

Využití vícerozměrných statistických metod pro hodnocení heterogenních povrchů

Bc. Jiří Nosek

Diplomová práce
2020



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Jiří Nosek
Osobní číslo:	T18322
Studijní program:	N3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Řízení jakosti
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Využití vícerozměrných statistických metod pro hodnocení heterogenních povrchů

Zásady pro vypracování

1. Vypracování rešerše zahrnující hodnocení jakosti povrchů, se zaměřením na homogenní povrchy.
2. Nasnímání dat s využitím 3D bezkontaktního scanneru Zygo 8000.
3. Provedení separací charakteristických povrchů, včetně jejich 3D parametrů
4. Nalezení odpovídajících závislostí a závěrů.

Forma zpracování diplomové práce: Tisková/elektronická

Seznam doporučené literatury:

1. Meloun, M., & Militký, J. (2004). *Statistická analýza experimentálních dat* (Vyd. 2., upr. a rozš.). Praha: Academia.
2. Pata, V., & Kubišová, M. (2018). *Statistické metody hodnocení jakosti strojírenských povrchů*. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati, Fakulta technologická.
3. Whitehouse, D. J., & Whitehouse, D. J. (2011). *Handbook of surface and nanometrology* (2nd ed). Boca Raton: CRC Press.ta

Vedoucí diplomové práce: **prof. Dr. Ing. Vladimír Pata**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **15. května 2020**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 10. února 2020

PROHLÁŠENÍ AUTORA

DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou 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 užit své dílo – diplomovou 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 diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují 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 diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta: Jiří Nosek

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na zlepšení metody hodnocení jakosti heterogenních povrchů řezné plochy po obrábění zejména nekonvenčními metodami. Zkoumanými parametry drsnosti povrchu jsou Rz a Ra. Pro praktickou část byl vybrán materiál nerezová ocel 1.4301 tloušťky 6 mm. Z tohoto materiálu byly vyřezány dva vzorky. Jeden laserem Fiber a druhý CO2 laserem. Teoretická část se zabývá nejdříve heterogenními plochami. Jejich popisem, hodnocením a vznikem. Navazuje zaměřením na použité lasery u vzorků a samotným principem úběru materiálu touto technologií. Pokračuje metodami snímání povrchů. Teoretickou část uzavírají statistické metody hodnocení kvality povrchů. V praktické části je rozebráno laboratorní měření, práce s daty a jejich vyhodnocení. Následuje aplikace pro vyhodnocení heterogenního povrchu a rozdělení na primární, sekundární a popřípadě terciální oblast.

Klíčová slova:

Jakost povrchu; heterogenní povrch; parametry drsnosti Ra, Rz; nelineární regrese;

ABSTRACT

The thesis is focused on method improvement in evaluating the quality of heterogeneous surfaces of the cutting face after machining, especially by unconventional methods. The aim is parameter investigation of surface roughness, specifically Rz and Ra. This paper is divided into two sections, namely the practical and theoretical section. The practical section discusses laboratory measurements, procedure/ data analysis and data assessment. For the practical part, the stainless steel material 1.4301 6 mm thick, was chosen. Two samples of the material were cut: one sample with a Fiber laser and the second sample with a CO2 laser. The theoretical section deals with heterogeneous surfaces, its description, evaluation and origin. Moreover, it focuses on the lasers used in the samples as well as the principle of material removal by lasers. Furthermore, it is followed by the scanning surfaces methods. The theoretical section is concluded by statistical methods for evaluating the quality of surfaces. In conclusion, possible implications of our results/ evaluation are classified into primary, secondary and possibly tertiary areas.

Keywords:

Surface quality; heterogeneous surface; roughness parameters Ra, Rz; nonlinear regression;

Rád bych vyjádřil vděčnost v první řadě mému vedoucímu diplomové práce panu prof. Dr. Ing. Vladimíru Patovi. Jeho myšlenky, rady a podpora byly pevnými základy, na kterých jsem byl schopný vytvořit tuto práci. Dále bych rád poděkoval Janě Budařové a Mgr. Veronice Vendelové za pomoc při formálním zpracování práce a jazykovou korekturu.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 CHARAKTERISTIKA A VZNIK HETEROGENNÍCH POVRCHŮ	11
1.1 CO TO JE HETEROGENNÍ POVRCH	11
1.2 POPIS VZNIKU HETEROGENNÍHO POVRCHU	12
1.3 PRINCIP, ROZDĚLENÍ A POUŽITÍ LASERU	13
1.3.1 CO ₂ lasery.....	14
1.3.2 Vláknové lasery.....	15
1.4 VZNIK ŘEZNÉ PLOCHY SE ZŘETELEM NA OBRÁBĚNÍ LASEROVÝM SVAZKEM	17
2 ZPŮSOB SNÍMÁNÍ HETEROGENNÍCH POVRCHŮ	18
2.1 MĚŘENÍ JAKOSTI POVRCHŮ	18
2.1.1 Kontaktní měření povrchů.....	18
2.1.2 Bezkontaktní měření povrchů	19
2.2 2D BEZKONTAKTNÍ ZPŮSOB SNÍMÁNÍ POVRCHŮ	20
2.2.1 Taylor Hobson CLI 500	20
2.2.2 3D snímání	21
2.2.3 Popis parametrů pro hodnocení drsnosti povrchu za pomoci 2D snímání	22
2.3 ROZDĚLENÍ STRUKTURY DRSNOSTI	23
3 MATEMATICKÉ METODY HODNOCENÍ HETEROGENNÍCH POVRCHŮ	25
3.1 STATISTICKÉ METODY	25
3.1.1 EDA.....	25
3.1.2 Kvalita dat	25
3.1.2.1 Kvalitativní data.....	26
3.1.2.2 Kvantitativní data.....	26
3.1.3 Grafické zobrazení a zhodnocení dat	27
3.1.3.1 Diagram časové posloupnosti (Time series plot).....	27
3.1.3.2 Histogram.....	28
3.1.3.3 Rozptylový diagram (Box plot a Scatter plot).....	28
3.1.4 Volba vhodných metod hodnocení.....	29
3.1.5 Shluková analýza	31
3.1.6 Diskriminační analýza.....	32
3.2 FRAKTÁLY.....	33
3.3 ANALÝZA HLAVNÍCH KOMPONENT PCA	33
3.4 KUBICKÝ SPLINE	34
3.5 NELINEÁRNÍ REGRESE	35
3.6 UMĚLÉ NEURONOVÉ SÍTĚ	35
II PRAKTICKÁ ČÁST	37
4 POČÁTEČNÍ INFORMACE O MĚŘENÍ	38

4.1	PODMÍNKY MĚŘENÍ	38
4.2	VYŠETŘOVANÉ POVRCHY	38
4.3	MĚŘICÍ PŘÍSTROJ	39
4.4	PROGRAM STATISTICKÉHO HODNOCENÍ.....	44
5	DATA.....	45
5.1	NAMĚŘENÁ DATA.....	45
5.2	ÚPRAVA DAT	45
5.2.1	Exploratorní datová analýza.....	45
6	HODNOCENÍ HETEROGENNÍCH POVRCHŮ	52
6.1	PODOBNOST DAT	52
6.1.1	Analýza hlavních komponent.....	52
6.1.2	Dendrogram naměřených dat	53
6.2	NELINEÁRNÍ REGRESIVNÍ KŘIVKY	54
6.2.1	1-4301 FIBER Rz.....	54
6.2.2	1-4301 FIBER Ra.....	55
6.2.3	1.4301 CO2 Rz.....	56
6.2.4	1.4301 CO2 Ra.....	57
6.3	KONTROLA NEURONOVOU SÍTÍ	58
6.3.1	1.4301 FIBER Ra	62
6.3.2	1.4301 CO2 Rz.....	63
6.3.3	1.4301 CO2 Ra.....	64
6.4	URČENÍ OBLASTÍ HETEROGENNÍHO POVRCHU.....	65
6.4.1	1.4301 FIBER Rz	65
6.4.2	1.4301 FIBER Ra	66
6.4.3	1.4301 CO2 Rz.....	67
6.4.4	1.4301 CO2 Ra.....	68
6.5	ZÁKLADNÍ STATISTICKÉ HODNOCENÍ NALEZENÝCH OBLASTÍ	69
6.5.1	1.4301 FIBER Rz	69
6.5.2	1.4301 FIBER Ra	71
6.5.3	1.4301 CO2 Rz.....	73
6.5.4	1.4301 CO2 Ra.....	75
	ZÁVĚR	77
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	79
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	83
	SEZNAM OBRÁZKŮ	84
	SEZNAM TABULEK.....	88
	SEZNAM PŘÍLOH.....	89

ÚVOD

Jak je to kvalitní? Otázka, která zajímá lidstvo od nepaměti. O to větší váhu získávala tato otázka s nástupem a rozvojem strojírenského průmyslu. Dnešní doba nás rozmazluje přístroji měřícími s přesností mikrometrů a rychlostí blesku. I přes to najdeme oblasti strojírenství, na které se tak trochu zapomíná. Jedním z nich jsou heterogenní povrchy, kterými se zabývá tato diplomová práce.

Dnešní strojírenská praxe k otázce hodnocení heterogenních povrchů nepřistupuje nejméně. Heterogenní povrch představují dvě někdy až tři oblasti s výrazně odlišnou hodnotou drsnosti na jedné ploše. Takový povrch vzniká při rychlých změnách obráběcích schopností stroje nebo prostředku obrábění. V drtivé většině případů se jedná o nekonvenční metody obrábění. Zejména laser a vodní paprsek. Do dnešních dob se takový povrch změří celý a výsledná hodnota vychází z průměrů všech oblastí. To však znamená značně zkreslenou představu o drsnosti povrchu.

Tato diplomová práce přináší prostředek pro změnu. Za pomoci statistického vyhodnocení dat, nelineární regrese a matematických postupů rozdělíme heterogenní povrch na oblasti primární, sekundární, případně terciální. Díky tomu můžeme přesně určit oblast, ve které budeme měřit. Výsledkem budou dvě, popř. tři oblasti vyhodnocené samostatně. To přinese velké zpřesnění vyhodnocení povrchu vzorku. Předmětem této práce bylo ověření této myšlenky.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 CHARAKTERISTIKA A VZNIK HETEROGENNÍCH POVRCHŮ

Pochopení vzniku zkoumaného povrchu nám rozšíří povědomí o naší problematice. Vznik heterogenních povrchů může probíhat několika způsoby. Z převážné části se jedná o nekonvenční technologie. Klasickými představiteli jsou obrábění laserem a vodním paprskem.

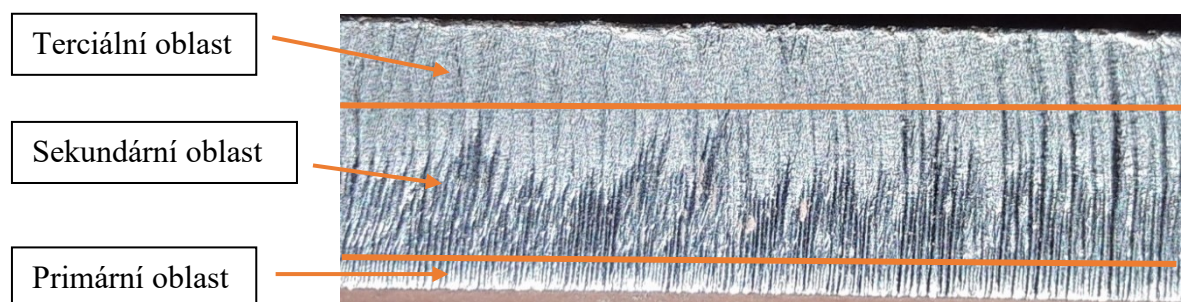
1.1 Co to je heterogenní povrch

Nekonvenční paprskové technologie po sobě zanechávají viditelné rýhování na obráběné ploše [1]. Zároveň však ve vstupu do materiálu vytváří přesně opracovaný povrch. Výsledná drsnost se pak statisticky významně liší dle místa měření. Čím hlouběji měříme, tím je povrch horší. Tyto oblasti dělíme na primární, sekundární, případně terciální [2,3].

Primární oblast je oblast, kde paprsek vstupuje do materiálu a část kde si při průchodu materiálem zachovává většinu své vstupní energie. Tato oblast má nejlepší tvarovou přesnost, ne vždy však nejmenší drsnost povrchu.

Sekundární, nebo také přechodová oblast se vyznačuje znatelným poklesem kvality povrchu. Okem viditelná změna je způsobena snižující se energií paprsku. Při průchodu materiálem ztrácí energii. Jakmile energie klesne na určitou úroveň, zhorší se řezné vlastnosti paprsku, nicméně ne v každém místě řezu. Proto není změna náhlá, ale pozvolná. Zde hodnoty primární oblasti pozvolna zhoršují svou kvalitu.

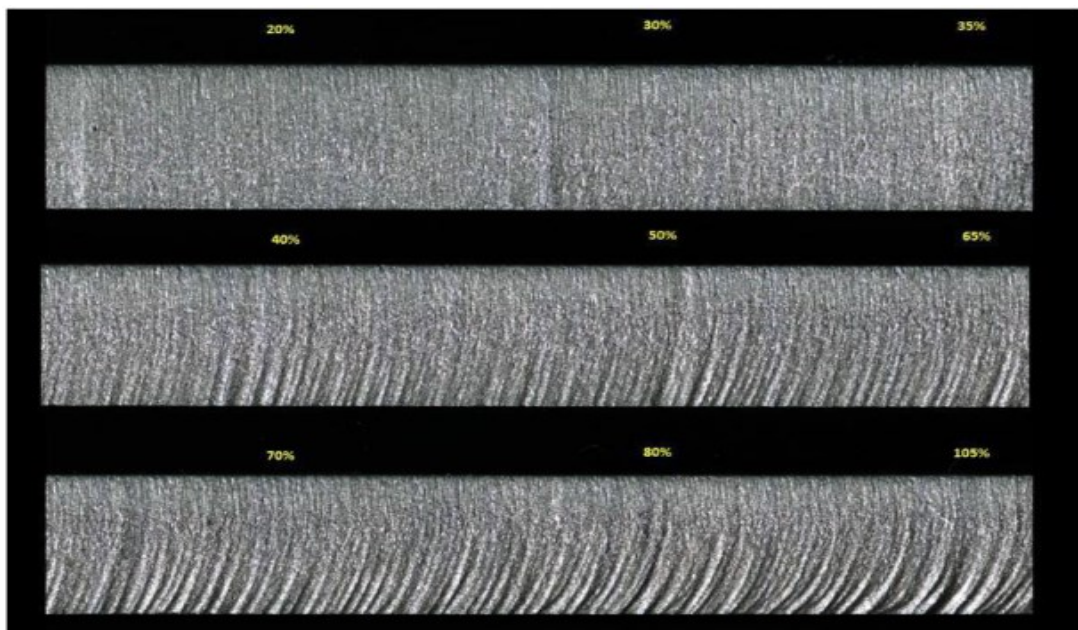
Terciální oblast je, kde paprsek již nemá dostatek energie, aby ani částečně řezal ve stejné kvalitě jako v sekundární oblasti. Celá oblast je významně tvarově horší oproti primární. Výsledná drsnost a mikogeometrie povrchu je náhodná. Výskyt terciální oblasti však není pravidlem. Velmi záleží na tloušťce materiálu, fyzikálních vlastnostem materiálu a technologii obrábění. Může se stát, že paprsek vystoupí z materiálu s dostatečnou energií a vytvoří tak pouze primární a sekundární oblasti. [1,2,3].



Obr. 1 Ukázka heterogenního povrchu

Na obrázku 1 vidíme přibližné rozdělení oblastí na ocelovém vzorku, který byl řezán vláknovým laserem.

Pro srovnání můžeme na obrázku 2 vidět povrch materiálu řezaného abrazivním vodním paprskem. Ze začátku je povrch hladký po celé ploše. To protože má paprsek pomalý posuv a má dost času se prořezat plnou energií skrz celý materiál. Jak posuv zrychluje, energie není dostatek a už u 40 % posuvu vidíme výskyt sekundární oblasti. Od 80% po 105 % se začíná objevovat i terciální oblast.



Obr. 2 Dřsnost povrchu s ohledem na rychlost řezu vodním paprskem [4]

1.2 Popis vzniku heterogenního povrchu

Jak bylo výše zmíněno, vznik heterogenních povrchů je úzce spjat s nekonvenčními technologiemi obrábění. Ať jde o vodní, laserový či plazmový paprsek, všechny tyto technologie tvoří heterogenní povrch řezu. Jde o charakteristický povrch po obrábění soustředěným paprskem určitého druhu energie. Pro každou technologii sice specifický, ale princip vzniku je stejný. [1, 5]

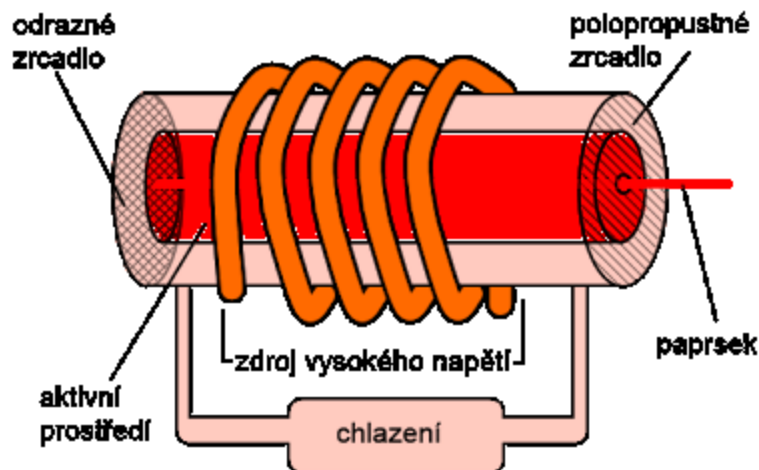
Při vstupu do materiálu paprsek nese největší kinetickou energii a tedy nejlepší řezné vlastnosti. Jak paprsek pokračuje, odevzdává energii, aby se mohl prořezat hlouběji. Tím se jeho schopnost řezat materiál čistě zhoršuje. Pravidelná struktura řezu se zhoršuje a dochází k pozvolnému úpadku kvality řezu. To má za následek vytvoření nestejně (heterogenní) drsnosti na ploše řezu za stálých řezných podmínek.

U vzniku heterogenního povrchu velmi záleží na energetické síle stroje a materiálových parametrech ovlivňující řez. Pokud se například jedná o tenký materiál, pak nemusí heterogenní povrch vzniknout. Čím je však tloušťka materiálu větší, tím je pro paprsek obtížnější prořezat ho při zachování dostatečné energie pro čistý řez.

Existuje několik typů nekonvenčních technologií, které vytvářejí heterogenní povrch. V této práci se zaměříme na laser z důvodu použití této technologie v praktické části. [1, 5, 6]

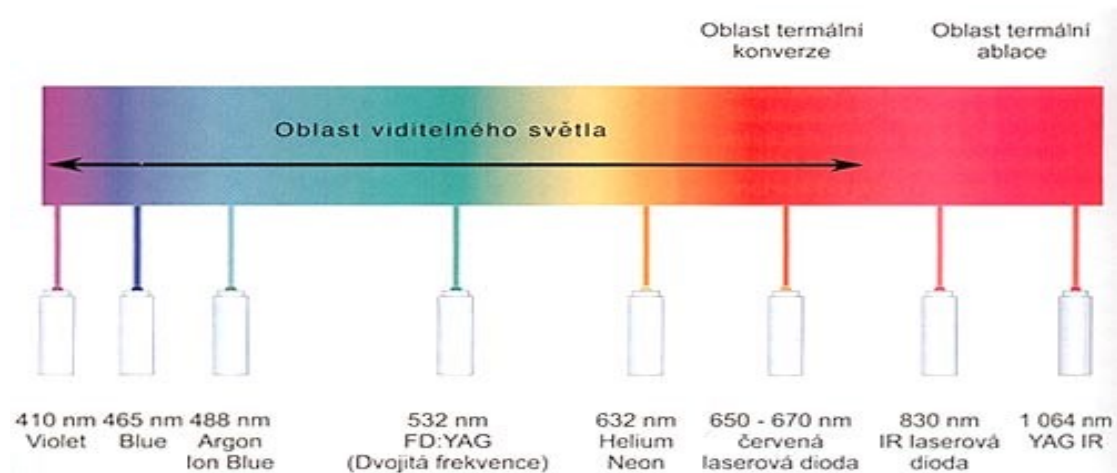
1.3 Princip, rozdělení a použití laseru

Princip funkce laseru lze objasnit na základě pojmů kvantové fyziky a planetárního modelu atomu. Samotný název LASER je zkratkou samotné podstaty vytvoření laserového paprsku: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (zesilování světla stimulovanou emisí záření). Zesílení emisí záření poskytuje v úzkém svazku lavinu fotonů. Běžné světelné záření je vlnění, které se šíří všemi směry. Laserové světlo vzniká v prostředí určitého stimulujícího elektromagnetického záření potlačením spontánní emise. Jde tedy o stimulovanou emisí – soustředění do úzkého svazku paprsků. Laserový paprsek je monochromatický, koherentní, polarizovaný a s nepatrnou divergencí. [1, 5, 6, 7]



Obr. 3 Schéma konstrukce laseru [8]

Zde je důležitý poznatek, že podle energie fotonů buď paprsek vidíme, nebo ne (je v jiném pásmu, infračervené, ultrafialové apod.). Jdeme-li do důsledku, pak závisí i barva paprsku na vlnové délce. Paradoxně nejmenší výkon a tedy nejbliže k infračervené oblasti má barva paprsku červená, která má největší vlnovou délku. Největší výkon má fialová (nejbliže ultrafialovému záření), která má nejnižší vlnovou délku.

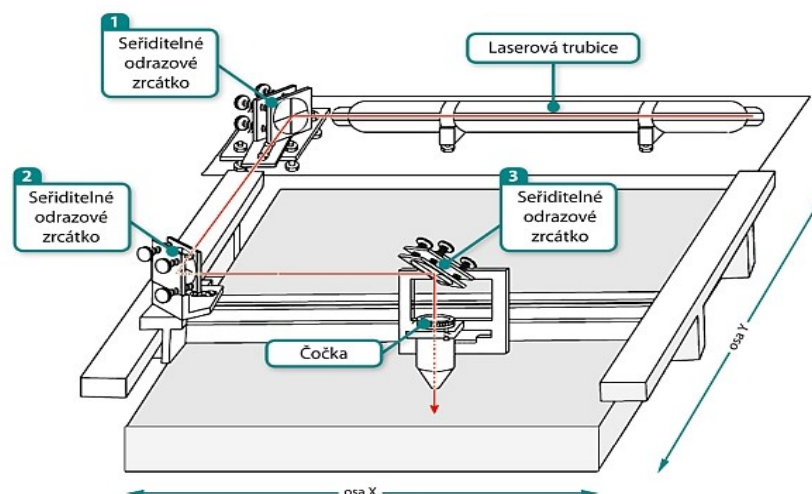


Obr. 4 Závislost vlnové délky na typu laseru [8]

V dnešní době máme v oblasti laserů velké možnosti. K tvorbě laserového paprsku lze použít velkého množství zdrojů záření a stejně tak aktivních prostředí. V této práci se zaměříme na dva, pro nás důležité typy, a to CO₂ a vláknové lasery.

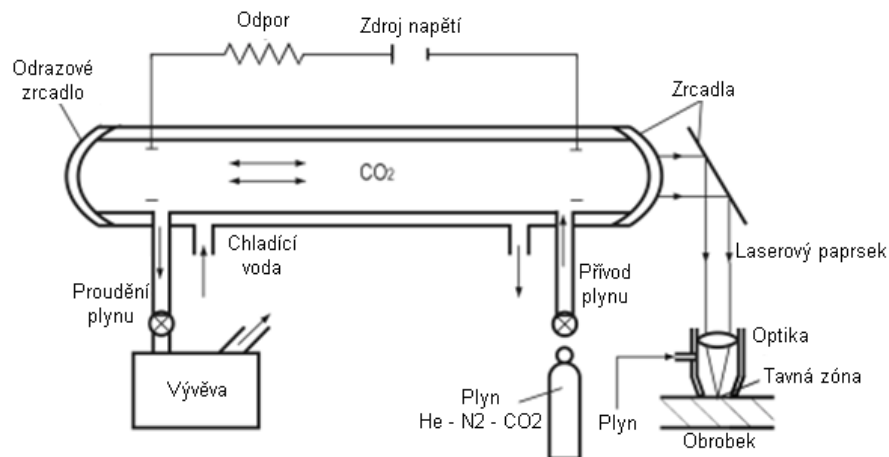
1.3.1 CO₂ lasery

CO₂ laser na vznik stimulované emise záření využívá kvantovo – energetické přechody související s oscilací molekul CO₂ a dusíku (N₂). Hlavní částí CO₂ je laserová trubice, ve které se nachází směs plynů CO₂, N₂ a He. Energie potřebná na excitaci je vytvářena ve formě tlejivého výboje mezi elektrodami, na které se přivádí vysoké napětí z generátoru vysokého napětí. Teplota v dutině nesmí přesáhnout 400°K. Vznikající teplo mezi elektrodami se musí odvádět, a tedy chladit. Do výkonu 55 W je chlazení většinou vzduchem, ale výkony nad 100 W už mají chlazení vodou. [1, 5]

Obr. 5 Schéma CO₂ laserové sestavy [9]

Nejčastější technické řešení CO₂ laserů vidíme na obrázku 5. Z laserové trubice vedeme paprsek soustavou zrcátek k pohyblivé, číslicově řízené hlavě s čočkou. Ta se pohybuje ve třech osách a provádí řezný pohyb.

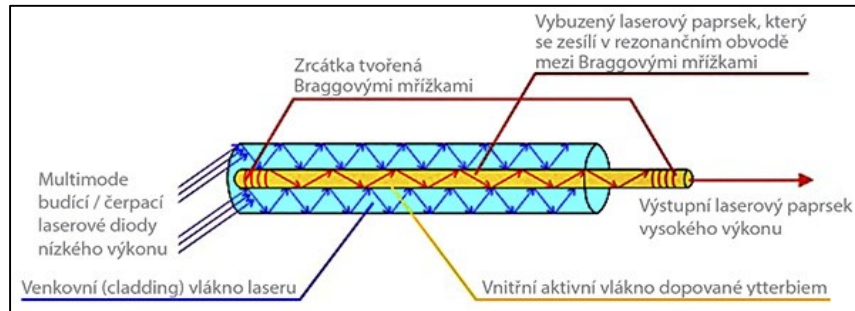
Principem vzniku laserového paprsku je dostat elektron z jedné valenční vrstvy 1 na vyšší 3. Tím získá energii a sám nechce zůstat na této úrovni, držíme ho zde buzením plynu. Následně při klesání z vyšší valenční vrstvy 3 do vrstvy 2 se vyzařuje energie ve formě fotonu. To je laserový paprsek. Fotony se řadí k sobě a my chceme zcela řízenou kontrolu nad emisí fotonů, abychom mohli ovládat laser. Následně fotony směřujeme v rezonanční dutině mezi dvěma zrcadly tak, aby se energie koncentrovala a stala se koherentní. V rezonančním obvodu se zesílí tok fotonů a překoná polopropustné zrcadlo (odrazivost okolo 99,9%). Koherentní paprsek má minimální rozbíhavost. Tato koherence má velmi velkou energii, kterou lze pomocí optiky vhodně koncentrovat do malého bodu, což se pak nazývá spot laseru. V něm se koncentruje energie, kterou využíváme k obrábění. [1, 5, 7]



Obr. 6 Schéma vzniku CO₂ laserového paprsku

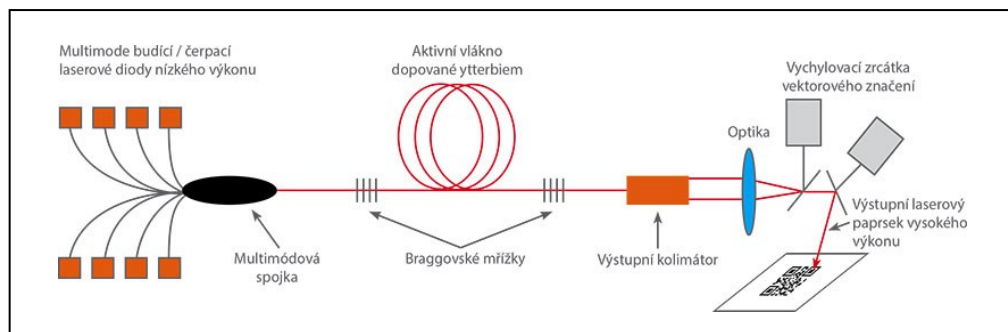
1.3.2 Vláknové lasery

Jedná se vlastně o spojení laseru s optickými vlákny. Ke generování záření dochází v jádru optického vlákna. Takový laser produkuje velmi intenzivní a kvalitní svazek záření. Jejich významnou předností je účinnost. Ta dosahuje hodnot až 50 %. Další velkou předností je právě využití optického vlákna, které slouží ke konverzi nekvalitního rozbíhavého světla do jednoho silného laserového svazku. Na obrázku 7 můžeme vidět proces vzniku laserového paprsku v optickém vláknu. Zároveň můžeme pozorovat velký poměr plochy pláště vůči celkovému objemu. Díky tomu lze tento typ laseru velmi účinně chladit. U jiných typech laseru se převážně chladí vodou. U vláknového ve většině případů stačí vzduch. [10].



