

Hodnocení jakosti povrchů s využitím moderních geometrických metod

Bc. Roman Hanák

Diplomová práce
2015



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Roman Hanák**
Osobní číslo: **T13613**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Hodnocení jakosti povrchů s využitím moderních geometrických metod**

Zásady pro vypracování:

1. Podle příslušných norem ČSN EN ISO uveďte základní způsoby snímání jakosti povrchů.
2. Uveďte možnosti využití teorie fraktálů v hodnocení jakosti povrchu se zaměřením na drsnost povrchu a využijte geometrických prostředků při hodnocení tzv. stratifikovaných povrchů.
3. U daných vzorků proveďte prostorové snímání povrchu na definovaných plochách.
4. Na vybraných vzorcích aplikujte teorie fraktálů a teorii fraktálových dimenzí.
5. Aplikujte základní teorii testovaných hypotéz ve vazbě na nalezené fraktálové dimenze.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. **Norma ČSN EN ISO 4287. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu. 1999**
2. **Norma ČSN EN ISO 4288. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu. 1999**
3. **Stoul K. J. and Blunt L., Three Dimensional Surface Topography**
4. **Wiley J. and Sons, Fractal Geometry**

Vedoucí diplomové práce:

doc. Dr. Ing. Vladimír Pata
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

30. ledna 2015

Termín odevzdání diplomové práce:

13. května 2015

Ve Zlíně dne 9. února 2015


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.

děkan




prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.

ředitel ústavu

Příjmení a jméno:

Obor:

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užit své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské 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.

Ve Zlíně

.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ 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, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ 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, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlíádne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Ve své práci se zaměřuji na hodnocení jakosti povrchů s využitím moderních geometrických metod. Diplomová práce je rozdělena do dvou částí. V teoretické části se zabývám metodami bezkontaktní kontroly povrchu a vhodnými statistickými metodami pro jeho kontrolu. V praktické části testuji jednotlivé povrchy zkušebních vzorků. Dále aplikuji teorii fraktálů a teorii fraktálových dimenzí na vybraných vzorcích a ověřuji základní teorii testování statistických hypotéz ve vazbě na nalezené fraktálové dimenze.

Klíčová slova: Jakost povrchu, Moderní geometrické metody, Teorie fraktálů, Fraktálové dimenze, Statistické hypotézy

ABSTRACT

In my thesis I focus on the quality assessment of surfaces using advanced geometric methods. The thesis is divided into two parts. The theoretical part deals with the methods of non-contact surface inspection and appropriate statistical methods to control it. In the practical part of the test the surfaces of individual specimens. Additionally I apply the theory of fractals and fractal dimension theory on selected samples and examine the primary theory of statistical hypothesis testing in relation to the found fractal dimensions.

Keywords: Quality of surface, Modern geometric methods, The theory of fractals, fractal dimensions, Statistical hypothesis

Tímto bych chtěl poděkovat panu doc. Dr. Ing. Vladimíru Patovi za ochotu, cenné rady, připomínky a pomoc při řešení diplomové práce.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 UVEĎTE ZÁKLADNÍ ZPŮSOBY SNÍMÁNÍ JAKOSTI POVRCHU PODLE NOREM ČSN EN ISO 4287 A ČSN EN ISO 4288.....	12
1.1 PRINCIP KONTAKTNÍHO ZPŮSOBU SNÍMÁNÍ JAKOSTI	12
1.1.1 Výhody a nevýhody kontaktního způsobu snímání jakosti	14
1.2 PRINCIP BEZKONTAKTNÍHO ZPŮSOBU SNÍMÁNÍ JAKOSTI	15
1.2.1 Laserový snímač	15
1.2.2 Snímač Talysurf CLI	15
1.2.3 Program Talymap	18
2 UVEĎTE MOŽNOSTI VYUŽITÍ TEORIE FRAKTÁLŮ V HODNOCENÍ JAKOSTI POVRCHŮ SE ZAMĚŘENÍM NA DRSNOST	20
2.1 FRAKTÁLNÍ GEOMETRIE.....	20
2.2 FRAKTÁL	20
2.3 DĚLENÍ FRAKTÁLŮ	21
2.3.1 Příklady fraktálů vzniklých algoritmem IFS	23
2.3.2 Přírodní fraktály	25
2.4 HAUSDORFFOVA DIMENZE POMOCÍ MATEMATIKY	28
2.5 POKRÝVAJÍCÍ DIMENZE D_p	29
3 VYUŽIJTE GEOMETRICKÝCH PROSTŘEDKŮ PŘI HODNOCENÍ TZV. STRATIFIKOVANÝCH POVRCHŮ	32
3.1 TESTOVÁNÍ STATISTICKÝCH HYPOTÉZ	32
3.1.1 Výběr statistické metody.....	33
3.2 NULOVÁ A ALTERNATIVNÍ HYPOTÉZA	34
3.2.1 Postup testu	34
3.2.2 Chyba I. a II. druhu.....	35
3.3 T-TEST (ROVNOST STŘEDNÍCH HODNOT)	36
3.4 F-TEST (ROVNOST ROZPTYLŮ)	38
3.5 METODA ANOVA (ANALYSIS OF VARIANCE).....	39
3.5.1 Jednofaktorová anova	40
3.5.2 Jednofaktorová anova (Vzorce pro výpočet):	41
3.5.3 Kruskal-Wallis test	43
4 DEFINICE PARAMETRŮ Z NORMY ČSN EN ISO 25178-2.....	45
4.1 TERMÍNY GEOMETRICKÉHO PARAMETRU	45
4.2 TERMÍNY GEOMETRICKÉHO PRVKU	45
4.3 DEFINICE PARAMETRU POLE	46
II PRAKTICKÁ ČÁST	49
5 U DANÝCH VZORKŮ PROVEĎTE PROSTOROVÉ SNÍMÁNÍ POVRCHU NA DEFINOVANÝCH PLOCHÁCH.....	50
5.1 VZORKY.....	50
5.1.1 Specifikace materiálu.....	50
5.1.2 Tepelné ošetření materiálu	51

5.2	POUŽITÉ MĚŘIDLO	53
5.3	ULOŽENÍ VZORKŮ.....	54
5.4	KALIBRACE MĚŘICÍHO PŘÍSTROJE.....	54
5.5	POSTUP MĚŘENÍ.....	54
5.6	ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ	57
5.7	VYHODNOCENÍ MATEMATICKÝMI METODAMI.....	60
5.7.1	Statistické zpracování	60
6	NA VYBRANÝCH VZORCÍCH APLIKUJTE TEORII FRAKTÁLŮ A TEORII FRAKTÁLOVÝCH DIMENZÍ	66
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	78
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	80
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	81
	SEZNAM TABULEK	83

ÚVOD

Měření a hodnocení struktury povrchu představuje specifickou samostatnou část metrologie, zprostředkovanou jednoúčelovými měřicími přístroji. Vývoj měření a hodnocení struktury povrchu zaznamenaly v uplynulých několika letech výrazný kvalitativní technický pokrok. Přední světový výrobci měřicí techniky aktivně reagovali na nové požadavky pro kvalitu funkčních povrchů součástí z progresivních konstrukčních materiálů spojenou s vysokou přesností rozměrů, tvaru a vzájemné polohy často malých funkčních ploch.

Vývoj měřicí techniky je výrazně ovlivňován i technickými potřebami uživatelů a jejich ekonomickými možnostmi. Výsledkem komplexního vývoje je nejen zvyšování technické úrovně stávajících měřicích a vyhodnocovacích prostředků pro strukturu povrchu, ale i vývoj nových metodik a softwaru pro praktické vyhodnocování kontrolovaného profilu povrchu. [12]

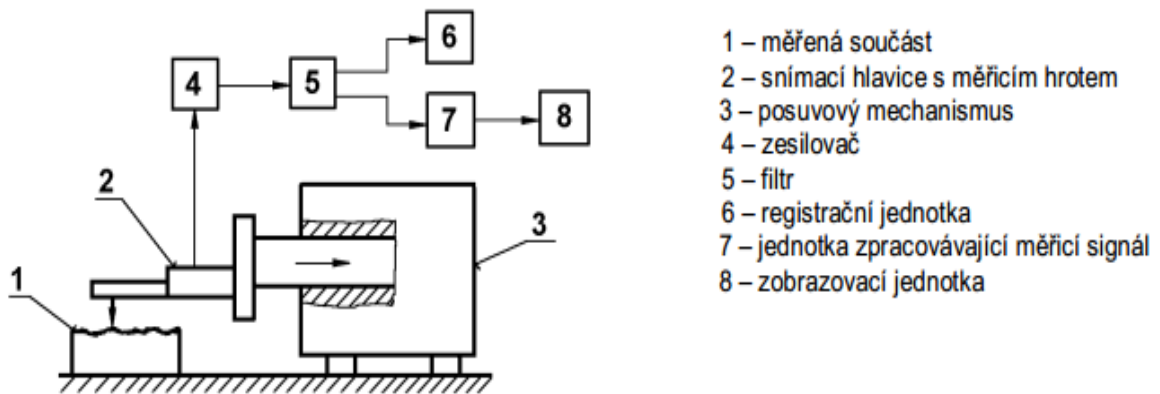
V této diplomové práci budou uvedeny základní způsoby snímání jakosti povrchu kontaktním a bezkontaktním způsobem podle příslušných norem ČSN EN ISO. Dále se tato práce bude zabývat snímáním povrchu daných vzorků na definovaných plochách s následným využitím teorie fraktálů a teorii fraktálních dimenzí v hodnocení jakosti. Po nasnímání povrchu bude také uvedeno zpracování naměřených hodnot a následné statistické vyhodnocení.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 UVEĎTE ZÁKLADNÍ ZPŮSOBY SNÍMÁNÍ JAKOSTI POVRCHU PODLE NOREM ČSN EN ISO 4287 A ČSN EN ISO 4288

1.1 Princip kontaktního způsobu snímání jakosti

Metoda umožňuje zjišťování číselných hodnot jednotlivých parametrů drsnosti a je také možné ji využít pro nejmodernější statistická a spektrální hodnocení nerovnosti povrchu. Dotykový profilometr se skládá z části mechanické a elektronické.



Obr. 1. Princip měření dotykovým profilometrem [1]

Mechanická část:

- Stolek, na který se umísťuje měřená součást,
- rameno se snímacím hrotem, které se pohybuje určitou konstantní rychlostí a snímací hrot snímá nerovnosti povrchu,
- přímočarý vratný pohyb je zajištěn pomocí elektromotorku, popř. pneumaticky.

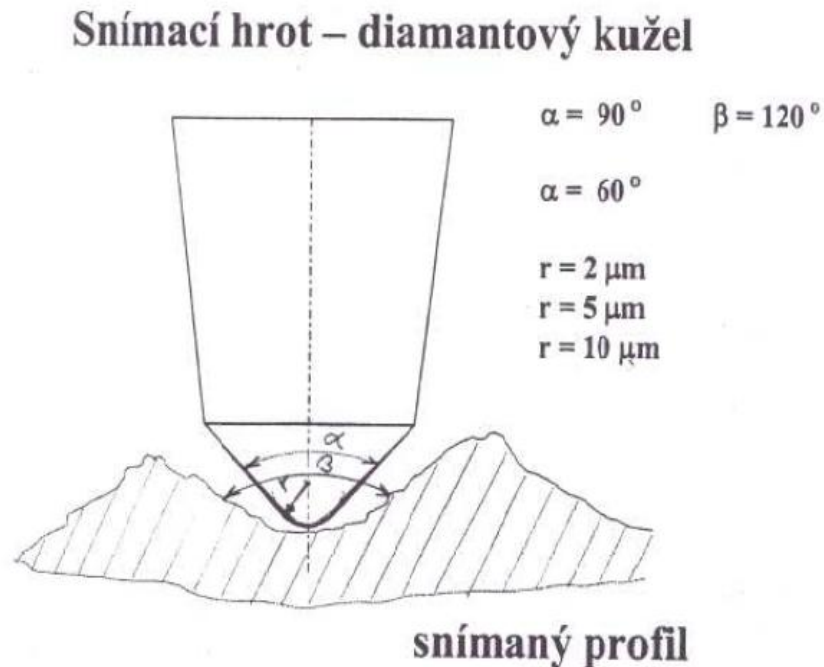
Elektronická část:

- Převádí mechanický signál vygenerovaný snímacím hrotem detekujícím nerovnosti povrchu měřené plochy na elektrický signál, který se zpracovává (číselná hodnota příslušného parametru drsnosti nebo grafický záznam nerovnosti povrchu).

Pohyb snímacího hrotu musí být velmi přesný co do přímosti a rovnoměrnosti. Rychlost musí být volena s ohledem na dynamické vlastnosti snímacího systému (nepoškození povrchu, věrné snímání nerovnosti). Získaný profil je ovlivňován vlastnostmi snímacího systému. [1]

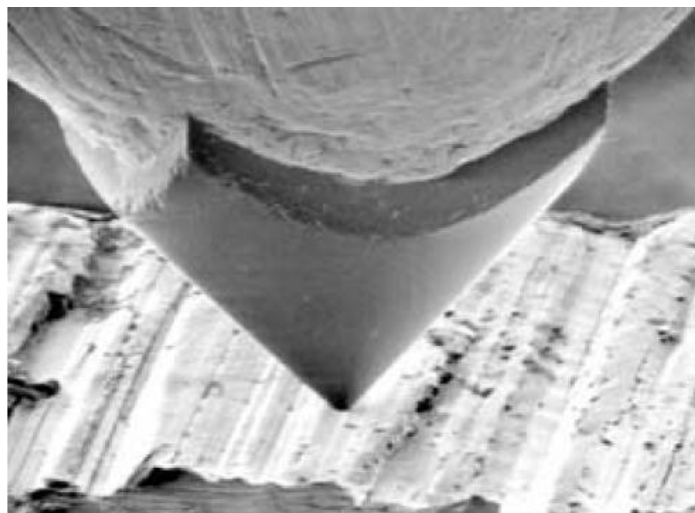
Správnost výsledků měření ovlivňuje:

- poloměr zaoblení snímacího hrotu $r = (2\mu\text{m}, 5\mu\text{m}, 10\mu\text{m})$,
- vrcholový úhel snímacího hrotu $\alpha = (60^\circ, 90^\circ)$,



Obr. 2. Diamantový kužel dotykového přístroje [4]

- měřicí (přítlačná) síla (cca 0,00075N),
- rychlost změny měřicí síly,
- poloměr zaoblení kluzné patky snímače (u relativní metody),
- celkové geometrické uspořádání systému snímače. [1]



Obr. 3. Měřicí hrot [5]

1.1.1 Výhody a nevýhody kontaktního způsobu snímání jakosti

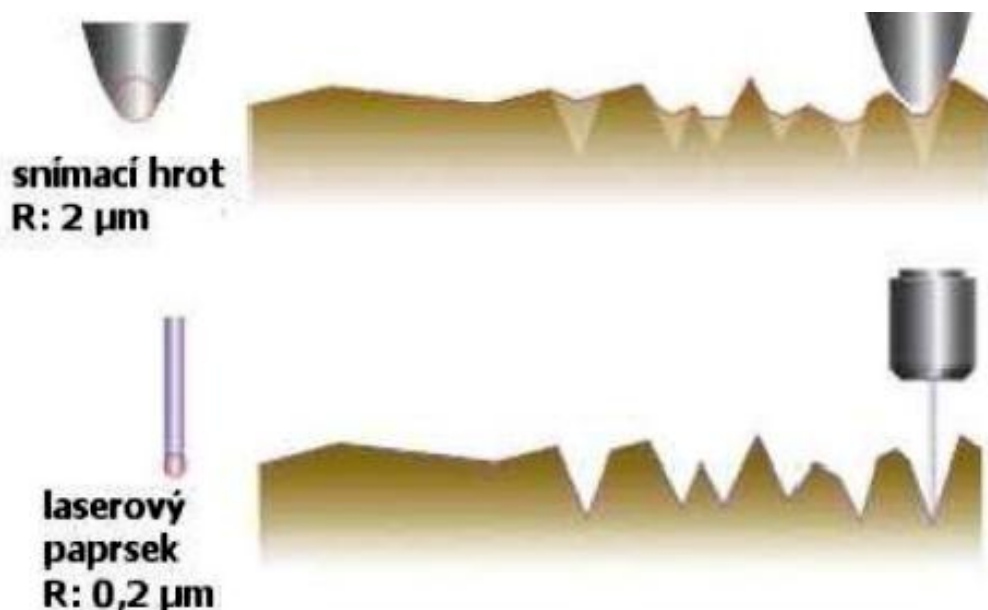
V tradičním strojírenském prostředí mají kontaktní metody proti optickým metodám značnou výhodu ve větší toleranci vůči znečištění. Snímací hrot odsune malé nečistoty nebo mu nevádí olejová vrstva. Optická sonda vyžaduje skutečně čistý měřený povrch. Ve strojírenské praxi je zatím dávána přednost kontaktním měřicím přístrojům. Mimo jiné i proto, že normované parametry struktury povrchu zatím nepočítají se ztracenými daty nebo proměnnou velikostí opticky snímaného bodu.

Další výhody jsou např.:

- Snadná obsluha
- Rychlé měření a přímé čtení výstupních hodnot
- Přenosné zařízení, malé rozměry snímače [3]

Nevýhody:

- Větší nepřesnost měření
- Povrchy, které se kontaktním způsobem měřit nedají (patří mezi ně povrchy některých nových konstrukčních materiálů nebo moderní, tzv. technické povrchy, jako jsou např. sestavy mikrorozměrných čoček, součástky paměťových zařízení apod., kde velké rozměrové rozdíly profilu povrchu neumožňují použití snímacího hrotu).



Obr. 4. Porovnání snímání hrotem a laserovým paprskem [9]

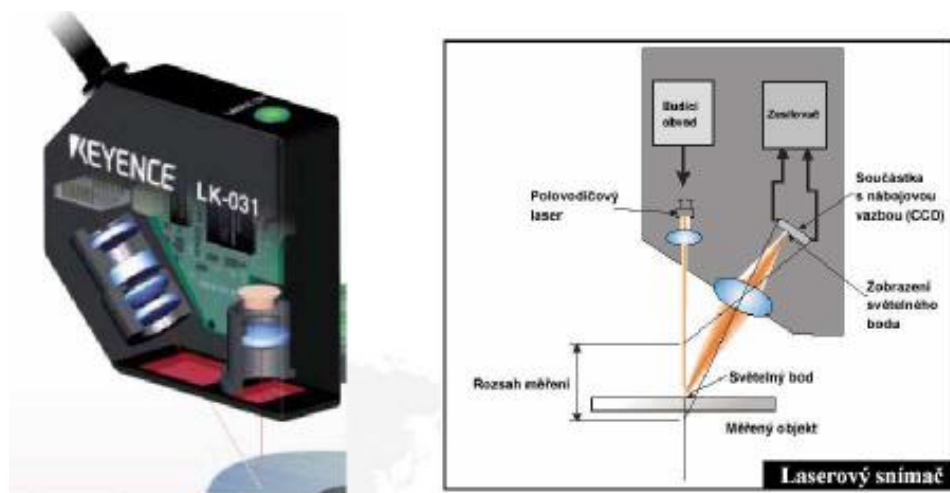
1.2 Princip bezkontaktního způsobu snímání jakosti

Nahrazuje kontaktní snímání při měření povrchů citlivých na mechanické poškození, měkkých materiálů apod. Kontrolovaný povrch je snímán zaostřenou měřicí hlavou, jejíž programem řízené nastavení je jednoduché a rychlé.

