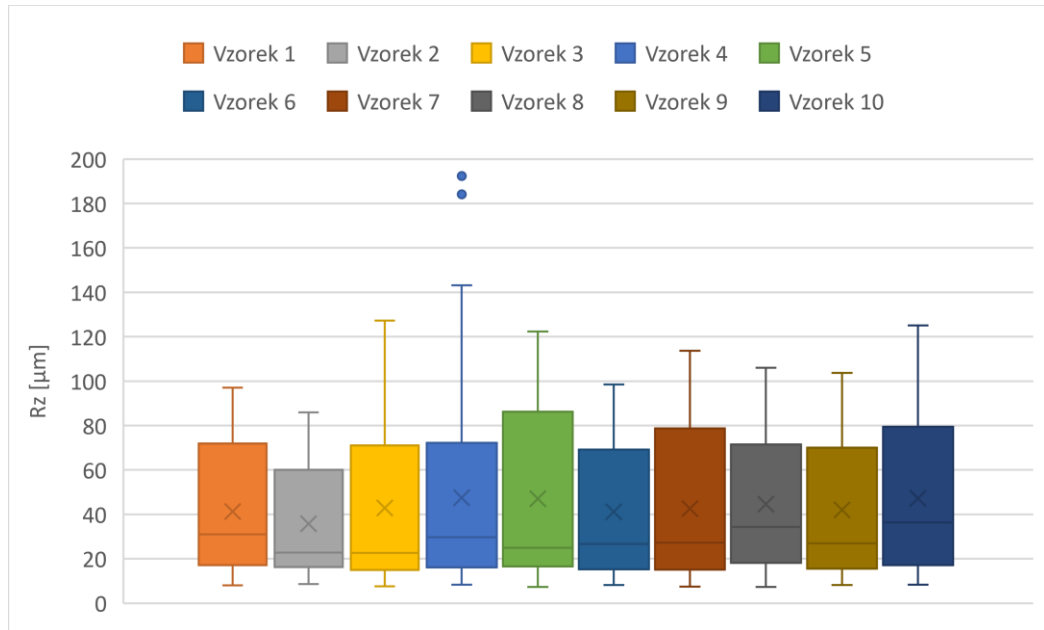
8.1 Naměřené hodnoty Rz

V následující tabulce jsou zpracovány naměřené hodnoty parametru Rz. Jednotlivé vzorky jsou očíslovány a seřazeny. Všechny hodnoty jsou v mikrometrech.

Tabulka 2 Tabulka hodnot Rz

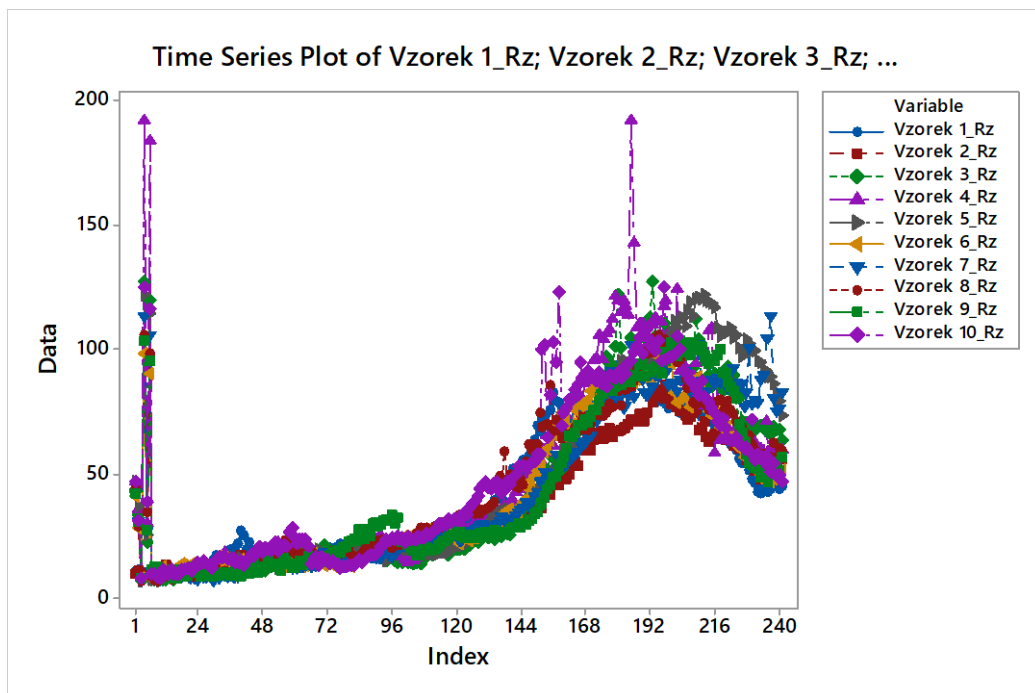
Rz [μm]	Průměr	Směrodatná odchylna	Min	Max	1. kvartil	3. kvartil	Medián
1	41,236	27,853	7,956	97,106	17,175	71,573	31,005
2	35,791	23,449	8,550	85,936	16,296	59,849	22,767
3	42,913	34,676	7,533	127,199	14,971	70,903	22,623
4	47,529	38,299	8,243	192,339	16,049	71,351	29,667
5	46,982	37,617	7,328	122,285	16,591	86,198	24,967
6	41,181	28,962	8,145	98,503	15,230	69,085	26,676
7	42,626	32,050	7,461	113,734	15,097	78,599	27,204
8	44,580	29,705	7,290	105,983	18,177	71,138	34,397
9	42,000	31,616	8,155	103,659	15,703	69,849	26,932
10	47,151	32,498	8,368	125,066	17,213	79,029	36,389

Z dat v tabulce byl zhotoven Box-plot hodnot parametru Rz. V grafu lze vidět hodnoty jednotlivých vzorků, které lze navzájem porovnat s ostatními vzorky. V grafu je vidět, že vzorky 1, 5, 7, 10 mají větší rozptyl hodnot. Naopak vzorek 2 menší.



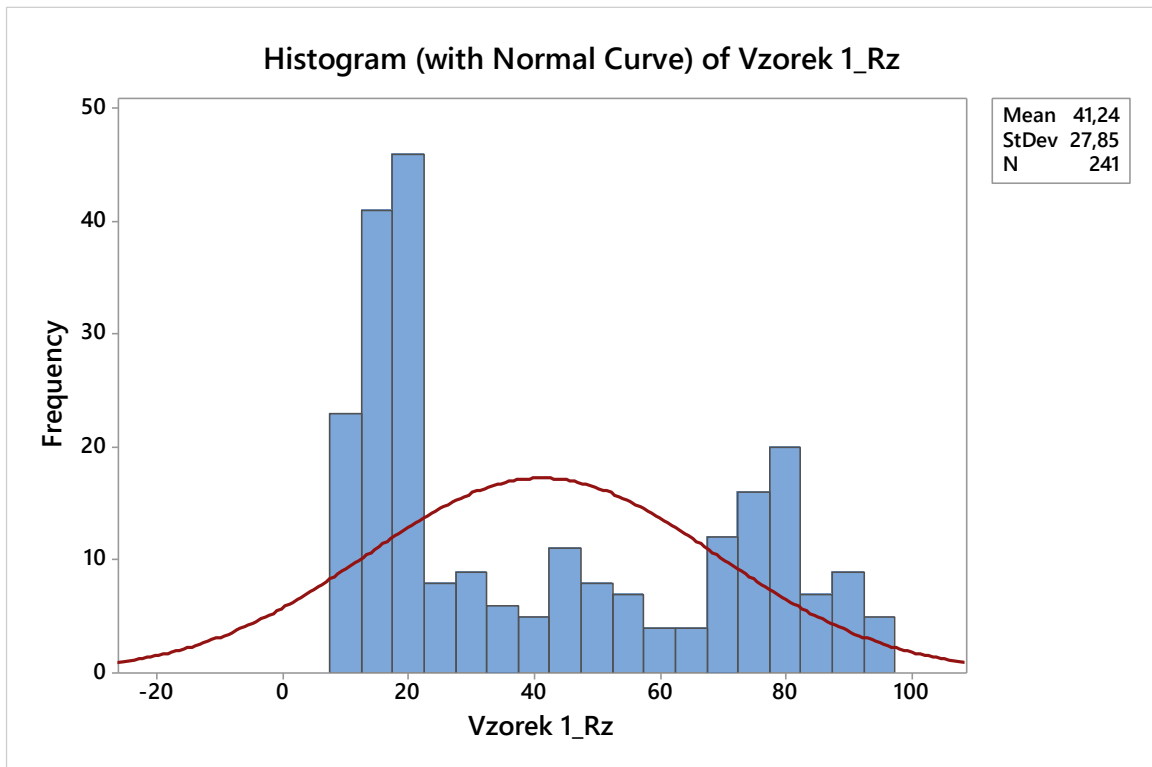
Obrázek 15 Box-plot hodnoty Rz naměřených vzorků

Z naměřených dat byla vyhotovena časová řada měření parametru. Svislá osa grafu jsou hodnoty parametru Rz a vodorovná osa jsou naměřená data během posunu laseru při měření. V grafu je vidět rozdělení na tři sekce podle konstantního, rostoucího či klesajícího trendu hodnot. Také jsou vidět dvě místa s výskytem odlehlých hodnot.

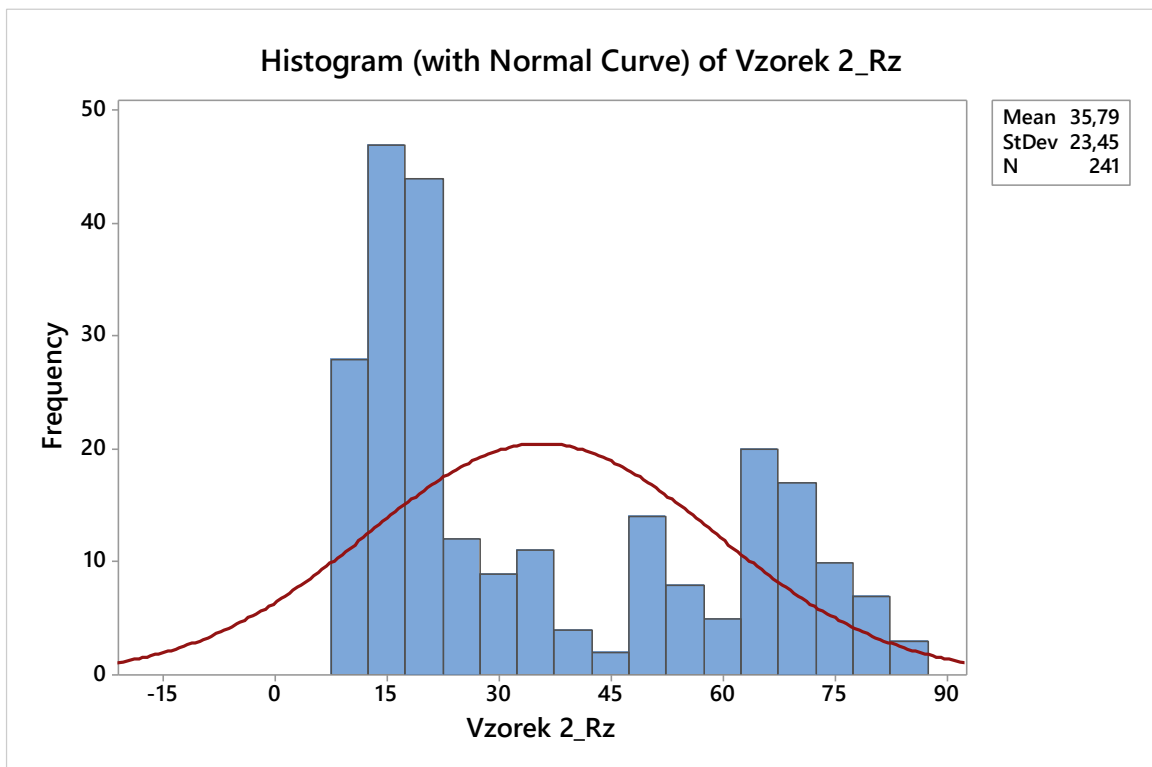


Obrázek 16 Časová řada parametru Rz

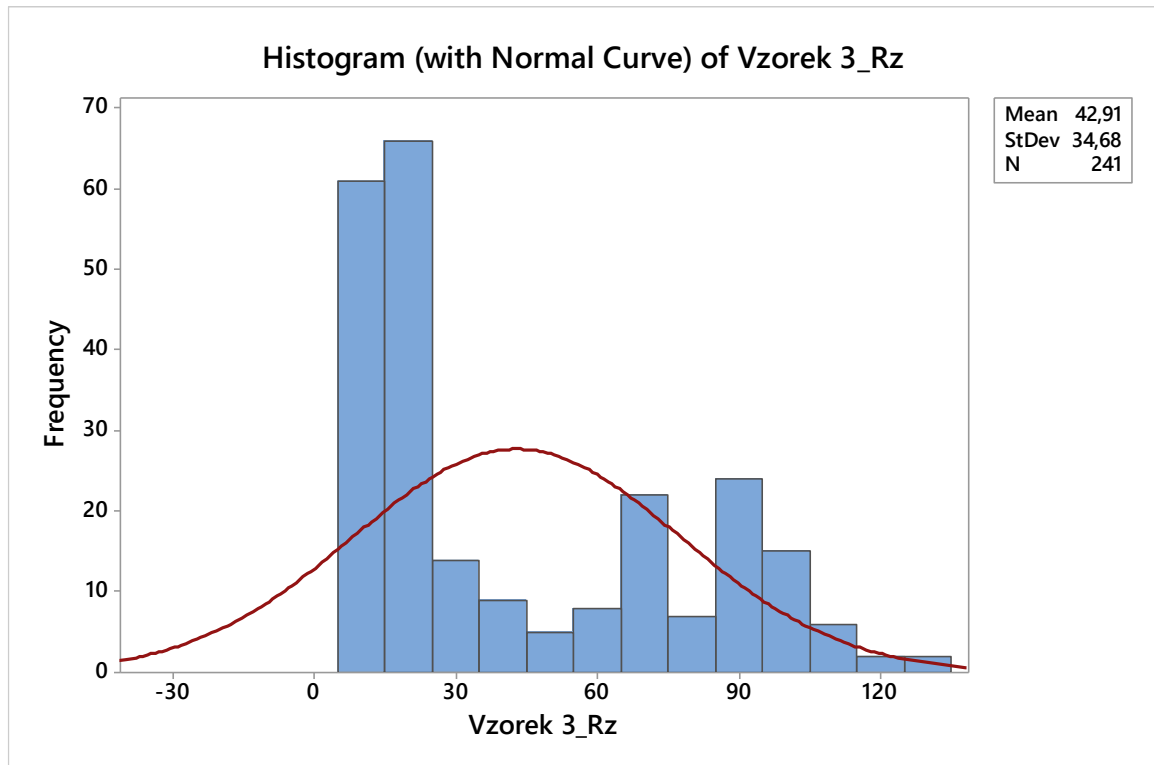
Dále byly vyhotoveny histogramy jednotlivých vzorků. Ty poskytují vizuální rozložení dat, což pomůže zjistit rozptyl hodnot měřeného povrchu.



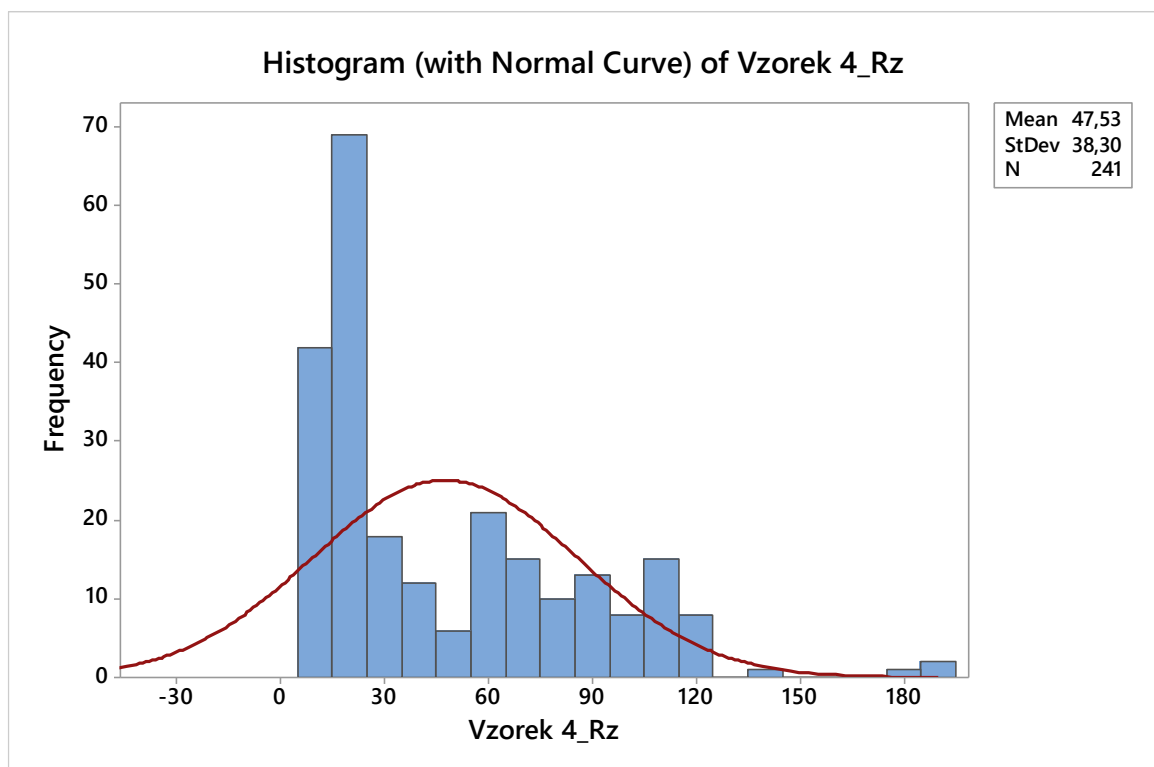
Obrázek 17 Rozdělení hodnot Rz 1. vzorku