Obr. 7 Princip čerpání aktivního vlákna přes plášť [11]

Průřez středního vlákna je různý. Většinou se jedná o čtvercový nebo obdélníkový. Daným průřezem dává vlastní specifikaci laserovému paprsku i vlastní individuální užití. Jde o princip blízký pevnolátkovým laserům. Tedy optické vlákno zastává funkci krystalu. Vytváří v něm laserový paprsek a optické vlákno funguje jako optický zesilovač. Budící diody svítí do velkého optického vlákna a světelný tok působí na vlákno, které je umístěné uvnitř tohoto velkého vlákna. Vnitřní vlákno obsahuje aktivní prvek, a tím je ytterbium. Více diod dokáže pumpovat v optickém vlákne vysokou energii s perfektní kvalitou paprsku. Další velmi důležitý princip pro získání laserového paprsku je vysoce výkonný optický zesilovač. Optický zesilovač konvertuje malý světelný signál z budících diod do výkonného paprsku, často tisíckrát silnější, ale identický jako originál. Zvětšení výkonu se dosáhne použitím také více laserových diod. Aktivní vlákno může jen podporovat přenos laseru, proto kvalita paprsku není závislá na pracovním výkonu laseru. [10, 11, 12]



Obr. 8 Schéma vláknového laseru [11]

Fyzikální limit výstupního výkonu z jediného vláknového laserového systému je odhadnut na cca 10–20 kW. Výkonová konverzní účinnost ytterbiových vláknových laserů je velmi vysoká, vyšší než 80 %, takže např. při čerpání 1 kW je ztrátové teplo jen 200 W a je možné odvést ho vzhledem k velké délce a malému průměru aktivního prostředí (vláken) klasickým chlazením vodou. [10, 11, 12]

1.4 Vznik řezné plochy se zřetelem na obrábění laserovým svazkem

Po dopadu paprsku na materiál se část paprsku odrazí, část se absorbuje do materiálu a část projde materiálem. Absorbované paprsky ohřívají materiál, který se ohřevem nataví a následně odpaří z ohřáté oblasti. Množství odražených paprsků závisí na vlastnostech materiálů a jejich schopnosti pohlcovat a odrážet laserové záření. [1, 5, 13]

Důležité faktory pro použití laserového paprsku:

- reflektivita - odrazivost povrchu
- absorpce - pohlcování laserového záření
- tepelná vodivost
- tavení povrchové vrstvy
- odpařování

Proces ablace neboli odstraňování materiálu je složitá kombinace procesu fotochemického a fototermického. Při dopadu záření dochází jednak k porušení chemických vazeb absorpcí kvant energie a jednak porušením vazeb termicky - zvýšením teploty. CO₂ laser, který emituje tepelné záření o vlnové délce 10 600 nm, způsobuje zejména fototermickou ablaci. Rozměry a tvary jakékoliv laserem obrobene struktury závisí na optice a mechanice laserového zařízení a také na vlastnostech obráběného polymeru. Nejdůležitějšími parametry jsou f-číslo (poměr hloubky ohniska a ohniskové vzdálenosti f-theta objektivu) a vlnová délka laseru. Čím je vlnová délka laseru nižší a čím má obráběný polymer nižší tepelnou vodivost, tím lépe je obráběn. Pro konkrétní aplikace jsou pak důležité parametry jako výkon laseru, posuv a počet přejezdů paprsku ve stejné drážce. [1, 5, 13]



Obr. 9 Schéma principu úběru materiálu laserem [14]

2 ZPŮSOB SNÍMÁNÍ HETEROGENNÍCH POVRCHŮ

Topografie povrchu po řezání nekonvenčními vysokoenergetickými technikami je málo prozkoumaná [1]. Proto se systém jejich hodnocení žádným výrazným způsobem neposunul. Zato obecné měření jakosti povrchů se posouvá takřka každým dnem.

2.1 Měření jakosti povrchů

Dnešní doba nabízí nepřehledné množství přístrojů pro měření drsnosti povrchu. Tyto přístroje se dělí do dvou hlavních skupin: na kontaktní a bezkontaktní.

2.1.1 Kontaktní měření povrchů

Kontaktním měřením je myšleno snímání povrchu speciálním hrotem, který se snaží kopírovat snímaný povrch. Přejížděním po měřeném povrchu snímá přístroj souřadnice drsnosti povrchu. Následně je počítač zpracuje a my s nimi dále pracujeme. I přes stáří této metody se jedná o stále hojně využívanou metodu pro její jednoduchost. Kontaktní přístroj se skládá z části mechanické a elektronické. Příklad takového přístroje vidíme na obrázku 10.

Pomineme-li stůl a přípravky na ustavení, pak se mechanická část skládá ze dvou hlavních částí. Snímací hrot zajišťuje co nejpřesnější kontakt s povrchem. Zároveň musí zajišťovat jednoduchý pohyb po povrchu, aby jej nejlépe vůbec nepoškodil. Druhou částí je mechanismus zajišťující pohyb. Zahrnuje rameno, na kterém je snímací hrot a motor zajišťující rovnoměrný pohyb hrotu. Musí zajistit přesný pohyb co do přímosti i rovnoměrnosti. Elektronická část zajišťuje vyhodnocení a transformaci mechanického pohybu na požadovaná data. Mechanický pohyb se mění na elektrický signál, který je zpracován na číselnou hodnotu. [15]



Obr. 10 Příklad kontaktního drsnoměru

Správnost výsledku měření ovlivňuje:

- a) poloměr zaoblení snímacího hrotu (2 μm , 5 μm , 10 μm)
- b) vrcholový úhel snímacího hrotu (600, 900)
- c) měřicí (přítlačná) síla (cca 0,00075 N)
- d) rychlost změny měřicí síly

Kontaktní měřicí přístroje mají ve strojírenství podstatnou výhodu ve větší toleranci vůči nečistotám. Hrot může pohnout s drobnou nečistotou a nezkreslí měření. Také mu nevadí jemné olejové vrstvy. [15, 16]

2.1.2 Bezkontaktní měření povrchů

Jejich nejčastější využití se nachází ve vědecké činnosti. Nejčastěji se využívá snímačů CLA (Chromatic Length Aberration) a snímačů laserových. Rozlišitelnost snímačů CLA je v μm , laserových snímačů je přibližně o řád nižší.

Princip CLA snímače: bílé světlo je rozkládáno a optikou je směřováno na kontrolovaný povrch. Optika rozloží světlo podle vlnových délek a v každém bodě povrchu je zaostřena jen určitá vlnová délka. Světlo odražené z povrchu prochází otvorem, který propustí jen světlo zaostřené vlnové délky. Spektrometr vychýlí světlo na maticový senzor, kde je každému bodu připravena prostorová poloha, která je následně počítačově zpracována a vyhodnocena. Místo snímačů CLA můžeme použít laserové, ale ty nejsou tak prostorově přesné. Nasnímané prostorové polohy jsou potom zpracovány speciálními softwary, které umožní 3D zpracování dat, včetně 3D vizualizace. [16, 17, 18]

Výraznou předností u těchto přístrojů je daleko přesnější měření. Dále pak vyloučena destrukce povrchu, rychlost měření, velikost oblasti měřené najednou apod.

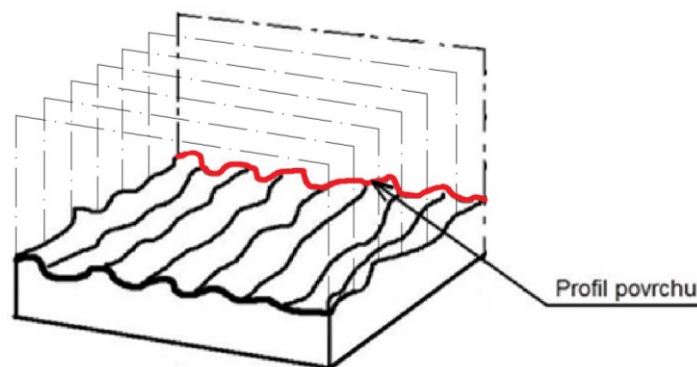
Na druhou stranu jsou zde i výrazné nevýhody. Těmi jsou zejména vysoká pořizovací cena stroje a softwaru. Zároveň možnost ztráty dat kvůli špatnému odrazu paprsku od vzorku. Je to převážně v místech profilu s náhlou změnou nebo je odrazivost velmi vysoká, či naopak.

Pro pevné materiály jakými jsou keramika, polymery, dřevo, zuby, kosti, vlákna a jiné se využívá speciální metoda, a to tzv. „Konfokální laserová rastrovací mikroskopie (CLSM).“ Je to optická kombinovaná zobrazovací technika, která díky vynikajícímu rozlišení, výbornému kontrastu a velkému rozsahu zvětšení přemostuje prostor mezi optickou a elektronovou rastrovací mikroskopií bez nutnosti speciální úpravy vzorku. [16, 17, 18]

2.2 2D bezkontaktní způsob snímání povrchů

V praktické části používáme k hodnocení drsnosti povrchů pouze bezkontaktní přístroj. Konkrétně Taylor Hobson CLI 500. Taylor Hobson CLI 500 využíváme pro nasnímání povrchu ve 2D.

Princip 2D snímání povrchu se dá zjednodušeně popsat, jako rozdělení zkoumané plochy na čáry v jednom směru. Obrázek 11 schematicky ukazuje tento princip. Čerchované čáry vykreslují dráhy jednotlivých přejezdů přístroje. Horní vodorovná čára reprezentuje dráhu přístroje, svislé pak zlepšují představu o místě začátku a konce měření. Získáme křivku drsnosti povrchu, kterou můžeme dále vyhodnocovat dle možností softwaru. Moderní přístroje mají dále možnost z jednotlivých naměřených křivek profilu seskládat přibližný 3D obraz povrchu. Čím větší počet nasnímaných čar, tím více se blíží naměřený profil reálnému.



Obr. 11 Dráhy 2D skenování

2.2.1 Taylor Hobson CLI 500

Výrobce měřicí techniky s dlouholetou tradicí Taylor Hobson Ltd. se soustřeďuje nejen na přípravu vysoce kvalitních systémů a přístrojů na měření textury i tvaru povrchu, ale současně je aktivně zapojen do přípravy i normalizace metodik měření, zpracování výsledků a jejich vyhodnocení formou parametrů. Zvláštní pozornost věnuje i konkrétnímu využití kontrolních postupů a získaných výsledků pro posuzování funkčních vlastností povrchu.

[19]



Obr. 12 Taylor Hobson CLI 500

Náš přístroj pracuje se systémem CLI, který nabízí možnosti měření a analýzy povrchu ve třech osách. Analýzu mohou provádět z jednoho profilu řezu (2D) i profilu plochy (3D). Bezdotykový způsob měření probíhá za pomoci laserové triangulační sondy a CLA konfokálního snímače (Chromatic Length Aberration – CLA). Navíc je systém CLI vybaven automatickým posuvem ve všech osách (X, Y, Z), s rychlostí až do 30 mm/s.

Jak je již zmíněno, Talysurf CLI 500 může kombinovat tradiční 2D a prostorové 3D hodnocení, a tím lze jedním přístrojem monitorovat výzkum a vývoj, provádět analýzy apod.

Základem programového vybavení přístrojů Talysurf CLI je firemní program Talymap, který zabezpečuje veškeré řídicí, kontrolní, vyhodnocovací i informační služby.

Talysurf CLI 500 má měřicí prostor 50x50x50 mm; délka posuvu 50 mm. Je určen především pro měření malých součástí. [19]

2.2.2 3D snímání

Princip 3D snímání je zjednodušeně zachycení odraženého světla z definované plochy, kterou dokáže přístroj zachytit. Tyto systémy přinášejí předně velké zrychlení snímání. U 2D systémů na jeden měřicí cyklus získáme pouze přímkou z povrchu. U 3D systémů získáme rovnou plochu o velikosti, kterou je přístroj schopný naměřit. Díky moderní technologii se u 3D systémů v dnešní době dosahuje takové přesnosti snímání, že se naměřený povrch od skutečného liší pouze minimálně.

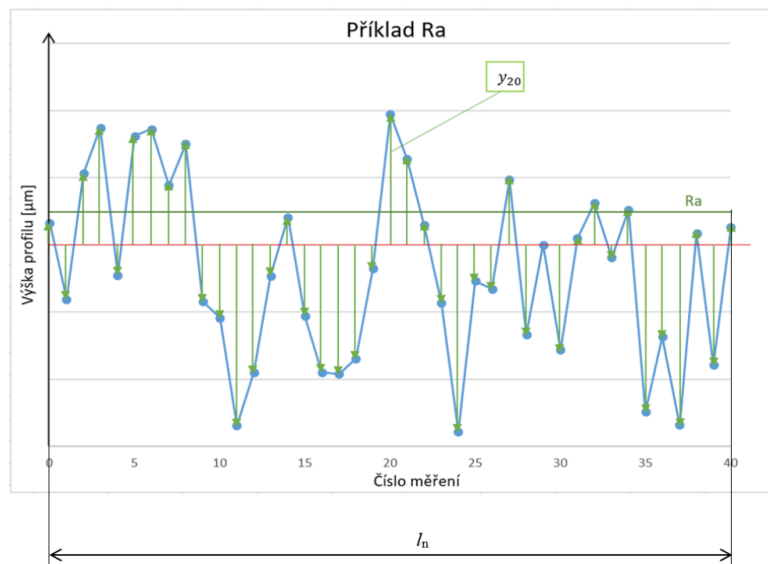
2.2.3 Popis parametrů pro hodnocení drsnosti povrchu za pomoci 2D snímání

Parametrů popisujících hodnocení drsností je celá řada. V naší práci jsme vybrali tři parametry, které by se pro naše účely nejlépe hodily. Jsou to Ra, Rz a Rmr parametry.

Parametr Ra:

- aritmetický průměr absolutních hodnot y_i skutečného profilu v rozsahu celkové hodnocené délky l_n
- obecný vzorec:

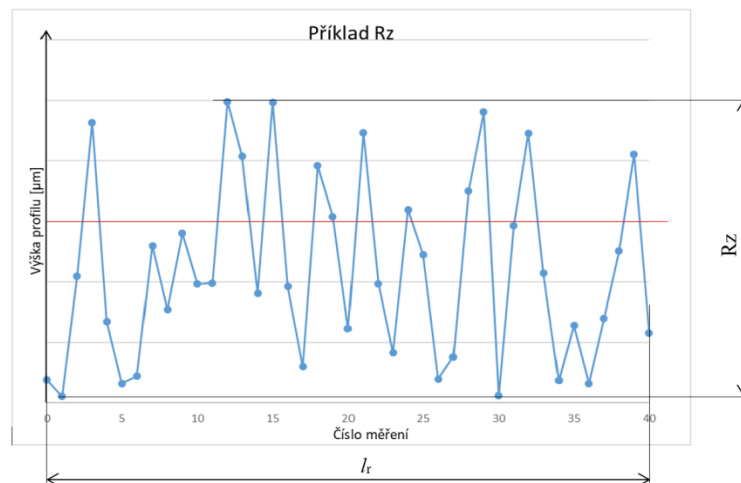
$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad [1]$$



Obr. 13 Zobrazení hodnoty Ra

Parametr Rz:

- součet nejvyššího výstupku a nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky l_r

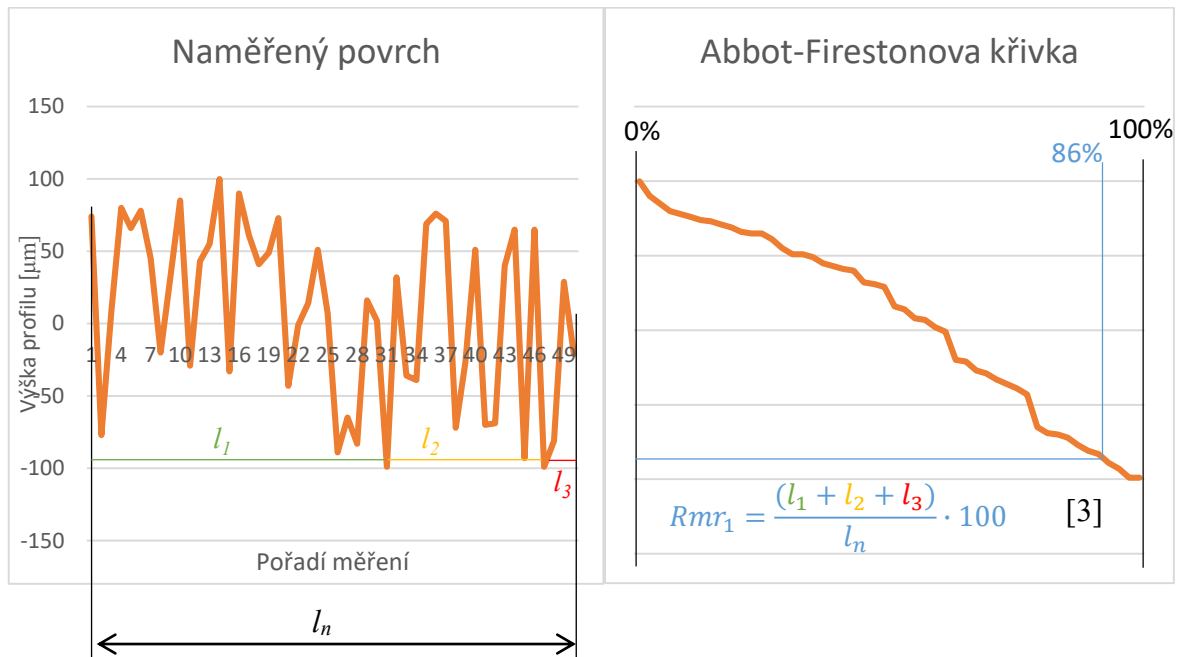


Obr. 14 Zobrazení hodnoty Rz

Parametr Rmr:

- udává poměr délky vyplněné materiálem k hodnocené délce v určité (i) hloubce řezu v [%]
- obecný vzorec:

$$Rmr(i) = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{l_n} \cdot 100 \text{ [%]} \quad [2]$$



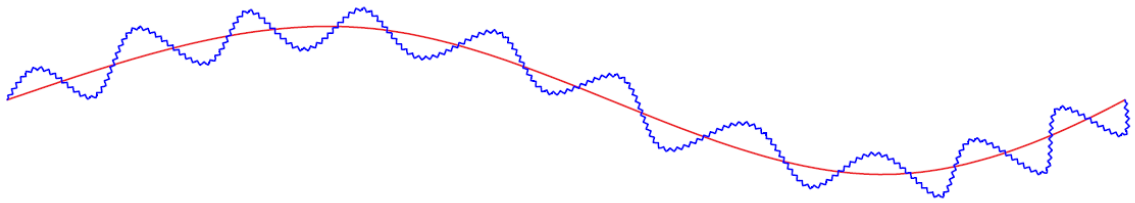
Obr. 15 Zobrazení hodnoty Rmr

2.3 Rozdělení struktury drsnosti

Při obrábění působí různé vlivy, které ovlivňují kvalitu obrábění, a tím vzniká drsnost povrchu. Různé vlivy však mají odlišný dopad na povrch. Některé způsobují změny velkého rázu, jiné na úrovni mikrometrů. Vlivy působící velké změny na povrchu jsou pro vyhodnocování drsnosti povrchu nežádoucí a musí být filtrovány.

Podle velikosti rozteče nerovností se struktura rozděluje na:

1. Základní profil (tvar)
 - největší rozteč
 - může být způsobena nedostatečnou tuhostí, špatnou přímostí vodících ploch apod.
 - filtrace metodou nejmenších čtverců

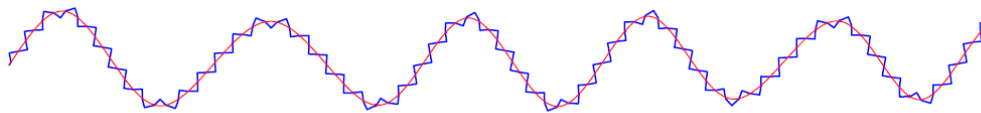


Obr. 16 Profil – červená tvarová nerovnost

Červená čára na obrázku 16 reprezentuje samotnou tvarovou nerovnost. Modrá čára reprezentuje obrobený povrch. [15]

2. Vlnitost povrchu

- střední rozteč
- spíše považována za vliv stroje jako např. nevyváženost brousícího kotouče
- může být způsobeno chvěním, či deformací obrobku
- filtrace pomocí Gaussova filtru



Obr. 17 Profil - červená vlnitost

Profil na obrázku 17 je očištěn o tvarovou nepřesnost. Zobrazuje pouze vlnitost zvýrazněnou červenou čarou a drsnost, která je nesena na modré čáře. [15]

3. Drsnost povrchu

- nejmenší rozteč
- způsobeny výsledky výrobního procesu (relativní vzájemný pohyb mezi nástrojem a obrobkem), dále pak mechanismem tvorby třísky



Obr. 18 Příklad drsnosti povrchu

Po filtraci tvarové nerovnosti a vlnitosti nám zůstane pouze čistá drsnost povrchu, kterou můžeme dále statisticky vyhodnocovat. [15]

3 MATEMATICKÉ METODY HODNOCENÍ HETEROGENNÍCH POVRCHŮ

Neexistuje žádná specifická metoda určená pouze pro hodnocení heterogenních povrchů. Dnes se hodnocení takového povrchu provádí výpočtem průměrné hodnoty ze tří míst plochy. Dalo by se říci, že se odhadem určí primární, sekundární a terciální oblast. Z každé se naměří parametry drsnosti. Ty se následně zprůměrují. Vypovídající hodnota o drsnosti povrchu je mizerná, jelikož se nejlepší a nejhorší povrch může lišit i o desítky mikrometrů. Předpokládám, že pro praxi je tato metoda dostatečná, protože se za roky používání nekonvenčních technologií nezměnila. Pro laboratorní podmínky je však nevhodná. [2, 21]

3.1 Statistické metody

Pro hodnocení heterogenních povrchů budeme využívat klasické statistické metody se zřetelem na specifický heterogenní povrch.

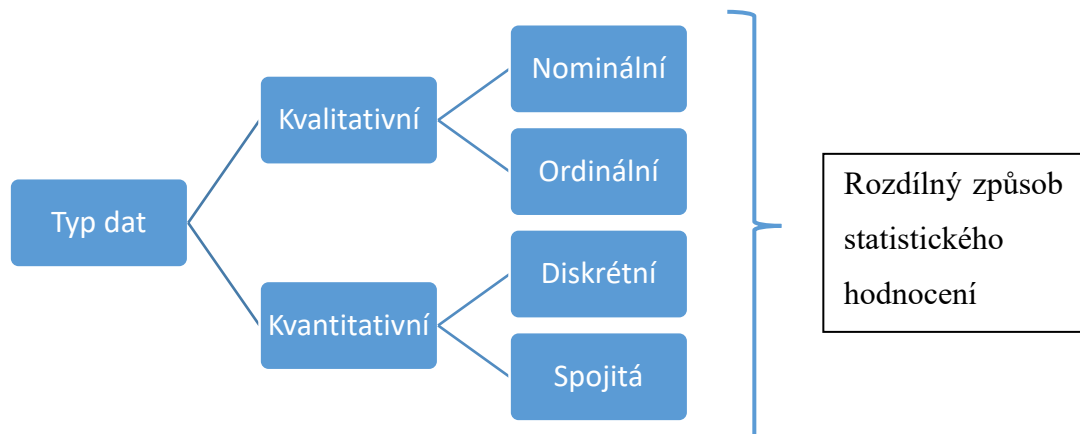
3.1.1 EDA

Zkratka označuje exploratorní (průzkumovou) datovou analýzu. Průzkum naměřených dat a odhad chování celku. Jde o skupinu metod vyšetření dat. Výsledkem je bližší pochopení zkoumaných dat a případnému označení vzdálených hodnot poukazujících na chyby měření. [15]

Dělí se obecně na tři kroky:

- 1 – Kvalita dat
- 2 – Grafické zobrazení a zhodnocení dat
- 3 – Volba vhodných metod hodnocení

3.1.2 Kvalita dat



3.1.2.1 Kvalitativní data

Anglicky Qualitative. Jde o nečíselná data. Popisují zejména slovně například chuť, či krásu. Někdy se pro taková data používá pojem měkká, protože popisují kvalitu věcí a jevů. [15]

3.1.2.1.1 Nominální

Také se jim říká klasifikační data. U takových platí, že dvě hodnoty jsou různé. Jde tedy například o barvy, krevní skupinu, pohlaví apod. Tato data umožňují pouze třídění. Nelze je porovnávat, ani s nimi provádět matematické operace.

Z hlediska statistiky lze u nominálních dat počítat například četnost, modus, výpočet procent atd. [15]

3.1.2.1.2 Ordinální

Tyto data popisují pořadí. Podobají se nominálním ve výběru nějakého počtu možností. Lze u nich zavést uspořádání, pořadí, lze určit, která hodnota je lepší, horší, větší, menší. Na druhou stranu nenesou informaci o „vzdálenostech“ mezi hodnotami. Tedy nenesou hodnoty o rozdílech mezi nimi. Nelze s nimi provádět matematické operace.

Praktické použití ordinálních dat: Třídění dat a údajů a označování kritérií pro třídění atd. Tedy všude, kde se mohou vyjadřovat pořadí podle daného kritéria. (například setřídění pracovníků dle stupňů vzdělání).

Z hlediska statistiky lze u nominálních dat počítat například: medián, kvartilová odchylka, aritmetický průměr, směrodatná odchylka atd. [15]

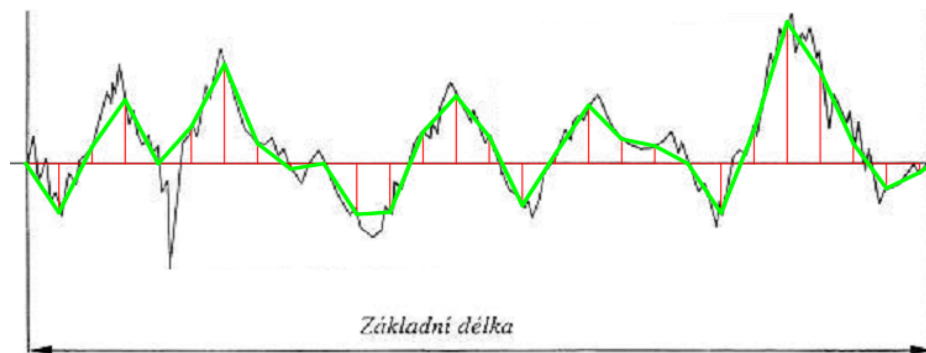
3.1.2.2 Kvantitativní data

Tato data jsou číselné popisy, kterými definujeme nebo měříme věci či jevy jako například cenu, rozměry, váhu aj. Pro tato data se objevuje označení tvrdá data. [15]

3.1.2.2.1 Diskrétní a spojitá data

Náhodné veličiny dělíme dle množiny hodnot, kterých mohou nabývat, na spojitě a diskrétní. Diskrétní náhodná veličina (*discrete random variable*) může nabýt nejvýše spočetně mnoha hodnot (představovaných izolovanými body na reálné ose), zatímco spojitá náhodná veličina (*continuous random variable*) může nabýt všech hodnot v určitém intervalu (tedy může nabýt nespočetně mnoha hodnot). [15]

Dá se tvrdit, že diskrétní data jsou nepřesným, ale změřitelným vykreslením dat spojitých. Podle množství bodů diskrétních se odvíjí přesnost zachycení skutečného chování dat spojitých. Pokud chceme například změřit tvar drsnosti povrchu, musíme převést skutečnou křivku drsnosti na množství bodů, abychom mohli určit jejich hodnoty. Na obrázku 19 vidíme příklad porovnání spojitých a diskrétních hodnot. Černá křivka reprezentuje skutečnou drsnost naměřeného povrchu. Červené rozdělují křivku na stejné úseky, které přístroj snímá. Zelená čára vykresluje spojení bodů vzniklých z průniku černé a červených čar, které vyhodnotí přístroj jako naměřenou drsnost. Čím větší je hustota bodů, tím blíže jsme reálné křivce. To sebou nese i negativa. Větší počet bodů je náročnější na čas či peníze. [22]



Obr. 19 Černá čára = spojitá; Zelená čára = diskrétní

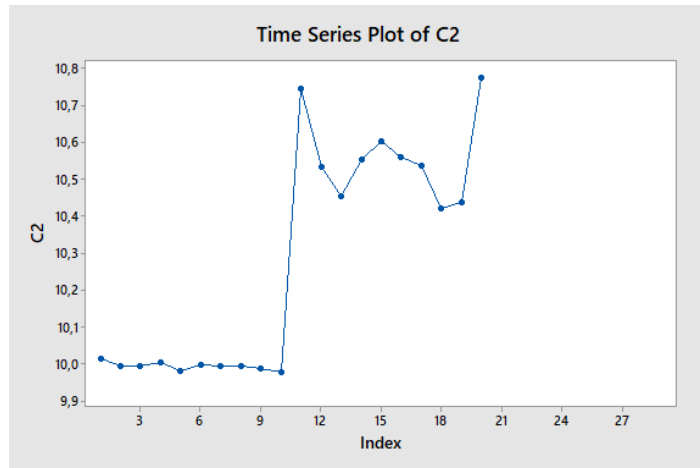
3.1.3 Grafické zobrazení a zhodnocení dat

Existuje mnoho grafických vykreslení dat. Pro postup EDA jsou preferovány určité typy grafů, které nejvíce vypovídají o vlastnostech dat. Jsou to:

- Diagram časové posloupnosti
- Histogram
- Rozptylový diagram (Box plot a Scatter plot)

3.1.3.1 Diagram časové posloupnosti (*Time series plot*)

Jedná se o zobrazení dat v závislosti na jejich pořadí měření. Může nám ukázat, zda data mají očekávaný průběh měření. Pokud například zobrazíme diagram časové posloupnosti kontroly dílů u výroby ranní a noční směny, můžeme pozorovat nárůst zmetkovitosti u noční směny výkyvem.

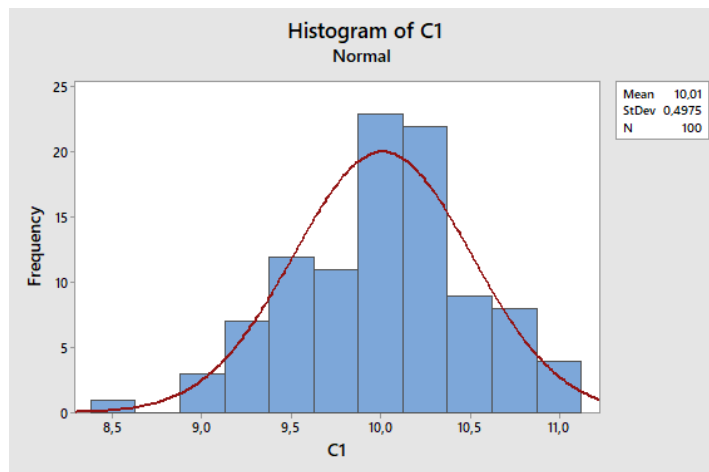


Obr. 20 Graf časové posloupnosti

Obrázek 20 je pouze příklad grafu časové řady. Hodnoty C2 nevychází z reálného měření.