Výrobce měřicí techniky s dlouholetou tradicí Taylor Hobson Ltd. se zaměřuje nejen na přípravu vysoce kvalitních systému 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 parametru. Zvláštní pozornost věnuje i konkrétnímu využití kontrolních postupů a získaných výsledků pro hodnocení funkčních vlastností povrchu. V současné době Taylor Hobson nabízí plynule inovovaný komplexní program prostorového hodnocení textury povrchu Talymap. [3]

1.2.1 Laserový snímač

Paprsek polovodičového laseru se odrazí od snímaného povrchu do přijímacího optického systému. Paprsek je zaostřen na CCD snímacím poli. CCD zajišťuje špičkovou hodnotu rozdělení množství světla v bodě paprsku. CCD obrazové prvky (jednotlivé CCD snímané elementy) na ploše bodu paprsku jsou použity pro určení přesné polohy zaměřeného bodu. [6]

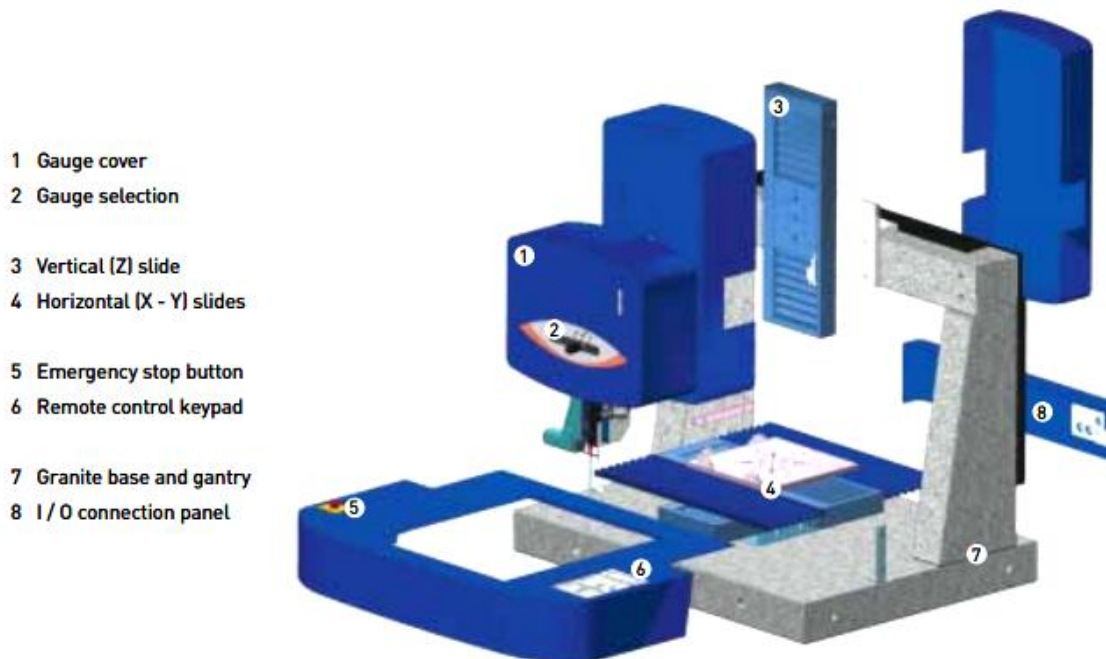


Obr. 5. Princip laserového snímače [6]

1.2.2 Snímač Talysurf CLI

Přístroje talysurf CLI jsou vysoce účinnými měřicími přístroji k provádění rychlého prostorového měření a hodnocení povrchu s vysokým rozlišením. Systém CLI nabízí možnosti

měření a analýzy povrchu ve třech osách, s využitím kontaktní nebo bezkontaktní měřicí techniky. Tyto přístroje (Obr. 6) jsou snadno ovladatelné a výkonné, vhodné i pro kontrolu velkého počtu součástí. Jsou schopny provádět analýzu dat při hodnocení struktury povrchu z jednoho profilu řezu (2D) i profilu plochy povrchu (3D). [7]



Obr. 6. Snímač Talisurf CLI [8]

Tento nástroj má působivou účinnost, šetří čas a tím i peníze. Pod ergonomickými kryty jsou desítky prvků, které tvoří systém přesným, spolehlivým a bezúdržbovým na mnoho let dopředu. [8]

Hlavní předností přístrojů je univerzálnost jejich využití, která vyplývá z možností systému měřit buď indukčním kontaktním způsobem Form Talysurf, nebo bezkontaktním způsobem zastupovaným laserovou triangulační sondou a CLA konfokálním snímačem (Chromatic Length Aberration – CLA). Uvedené tři způsoby měření zajišťují prakticky neomezené možnosti měření struktury povrchu z hlediska jakosti, přesnosti a druhu materiálu součástí. Navíc je systém CLI vybaven automatickým posuvem ve všech osách (X , Y , Z), s posuvovou rychlostí až do 30 mm/s, což zajišťuje rychlé automatické měření. Připravenost přístroje pro kontrolu širokého sortimentu součástí dokumentuje i velikost měřícího prostoru (max. 200 x 200 x 200mm) a nosnost stolu (max. 20kg). [7]

Praktickou předností Talysurf CLI je spojení klasického 2D a prostorového hodnocení 3D do jednoho výkonného přístroje. I když je systém CLI speciálně navržen pro měření 3D, je současně vybaven mechanickými i analytickými prostředky pro komplexní měření 2D. Lze

tak jedním přístrojem monitorovat výzkum a vývoj, provádět studijní analýzy (např. opotřebení), rutinní inspekci i řídit výrobní procesy. Vedle zřejmého ekonomického přínosu má uživatel stále možnost porovnávat výsledky měření se všemi, kteří ještě používají jen klasické měření 2D. Univerzálnost systému Talysurf CLI zajišťuje možnost využít na jednom přístroji až čtyři různé měřicí hlavy ke kontrole všech kombinací materiálů a kvality povrchů součástí.

Přístroje Talysurf CLI jsou dostupné ve třech velikostních provedeních, což uživateli nabízí výběr přesně podle svých požadavků a potřeb:

Talysurf CLI 2000 – základní typ s vysokou rychlostí a přesností v mimořádně velkém měřicím prostoru (200 x 200 x 200mm); je určen nejen pro kontrolu velkých součástí (délka posuvu X - Y - Z je 200mm), ale i malých součástí vyráběných v dávkách. Na stůl lze na jednu uložit více součástí; mimořádně přesný stůl umožní posuv z jedné součásti na druhou, zatímco měřicí program automaticky bez dohledu opakuje kontrolní operaci (Obr. 7).

Talysurf CLI 2000

Measuring envelope:

X axis = 200mm

Y axis = 200mm

Z axis = 200mm

Weight capacity:

20kg (44 lbs)



Obr. 7. Snímač Talysurf CLI 2000 [8]

Talysurf CLI 1000 – s měřicím prostorem 100 x 100 x 100mm je ideální typ pro malé a střední velikosti součástí; přístroj je z hlediska přesnosti, rychlosti, software a programovatelnosti zcela rovnocenný základnímu modelu CLI 2000. Při délce posuvu X - Y - Z 100mm jsou tak u kompaktního přístroje CLI 1000 k dispozici všechny výkonné kontrolní operace (Obr. 8) [7]

Talysurf CLI 1000**Measuring envelope:****X axis = 100mm****Y axis = 100mm****Z axis = 100mm****Weight capacity:****20kg (44 lbs)**

Obr. 8. Snímač Talysurf CLI 1000 [8]

Talysurf CLI 500 – nejmenší provedení (měřicí prostor 50 x 50 x 50mm; délka posuvu 50 mm) je charakterizované ekonomickou a prostorovou efektivností. Je určen především pro měření součástí malých rozměrů. Pro instalaci přístroje stačí půdorysná plocha stolu 500x310mm. Talysurf CLI 500 je připraven automaticky provádět měřící operace a uvolnit pracovní kapacitu operátora (Obr. 9). [7]

Talysurf CLI 500**Measuring envelope:****X axis = 50mm****Y axis = 50mm****Z axis = 50mm****Weight capacity:****10kg (22 lbs)**

Obr. 9. Snímač Talysurf CLI 500 [8]

1.2.3 Program Talymap

Program Taylor Hobson Talymap zpracovává prostorovou charakteristiku povrchu z dat získaných kontaktním i bezkontaktním měřícím systémem profilometru. Program umožní několika rozdílnými způsoby zobrazit snímaný povrch, včetně axonometrické projekce (čárové nebo síťové) s volitelným úhlem pohledu a barevným rozlišením výšek, s nastavitelným zvětšením celku nebo vybrané části povrchu. Dále lze provádět rozměrová měření ve třech osách, inverzi profilu povrchu, simulaci opotřebení povrchu, apod. Práce s pro-

gramem i vkládání dat k analýze je jednoduchá a rychlá; výsledky probíhající analýzy lze přímo sledovat. Při analýze řady profilů program umožní rychlé opakování stejné operace, úlohy nebo výpočtu, včetně grafické dokumentace. [7]

2 UVEĎTE MOŽNOSTI VYUŽITÍ TEORIE FRAKTÁLŮ V HODNOCENÍ JAKOSTI POVRCHŮ SE ZAMĚŘENÍM NA DRSNOST

2.1 Fraktální geometrie

Fraktální geometrie je samostatná vědní disciplína zabývající se vlastnostmi fraktálů a jejich popisem. Vědci se jí věnují intenzivněji přibližně od sedmdesátých let minulého století. Do doby, než byla objevena a popsána fraktální geometrie, byla euklidovská geometrie považována za nejsilnější nástroj popisu všech geometrických útvarů. Euklidovská geometrie byla úspěšně používána po celá staletí, ale její slabinou, kterou si prakticky nikdo neuvědomoval, byl problém jak popsat jednoduchým způsobem složitě strukturované útvary. Tyto útvary mohly být jak matematického, tak i přírodního původu.

Běžné objekty jako úsečky, kruhy, čtverce, trojúhelníky, obdélníky, koule, krychle, jehlany je možné poměrně snadno popsat pomocí euklidovské geometrie. Například pravoúhlý trojúhelník je plně popsán (každý jeho bod je jednoznačně určen) Pythagorovou větou. Pokud by bylo třeba popsat jednoduchý fraktál jako je například Kochova křivka, pak by bylo nutné sestavit složitou a nepřehlednou rovnici. Tento objekt však může být jednoduše popsán za použití fraktální geometrie. Její složitost je možné dokonce popsat pomocí jednoho čísla, tzv. fraktální dimenze. [10]

2.2 Fraktál

Za jejího zakladatele je dnes považován matematik Benoit B. Mandelbrot, který jako první matematicky definoval pojem fraktál. I před zavedením pojmů fraktál a fraktální geometrie se vědci a umělci zabývali geometrickými útvary, které dnes nazýváme fraktály, jako například sněhovou vločku Kochovu (Koch snowflake) nebo Sierpiňského trojúhelník (Sierpiński triangle). Slovo „fraktál“ pochází z latinského slova „fractus“, což znamená zlomený. Mandelbrot zvolil toto slovo ve svých pracích jako název pro objekty příliš nepravidelné pro běžnou matematiku. Jako fraktály se tedy označují nepravidelné geometrické útvary dělitelné na jednotlivé části, z nichž každá je v ideálním případě zmenšenou kopií celku. Jsou to tedy množiny, jejichž geometrický motiv se opakuje v základním tělese a tento jev se nazývá soběpodobnost (self-similarity). Objekt je tedy striktně soběpodobný (deterministický), pokud může být rozdělen na libovolně malé části, které jsou malou kopií původní množiny. Matematické fraktály mohou být také statisticky soběpodobné (stochastické),

stejně jako fraktály přírodní, kdy jsou malé úlomky podobné celku jen statisticky. Vedle soběpodobných fraktálů existují také fraktály soběafinitní (self-affined, soběpříbuzné). U těchto fraktálů je potřeba znát vedle struktury nepravidelných úlomků i způsob transformace měřítka. [10]

Vlastnosti popsané na základě Kochovy křivky jsou platné pro většinu fraktálů. Křivka je spojitá, sama sebe nikde nepřetíná a nemá nikde derivaci. Jde o křivku striktně soběpodobnou, jinak řečeno má invarianci geometrie vůči změně měřítka (měřítkově nezávislá). Geometrický motiv se v primárním tělese z matematického hlediska opakuje do nekonečna. Při měření různými měřítky by délka byla vždy jiná, prodlužující se při požití vždy menšího měřítka. Křivka má už vzpomínanou neceločíselnou dimenzi, způsobenou výraznou strukturovaností křivky. Fraktální dimenze Kochovy křivky je 1,2619 a to je z topologického hlediska něco jako přímka, která má dimenzi 1 a hladkou plochu s dimenzí 2.

2.3 Dělení fraktálů

Na otázku jak fraktály vznikají, lze dostatečně odpovědět pouze pro matematické fraktály, tedy útvary vznikající matematicky definovanou geometrickou transformací. Vedle matematických fraktálů existují také fraktály přírodní. V případě přírodních fraktálů nejsou většinou známy složité geometrické transformace založené na fyzikální, nebo chemické podstatě jejich vzniku.

Rozdělení matematických fraktálů je možné provést podle algoritmu konstrukce fraktálu:

- IFS (Iteration Function System), který ke konstrukci používá transformací, které se cyklicky opakují.
- TEA (Time Escape Algorithms). Tento algoritmus provádí iterace pro uživatelsky stanovené hranice a pro konstrukci využívá komplexní rovinu.

Dále je možné také dělit matematické fraktály na:

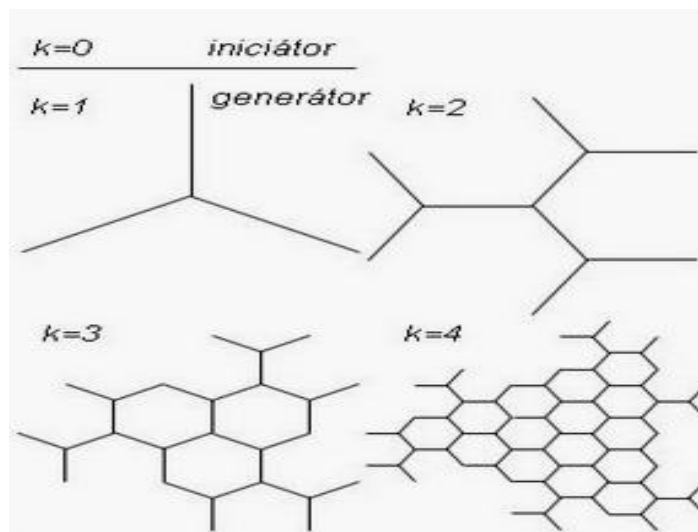
- deterministické (pravidelné)
- stochastické (náhodné)

Další alternativou je již uvedené rozdělení na:

- fraktály soběpodobné
- fraktály soběpříbuzné

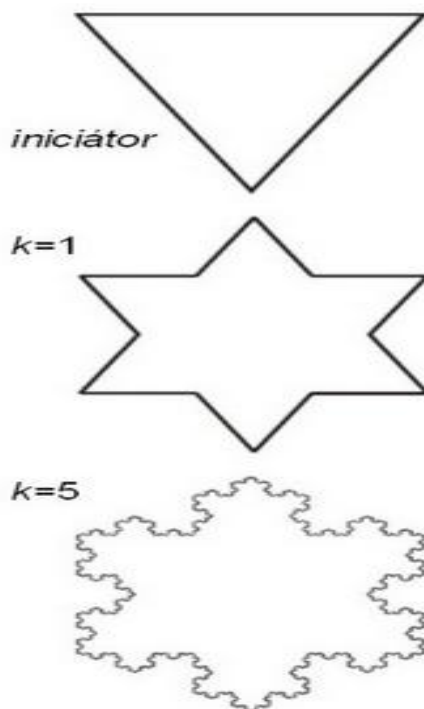
Fraktály lze dále dělit podle různých pravidel a podle různých autorů. Vysvětlení konstrukce IFS fraktálů je možné podat například pomocí již zmíněné Kochovy křivky. V případě této křivky potřebujeme mít tzv. iniciátor a generátor. Iniciátor v tomto případě představuje úsečku (krok 0, Obr. 10) a generátor je tvar, kterým se iniciátor nahradí. V tomto případě je generátorem útvar vzniklý vyjmutím prostřední třetiny a nahrazením této třetiny dvěma úsečkami délky jedné třetiny. Tuto transformaci si lze také představit jako přerušení úsečky v jedné třetině a nadzvednutí druhé třetiny tak aby bylo možné vložit novou úsečku délky opět jedné třetiny. Po transformaci je každá strana už považována za iniciátor pro další krok. V každém kroku se nahrazuje každá úsečka (iniciátor) zmenšenou kopií generátoru. Jak je vidět na (Obr. 11), tak už v kroku 5 lze získat poměrně komplikovanou křivku.

Generaci tohoto typu fraktálů je lépe si představit z matematického hlediska jako konstrukci pomocí takzvaných afinních transformací. Těmito transformacemi se rozumí zmenšení, rotace a posuv. V případě Kochovy křivky je pro generaci použito všech tří transformací. Generátor v kroku 1 je ve druhém kroku uplatněn čtyřikrát. Pro levou část kroku (a) je generátor pouze zmenšen na $1/3$. Pro druhou návaznou část (b – tmavě šedá výplň) je generátor zmenšen na $1/3$, posunut na $1/3$ a pravý konec otočen o 60° proti směru hodinových ručiček. Třetí část (c) je také zmenšena na $1/3$, posunuta o $1/3$, ale levý konec je otočen o 60° ve směru hodinových ručiček. Poslední část je opět zmenšena na $1/3$ a posunuta na $2/3$. Pokud iniciátorem bude opět úsečka a generátorem tři úsečky jdoucí z počátku po 120° (Obr. 10) pak po několika iteracích obdržíme tzv. voštinovou strukturu. [10]



Obr. 10. Voštinová struktura [11]

Kochova křivka a Kochova vložka patří mezi IFS fraktály. Pokud jako iniciátor bude rovnostranný trojúhelník, a generátor stejný jako u Kochovy křivky, pak je získána tzv. Kochova vložka (Obr. 11). [11]



Obr. 11. Kochova vložka [11]

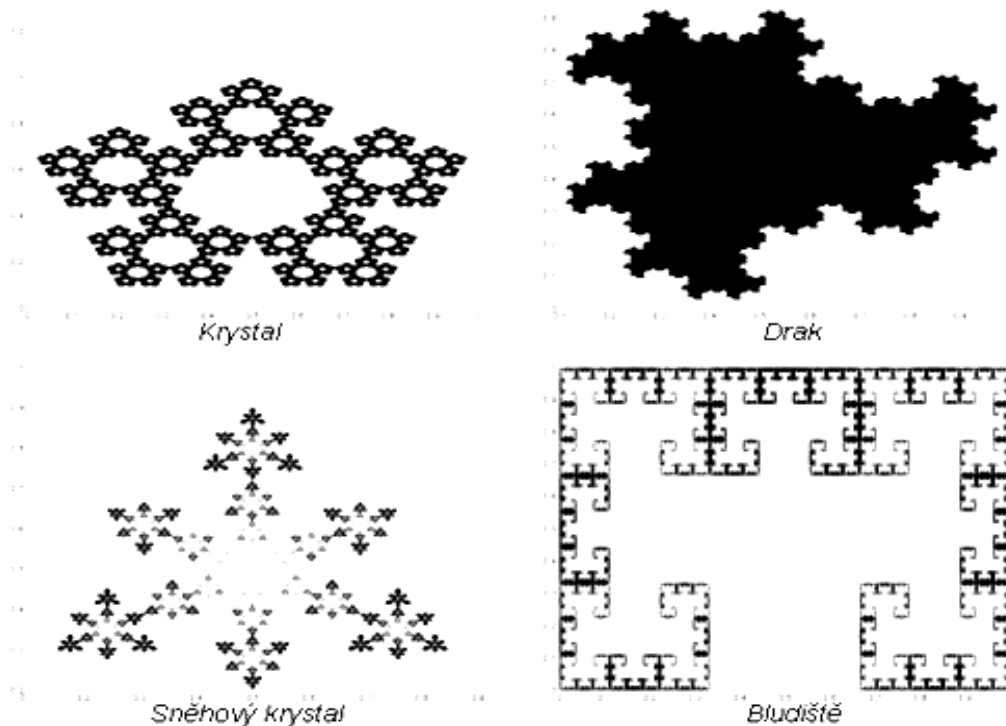
2.3.1 Příklady fraktálů vzniklých algoritmem IFS

Nejjednodušším IFS fraktálem je Cantorova množina (Obr. 12). Celá tato množina leží v intervalu $[1,0]$ a její konstrukce spočívá ve vynechání druhé třetiny tohoto intervalu ze všech dalších, které tímto procesem vznikají. Po nekonečně mnoha krocích je získána množina bodů, která má z hlediska topologického dimenzi nulovou, ale z hlediska fraktálního je její dimenze $0,6309$. Opět je množinou soběpodobnou a lze ji získat afinními transformacemi algoritmem IFS. Na rozdíl od zmíněné Kochovy křivky, probíhají transformace pouze v jedné ose. Pro generování je použito pouze dvou principů transformací: zmenšení a posuvu. V první kroku je iniciátor ve formě úsečky délky 1 zmenšen na $1/3$ a ponechán na místě. Další transformace (ne krok) je zmenšení úsečky na $1/3$ a posuv o $2/3$. V dalších krocích jsou obě transformace uplatněny na celou vzniklou množinu. [11]