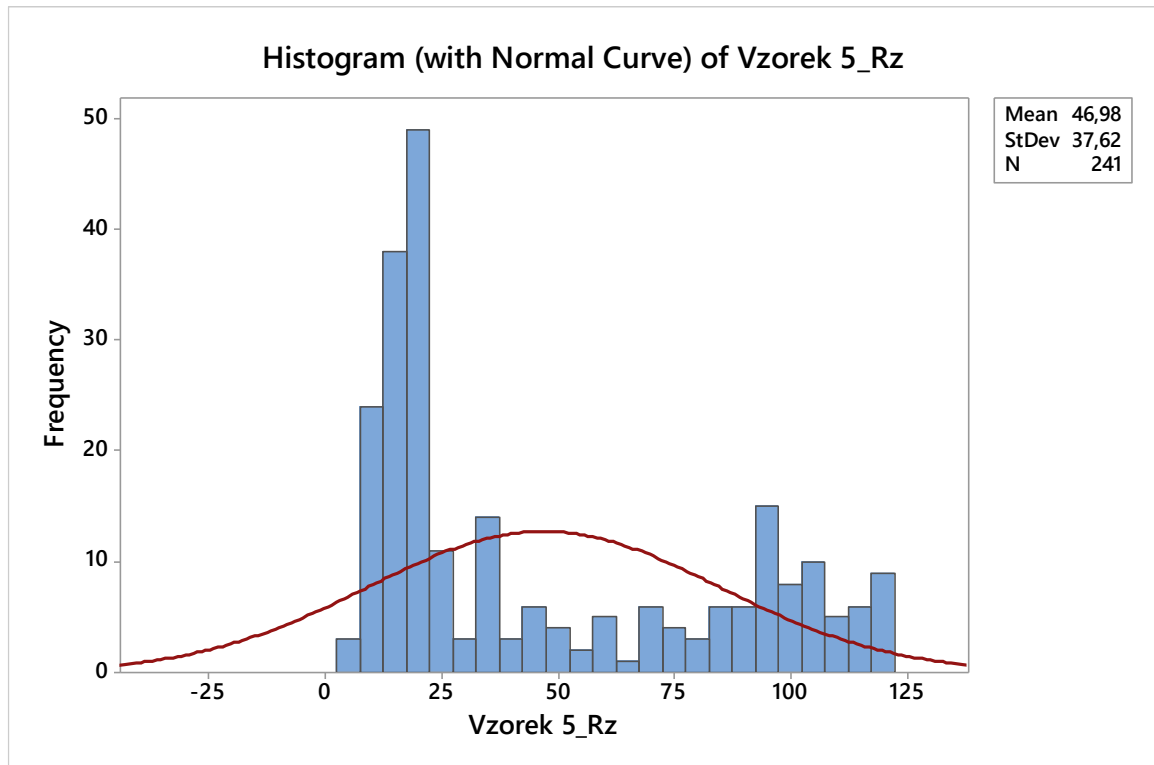
Obrázek 18 Rozdělení hodnot Rz 2. vzorku



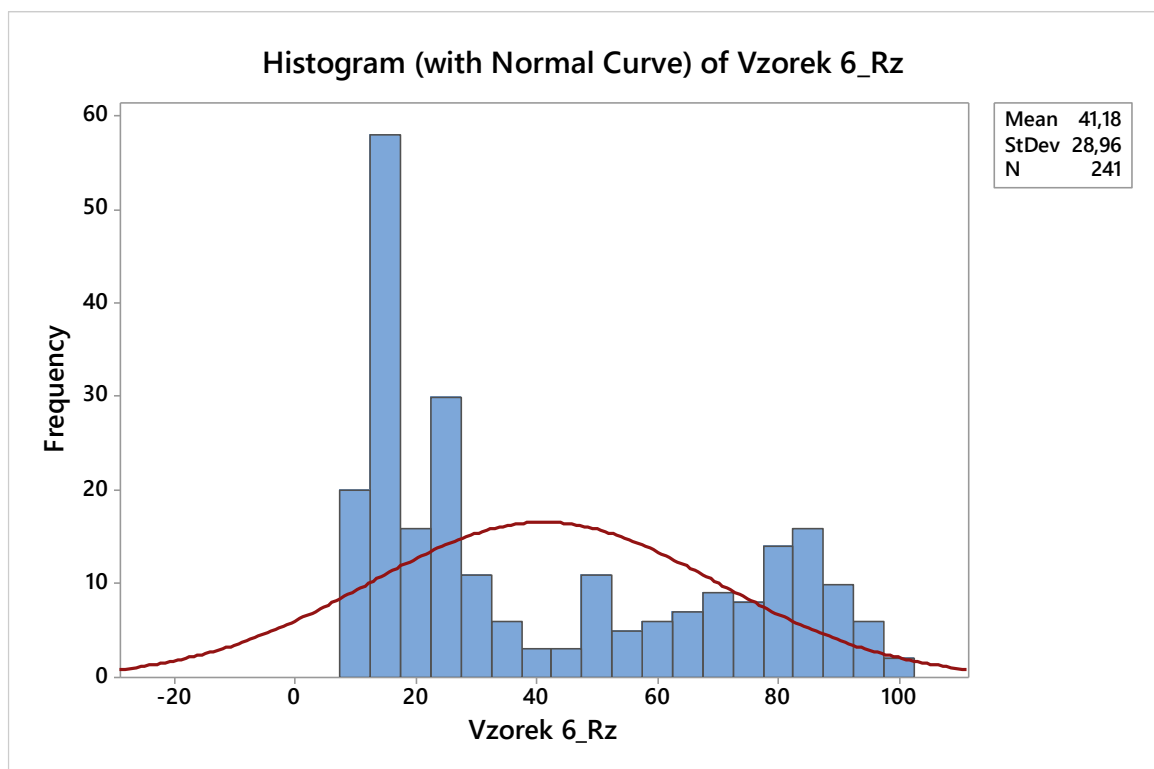
Obrázek 19 Rozdělení hodnot Rz 3. vzorku



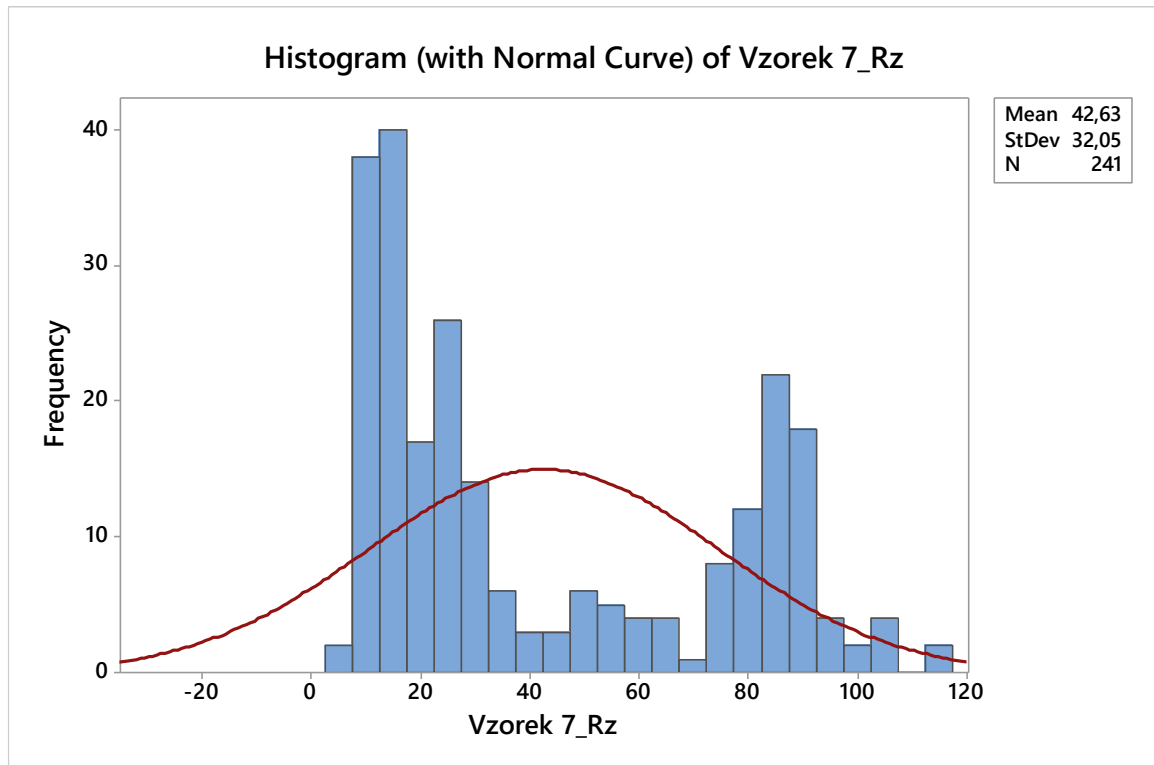
Obrázek 20 Rozdělení hodnot Rz 4. vzorku



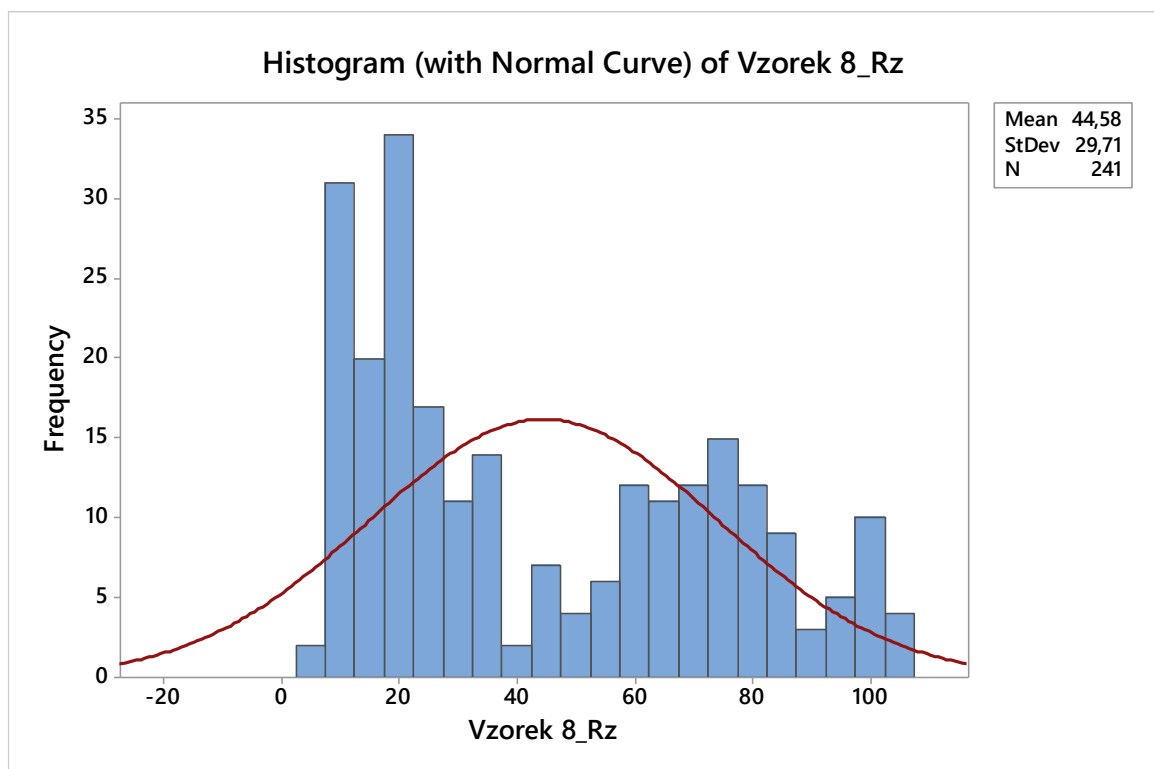
Obrázek 21 Rozdělení hodnot Rz 5. vzorku



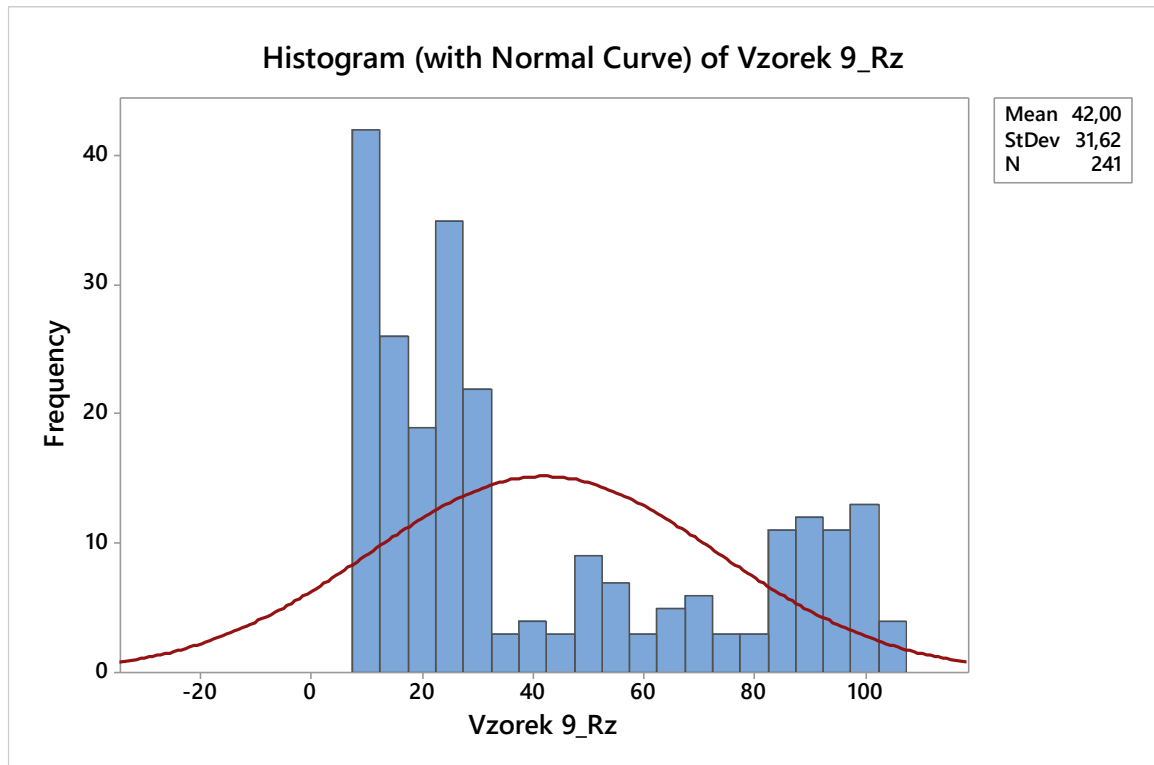
Obrázek 22 Rozdělení hodnot Rz 6. vzorku



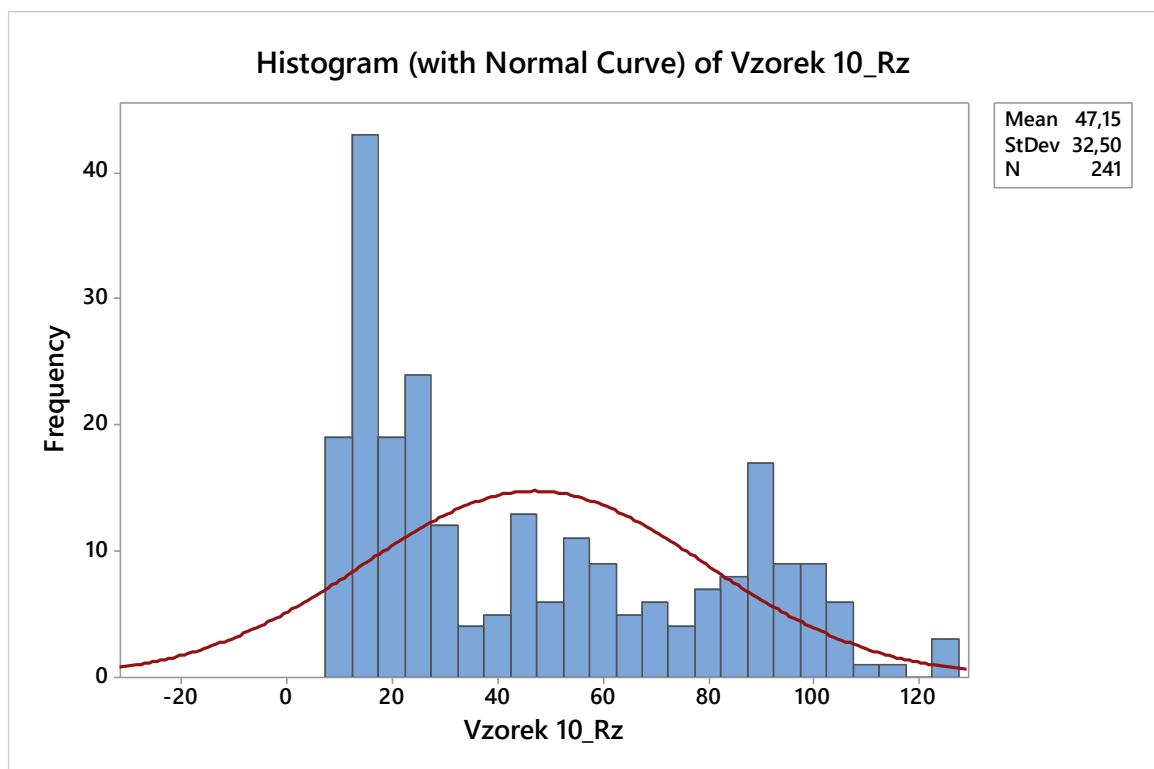
Obrázek 23 Rozdělení hodnot Rz 7. vzorku



Obrázek 24 Rozdělení hodnot Rz 8. vzorku



Obrázek 25 Rozdělení hodnot Rz 9. vzorku



Obrázek 26 Rozdělení hodnot Rz 10. vzorku

Při hodnocení těchto histogramů se dá zjistit, že jsou všechny do jisté míry dvouvrcholové, tudíž nemají normálové rozdělení. Vrcholy vychází z časové řady, kdy první vrchol odpovídá prvnímu úseku, který má oproti dalším mnohem stabilnější hodnoty. Druhý vrchol odpovídá hranici druhého a třetího úseku časové řady, kde se nachází největší počet hodnot.

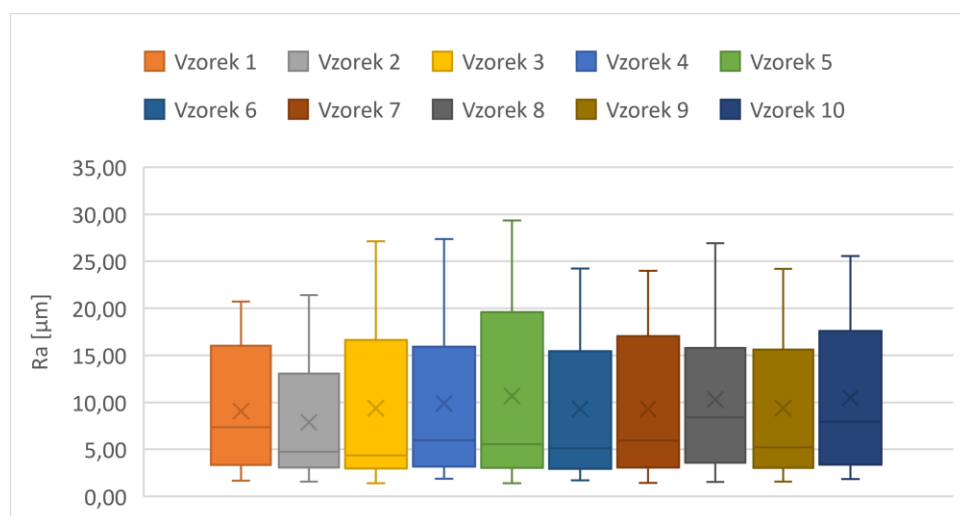
8.2 Naměřené hodnoty Ra

V této tabulce jsou zpracovány naměřené hodnoty parametru Ra. Jednotlivé vzorky jsou opět očíslovány a seřazeny. Hodnoty v mikrometrech.