3.1.3.2 Histogram

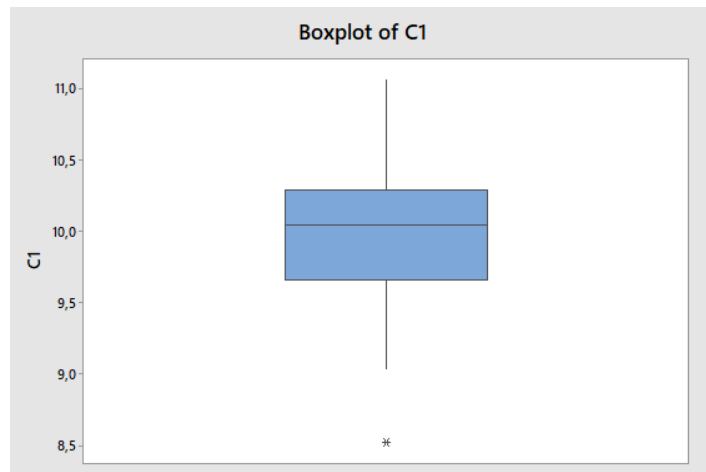
Histogram představuje grafické znázornění intervalového rozdělení četnosti. Má-li soubor dat normální rozdělení, pak by na něj měla působit pouze náhodná chyba. V takovém případě bude mít histogram zvonovitý tvar. Pokud je histogram odchýlen od tohoto tvaru, pravděpodobně na data působí identifikovatelné vlivy.



Obr. 21 Histogram normálního rozdělení

3.1.3.3 Rozptylový diagram (Box plot a Scatter plot)

Box plot neboli krabicový graf je jednou z grafických metod používaných ve statistice, která umožňuje posouzení dat pomocí kvartilů.



Obr. 22 Box plot

Kvantily jsou hodnoty, které rozdělují uspořádaný soubor hodnot na určitý počet stejně obsazených částí. Obecně x_p , kde „p“ je procentní kvantil. [15, 22]

Nejpoužívanější kvantily jsou kvartily. Jsou to hodnoty, které dělí soubor na čtyři části, z nichž každá obsahuje 25% jednotek, a značíme je následujícím způsobem:

- x_{25} = dolní kvartil
- x_{50} = druhý kvartil nazývaný též Medián a běžně se také značí jako x s vlnkou
- x_{75} = horní kvartil

Ve statistických programech se tyto kvartily často označují jako Q_{25} , Q_{50} a Q_{75} nebo Q_1 , Q_2 a Q_3 . [15, 22]

Box-plot nám u souboru dat umožňuje:

- a) identifikovat odlehlé hodnoty (outliers)
- b) posoudit symetrie u konců rozdělení
- c) porovnat rozptyl u dvou a více souborů hodnot a případně posoudit způsobnost procesů.

3.1.4 Volba vhodných metod hodnocení

Volba vhodných metod následuje po „vyčištění“ dat. Vybereme vhodné parametry, které nám pomohou k hodnocení. Tyto parametry jsou výsledkem našeho zkoumání dat a vypovídají o jejich vlastnostech. Jednotlivé parametry jsou:

- Počet parametrů

$$N = \sum_{i=1}^N n_i$$

[4]

- Aritmetický průměr

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad [5]$$

- Medián

$$\tilde{x} = \frac{N}{2} \quad [6]$$

Pokud se jedná o lichý počet parametrů, pak jsou mediánem dvě hodnoty, které jsou nejbližší hodnoty vypočtené.

- Modus

Hodnota znaku s největší relativní četností

- Standartní odchylka

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad [7]$$

- Směrodatná odchylka rozptylu

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad [8]$$

- Variační koeficient

$$v_x = \frac{s_x}{\bar{x}} \quad [9]$$

Je charakteristikou variability rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny.

- Minimum

Minimální hodnota ze souboru hodnot.

Může jich být více, pokud mají stejnou hodnotu.

- Maximum

Maximální hodnota ze souboru hodnot.

Může jich být více, pokud mají stejnou hodnotu.

- Kvantily

Je míra polohy rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny.

3.1.5 Shluková analýza

Shluková analýza určuje shluky hodnot ve vícerozměrném prostoru. Následně redukuje vícedimenzionální problém kategorizací hodnot do nalezených shluků. Existuje spousta metod shlukování, které se liší:

- Měřením vzdálenosti mezi objekty
- Algoritmem spojování objektů do shluků
- Interpretací výstupů

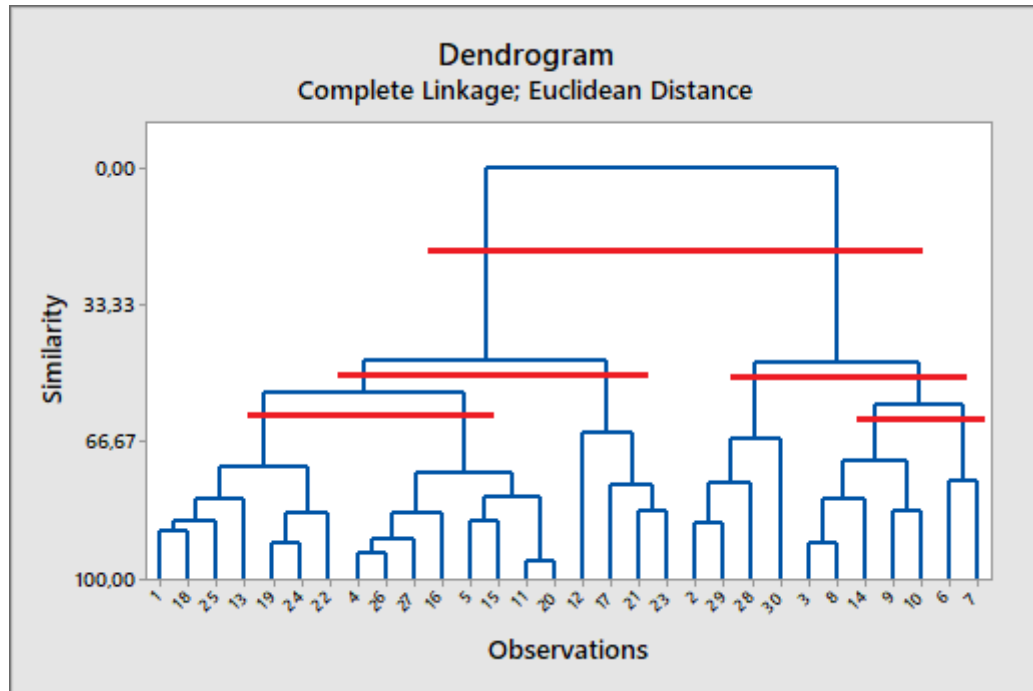
Každá z metod má své vlastní předpoklady výpočtu a je použitelná pro různé typy úloh. Použití chybné metody může vést k zavádějícím výsledkům. [23]

Vzájemnou pozici objektů ve vícerozměrném prostoru lze popsat jejich vzdáleností. Dle vzdálenosti objektů je můžeme slučovat do shluků a přiřazení objektů ke shlukům ve vícerozměrném prostoru následně využít pro zjednodušení jejich x- dimenzionálního popisu. Smysluplnost výsledků shlukování závisí jednak na objektivní existenci shluků v datech, jednak na arbitrárně nastavených kritériích definice shluků. [23]

Hlavními cíli jsou zjistit vazby mezi objekty nebo identifikovat v datech shluky. Dosáhne-li zjištění vazby, výstupem je dendrogram. Pokud identifikujeme shluky, můžeme s nimi dále využívat pro analýzu při zjednodušování vícedimenzionálního problému.

Identifikace shluků ve výsledcích shlukové analýzy:

- Expertní/intuitivní
- hranice oddělení shluků je určena podle zkušeností analytika a praktického významu výstupu
- Matematické metody (analýza mezishlukových/vnitroshlukových vzdáleností; silhouette metoda aj.) fungují dobře v případě existence přirozených shluků
- V některých případech (při neexistenci přirozených shluků) je rozdělení souboru pouze arbitrární



Obr. 23 Dendrogram – řez na více vzdálenostech

Na obrázku 23 pozorujeme příklad dendrogramu z programu Minitab. Červené čáry jsou přidány pro zdůraznění počtu významných shluků.

3.1.6 Diskriminační analýza

Diskriminační analýza patří mezi metody zkoumání závislosti mezi skupinou p nezávisle proměnných, nazvaných diskriminátory, tj. sloupců zdrojové matice na jedné straně a jednou kvalitativní závisle proměnnou na druhé straně. Umožňuje zařazení objektu do jedné z již existujících tříd. Ve vstupních datech jsou svými hodnotami diskriminátorů u všech objektů dány zařazené objekty do primárních tříd. Dále jsou dány nezařazené objekty, pro které budeme hledat zařazení do třídy. Objekt zařadíme do třídy na základě jeho největší míry podobnosti, např. nejmenší Mahalanobisovy vzdálenosti. [23]

Diskriminační (zařazovací) pravidla: při diskriminační analýze se snažíme vyčíslit hodnotu diskriminační funkce, která nám usnadní zařazení do primární třídy. Takto vyčíslené hodnoty funkce používáme také ke třídění nezařazených objektu do předem známých primárních tříd, a to na základě p diskriminátorů x_1, x_2, \dots, x_p . Každá primární třída je charakterizována svou funkcí hustoty pravděpodobnosti $f_j(\mathbf{x})$, kde $\mathbf{x}^T = [x_1, x_2, \dots, x_p]$. Existuje citlivé pravidlo pro zařazení, diskriminaci objektu vektoru \mathbf{x} do třídy G_j . [23]

$$f_j(\mathbf{x}) = \max_{i \in 1, \dots, g} f_i(\mathbf{x}) \quad [10]$$

3.2 Fraktály

Fraktál je podle původní Mandelbrotovy definice množina, jejíž Hausdorffova dimenze je větší než dimenze topologická. Můžeme jej také popsat jako geometrický objekt, který nese tyto vlastnosti:

- je soběpodobný – můžeme pozorovat stále opakující se charakteristický motiv, i když měníme měřítko
- mívá na první pohled velmi složitý tvar, ale je generován opakovaným použitím jednoduchých pravidel

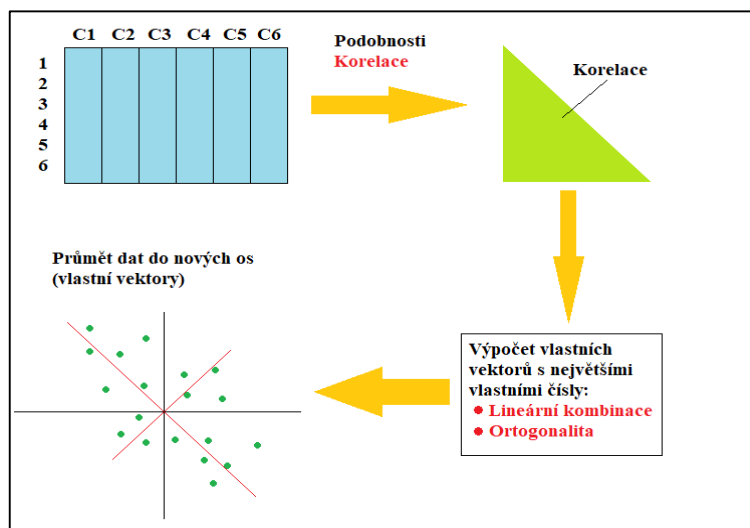
Fraktály mohou na první pohled vypadat jako velmi složité geometrické objekty. Jsou však často založeny na překvapivě jednoduchých matematických strukturách. [24]

Druhy fraktálů:

- L – systém (systém vyvinut pro modelování růstu rostlin)
- IFS (kontrahující, tj. obraz při této funkci je menší než jeho vzor)
- TEA (mapování oblastí přitažlivosti pro různá řešení nelineárního systému)

3.3 Analýza hlavních komponent PCA

PCA (principal component analysis) se do češtiny překládá jako analýza hlavních komponent. Jejím účelem je snížení počtu proměnných pomocí tzv. hlavních komponent. Jimi popisujeme variabilitu a jejich vztahy u všech proměnných. Při této analýze neexistuje, jako je tomu u jiných, dělení na závislé a nezávislé proměnné. Všechny mají tedy stejný status. [23,25]



Obr. 24 Postup PCA pro ordinaci

Schématický postup na obrázku 24 zjednodušeně popisuje posloupnost jednotlivých kroků transformace na hlavní komponenty a závěrečné zobrazení do nového grafu.

Vznik hlavních komponent probíhá lineární kombinací původních proměnných. Z p proměnných X_i vytvoříme nové proměnné Z_j . Hodnoty Z_j jsou nekorelované. Toho se snažíme dosáhnout, protože nám dokazuje, že každá nová proměnná Z_j měří jinou vlastnost. Z_j pak nazýváme hlavní komponenty. Data však musí mít pro takovou úpravu předpoklad. Především musí původní data mít silnou korelaci. Jejich základní charakteristikou je jejich rozptýl, tedy míra variability. [23,25]

Využívá se pro redukci počtu znaků bez velké ztráty informace, testy vícerozměrné normality, průzkumovou analýzu, snížení rozměrnosti, míru jakosti, zobrazení vícerozměrných dat projekcí do roviny nebo regrese s využitím hlavních komponent. [23,25]

3.4 Kubický spline

Kubický spline se využívá pro proložení prakticky všech regresních křivek daty, které jsme naměřili. Nesou jednorozměrnou nezávisle proměnnou x a jednorozměrnou náhodnou závisle proměnnou y . Lineární spline, který je předstupněm kubického, nám body mezi sebou napojí spojitou přímkou. Jestliže využijeme kubický spline, napojení se zaoblí a tím v některých případech lépe vykreslí spojitost dat. [26]

Jde tedy o funkci $S(x)$, která je kubický polynom na každém subintervalu $\langle x_i, x_{i+1} \rangle$

$$S_i(x) = a_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3, \quad x \in \langle x_i, x_{i+1} \rangle \quad [11]$$

A vyhovuje podmínkám:

$$S_i(x_i) = f(x_i), i = 0, \dots, n - 1, \quad S_{n-1}(x_n) = f(x_n) \quad [12]$$

$$S_i(x_{i+1}) = S_{i+1}(x_{i+1}), i = 0, \dots, n - 2 \quad [13]$$

$$S_i'(x_{i+1}) = S_{i+1}'(x_{i+1}), i = 0, \dots, n - 2 \quad [14]$$

$$S_i''(x_{i+1}) = S_{i+1}''(x_{i+1}), i = 0, \dots, n - 2 \quad [15]$$

Abychom mohli kubický splajn jednoznačně určit, musí být předepsány okrajové podmínky. Tyto podmínky se používají:

$$a) \quad S''(x_0) = S''(x_n) = 0 \quad [16]$$

$$b) \quad S''(x_0) = f_0''(x_1), S''(x_n) = f_n'' \quad [17]$$

$$c) \quad S''(x_0) = f_0', S'(x_n) = f_n' \quad [18]$$

$$d) \quad \text{Podmínky typu „not-a-knot“ (} S_1 \text{ je tentýž kubický polynom jako } S_0 \text{ a } S_{n-2} \text{ je tentýž kubický polynom jako } S_{n-1} \text{ tj. } S_0'''(x_1) = S_1'''(x_1) \text{ a } S_{n-2}'''(x_{n-1}) = S_{n-1}'''(x_{n-1})) \quad [19]$$

3.5 Nelineární regrese

Regrese vyjadřuje spojitý vztah mezi závisle proměnou a nezávisle proměnou. Cílem je popsat tuto závislost vhodným matematickým modelem. Nemůžeme proměnné libovolně zaměňovat. To je možné pouze u závislosti korelační.

Existují dva druhy regrese. Lineární a nelineární. Rozdíl mezi nimi je především ve způsobu výpočtu bodových odhadů regresních parametrů. Lineární regrese je jednodušší, ale značně nedokonale popisuje reálné chování mezi veličinami. Takové chování je převážně nelineární. Výpočet parametrů nelineární regresní rovnice, která popisuje takové chování, je složitý a provádí se takzvanou iterační procedurou. [27]

Pro lineární regresní modely platí podmínka:

$$g_j = \frac{\partial f(x, b_1, \dots, b_p)}{\partial b_j} = konst., \quad j = 1, \dots, p \quad [20]$$

b_p – odhady regresních koeficientů

Pokud je alespoň pro jeden parametr b_j parciální derivace g_j jeho funkcí, jde o nelineární regresní model. Příkladem takového modelu může být asymptotická regresní konvexní funkce [21].

$$y = b_1 - b_2 \cdot e^{(-b_3 \cdot i)} \quad [21]$$

Pro vykreslení a vyhodnocení parametrů křivky pro naši aplikaci využijeme program Minitab 17.

3.6 Umělé neuronové sítě

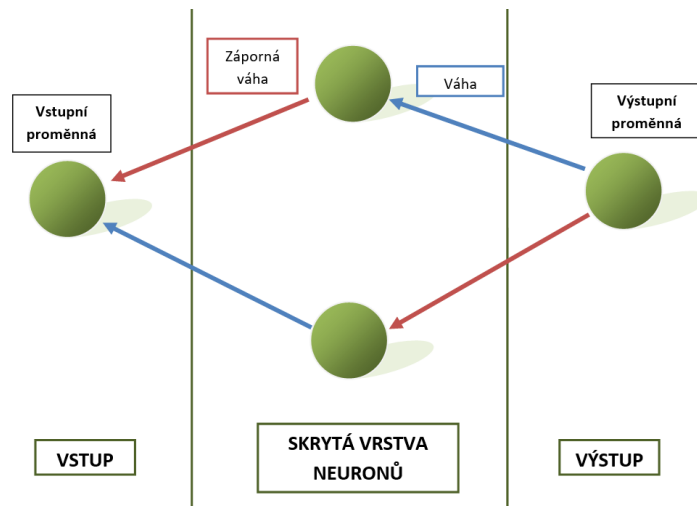
Neuronová síť se používá v umělé inteligenci jako jeden z výpočetních modelů. Umělé neuronové sítě si vzali příklad z chování biologických struktur. Jde o strukturu určenou pro distribuované paralelní zpracování dat. [2]

Přibližná definice je, že umělá neuronová síť se chová jako struktura několika jednoduchých procesorů, které každý jednotlivě obsahuje svou paměť. Mezi sebou jsou procesory propojeny informačními kanály. Informační kanály jsou představovány synaptickými vazbami, jinak také váhy.

Aplikace umělých neuronových sítí jsou nepřeborné. Záleží spíše na struktuře, algoritmech určení a technologických možnostech výpočetní techniky. Stejně jako určité oblasti mozku

zpracovávají různé informace, musí se lišit architektura a algoritmy umělé neuronové sítě pro jednotlivé úkoly zpracování. [2, 28]

V naší práci využijeme neuronovou síť pro kontrolu výsledků. Veškerou mechaniku a algoritmy zajišťuje program QCExpert. Ten je určen mimo jiné pro výpočetní úlohy za pomoci umělých neuronových sítí.



Obr. 25 Schéma neuronové sítě

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 POČÁTEČNÍ INFORMACE O MĚŘENÍ

Základní předpoklad k práci s daty je zajištění opakovatelnosti. Do následujících odstavců jsme umístili potřebné hodnoty pro zajištění tohoto předpokladu.

4.1 Podmínky měření

Veškeré měření probíhalo v metrologické laboratoři UTB FT U15/229.

Teplota: 21 °C

Vlhkost: 72 %

Tlak: 1010 hPa

4.2 Vyšetřované povrchy

K měření jsme měli dva druhy materiálů. Otěru vzdorný plech HARDOX tloušťky 8 mm a nerezovou ocel 1.4301 tloušťky 6 mm. Z těch od každého dva vzorky. Jeden uřezán Fiber laserem a druhý CO2 laserem.



Obr. 26 Materiál HARDOX



Obr. 27 Materiál 1.4301

Z těchto dvou materiálů jsme zvolili pouze nerezovou ocel 1.4301. Hlavním důvodem byla skutečnost, že tento materiál měl značně nevýraznější heterogenní povrch.



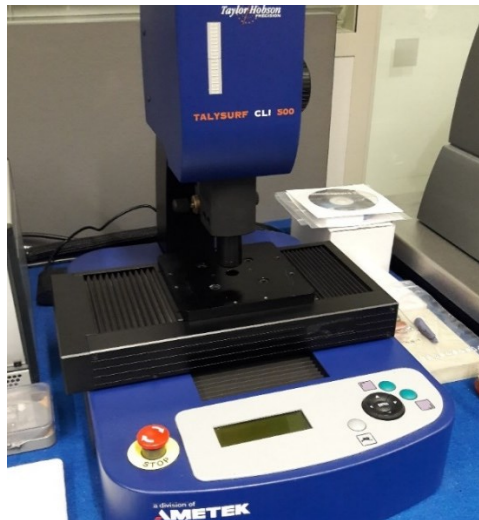
Obr. 28 HARDOX – heter. povrch



Obr. 29 1.4301 - heter. Povrch

Jinými slovy, pokud se nám povede rozdělení na oblasti heterogenního povrchu u materiálu 1.4301, nebude problém tento postup úspěšně aplikovat na výraznější HARDOX.

4.3 Měřicí přístroj

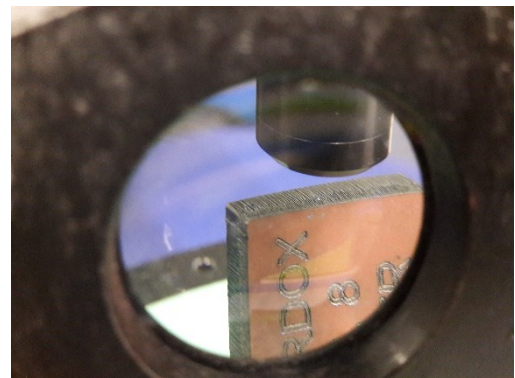


Obr. 30 Talysurf CLI 500

Měřili jsme na bezkontaktním přístroji Talysurf CLI 500. V následujícím sledu obrázků je zjednodušeně popsán postup měření jednoho vzorku

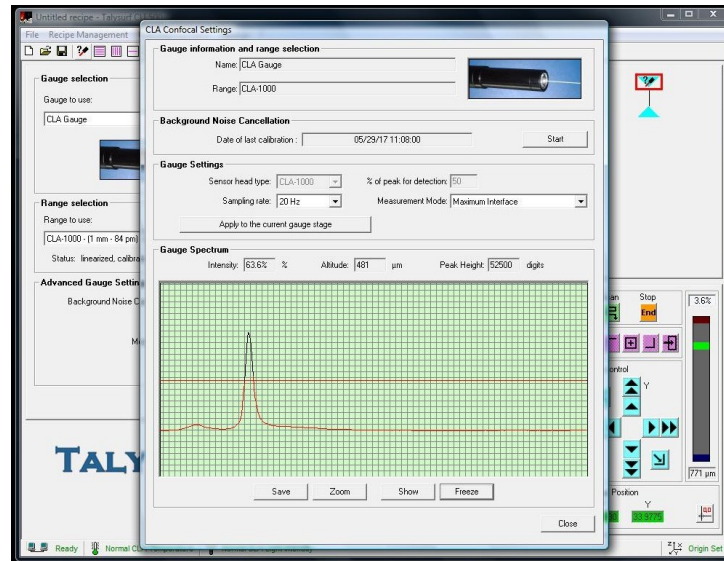


Obr. 31 Talysurf – nastavení ohniska



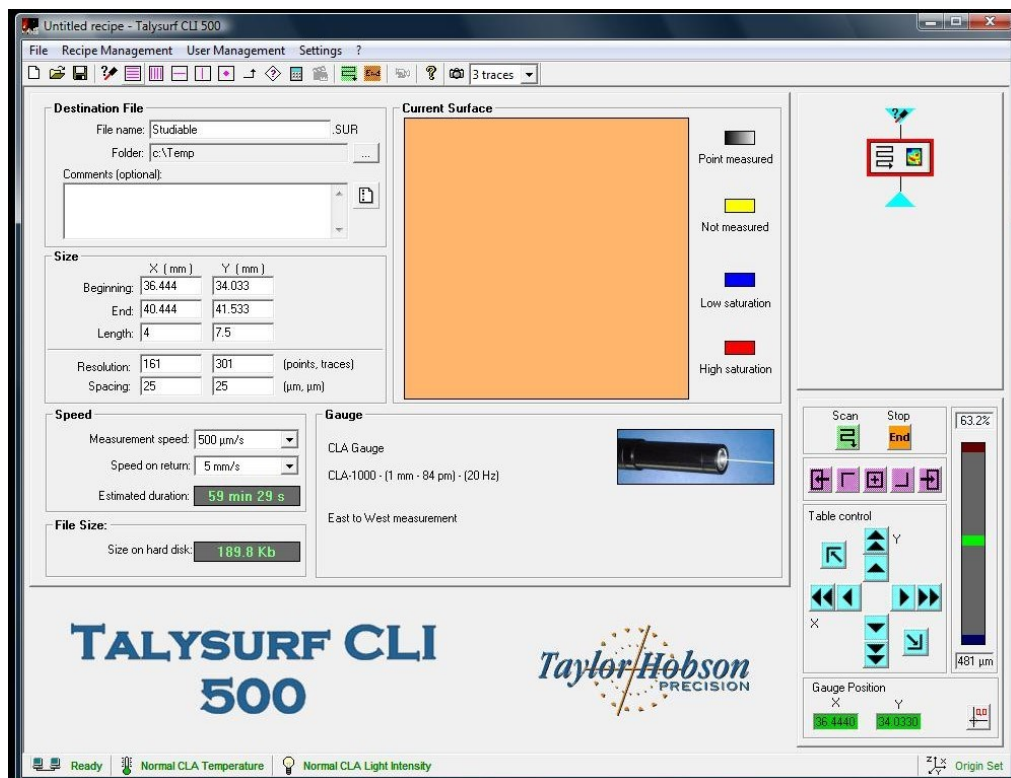
Obr. 32 Talysurf - detail měřicí hlavy

Nejdříve se nastavuje ohnisková vzdálenost. Měřicí hlavu přibližujeme k měřené ploše tak dlouho, dokud nezezelená ukazatel. Ten je umístěn přímo na přístroji. Pomocí ukazatele se určí správná vzdálenost hlavy.



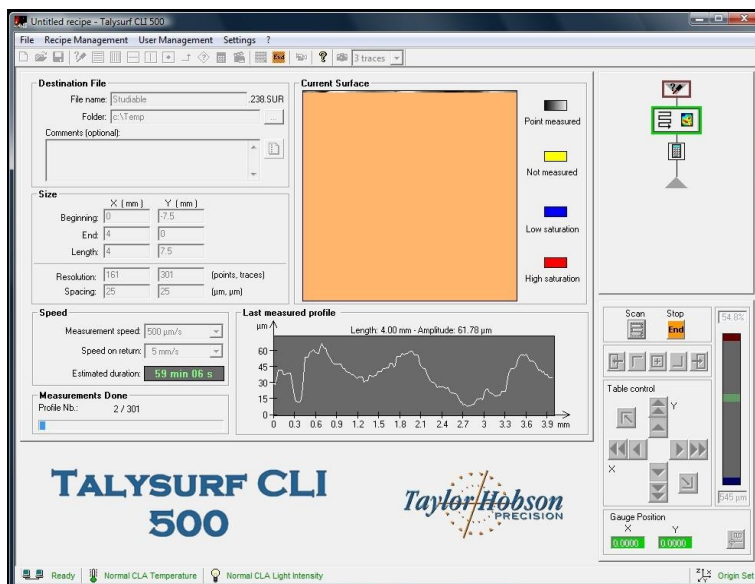
Obr. 33 Nalezení píku

Jako každý měřicí přístroj před měřením, je třeba i Talysurf CLI 500 kalibrovat. Dále je třeba zajistit správný rozsah měření a správnou odrazivost měřicího paprsku. K tomu nám slouží ukazatel píku – obrázek 33. Čím vyšší pík, tím líp paprsek „měří“. Následuje nastavení parametrů měření. Pro každý vzorek jsme použili stejné parametry. Ty můžeme vidět na obrázku 34.



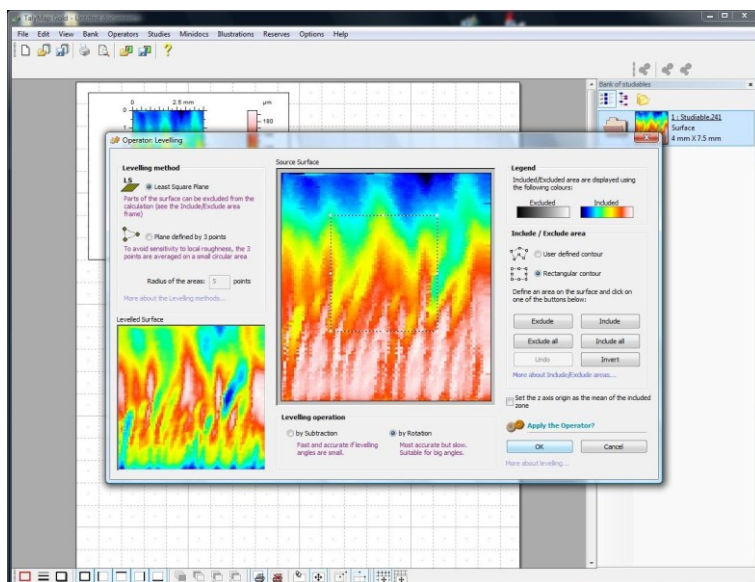
Obr. 34 Parametry nastavení

Po té přichází na řadu samotné měření. Na obrázku 35 vidíme zobrazení programu v průběhu měření.