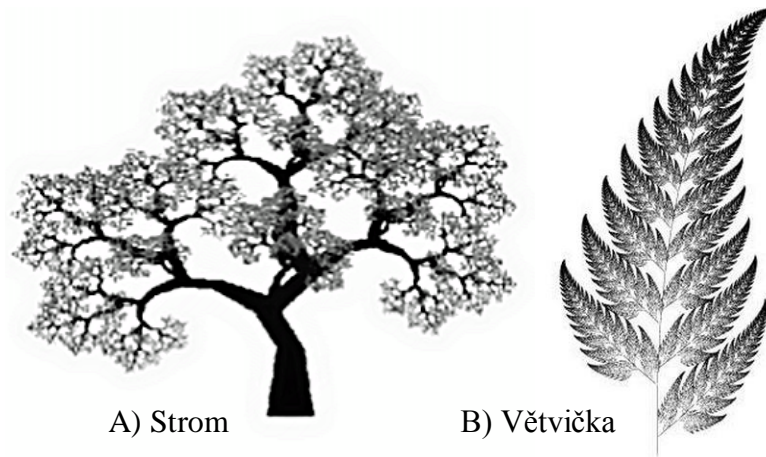


Obr. 12. Cantorovy množiny [11]

Na (Obr. 13) je zobrazeno několik dalších fraktálů vzniklých afinními transformacemi. Některé fraktály jsou tzv. soběpodobné a jiné soběpříbuzné. Záleží na tom, zda bylo pro generaci těchto fraktálů použito afinní transformace zmenšení izotropní (ve všech směrech stejné zmenšení), pak je získán fraktál soběpodobný. Pokud bylo použito anizotropní transformace (v každém směru jiné zmenšení) je získán fraktál soběpříbuzný. Jak je vidět, tyto fraktály mohou mít nejenom „přísně matematický vzhled“, ale také se mohou podobat tomu, co je známo z přírody. Příkladem je fraktál „Strom“ a „Větvička“ (Obr. 14). [11]



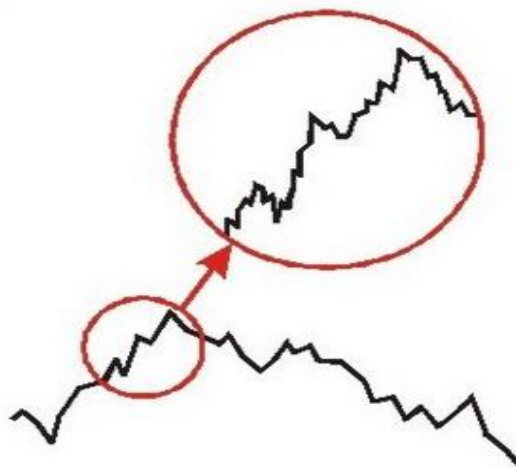
Obr. 13. Příklady fraktálů vzniklých afinními transformacemi algoritmem IFS [11]



Obr. 14. *Příklady fraktálů vzniklých afinními transformacemi algoritmem IFS [11]*

2.3.2 Přírodní fraktály

Přírodní fraktály oproti matematickým nejsou nikdy striktně soběpodobné, tedy přírodní útvary při zvětšení nejsou přesně identické. Příkladem přírodního fraktálu je již zmíněná pobřežní linie. To je objekt s fraktální dimenzí mezi 1 a 2. S objekty, které lze od určitých měřítek z geometrického hlediska nazvat fraktály, se lze setkat v přírodě i jinde. V této souvislosti lze mluvit o struktuře na struktuře. Například kamenné pohoří má při pohledu z dálky svoji strukturu, kterou tvoří hory, kopce a vyvýšeniny. V případě přiblížení lze vidět jednu horu, která je opět strukturovaná. Po dalším přiblížení lze vnímat mimo jiné kamení, které má opět strukturu. Po oddělení části této struktura a po dalším zvětšení se objeví další struktura. Při následném zvětšování bude pozorována další a další struktura, což bude pokračovat až po atomární délky. Jedná se tedy o strukturu na struktuře, jak je znázorněno na (Obr. 14). [11]



Obr. 15. *Struktura na struktuře [11]*

Dalším příkladem může být sněhová vločka a její nádherně složitá struktura. Popis pomocí euklidovské geometrie by byl prakticky nemožný. Pokud by se povedlo přece jen sněhovou vločku popsat, pak výsledky budou omezeny pouze na tento jediný exemplář. Každá následná vločka bude jiná, jedinečná a bude se třeba jen mírně lišit od těch ostatních. Nikdy před tím a ani nikdy v budoucnu nedopadne na zem stejná vločka. To je způsobeno neopakovatelnými podmínkami, při kterých vločka vzniká. Stejně tak jako vločka, je každé těleso útvar, množina či povrch v reálném světě unikátem, který nelze absolutně přesně reprodukovat. Lze vytvořit podobný objekt, ale nikdy ne kopie.

Fraktály jsou pohoří, oblaka, blesky, sněhové vločky, toky řek, stromy i listí, cévní systémy živočichů, komůrky v plicích, DNA, dále i rozložení hmoty v galaxiích, hvězdokupy, ale i povrch obrobku, tvar trhlin i vad v obrobku i nástroji, či dokonce časový vývoj akcií na burzách všeho druhu, časové změny inflace, zadlužení států i vývoj kurzu měny. Dá se říci, že fraktály jsou všude v okolí. Euklidovská tělesa, jako například přímky, čtverce či krychle, jsou pouze v učebnicích matematiky. Musíme se tedy vzdát klasických představ o tělesech kolem, ale i dějích kolem nás a spíše než poznat, uvěřit, že náš svět je strukturovaný.

Neznamená to však, že by nebyla euklidovská geometrie v běžném světě použitelná. Například obyčejný stůl, skládá se ze čtyř nohou a desky. Nohy budou pro zjednodušení jen válce stejného průměru, deska bude mít konstantní délku, šířku a tloušťku. Tento objekt v běžném měřítku bude popsitelný pomocí euklidovské geometrie. Pokud by byl posuzován jeho povrch, který by byl náležitě zvětšen, pak se lze setkat se strukturou na struktuře. Povrch je pak z geometrického hlediska označen jako fraktál. Jiným příkladem je strom (Obr. 14, A), který je z geometrického hlediska i v běžném měřítku je fraktálem.

Protože fraktály se z geometrického hlediska v přírodě vyskytují a jsou její přirozenou součástí, je znalostí fraktálů využíváno i při simulacích reálného světa ve virtuální realitě, počítačových hrách a ve filmu. Příkladem může být povrch měsíce ve filmu Apollo 13 režiséra Rona Howarda nebo Titanik, Den po té a další. K tomu, aby bylo možno generovat tyto přírodní struktury, musí být známa mimo jiné fraktální dimenze. U přírodních fraktálů není ovšem znám „algorithmus generování“ útvaru a fraktální dimenzi lze jen odhadovat (Odhad fraktální dimenze).

Přírodní fraktály jsou často multifraktály. Tento pojem značí, že fraktál v určitých měřítkách má jinou složitost (jiné vlastnosti). To je dáno různou vahou vlivů působících na

vznik fraktálu v různých měřítkách. Multifraktály mohou být také generovány „uměle“, tzv. matematické multi-fraktály.

D udává míru nepravidelnosti útvaru. Nefraktálním objektem se zmenšováním délky měřítka přibližně délka objektu k nějaké mezní hodnotě. U fraktálů je to naopak a jejich délka se stále zvětšuje.

Vzorcem lze určit Topologická dimenze u symetricky pravidelných těles, tak i Hausdorfova-Besicovitchovu dimenze při fraktály.

Přesná matematická definice: zní:

Řekněme ε - síti dané množiny M , takovou její konečnou podmnožinu N , kde každý bod má od množiny N vzdálenost nejvíce ε , pak je Hausdorffova dimenze definována vztahem:

$$D = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln n}{\ln \frac{1}{\varepsilon}} \quad (1)$$

Pokud tato limita existuje, kde n minimální možný počet prvků ε -sítě N . [9]

Mocninový zákon přítomen při měření různých křivek, vyjadřuje závislost získané informace na zvoleném měřítku. Pokud je závislost znázorněna v logaritmických souřadnicích, tak fraktální dimenze D je rovna směrnici příslušné přímky vyjadřující závislost na měřítku +1. Čili pokud vyjde v logaritmických souřadnicích lineární závislost (body ležící v přibližné přímce, kterou sestrojíme přeložením metody nejmenších čtverců), pak se dá předpokládat, že daný objekt má fraktální dimenzi. [9]

Ukázky výpočtu Hausdorfovej množiny:

Nejdříve bych uvedl nejjednodušší příklad, vycházející z úsečky, která má jednotkovou délku. Úsečku rozdělíme na N dílků, což je možno považovat jako bychom se na ni poohlédli z N -násobným zvětšením.

Měřítka nové úsečky počítáme $s = \frac{1}{N}$, kde s je měřítko a N je počet dílků na které se úsečka rozdělí. Pro Hausdorffova dimenze obecně platí uvedená podmínka $N \cdot s^D = 1$. Z toho vyplývá výpočet pomocí vzorců:

$$N \cdot s^D = 1 \quad (2)$$

$$\log N \cdot s^D = \log 1 \quad (3)$$

$$\log N + \log s^D = 0 \quad (4)$$

$$\log N + D \cdot \log s = 0 \quad (5)$$

$$D \cdot \log s = -\log N \quad (6)$$

$$D = \frac{-\log N}{\log s} \quad (7)$$

$$D = \frac{\log N}{\log \frac{1}{s}} = \frac{\log N}{\log N} = 1 \quad (8)$$

Druhý výpočet odvozen při Kochově křivce. Útvar jeho zjemnění je založen tak, že každá úsečka předchozího útvaru je nahrazena dvěma úsečkami s třetinovou délkou, a rovnostranný trojúhelník sestrojen uprostřed mezi dvěma novými úsečkami. Při trojnásobném zjemnění se délka zvětší čtyřikrát. Výsledkem je neceločíselné číslo.

$$s = \frac{1}{3}, N = 4 \quad (9)$$

Výpočet Hausdorffové dimenze:

$$D = \frac{\log N}{\log \frac{1}{s}} = \frac{4}{3} = 1,2618595 \quad (10)$$

Topologická dimenze křivky je rovna jedné. Hausdorffova dimenze je větší než jedna, čili se dá konstatovat, že útvar je fraktál. Kochova křivka je v celém svém rozsahu spojitá, ale v žádném bodě nemá derivaci. [10]

2.4 Hausdorffova dimenze pomocí matematiky

Definice: Necht' N je podmnožina v R^n a s je nezáporné číslo. Pro každé $\delta > 0$ definujeme:

$$H_\delta^s(F) = \{\sum_{i=1}^{\infty} |U_i|^s : U_i \text{ je } \delta - \text{pokrytí } F\} \quad (11)$$

$$H_\delta^s(F) = \lim_{\delta \rightarrow 0} H_\delta^s(F) \quad (12)$$

Z tohoto vztahu plyne, pro každou množinu $F \in R^n$ a $\delta < 1$, že $H_\delta^s(F)$, je narůstající vztahem k s , teda $H^s(F)$ definovaná vztahem (16) je také nerostoucí. Dokonce platí ještě silnější tvrzení, když $t > s$ a U_i je pokrytí F , potom: (při $\delta < 1$).

$$\sum_i |U_i|^t = \sum_i |U_i|^s |U_i|^{t-s} \leq \delta^{t-s} \sum_i |U_i|^s \quad (13)$$

Jestli použijeme ve vzorci (11) na krajní výrazy infimum dostaneme:

$$H_\delta^t(F) \leq \delta^{t-s} H_\delta^s(F) \quad (14)$$

Po limitním přechodu $\delta \rightarrow 0$ plyne pro $t > s$ z $H^s(F) < \infty$ rovnost $H^s(F) = 0$. Proto, pokud by šlo nakreslit graf závislosti $H_\delta^t(F)$ a s skončil v kritické hodnotě. Tato kritická hodnota se nazývá Hausdorffova dimenze množiny. Označovaná jako $dim_H(F)$ a je definována pro každou množinu $F \in R^n$. V některých literaturách nazývaná také jako Hausdorffova-Besicovitchova dimenze.

Definice: Necht', pak Hausdorffova dimenze množiny F je

$$im_H(F) = inf\{s \geq 0 : H^s(F) = 0\} = sup\{s \geq 0 : H^s(F) = \infty\}, (15)$$

pak definujeme supremum prázdné množiny jako 0.

Zjištěno je, že platí:

$$H^s(F) = \begin{cases} \infty & 0 \leq s < dim_h(F) \\ 0 & s > dim_h(F) \end{cases} \quad (16)$$

Pokud $s = dim_H(F)$, potom $H^s(F) = 0, \infty$ a nebo $0 < H^s(F) < \infty$. Barelovská množina splňující poslední vztah se nazývá s-množina.

Hausdorffova množina má užitečné vlastnosti:

- 1) Monotónnost- Z $E \in F$ plyne $dim_H(E) \leq dim_H(F)$
- 2) Spočetná stabilita- Jestli $F_1, F_2 \dots$ je nejvyšší spočetní posloupnost množin, potom

$$dim_H \cup_{i=1}^{\infty} F_i = sup\{dim_H F_i\}.$$

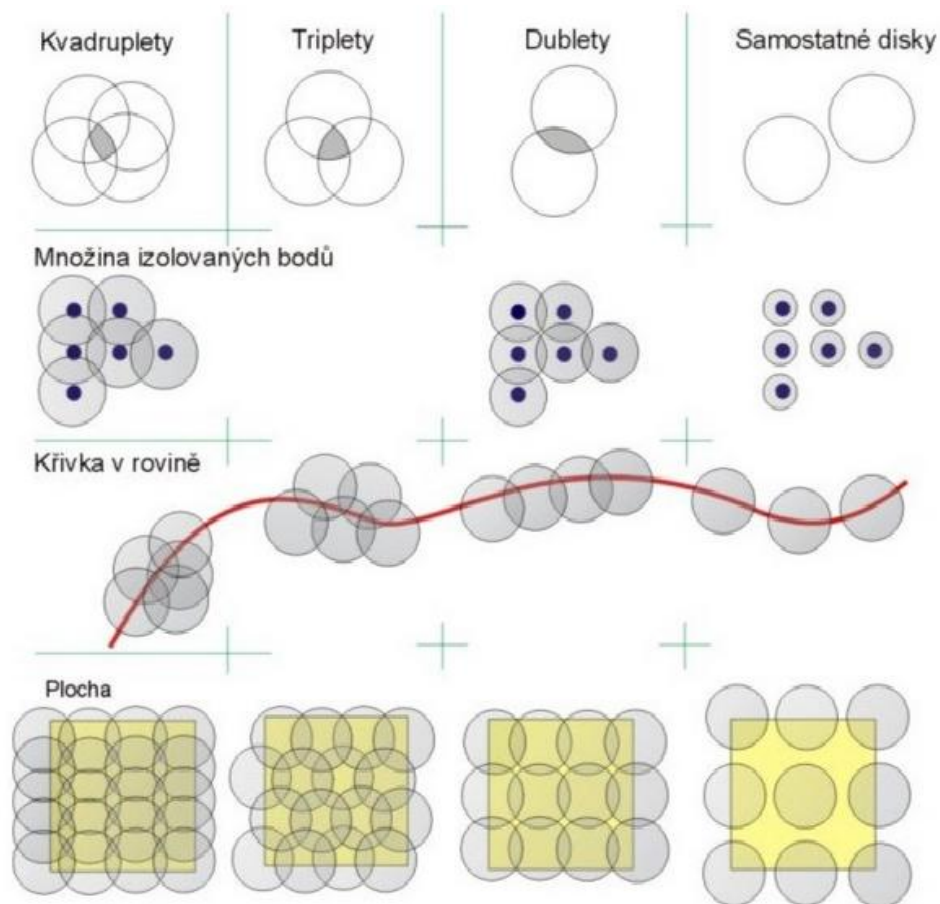
- 3) Dimenze spočetné množiny- Pokud F je spočetná, potom $dim_H(F_i) = 0$.
- 4) Dimenze otevřené množiny- Pokud $F \in R^n$ je otevřená množina potom $dim_H(E) \leq dim_H(F)$.
- 5) Dimenze hladké množiny- jestli F je hladká (spojitá, diferencovatelná) m-dimenzionální podvarianta v R^n , potom $dim_H(F) = m$.

2.5 Pokrývající dimenze D_p

Množina bodů, křivka a plocha mohou být pokryty disky několika možnými způsoby, jak je znázorněno na (Obr. 15). Jednotlivé útvary lze pokrývat samostatnými disky, dvojicí disků mající nenulový průnik, tzv. dubletách, třemi kotouči, které mají vzájemný nenulový průnik – triplety a disky, které mají vzájemný průnik čtyř kotoučů – kvadruplety. Pro pokrytí plochy nebo topologicky třídimenzionálního objektu je nutné použít místo disků kou-

le. Při nenulovém průniku dvou koulí se jedná opět o dublety, při nenulovém průniku tří koulí o tripletech, atd.

V případě pokrytí křivky v rovině, je křivka pokryta disky čtyřmi různými způsoby (Obr. 15 uprostřed). Na úplné pokrytí křivky stačí dublety, tedy pouze jediný průnik dvou sousedních disků a to při jakémkoliv poloměru, pokrývající dimenze je $D_P = 1$.



Obr. 16. Pokrývající dimenze - pokrývání bodů, křivky a plochy koulemi [10]

Množina izolovaných bodů může být pokryta koulemi o nekonečně malém poloměru, takže mezi koulemi nebude žádný průnik. Pokrývající dimenze $D_P = 0$.

Plocha má pokrývající dimenzi $D_P = 2$. Na (Obr. 15) vpravo uprostřed jsou na pokrytí plochy použity dublety a jak je vidět, toto pokrytí není dostačující, neboť plocha není pokryta celá. Na pokrytí je třeba průnik alespoň ale tři disků (triplety), jak je znázorněno na (Obr. 15) dole uprostřed.

Podobná myšlenka určuje pokrývající dimenzi například krychle, kdy jsou použity místo disků koule, takže pokrývající dimenze $D_P = 3$.

Definice pokrývající dimenze je následující:

Pokud množina S je pokryta malými disky respektive koulemi, maximální počet disků respektive koulí, který má vzájemně nenulový průnik, je nazýván uspořádání pokrytí. V případě dublet je uspořádání rovno dvěma, v případě triplet je to 3 a v případě kvadruplet je to 4. Otevřená pokrytí množiny S jsou soubory konečně otevřených dílků $A = \{A_1, \dots, A_m\}$ takové, že jejich spojení pokrývá množinu S . Otevřené pokrytí $B = \{B_1, \dots, B_m\}$ je nazýváno zjemnění množiny A stanovené pro každé B_i , v němž je A_k takové že $B_i \in A_k$ (množina B_i je podmnožinou množiny A_k). Uspořádání pokrytí množiny A maximální celočíselné k takové, že existují disjunktivní (nespojité) indexy i_1, \dots, i_k s $A_{i_1} \cap \dots \cap A_{i_k} \neq \emptyset$.

Množina S má pokrývající dimenzi $D_p = n$ právě tehdy, pokud pro libovolný poloměr disku respektive koule $r > 0$ existuje pokrytí množiny S koulemi o poloměru r takové, že každý bod množiny S patří maximálně do $n + 1$ pokrývajících koulí a neexistuje takové pokrytí těmito koulemi, pro které by každý bod z množiny S patřil do n koulí.

Dá se dále prokázat, že pro převážnou většinu množin platí $D_T = D_p$. Pomocí pokrývající dimenze můžeme tedy definovat dimenzi topologickou. [10]

3 VYUŽIJTE GEOMETRICKÝCH PROSTŘEDKŮ PŘI HODNOCENÍ TZV. STRATIFIKOVANÝCH POVRCHŮ

Hypotézy jako domněnky (dohady, předpoklady) z řeckého hypod, níže, snížený + thesis - tvrzení, jsou tvrzení, které vědci formulují tehdy, když na dané úrovni poznání nevědí vysvětlit určité skupiny jevů nebo událostí a hypotéza se je pokouší vysvětlit. Umožňuje určit, zda experimentálně získaná data vyhovují předpokladu, který byl před testováním stanoven. V době formulování hypotézy není možné s jistotou prohlásit, zda je daná hypotéza pravdivá, nebo nepravdivá. Snaha o hlubší poznávání dává možnost pro rozvoj nových hypotéz. Ověřování hypotéz se nazývá testování hypotéz. V určitých případech může být hypotéza ověřena pouze s určitou mírou pravděpodobnosti.

Vědecká hypotéza musí vyhovovat následujícím podmínkám:

- Musí vycházet z dosavadních poznatků.
- Musí být ve shodě s fakty, kterých se týká.
- Musí objasňovat většinu jevů kterých se týká, případně musí být použitelná i na jevy, které v době formulování hypotézy nejsou známy.
- Musí být vědecky ověřitelná, např. experimentům.

3.1 Testování statistických hypotéz

Při testování parametry základního souboru neznáme, proto stanovíme hypotézu, kterou ověřujeme statistickými postupy. Ověřovat lze předpoklady nejen o parametrech (např. O střední hodnotě), ale také o tvaru rozdělení statistického znaku (např. Testování shody empirického rozdělení četností s normálním rozdělením).