Tabulka 3 Tabulka hodnot parametru Ra

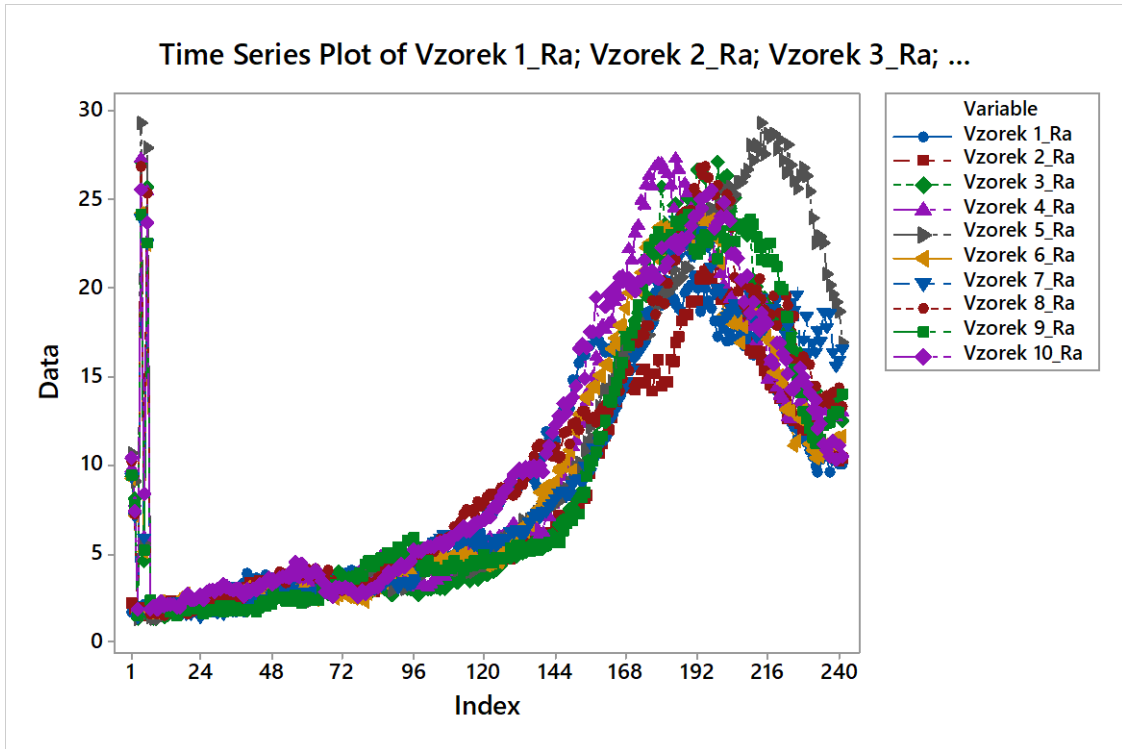
Ra [μm]	Průměr	Směrodatná odchylka	Min	Max	1. kvartil	3. kvartil	Medián
1	9,058	6,223	1,688	20,735	3,382	15,976	7,358
2	7,879	5,873	1,589	21,386	3,087	12,944	4,750
3	9,374	8,279	1,399	27,125	2,997	16,485	4,376
4	9,876	8,081	1,892	27,346	3,197	15,872	5,974
5	10,655	9,298	1,389	29,345	3,063	19,558	5,576
6	9,319	7,353	1,715	24,211	2,927	15,295	5,115
7	9,316	7,234	1,423	23,999	3,087	17,007	5,925
8	10,279	7,465	1,540	26,907	3,603	15,770	8,412
9	9,377	7,930	1,581	24,199	3,033	15,426	5,225
10	10,490	7,595	1,863	25,557	3,429	17,566	7,940

Z dat v tabulce byl opět zhotoven Box-plot hodnot parametru Ra. Lze vidět, že míra rozptýlů hodnot jednotlivých vzorků se podobá míře Box-plotu parametru Rz.

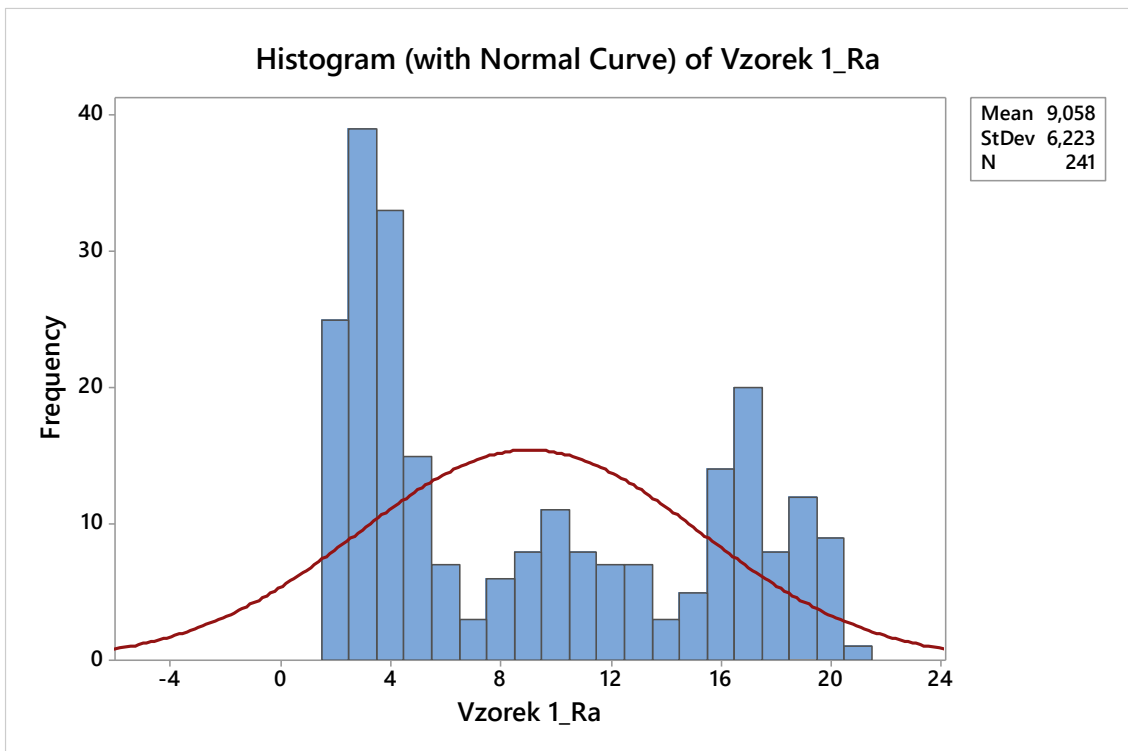


Obrázek 27 Box-plot hodnoty Ra naměřených vzorků

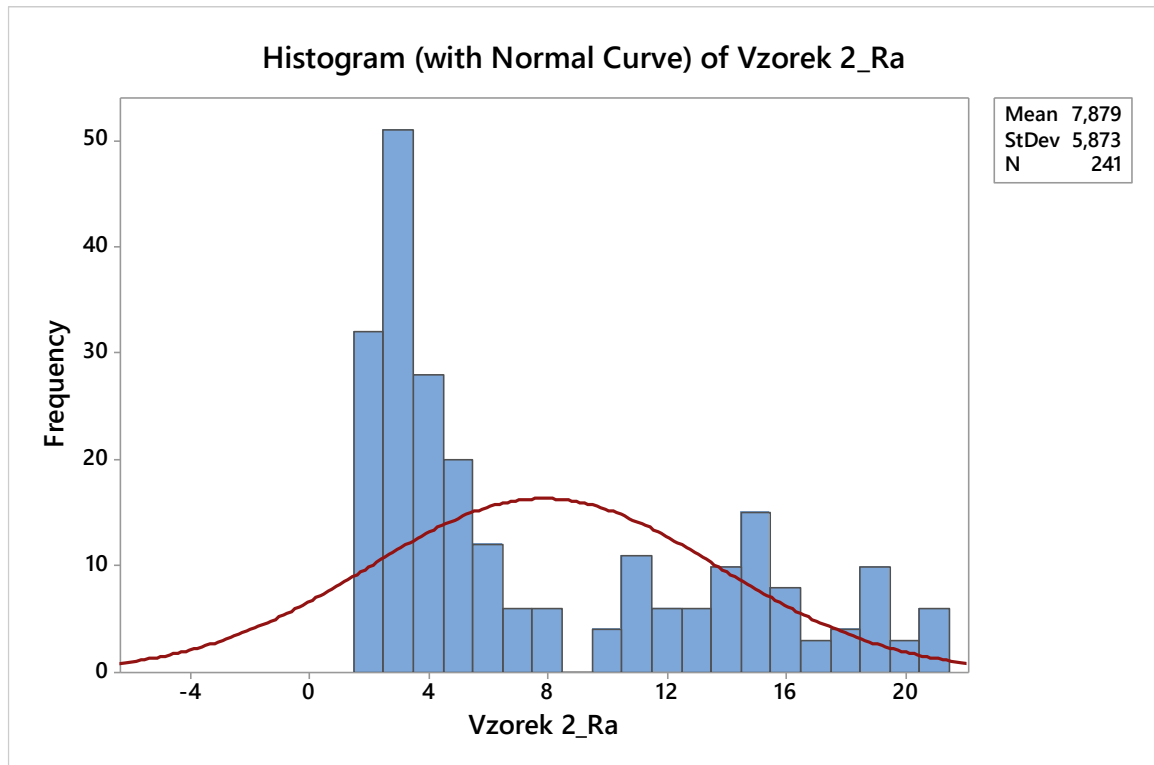
Byla vyhotovena časová řada i pro parametr Ra. Graf se velmi podobá časové řadě parametru Rz. Lze opět vidět tři části podle trendu růstu hodnot. Ovšem oproti parametru Rz se v grafu nachází pouze jedno místo s výskytem odlehlých hodnot.



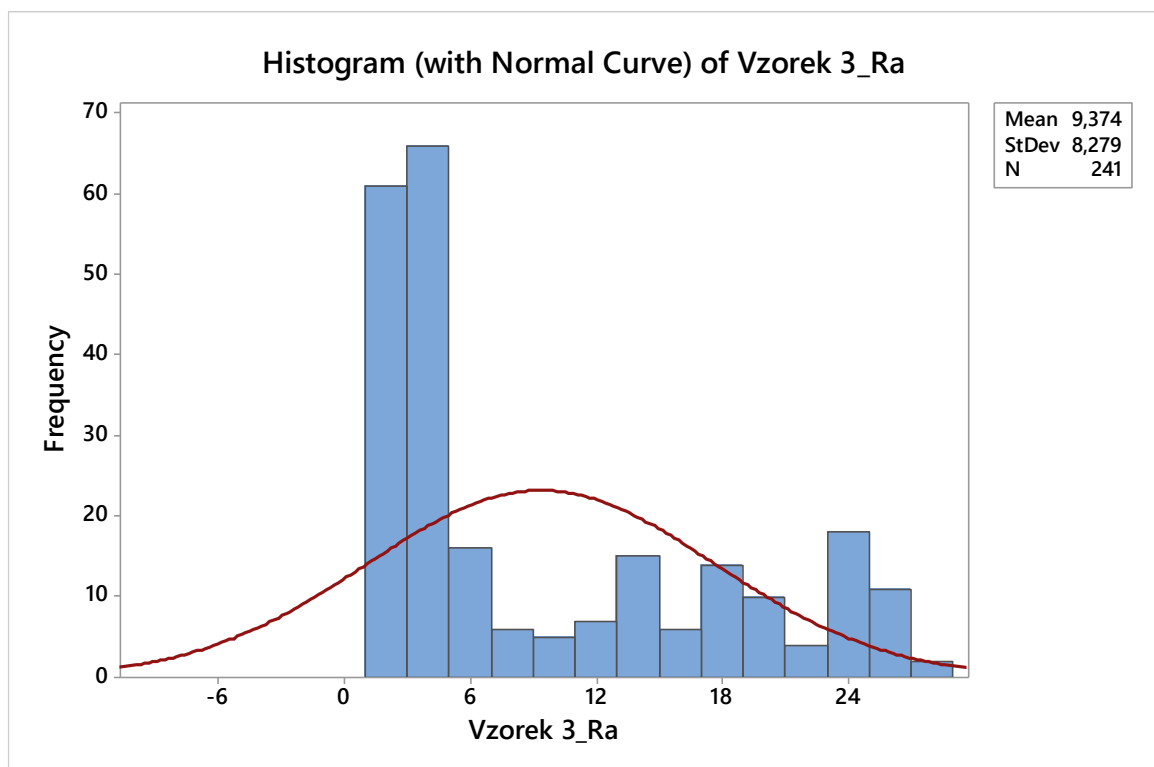
Obrázek 28 Časová řada parametru Ra



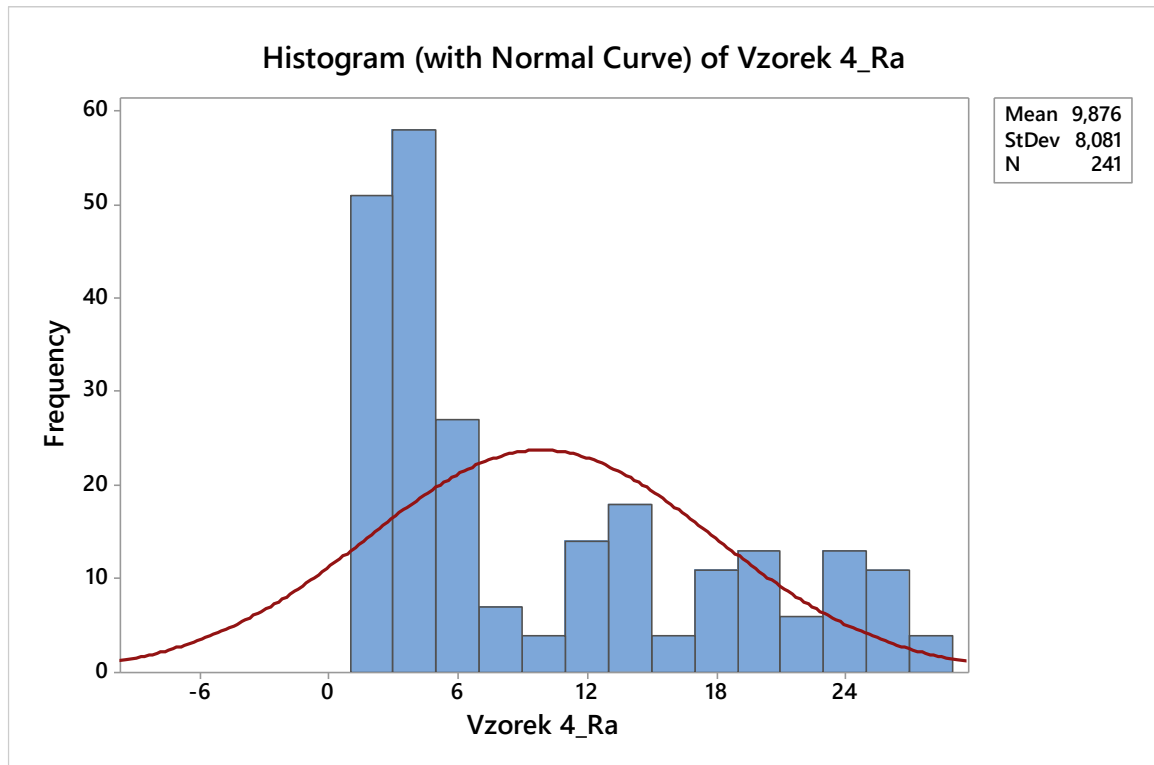
Obrázek 29 Rozdělení hodnot Ra 1. vzorku



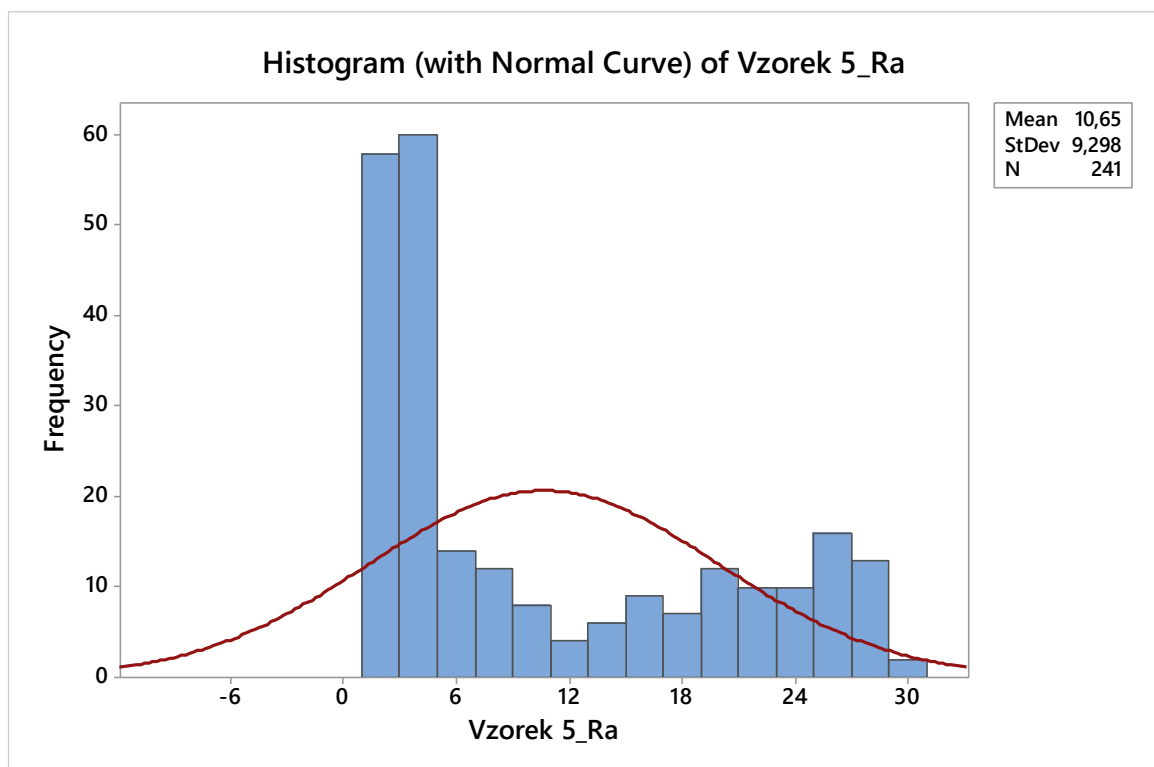
Obrázek 30 Rozdělení hodnot Ra 2. vzorku