Obr. 35 Měření

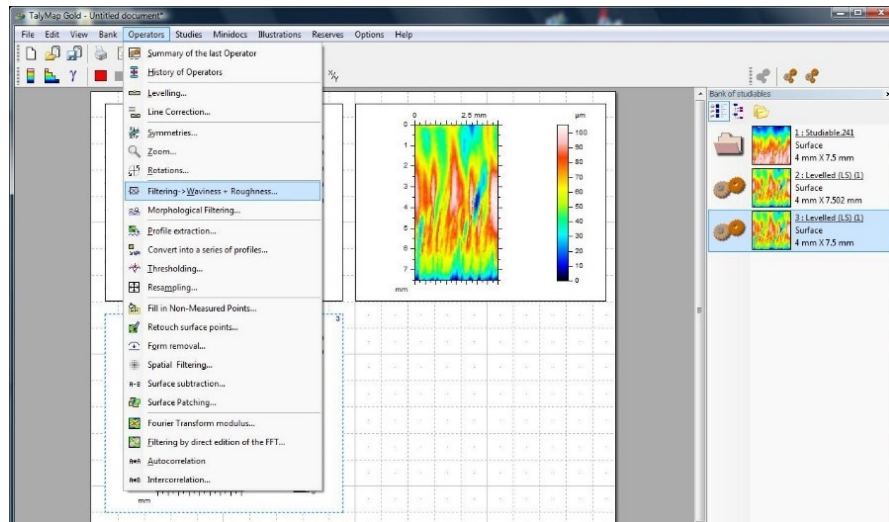
Po dokončení měření se přesouváme do vyhodnocovacího prostředí softwaru TalyMap. Hned po naměření nám program zobrazí naměřenou plochu s barevným spektrem vykreslení. Vidíme na obrázku 36. To reprezentuje míru drsnosti.



Obr. 36 Naměřená plocha

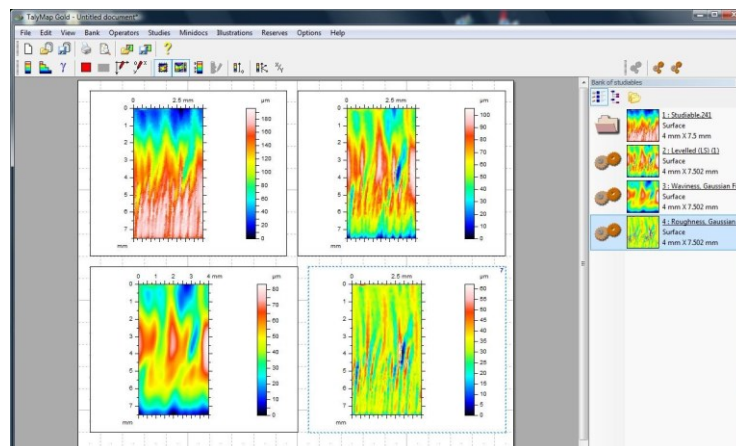
Zároveň můžeme v tomto kroku ještě oříznout oblast vyhodnocování dle potřeby. Jakmile potvrdíme oblast, automaticky se provede filtrace tvarového zkreslení.

Následně pomocí operátoru Filtering → Waviness + Roughness rozdělíme povrch na vlnitost a samotnou drsnost.



Obr. 37 Filtr vlnitost a drsnost

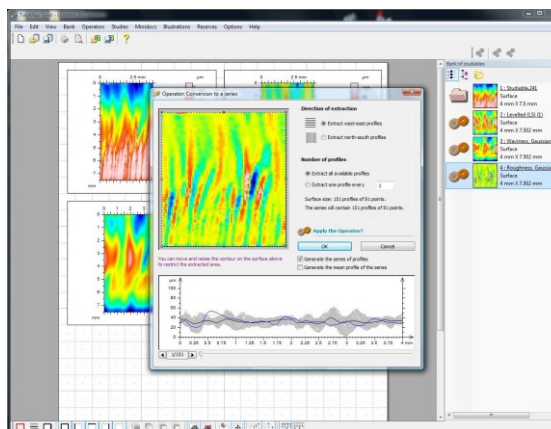
Program nám automaticky zobrazuje jednotlivé kroky v podobě samostatných oken. Na obrázku 38 vidíme všechny. Levý horní zobrazuje původní naměření, pravý horní je povrch s úpravou tvarové nerovnosti. Levý spodní je zobrazení vlnitosti a pravý zobrazuje samostatnou drsnost povrchu.



Obr. 38 Jednotlivé úpravy povrchu

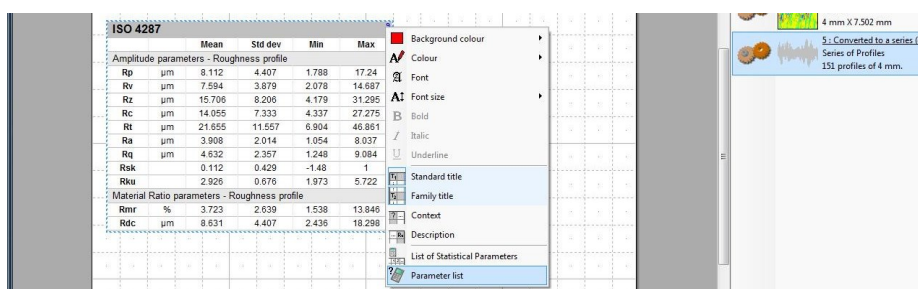
Naměřené hodnoty očištěné o vliv tvaru a vlnitosti nazýváme surovými daty. Nesou všechny parametry, které může software vyhodnotit. Pro jejich zobrazení a statistické hodnocení musíme očištěná data rozdělit na jednotlivé řezy. K tomu slouží operátor Conversion to a series. Software musí vědět, jakým směrem má orientovat rozdělení povrchu pro vyhodnocení křivek drsnosti a z toho se odvíjejících parametrů.

Na obrázku 39 vidíme možnosti orientace. Buď West-East, tedy horizontální orientaci anebo North-South, tedy vertikální.



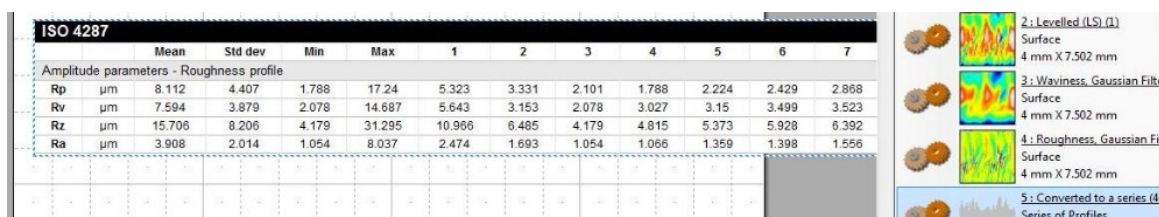
Obr. 39 Rozdělení na řezy

Volíme pro náš případ horizontální, jelikož potřebujeme vyhodnocovat povrch kolmo k směru proudu řezného paprsku. Tato možnost se však může měnit se zřetelem na orientaci měřeného vzorku. Poslední příkaz pro samotné zobrazení hodnot je Studies → Parameter tables.



Obr. 40 Hodnoty a úprava

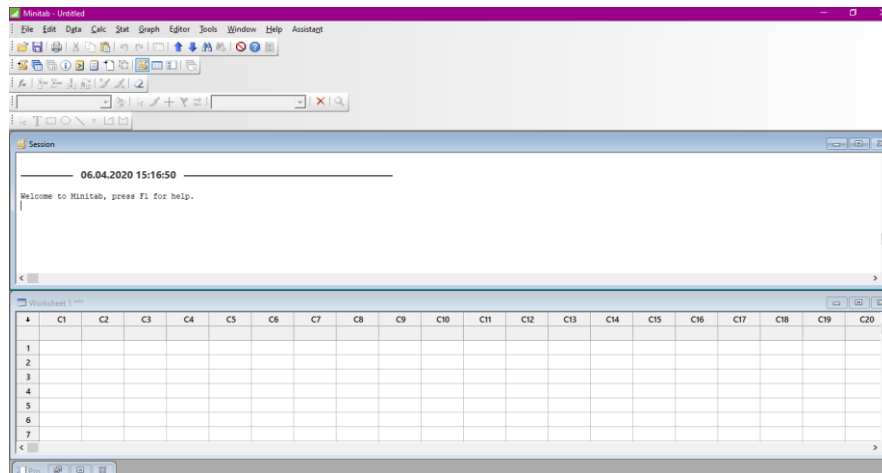
Zobrazí se nám několik přednastavených parametrů a některé jejich statistické hodnoty. Dle původní rozvahy potřebujeme pouze parametry Ra, Rz a Rmr. Úpravu provedeme přes pravé tlačítko myši, příkazem Parametr list. Výsledek úprav vidíme na obrázku 41.



Obr. 41 Zobrazení vybraných parametrů

4.4 Program statistického hodnocení

K veškerému statistickému hodnocení jsme použili program Minitab 17. Má veškeré mechaniky, které k hodnocení povrchů potřebujeme.



Obr. 42 Ukázka prostředí programu Minitab 17

K přenesení dat ze softwaru TalyMap do Minitab 17 musíme využít univerzální Textový dokument. TalyMap totiž nemá export dat do zpracovatelné podoby pro Minitab 17.

5 DATA

Z naměřených amplitudových parametrů jsme vybrali k hodnocení Rz a Ra. Tyto parametry nejlépe popisují vlastnosti heterogenního povrchu, které chceme vyhodnocovat. Rmr není vhodný parametr.

5.1 Naměřená data

Tab. 1 Ukázka hodnot 1.4301 laser FIBER

1.4301 - FIBER											
i	Rz[μ m]	Ra[μ m]	i	Rz[μ m]	Ra[μ m]	i	Rz[μ m]	Ra[μ m]	i	Rz[μ m]	Ra[μ m]
1	20,746	5,222	64	23,752	5,199	127	21,218	4,895	190	14,163	3,238
2	21,509	5,295	65	24,190	5,602	128	20,690	4,940	191	12,673	2,668
3	21,648	5,308	66	23,045	5,354	129	21,612	4,807	192	15,924	3,329
4	21,731	4,959	67	24,413	5,537	130	23,717	5,132	193	15,043	2,930
5	21,884	4,989	68	25,483	5,121	131	20,817	4,692	194	14,317	2,750
6	22,526	5,212	69	24,925	5,280	132	21,932	4,997	195	13,124	2,896
7	22,415	5,218	70	22,208	5,360	133	23,450	4,802	196	18,946	3,691
8	21,664	5,042	71	24,816	5,603	134	22,921	4,906	197	18,924	3,045
9	23,413	5,056	72	24,354	5,510	135	22,882	4,445	198	14,266	2,620
10	20,502	4,920	73	23,588	5,861	136	23,831	4,685	199	14,001	2,934

Tab. 2 Ukázka hodnot 1.4301 laser CO2

1.4301 - CO2											
i	Rz[μ m]	Ra[μ m]	i	Rz[μ m]	Ra[μ m]	i	Rz[μ m]	Ra[μ m]	i	Rz[μ m]	Ra[μ m]
1	13,299	2,84	64	10,187	2,138	127	17,435	2,806	190	76,433	15,925
2	13,926	2,693	65	11,527	2,55	128	21,56	3,109	191	69,957	16,194
3	13,944	2,675	66	11,259	2,6	129	19,303	2,566	192	75,107	17,535
4	13,104	2,714	67	11,211	2,188	130	20,653	2,968	193	79,955	16,626
5	14,186	2,78	68	11,502	2,472	131	17,804	2,82	194	72,594	17,552
6	13,705	2,681	69	11,63	2,364	132	14,341	2,6	195	77,463	16,664
7	13,09	2,529	70	13,252	2,557	133	12,294	2,168	196	76,459	16,533
8	13,463	2,889	71	12,967	2,598	134	12,06	2,3	197	75,082	15,318
9	13,52	2,75	72	12,078	2,552	135	12,179	2,578	198	71,964	16,522
10	14,673	2,706	73	11,293	2,392	136	15,606	2,521	199	71,814	17,447

5.2 Úprava dat

Surová data je třeba zkontrolovat a popřípadě očistit o vzdálené hodnoty, které je přípustné odstranit.

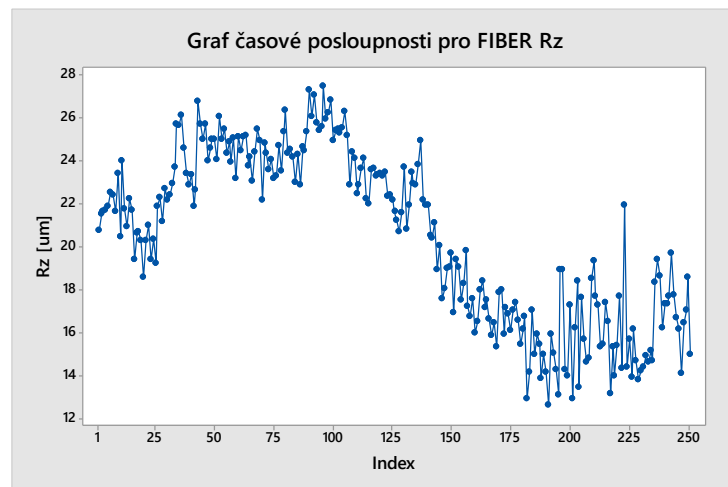
5.2.1 Exploratorní datová analýza

Kvalita dat:

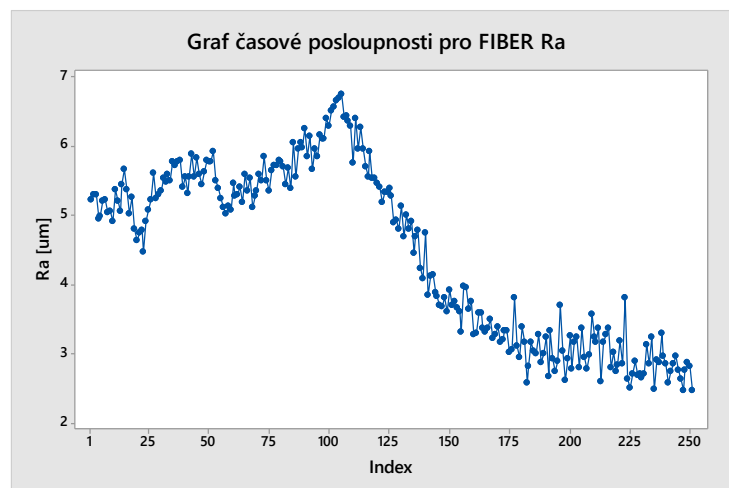
Všechny data se řadí do stejných skupin. Jsou to Kvantitativní, Diskrétní.

Grafické zobrazení a zhodnocení dat:

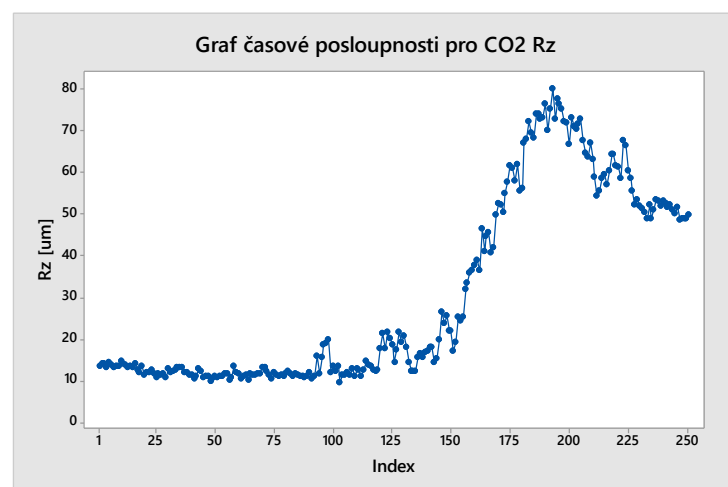
1. Grafy časové posloupnosti:



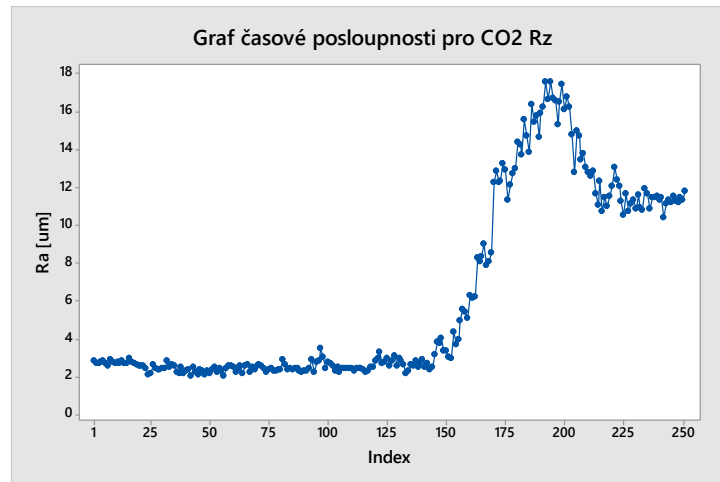
Obr. 43 Graf časové posloupnosti FIBER Rz



Obr. 44 Graf časové posloupnosti FIBER Ra



Obr. 45 Graf časové posloupnosti CO2 Rz

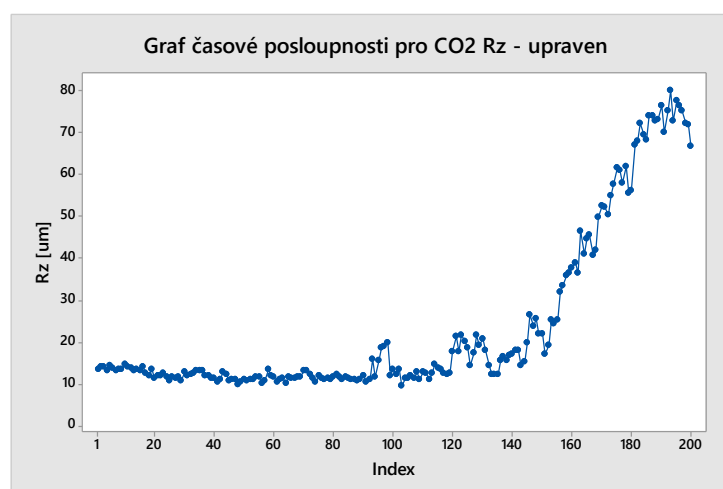


Obr. 46 Graf časové posloupnosti CO2 Rz

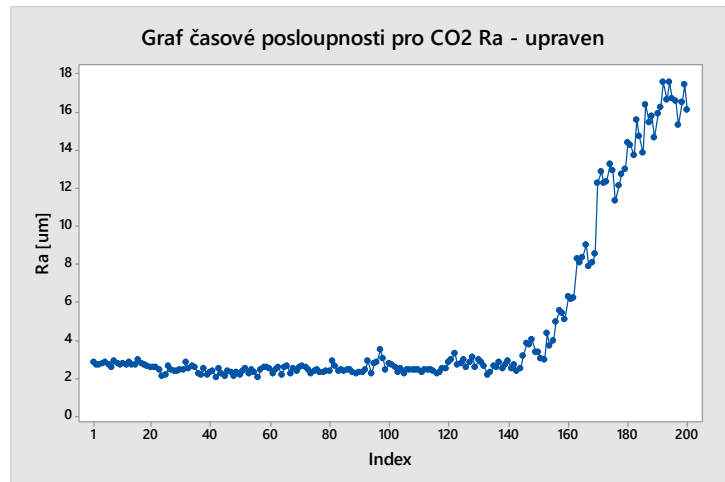
Už z grafů časové posloupnosti můžeme pozorovat nevhodné hodnoty. U všech grafů zhruba od hodnoty 200 a dál vidíme skupinu sobě podobných hodnot, které nerespektují průběh křivky. To by mohlo znamenat, že jde o drsnost hrany vzorku, která se významně odlišuje od povrchu. Pokud je to tak, musíme tyto hodnoty vyřadit, protože nám významně ovlivňují hodnocení heterogenního povrchu.

Po ověření postupu měření jsme zjistili, že se opravdu jedná o povrch v okolí hrany vzorku u všech měření. U vzorku 1.4301 FIBER se však paprsek měření dostal pouze do blízkosti hrany. Nelze jednoznačně určit, zda tyto data jsou ovlivněna hranou a ponecháme je v souboru. U vzorku 1.4301 CO2 se na hranu paprsek měření dostal jednoznačně. Proto u tohoto vzorku vyřazujeme hodnoty 201 až 251 ze souboru dat.

Po vyřazení hodnot vypadají grafy takto:



Obr. 47 Graf CO2 Rz - ořezané data

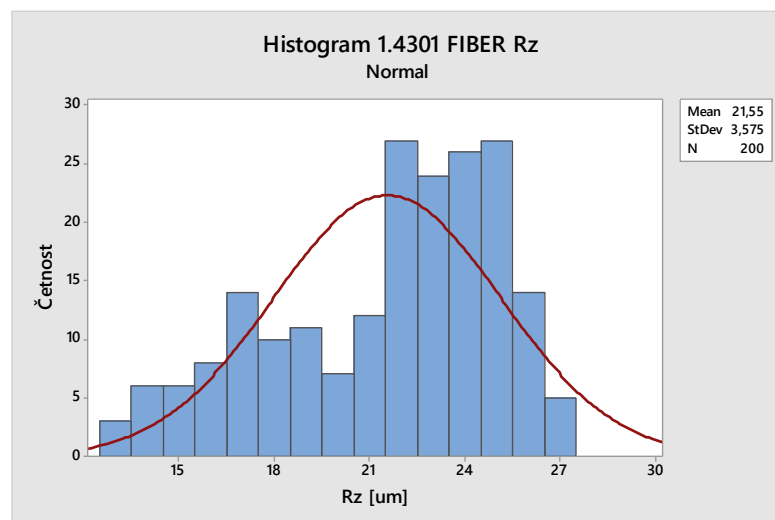


Obr. 48 Graf CO2 Ra - ořezané data

2. Histogramy:

Data mají vzestupnou tendenci. Nejedná se o rozptyl v rozmezí jedné hodnoty. Proto Gaussova křivka neodpovídá tvaru sloupců. To v našem případě nevádí. Právě naopak, dokazuje to přítomnost heterogenního povrchu.

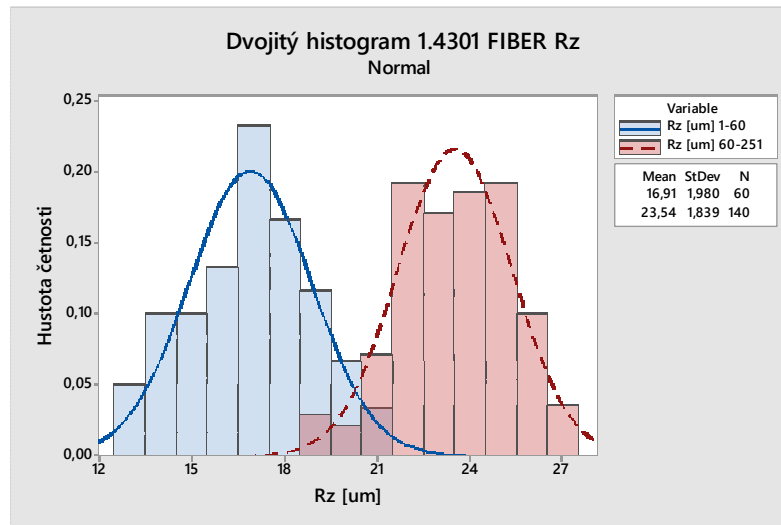
Pro parametr Rz ze skupiny dat FIBER platí, že nemají normální rozdělení. Tedy nelze celý soubor dat popsat Gaussovou křivkou. To jasně vidíme na obrázku 49.



Obr. 49 Histogram 1.4301 FIBER Rz

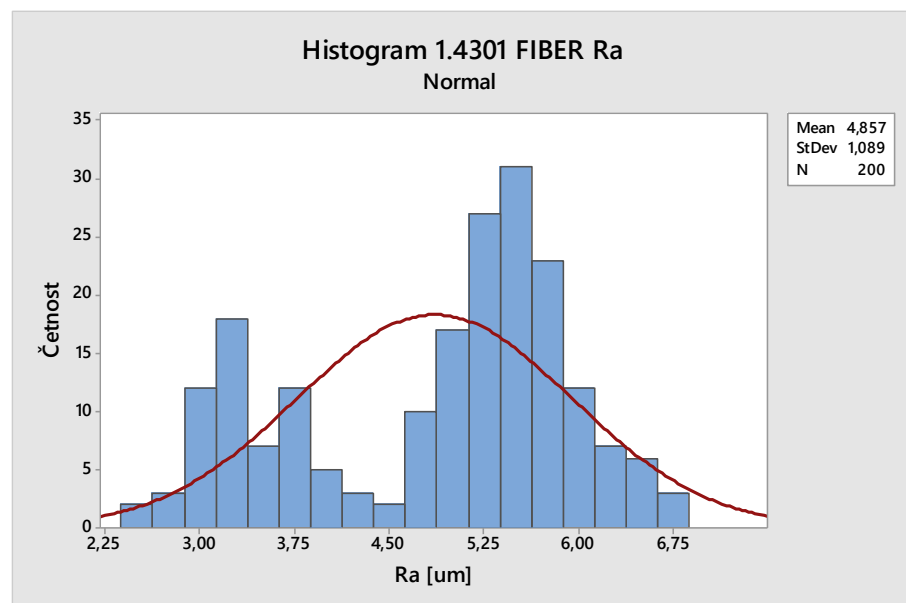
Když ale rozdělíme data na dvě části, můžeme pozorovat rozdělení podobné Gaussově křivce. Rozdělení dat pro Rz jsme zvolili podle intuice. Od první do šedesáté hodnoty (včetně) jednu skupinu. Zbytek je druhá skupina. Takové zobrazení slouží pouze pro ilustraci jevu. Tento jev je spojen s heterogenním povrchem. Jasně prokazuje, že data obsahují více průměrů, kolem kterých se pohybuje určitý rozptyl dat

normálního rozdělení. Na obrázku 50 vidíme dva histogramy v jednom diagramu. U obou jsme se přiblížili normálnímu rozdělení.



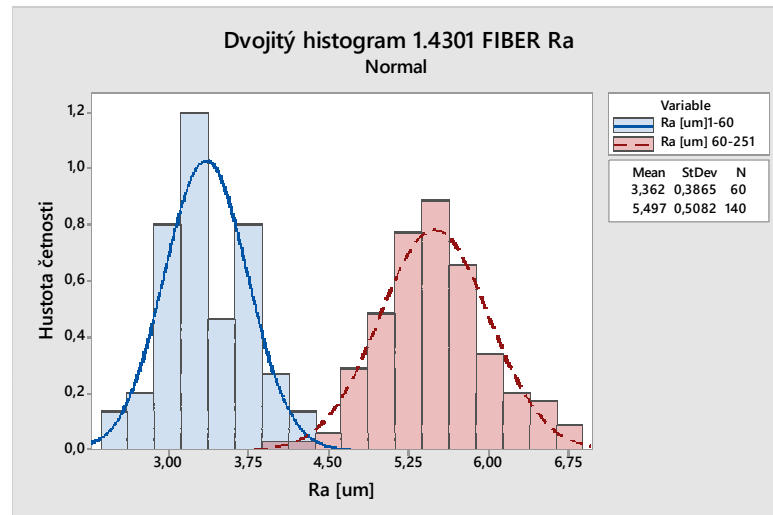
Obr. 50 Dvojité histogram 1.4301 FIBER Rz

Stejná situace vzniká u souboru dat pro Ra ze skupiny FIBER. Celý soubor nemá normální rozdělení, proto nelze popsat Gaussovou křivkou.



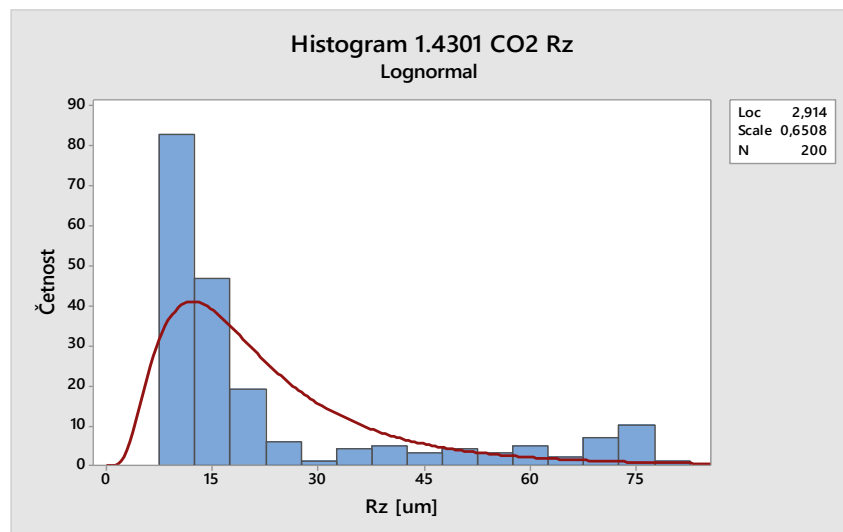
Obr. 51 Histogram 1.4301 FIBER Ra

Pokud jej opět intuitivně rozdělíme na dvě skupiny, uvidíme jasnou podobnost jednotlivých skupin s normálním rozdělením. Rozdělení je stejné jako u Rz. První skupina tvoří prvních šedesát hodnot, včetně. Druhá obsahuje zbytek. Dokonce první skupina (na obrázku 52 modře) v nás evokuje pocit, že by se dala ještě rozdělit. To poukazuje na možnost, že heterogenní povrch bude mít i terciální oblast.