Rozdělení statistických hypotéz:

A) Parametrické hypotézy - pojednávají o parametrech rozdělení (populace). Setkáváme se s třemi rozděleními:

- Hypotézy o parametry jedné populace (o střední hodnotě, mediánu, rozptylu, relativní četnosti, ...)
- Hypotézy o parametry více než dvou populací (ANOVA)

Parametrické hypotézy je možno zapsat jako rovnosti (resp. Nerovnosti) mezi testovaným parametrem a jeho předpokládanou hodnotou (např. " $M = 100$ ", " $\pi \leq 0,08$ ") nebo jako rovnosti (resp. Nerovnosti) mezi testovanými parametry (např. " $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$ "). K odvo-

zení parametrických testů je třeba pro daný výběr specifikovat typ rozdělení (v některých případech i některé parametry tohoto rozdělení, nejde tedy o všeobecně libovolné testy parametrických hypotéz). [15]

B) Neparametrické hypotézy - pojednávají o jiných vlastnostech populace (tvar rozdělení, závislost proměnných). Tímto testem se říká, pokud k jejich odvození není nutné pro daný výběr specifikovat typ rozdělení. [15]

3.1.1 Výběr statistické metody

Určujeme podle typu proměnných. Přehled proměnných viz. následující rozdělení.

Kvalitativní proměnné:

Nominální proměnná - neuspořádává se, nabývá rovnocenných variant (např. Barvy, národnost, pohlaví)

Ordinální proměnná - pořádá se, variantou se dá přiřadit pořadí, je možné je seřadit, porovnat (např. Velikosti oblečení, vzdělání, ...)

Diskrétní proměnná - nabývá konečné množství variant (např. Klasifikace, ...)

Kvantitativní proměnné:

Spojité proměnná - nabývá libovolné hodnoty n z podmnožiny m . (např. výška, hmotnost, věk ...)

Tab. 1. Výběr statistické metody [16]

Typy proměnných:	Test:
Dvě kvalitativní	X ² test
Kvalitativní (dvě proměnné) X proměnných	T test
Kvalitativní (dvě a více proměnných) X proměnných	Jednosměrná ANOVA
Dvě spojitě	Korelace

3.2 Nulová a alternativní hypotéza

V tomto případě jde o rozhodnutí, v němž proti sobě stojí dvě tvrzení. Nulová hypotéza H_0 jako jedna z nich je opakem toho, co chceme, aby zkoumání dokázalo, představuje určitý Rovnovážného stavu, proto je vyjadřována znaménkem rovnosti "=".

Pokud testujeme statistickými metodami, tak proti sobě musí stát dvě hypotézy. Druhou z nich je alternativní hypotéza H_A , která přesně určuje, do jaké situace se dostaneme, jestliže nulová hypotéza neplatí. Představuje porušení ustáleným stavem a je možné ji zapsat jedním z uvedených znaků ($\neq, <, >$). Pokud je určená znaménky $<, >$ hypotéza se nazývá jednostrannou alternativní hypotézou. Při použití nerovnosti \neq se hovoří o tzv. Obojstranné alternativní hypotéze. Nulová a alternativní hypotéza se musí navzájem vylučovat.

Shrnutí: Nulová hypotéza H_0 je určena vždy jednoznačně (např. $M_1 = 100$), na rozdíl od alternativní hypotézy. Pokud obsahuje zadání vedoucího na testování hypotéz vztah jednostranné nerovnosti, volí se alternativní hypotéza příslušná jednostranná hypotéza. V ostatních případech se volí oboustranná alternativní hypotéza. H_A by měla být v souladu s výběrovým souborem. Pokud tomu tak není, přizpůsobíme H_A závěrem získaným z výběrového souboru. [15]

3.2.1 Postup testu

1. Formulace nulové H_0 a alternativní H_A hypotézy

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \quad (17)$$

$$H_A: \mu_1 \neq, <, > \mu_2 \quad (18)$$

2. Zvolení hladiny významnosti α , tak dostanu kritickou hodnotu ($t_{krit.}$)

3. Nalezení vhodného testovacího kritéria a výpočet jeho hodnoty (t)

4. Srovnání vypočteného testovacího kritéria (t) s kritickou hodnotou ($t_{krit.}$)

5. Pokud je hodnota testovacího kritéria $t > t_{\alpha/2}$ jako hodnota kritická zamítnout nulovou hypotézu. Pokud se H_0 nedá odmítnout, nemusí to znamenat, že automaticky platí. Může se jednat o nedostatečně velký výběr, pro získání důkazů na její zamítnutí.

3.2.2 Chyba I. a II. druhu

V rozhodování o H_0 vycházíme z výběrového souboru, který nemusí dostatečně přesně reprezentovat vlastnosti základního souboru, to znamená, že není zcela vyloučena možnost vzniku chyby.

Uvedený postup způsobuje chybu I. druhu (k chybnému zamítnutí hypotézy), nebo že chybě II. druhu (chybné přijetí hypotézy). Pravděpodobnost chyby I. druhu se nazývá jako hladina významnosti testu, označovaná jako α . Pokud platí H_0 a my jsme ji nezamítli, rozhodnutí je správné. Pravděpodobnost tohoto rozhodnutí se nazývá spolehlivost, označovaná jako $1 - \alpha$. Pravděpodobnost, že neodmítne H_0 pokud platí H_A je chybou II. druhu, označovaná β . Správné rozhodnutí o zamítnutí H_0 , tedy pokud je platná H_A se dopouštíme s pravděpodobností $1 - \beta$, nazývaná také síla testu. Pro lepší znázornění a pochopení viz. (Tab. 2).

Při testování hypotéz se snažíme minimalizovat obě chyby, což není možné, protože při snížení β se zvýší hladina významnosti α a naopak. Nejlepším způsobem je najít kompromis mezi požadavky na α a β . Hladina významnosti je rozhodujícím vstupním parametrem testu pro pravděpodobnost chyby I. druhu volena obvykle 5% -ní, nebo 1% -ní. Chybu II. druhu snižuje, pokud máme možnost výběru volbou vhodného testu. Pokud ne, zvýšíme rozsah výběrového souboru, při čemž se sníží β a α zůstane neměnná.

Tab. 2. Platnost nulové nebo alternativní hypotézy [16]

Rozhodnutí:	Skutečnost:	
	platí H_A	platí H_0
Nezamítáme H_0	Správné rozhodnutí pravděpodobnost rozhodnutí $1 - \alpha$	Chyba II. druhu pravděpodobnost rozhodnutí β
Zamítáme H_0	Chyba I. druhu pravděpodobnost rozhodnutí α	Správné rozhodnutí pravděpodobnost rozhodnutí $1 - \beta$

3.3 T-test (Rovnost středních hodnot)

T-test je jedním z nejpoužívanějších testů, předurčený pro vícerozměrný lineární regresivní model. Řadí se do parametrických testů, což nám vypovídá o předpokladu, že výběry patří do normálního rozdělení. T-test je založen na principu porovnání dvou nezávislých výběrů, umožňuje porovnat dvě populace, kde zjišťujeme nezávislost výběrů, tím že každý z výběru obsahuje jiné prvky. Prvky v jednotlivých výběrech nemusí obsahovat stejný počet pozorování, avšak při vysoké nevyváženosti počtu prvků klesá robustnost testu.

Pokud zjistíme metodou nejmenších čtverců, že regresní koeficienty jsou nějaké nenulové čísla, a bereme v úvahu, že jde o provádění náhodných veličin, je namístě testovat, zda původní parametry nemohou být přesto nulové. Za předpokladu klasického lineárního modulu je možné testovat nulovou hypotézu:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 (\mu_1 - \mu_2 = 0) \quad (19)$$

a alternativní hypotézu:

$$H_A: \mu_1 > \mu_2 (\mu_1 - \mu_2 > 0) \quad (20)$$

$$\mu_1 < \mu_2 (\mu_1 - \mu_2 < 0) \quad (21)$$

$$\mu_1 > \mu_2 (\mu_1 - \mu_2 > 0) \quad (22)$$

$$\mu_1 \neq \mu_2 (\mu_1 - \mu_2 \neq 0) \quad (23)$$

Poznámka:

Při alternativní hypotéze máme výběr ze tří možností na rozdíl od nulové, která je přímo určena. Správná volba se určuje podle vztahu mezi průměry jednotlivých výběrů.

pokud:

\bar{x}_1 je jednoznačně vyšší než \bar{x}_2 , volíme $\mu_1 > \mu_2$,

\bar{x}_1 je jednoznačně nižší než \bar{x}_2 , volíme $\mu_1 < \mu_2$

\bar{x}_1 se nachází v blízkosti \bar{x}_2 , volíme $\mu_1 \neq \mu_2$,

Volba testované charakteristiky je určena poznáním (resp. Nepoznaného) směrodatných odchylek σ_1, σ_2 .

Pokud známe σ_1, σ_2 , pak:

$$T(X) = Z_2 = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}} \rightarrow N(0,1) \quad (24)$$

Pokud nepoznáme σ_1, σ_2 , pak:

$$T(X) = Z_2 = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \rightarrow t_{n_1+n_2-2} \quad (25)$$

$$\text{kde } S_p = \sqrt{\frac{(n_1-1)s_1^2 + (n_2-1)s_2^2}{n_1+n_2-2}} \quad (26)$$

Označení t :

t_α při jednostranném testu $H_A(\mu_1 < \mu_2)$ nebo $(\mu_1 > \mu_2)$

$t_{\alpha/2}$ při oboustranném testu $H_A(\mu_1 \neq \mu_2)$

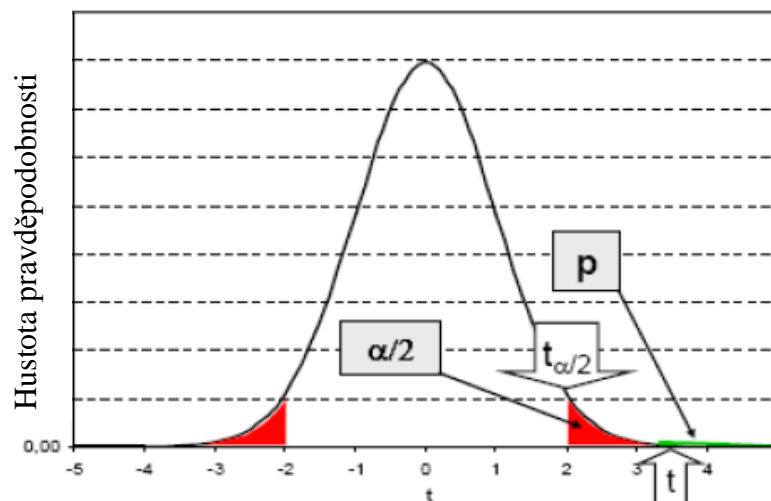
$$t_{\alpha/2} = f(\alpha/2, D_F) \quad (27)$$

$$D_F = 1(n_1 + n_2) - 2 \quad (28)$$

Následuje rozhodnutí o zamítnutí nulové hypotézy H_0

Pokud $|T| > t_{\alpha/2}$ – ANO, pravděpodobnost, že uvažujeme nesprávně je menší než 5% ($p < 0,05$), zamítám H_0 , přestože platí hypotéza alternativní H_A .

Pokud $|T| < t_{\alpha/2}$ – NE, pravděpodobnost, že uvažujeme nesprávně a pokud by jsme zamítli nulovou hypotézu by byla větší jak 5% ($p > 0,05$). [17]



Obr. 17. Ukázka Studentova rozdělení ($DF=28$) [17]

3.4 F-test (Rovnost rozptylů)

F-test hypotézy o hodnotách regresních koeficientů odhaluje, zda vůbec existuje nějaká vysvětlující proměnná, která má na vysvětlovanou proměnnou vliv.

Testuje se nulová hypotéza

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2, \quad (29)$$

oproti alternativní hypotéze

$$H_A: \sigma_1^2 > \sigma_2^2, \quad (30)$$

nebo $\sigma_1^2 < \sigma_2^2$.

Stejně jako u t-testu je nulová hypotéza jasná. V tomto případě však u alternativní hypotézy máme pouze dvě možnosti. Oboustranná alternativní hypotéza odpadá z důvodu založení testu shody dvou rozptylů na Fischer-Snedecorovom rozdělení, které porušuje podmínku, která uvádí, pro výpočet p-value pro oboustrannou alternativní hypotézu, že nulové rozdělení testové charakteristiky má být symetrické. Rozhodujeme se na základě vztahu rozptylu výběru jednotlivých výběrů.

Pokud s_1^2 je jednoznačně vyšší než s_2^2 , volíme $\sigma_1^2 > \sigma_2^2$, ale pokud je s_1^2 jednoznačně nižší než s_2^2 , volíme $\sigma_1^2 < \sigma_2^2$.

Volba testované charakteristiky

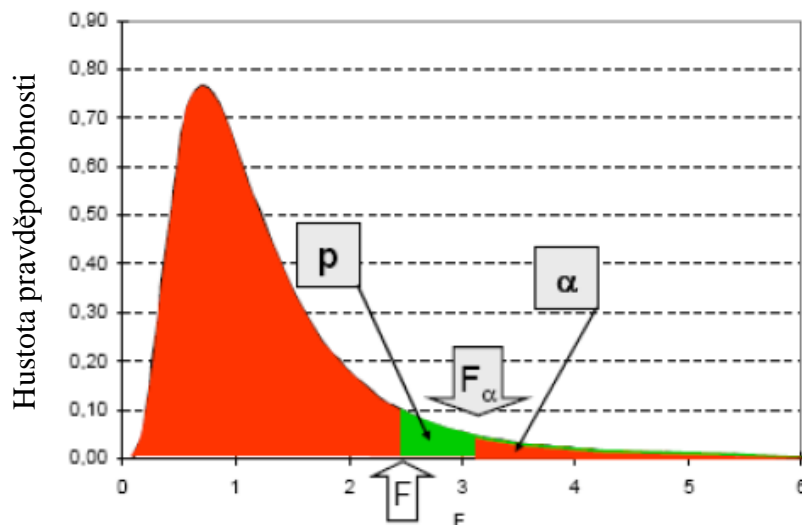
$$T(X) = F = \frac{s_1^2}{s_2^2} \rightarrow F(m, n), \quad (31)$$

kde F má Fischer-Snedecorovo rozdělení s m stupni volnosti pro čitatele a n stupni volnosti pro jmenovatele.

$$F_\alpha = (\alpha, DF_1, DF_2) \quad (32)$$

$$DF_1 = n_1 - 1 \quad (33)$$

$$DF_2 = n_2 - 1 \quad (34)$$



Obr. 18. Ukázka Fisherova rozdělení ($DF_1=17, DF_2=8$) [17]

Následuje rozhodnutí o zamítnutí H_0 :

Pokud $F > F_{\alpha}$ - ANO, pravděpodobnost, že uvažujeme nesprávně je menší než 5% ($p < 0,05$).

Pokud $F < F_{\alpha}$ - NE, pravděpodobnost, že uvažujeme nesprávně, pokud by jsme zamítli nulovou hypotézu by byla větší jak 5% ($p > 0,05$).

3.5 Metoda Anova (Analysis of variance)

Je metoda testování hypotéz o rovnosti středních hodnot, ale (ne) zamítnutí se provádí na základě analýzy rozptylu. Slouží pro vícenásobné porovnání středních hodnot, umožňuje ověřit významnost rozdílu mezi výběrovými průměry většího počtu náhodných výběrů, umožňuje posoudit vliv různých faktorů na proces charakterizovaný kvantitativním statistickým znakem Y , dovoluje hodnotit účinky různých opatření.

Předpoklady pro použití metody analýzy rozptylu pro testování rozdílů více středních hodnot:

- Nezávislost měření (ve skupinách i mezi skupinami)
- Normalita dat v každé skupině
- Homogenita rozptylů (alespoň přibližná homogenita uvnitř skupin) [17]

3.5.1 Jednofaktorová anova

Pointa analýzy rozptylu spočívá v rozkladu celkového rozptylu na dílčí rozptyly příslušející jednotlivým vlivům, podle kterých jsou data roztříděny. Reziduální rozptyl je jednou ze složek celkového rozptylu, který vyjadřuje nepostižitelné vlivy.

Metoda prokazující závislost hodnot znaku Y na faktoru X , pro které jsou k dispozici příslušná data, že celkovou variabilitu měřenou součtem čtverců odchylek od celkového průměru je rozdělena na variabilitu uvnitř jednotlivých výběrů a na variabilitu mezi jednotlivými výběry. Cíl je buď přijetí nulové hypotézy o vzájemné nezávislosti Y na X , nebo ji zamítnout (na zvolené hladině významnosti) a tedy předpokládat závislost Y na X .

Většinou máme k nezávislých náhodných výběrů, které nemusí obecně pocházet z jednoho základního souboru. Jinak řečeno, nemusí být stejného typu s různými rozsahy tj. počty prvků $n_1, n_2, n_3, \dots, n_k$. Číslo k může být libovolné celé, vyšší než 1, podle dané situace. Rozsahy výběrů nemusí být stejné. V každém z nich bude znám výběrový průměr \bar{x}_i , výběrový rozptyl $s_i^2, i = 1, 2, \dots, k$. Obecně vznikají výběrové soubory v základním rozdělení na základě určitého statistického znaku X (nezávislý faktor) do k skupin. V každém z nich se nachází i_n prvků kde $i = 1, 2, \dots, k$. Hodnoty nezávislého faktoru předem určíme a často nabývají kvalitativní (nečíselné) veličiny. Nemusí být vzájemně uspořádány. Rovněž faktor X , který nabývá k kvalitativních hodnot může a nemusí mít vliv na hodnoty statistického znaku Y (o kterém předpokládáme, že má kvantitativní povahu). Anova má snahu prokázat, zda hodnoty kvalitativního znaku X ovlivňují hodnoty kvantitativního znaku Y (závislého faktoru) Hodnoty znaku Y , které přísluší hodnotě x_i faktoru X označujeme $y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{im}$. Pro vyhodnocování a analýzu je vhodné upravit a uspořádat údaje do přehledné tabulky, která by měla obsahovat číslo výběru, zjištěné hodnoty sledovaného znaku, počet prvků, průměr, rozptyl. [17]

Předpoklady analýzy:

Faktor X má k úrovní (hodnot x_i), s účinkem na znak Y , který se dá vyjádřit vztahem

$$\mu_i = \mu + \alpha_i, i = 1, 2, \dots, k, \text{ kde}$$

μ_i - je průměr znaku Y v i -té skupině (příslušné k hodnotě faktoru x_i)

μ - je celkový průměr znaku Y

α_i - je efekt hodnoty faktoru x_i na znak Y

Formulujeme nulovou hypotézu, že všechny výběry vycházejí ze stejného základního souboru, jinak řečeno, že hodnoty faktor X nemají na hodnoty znaku Y žádný vliv. Dále předpokládejme, že hodnoty α_i pocházejí z normálního rozdělení, střední hodnota se rovná nule a rozptyl σ^2 je konstantní.

3.5.2 Jednofaktorová anova (Vzorce pro výpočet):

Nulová hypotéza:

$$H_0: E(\alpha_1) = E(\alpha_2) = \dots = E(\alpha_k) = 0 \quad (35)$$

Alternativní hypotéza:

$$H_1: E(\alpha_i) \neq E(\alpha_j) \quad (36)$$

$E(\alpha_i)$ - střední hodnota náhodné veličiny α_i

Při ANOVA testu postupujeme běžným statistickým postupem zvaným testování statistických hypotéz. Buď přijmeme nulovou hypotézu a tím vyvodíme nezávislost hodnot faktoru Y na faktoru X , nebo ji zamítneme na zvolené hladině významnosti a konstatujeme pro daný postup, že faktor X ovlivňuje Y .

Celkovou variabilitu znaku Y , změříme výběrovým rozptylem:

$$s^2 = \frac{\sum_i \sum_j (y_{ij} - \bar{y})^2}{n-1} \quad (37)$$

V souvislosti s analýzou rozptylu se tato část zabývá pouze čtenářům (Rovnice 32), čili součtem čtverců odchylek zjištěných hodnot y_{ij} od celkového průměru \bar{y} , přičemž průměr vypočítáme součtem všech hodnot a výsledek vydělíme jejich počtem viz. (Rovnice 33).

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} y_{ij} \quad (38)$$

Uvedený součet čtverců budeme označovat symbolem s_y :

$$s_y = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y})^2 \quad (39)$$

Celkovému součtu čtverců náleží počet stupňů volnosti $df_y = n - 1$.

Variabilita mezi skupinami bude měřená meziskupinovým součtem čtverců $s_{y,m}$, definovaným jako:

$$s_{y,m} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} n_i (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \quad (40)$$

Meziskupinovému součtu čtverců náleží počet stupňů volnosti $df_m = k - 1$.

Variabilitu uvnitř skupin pojmenováváme jako vnitroskupinovou (zbytkovou), označovanou $s_{y,y}$ a je definována jako:

$$s_{y,y} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \quad (41)$$

Vnitroskupinovým součtu čtverců přináleží počet stupňů volnosti $df_v = n - k$.