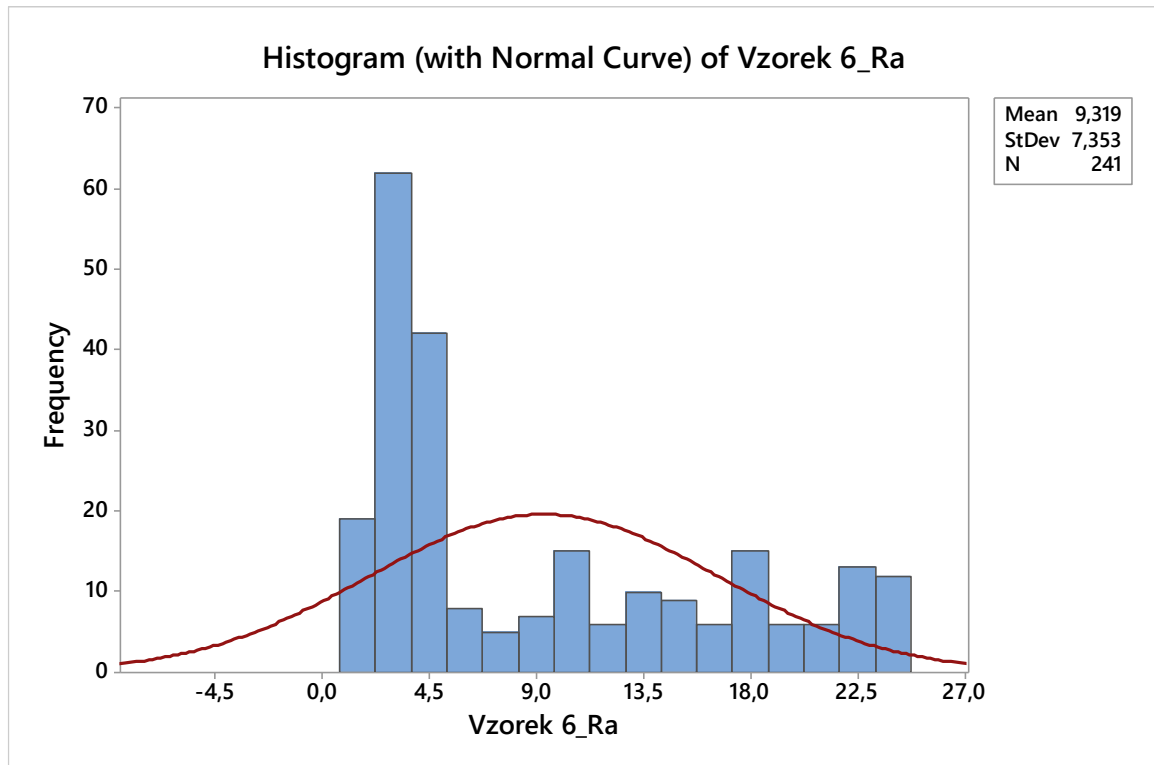
Obrázek 31 Rozdělení hodnot Ra 3. vzorku



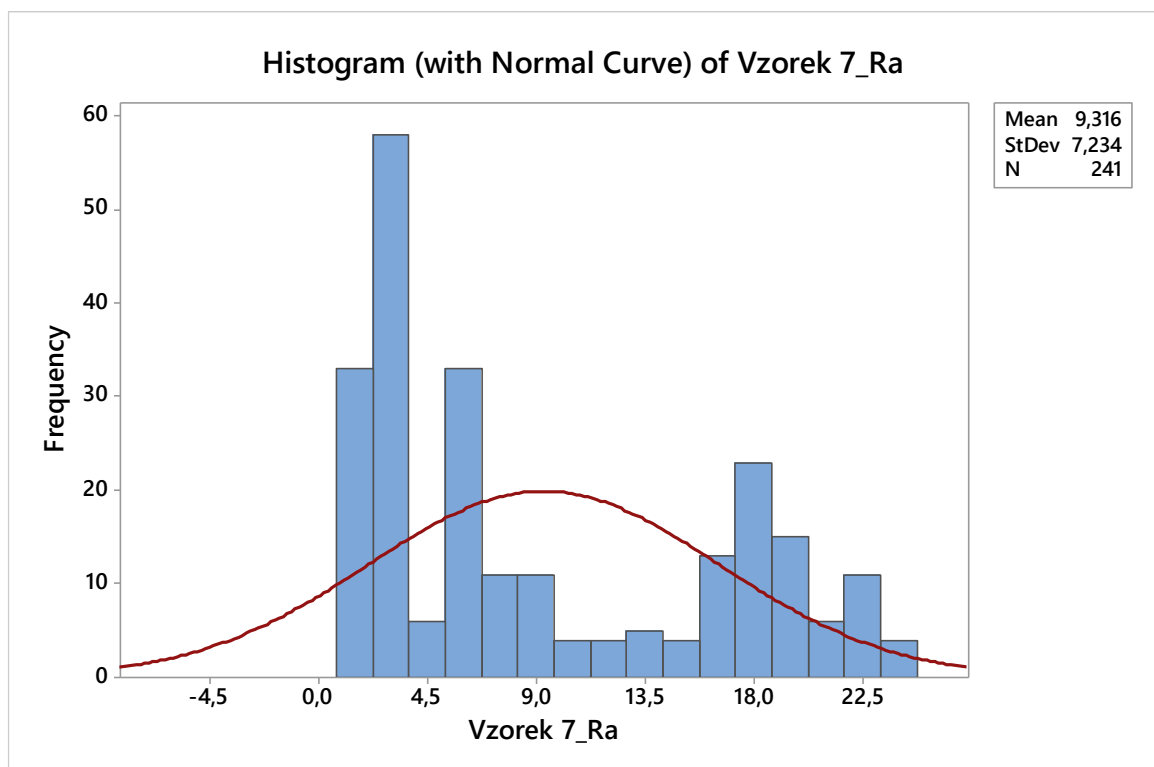
Obrázek 32 Rozdělení hodnot Ra 4. vzorku



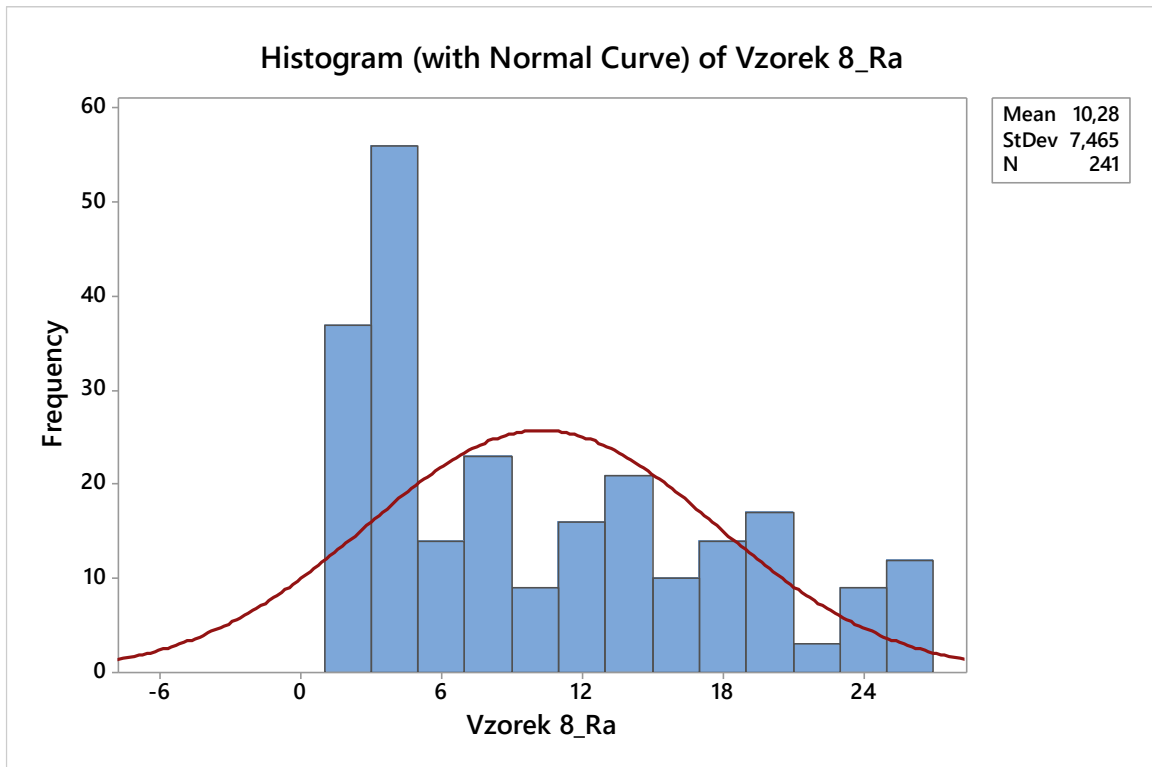
Obrázek 33 Rozdělení hodnot Ra 5. vzorku



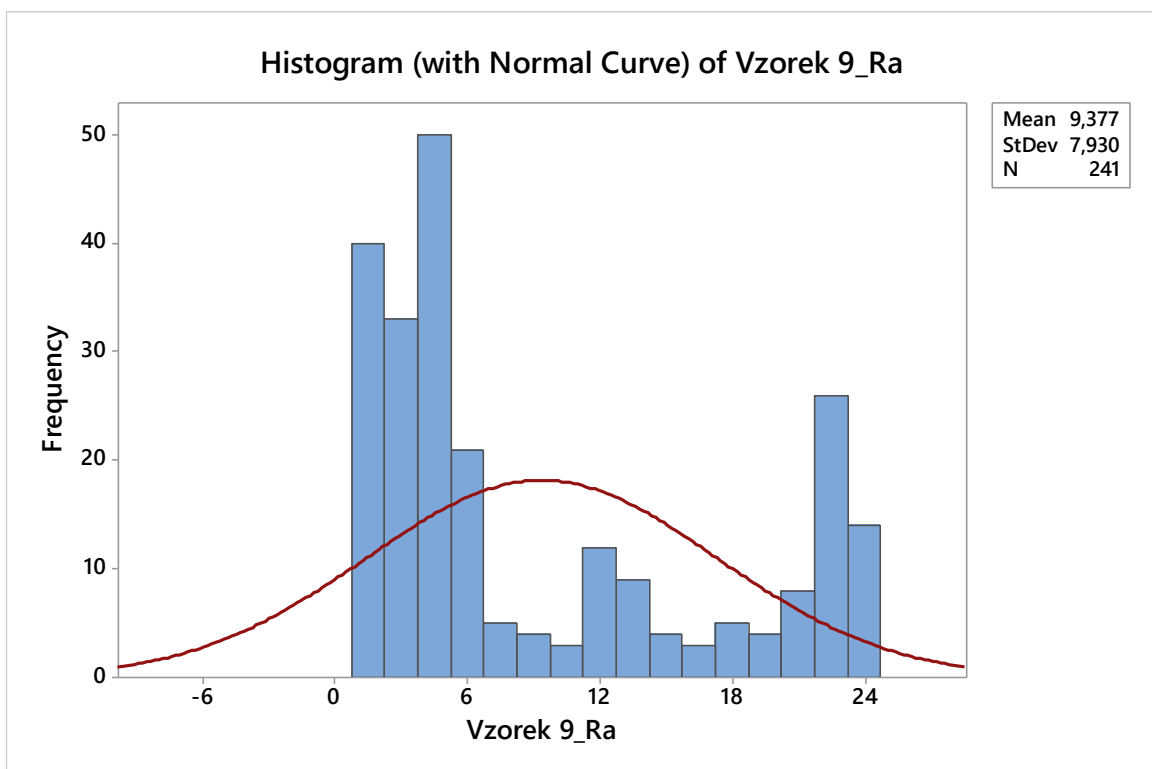
Obrázek 34 Rozdělení hodnot Ra 6. vzorku



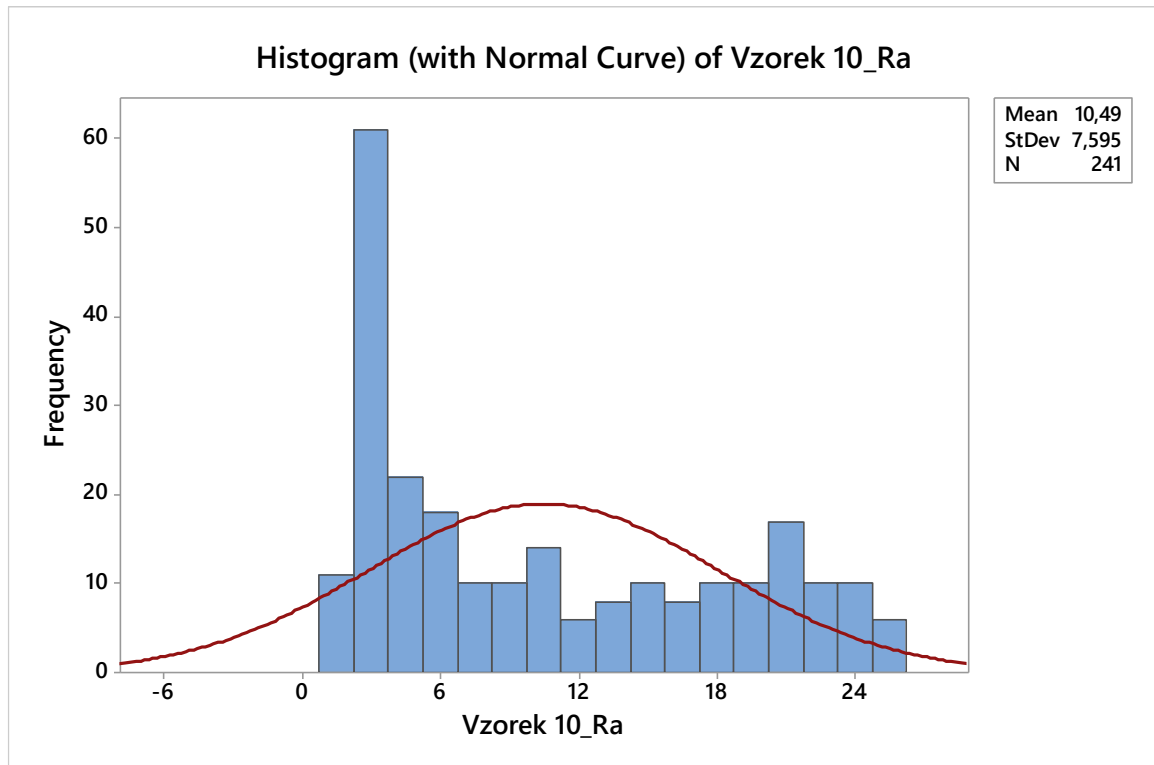
Obrázek 35 Rozdělení hodnot Ra 7. vzorku