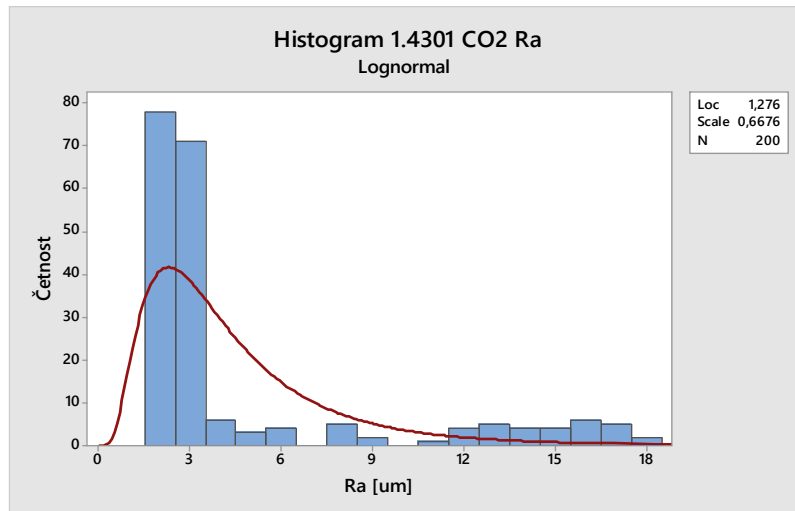
Obr. 52 Dvojité histogram 1.4301 FIBER Ra

U skupiny CO2 nám histogram popisuje nejlíže Logonormální rozdění. Tedy rozdění vychýlené na jednu stranu. To také predikuje výskyt heterogenního povrchu. Čteme totiž z histogramu pro Rz ze skupiny CO2 na obrázku 53, že oblast od hodnoty 7,5 [μm] do hodnoty 22,5 [μm] pojmulý 75% četnosti. Naproti tomu hodnoty od 22,5 [μm] do 82,5 [μm] pojmulý zbylých 25% četnosti. To dost jasné ukazuje na značné diverzifikovaný povrch, respektive na heterogenní povrch.



Obr. 53 Histogram 1.4301 CO2 Rz

U histogramu pro Ra ze skupiny CO2 na obrázku 54 pozorujeme stejné chování jako u obrázku 53. Tím pádem pro něj platí stejné tvrzení a i tento poukazuje na výskyt heterogenního povrchu.

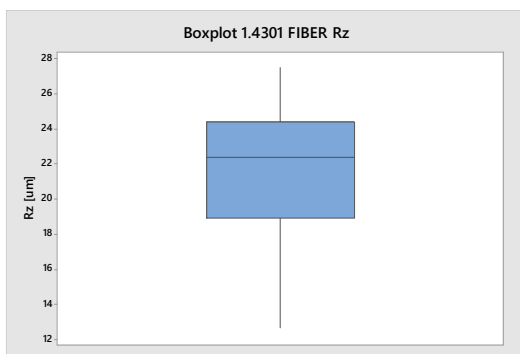


Obr. 54 Histogram 1.4301 CO2 Ra

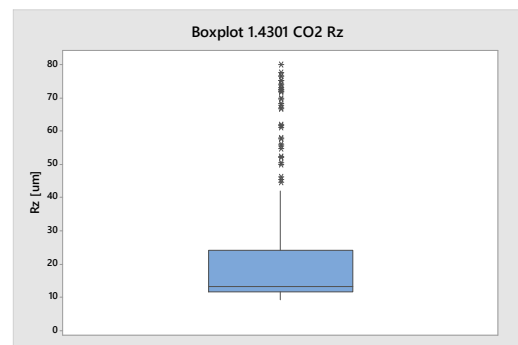
Nemůžeme na základě histogramů určit přesný bod, kdy se heterogenní oblasti mění. Tedy nalézt hranici mezi primární a sekundární, popř. terciální oblastí. Nicméně jasně dokazují jejich přítomnost.

3. Krabicové diagramy:

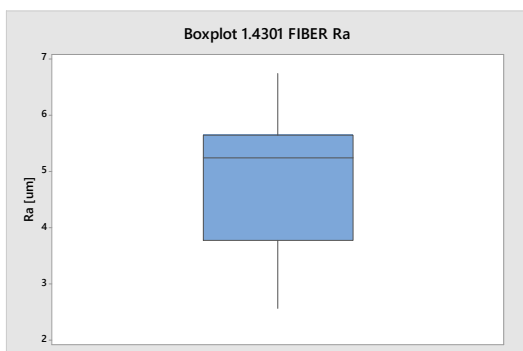
Také Boxploty nám jasně prokazují vychýlenost dat. To je však vše, co nám tyto diagramy dokazují.



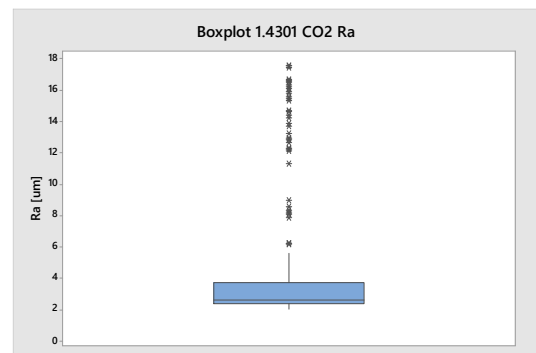
Obr. 55 Krabicový diagram FIBER Rz



Obr. 57 Krabicový diagram CO2 Rz



Obr. 56 Krabicový diagram FIBER Ra



Obr. 58 Krabicový diagram CO2 Ra

6 HODNOCENÍ HETEROGENNÍCH POVRCHŮ

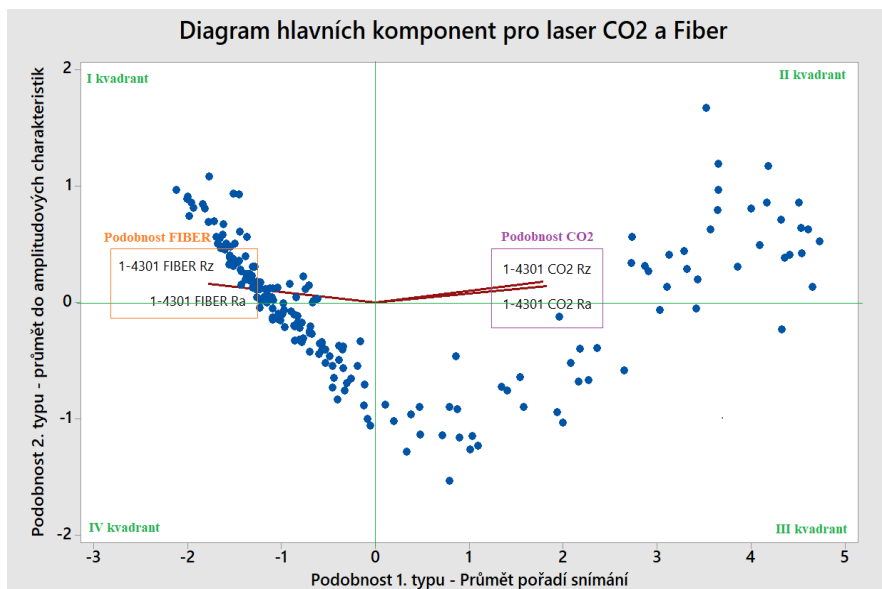
Naším hlavním cílem je rozdělit heterogenní povrch na alespoň dvě, nejlépe však tři oblasti. Ty nazýváme primární, sekundární a popřípadě terciální. V rámci hodnotitelného postupu jsme zvolili metodu vykreslení naměřených hodnot jednotlivých prvků Ra a Rz křivkou. Vzhledem k rozmístění dat na grafu časové osy jsme se přiklonili k metodě vykreslení nelineární regresní křivkou. Křivka musí být vypovídající.

6.1 Podobnost dat

Je důležité data prověřit na vzájemnou podobnost. Pokud by byly všechny hodnoty sobě podobné významně, pak by nelineární regresní křivka vytvořená z takových dat byla nevypovídající.

6.1.1 Analýza hlavních komponent

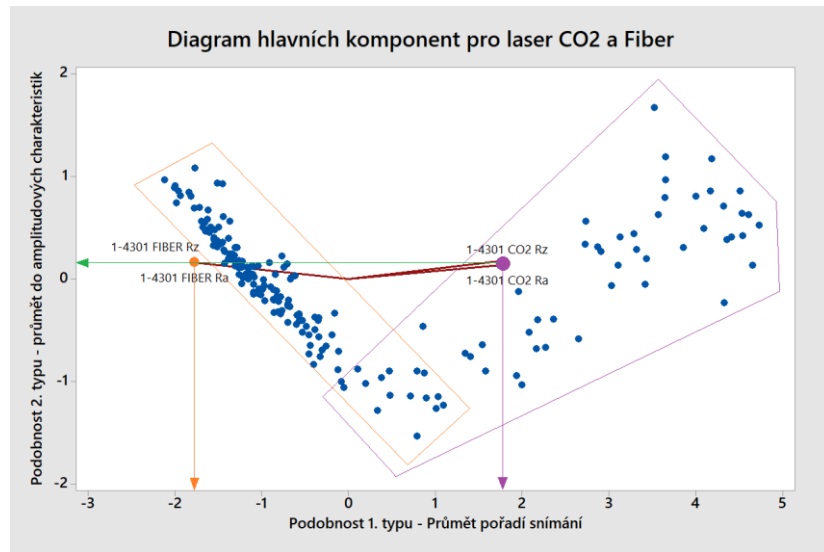
Analýza nám poskytuje grafické zobrazení, a to jak podobnost naměřených souborů mezi sebou, tak i podobnost jednotlivých naměřených hodnot.



Obr. 59 Diagram hlavních komponent

Na zobrazení diagramu z obrázku 59 jsme se zaměřili na zhodnocení podobnosti souborů dat 1-4301 FIBER Rz, 1-4301 FIBER Ra, 1-4301 CO2 Rz a 1-4301 CO2 Ra. Červené čáry, které indikují podobnost souborů, svou pozicí jasně dokazují, že soubory 1-4301 FIBER Rz a 1-4301 FIBER Ra jsou si významně podobné. Skupina „podobnost FIBER“ označena oranžovým obdélníkem. Stejné tvrzení platí pro soubory 1-4301 CO2 Rz a 1-4301 CO2 Ra. Skupina „podobnost CO2“ označena fialovým obdélníkem. Podobnost

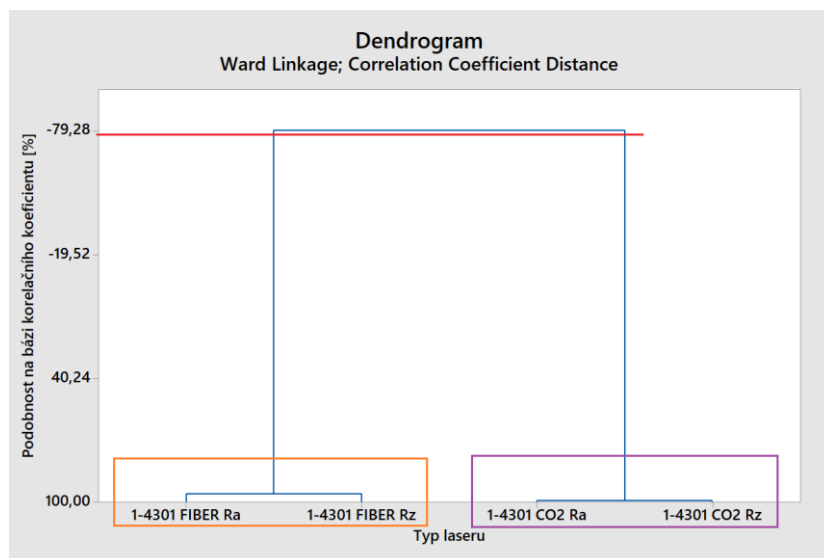
FIBER se nachází v I kvadrantu, kdežto podobnost CO2 v II kvadrantu. To je jasný ukazatel, že tyto skupiny mezi sebou nemají žádnou podobnost.



Obr. 60 Diagram hlavních komponent 2

Pro přehlednost jsme další úpravy grafu rozdělili na dva obrázky. Na obrázku 60 vidíme ohrazení dat podle skupin. Podobnost 2. typu je stejná u obou skupin. Podobnost 1. typu však rozdílný. To nám říká, že budou třeba 2 regresní křivky pro každou skupinu. Tedy 4 regresní křivky dohromady.

6.1.2 Dendrogram naměřených dat



Obr. 61 Dendrogram dat laserů pro Rz a Ra

Dendrogram nás ujistil v podobnosti mezi 1-4301 FIBER Rz a 1-4301 FIBER Ra stejně jako mezi 1-4301 CO2 Rz a 1-4301 CO2 Ra. Zároveň jasně prokázal, že shluky oranžový a fialový jsou si na 100% nepodobné.

6.2 Nelineární regresivní křivky

Potřebujeme získat nástroj na přibližný popis chování naměřených dat, se kterým můžeme dále pracovat. K tomu nám poslouží nelineární regresivní křivky. Jejich popis chování dat je dostatečný a získáme rovnici křivky, díky které můžeme dále vyhodnocovat povrch. Jak jsme popsali výše, máme dva typy technologií řezů. Laser FIBER a CO2.

6.2.1 1-4301 FIBER Rz

Počáteční hodnoty pro parametry:

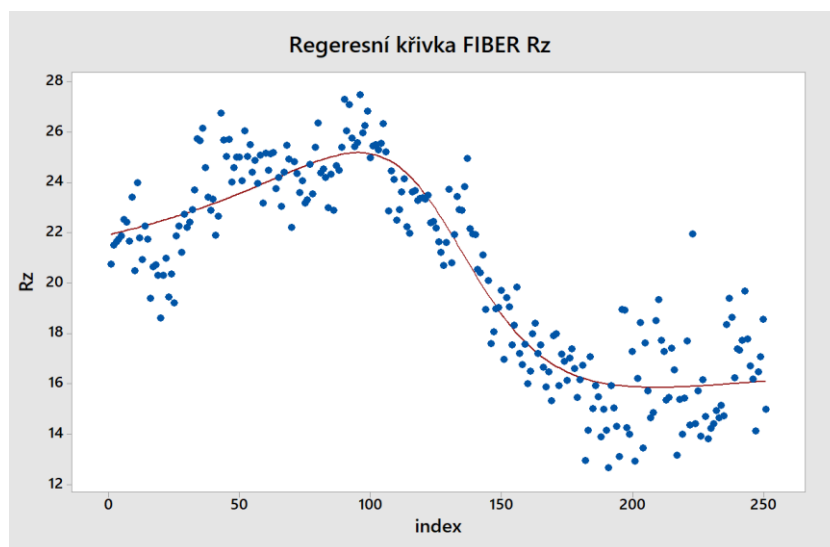
Parametry	Hodnota
Theta1	4,5
Theta2	-0,06
Theta3	0,0002
Theta4	-0,01
Theta5	0,00005

Algoritmus	Marquardt
Max. počet iterací	200

Obecná rovnice křivky:

$$Rz = \frac{(Theta1 + Theta2 \cdot i + Theta3 \cdot i^2)}{(1 + Theta4 \cdot i + Theta5 \cdot i^2)}$$

Po zadání počátečních hodnot parametrů do obecné rovnice nám Minitab dopočítal parametry pro náš příklad a zobrazil výslednou křivku. Křivka se jeví jako vypovídající.



Obr. 62 Regrese FIBER Rz

Vypočítaný odhad parametrů křivky:

Parametry	Hodnota	Odchylka hodnoty
Theta1	21,9138	0,246600
Theta2	-0,2727	0,005764
Theta3	0,0010	0,000040
Theta4	-0,0135	0,000336
Theta5	0,0001	0,000003

Výsledný počet iterací 40

Konkrétní rovnice křivky:

$$Rz = \frac{(21,9138 + (-0,2727 \cdot i) + 0,001 \cdot i^2)}{(1 + (-0,0135 \cdot i) + 0,0001 \cdot i^2)}$$

6.2.2 1-4301 FIBER Ra

Počáteční hodnoty pro parametry:

Parametry	Hodnota
Theta1	4,5
Theta2	-0,06
Theta3	0,0002
Theta4	-0,01
Theta5	0,00005

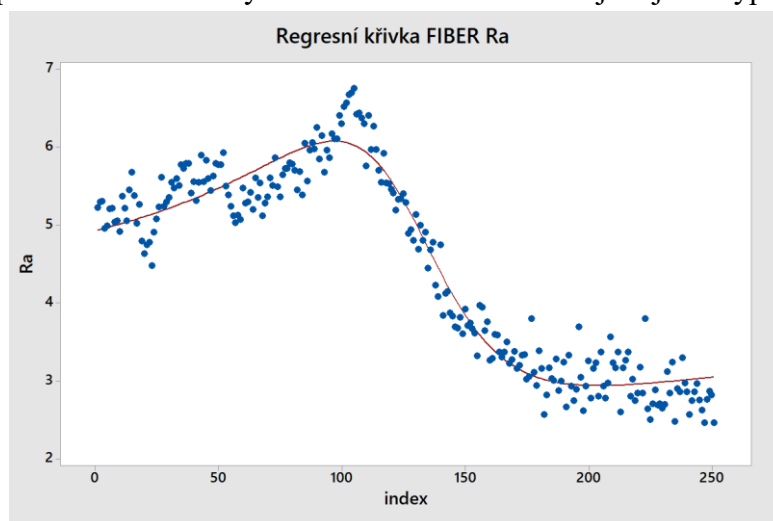
Algoritmus Marquardt

Max. počet iterací 200

Obecná rovnice křivky:

$$Ra = \frac{(Theta1 + Theta2 \cdot i + Theta3 \cdot i^2)}{(1 + Theta4 \cdot i + Theta5 \cdot i^2)}$$

Po zadání počátečních hodnot parametrů do obecné rovnice nám Minitab dopočítal parametry pro náš příklad a zobrazil výslednou křivku. Křivka se jeví jako vypovídající.



Obr. 63 Regrese FIBER Ra

Vypočítaný odhad parametrů křivky:

Parametry	Hodnota	Odchylka hodnoty
Theta1	4,92690	0,0468783
Theta2	-0,05991	0,0008083
Theta3	0,00021	0,0000043
Theta4	-0,01376	0,0001881
Theta5	0,00005	0,0000016

Výsledný počet iterací 40

Konkrétní rovnice křivky:

$$Ra = \frac{(4,9267 + (-0,05991 \cdot i) + 0,00021 \cdot i^2)}{(1 + (-0,01376 \cdot i) + 0,00005 \cdot i^2)}$$

6.2.3 1.4301 CO2 Rz

Počáteční hodnoty pro parametry:

Parametry	Hodnota
Theta1	1
Theta2	0,4
Theta3	-0,1

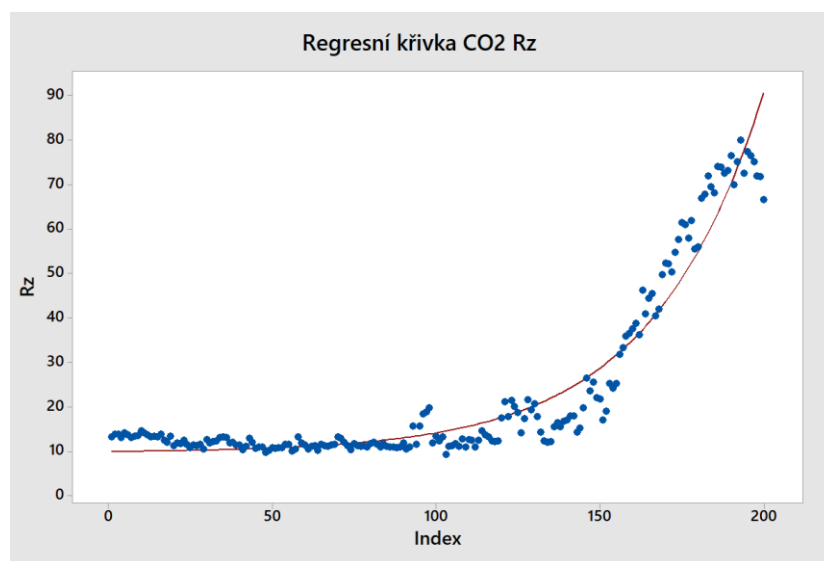
Algoritmus Marquardt

Max. počet iterací 200

Obecná rovnice křivky:

$$Rz = Theta1 - Theta2^{(-Theta3 \cdot i)}$$

Po zadání počátečních hodnot parametrů do obecné rovnice nám Minitab dopočítal parametry pro náš příklad a zobrazil výslednou křivku. Křivka se jeví jako vypovídající.



Obr. 64 Regrese CO2 Rz

Vypočítaný odhad parametrů křivky:

Parametry	Hodnota	Odchylka hodnot
Theta1	9,66802	0,619575
Theta2	-0,24500	0,057038
Theta3	-0,02900	0,001209

Výsledný počet iterací 63

Konkrétní rovnice křivky:

$$Rz = 9,66802 + 0,245^{(0,029 \cdot i)}$$

6.2.4 1.4301 CO2 Ra

Počáteční hodnoty pro parametry:

Parametry	Hodnota
Theta1	1
Theta2	0,4
Theta3	-0,1

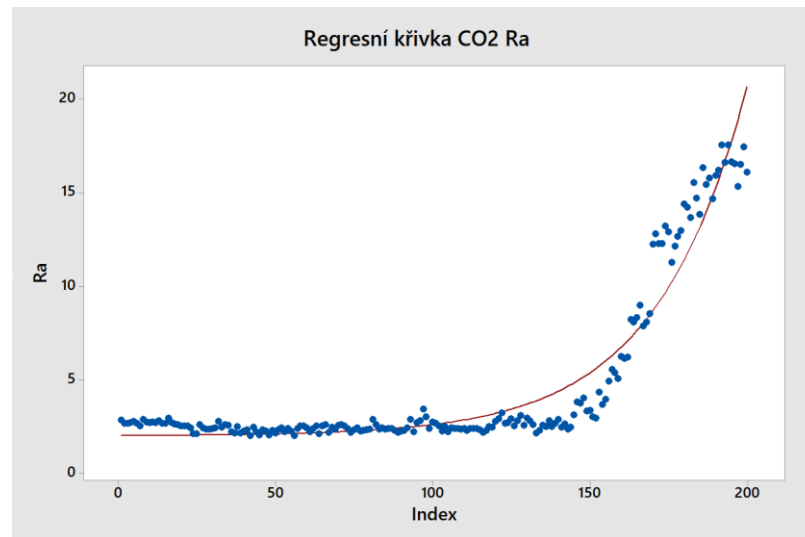
Algoritmus Marquardt

Max. počet iterací 200

Obecná rovnice křivky:

$$Ra = Theta1 - Theta2^{(-Theta3 \cdot i)}$$

Po zadání počátečních hodnot parametrů do obecné rovnice nám Minitab dopočítal parametry pro náš příklad a zobrazil výslednou křivku. Křivka se jeví jako vypovídající.



Obr. 65 Regrese CO2 Ra

Vypočítaný odhad parametrů křivky:

Parametry	Hodnota	Odchylka hodnot
Theta1	1,99092	0,132349
Theta2	-0,01994	0,005695
Theta3	-0,03421	0,001485

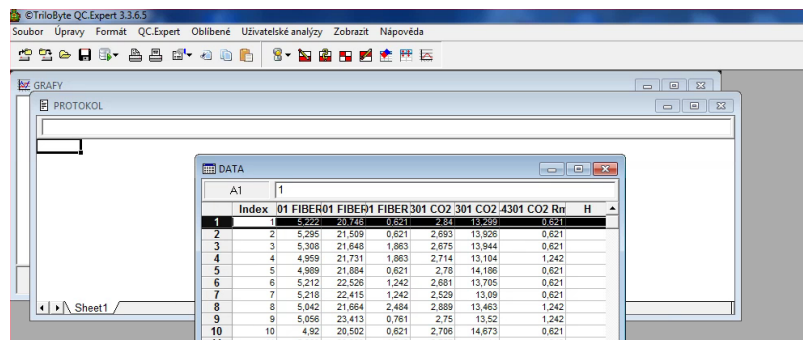
Výsledný počet iterací: 62

Konkrétní rovnice křivky:

$$Ra = 1,99092 + 0,01994^{(0,03421 \cdot i)}$$

6.3 Kontrola neuronovou sítí

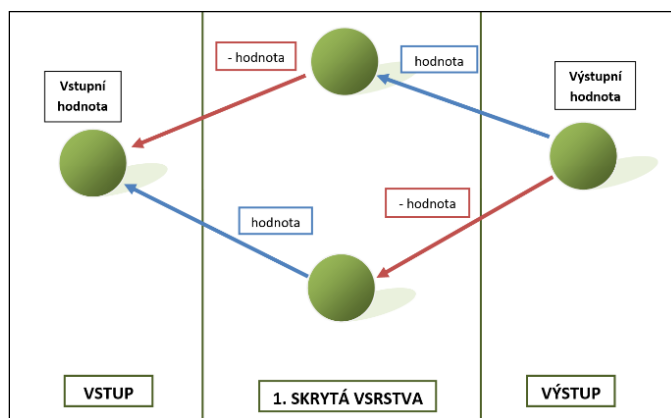
Je třeba dokázat, že nalezené nelineární regresní křivky jsou správně. Zvolíme tedy jinou metodu k tvorbě křivky. My jsme zvolili program TriloByte QC.Expert, který řeší problematiku pomocí neuronových sítí. Následující podrobný popis postupu je pro soubor dat 1.4301 FIBER Rz. Pro ostatní soubory platí stejný postup. Důležité informace budou vy-psány. Nejdříve nahrajeme data do programu QC.Expert.



Index	01 FIBER01	FIBER01	FIBER301	CO2 301	CO2 4301	CO2 Rr	H
1	5,222	20,738	0,621	2,84	13,299	0,621	
2	5,295	21,509	0,621	2,693	13,926	0,621	
3	5,308	21,648	1,863	2,675	13,944	0,621	
4	4,859	21,731	1,863	2,714	13,104	1,242	
5	4,989	21,884	0,621	2,78	14,196	0,621	
6	5,212	22,528	1,242	2,681	13,705	0,621	
7	5,218	22,415	1,242	2,529	13,09	0,621	
8	5,042	21,684	2,494	2,889	13,463	1,242	
9	5,056	23,413	0,761	2,75	13,52	1,242	
10	4,92	20,502	0,621	2,706	14,673	0,621	

Obr. 66 QC.Expert - nahraná data

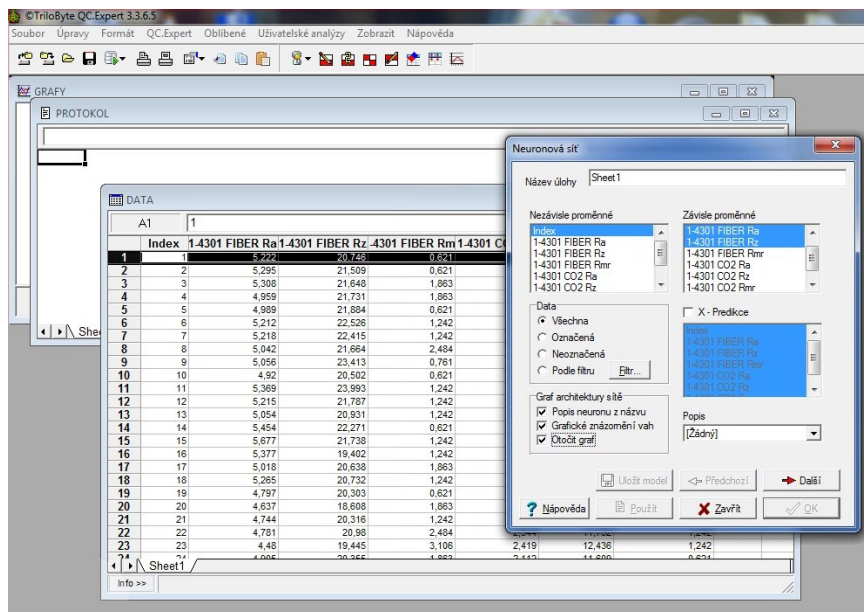
Dále musíme nastavit parametry neuronové sítě na bázi lineárních perceptronů s jednou skrytou vrstvou. Předpokládané schéma neuronové sítě vidíme na obrázku 67. Znaménka hodnot jsou ilustrativní.



Obr. 67 Schéma neuronové sítě

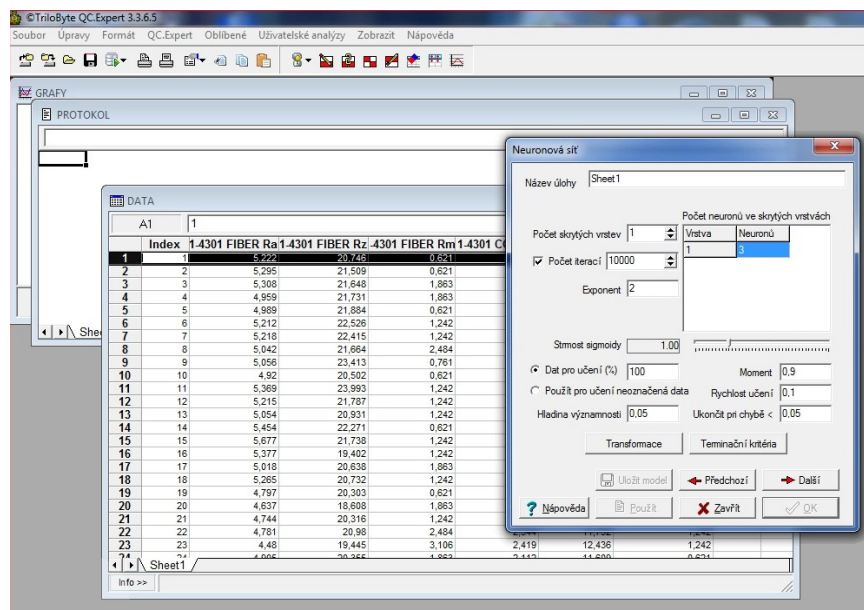
Vstupní hodnota je nezávisle proměnná a výstupní hodnota je závisle proměnná. Vstupní hodnota je v našem případě pořadí, tedy index. Výstupní hodnota je hodnota Ra. Hodnoty vyjadřují, jak silné propojení vzniká v rámci výpočtu mezi jednotlivými neurony. Hodnoty vyčteme až po naučení sítě v dalších krocích.