Aritmetickými úpravami výše uvedených rovnic lze snadno prokázat základní vztah analýzy rozptylu, a to že celkový součet čtverců s_y je roven sumě mezi jednotlivými a vnitroskupinových součtu čtverců.

$$s_y = s_{y,m} + s_{y,v} \quad (42)$$

Pro ověření nulové hypotézy použijeme statistiku:

$$F = \frac{\frac{s_{y,v}}{n-k}}{\frac{s_{y,m}}{k-1}} = \frac{df_m}{df_v} \quad (43)$$

kteří má při platnosti nulové hypotéza Fisherova rozdělení $(k - 1, n - k)$. Kritické hodnoty Fischerova rozdělení $F_\alpha(df_1, df_2)$ jsou tabelované pro různé hodnoty hladiny α a různé hodnoty parametrů (degree of freedom) df_m, df_v . Někdy se místo kritických hodnot tabelují kvantily tohoto rozdělení $F_{\alpha-1}^k(df_1, df_2)$, protože jejich výsledky jsou shodné.

$$F_\alpha = (df_1, df_2) = F_{\alpha-1}^k(df_1, df_2) \quad (44)$$

Např. 5% - ní kritická hodnota je rovna 95% - nímu kvantilu při stejných hodnotách parametrech df_1, df_2 . [17]

Postup:

1. Zvolíme hladinu významnosti α , představující chybu I. druhu, tj. pravděpodobnost zamítnutí nulové hypotézy. Uváděné jako čísla, nebo v procentech.
2. Vypočítáme hodnotu statistiky F pomocí (Rovnice 38).
3. Porovnáme vypočítané F v kroku dva s kritickou hodnotou $F_\alpha(df_1, df_2)$. Následně rozhodneme ze dvou alternativ a to buď:
 - a) Platí $F \leq F_\alpha(k - 1, n - k)$, v tomto případě se nulová hypotéza přijímá (nezamítá), a je interpretována tak, že hodnoty faktoru X nemají na hodnotu znaku Y statisticky významný vliv (na zvolené hladině významnosti). Faktor X je neúčinný.

- b) Platí $F > F_{\alpha}(k - 1, n - k)$, nulová hypotéza je zamítnuta, přijímá se hypotéza alternativní. Konstatuje se, že faktor X je účinný a má na hodnotu znaku Y statisticky významný vliv.

Poměr determinace a korelace:

Čím větší je $s_{y,m}$ tím vzrůstá těsnost závislosti znaků X a Y . Jelikož jsou jednotlivé součty čtverců vzájemně propojeny vztahem (Rovnice 42), píšeme rovnici:

$$P^2 = \frac{s_{y,m}}{s_y} \quad (45)$$

tím je zavedena míra těsnosti závislosti znaku Y na znaku X poměr determinace P^2 . Odmocninu z tohoto poměru P , nazýváme poměr korelace. Poměr determinace nabývá hodnot $[0,1]$, určované v závislosti na těsnosti X a Y . Čím je těsnější, tím se hodnota P^2 blíží k 1. To rovněž ovlivňuje i vnitroskupinový součet čtverců, který se blíží k celkovému součtu čtverců, na rozdíl od meziskupinového součtu čtverců, který se blíží nule. P^2 je náhodná veličina, protože poměr vychází z podílu dvou náhodných veličin, proto může být výsledkem kladné číslo, i v případě, že výsledkem ANOVA je fakt, že zkoumaný objekt není statisticky významný, nebo sledovaná veličina na faktoru nezávisí. Logicky by mělo pak platit, že P^2 je nulový. Zdánlivý rozpor vysvětlujeme statistickým přístupem, testem statistické hypotézy pro daný případ $H_0: P^2 = 0$. Testovacím kritériem se stane statistika F ze vzorce (Rovnice 38). Pokud platí: $F \leq F_{\alpha}(k - 1, n - k)$ pak se nulová hypotéza přijímá. Konstatuje, že hodnoty X nemají na hodnoty znaku Y , žádný statistický vliv na zvolené hladině významnosti. Poměr determinace a korelace je roven nule. Jinak řečeno, je statisticky nevýznamný. V opačném případě se nulová hypotéza zamítá. Poměry determinace a korelace jsou nenulové, a dá se mluvit o síle závislosti veličiny Y na faktoru X .

3.5.3 Kruskal-Wallis test

Neparametrická verze jednofaktorové analýzy metody ANOVA, používána při nesplnění podmínek pro použití ANOVA (nejen pro metrická data, která mají náhodné rozdělení a jejich rozptyl uvnitř skupin je přibližně stejný). Nulová hypotéza při tomto druhu testu předpokládá, že měření ve skupinách má stejné mediány. Protože se pracuje na úrovni ordinální měření, nejdříve se uspořádají všechna data podle velikosti. Pak se nahradí jejich hodnoty pořadími a vypočítají se koeficienty, SR^i jako součty pořadí dat ve skupině i .

Podle vzorce (Rovnice 41) spočítáme testovací kritérium H , které udává rozdílnost aritmetických průměrů pořadí ve skupinách.

$$H = \left[\frac{1}{n(n-1)} \cdot \sum_{i=0}^n \left(\frac{(S \cdot R_i)^2}{n_i} \right) \right] - 3 \cdot (n + 1) \quad (46)$$

Přibližně platí, že při $H \geq 4$ je $p \leq 0,05$. [18]

4 DEFINICE PARAMETRŮ Z NORMY ČSN EN ISO 25178-2

4.1 Termíny geometrického parametru

- Parametr pole je parametr určený ze všech bodů v omezené stupnici povrchu.
- Parametr prvku je parametr stanovený z podmnožiny předurčených topografických prvků z omezení stupnice povrchu.
- V-parametr je objem materiálu nebo zkoušený objem pole nebo parametr prvku.
- S-parametr je pole nebo parametr prvku, který není V-parametr.
- Výška je vyznačená kolmá vzdálenost z referenčního povrchu k omezení stupnice povrchu. Výška je záporná za předpokladu, že bod leží od referenčního povrchu ve směru materiálu.
- Hodnota koordinace $z(x, y)$ je výškové omezení stupnice povrchu v poloze (x, y) . Souřadnicový systém je založen na referenčním povrchu. [19]

4.2 Termíny geometrického prvku

- Pik je bod na povrchu, který je vyšší než všechny další body v jeho okolí.
- Vrch je oblast okolo piku taková, že směr všech maximálních cest končí v piku.
- Přímka kurzu je křivka, která odděluje přilehlé vrchy.
- Prohlubeň je nejnižší bod na povrchu, který je nižší než všechny další body v jeho okolí.
- Údolí je oblast okolo prohlubně taková, že směr všech maximálních cest končí v prohlubni.
- Hřebenová přímka je křivka oddělující přilehlá údolí.
- Sedlo je sada bodů na omezené stupnici povrchu, kde se kříží hřebenové přímky a přímky kurzu.
- Bod sedla je jeden bod příslušného sedla.
- Topografický prvek je plocha, přímka nebo bod prvku vymezující stupnici povrchu.
- Plocha prvku je vrch nebo údolí.
- Přímka prvku je přímka kurzu nebo hřebenová přímka.
- Bod prvku je pik, prohlubeň nebo bod sedla.
- Obrysová přímka je přímka na povrchu skládajících se z bodů stejné výšky. [19]

- Strom změn je graf, kde každá obrysová přímka je vymezena body proti výšce tak, že přilehlé obrysové přímky tvoří přilehlé body grafu. Píky a prohlubně jsou zastoupeny na stromu změny pomocí konců přímek. Body sedla jsou zastoupeny na stromu změny pomocí spojovacích přímek.
- Pročištění je zjednodušená metoda stromu změny, ve které jsou přímky z piků/prohlubní z nichž jsou odstraněny nejbližší připojené body sedla.
- Místní výška piku je rozdíl mezi výškou piku a výškou nejbližšího připojeného sedla v oblasti stromu změny.
- Místní hloubka prohlubně je rozdíl mezi hloubkou nejbližšího připojeného sedla na stromu změny a hloubkou prohlubně.
- Wolfovo pročištění je pročištění, kde přímky jsou odstraněny, aby od piku/prohlubně s nejmenší místní výškou/hloubkou piku/prohlubně až do piku/prohlubně se specifickou místní výškou piku/prohlubně. Místní výšky/hloubky piku/prohlubně se budou měnit v průběhu Wolfova pročištění, jako odstraňující čáry od stromu změny bude také odstraněn přidružený bod sedla.
- Výška piku Wolf je minimální práh, ve kterém je pik prořezán na základě průniku Wolf.
- Hloubka prohlubně Wolf je minimální práh, ve kterém je prohlubeň prořezána na základě průniku Wolf.
- Výška rozlišování je minimální výška piku Wolf nebo hloubka prohlubně Wolf omezené stupnice povrchu, které by měly být vztahy v úvahu. Výška rozlišování je obvykle specifikována jako procento S_z . [19]

4.3 Definice parametru pole

V předchozích terminologiích je každý termín vymezen jeho parametrem (zkratkou termínu), a následně jeho značkou. Zatímco zkrácené termíny se mohou skládat z více písmen, značka je tvořena pokud je potřeba jen ze samotného písmene s indexem. Značky jsou použity v rovnicích. Důvodem pro toto odlišení je, abychom předešli k nesprávnému výkladu sloučených písmen jako je indikace vícevětého počtu násobků mezi veličinami v rovnicích. Parametry (zkrácené termíny) jsou použity ve výrobní dokumentaci, technických výkresech a datových listech.

Všechny výškové parametry jsou stanoveny na základě určené plochy. [19]

- Základ průměrné výšky čtverce omezené stupnice povrchu S_q je určen vymezením průměrné hodnoty čtverce hodnot koordinace uvnitř plochy. [19]

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x, y) dx dy} \quad (47)$$

- Šikmost omezené stupnice povrchu S_{sk} je koeficient průměrné hodnoty koordinační krychle a hodnot a krychle S_q uvnitř stanovené krychle.

$$S_{sk} = \frac{1}{S_q^3} \left[\frac{1}{A} \iint_A z^3(x, y) dx dy \right] \quad (48)$$

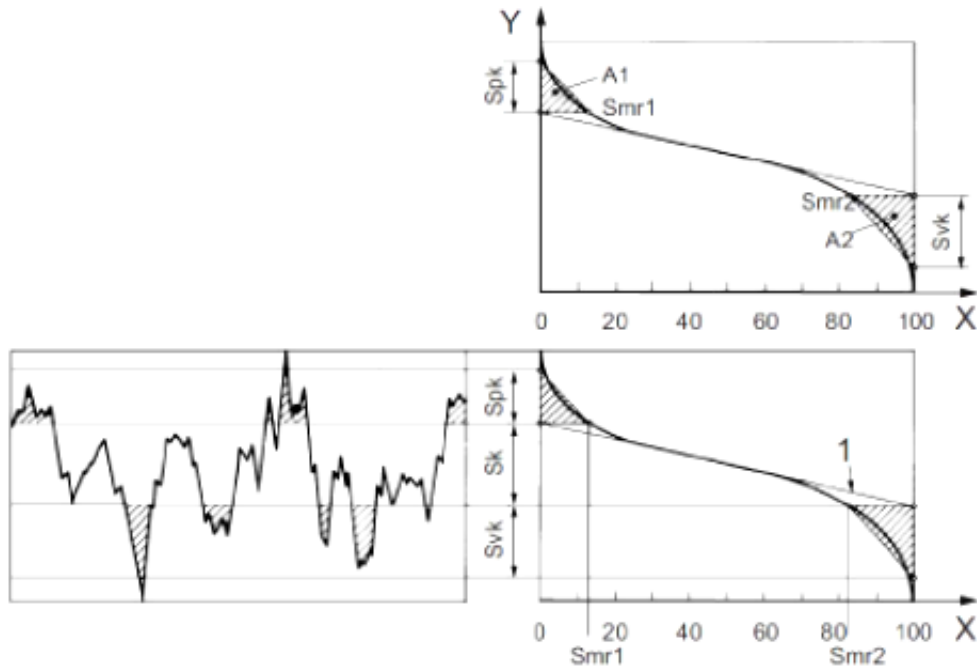
- Špičatost omezené stupnice povrchu S_{ku} je koeficient průměrné čtvrté odmocniny hodnot koordinace a hodnoty čtvrté mocniny S_q uvnitř stanovené plochy.

$$S_{ku} = \frac{1}{S_q^4} \left[\frac{1}{A} \iint_A z^4(x, y) dx dy \right] \quad (49)$$

- Maximální výška piku omezené stupnice povrchu S_p je největší hodnota výšky piku uvnitř stanovené plochy.
- Maximální výška prohlubně omezené stupnice povrchu S_v je hloubka prohlubně uvnitř určené plochy zmenšená o její nejmenší hodnotu.
- Maximální výška omezené stupnice povrchu S_z je součet maximální hodnoty výšky piku a maximální hodnoty hloubky prohlubně uvnitř určené plochy $S_z = S_p + S_v$.
- Aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu S_a je aritmetický průměr absolutních hodnot koordinace uvnitř stanovené plochy.

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |z(x, y)| dx dy \quad (50)$$

- Povrch jádra je omezení stupnice povrchu kromě výstupních jader vrchů a údolí.
- Výška jádra S_k je vzdálenost mezi nejnižší úrovní povrchu jádra.
- Redukovaná výška piku S_{pk} je průměrná výška vystupujících piků nad povrch jádra.
- Redukovaná hloubka údolí S_{vk} je průměrná hloubka vystupujících údolí pod povrch jádra.
- Poměr materiálu S_{mr1} je poměr plochy materiálu v průsečiku přímky, který odděluje vystupující vrchy od jádra povrchu k ploše hodnocení.
- Poměr materiálu S_{mr2} je poměr plochy řezu materiálu vymezený přímkou, který odděluje vystupující údolí od jádra povrchu, k hodnocené ploše.[19]



Obr. 19. Výpočet parametrů S_{pk} a S_{vk} [19]

X -poměr materiálu, Y -průsečík přímek polohy, 1-ekvivalentní přímka,
 A_1 -plocha vrchu, A_2 -plocha údolí, S_{mr1}, S_{mr2} -poměry materiálů

Plocha vrchu A_1 je vyšrafovaná na Obr. 18 a můžeme ji vypočítat, jako výšku pravoúhlého trojúhelníku, která přesahuje jádro profilu.

$$A_1 = \frac{S_{pk} \cdot S_{mr1}}{2} \quad (51)$$

Plocha údolí A_2 je také vyšrafovaná na Obr. 18 a můžeme ji vypočítat, jako výšku pravoúhlého trojúhelníku, která je umístěna pod jádrem profilu.

$$A_2 = \frac{S_{vk} \cdot S_{mr2}}{2} \quad (52)$$

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 U DANÝCH VZORKŮ PROVEĎTE PROSTOROVÉ SNÍMÁNÍ POVRCHU NA DEFINOVANÝCH PLOCHÁCH

Úkolem bylo porovnat jakost povrchu vzorků s leštěným povrchem před, ale i po povlakování. Vzorky jsme neleštily. Tato operace byla provedena firmou, která si nepřála být jmenována. Firma, která u vzorků tuto dokončovací operaci prováděla, ji realizovala manuálně. Vzorky nebyly leštěny v jednom časovém intervalu. Následná kontrola jakosti povrchu vyleštěných povrchů nebyla provedena, protože firma neměla na toto vyhodnocení vybavení a proto byly vzorky před snímáním hodnoceny jen pohledově.

5.1 Vzorky

Za vzorek byla zvolena destička o rozměru 40mm x 40mm x 10mm. Bylo použito 10 vzorků a u všech 10 vzorků byly povlaky po leštění nanášeny technologií PVD. Typ povlaku pro všechny vzorky byl zvolen TiAlN (titan aluminium nitrid). Destičky byly také tepelně zpracovány na $50 \pm 2\text{HRC}$. Vzorek je z univerzální oceli určený pro práci za tepla. Používá se především pro tvarové desky a vložky pro výrobu tlakovým vstřikováním, pro zpracování hliníkových, zinkových a magneziových slitin.



Obr. 20. Povlakovaný měřený vzorek 40mm x 40mm x 10mm

5.1.1 Specifikace materiálu

Tab. 3. Specifikace materiálu [20]

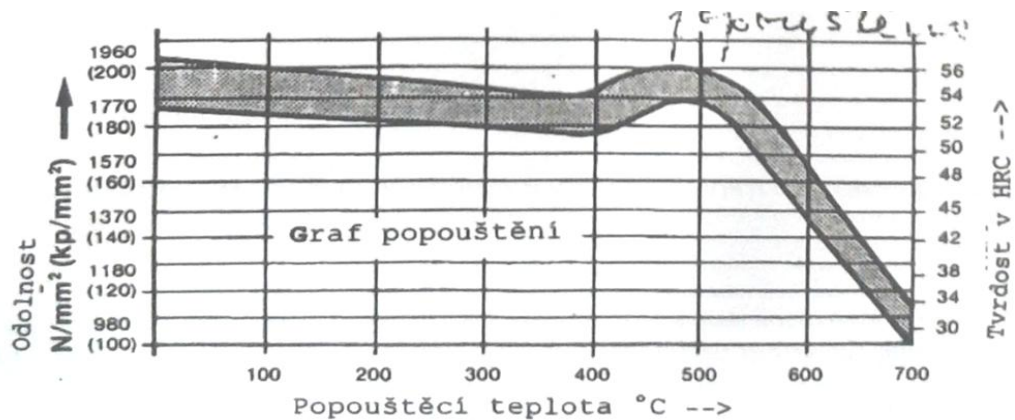
Ušlechtilá ocel	
Číslo materiálu	1.2343
DIN-označení	X38 CrMoV 5 1
Směrová analýza (%)	C-0,38 Si-1,0 Mn-0,4 Cr-5,3 Mo-1,2 V-0,4
Pevnost při dodávce	asi 780 N/mm ² (cca 80 kp/mm ²)

Pokyny pro materiál:

- a) Tvrdé chromování – Mělo by být použito jen ve zvláštních případech, například při korekturách rozměrů. Doporučuje se nejdříve pohovor s chromovnou.
- b) Erodivání - Je možné. Kvalita povrchu se řídí podle nastavení stroje a kvality elektrod. Měděné elektrody dávají lepší povrchy než grafitové elektrody. Důležité je dostatečné šlichtovací erodování.
- c) Nitridování - Zvyšuje odolnost proti opotřebení a zamezuje lpění stříkaného materiálu. Použitelné jsou všechny známé nitridovací postupy.

5.1.2 Tepelné ošetření materiálu

- Měkké žíhaní při teplotě 800-840°C
 - Délka procesu 3-6 hodin s pomalým ochlazováním v peci.
 - Odolnost proti žíhání je cca 780 N/mm² (cca 80 kp/mm³)
- a) Žíhaní - Žíhaní za nízkého napětí se doporučuje k odstranění napětí po hrubém opracování, především při hlubších konturách, jakož i pro zamezení deformace při kalení. Proces probíhá při teplotě 600-650°C a délka procesu je 2-3 hodiny s pomalým ohříváním a chlazením.
 - b) Kalení - Při kalení se předehřívá na 400 a 800°C, pak se postupuje na kalící teplotu 1000-1050°C.
 - Za použití tepelné lázně se proces provádí tak, že po vyrovnání teploty na cca 540°C následuje ochlazování na vzduchu až na cca 100°C.
 - V oleji teplém cca 60°C se ochlazuje až na cca 450°C, pak následuje ochlazení na vzduchu až na cca 100°C.
 - Na vzduchu dochází k ochlazení výrobku z kalících teplot až na cca 100°C. Výrobky musí být chráněny proti zokujení.
 - c) Ochlazení - Po ochlazení až na cca 100°C musí být výrobky přemístěny okamžitě do vyhřáté popouštěcí pece.
 - d) Popouštění - Provádí se asi 1 hodinu na každých 20mm síly stěny, nejméně však 2-3 hodin. Vícenásobné popouštění zvyšuje houževnatost a odolnost proti změně teploty. Teplotní ošetření nejvhodnějšího příslušný výrobek by mělo být stanoveno kalírnou. Potřebná tvrdost by měla být kalírně předepsána a při zpětném dodání zkontrolována. [20]



Obr. 21. Graf popouštění [20]

Povlaky nanášené technologií PVD:

- 1) Mikrotryskání povrchu vzorku. Bylo provedeno u vzorků, u kterých byla tato operace předepsaná. Leštěné vzorky byly ponechány v původním stavu.
- 2) Vzorky byly vyčištěny a odmaštěny chemicky v automatické čisticí lince. Celý proces čištění je zcela automatický. Detailní technologický postup odpovídá základnímu materiálu povlakovaného vzorku (nástroje).
- 3) Po vyčištění byly vzorky vysušeny horkým vzduchem
- 4) Vyčištěné vzorky byly vloženy do svlakovací komory.
- 5) Na svlakovací lince byl zvolen program pro nanášení požadovaného typu povlaku. Při povlakování jsou vzorky (nástroje) v komoře umístěny na stolech s trojnásobnou rotací která zajistí nanesení stejné tloušťky povlaku po celém povrchu. Tato technologie neumožňuje povlakování dutin. Povlak se vytváří z částic uvolňovaných z elektrod na obvodu svlakovací komory.
- 6) Před zahájením povlakování proběhne plazmová nitridace. Cílem plazmové nitridace je jednak finální dočištění povrchu a jednak zajištění maximální adheze povlaku k základnímu materiálu.
- 7) Technologie povlakování – Technologické parametry jsou řízeny počítačem a je tedy garantovaná reprodukovatelnost procesu. Tyto parametry stejně jako detailní parametry čištění v čisticí lince jsou předmětem KNOW HOW.
- 8) Povlakovací teplota je 200-500°C dle typu nanášeného povlaku. [20]

5.2 Použité měřidlo

Pro měření jsem použil přístroj Talysurf CLI 500 (Obr. 21). Přístroj je určen pro měření malých součástí. Laboratorní měřidlo tohoto typu je cenově drahé, a proto je nutné při manipulaci s měřidlem dodržovat určité zásady. Největší pozornost je tedy věnována ukládání měřeného objektu na podložku, tak aby nedošlo ke kontaktu s čočkou přístroje. Na (Obr. 25) je vidět polohovací stolek přístroje, na kterou se měřený vzorek pokládá.