Obrázek 36 Rozdělení hodnot Ra 8. vzorku



Obrázek 37 Rozdělení hodnot Ra 9. vzorku

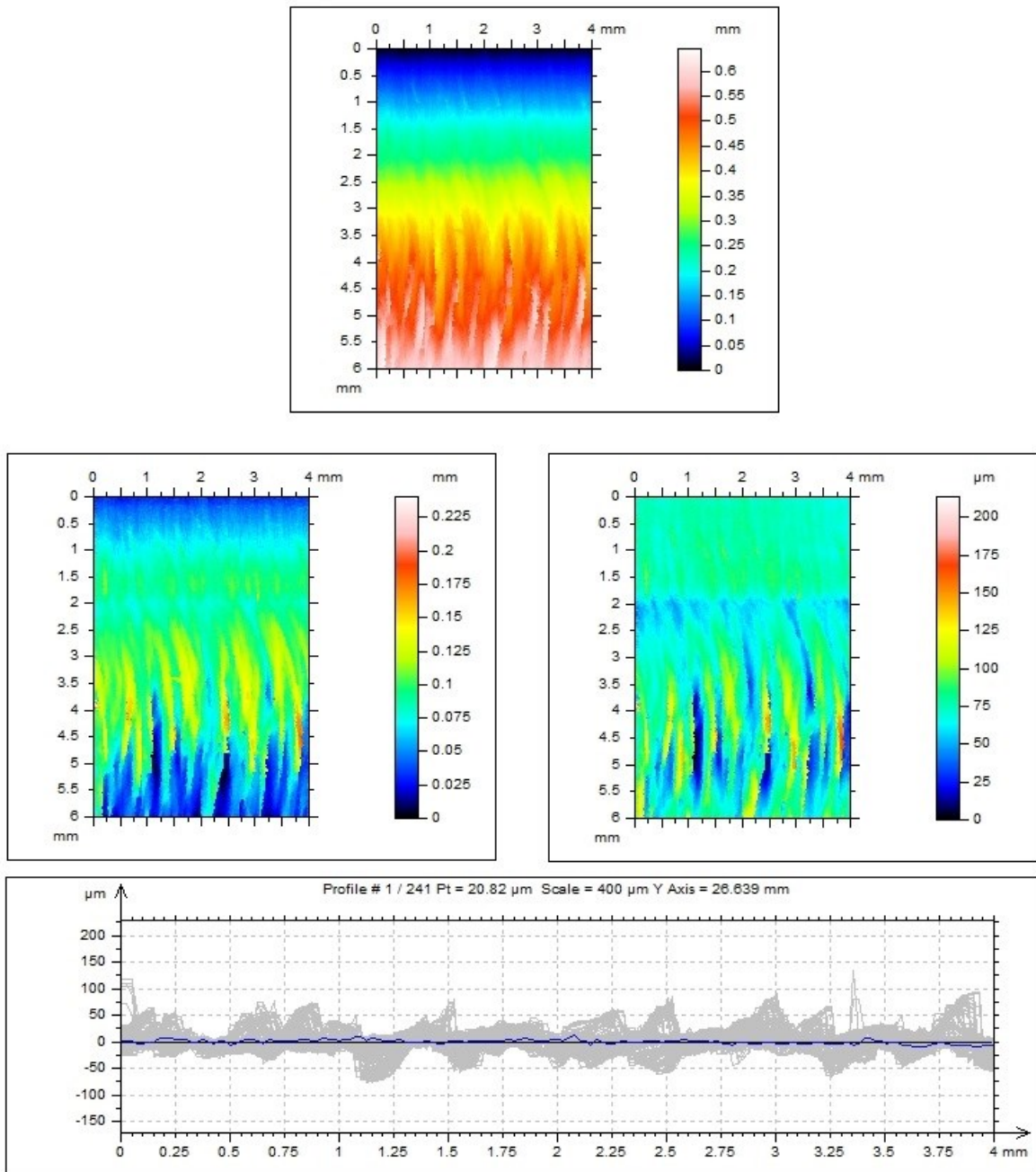


Obrázek 38 Rozdělení hodnot Ra 10. vzorku

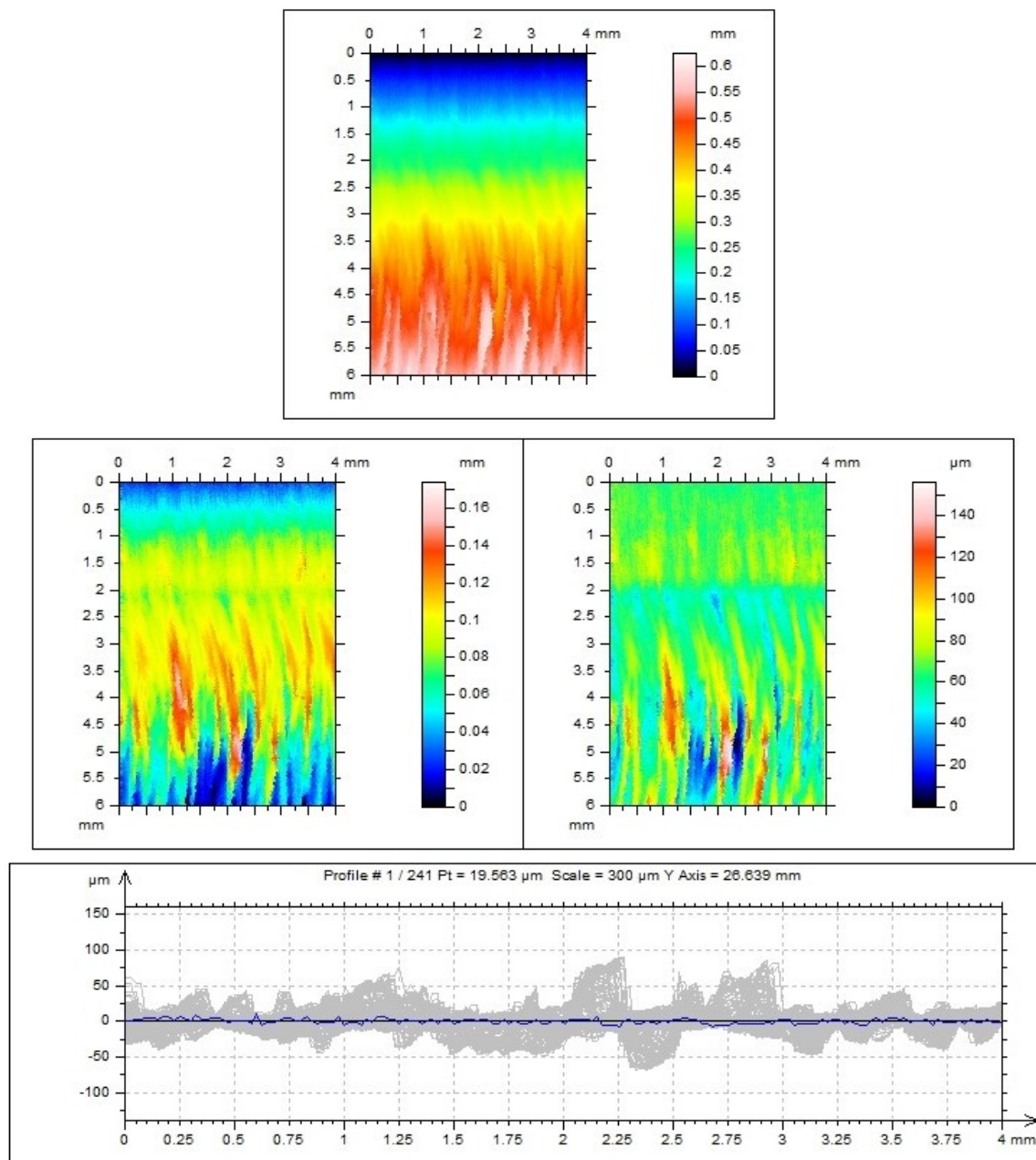
Při hodnocení histogramů parametru Ra lze opět zahlédnout, že jsou všechny dvouvrcholové. Zdůvodnění jednotlivých vrcholů je totožné jako u parametru Rz, ovšem s porovnáním časové řady parametru Ra.

8.3 Nasnímaná data

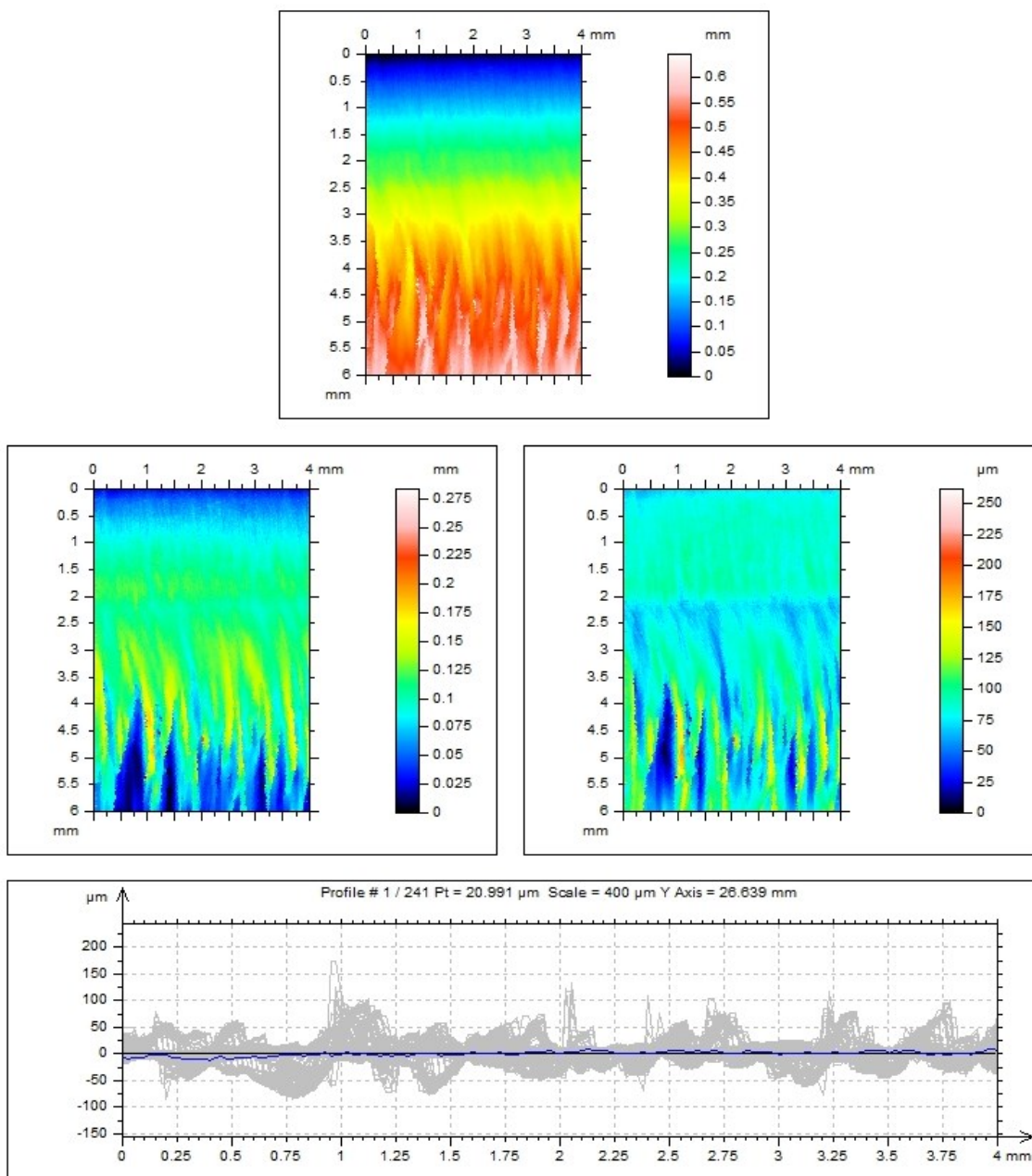
Z profilometru kromě dat se získala také nasnímaná data jednotlivých povrchů vzorků. První snímek je naměřený samotný povrch. Na dalším snímku bylo provedeno vyrovnání povrchu (tzv. leveling), kdy byl použit filtr na vypuštění tvaru. Třetí snímek je pak už samotná drsnost povrchu (po odebrání vlnitosti). Poslední snímek je poté řez povrchu z boku, na kterém jsou zaneseny všechny hodnoty, které byly naměřeny.