V programu nastavíme jako nezávisle proměnnou index a závisle proměnnou jeden ze skupiny FIBER. Pro tento případ: 1.4301 FIBER Rz



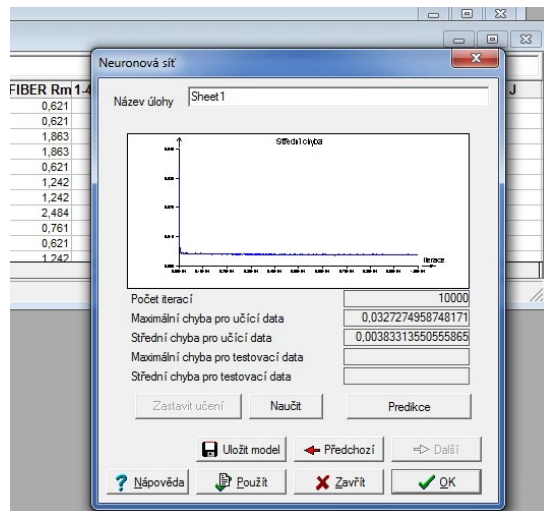
Obr. 68 Vstupní a výstupní parametry neuronové sítě

Pokračujeme nastavením parametrů skryté vrstvy. Zde se zejména zaměříme na počet neuronů, skrytých vrstev a iterací.



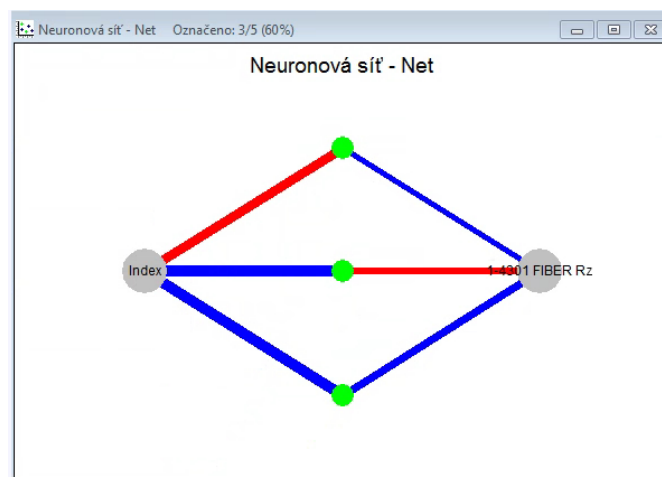
Obr. 69 Skrytá vrstva neuronové sítě

Počet neuronů jsme upravili oproti původní myšlence ze dvou na tři. Čím větší počet, tím je výpočet komplikovanější. Zároveň však je výsledek přesnější. Pro náš případ stačí jedna skrytá vrstva. Počet iterací je odvozen ze zkušeností, proto 10 000.



Obr. 70 Naučená neuronová síť

Obrázek 70 nám ukazuje naučenou síť po 10 000 iteracích s nalezením střední chyby pro učící data = 0,0038.



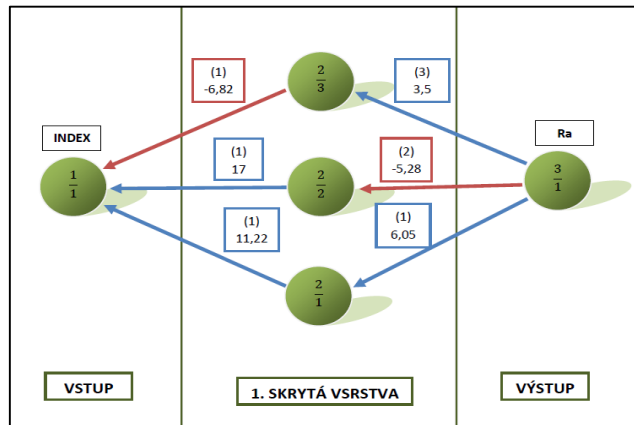
Obr. 71 Schéma neuronové sítě z QC.Expert

Program TriloByte nám po naučení sítě zobrazí veškeré potřebné hodnoty v okně Protokol. Na obrázku 71 vidíme vykreslené schéma neuronové sítě. Tloušťka čar je poměrově shodná s velikostí hodnot propojení neuronů. Barva čar jasně odlišuje kladné hodnoty od záporných. Naučené váhy můžeme vidět na obrázku 72. Pro lepší orientaci v těchto hodnotách jsme vytvořili grafické znázornění s hodnotami - obrázek 73.

PROTOKOL			
Váhy			
Vrstva / Neuron	1. Váha	2. Váha	3. Váha
2 / 1	11,22377409		
2 / 2	17,00200643		
2 / 3	-6,826469278		
3 / 1	6,051625675	-5,280235526	3,514319019

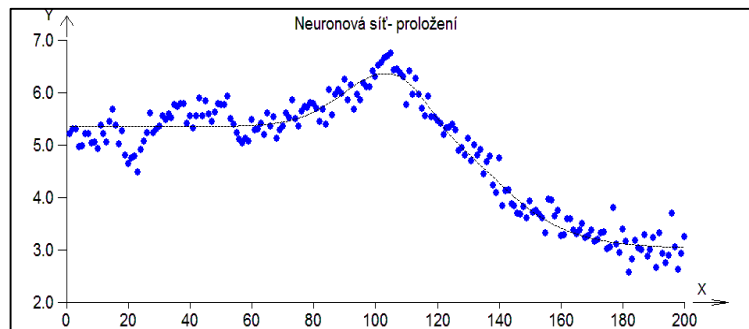
Obr. 72 Hodnoty vrstev neuronové sítě

Na schématickém zobrazení obrázku 73 vidíme jednotlivé neurony a jejich vzájemné propojení. Čísla v závorkách jsou váhy propojení a čísla pod nimi jsou hodnoty těchto propojení. Hodnoty jsme zaokrouhlili. Směr šipek se v průběhu výpočtu nemění, proto mohou hodnoty nabývat záporných hodnot.

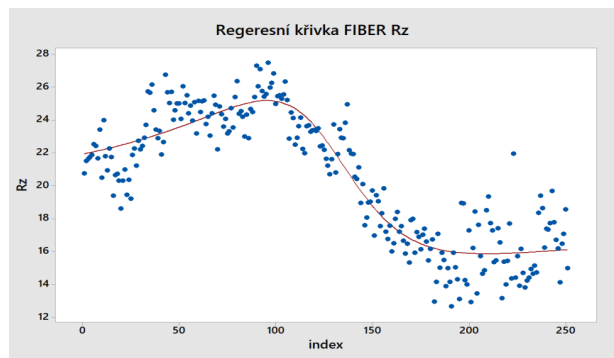


Obr. 73 Schéma neuronové sítě FIBER Rz

Výsledkem takto naučené neuronové sítě je také křivka vykreslující průběh naučené neuronové sítě. Protokol upevňuje správnost větou: „Model je významný.“



Obr. 74 QC.Expert průběh neur. sítě pro Fiber Rz



Obr. 75 Regrese FIBER Rz

Je zřejmé, že křivky jsou si podobné. Zároveň protokol programu QC.Expert ujišťuje řádkem: „Model je významný“. Můžeme tedy uznat regrese křivku FIBER Rz za správnou.

6.3.1 1.4301 FIBER Ra

Výpočet:

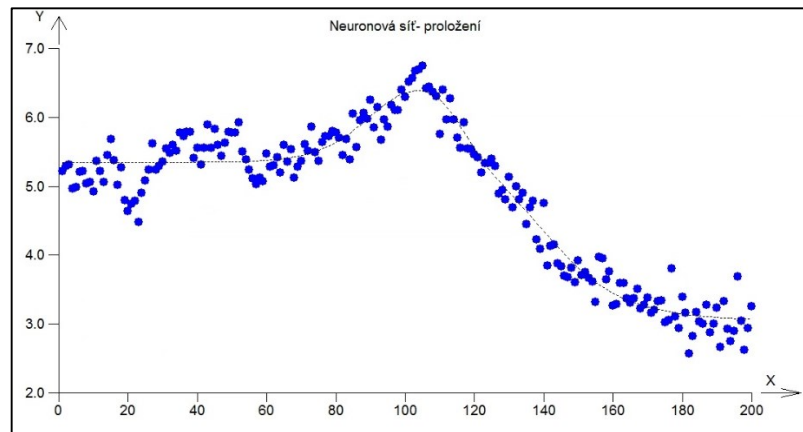
Počet iterací : 10 000

Střední chyba pro učící data : 0,0019

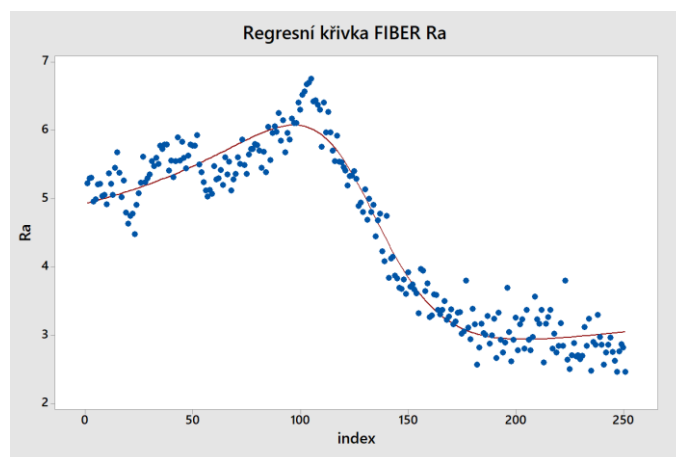
Model je významný

Váhy

Vrstva / Neuron	1. Váha	2. Váha	3. Váha
2 / 1	16,6343		
2 / 2	11,3712		
2 / 3	6,8217		
3 / 1	-5,3621	6,05712	-3,4097



Obr. 76 QC.Expert průběh neur. sítě pro Fiber Ra



Obr. 77 Regrese FIBER Ra

Křivky jsou si podobné a model je významný. Regresní křivka FIBER Ra je správná.

6.3.2 1.4301 CO2 Rz

Výpočet

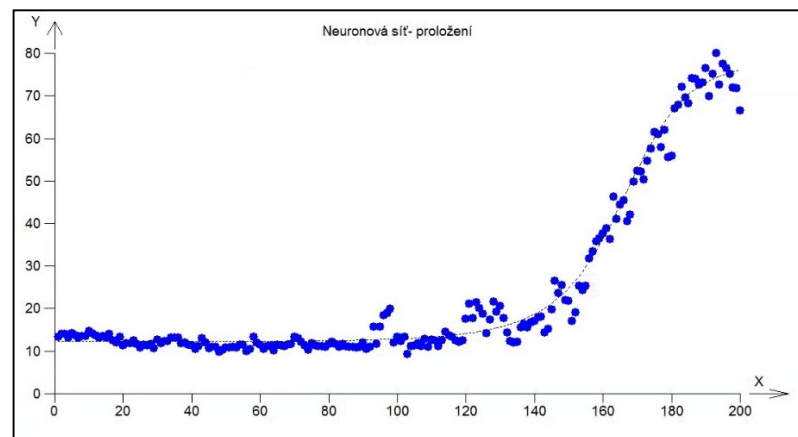
Počet iterací : 10 000

Střední chyba pro učící data : 0,0005

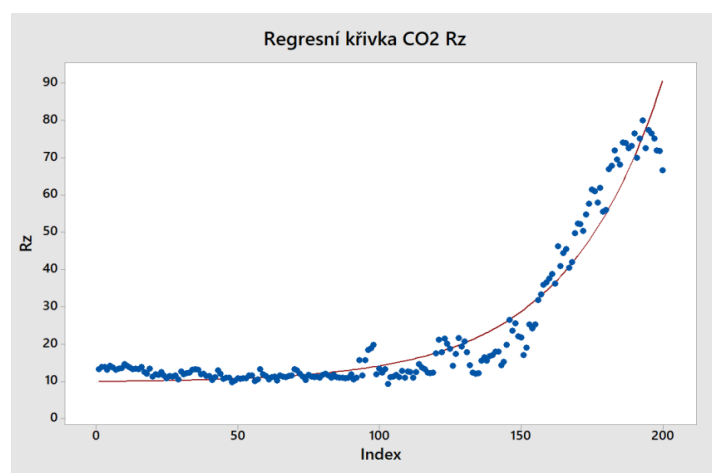
Model je významný

Váhy

Vrstva / Neuron	1. Váha	2. Váha	3. Váha
2 / 1	11,5196		
2 / 2	5,1999		
2 / 3	-5,9867		
3 / 1	3,55312	3,164	-2,7826



Obr. 78 QC.Expert průběh neur. sítě pro CO2 Rz



Obr. 79 Regrese CO2 Rz

Křivky jsou si podobné a model je významný. Regresní křivka CO2 Rz je správná.

6.3.3 1.4301 CO2 Ra

Výpočet

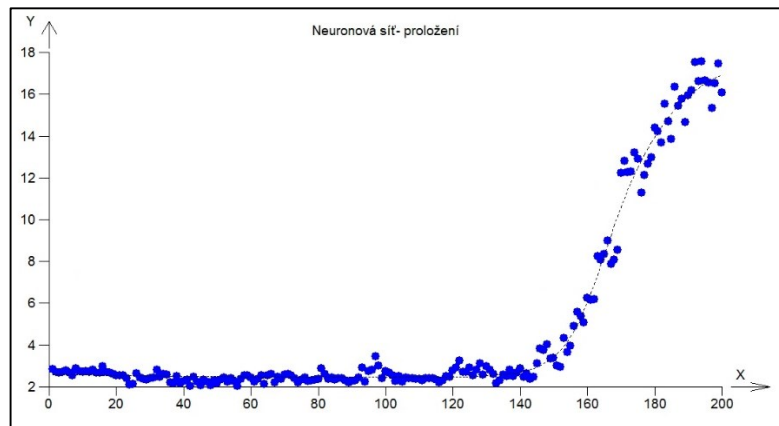
Počet iterací : 10000

Střední chyba pro učící data : 0,0007

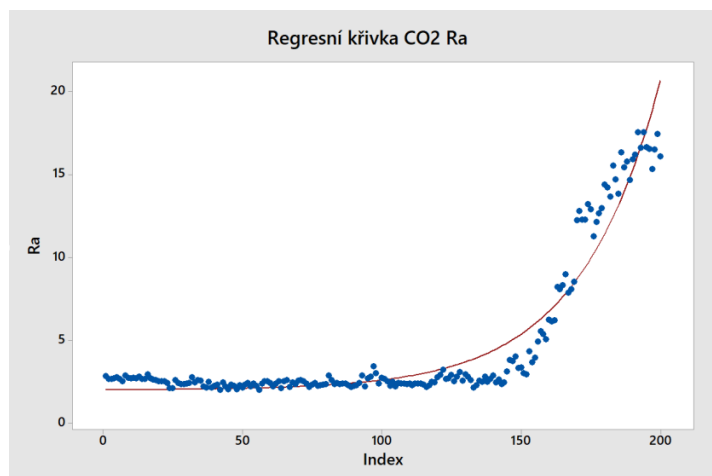
Model je významný

Váhy

Vrstva / Neuron	1. Váha	2. Váha	3. Váha
2 / 1	-4,8314		
2 / 2	6,8805		
2 / 3	-3,6939		
3 / 1	-2,7877	5,6888	3,5074



Obr. 80 QC.Expert průběh neur. sítě pro CO2 Rz



Obr. 81 Regrese CO2 Ra

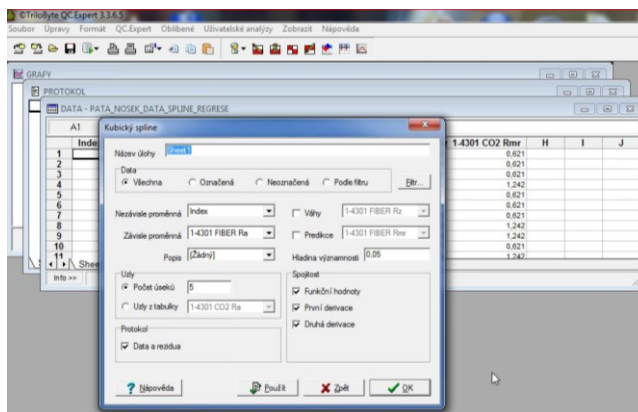
Křivky jsou si podobné a model je významný. Regresní křivka CO2 Ra je správná.

6.4 Určení oblastí heterogenního povrchu

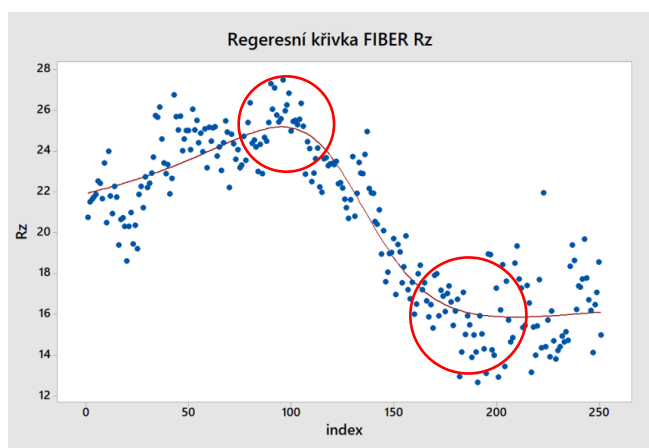
Závěrečným krokem je samotné rozdělení povrchů na jednotlivé oblasti. K rozdělení využijeme matematickou metodu nalezení lokálních extrémů. K nalezení využijeme program QC.Expert. Ten proloží data kubickým splinem, rozdělí ho na několik oblastí a nalezne lokální extrémů. Počet oblastí můžeme měnit. Opět projdeme podrobněji postup pro soubor dat FIBER Rz. U ostatních je postup stejný, proto u nich zhodnotíme pouze výsledky.

6.4.1 1.4301 FIBER Rz

Pro vyvolání příkazu proložení kubickým splinem a výpočet požadovaných hodnot vybereme cestu QC.Expert → Regrese → Kubický spline. Dále musíme nastavit parametry jako závisle a nezávisle proměnnou, počet úseků apod. Naše nastavení vidíme na obrázku 82.

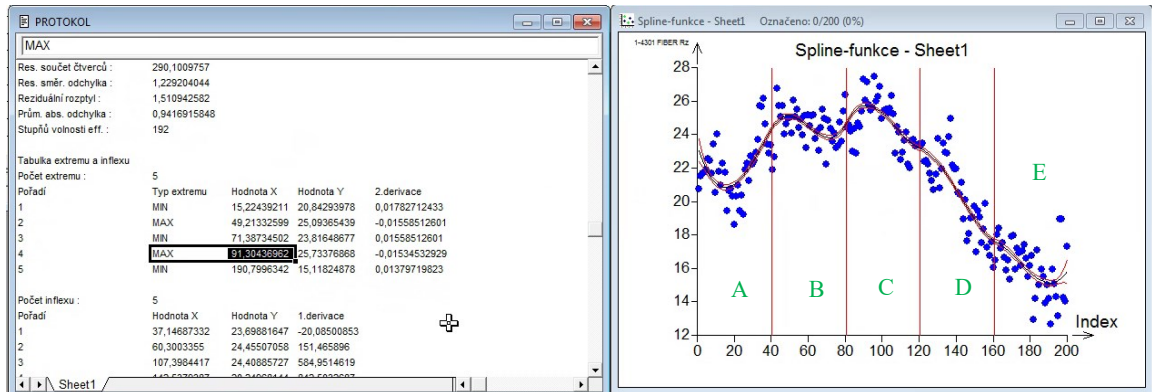


Obr. 82 QC.Expert - Kubický spline



Obr. 83 Oblasti zájmu regrese FIBER Rz

Na obrázku 83 vidíme červenými kruhy zvýrazněny oblasti přechodů heterogenního povrchu. Určit je můžeme díky průběhu nelineární regresní křivky. Na tyto oblasti se zaměříme u hledání extrémů.



Obr. 84 Hodnoty extrémů a proložení spline u FIBER Rz

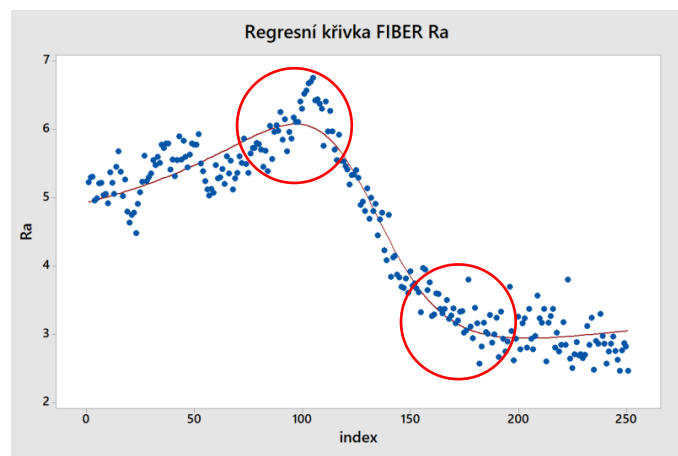
Tabulku hodnot a graf na obrázku 84 nám program vypracuje sám po odsouhlasení příkazu. Na grafu vidíme, že zvýrazněné oblasti na nelineární regresní křivce se nachází v zeleně označených oblastech C a E. Podle rozpětí hodnot osy *Index* v oblastech C a E přiřadíme extrémy. Pro oblast C je to Hodnota X_1 : 91,304 tedy index 91. Pro oblast E je to Hodnota X_2 : 190,7996 tedy index 191. Z toho vyplývá závěrečné tvrzení:

Hranice mezi primární a sekundární oblastí heterogenního povrchu je v naměřené hodnotě s číslem pořadí 91.

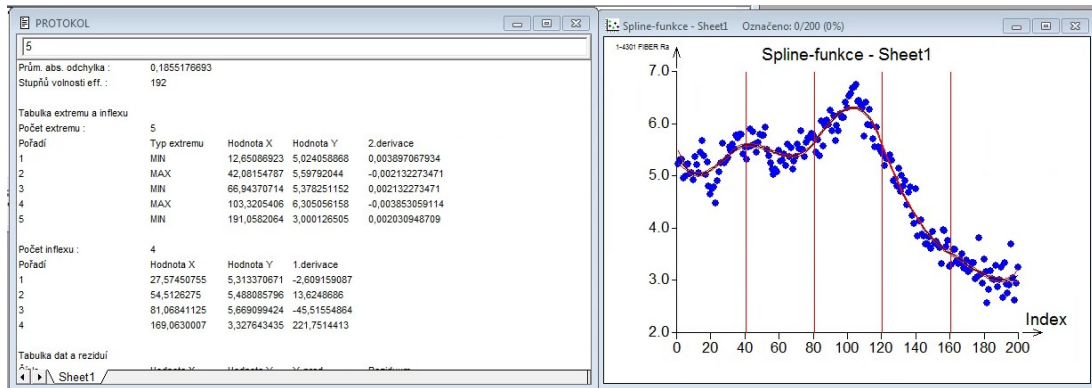
Hranice mezi sekundární a terciální oblastí heterogenního povrchu je v naměřené hodnotě s číslem pořadí 191.

Pozor na přiřazování jmen oblastí. Primární oblast je vždy ta nejlépe obrobena. To však neznamená, že musí nést nejmenší hodnoty amplitudových parametrů. Primární oblast je vždy vstupní oblast. Zde energie, či nástroj vstupuje do obrobku.

6.4.2 1.4301 FIBER Ra



Obr. 85 Oblasti zájmu regrese FIBER Ra



Obr. 86 Hodnoty extrémů a proložení spline u FIBER Ra

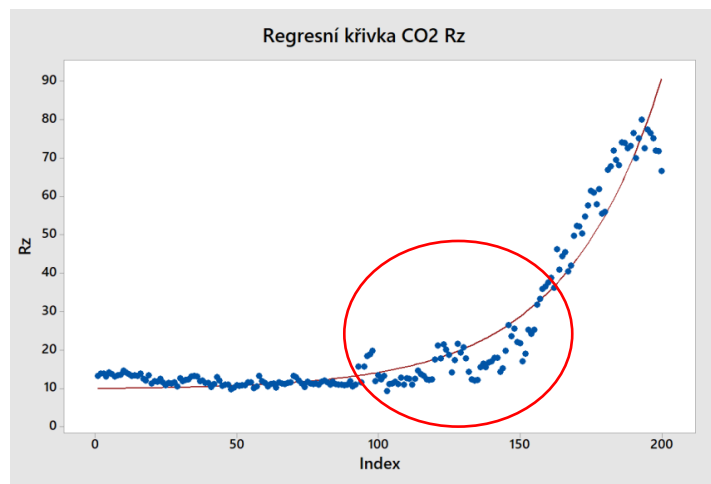
Hledané extrémy:

- Hodnota $X_1 = 103,32$ tedy index 103
- Hodnota $X_2 = 191,058$ tedy index 191

Hranice mezi primární a sekundární oblastí heterogenního povrchu je v naměřené hodnotě s číslem pořadí 103.

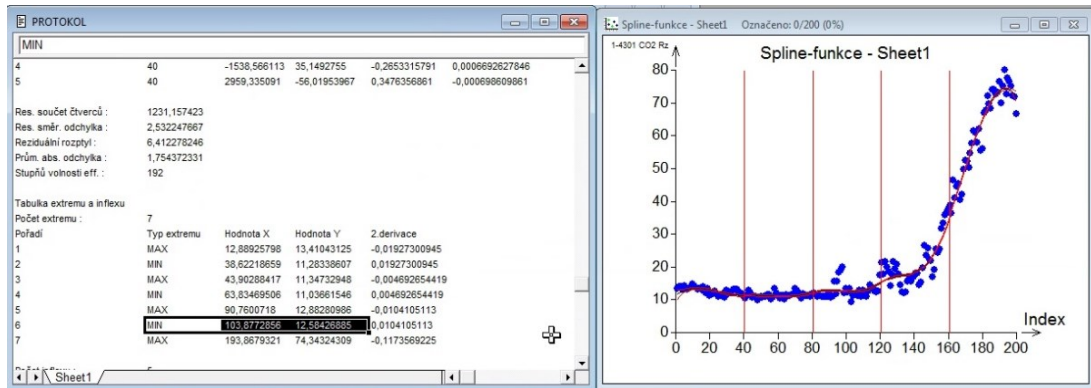
Hranice mezi sekundární a terciální oblastí heterogenního povrchu je v naměřené hodnotě s číslem pořadí 191.

6.4.3 1.4301 CO2 Rz



Obr. 87 Oblast zájmu regrese CO2 Rz

U hodnot ze souboru CO2 laserem řezaných vzorků je vidět, že nelineární regrese odhalila pouze jedno místo přechodu. To znamená nepřítomnost terciální oblasti na ploše vzorku.



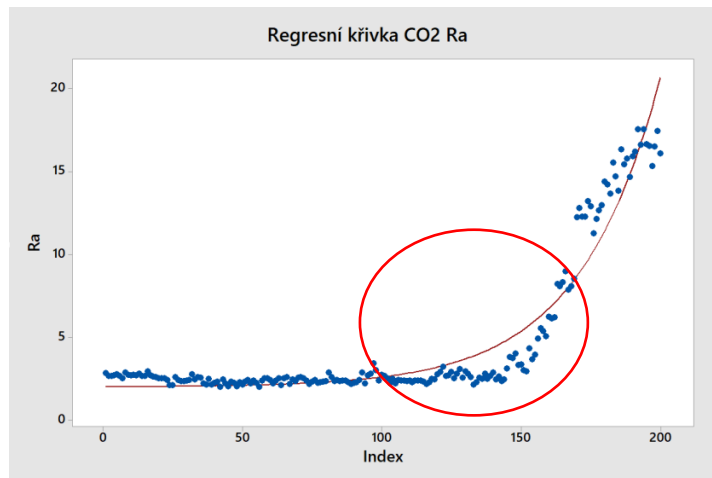
Obr. 88 Hodnoty extrémů a proložení spline u CO2 Rz

Hledaný extrém:

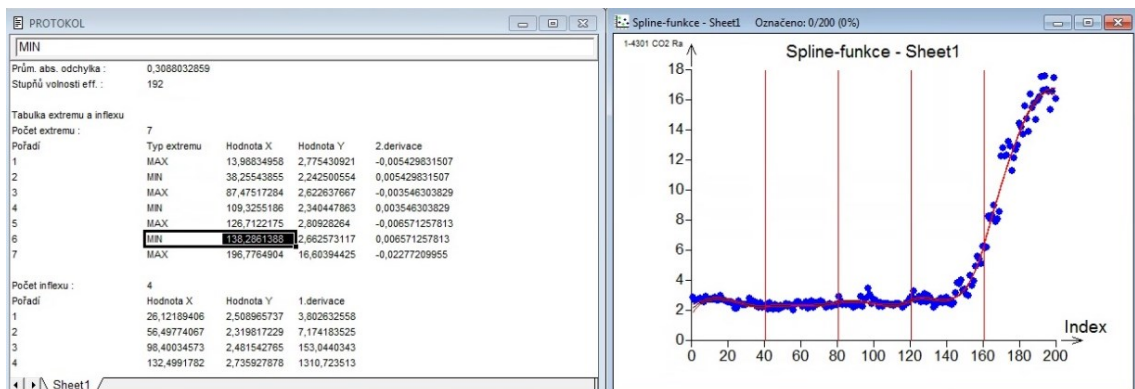
- Hodnota $X_1 = 103,877$ tedy index 104

Hranice mezi primární a sekundární oblastí heterogenního povrchu je v naměřené hodnotě s číslem pořadí 104.