Obr. 22. Měřicí přístroj Talysurf CLI 500

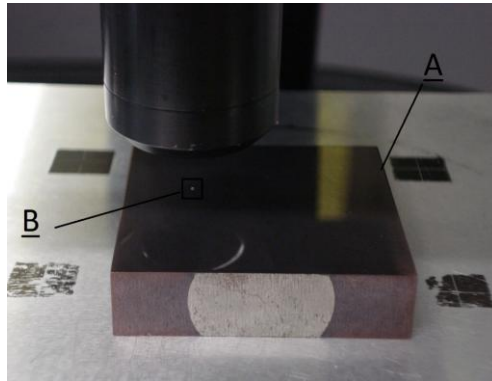
A) Měřicí zařízení Talysurf CLI 500 B) Zdroj C) Měřicí a vyhodnocovací software Talymap version gold

Tab. 4. Technické parametry přístroje

Funkce, rozměry, hmotnost	Talysurf CLI 500
Měřicí prostor D x H x V	50 x 50 x 50 mm
Délka posuvu v osách X x Y x Z	50 mm
Osové rozlišení	5 μm
Rychlost měření	30, 15, 10, 5, 1, 0.5 mm/s
Rychlost polohování (osy X x Y)	30 mm/s maximum
Rozměry přístroje D x H x V	500 x 310 x 450 mm
Nosnost	10 kg
Hmotnost	55 kg

5.3 Uložení vzorků

Vzorek po očištění a označení je připraven k měření. Vzorek po uložení na podložku přístroje byl stabilní, proto nebylo potřeba žádné zajištění polohy vzorku při měření. Ještě jednou chci připomenout opatrnost při pokládání vzorku tak, aby nedošlo k dotyku s měřicí čočkou, protože nejen že by se nedalo uskutečnit dané měření, ale to nejpodstatnější, došlo by k poškození přístroje.

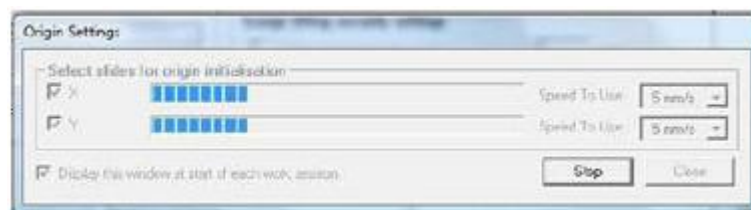


Obr. 23. Uložení vzorku

A) Měřicí vzorek B) Měřená oblast
vzorku 4mm x 4mm

5.4 Kalibrace měřicího přístroje

Po uložení vzorku jsem si spustil měřicí program, kterým se ovládá měřicí přístroj. Po spuštění se klikne na tlačítko Start a program sám spustí automatickou kalibraci přístroje. Kalibraci přístroje jsem provedl před každým snímáním definované plochy.



Obr. 24. Kalibrace přístroje

5.5 Postup měření

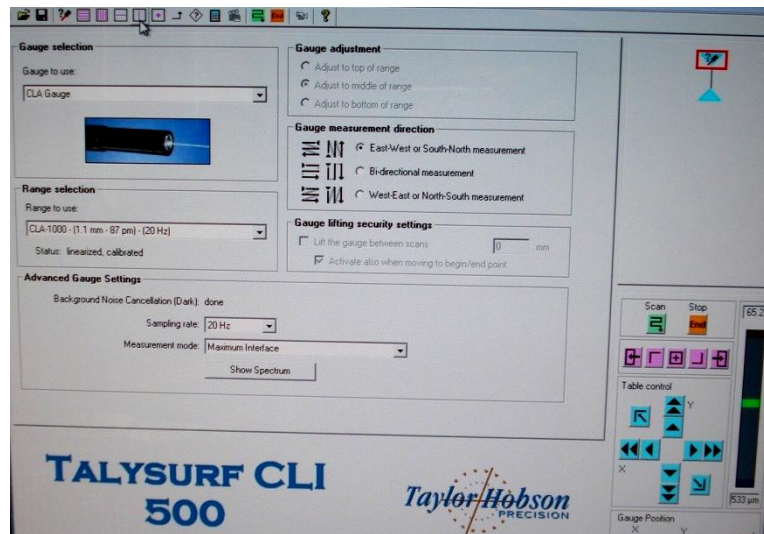
Měření probíhala pro každý z 10 vzorků stejně, proto uvedu jeden příklad jako ukázkou postupu měření s přístrojem Talysurf CLI 500. Pro lepší přehled v popisech postupu bych nejprve uvedl obrázek s popisem funkčních částí měřicího přístroje.



Obr. 25. Popis měřicího přístroje

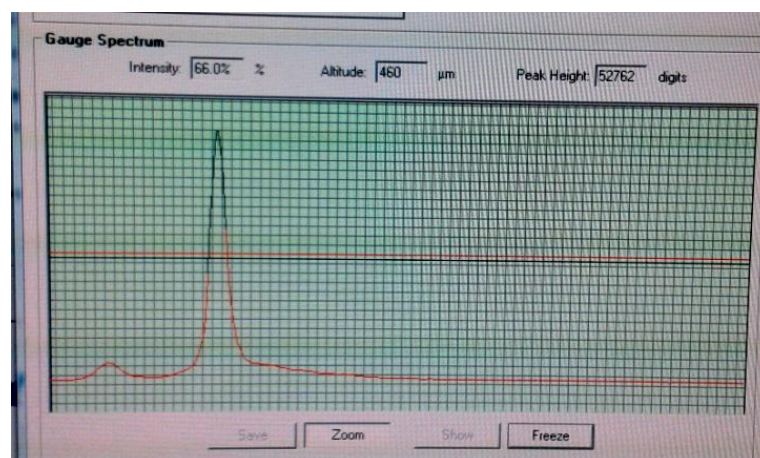
*A) Ukazatel polohy v ose Z B) Uložení
čočky C) Měřený vzorek D) Polohovací
stolek E) Informační displej
F) Ovládání posuvu vzorku*

Prvním krokem po kalibraci je nastavení počátku. Nastavení počátku jsem zajistil posouváním polohovacího stolku do polohy, ve které snímací paprsek byl umístěn na okraji měřicího políčka (Obr. 23), proto aby v průběhu měření snímací paprsek při průběhu měření nevyjel mimo plochu vzorku. Potom následovalo nastavení odrazivosti měřené části objektu v počátečním bodě měření. Odrazivost by neměla klesnout pod 40%, čehož jsem se striktně držel. Na (Obr. 26) jsem klikl na první ikonku vpravo, dále na ikonku show spectrum, přičemž se otevřelo nové okno s popisem dané odrazivosti.



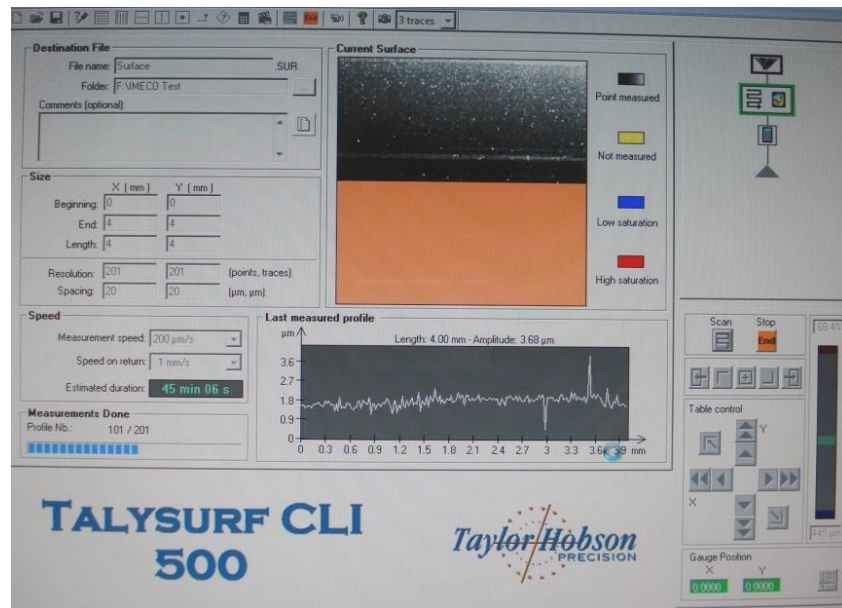
Obr. 26. Základní nastavení

Pak jsem klikl na zoom a nastavil odrazivost přibližováním čočky k ploše měření. Odrazivost se dá kontrolovat na třech místech, buď na monitoru pc, na daném přístroji dole v informačním displeji a na ukazateli odrazivosti (Obr. 25, E). První dvě možnosti popisují intenzitu odrazivosti procentní, ovšem poslední z nich nám ukazuje pouze stupnici a barevné rozlišení podle čeho se dá určit, zda je odrazivost dostatečná. Já jsem volil kombinaci dvou metod a to ukazatele odrazivosti a také jsem kontroloval procentuální intenzitu odrazivosti na pc, protože tam je velmi dobře vidět procenta intenzity, ale i amplituda (Obr. 27). Poté se okno uzavře stisknutím tlačítka close.

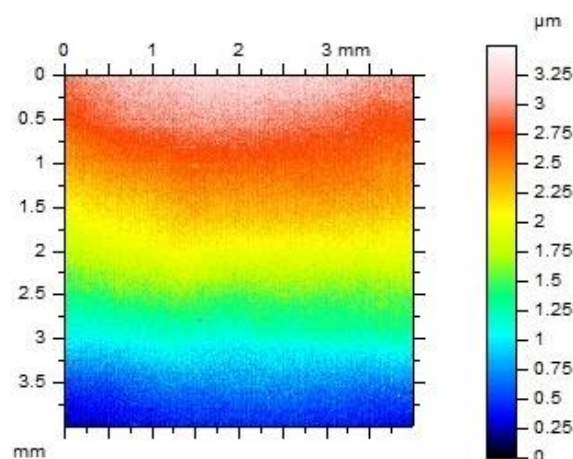


Obr. 27. Nastavení odrazivosti

Po zavření okna měření jsem nastavil plochu měření. V mém případě jsem měřil plochu 4 x 4mm a krokování jsem volil po 20μm. Nakonec jsem stiskl tlačítko scan (Obr. 28), čím se spustilo měření. Po měření se zobrazil graf (Obr. 29), který jsem si po každém měření uložil.



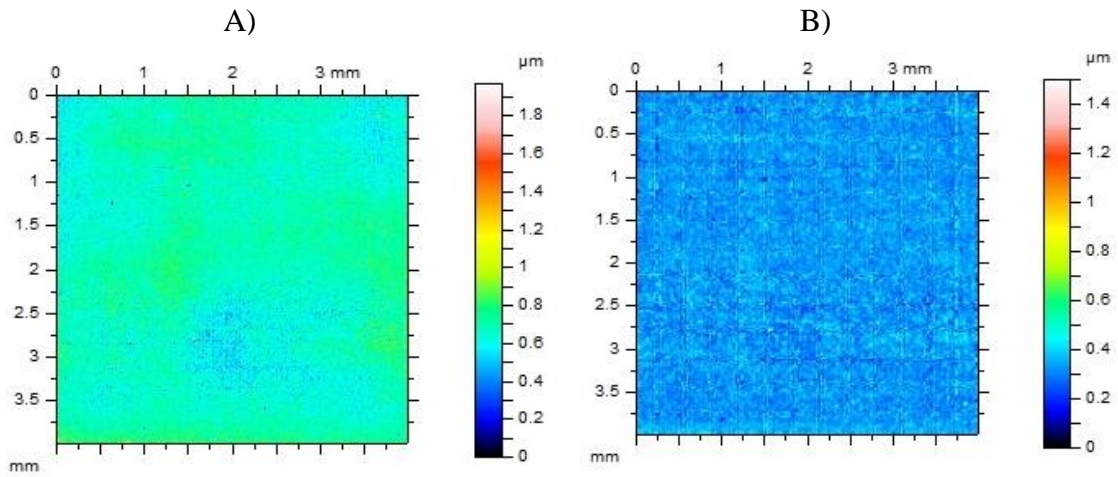
Obr. 28. Průběh měření



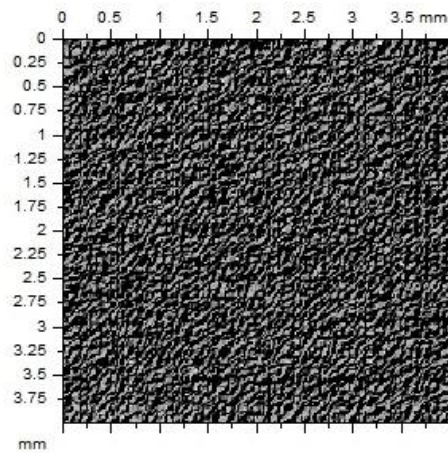
Obr. 29. Výsledek měření

5.6 Zpracování výsledků měření

Po přeměření všech deseti vzorků jsem začal zpracovávat naměřená data tak, abych se dopracoval k výsledkům, které bych mohl vyhodnotit a následovně přijít na metody popisu daného povrchu co nejpodrobněji. Pro vyhodnocování jsem použil program TalyMap version gold. Nasnímané povrchy byly vyhodnoceny jednotlivě. Po nasnímání vzorků jsem nejprve provedl vyrovnání nasnímaného povrchu vzorků, poté následovala filtrace nerovností podle Gausovského fitru o zvolené základní délce 0,8mm dle ČSN EN ISO 4287 a ČSN EN ISO 4288. Také jsem provedl foto simulace daného povrchu.

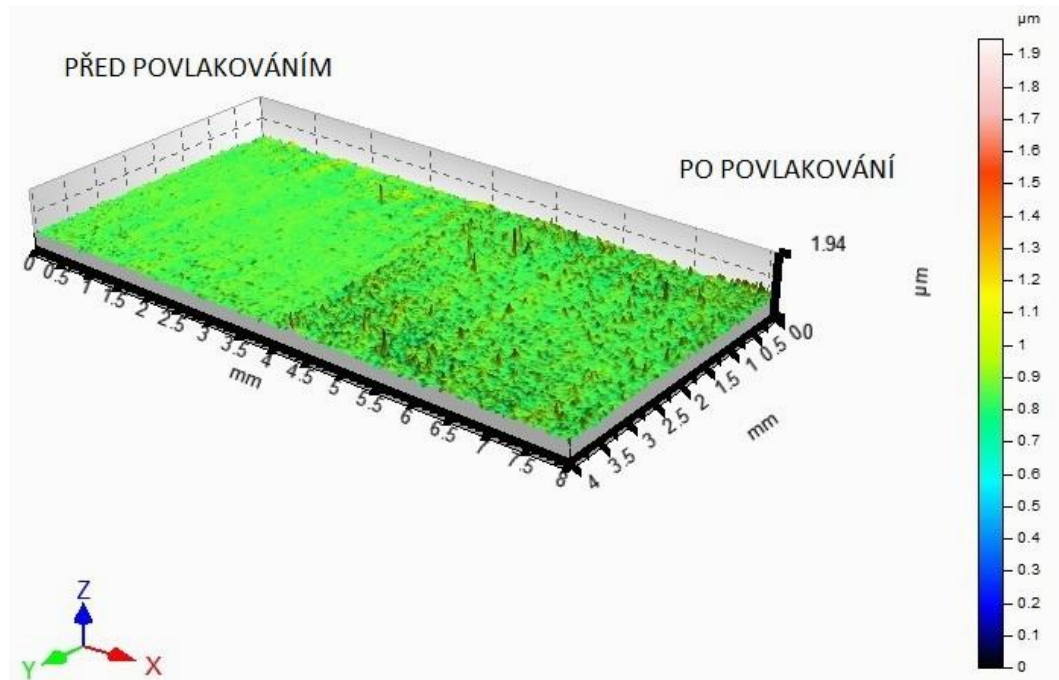


Obr. 30. A) Vyrovnání nasnímaného povrchu B) Filtrace drsnosti



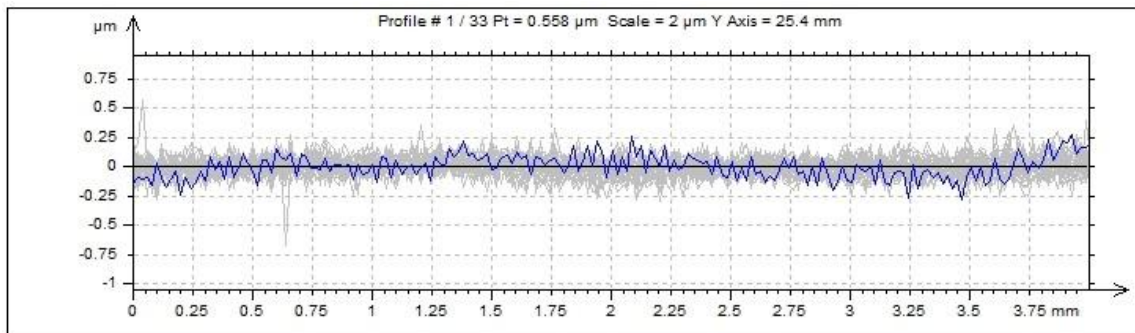
Obr. 31. Foto simulace povrchu vzorku

Teprve po těchto krocích bylo možné vytvořit 3D obraz snímaného vzorku, ke kterému bylo přiřazeno měřítko, stupnice a osy. Pro srovnání vzorku před povlakováním a po povlakování jsem vzorky dal vedle sebe (Obr. 32). Z obrázku je jasně patrné, že jakost povrchu u vzorku po povlakování je nižší, než u vzorku před povlakováním.



Obr. 32. Destička 3D zobrazení

Dále jsem pokračoval tak, že jsem 3D pohled (obraz) vyhodnocoval jak v podélném (East-West), tak v příčném směru (North-South). Na definovaný povrch bylo vytvořeno díky snímání 201 řezů jak v podélném, tak v příčném směru. Parametry, na které bylo snímání zaměřeno z hlediska jakosti povrchu, byly R_a , R_p , R_v , R_z .



Obr. 33. Profil povrchu snímaného vzorku

ISO 4287		1	2	3	4	5	6	7	8
Amplitude parameters - Roughness profile									
R_p	µm	0.115	0.122	0.122	0.109	0.087	0.0869	0.121	0.111
R_v	µm	0.107	0.12	0.103	0.104	0.0841	0.0864	0.0982	0.0977
R_z	µm	0.222	0.242	0.225	0.212	0.171	0.173	0.219	0.209
R_c	µm	0.124	0.121	0.126	0.106	0.104	0.0937	0.112	0.111
R_t	µm	0.312	0.324	0.434	0.257	0.259	0.214	0.317	0.29
R_a	µm	0.0405	0.0415	0.0403	0.0347	0.0324	0.0323	0.0376	0.0336
R_q	µm	0.0508	0.0521	0.0505	0.0451	0.0406	0.0401	0.047	0.0433
R_{sk}		0.0266	0.18	0.388	0.12	0.129	-0.0225	0.385	0.21
R_{ku}		2.83	3.35	3.54	3.47	3.55	2.78	3.88	3.92

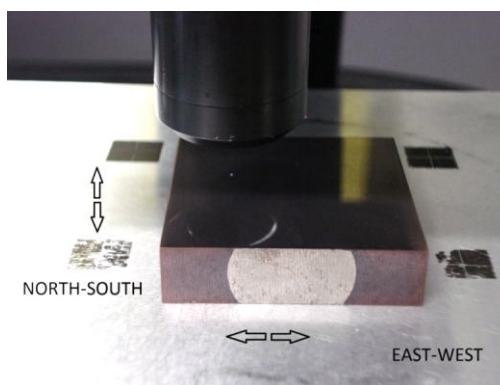
Obr. 34. Hodnoty získané z profilu povrchu

Získané parametry R_a, R_p, R_v, R_z z programu TalyMap pro vzorky 1 až 10 bylo nutné převést do programu Minitab 14, aby bylo možné následně naměřená data vyhodnocovat.