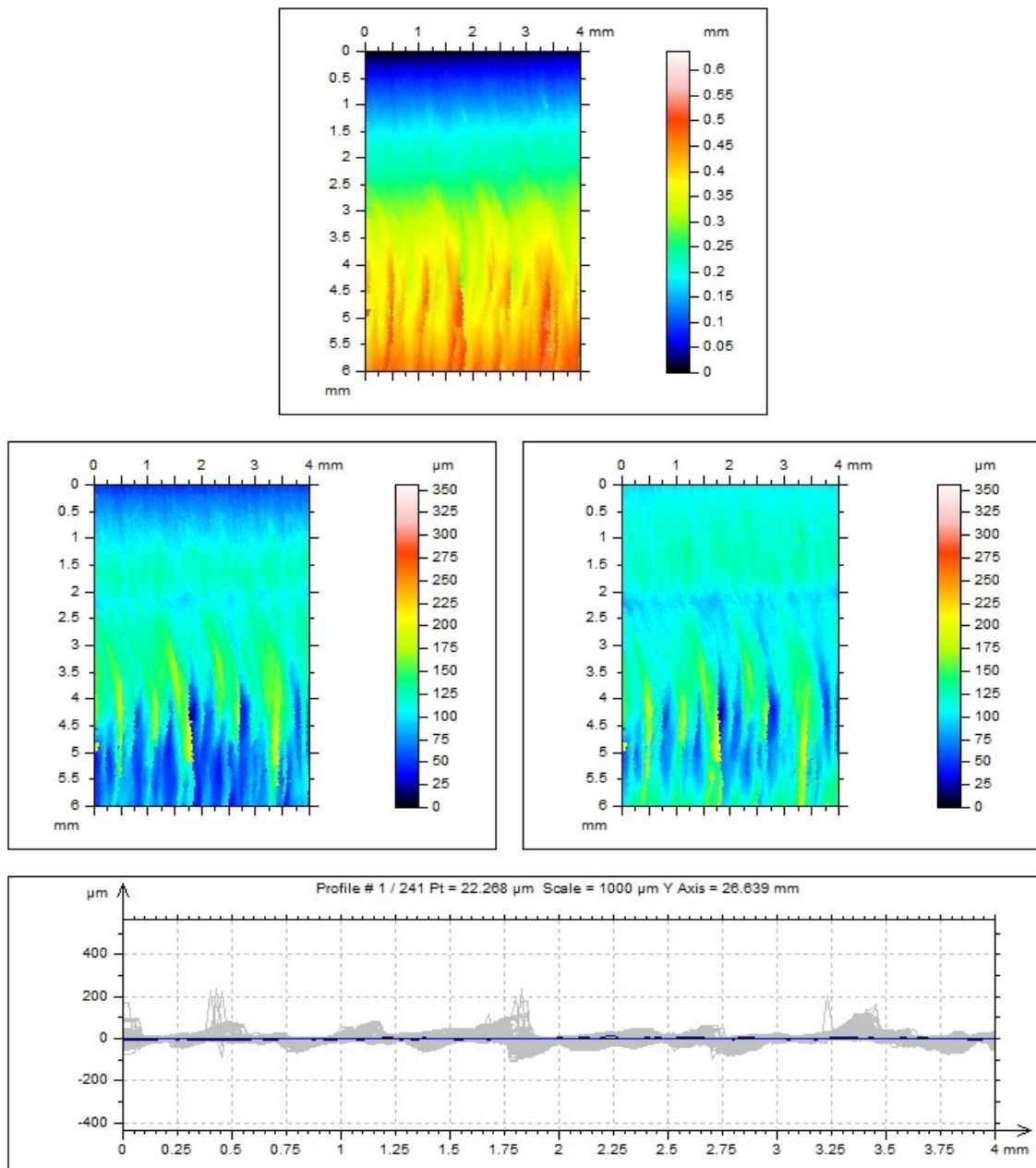
Obrázek 39 Nasnímaný povrch 1. vzorku



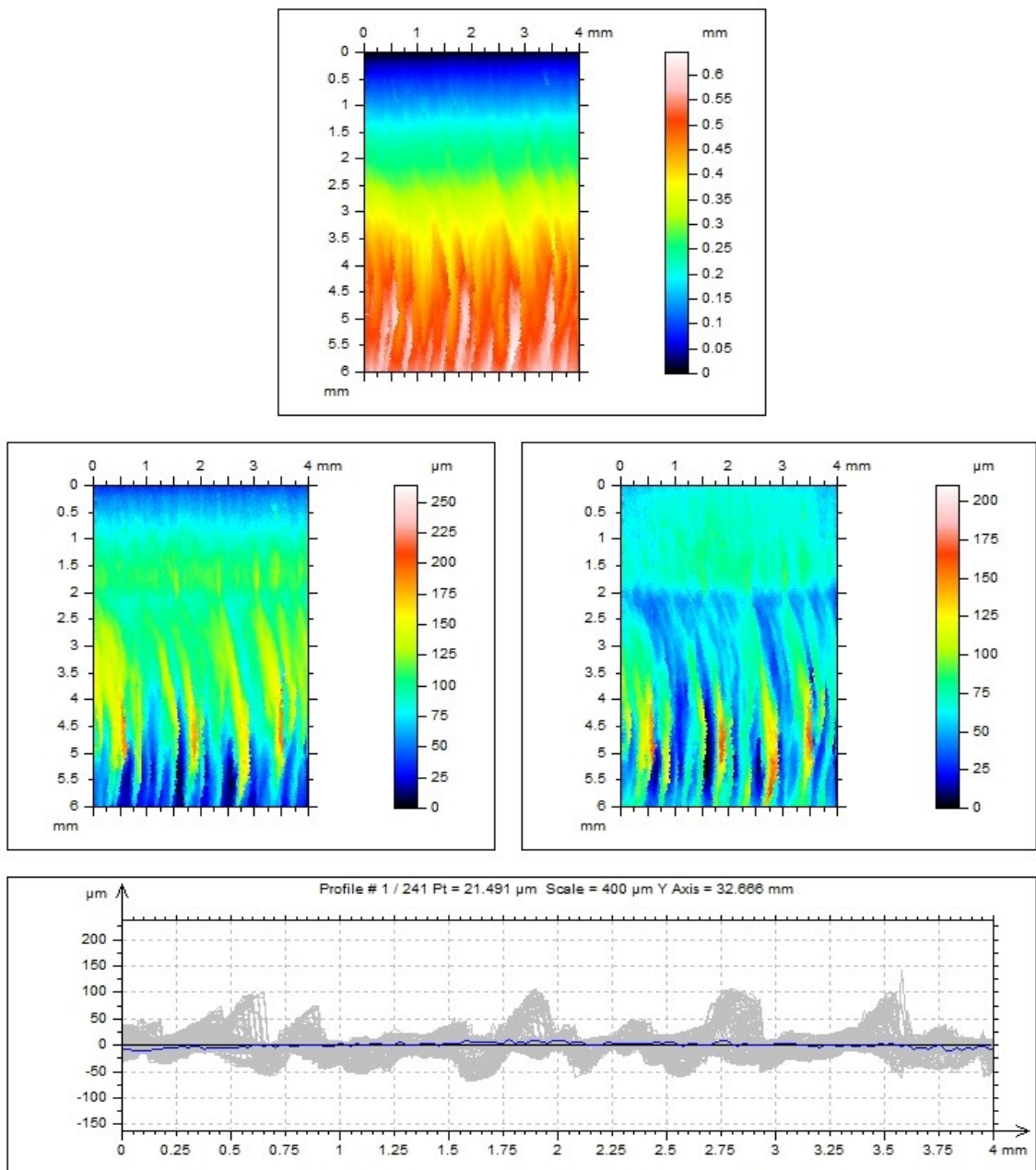
Obrázek 40 Nasnímaný povrch 2. vzorku



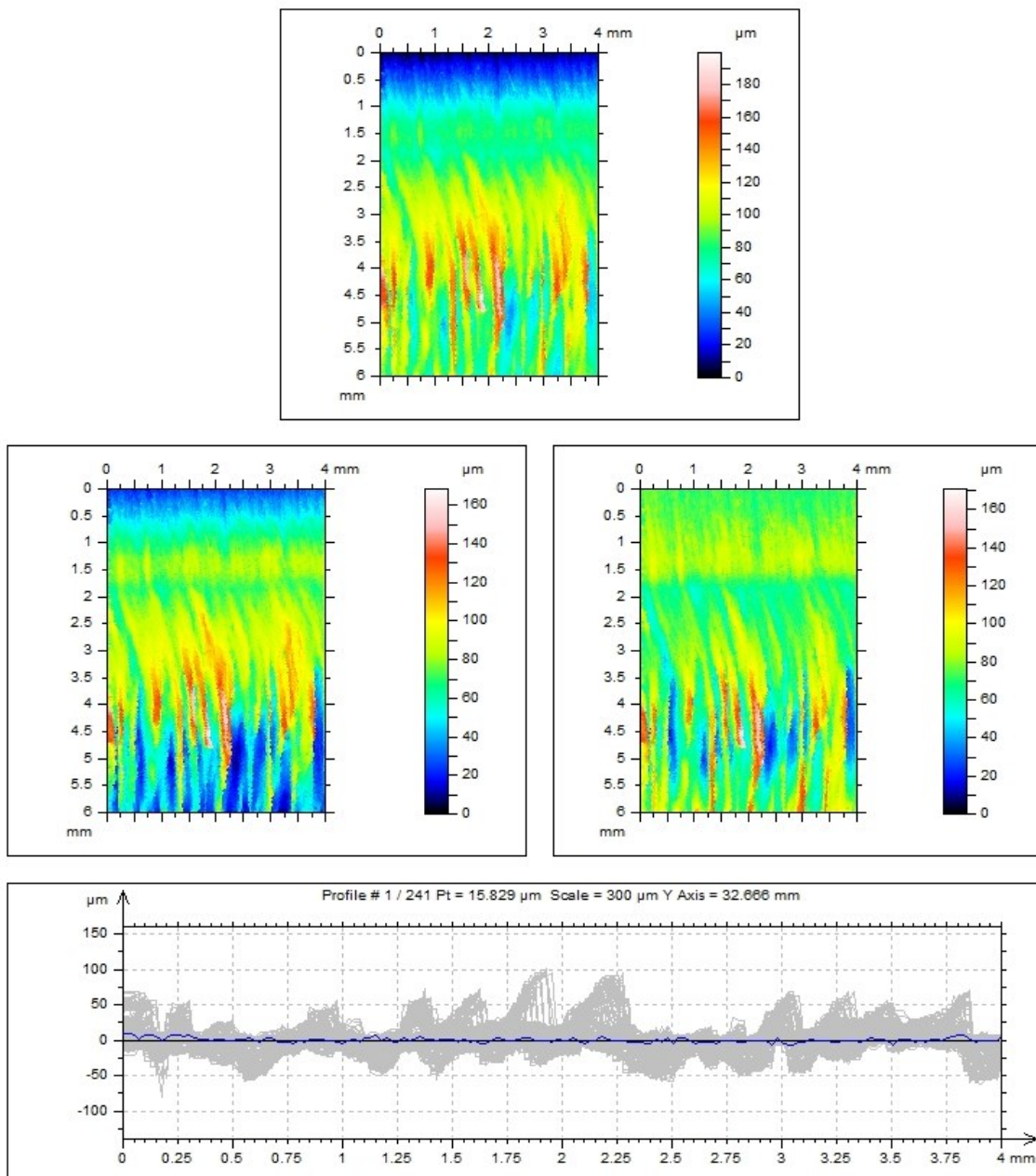
Obrázek 41 Nasnímaný povrch 3. vzorku



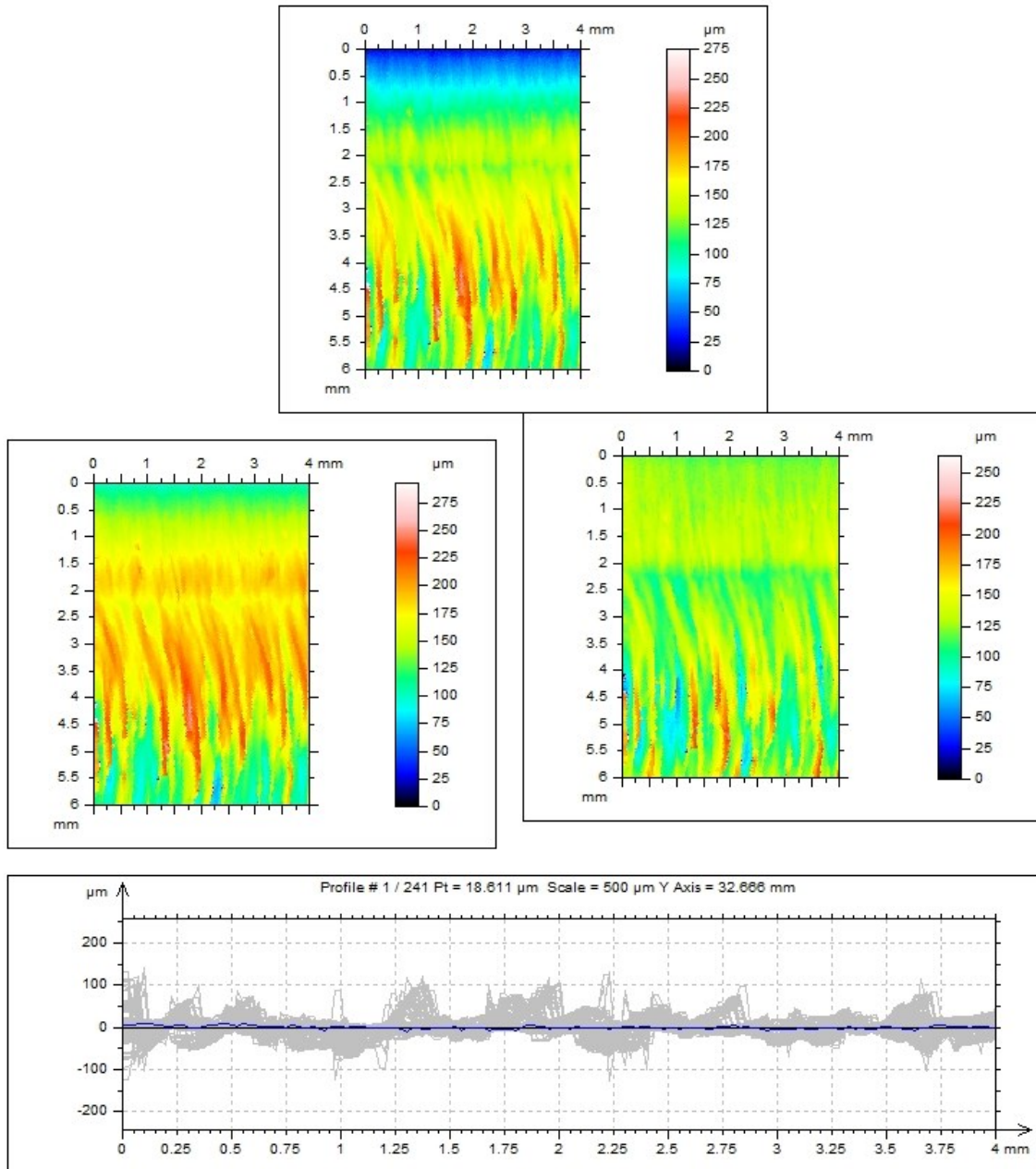
Obrázek 42 Nasnímaný povrch 4. vzorku



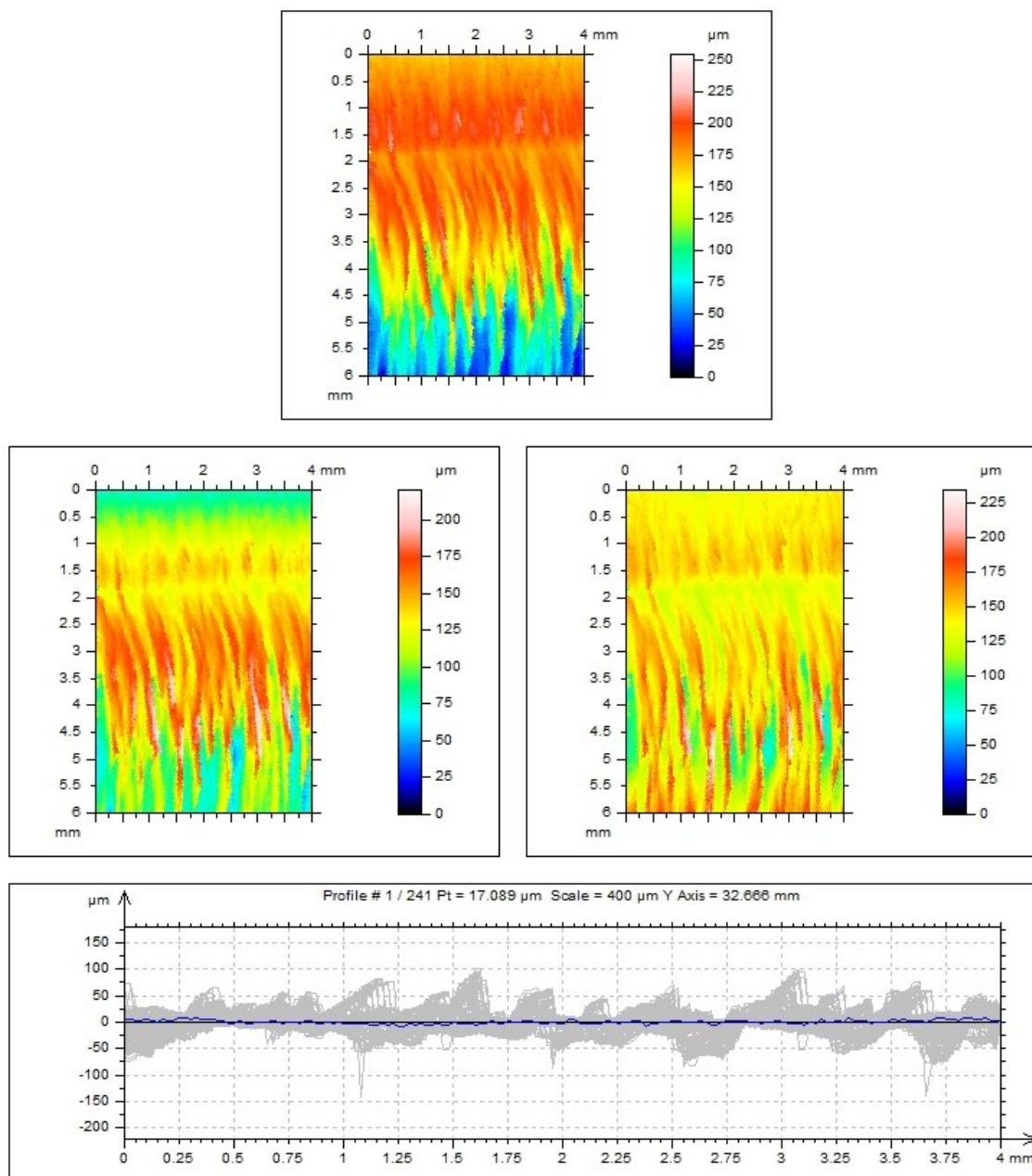
Obrázek 43 Nasnímaný povrch 5. vzorku



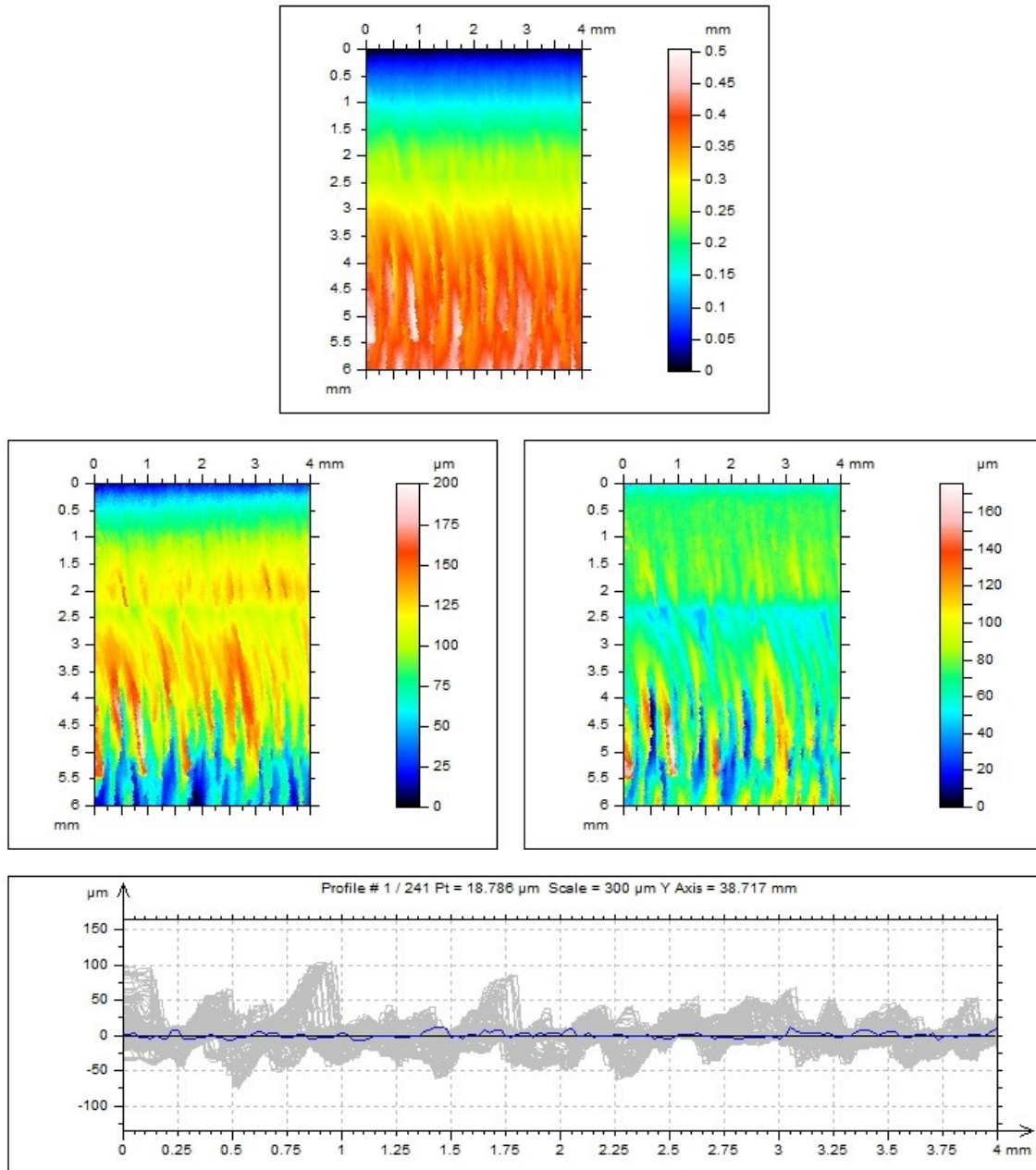
Obrázek 44 Nasnímaný povrch 6. vzorku



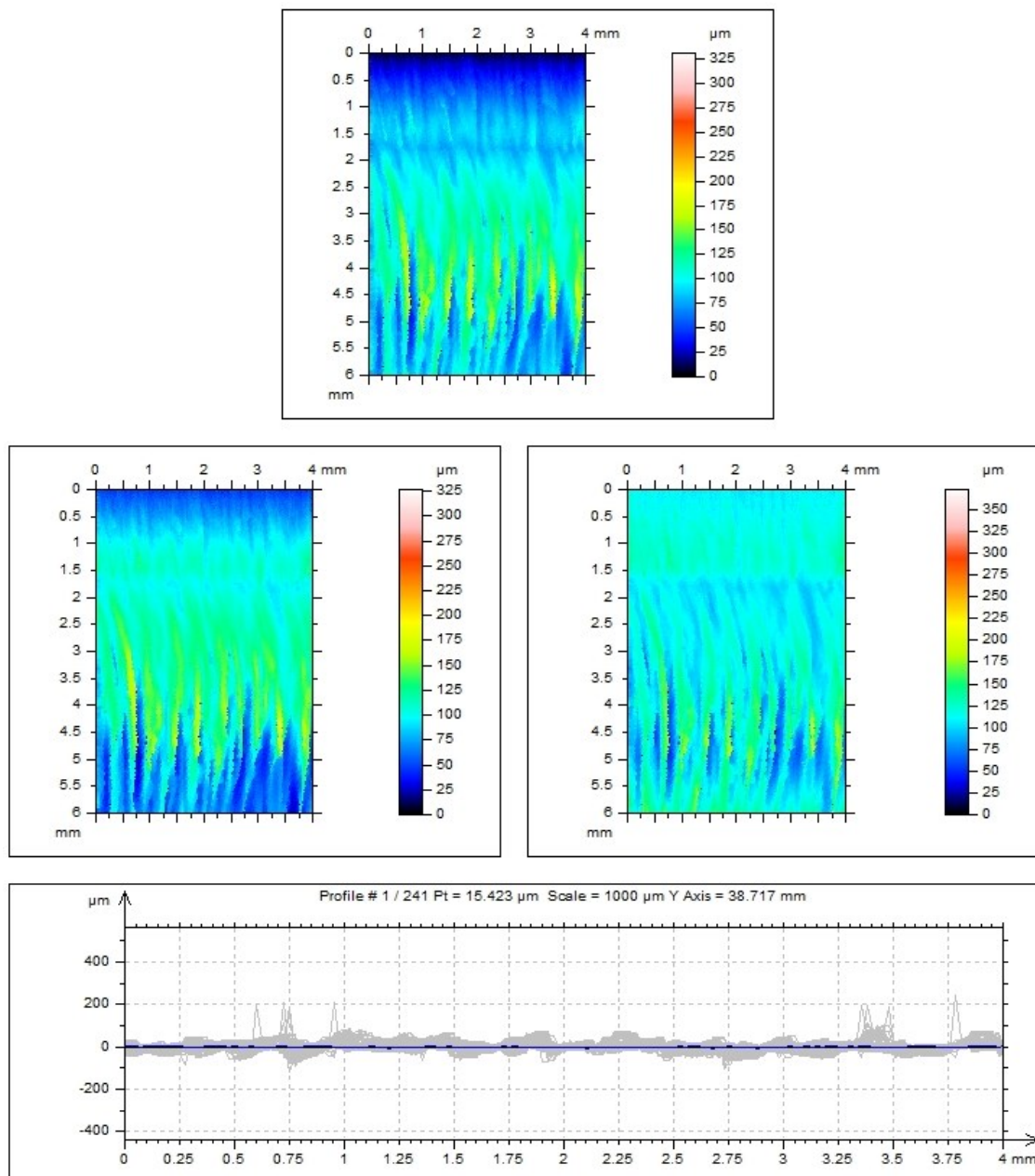
Obrázek 45 Nasnímaný povrch 7. vzorku



Obrázek 46 Nasnímaný povrch 8. vzorku



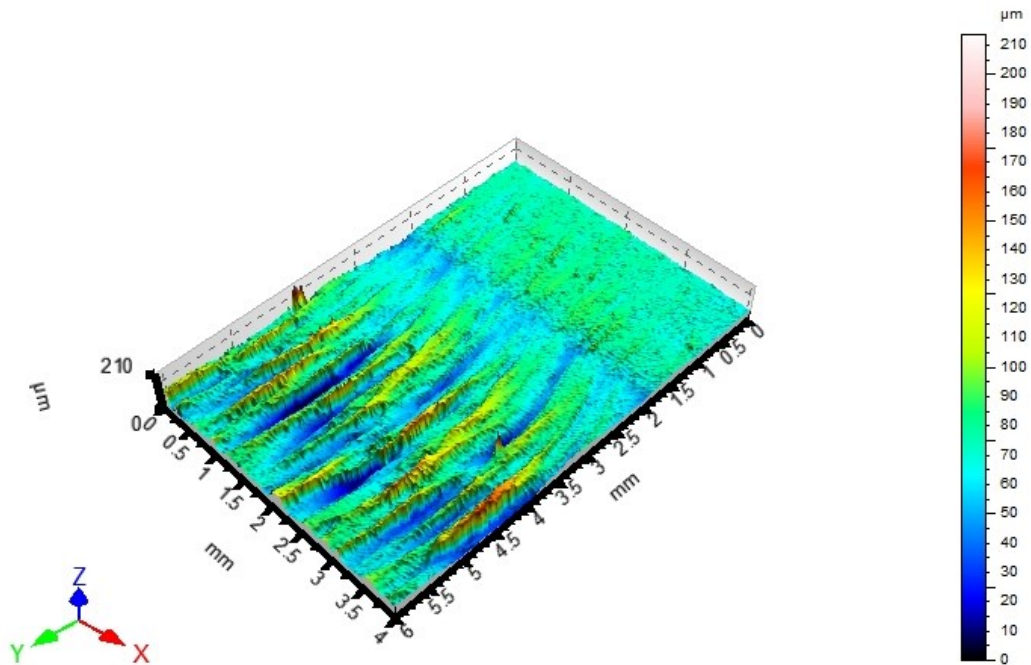
Obrázek 47 Nasnímaný povrch 9. vzorku



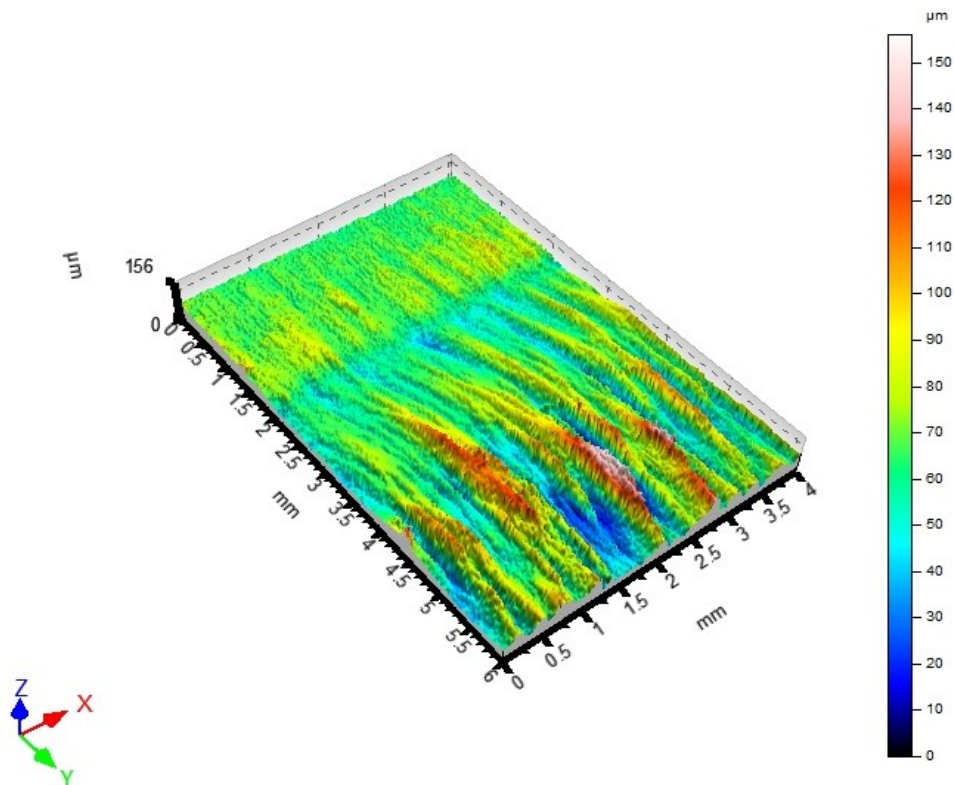
Obrázek 48 Nasnímaný povrch 10. vzorku

8.3.1 3D pohledy jednotlivých vzorků

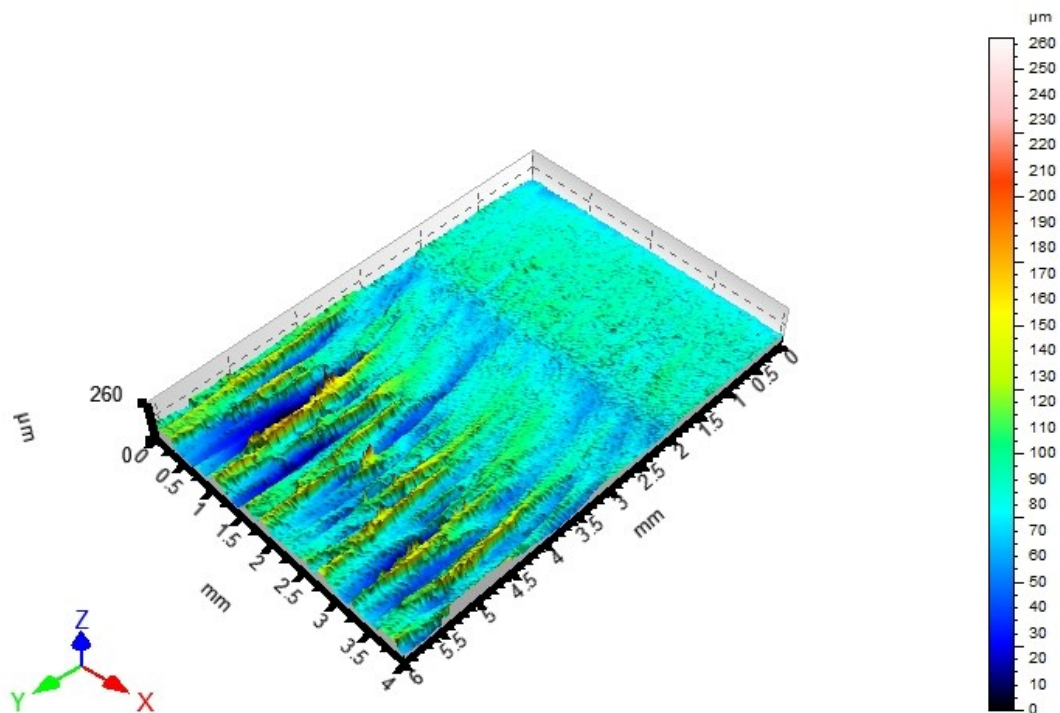
Na následujících obrázcích jsou 3D pohledy naměřených dat jednotlivých vzorků o rozměrech 4x6 mm.



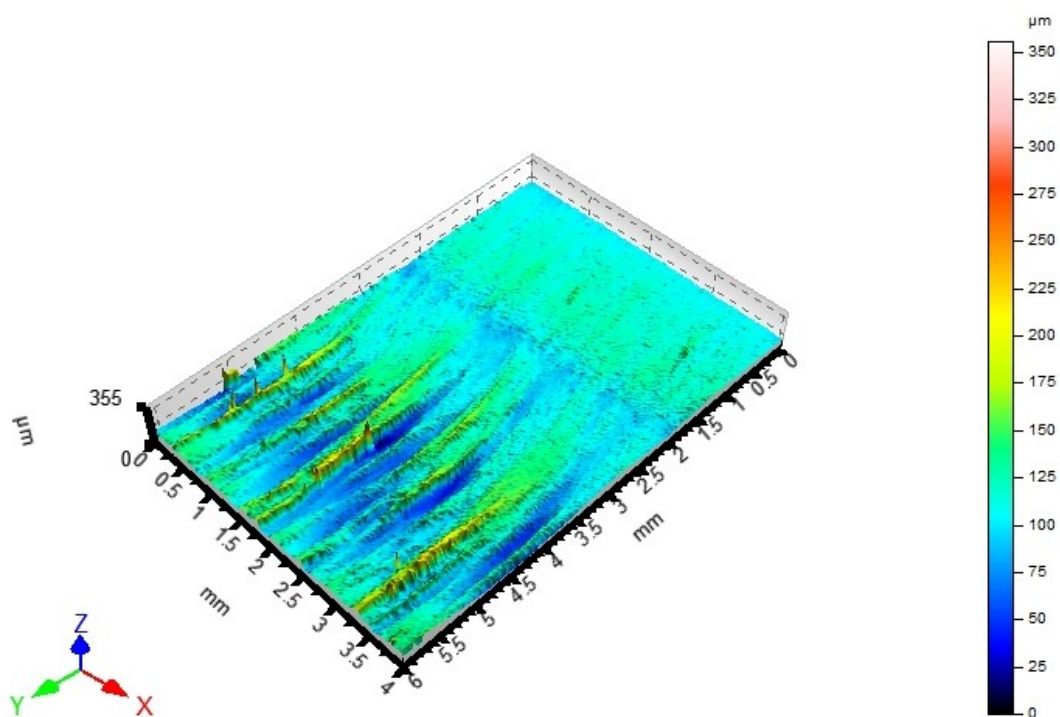