6.4.4 1.4301 CO2 Ra



Obr. 89 Oblast zájmu regrese CO2 Ra



Obr. 90 Hodnoty extrémů a proložení spline u CO2 Ra

Hledaný extrém:

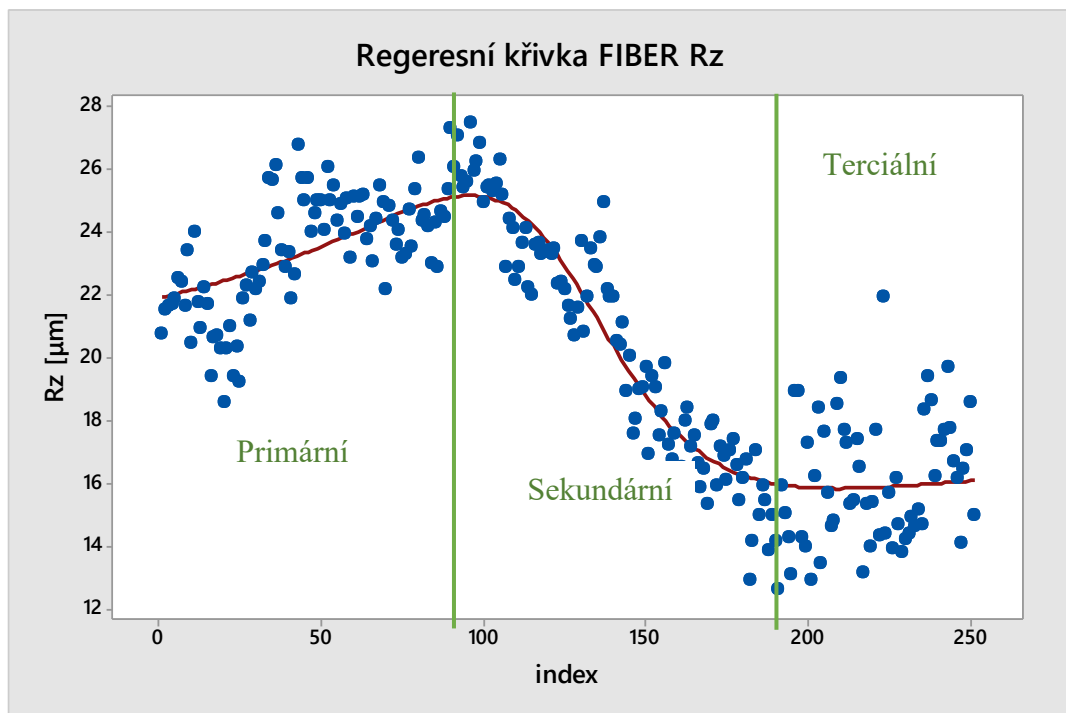
- Hodnota $X_1 = 138,286$ tedy index 138

Hranice mezi primární a sekundární oblastí heterogenního povrchu je v naměřené hodnotě s číslem pořadí 138.

6.5 Základní statistické hodnocení nalezených oblastí

Díky nalezení hranic jednotlivých oblastí můžeme rozdělit soubory hodnot na daný počet částí. Tyto pak hodnotíme samostatně a získáme hodnoty drsnosti rozdělených povrchů. Samotné dělicí body ze souboru dat odstraníme pro jejich nedefinované zařazení do jedné nebo druhé oblasti. Data jsou připravena na zhodnocení.

6.5.1 1.4301 FIBER Rz



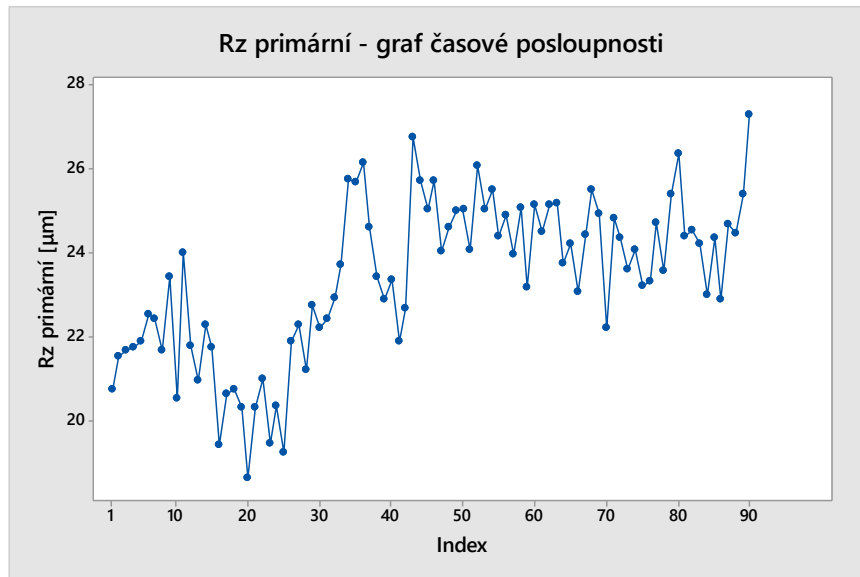
Obr. 91 Vyznačení oblastí na křivce pro Rz

Primární oblast:

Hranice je v hodnotě s indexem 91

Tab. 3 Základní statistika – primární části FIBER Rz

Počet hodnot	Arit. Průměr [μm]	Odchylka průměru [μm]	Minimum [μm]	Medián [μm]	Maximum [μm]
90	23,386	0,199	18,608	23,639	27,289



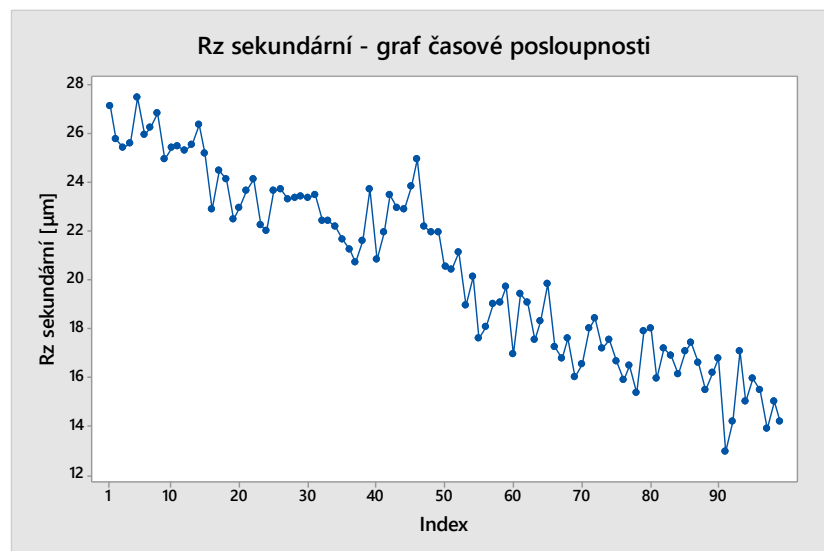
Obr. 92 Graf časové posloupnosti pro Rz primární oblast

Sekundární:

Hranice je v hodnotě s indexem 191

Tab. 4 Základní statistika - sekundární části FIBER Rz

Počet hodnot	Arit. Průměr [µm]	Odchylka průměru [µm]	Minimum [µm]	Medián [µm]	Maximum [µm]
99	20,452	0,375	12,943	20,69	27,478

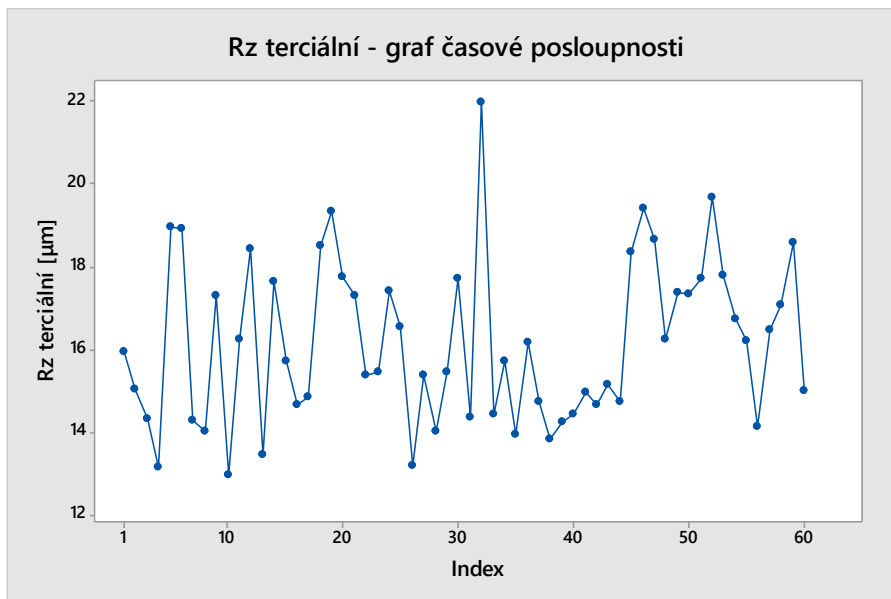


Obr. 93 Graf časové posloupnosti pro Rz sekundární oblast

Terciální:

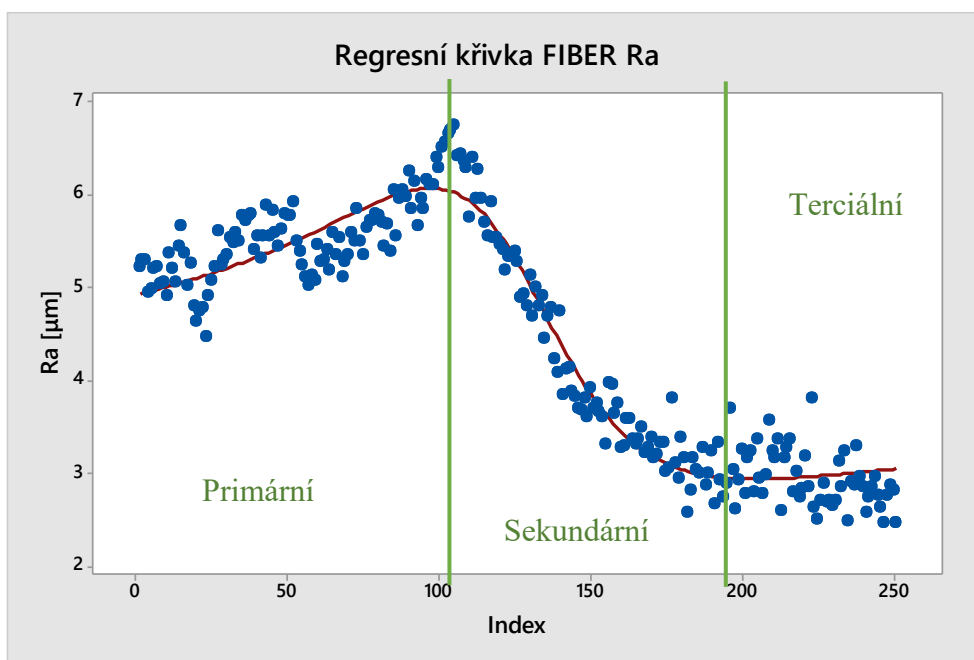
Tab. 5 Základní statistika - terciální části FIBER Rz

Počet hodnot	Arit. Průměr [µm]	Odchylka průměru [µm]	Minimum [µm]	Medián [µm]	Maximum [µm]
60	16,147	0,254	12,936	15,819	21,957



Obr. 94 Graf časové posloupnosti pro Rz primární oblast

6.5.2 1.4301 FIBER Ra



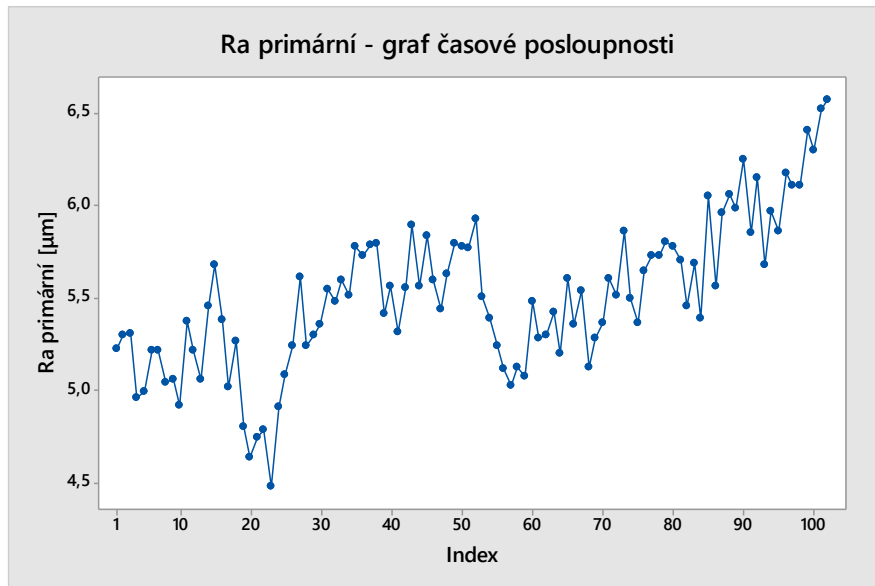
Obr. 95 Vyznačení oblastí na křivce pro Ra

Primární:

Hranice je v hodnotě s indexem 103

Tab. 6 Základní statistika - primární části FIBER Ra

Počet hodnot	Arit. Průměr [µm]	Odchylka průměru [µm]	Minimum [µm]	Medián [µm]	Maximum [µm]
102	5,5071	0,0401	4,48	5,4975	6,569



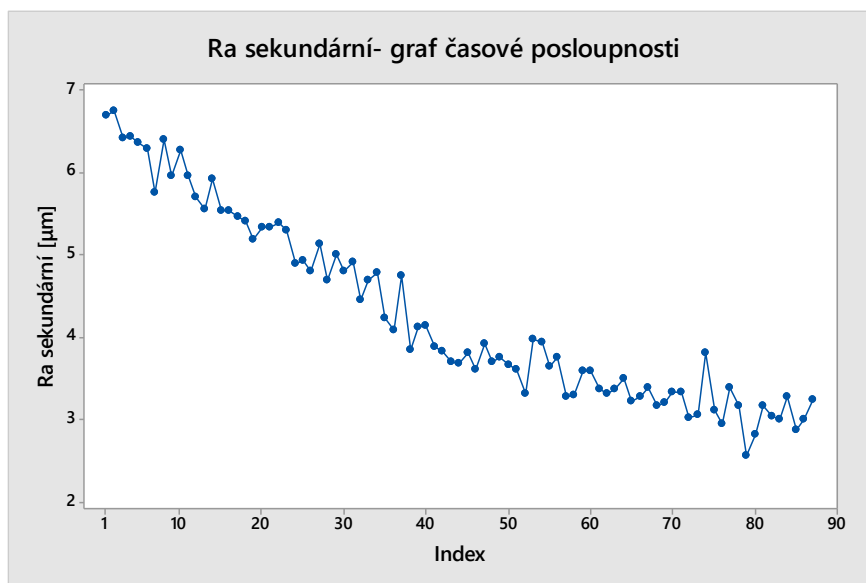
Obr. 96 Graf časové posloupnosti pro Ra primární oblast

Sekundární:

Hranice je v hodnotě s indexem 191

Tab. 7 Základní statistika - sekundární části FIBER Ra

Počet hodnot	Arit. Průměr [μm]	Odchylka průměru [μm]	Minimum [μm]	Medián [μm]	Maximum [μm]
87	4,285	0,121	2,568	3,842	6,752

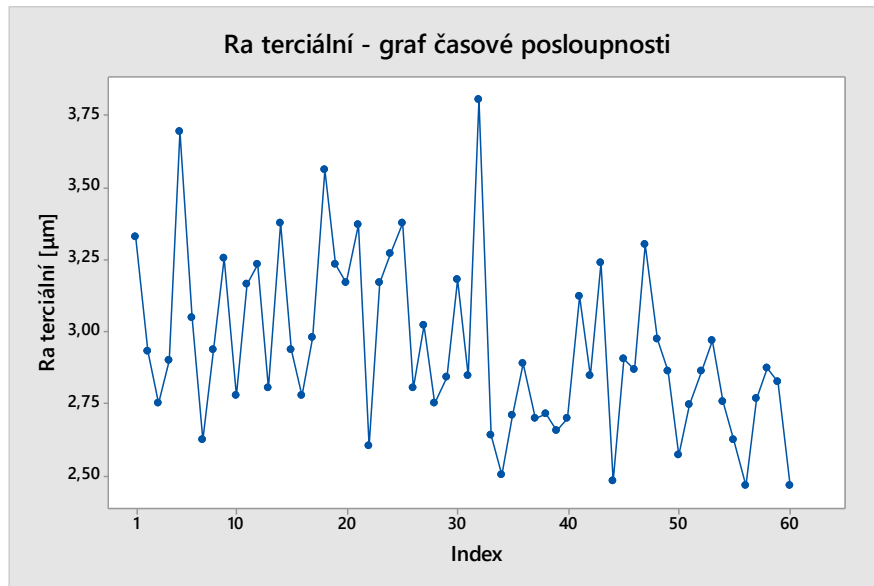


Obr. 97 Graf časové posloupnosti pro Ra sekundární oblast

Terciální:

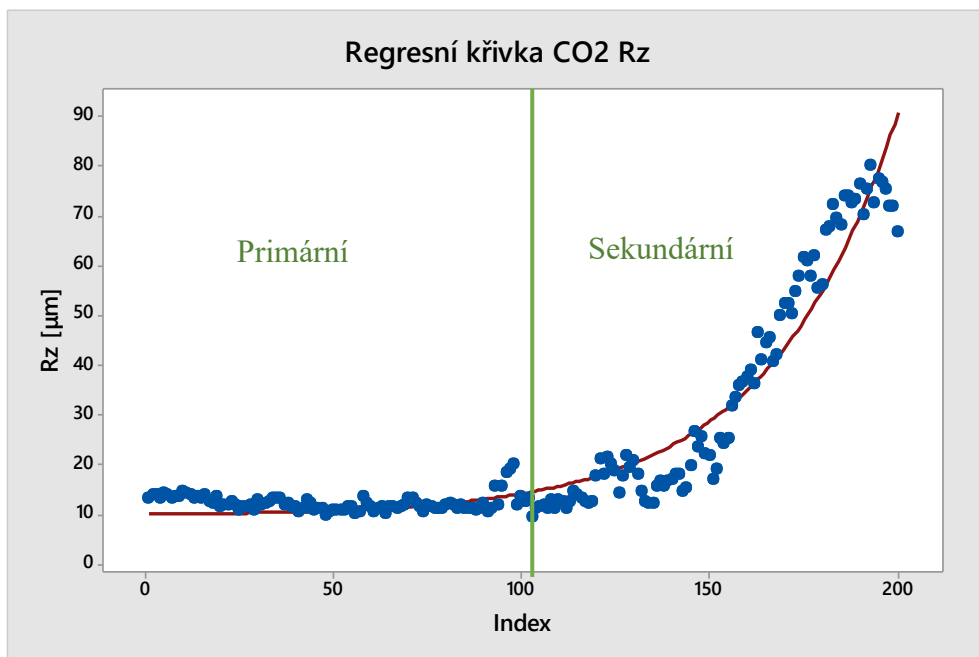
Tab. 8 Základní statistika - terciální části FIBER Ra

Počet hodnot	Arit. Průměr [μm]	Odchylka průměru [μm]	Minimum [μm]	Medián [μm]	Maximum [μm]
60	2,9408	0,0387	2,464	2,868	3,803



Obr. 98 Graf časové posloupnosti pro Ra terciální oblast

6.5.3 1.4301 CO2 Rz



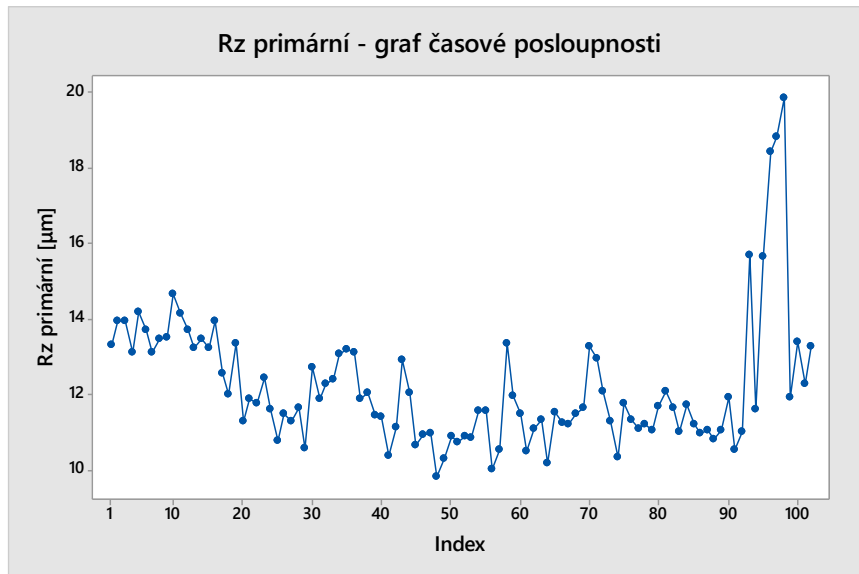
Obr. 99 Vyznačení na křivce pro Rz

Primární:

Hranice je v hodnotě s indexem 104

Tab. 9 Základní statistika - primární části FIBER Rz

Počet hodnot	Arit. Průměr [µm]	Odchylka průměru [µm]	Minimum [µm]	Medián [µm]	Maximum [µm]
102	12,193	0,169	9,825	11,706	19,839

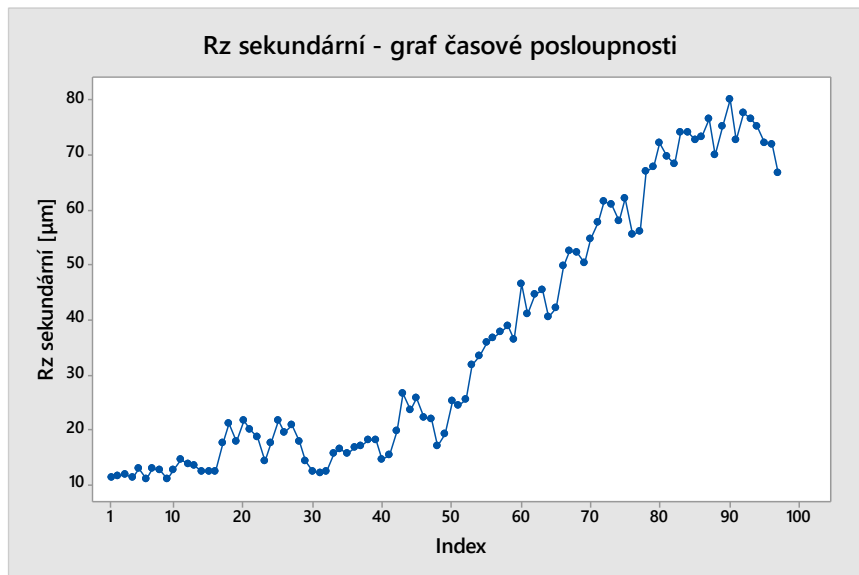


Obr. 100 Graf časové posloupnosti pro Rz primární oblast

Sekundární:

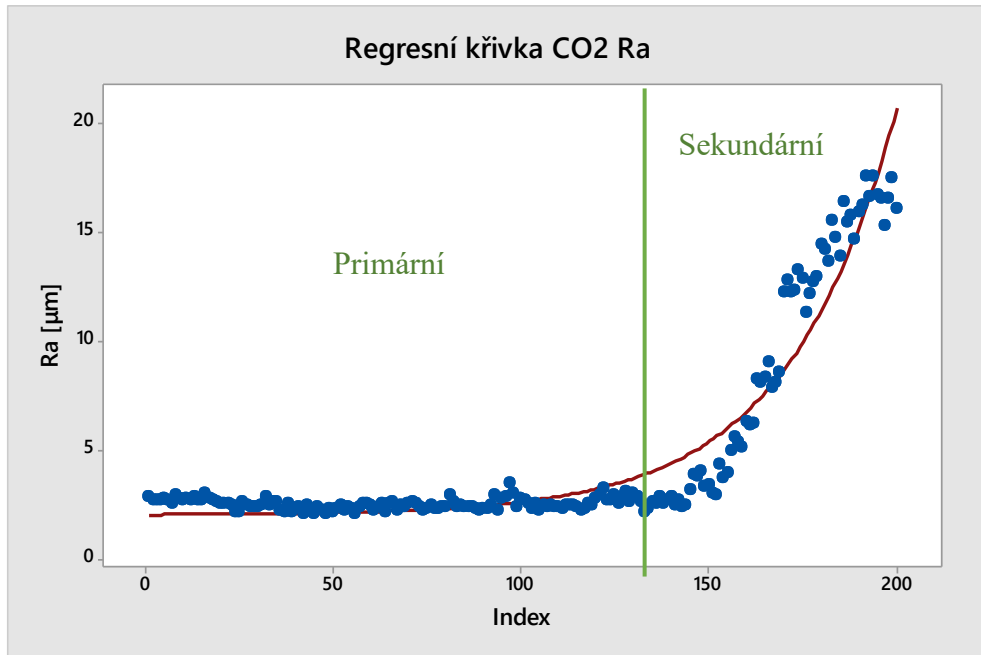
Tab. 10 Základní statistika - sekundární části FIBER Rz

Počet hodnot	Arit. Průměr [μm]	Odchylka průměru [μm]	Minimum [μm]	Medián [μm]	Maximum [μm]
97	36,12	2,38	10,98	25,26	79,95



Obr. 101 Graf časové posloupnosti pro Rz sekundární oblast

6.5.4 1.4301 CO2 Ra



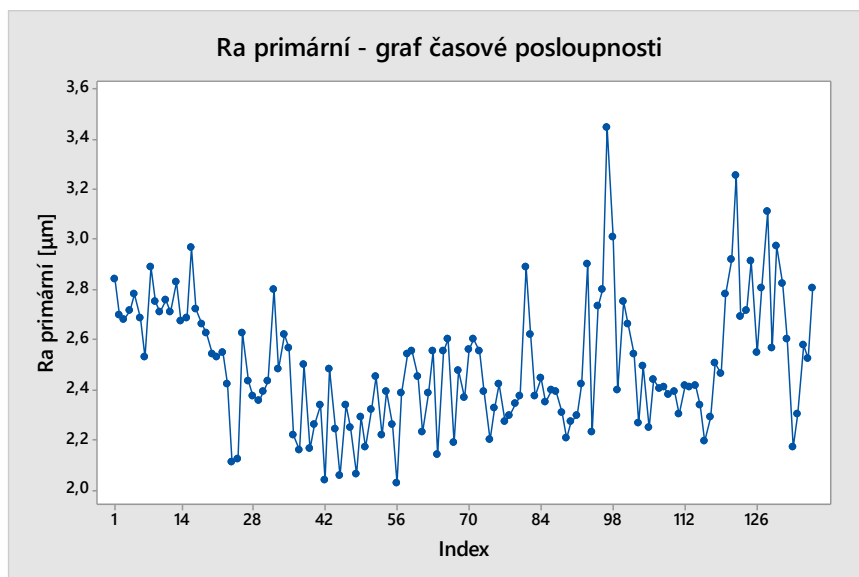
Obr. 102 Vyznačení na křivce pro Ra

Primární:

Hranice je v hodnotě s indexem 138

Tab. 11 Základní statistika - primární části FIBER Ra

Počet hodnot	Arit. Průměr [µm]	Odchylka průměru [µm]	Minimum [µm]	Medián [µm]	Maximum [µm]
137	2,4959	0,0215	2,027	2,448	3,443

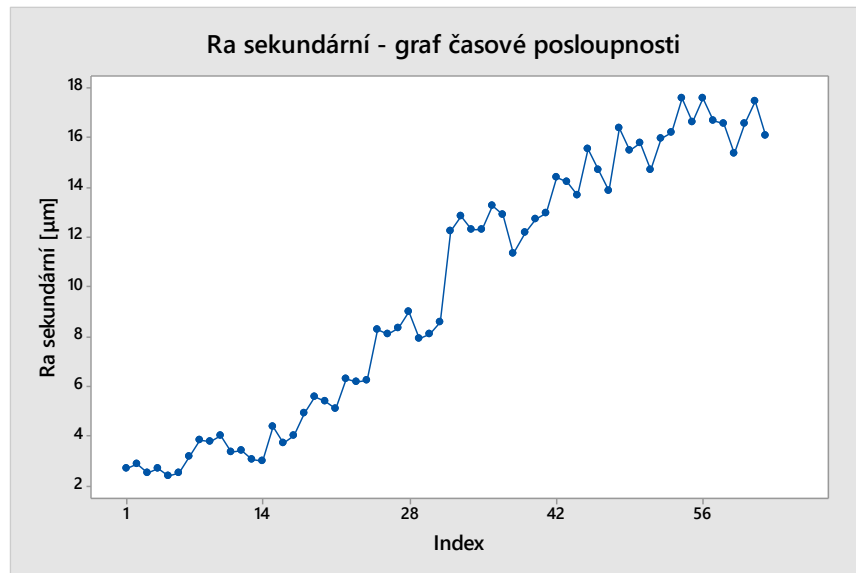


Obr. 103 Graf časové posloupnosti pro Ra primární oblast

Sekundární:

Tab. 12 Základní statistika - sekundární části FIBER Ra

Počet hodnot	Arit. Průměr [μm]	Odchylka průměru [μm]	Minimum [μm]	Medián [μm]	Maximum [μm]
62	9,81	0,676	2,375	10,135	17,552



Obr. 104 Graf časové posloupnosti pro Ra sekundární oblast

ZÁVĚR

V této diplomové práci jsme potvrdili tvrzení, že lze heterogenní povrch rozdělit na oblasti primární, sekundární a popř. terciální. Pro měření drsnosti povrchu jsme vybrali parametry Rz a Rz, protože nejlépe nesou informaci o heterogenitě povrchu. Pomocí bezkontaktního 2D měřicího přístroje TalySurf CLI 500 jsme tyto hodnoty změřili a následně statisticky zpracovali v programu Minitab 17. Ve stejném programu jsme vytvořili nelineární regresní křivky, které nám určily přibližná místa hranic jednotlivých oblastí heterogenního povrchu. Správnost křivek jsme si ověřili pomocí umělé neuronové sítě v softwaru QC.Expert, která vykreslila křivky významně podobné těm regresním. Tím potvrdila jejich správnost. Ve stejném programu jsme díky kubickému splinu získali extrémní křivky, které jasně ukázaly na jeden bod, tedy hranici mezi oblastmi.

U našich zkoumaných vzorků jsou výsledky následující. Pro data z laseru FIBER jsme díky nelineární regresní křivce našli dvě dělicí hodnoty a tedy tři oblasti. Pro data z laseru CO2 byla nalezena pouze jedna rozdělovací hodnota. Tedy povrch má jen primární a sekundární oblast. Jednotlivé hodnoty vidíme v tabulce 13.