Nejprve jsem musel naměřená data z programu TalyMap převést do WordPadu a to protože je to jediný použitelný program na pracovním počítači u CLA. Data jsem musel pro jednotlivé destičky ukládat samostatně a navíc ještě rozdělit na podélné a příčné. Takto vytvořené textové soubory ve WordPadu se musely převést pro jednotlivé destičky odděleně do Minitabu a to všech 201 řádků pro podélné $R_{a_EW}, R_{p_EW}, R_{v_EW}, R_{z_EW}$ a příčné $R_{a_NS}, R_{p_NS}, R_{v_NS}, R_{z_NS}$. Stále však Minitab bral data jako text, ne jako numerické hodnoty a proto bylo ještě nutné převést všechna data z textového formátu na formát numerický. Tento postup se musel aplikovat u všech nasnímaných destiček na CLA.

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
	Ra_1_EW_P	Rp_1_EW_P	Rv_1_EW_P	Rz_1_EW_P	Ra_1_NS_P	Rp_1_NS_P	Rv_1_NS_P	Rz_1_NS_P
1	0,0405	0,1150	0,1070	0,222	0,0537	0,1810	0,1520	0,333
2	0,0415	0,1220	0,1200	0,242	0,0366	0,1240	0,1180	0,242
3	0,0403	0,1220	0,1030	0,225	0,0393	0,1120	0,0915	0,203
4	0,0347	0,1090	0,1040	0,212	0,0350	0,0816	0,0811	0,163
5	0,0324	0,0870	0,0841	0,171	0,0382	0,1260	0,0860	0,212
6	0,0323	0,0869	0,0864	0,173	0,0386	0,1320	0,1190	0,251
7	0,0376	0,1210	0,0982	0,219	0,0352	0,1290	0,1040	0,233
8	0,0336	0,1110	0,0977	0,209	0,0391	0,1220	0,1140	0,236
9	0,0348	0,1250	0,1070	0,232	0,0430	0,1090	0,1340	0,244
10	0,0331	0,1240	0,1050	0,229	0,0416	0,1100	0,1190	0,229

Obr. 35. Naměřené hodnoty parametrů drsnosti pro destičku 1



Obr. 36. Označování směru měření

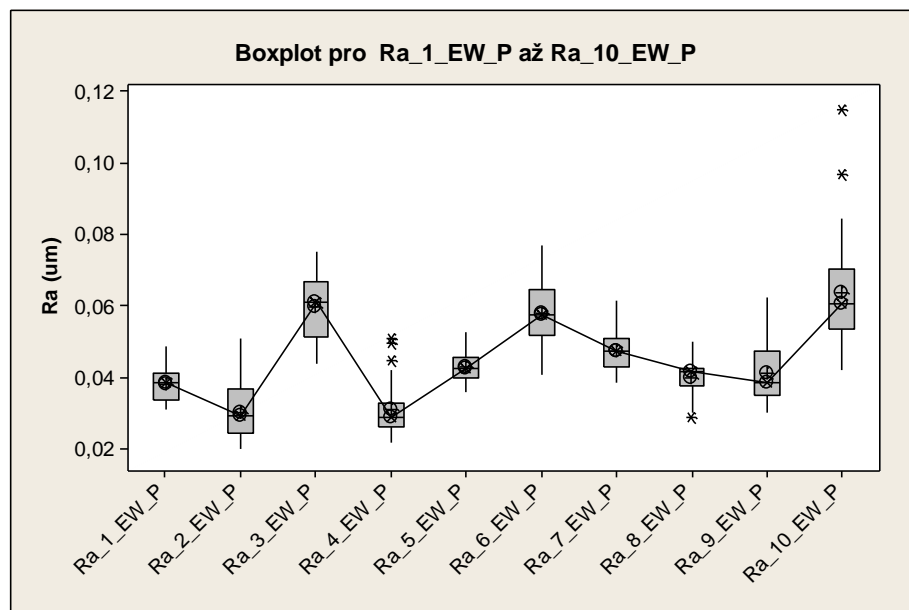
5.7 Vyhodnocení matematickými metodami

5.7.1 Statistické zpracování

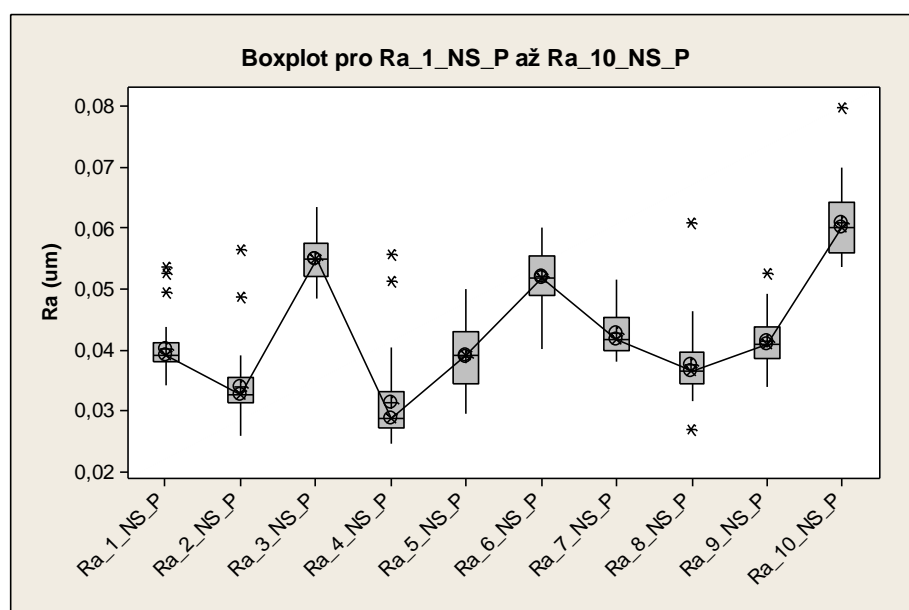
Nejprve jsem uvažoval, zda jsou jakosti povrchů před leštěním stejné. Proto jsem pro popis povrchu naměřených částí vzorků vybral jako první metodu statistického vyhodno-

cování. Na zpracování výsledků jsem použil program Minitab 14. Pro kontrolu hodnot jsem si zvolil Boxplot diagram (Krabicový diagram).

Získaná data ze softwaru TalyMap jsem pro uložení převedl do textového formátu (Word-Pad). Pro následné zpracování jsem si převedl data z textového formátu do numerického formátu (Minitab). Sloupce jsem v Minitabu zaměnil za řádky a následně jsem provedl kontrolu pomocí Boxplot diagramu pro parametr R_a jak v podélném (Obr. 37), tak v příčném směru (Obr. 38) a to z důvodu nalezení vychýlených hodnot.



Obr. 37. Graf Boxplot pro Ra_{EW_P} (Měřeno ve směru East-West \leftrightarrow)



Obr. 38. Graf Boxplot pro Ra_{NS_P} (Měřeno ve směru North-South \updownarrow)

Z počátečních 201 řádků pro podélné parametry $R_{a_EW}, R_{p_EW}, R_{v_EW}, R_{z_EW}$ a příčné parametry $R_{a_NS}, R_{p_NS}, R_{v_NS}, R_{z_NS}$ po filtraci vychýlených hodnot a splnění norem ČSN EN ISO 4287 a ČSN EN ISO 4288 zbylo 33 řádků pro jednotlivé parametry R_a, R_p, R_v, R_z jak podélné, tak příčné. Takto získané hodnoty jsem dále vyhodnocoval.

Kruskal-Wallis Ra_East-West_Před povlakováním (Ra_EW_P):

$$H_0: \tilde{M}_{Ra_1_EW_P} = \tilde{M}_{Ra_2_EW_P} \dots = \tilde{M}_{Ra_10_EW_P} \quad (53)$$

Medián $\tilde{x}_{Ra_1_EW_P}$ se od $\tilde{x}_{Ra_2_EW_P}$ až od $\tilde{x}_{Ra_10_EW_P}$ liší pouze náhodou a to za předpokladu, že všechny povrchy námi měřených vzorků jsou leštěny stejně.

$$H_A: \tilde{M}_{Ra_1_EW_P} \neq \tilde{M}_{Ra_2_EW_P} \dots \neq \tilde{M}_{Ra_10_EW_P} \quad (54)$$

Medián $\tilde{x}_{Ra_1_EW_P}$ se od $\tilde{x}_{Ra_2_EW_P}$ až od $\tilde{x}_{Ra_10_EW_P}$ liší jinak než náhodou a to v důsledku rozdílného opracování povrchu všech vzorků. Vzorky nebyly leštěny stejně.

$$1 - \alpha = 0,95$$

Kruskal-Wallis Test: Ra_EW_P versus Subscripts

Kruskal-Wallis Test on Ra_EW_P

Subscripts	N	Median	Ave Rank	Z
Ra_1_EW_P	33	0,03830	110,4	-3,50
Ra_10_EW_P	33	0,06060	278,5	7,17
Ra_2_EW_P	33	0,02900	50,8	-7,28
Ra_3_EW_P	33	0,06100	273,1	6,83
Ra_4_EW_P	33	0,02850	55,3	-6,99
Ra_5_EW_P	33	0,04250	159,2	-0,40
Ra_6_EW_P	33	0,05750	260,7	6,04
Ra_7_EW_P	33	0,04700	199,9	2,19
Ra_8_EW_P	33	0,04120	129,9	-2,26
Ra_9_EW_P	33	0,03830	137,2	-1,80
Overall	330		165,5	

H = 235,76 DF = 9 P = 0,000
H = 235,76 DF = 9 P = 0,000 (adjusted for ties)

Obr. 39. Kruskal-Wallis test pro

Ra_EW_P

$$P = 0,000 < \alpha = 0,050$$

Zamítám H_0 o náhodnosti mediánů parametru R_a ve prospěch H_A , protože mediány $\tilde{x}_{Ra_1-10_EW_P}$ povrchů parametru R_a se od sebe liší významně na konfidenci úrovni 95% s možností omylu 5%.

Pokud je hodnota koeficientu $P < 0,050$, zamítám nulovou hypotézu H_0 o normálním rozdělení na hladině významnosti $\alpha = 0,050$ ve prospěch hypotézy alternativní H_A .

Značení naměřených parametrů:

Ra_1_EW_P – Průměrná aritmetická úchylka prvního posuzovaného profilu vzorku ve směru **East-West** \leftrightarrow (Východ-Západ) **před** povlakováním

Ra_2_NS_O - Průměrná aritmetická úchylka druhého posuzovaného profilu vzorku ve směru **North-South** \updownarrow (Sever-Jih) **po** povlakování

Označení směru snímání vzorku a označení před povlakováním, nebo po povlakování platí pro parametry R_a , R_p , R_v , R_z .

Tab. 5. Testování hypotéz pro R_a , R_p , R_v , R_z

	Parametr	Směr snímání	Hypotéza H_0	P-Value [-]
Před povlakováním	$R_{a_EW_P}$	\leftrightarrow	Zamítám	< 0,05
	$R_{a_NS_P}$	\updownarrow	Zamítám	< 0,05
	$R_{p_EW_P}$	\leftrightarrow	Zamítám	< 0,05
	$R_{p_NS_P}$	\updownarrow	Zamítám	< 0,05
	$R_{v_EW_P}$	\leftrightarrow	Zamítám	< 0,05
	$R_{v_NS_P}$	\updownarrow	Zamítám	< 0,05
	$R_{z_EW_P}$	\leftrightarrow	Zamítám	< 0,05
	$R_{z_NS_P}$	\updownarrow	Zamítám	< 0,05
Po povlakování	$R_{a_EW_O}$	\leftrightarrow	Zamítám	< 0,05
	$R_{a_NS_O}$	\updownarrow	Zamítám	< 0,05
	$R_{p_EW_O}$	\leftrightarrow	Zamítám	< 0,05
	$R_{p_NS_O}$	\updownarrow	Zamítám	< 0,05
	$R_{v_EW_O}$	\leftrightarrow	Zamítám	< 0,05
	$R_{v_NS_O}$	\updownarrow	Zamítám	< 0,05
	$R_{z_EW_O}$	\leftrightarrow	Zamítám	< 0,05
	$R_{z_NS_O}$	\updownarrow	Zamítám	< 0,05

Zamítám H_0 o náhodnosti mediánů parametrů R_a , R_p , R_v , R_z ve prospěch H_A , protože mediány \tilde{x}_{Ra} , \tilde{x}_{Rp} , \tilde{x}_{Rv} , \tilde{x}_{Rz} povrchů parametrů R_a , R_p , R_v , R_z se od sebe liší významně na konfidenci úrovni 95% s možností omylu 5%. Toto tvrzení platí pro parametry vzorků před i po povlakování měřené jak v podélném tak i v příčném směru.

Mann-Whitney test:

Tab. 6. Naměřené hodnoty parametrů pro Mann-Whitney test

Vzorek	Parametry (Před povlakováním)				Parametry (Po povlakování)			
	S_{p_P} [μm]	S_{v_P} [μm]	S_{z_P} [μm]	S_{a_P} [μm]	S_{p_O} [μm]	S_{v_O} [μm]	S_{z_Z} [μm]	S_{a_O} [μm]
1.	1,300	0,673	1,970	0,069	2,110	0,933	3,040	0,091
2.	0,595	0,670	1,270	0,080	5,230	0,905	6,140	0,120
3.	0,969	0,463	1,430	0,098	2,570	1,480	4,050	0,090
4.	2,800	0,725	3,530	0,070	3,200	2,330	5,540	0,093
5.	0,851	0,702	1,550	0,073	4,350	2,080	6,420	0,085
6.	1,530	0,501	2,040	0,092	8,090	1,910	10,000	0,131
7.	1,570	0,477	2,040	0,079	3,890	2,220	6,120	0,147
8.	1,810	0,428	2,240	0,081	2,960	2,650	5,610	0,111
9.	2,120	0,667	2,780	0,092	7,790	6,610	14,400	0,398
10.	5,840	0,932	6,780	0,098	8,530	7,480	16,000	0,405

$$H_0: M_{Sp_P} = M_{Sp_O} \quad (55)$$

$$H_0: \tilde{x}_{Sp_P} = \tilde{x}_{Sp_O} \quad (56)$$

$$H_0: M_{Sp_P} \neq M_{Sp_O} \quad (57)$$

$$1 - \alpha = 0,95$$

Odhad medián parametru S_{p_P} před povlakováním se od odhadu mediánu S_{p_O} po povlakování liší pouze náhodou a to za předpokladu, že se při povlakování jakost povrchu nezměnila.

Mann-Whitney Test and CI: Sp_P; Sp_O

```

N      Median
Sp_P  10    1,550
Sp_O  10    4,120

```

```

Point estimate for ETA1-ETA2 is -2,363
95,5 Percent CI for ETA1-ETA2 is (-5,731;-1,142)
W = 65,0

```

```

Test of ETA1 = ETA2 vs ETA1 not = ETA2 is significant at 0,0028

```

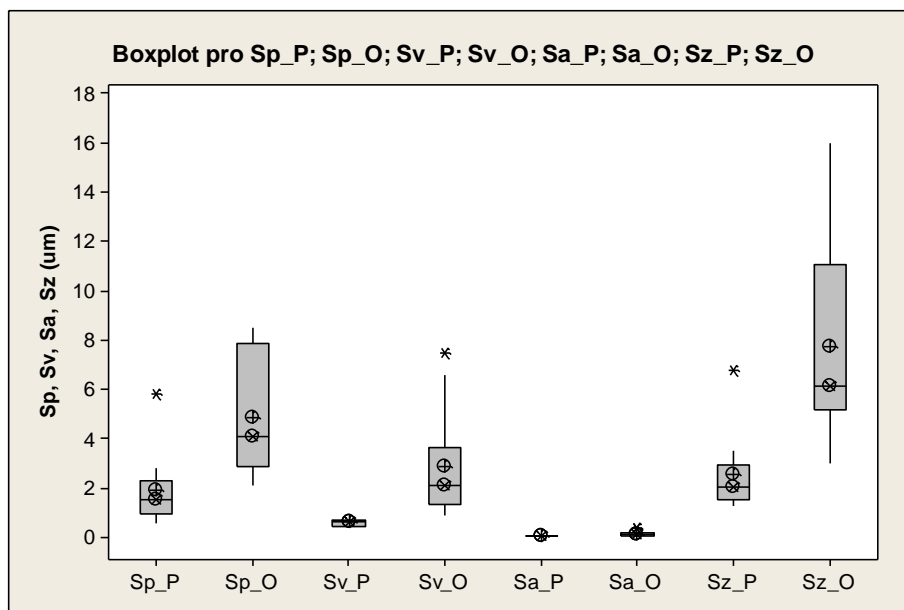
Obr. 40. Mann-Whitney Test pro Sp_P , Sp_O

$$P = 0,0028 < \alpha = 0,050$$

Na základě zjištění $P < 0,050$ zamítám H_0 ve prospěch H_A a tvrdím, že podle ČSN EN ISO 25178-2 v důsledku povlakování došlo ke snížení jakosti povrchu ve smyslu parametru S_p .

Tab. 7. Testování hypotéz pro parametry S_p , S_v , S_a , S_z

	Parametr	Hypotéza H_0	P-Value [-]
Před povlakováním	S_{p_P}	Zamítám	< 0,05
	S_{v_P}	Zamítám	< 0,05
	S_{a_P}	Zamítám	< 0,05
	S_{z_P}	Zamítám	< 0,05
Po povlakování	S_{p_O}	Zamítám	< 0,05
	S_{v_O}	Zamítám	< 0,05
	S_{a_O}	Zamítám	< 0,05
	S_{z_O}	Zamítám	< 0,05



Obr. 41. Graf Boxplot srovnání 3D parametrů dle ČSN EN ISO 25178-2

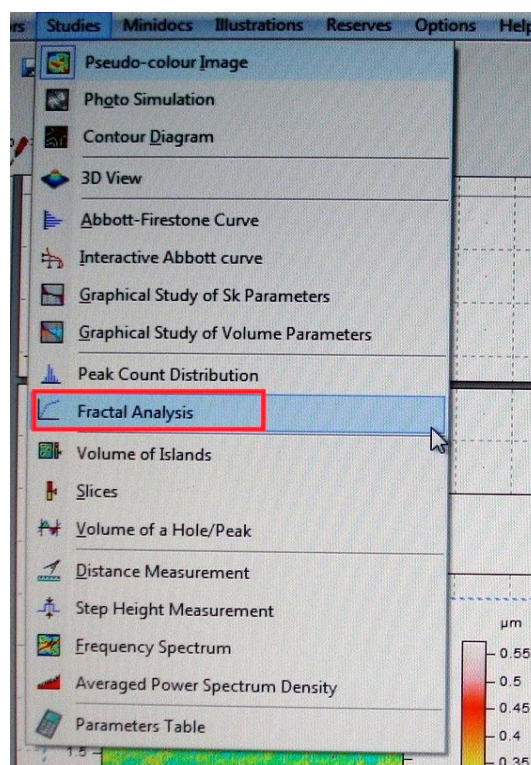
Odhady mediánu parametru před povlakováním S_{p_P} a parametru S_{p_O} po povlakování se od sebe liší statisticky významně. To je patrné i z (Obr. 41) kde jsou parametry srovnány. Z grafu také vyplývá, že parametry po povlakování mají vyšší hodnoty, ale i větší rozptyl hodnot vůči hodnotám parametrů před povlakováním. Tato zjištění se potvrdila u všech 10 vzorků.

6 NA VYBRANÝCH VZORCÍCH APLIKUJTE TEORII FRAKTÁLŮ A TEORII FRAKTÁLOVÝCH DIMENZÍ

Druhou metodou, kterou jsem zvolil pro vyhodnocení povrchu je zjištění fraktálové dimenze. Tato metoda nám vypovídá na rozdíl od statistického hodnocení o složitosti povrchu. Čím je číslo fraktální dimenze vyšší, tím je zkoumaný povrch vzorku složitější (členitější).