Obrázek 49 3D pohled povrchu 1. vzorku



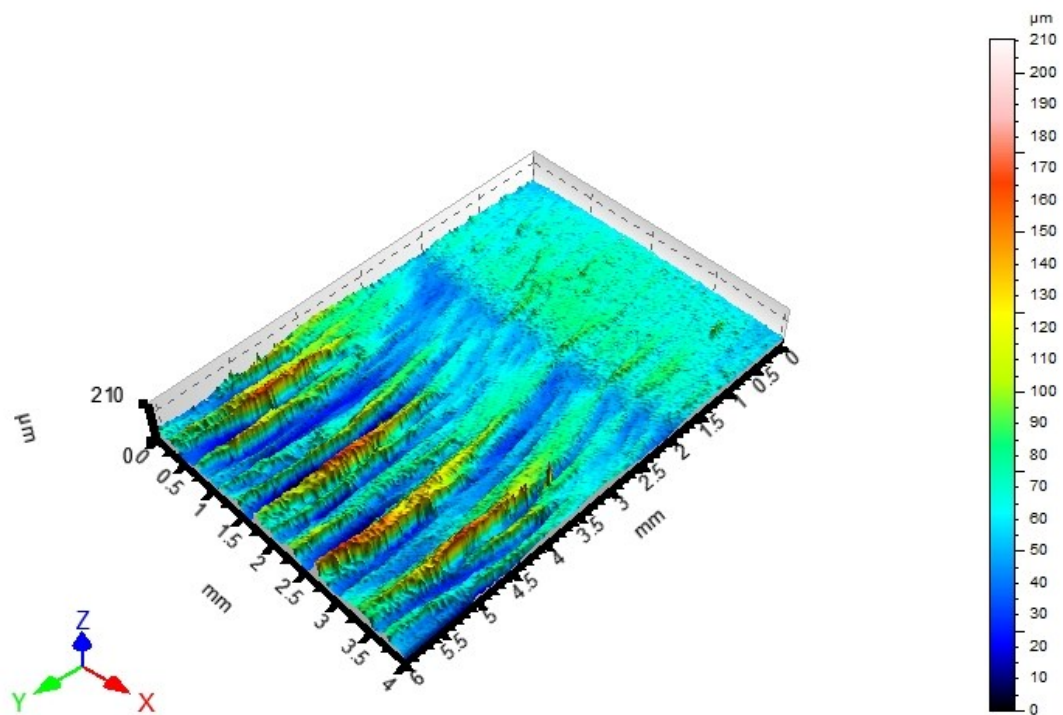
Obrázek 50 3D pohled povrchu 2. vzorku



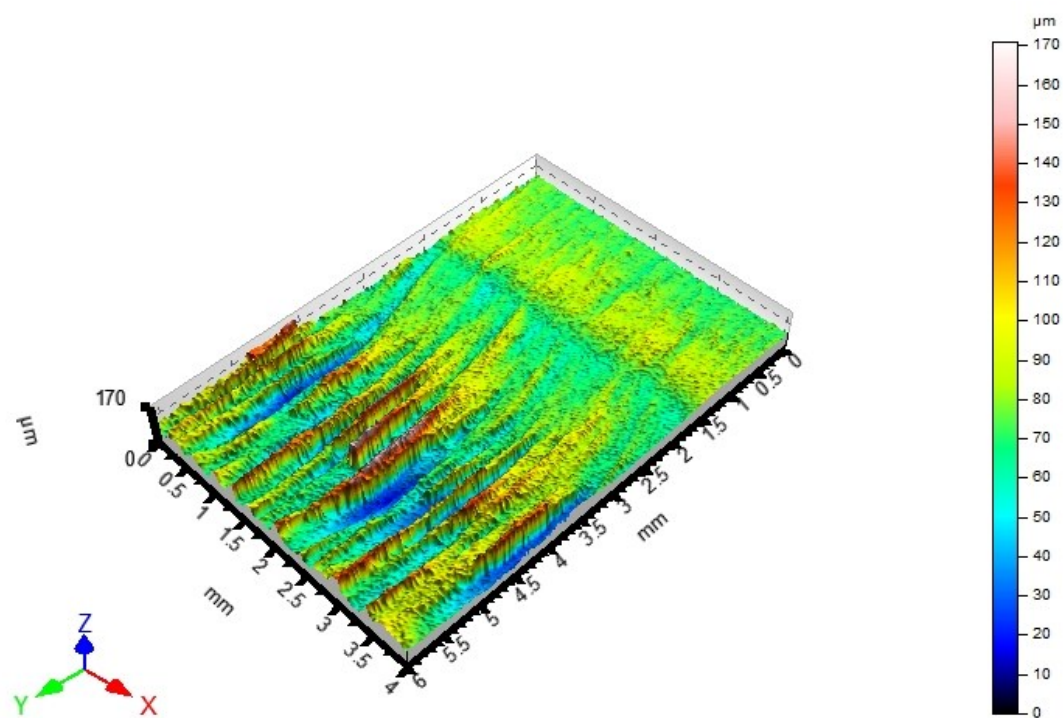
Obrázek 51 3D pohled povrchu 3. vzorku



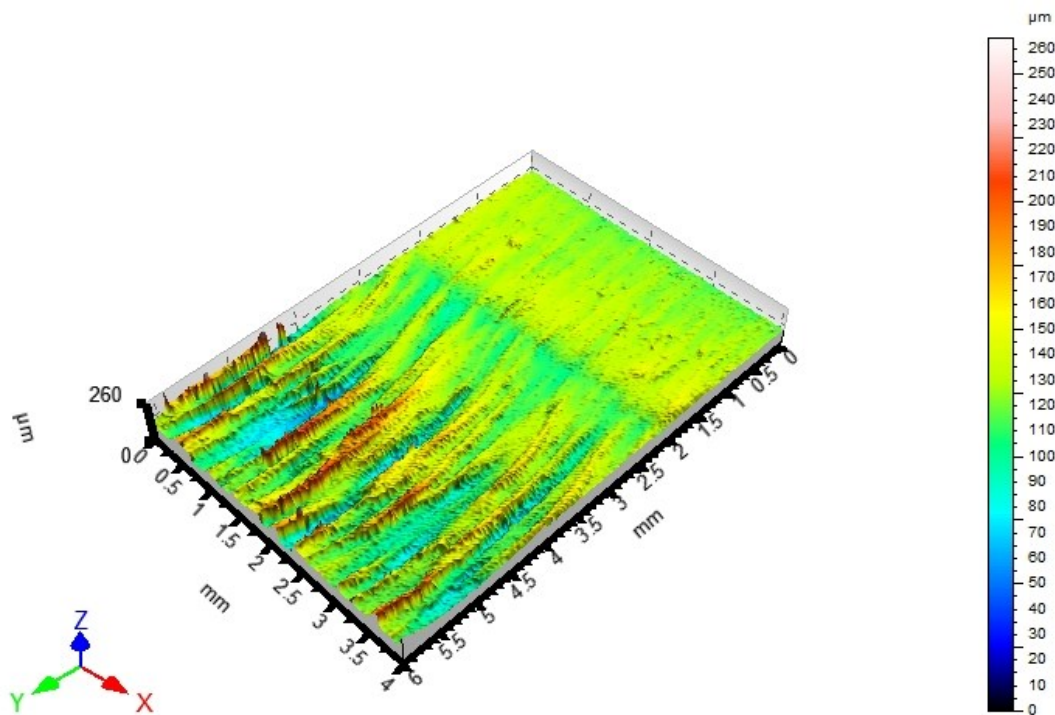
Obrázek 52 3D pohled povrchu 4. vzorku



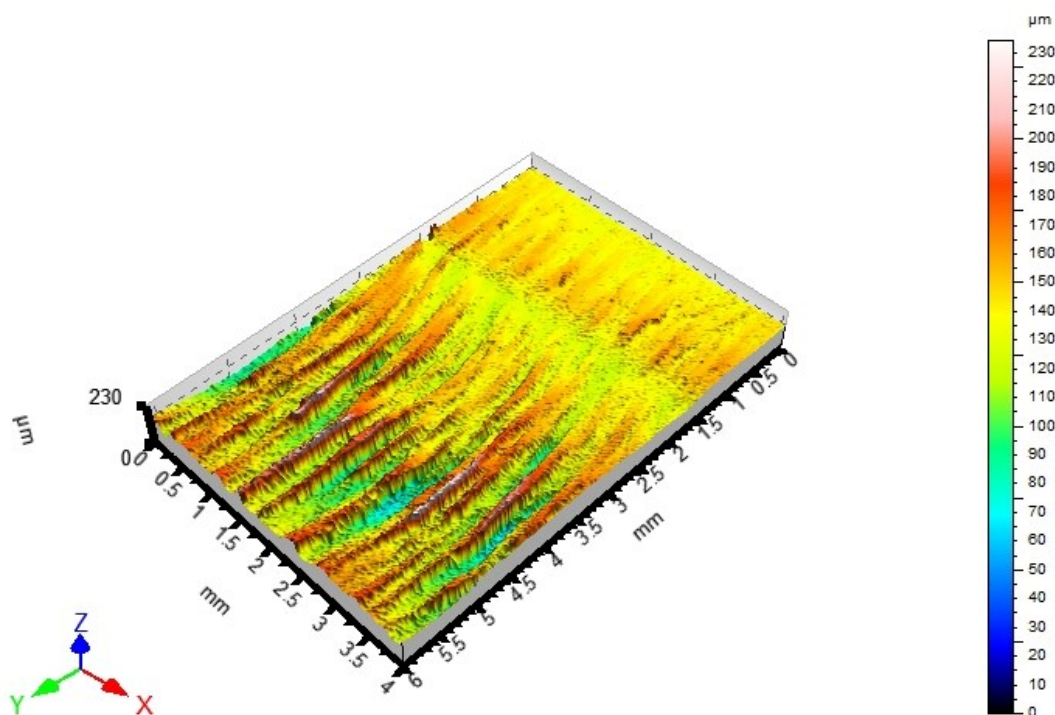
Obrázek 53 3D pohled povrchu 5. vzorku



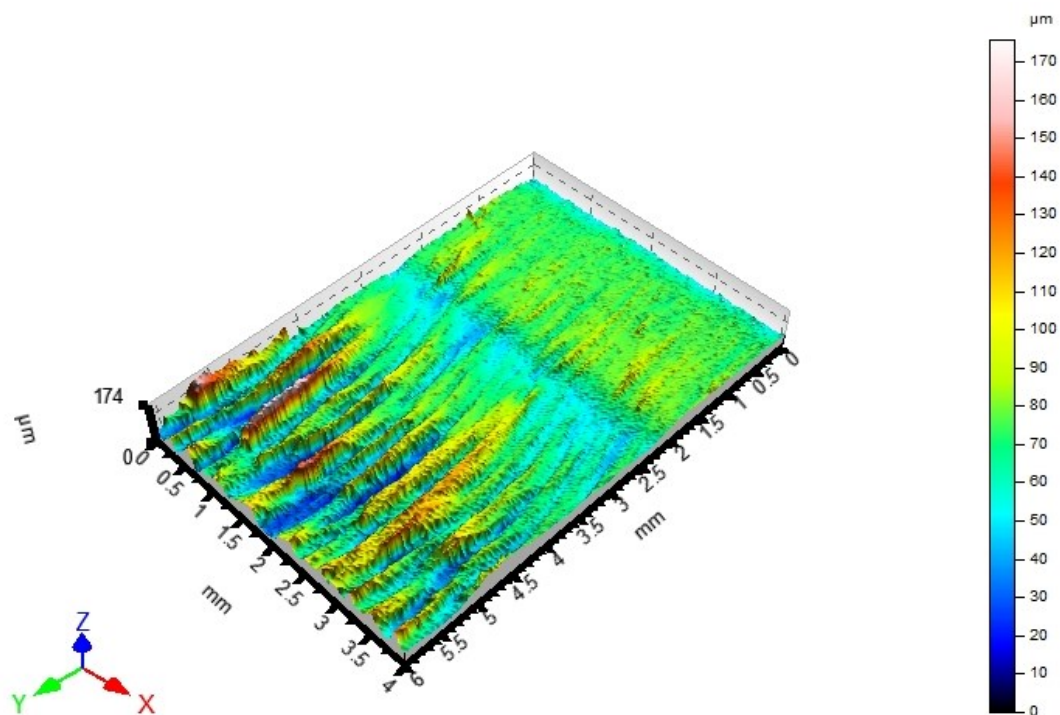
Obrázek 54 3D pohled povrchu 6. vzorku



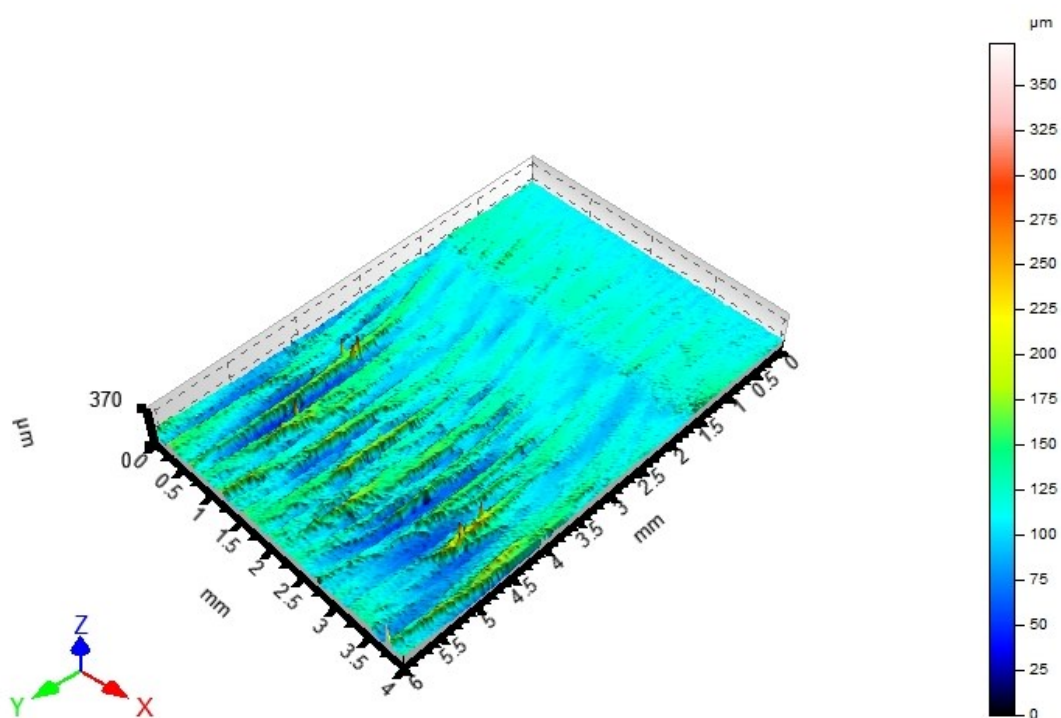
Obrázek 55 3D pohled povrchu 7. vzorku



Obrázek 56 3D pohled povrchu 8. vzorku



Obrázek 57 3D pohled povrchu 9. vzorku



Obrázek 58 3D pohled povrchu 10. vzorku

ZÁVĚR

Analýza časové řady parametrů Rz a Ra ukázala, že v průběhu času probíhají významné změny hodnot. Tyto změny naznačují proměnnost změn na zkoumaných površích. Změny jsou dány průchodem paprsku, který není konzistentní. Zjištěné nepravidelnosti ukazují na nekonzistentnost a dynamičnost povrchu, který prochází kontinuálními změnami.