Tab. 13 Hraniční hodnoty

	Pořadové číslo hodnoty	
	Primární na Sekundární	Sekundární na Terciální
1.4301 FIBER Rz	91	191
1.4301 FIBER Ra	103	191
1.4301 CO2 Rz	104	Není
1.4301 CO2 Ra	138	Není

Po nalezení dělicích hodnot následuje hodnocení rozdělených souborů. Ty se statisticky hodnotí každý zvlášť. Pro naše vzorky jsme vybrali pouze základní statistické hodnoty, které vidíte v tabulce 14.

Tab. 14 Přehled základních statistických hodnot pro FIBER

1.4301 FIBER							
Parametr	Oblast	Počet hodnot	Aritmetický průměr [μm]	Odchylna průměru [μm]	Minimum [μm]	Medián [μm]	Maximum [μm]
Rz	Primární	90	23,386	0,199	18,608	23,639	27,289
	Sekundární	99	20,452	0,375	12,943	20,6	27,478
	Terciální	60	16,147	0,254	12,936	15,819	21,957
Ra	Primární	102	5,5071	0,0401	4,48	5,4975	6,569
	Sekundární	87	4,285	0,121	2,568	3,842	6,752
	Terciální	60	2,9408	0,0387	2,464	2,868	3,803

Tab. 15 Přehled základních statistických hodnot pro CO2

1.4301 CO2							
Parametr	Oblast	Počet hodnot	Aritmetický průměr [μm]	Odchylka průměru [μm]	Minimum [μm]	Medián [μm]	Maximum [μm]
Rz	Primární	102	12,193	0,169	9,825	11,706	19,839
	Sekundární	97	36,12	2,38	10,98	25,26	79,95
Ra	Primární	137	2,4959	0,0215	2,027	2,448	3,443
	Sekundární	62	9,81	0,676	2,375	10,135	17,552

Postup popsany v diplomové práci je spíše určen laboratorním a vědeckým účelům. Pro uvedení podobného postupu do strojírenské praxe by v dnešní rychlé době bylo nutné urychlit proces vyhodnocení a nalezení jednotlivých oblastí.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie: Advanced methods of material removal*. Košice: Vienaľa, 2000. ISBN 80-7099-430-4.
- [2] PATA, Vladimír. *Moderní způsoby hodnocení drsnosti strojírenských povrchů na bázi matematické statistiky: Modern ways of assessing the roughness of engineering surfaces based on mathematical statistics : teze přednášek ke jmenování profesorem*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2019. ISBN 978-80-7454-829-1.
- [3] Structural Changes in Metals during Laser Cutting. *Scientific.net* [online]. Dostupné z: <https://www.scientific.net/MSF.919.25>
- [4] Řezání vodním paprskem | MOTROM, s.r.o.. Strojírenská výroba | *MOTROM, s.r.o.* [online]. Copyright © 2020 [cit. 15.01.2020]. Dostupné z: <https://motrom.cz/rezani-vodnim-paprskem/>
- [5] SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění II: obrábění laserem, plazmou, ultrazvukem, elektronovým, iontovým a vodním paprskem*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2016. ISBN 978-80-248-3944-8.
- [6] KUMAR, K., Nisha KUMARI a J. Paulo DAVIM. *Non-conventional machining in modern manufacturing systems*. Hershey PA: IGI Global, [2019].
- [7] Laser cutting of aluminium-alumina metal matrix composite - ScienceDirect. *ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books*. [online]. Copyright © 2019 Elsevier Ltd. All rights reserved. [cit. 15.01.2020]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0030399219302506?via%3Dihub>
- [8] Laser - FYZIKA 007. *FYZIKA 007* [online]. Copyright © 2004 David Monniaux [cit. 16.01.2020]. Dostupné z: <http://www.fyzika007.cz/fyzika-mikrosveta/laser>
- [9] CO2 lasery - První hanácká BOW. *Váš svět strojů... - První hanácká BOW* [online]. Copyright © Copyright První Hanácká BOW spol. s r.o., 2018 [cit. 16.01.2020]. Dostupné z: <https://www.bow.cz/filter/co-sub-2-sub-lasery-c889>
- [10] PETERKA, Pavel. *Vláknové lasery*. Praha: Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, Academia, 2014. ISSN 14-35256S. [cit. 16.01.2020] Dostupné z: <https://www.academia.cz/edice/kniha/vlaknove-lasery>

- [11] Princip vláknového FIBER LASERU - ElektroPrůmysl.cz. *informace ze světa průmyslu a elektrotechniky - ElektroPrůmysl.cz* [online]. Copyright © 2011 [cit. 17.01.2020]. Dostupné z: <https://www.elektroprumysl.cz/technologicke-novinky/princip-vlaknoveho-fiber-laseru>
- [12] Underwater cutting of 50 and 60 mm thick stainless steel plates using a 6-kW fiber laser for dismantling nuclear facilities - ScienceDirect. *ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books.* [online]. Copyright © 2019 Elsevier Ltd. All rights reserved. [cit. 17.01.2020]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0030399218320267?via%3Dihub>
- [13] Study on material transfer and surface properties during fiber laser cutting of A653 galvanized steel sheet | SpringerLink. *Home - Springer* [online]. Copyright © 2019 Springer Nature Switzerland AG. Part of [cit. 18.01.2020]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs40430-019-1842-4>
- [14] *Reference Library - Confluent Medical* [online]. Copyright © [cit. 18.01.2020]. Dostupné z: https://nitinol.com/wp-content/uploads/2017/05/Ultrafast-Laser-Cutting-of-Low-Mass-Superelastic-Nitinol-Parts-5_18_17-2.pdf
- [15] BUMBÁLEK, Bohumil, Vladimír ODVODY a Bohuslav OŠŤÁDAL. *Drsnost povrchu*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1989, 338 s.
- [16] Experimental Study of Surface Roughness and Micro-Hardness Obtained by Cutting Carbon Steel with Abrasive WaterJet and Laser Beam Technologies. *Object moved* [online]. Copyright © 2016 Science and Education Publishing. All Rights Reserved. [cit. 19.01.2020]. Dostupné z: <http://pubs.sciepub.com/ajme/4/5/2/>
- [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] MSEC2019-2874 SURFACE ROUGHNESS MEASUREMENT OF ADDITIVE MANUFACTURED PARTS USING FOCUS VARIATION MICROSCOPY AND STRUCTURED LIGHT SYSTEM | Request PDF. *ResearchGate* | *Find and share research* [online]. Copyright © ResearchGate 2020. All rights reserved. [cit. 19.01.2020]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/331984194_MSEC2019-2874_SURFACE_ROUGHNESS_MEASUREMENT_OF_ADDITIVE_MANUFACTURED_PARTS_USING_FOCUS_VARIATION_MICROSCOPY_AND_STRUCTURED_LIGHT_SYSTEM
- [19] Taylor Hobson | Metrology | Form | Surface | Equipment | Instruments. *Taylor Hobson* | *Metrology* | *Form* | *Surface* | *Equipment* | *Instruments* [online]. Copyright ©2020 AMETEK.Inc. All rights reserved. [cit. 19.01.2020]. Dostupné z: <https://www.taylor-hobson.com/>
- [20] NewView 8000 - *Optické profiloměry* | *OptiXs* [online]. Copyright © [cit. 19.01.2020]. Dostupné z: <https://www.optixs.cz/mereni-povrchu-38k/opticke-profilometry-87k/newview-8000-126p>
- [21] PATA, Vladimír a Milena KUBIŠOVÁ. *Statistické metody hodnocení jakosti strojírenských povrchů*. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati, Fakulta technologická, 2018. ISBN 978-80-7454-740-9.
- [22] MELOUN, Milan a Jiří MILITKÝ. *Kompendium statistického zpracování dat*. Praha: Karolinum, 2012, 982 s. ISBN 9788024621968.
- [23] MELOUN, Milan, Jiří MILITKÝ a Martin HILL. *Statistická analýza vícerozměrných dat v příkladech*. Vyd. 2. Praha: Academia, 2012, 750 s. Gerstner. ISBN 9788020020710.
- [24] ZELINKA, Ivan, František VČELAŘ a Marek ČANDÍK. *Fraktální geometrie: principy a aplikace*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-191-8.
- [25] HENDL, Jan. *Přehled statistických metod: analýza a metaanalýza dat*. Praha: Portál, 2012. s. 499. ISBN 978-80-262-0200-4. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:94b4a925-d18a-49ba-a145-fad3f3f883a1>
- [26] TriloByte Statistical Software | *TriloByte Home* [online]. Copyright © [cit. 10.02.2020]. Dostupné z: https://www.trilobyte.cz/downloadfree/qcemanual/cubic_spline.pdf

- [27] Martin Sebera - *FSpS MU - Vícerozměrné statistické metody. 302 Found* [online]. Copyright © 2012 [cit. 24.04.2020]. Dostupné z: http://www.fsps.muni.cz/~sebera/vicerozmerna_statistika_linregrese.html
- [28] TUČKOVÁ, Jana. *Vybrané aplikace umělých neuronových sítí při zpracování signálů*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2009. ISBN 978-80-01-04229-8.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

i	Index pořadí
y_i	Obecná hodnota výšky naměřeného profilu
x	Proměnná hodnota
N	Počet parametrů
\bar{x}	Aritmetický průměr
\tilde{x}	Medián
s	Standartní odchylka
σ	Směrodatná odchylka rozptylu
v_x	Variační koeficient
f_j	Funkce hustoty pravděpodobnosti
p	Počet diskriminátorů
G_j	Hodnota třídy diskriminace
p	Celkový počet proměnných PCA
X_i	Proměnná PCA
Z_j	Nová proměnná PCA
g_j	Podmínka regresního modelu
∂f	Parciální derivace funkce f
b_p	Odhady regresních koeficientů
j	Index pořadí
y	Funkce

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Ukázka heterogenního povrchu	11
Obr. 2 Drsnost povrchu s ohledem na rychlost řezu vodním paprskem [4]	12
Obr. 3 Schéma konstrukce laseru [8].....	13
Obr. 4 Závislost vlnové délky na typu laseru [8].....	14
Obr. 5 Schéma CO2 laserové sestavy [9]	14
Obr. 6 Schéma vzniku CO2 laserového paprsku	15
Obr. 7 Princip čerpání aktivního vlákna přes plášť [11].....	16
Obr. 8 Schéma vláknového laseru [11].....	16
Obr. 9 Schéma principu úběru materiálu laserem [14].....	17
Obr. 10 Příklad kontaktního drsnoměru	18
Obr. 11 Dráhy 2D skenování	20
Obr. 12 Taylor Hobson CLI 500.....	21
Obr. 13 Zobrazení hodnoty Ra	22
Obr. 14 Zobrazení hodnoty Rz	22
Obr. 15 Zobrazení hodnoty Rmr	23
Obr. 16 Profil – červená tvarová nerovnost.....	24
Obr. 17 Profil - červená vlnitost	24
Obr. 18 Příklad drsnosti povrchu.....	24
Obr. 19 Černá čára = spojitá; Zelená čára = diskrétní	27
Obr. 20 Graf časové posloupnosti.....	28
Obr. 21 Histogram normálního rozdělení	28
Obr. 22 Box plot	29
Obr. 23 Dendrogram – řez na více vzdálenostech	32
Obr. 24 Postup PCA pro ordinaci	33
Obr. 25 Schéma neuronové sítě	36
Obr. 26 Materiál HARDOX.....	38
Obr. 27 Materiál 1.4301	38
Obr. 28 HARDOX – heter. povrch	38
Obr. 29 1.4301 - heter. Povrch.....	38
Obr. 30 Talysurf CLI 500	39
Obr. 31 Talysurf – nastavení ohniska	39
Obr. 32 Talysurf - detail měřící hlavy	39

Obr. 33 Nalezení píku	40
Obr. 34 Parametry nastavení.....	40
Obr. 35 Měření.....	41
Obr. 36 Naměřená plocha	41
Obr. 37 Filtr vlnitost a drsnost.....	42
Obr. 38 Jednotlivé úpravy povrchu.....	42
Obr. 39 Rozdělení na řezy	43
Obr. 40 Hodnoty a úprava.....	43
Obr. 41 Zobrazení vybraných parametrů	43
Obr. 42 Ukázka prostředí programu Minitab 17.....	44
Obr. 43 Graf časové posloupnosti FIBER Rz.....	46
Obr. 44 Graf časové posloupnosti FIBER Ra.....	46
Obr. 45 Graf časové posloupnosti CO2 Rz.....	46
Obr. 46 Graf časové posloupnosti CO2 Rz.....	47
Obr. 47 Graf CO2 Rz - ořezané data	47
Obr. 48 Graf CO2 Ra - ořezané data	48
Obr. 49 Histogram 1.4301 FIBER Rz.....	48
Obr. 50 Dvojitý histogram 1.4301 FIBER Rz	49
Obr. 51 Histogram 1.4301 FIBER Ra.....	49
Obr. 52 Dvojitý histogram 1.4301 FIBER Ra	50
Obr. 53 Histogram 1.4301 CO2 Rz	50
Obr. 54 Histogram 1.4301 CO2 Ra	51
Obr. 55 Krabicový diagram FIBER Rz	51
Obr. 57 Krabicový diagram CO2 Rz	51
Obr. 56 Krabicový diagram FIBER Ra	51
Obr. 58 Krabicový diagram CO2 Ra	51
Obr. 59 Diagram hlavních komponent	52
Obr. 60 Diagram hlavních komponent 2	53
Obr. 61 Dendrogram dat laserů pro Rz a Ra.....	53
Obr. 62 Regrese FIBER Rz.....	54
Obr. 63 Regrese FIBER Ra.....	55
Obr. 64 Regrese CO2 Rz	56
Obr. 65 Regrese CO2 Ra	57

Obr. 66 QC.Expert - nahraná data	58
Obr. 67 Schéma neuronové sítě	58
Obr. 68 Vstupní a výstupní parametry neuronové sítě	59
Obr. 69 Skrytá vrstva neuronové sítě.....	59
Obr. 70 Naučená neuronová síť	60
Obr. 71 Schéma neuronové sítě z QC.Expert	60
Obr. 72 Hodnoty vrstev neuronové sítě	60
Obr. 73 Schéma neuronové sítě FIBER Rz	61
Obr. 74 QC.Expert průběh neur. sítě pro Fiber Rz	61
Obr. 75 Regrese FIBER Rz.....	61
Obr. 76 QC.Expert průběh neur. sítě pro Fiber Ra	62
Obr. 77 Regrese FIBER Ra.....	62
Obr. 78 QC.Expert průběh neur. sítě pro CO2 Rz	63
Obr. 79 Regrese CO2 Rz	63
Obr. 80 QC.Expert průběh neur. sítě pro CO2 Rz.....	64
Obr. 81 Regrese CO2 Ra	64
Obr. 82 QC.Expert - Kubický spline	65
Obr. 83 Oblasti zájmu regrese FIBER Rz.....	65
Obr. 84 Hodnoty extrémů a proložení spline u FIBER Rz.....	66
Obr. 85 Oblasti zájmu regrese FIBER Ra.....	66
Obr. 86 Hodnoty extrémů a proložení spline u FIBER Ra.....	67
Obr. 87 Oblast zájmu regrese CO2 Rz	67
Obr. 88 Hodnoty extrémů a proložení spline u CO2 Rz.....	68
Obr. 89 Oblast zájmu regrese CO2 Ra	68
Obr. 90 Hodnoty extrémů a proložení spline u CO2 Ra.....	68
Obr. 91 Vyznačení oblastí na křivce pro Rz	69
Obr. 92 Graf časové posloupnosti pro Rz primární oblast	70
Obr. 93 Graf časové posloupnosti pro Rz sekundární oblast.....	70
Obr. 94 Graf časové posloupnosti pro Rz primární oblast	71
Obr. 95 Vyznačení oblastí na křivce pro Ra	71
Obr. 96 Graf časové posloupnosti pro Ra primární oblast	72
Obr. 97 Graf časové posloupnosti pro Ra sekundární oblast.....	72
Obr. 98 Graf časové posloupnosti pro Ra terciální oblast	73

Obr. 99 Vyznačení na křivce pro Rz.....	73
Obr. 100 Graf časové posloupnosti pro Rz primární oblast	74
Obr. 101 Graf časové posloupnosti pro Rz sekundární oblast.....	74
Obr. 102 Vyznačení na křivce pro Ra.....	75
Obr. 103 Graf časové posloupnosti pro Ra primární oblast	75
Obr. 104 Graf časové posloupnosti pro Ra sekundární oblast.....	76

Pozn.: Veškeré obrázky bez odkazu na citace jsou vlastní tvorby.

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Ukázka hodnot 1.4301 laser FIBER	45
Tab. 2 Ukázka hodnot 1.4301 laser CO2	45
Tab. 3 Základní statistika – primární části FIBER Rz	69
Tab. 4 Základní statistika - sekundární části FIBER Rz	70
Tab. 5 Základní statistika - terciální části FIBER Rz	70
Tab. 6 Základní statistika - primární části FIBER Ra	71
Tab. 7 Základní statistika - sekundární části FIBER Ra	72
Tab. 8 Základní statistika - terciální části FIBER Ra	72
Tab. 9 Základní statistika - primární části FIBER Rz	73
Tab. 10 Základní statistika - sekundární části FIBER Rz	74
Tab. 11 Základní statistika - primární části FIBER Ra	75
Tab. 12 Základní statistika - sekundární části FIBER Ra	76
Tab. 13 Hraniční hodnoty	77
Tab. 14 Přehled základních statistických hodnot pro FIBER	77
Tab. 15 Přehled základních statistických hodnot pro CO2	78

SEZNAM PŘÍLOH

PI – Naměřená data

PŘÍLOHA P I: NAMĚŘENÁ DATA

1.4301 - FIBER											
i	Rz[μm]	Ra[μm]	i	Rz[μm]	Ra[μm]	i	Rz[μm]	Ra[μm]	i	Rz[μm]	Ra[μm]
1	20,746	5,222	64	23,752	5,199	127	21,218	4,895	190	14,163	3,238
2	21,509	5,295	65	24,190	5,602	128	20,690	4,940	191	12,673	2,668
3	21,648	5,308	66	23,045	5,354	129	21,612	4,807	192	15,924	3,329
4	21,731	4,959	67	24,413	5,537	130	23,717	5,132	193	15,043	2,930
5	21,884	4,989	68	25,483	5,121	131	20,817	4,692	194	14,317	2,750
6	22,526	5,212	69	24,925	5,280	132	21,932	4,997	195	13,124	2,896
7	22,415	5,218	70	22,208	5,360	133	23,450	4,802	196	18,946	3,691
8	21,664	5,042	71	24,816	5,603	134	22,921	4,906	197	18,924	3,045
9	23,413	5,056	72	24,354	5,510	135	22,882	4,445	198	14,266	2,620
10	20,502	4,920	73	23,588	5,861	136	23,831	4,685	199	14,001	2,934
11	23,993	5,369	74	24,070	5,494	137	24,961	4,781	200	17,290	3,254
12	21,787	5,215	75	23,189	5,362	138	22,169	4,230	201	12,936	2,777
13	20,931	5,054	76	23,310	5,642	139	21,962	4,085	202	16,224	3,164
14	22,271	5,454	77	24,715	5,726	140	21,928	4,748	203	18,424	3,234
15	21,738	5,677	78	23,553	5,723	141	20,544	3,842	204	13,442	2,804
16	19,402	5,377	79	25,388	5,801	142	20,413	4,127	205	17,634	3,372
17	20,638	5,018	80	26,360	5,779	143	21,110	4,148	206	15,713	2,936
18	20,732	5,265	81	24,385	5,705	144	18,949	3,876	207	14,663	2,778
19	20,303	4,797	82	24,539	5,451	145	20,089	3,835	208	14,847	2,976
20	18,608	4,637	83	24,204	5,684	146	17,606	3,695	209	18,507	3,562
21	20,316	4,744	84	23,002	5,385	147	18,065	3,681	210	19,336	3,232
22	20,980	4,781	85	24,331	6,047	148	18,985	3,818	211	17,728	3,168
23	19,445	4,480	86	22,890	5,565	149	19,043	3,603	212	17,274	3,368
24	20,355	4,905	87	24,657	5,960	150	19,721	3,925	213	15,361	2,602
25	19,217	5,080	88	24,468	6,061	151	16,968	3,708	214	15,446	3,166
26	21,871	5,236	89	25,381	5,981	152	19,431	3,747	215	17,402	3,267
27	22,275	5,613	90	27,289	6,249	153	19,062	3,670	216	16,544	3,372
28	21,211	5,241	91	26,046	5,849	154	17,537	3,613	217	13,162	2,802
29	22,724	5,295	92	27,100	6,145	155	18,322	3,321	218	15,379	3,021
30	22,205	5,353	93	25,753	5,675	156	19,851	3,970	219	13,999	2,749
31	22,413	5,546	94	25,429	5,963	157	17,217	3,948	220	15,440	2,841
32	22,920	5,478	95	25,587	5,860	158	16,772	3,646	221	17,704	3,179
33	23,691	5,595	96	27,478	6,173	159	17,581	3,758	222	14,364	2,844
34	25,726	5,509	97	25,963	6,106	160	16,014	3,269	223	21,957	3,803
35	25,656	5,776	98	26,253	6,107	161	16,503	3,290	224	14,416	2,640
36	26,145	5,728	99	26,834	6,403	162	17,984	3,594	225	15,711	2,501
37	24,588	5,788	100	24,964	6,297	163	18,395	3,591	226	13,927	2,706
38	23,412	5,791	101	25,439	6,519	164	17,201	3,372	227	16,171	2,885
39	22,892	5,412	102	25,487	6,569	165	17,533	3,308	228	14,709	2,694
40	23,342	5,558	103	25,281	6,669	166	16,662	3,374	229	13,829	2,710
41	21,887	5,313	104	25,539	6,697	167	15,885	3,504	230	14,226	2,652
42	22,662	5,552	105	26,323	6,752	168	16,479	3,228	231	14,406	2,698
43	26,754	5,893	106	25,200	6,424	169	15,339	3,272	232	14,937	3,122

44	25,691	5,559	107	22,873	6,438	170	17,907	3,379	233	14,639	2,845
45	25,026	5,834	108	24,449	6,372	171	17,976	3,158	234	15,150	3,238
46	25,716	5,596	109	24,115	6,300	172	15,941	3,199	235	14,721	2,480
47	24,007	5,441	110	22,499	5,760	173	17,192	3,328	236	18,343	2,903
48	24,591	5,631	111	22,915	6,403	174	16,902	3,335	237	19,388	2,865
49	24,990	5,790	112	23,628	5,970	175	16,130	3,026	238	18,643	3,300
50	25,010	5,776	113	24,136	6,268	176	17,035	3,059	239	16,239	2,971
51	24,069	5,772	114	22,227	5,966	177	17,395	3,803	240	17,378	2,859
52	26,049	5,926	115	21,979	5,705	178	16,604	3,112	241	17,339	2,570
53	25,036	5,501	116	23,626	5,552	179	15,470	2,941	242	17,717	2,745
54	25,486	5,384	117	23,685	5,920	180	16,167	3,391	243	19,685	2,860
55	24,391	5,237	118	23,280	5,542	181	16,748	3,161	244	17,785	2,969
56	24,871	5,116	119	23,371	5,535	182	12,943	2,568	245	16,722	2,754
57	23,967	5,028	120	23,393	5,460	183	14,168	2,824	246	16,196	2,624
58	25,079	5,126	121	23,323	5,413	184	17,065	3,170	247	14,118	2,465
59	23,179	5,073	122	23,486	5,195	185	15,022	3,031	248	16,464	2,766
60	25,149	5,475	123	22,382	5,329	186	15,919	3,006	249	17,066	2,871
61	24,491	5,284	124	22,435	5,334	187	15,492	3,279	250	18,571	2,824
62	25,126	5,301	125	22,196	5,399	188	13,894	2,876	251	14,991	2,464
63	25,175	5,419	126	21,650	5,291	189	14,979	3,000			

1.4301 - CO2											
i	Rz[μm]	Ra[μm]	i	Rz[μm]	Ra[μm]	i	Rz[μm]	Ra[μm]	i	Rz[μm]	Ra[μm]
1	13,299	2,84	64	10,187	2,138	127	17,435	2,806	190	76,433	15,925
2	13,926	2,693	65	11,527	2,55	128	21,56	3,109	191	69,957	16,194
3	13,944	2,675	66	11,259	2,6	129	19,303	2,566	192	75,107	17,535
4	13,104	2,714	67	11,211	2,188	130	20,653	2,968	193	79,955	16,626
5	14,186	2,78	68	11,502	2,472	131	17,804	2,82	194	72,594	17,552
6	13,705	2,681	69	11,63	2,364	132	14,341	2,6	195	77,463	16,664
7	13,09	2,529	70	13,252	2,557	133	12,294	2,168	196	76,459	16,533
8	13,463	2,889	71	12,967	2,598	134	12,06	2,3	197	75,082	15,318
9	13,52	2,75	72	12,078	2,552	135	12,179	2,578	198	71,964	16,522
10	14,673	2,706	73	11,293	2,392	136	15,606	2,521	199	71,814	17,447
11	14,14	2,757	74	10,339	2,197	137	16,415	2,804	200	66,547	16,082
12	13,689	2,707	75	11,749	2,322	138	15,607	2,501	201	72,97	16,742
13	13,213	2,826	76	11,307	2,423	139	16,713	2,686	202	70,96	16,214
14	13,478	2,669	77	11,09	2,271	140	17,006	2,875	203	70,19	14,754
15	13,242	2,685	78	11,219	2,297	141	17,958	2,459	204	71,423	12,785
16	13,94	2,965	79	11,053	2,344	142	18,009	2,65	205	72,732	14,979
17	12,571	2,721	80	11,693	2,373	143	14,392	2,375	206	67,511	14,701
18	11,994	2,659	81	12,089	2,889	144	15,203	2,472	207	64,444	13,417
19	13,362	2,622	82	11,631	2,615	145	19,748	3,129	208	63,496	13,782
20	11,267	2,538	83	10,995	2,373	146	26,425	3,833	209	67,063	13,039
21	11,88	2,527	84	11,718	2,443	147	23,546	3,742	210	63,079	12,74
22	11,752	2,544	85	11,196	2,351	148	25,558	4,012	211	58,923	12,565
23	12,436	2,419	86	10,962	2,396	149	22,025	3,335	212	54,293	12,845

24	11,609	2,112	87	11,039	2,392	150	21,804	3,373	213	55,606	11,661
25	10,787	2,121	88	10,817	2,306	151	17,055	3,009	214	58,372	11,049
26	11,486	2,625	89	11,052	2,203	152	19,039	2,951	215	59,393	12,305
27	11,29	2,433	90	11,936	2,273	153	25,257	4,327	216	57,117	10,699
28	11,641	2,373	91	10,525	2,296	154	24,223	3,666	217	60,389	11,461
29	10,58	2,354	92	11,023	2,422	155	25,295	3,963	218	64,366	10,967
30	12,726	2,39	93	15,679	2,897	156	31,756	4,914	219	64,28	11,532
31	11,869	2,432	94	11,615	2,228	157	33,395	5,565	220	61,628	12,012
32	12,271	2,797	95	15,652	2,729	158	35,85	5,374	221	61,15	13,063
33	12,377	2,481	96	18,412	2,8	159	36,467	5,082	222	58,407	12,383
34	13,083	2,619	97	18,823	3,443	160	37,584	6,242	223	67,567	12,068
35	13,204	2,566	98	19,839	3,008	161	38,741	6,142	224	66,365	11,226
36	13,122	2,215	99	11,902	2,398	162	36,287	6,199	225	60,175	10,52
37	11,883	2,16	100	13,366	2,748	163	46,285	8,228	226	58,41	11,62
38	12,04	2,501	101	12,286	2,662	164	40,981	8,081	227	55,582	10,742
39	11,427	2,163	102	13,28	2,542	165	44,453	8,332	228	52,09	11,118
40	11,391	2,259	103	9,329	2,267	166	45,428	8,984	229	53,446	11,293
41	10,389	2,334	104	11,213	2,494	167	40,544	7,872	230	51,706	10,858
42	11,127	2,035	105	11,357	2,244	168	41,98	8,07	231	51,306	11,55
43	12,916	2,479	106	11,81	2,437	169	49,782	8,538	232	50,313	10,911
44	12,053	2,239	107	11,2	2,401	170	52,385	12,234	233	48,931	10,774
45	10,652	2,055	108	12,827	2,41	171	52,157	12,809	234	52,157	11,921
46	10,934	2,337	109	10,976	2,379	172	50,347	12,262	235	48,911	11,615
47	10,959	2,247	110	12,729	2,388	173	54,725	12,287	236	50,891	10,818
48	9,825	2,062	111	12,484	2,298	174	57,586	13,222	237	53,404	11,469
49	10,293	2,287	112	11,055	2,415	175	61,47	12,893	238	53,124	11,423
50	10,876	2,17	113	12,521	2,408	176	61	11,286	239	51,972	11,539
51	10,742	2,321	114	14,568	2,415	177	57,911	12,135	240	52,975	11,279
52	10,888	2,451	115	13,675	2,336	178	61,875	12,675	241	52,498	11,441
53	10,863	2,22	116	13,273	2,192	179	55,49	12,962	242	51,596	10,397
54	11,549	2,391	117	12,431	2,288	180	55,926	14,395	243	52,098	11,145
55	11,545	2,257	118	12,188	2,505	181	66,995	14,207	244	50,826	11,302
56	10,003	2,027	119	12,429	2,463	182	67,799	13,673	245	50,053	11,198
57	10,54	2,384	120	17,527	2,778	183	72,003	15,549	246	51,415	11,538
58	13,34	2,538	121	21,163	2,918	184	69,51	14,705	247	48,564	11,271
59	11,961	2,554	122	17,795	3,249	185	68,2	13,849	248	48,744	11,197
60	11,501	2,448	123	21,499	2,692	186	74,039	16,348	249	48,674	11,415
61	10,489	2,229	124	20,034	2,712	187	73,873	15,435	250	48,935	11,329
62	11,077	2,386	125	18,672	2,913	188	72,554	15,785	251	49,786	11,786
63	11,308	2,553	126	14,191	2,543	189	73,086	14,658			