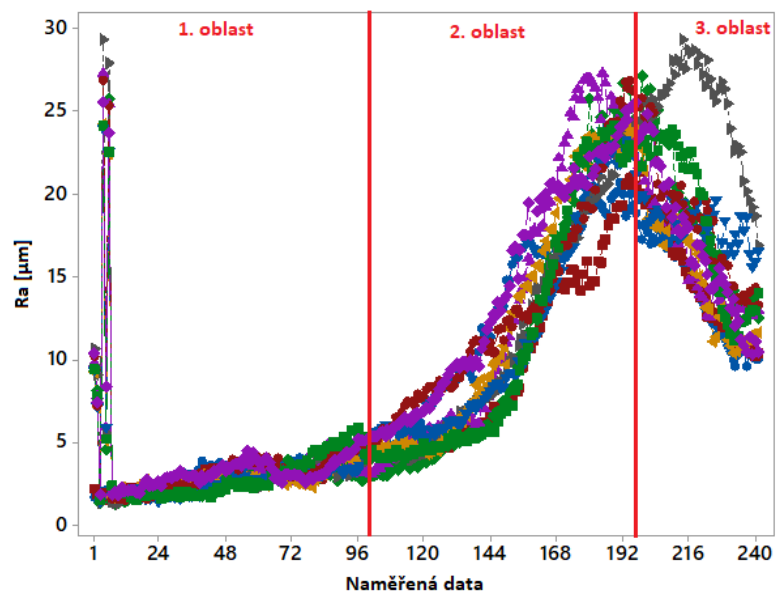
Tuto hypotézu potvrzují i histogramy naměřených parametrů Rz a Ra. Jejich dvouvrcholová distribuce může být interpretována jako existence dvou či více stavů povrchu. Ty mohou být způsobeny různými mechanismy a faktory.

Na časové řadě lze také identifikovat tři oblasti (viz obrázek 59), ve kterých dochází k významným změnám hodnot parametrů. První oblast je oproti dalším charakteristická větší stabilitou hodnot. Tato stabilita je například vidět na obrázku 60, který danou oblast zobrazuje. Paprsek má stabilní sílu při průchodu materiálem, a to se projevuje stabilní dráhou bez velkých chyb.

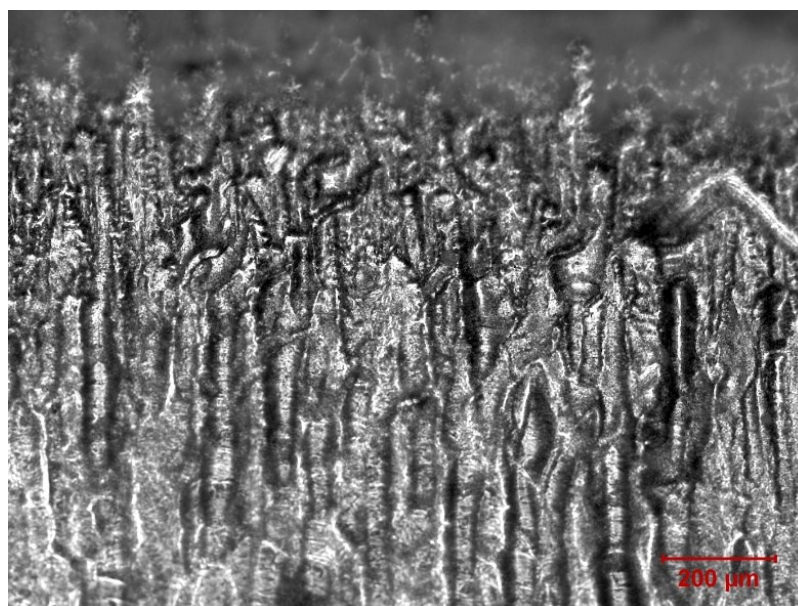
V druhé oblasti lze sledovat nárůst hodnot parametrů až k maximu časové řady. Tento nárůst lze interpretovat jako zhoršení průchodnosti paprsku materiálem při řezání. Tuto oblast zobrazuje obrázek 61, kde lze vidět zlom. Hodnoty parametru za daným zlomem jsou pak již horší, než tomu bylo na obrázku 60.

A nakonec ve třetí oblasti dochází postupně k poklesu hodnot parametrů. Tento pokles se dá interpretovat jako různé nedokonalosti na výstupní části materiálu. Například se může jednat o tečení materiálu. Další variantou je možnost, že roztavený materiál tekl do dolní části, kde zalil již obrobený materiál. Tento efekt lze částečně zahlédnout na obrázku 62.

Tato širší analýza poskytuje hlubší vhled do dynamiky změn povrchů a pomáhá lépe porozumět jejich chování v čase.



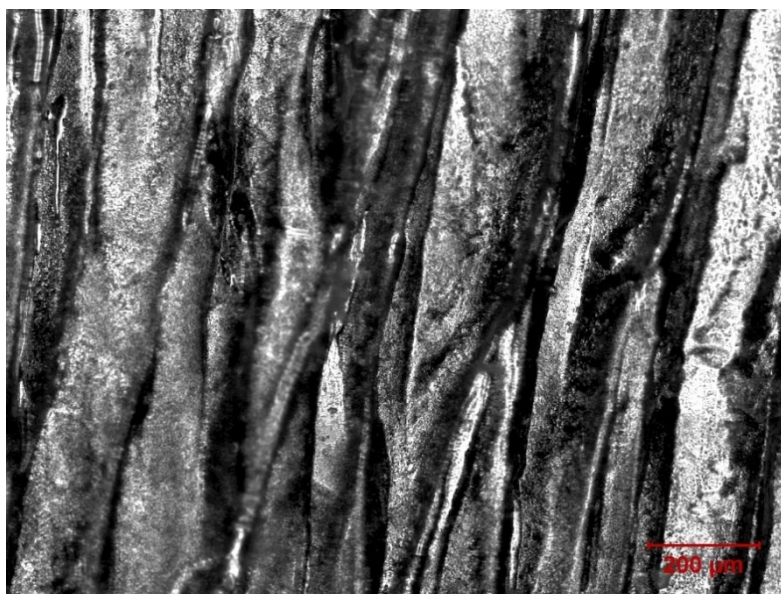
Obrázek 59 Rozdělení časové řady na tři oblasti



Obrázek 60 Snímek povrchu z 1. oblasti



Obrázek 61 Snímek povrchu z 2. oblasti



Obrázek 62 Snímek povrchu z 3. oblasti

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BÍLEK, Ondřej a Imrich LUKOVICS. Výrobní inženýrství a technologie. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati, 2014. ISBN 978-807-4544-712.
- [2] ŘASA, Jaroslav a Vladimír GABRIEL. Strojírenská technologie 3. Praha: Scientia, 2000. ISBN 80-718-3207-3.
- [3] JAYAPPA, Pradeep, Santhosh SRINIVASAN, K. VETRIVEL MURUGAN, C. THANGAVEL, M. BALA THEJA, G. PHANINDRA RAJA VARMA, S. MARICHAMY a Ram SUBBIAH. An overview on role of unconventional machining processes on different materials. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2022, 50, 1341-1345 [cit. 2024-02-13]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2021.08.253
- [4] KANNATEY-ASIBU, Elijah, 6 January 2023n. 1. Principles of Laser Materials Processing: Developments and Applications. Online. John Wiley. ISBN 9781119881636. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/9781119881636>. [cit. 2024-05-07].
- [5] SRIN, K.S.; BATHE, Ramkumar a BATHE, Ravi N, 2023. Nanomachining. Online. Dostupné z: <https://doi.org/10.5772/intechopen.111369>. [cit. 2024-05-07].
- [6] ČSN EN ISO 21920-1: Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Profil – Část 1: Indikace textury povrchu. (2023) (01.06.2023). Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [7] ČSN EN ISO 21920-2: Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Profil – Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu. (2023) (01.06.2023). Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [8] ČSN EN ISO 25178-2. Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Plocha – Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [9] Whitehouse, D. J., & Whitehouse, D. J. (2011). Handbook of surface and nanometrology (2nd ed). Boca Raton: CRC Press.ta
- [10] Parametry drsnosti. In: Jenoptik [online]. [cit. 2024-05-02]. Dostupné z: <https://www.jenoptik.cz/cz/technicke-informace/drsnost-povrchu-dle-din-en-iso/>
- [11] Kontrola drsnosti povrchu. ELUC [online]. [cit. 2024-05-09]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1102> (obr.)

- [12] Complete guide to Surface Finish Symbols, Charts, RA, RZ, Measurements, and Callouts [online]. [cit.2024-02-14]. Dostupné z: <https://www.cnccookbook.com/surface-finish-chart-symbols-measure-calculators/>
- [13] MONTGOMERY, Mike. What is Roughness Average? Astro Pak [online]. 2020 [cit. 2024-02-14]. Dostupné z: <https://astropak.com/surface-roughness-average-ra/#>
- [14] KUBÁTOVÁ, Dana a MELICHAR, Martin. IMPACT ANALYSIS OF ROUGHNESS EVALUATION METHODS. Online. S. 1-7. Dostupné z: <https://doi.org/10.2507/30th.daaam.proceedings.062>. [cit. 2024-05-07].
- [15] Surface roughness measurement. Tribonet [online]. 2022, 1-3 [cit. 2024-02-13]. Dostupné z: <https://www.tribonet.org/wiki/surface-roughness-measurement/>
- [16] VALÍČEK, J., M. DRŽÍK, T. HRYNIEWICZ, M. HARNIČÁROVÁ, K. ROKOSZ, M. KUŠNEROVÁ, K. BARČOVÁ a D. BRAŽINA. Non-contact method for surface roughness measurement after machining. Measurement Science Review [online]. 2012, 2012-01-1, 12(5) [cit. 2024-02-13]. ISSN 1335-8871. Dostupné z: doi:10.2478/v10048-012-0028-3
- [17] Similarity evaluation of topography measurement results by different optical metrology technologies for additive manufactured parts – ScienceDirect. ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books. [online]. Copyright © 2019 Elsevier Ltd. All rights reserved. [cit. 19.01.2020]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143816619308991?via%3Dihub>
- [18] Exploratory Data Analysis. U.S. Environmental Protection Agency [online]. [cit. 2024-03-07]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/caddis/exploratory-data-analysis>
- [19] PATIL, Prasad. What is Exploratory Data Analysis? Medium [online]. [cit. 2024-03-07]. Dostupné z: <https://towardsdatascience.com/exploratory-data-analysis-8fc1cb20fd15>
- [20] LEVAY, Radek. Histogramy [online]. [cit. 2024-04-17]. Dostupné z: <http://www.ikvalita.cz/tools.php?ID=24>
- [21] DUDEK, Martin. Box-plot neboli krabicový graf. Kvalita jednoduše [online]. [cit. 2024-04-17]. Dostupné z: <https://kvalita-jednoduse.cz/box-plot/>
- [22] What Is a Time-Series Plot, and How Can You Create One? Timescale [online]. [cit. 2024-05-09]. Dostupné z: <https://www.timescale.com/blog/what-is-a-time-series-plot-and-how-can-you-create-one/>

- [23] Pata, V., & Kubišová, M. (2018). Statistické metody hodnocení jakosti strojírenských povrchů. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati, Fakulta technologická.
- [24] Taylor Hobson | Metrology | Form | Surface | Equipment | Instruments. Taylor Hobson | Metrology | Form | Surface | Equipment | Instruments [online]. Copy-right ©2020 AMETEK.Inc. All rights reserved. [cit. 08.05.2024]. Dostupné z: <https://www.taylor-hobson.com/>
- [25] WU, Xiaolei a Yuntian ZHU. Heterogeneous materials: a new class of materials with unprecedented mechanical properties. Materials Research Letters [online]. 2017 [cit. 2024-05-09]. ISSN 2166-3831. Dostupné z: doi:10.1080/21663831.2017.1343208
- [26] Examples of Homogeneous Mixtures: Solid, Liquid and Gas [online]. [cit. 2024-05-09]. Dostupné z: <https://examples.yourdictionary.com/examples-of-homogeneousmixture.html>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Ra	Střední aritmetická výška profilu
Rz	Maximální výška profilu
ČSN	Česká státní norma
EN	Evropská norma
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
CLA	Chromatic Length Abberation
2D	Dvourozměrný prostor
3D	Trojrozměrný prostor
EDA	Exploratory Data Analysis
%	procento
α	úhel zkosení laseru
mm	milimetr
μm	mikrometr
kg	kilogram
Min	Minimální hodnota výběru
Max	Maximální hodnota výběru
Mean	Průměr
Stdev	Směrodatná odchylka
N	Počet naměřených hodnot
P	Profile
W	Waviness
R	Roughness
QR	Kvartilové rozpětí
SW	Software

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Maximální výška úseku [7]	17
Obrázek 2 Vztažený materiálový poměr pro R-profil [7]	18
Obrázek 3 Profil povrchu [7]	20
Obrázek 4 Parametry P,W,R na profilu povrchu [10]	20
Obrázek 5 Dělení povrchu pomocí filtrů [11]	21
Obrázek 6 Dotyková metoda snímání povrchu pomocí jehly [15]	22
Obrázek 7 Schéma bezdotykové metody pomocí laseru [16]	23
Obrázek 8 Základní rozdělení histogramů [20]	24
Obrázek 9 Box-plot [21]	25
Obrázek 10 Talysurf CLI 50	28
Obrázek 11 Přípravení vzorku pro měření	29
Obrázek 12 Detail laseru před měřením	29
Obrázek 13 Nastavení odrazivosti	30
Obrázek 14 Nastavení měřící délky	30
Obrázek 15 Box-plot hodnoty Rz naměřených vzorků	32
Obrázek 16 Časová řada parametru Rz	32
Obrázek 17 Rozdělení hodnot Rz 1. vzorku	33
Obrázek 18 Rozdělení hodnot Rz 2. vzorku	33
Obrázek 19 Rozdělení hodnot Rz 3. vzorku	34
Obrázek 20 Rozdělení hodnot Rz 4. vzorku	34
Obrázek 21 Rozdělení hodnot Rz 5. vzorku	35
Obrázek 22 Rozdělení hodnot Rz 6. vzorku	35
Obrázek 23 Rozdělení hodnot Rz 7. vzorku	36
Obrázek 24 Rozdělení hodnot Rz 8. vzorku	36
Obrázek 25 Rozdělení hodnot Rz 9. vzorku	37
Obrázek 26 Rozdělení hodnot Rz 10. vzorku	37
Obrázek 27 Box-plot hodnoty Ra naměřených vzorků	38
Obrázek 28 Časová řada parametru Ra	39
Obrázek 29 Rozdělení hodnot Ra 1. vzorku	39
Obrázek 30 Rozdělení hodnot Ra 2. vzorku	40
Obrázek 31 Rozdělení hodnot Ra 3. vzorku	40
Obrázek 32 Rozdělení hodnot Ra 4. vzorku	41
Obrázek 33 Rozdělení hodnot Ra 5. vzorku	41
Obrázek 34 Rozdělení hodnot Ra 6. vzorku	42

Obrázek 35 Rozdělení hodnot Ra 7. vzorku	42
Obrázek 36 Rozdělení hodnot Ra 8. vzorku	43
Obrázek 37 Rozdělení hodnot Ra 9. vzorku	43
Obrázek 38 Rozdělení hodnot Ra 10. vzorku	44
Obrázek 39 Nasnímaný povrch 1. vzorku	45
Obrázek 40 Nasnímaný povrch 2. vzorku	46
Obrázek 41 Nasnímaný povrch 3. vzorku	47
Obrázek 42 Nasnímaný povrch 4. vzorku	48
Obrázek 43 Nasnímaný povrch 5. vzorku	49
Obrázek 44 Nasnímaný povrch 6. vzorku	50
Obrázek 45 Nasnímaný povrch 7. vzorku	51
Obrázek 46 Nasnímaný povrch 8. vzorku	52
Obrázek 47 Nasnímaný povrch 9. vzorku	53
Obrázek 48 Nasnímaný povrch 10. vzorku	54
Obrázek 49 3D pohled povrchu 1. vzorku	55
Obrázek 50 3D pohled povrchu 2. vzorku	55
Obrázek 51 3D pohled povrchu 3. vzorku	56
Obrázek 52 3D pohled povrchu 4. vzorku	56
Obrázek 53 3D pohled povrchu 5. vzorku	57
Obrázek 54 3D pohled povrchu 6. vzorku	57
Obrázek 55 3D pohled povrchu 7. vzorku	58
Obrázek 56 3D pohled povrchu 8. vzorku	58
Obrázek 57 3D pohled povrchu 9. vzorku	59
Obrázek 58 3D pohled povrchu 10. vzorku	59
Obrázek 59 Rozdělení časové řady na tři oblasti.....	61
Obrázek 60 Snímek povrchu z 1. oblasti	61
Obrázek 61 Snímek povrchu z 2. oblasti	62
Obrázek 62 Snímek povrchu z 3. oblasti	62

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Parametry přístroje Talysurf CLI 50 [24]	28
Tabulka 2 Tabulka hodnot Rz.....	31
Tabulka 3 Tabulka hodnot parametru Ra	38