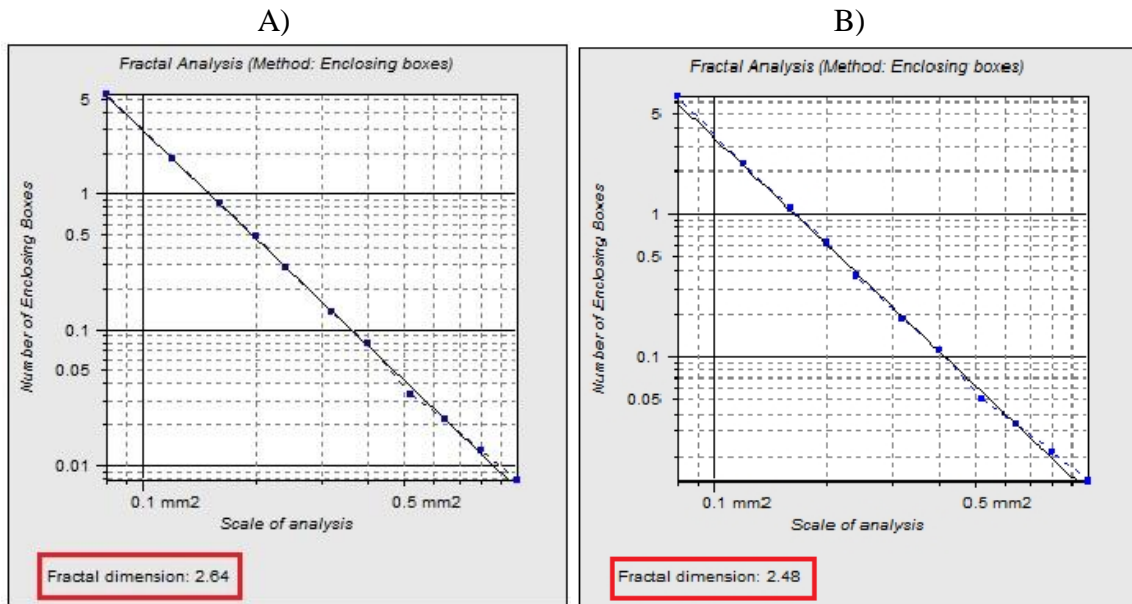
Postup zjištění fraktálové dimenze:

V programu Talymap version gold jsem označil výsledek měření požadovaný pro fraktálovou analýzu (Obr. 30, B). Následně zvolíme Studies - Fraktal Analysis.



Obr. 42. Postup získání fraktální dimenze

Pro zvolení příkazu Fractals Analysis dostaneme graf fraktálové analýzy (Obr. 42), kde vlevo dole vidíme hodnotu fraktálové dimenze, která nám udává členitost měřeného povrchu vzorku.



Obr. 43. Fraktálová analýza vzorek 1 A) Před povlakovaním B) Po povlakování

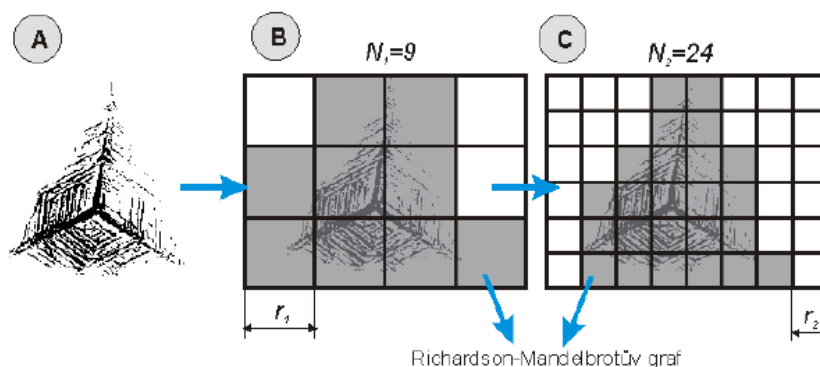
Na (Obr. 43) můžeme vidět graf fraktálové analýzy, kde na horizontální ose máme zobrazeno měřítko analýzy a to pokrývající plochu. Na vertikální ose je zobrazen počet obklopujících čtverců. Pro sestavení grafu se využívá metoda počítání čtverců (box counting method). Tato metoda je zobrazena na (Obr. 44). Měřený objekt (Obr. 44, A) nejprve pokrýváme čtverci o straně r_1 s výsledným pokrytím 9 čtverců (Obr 44, B). Následně objekt pokrýváme čtverci o menší straně r_2 s výsledným pokrytím 25 čtverců (Obr. 44, C). Toto měření se zaznamená do Richardson-Mandelbrotova grafu, který je na (Obr. 45).

Počet pokrývajících čtverců volíme dle vztahu:

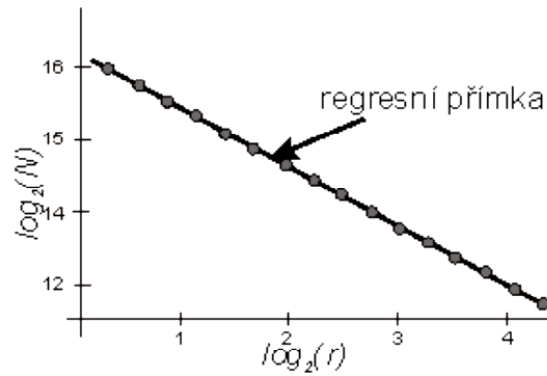
$$N_{(r_{BOX})} = konst \cdot r_{BOX}^{-D_B} \tag{58}$$

Výpočet Box dimenze:

$$D_B = - \frac{\Delta \log N(r_{BOX})}{\Delta \log r_{BOX}} \tag{59}$$



Obr. 44. Popis metody počítání čtverců [21]



Obr. 45. Richardson-Mandelbrotův graf
[21]

Ukázka výpočtu Hausdorfovej množiny:

Nejdříve bych uvedl nejjednodušší příklad, vycházející z úsečky, která má jednotkovou délku. Úsečku rozdělíme na N dílků, což je možno považovat jako bychom se na ni pohledli z N -násobným zvětšením. [10]

Měřítka nové úsečky počítáme $s = \frac{1}{N}$, kde s je měřítko a N je počet dílků na které se úsečka rozdělí. Pro Hausdorffova dimenze obecně platí uvedená podmínka:

$N \cdot s^D = 1$. Z toho vyplývá výpočet pomocí vzorců:

$$N \cdot s^D = 1 \quad (60)$$

$$\log N \cdot s^D = 1 \quad (61)$$

$$\log N + \log s^D = 0 \quad (62)$$

$$\log N + D \cdot \log s = 0 \quad (63)$$

$$D \cdot \log s = -\log N \quad (64)$$

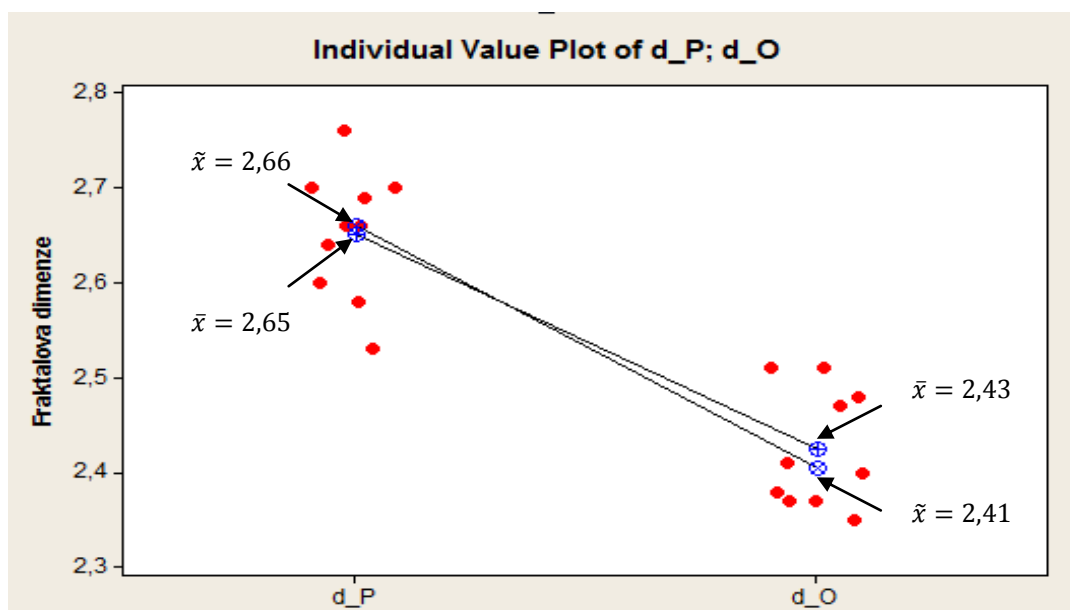
$$D = \frac{-\log N}{\log s} \quad (65)$$

$$D = \frac{\log N}{\log \frac{1}{s}} = \frac{\log N}{\log N} = 1 \quad (66)$$

Tab. 8. Výsledky fraktálových analýz

	Fraktálová dimenze (Před povlakováním)	Fraktálová dimenze (Po povlakování)
Vzorek	d_P [-]	d_O [-]
1.	2,64	2,48
2.	2,66	2,38
3.	2,76	2,41
4.	2,58	2,40
5.	2,69	2,37
6.	2,70	2,37
7.	2,70	2,51
8.	2,66	2,35
9.	2,60	2,51
10.	2,53	2,47

Hodnota fraktálové dimenze se pohybuje od 2 do 3. Čím více se hodnoty blíží hodnotě 3, tím je členitost povrchu vyšší. V průběhu našeho měření jsme dosáhli nejvyšší fraktálové dimenze a tedy nejčlenitějšího povrchu u vzorku 3 (Před povlakováním), který vykazoval hodnotu 2,76. Naopak nejnižší fraktálovou dimenzi jsme vysledovali u vzorku 8 (Po povlakování), který udával hodnotu 2,35 (Tab. 8).



Obr. 46. Rozptyl fraktálové dimenze

Z grafu je patrné, že rozptyly hodnot fraktálových dimenzí před a po povlakování se nijak výrazně nezměnily, za to hodnoty fraktálových dimenzí po povlakování d_O jsou viditelně nižší než hodnoty fraktálových dimenzí před povlakováním d_P a to u všech 10 vzorků. Lze tedy tvrdit, že technologie úpravy povrchu vzorků ovlivnila výrazně členitost povrchu.

Tab. 9. Fraktálová dimenze

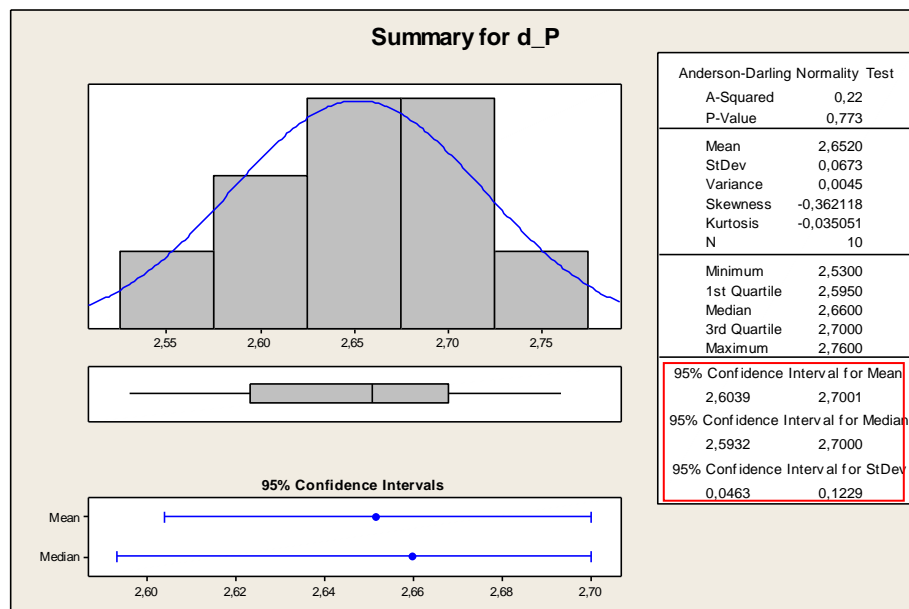
	Fraktálová dimenze (Před povlakováním)	Fraktálová dimenze (Po povlakování)
Parametr	d_P [-]	d_O [-]
\bar{x}	2,65	2,43
\tilde{x}	2,66	2,41

\bar{x} - Odhad aritmetického průměru

\tilde{x} - Prostřední hodnota výběrového souboru, seřazených dle velikosti (Medián)

Konfidenční interval:

Konfidenční interval pro μ fraktálové dimenze vzorku před povlakováním.



Obr. 47. Konfidenční interval pro d_P

Tab. 10. Fraktálové dimenze před povlakováním

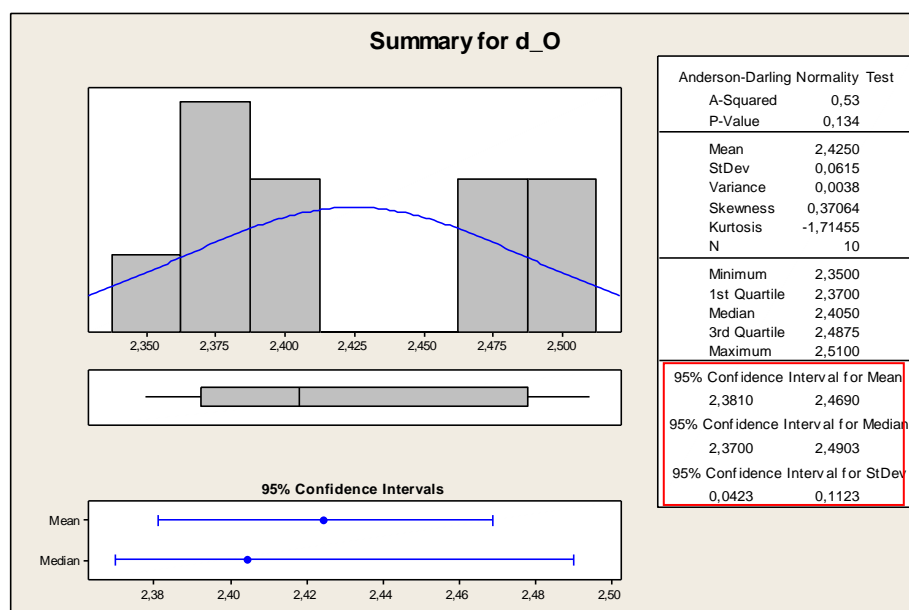
	Fraktálová dimenze (Před povlakováním) Dolní hranice	Fraktálová dimenze (Po povlakování) Horní hranice
Parametr	d_P [-]	d_P [-]
μ_{d_P}	2,60	2,70
M_{d_P}	2,59	2,70
σ_{d_P}	0,05	0,12

μ_{d_P} - Odhad aritmetického průměru fraktálové dimenze před povlakováním

σ_{d_P} - Odhad směrodatné odchylky fraktálové dimenze před povlakováním

M_{d_P} - Prostřední hodnota výběrového souboru fraktálové dimenze před povlakováním, seřazeného dle velikosti

Konfidenční interval pro μ fraktálové dimenze vzorku po povlakování.

Obr. 48. Konfidenční interval pro d_O

Vysvětlivky pro (Obr. 47, 48):

Mean – Odhad aritmetického průměru (μ_{d_P})

StDev – Odhad směrodatné odchylky (σ_{d_P})

Minimum – Minimální hodnota výběrového souboru

1st Quartile – První kvartil výběrového souboru

Median – Prostřední hodnota výběrového souboru, seřazeného dle velikosti (M_{d_P})

3rd Quartile – Třetí kvartil výběrového souboru

Maximum – Maximální hodnota výběrového souboru

Tab. 11. Fraktálové dimenze po povlakování

	Fraktálová dimenze (Před povlakováním) Dolní hranice	Fraktálová dimenze (Po povlakování) Horní hranice
Parametr	d _P [-]	d _O [-]
μ_{d_o}	2,60	2,70
M_{d_o}	2,59	2,70
σ_{d_o}	0,05	0,12

μ_{d_o} - Odhad aritmetického průměru fraktálové dimenze po povlakování

σ_{d_o} - Odhad směrodatné odchylky fraktálové dimenze po povlakování

M_{d_o} - Prostřední hodnota výběrového souboru fraktálové dimenze po povlakování, seřazeného dle velikosti

Na základě hodnot vyplývajících z (Tab. 8) a (Tab. 9) můžeme konstatovat, že u všech vzorků po povlakování byl zjištěn pokles fraktálové dimenze jak na dolní, tak i na horní hranici fraktálové dimenze. Odhad směrodatné odchylky fraktálové dimenze po povlakování σ_{d_o} se nijak zásadně nezměnil od hodnoty odhadu směrodatné odchylky fraktálové dimenze před povlakováním σ_{d_p} .

Mann-Whitney test:

Liší se medián fraktálové dimenze před povlakováním a po povlakování statisticky významně?

$$H_0: M_{d_p} = M_{d_o} \quad (67)$$

$$H_A: M_{d_p} \neq M_{d_o} \quad (68)$$

$$1 - \alpha = 0,95$$

$$P = 0,0002 < \alpha = 0,050$$

Zamítám H_0 ve prospěch H_A . Mann-Whitney test prokázal vliv povlakování na změnu členitost povrchu.

Kruskal-Wallis test:

Před povlakováním:

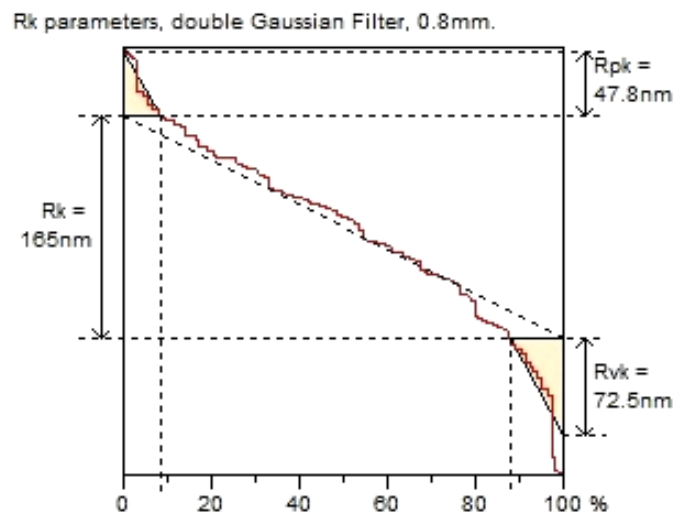
$$H_0: M_{Rp_k_{1_P}} = M_{Rp_k_{2_P}} \dots = M_{Rp_k_{10_P}} \quad (69)$$

$$H_A: M_{Rpk_1_P} \neq M_{Rpk_2_P} \dots \neq M_{Rpk_10_P} \quad (70)$$

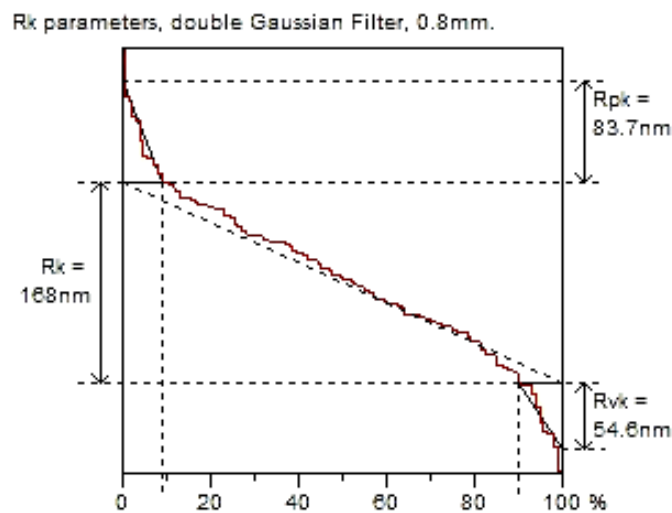
$$1 - \alpha = 0,95$$

$$P = 0,0002 < \alpha = 0,050$$

Zamítám H_0 ve prospěch H_A .



Obr. 49. Graf naměřených R_k parametrů pro vzorek 1, krok 0,4mm před povlakováním



Obr. 50. Graf naměřených R_k parametrů pro vzorek 1, krok 0,4mm po povlakování

Na (Obr. 49) můžeme vidět hodnoty parametru pro vzorek před povlakováním. Při porovnání s (Obr. 50) kde můžeme vidět hodnoty parametru pro vzorek po povlakování je jasně viditelné, že redukovaná výška výstupků Rpk se u vzorku po povlakování zvýšila. Naopak redukovaná hloubka prohlubně Rvk se u vzorku po povlakování snížila. Redukovaná výška jádra Rk , nebyla povlakováním ovlivněna. Zůstala téměř totožná.

Mann-Whitney test:

Po povlakování:

$$H_0: M_{Rpk_{1_P}} = M_{Rpk_{1_O}} \tag{71}$$

$$H_0: M_{Rpk_{1_P}} \neq M_{Rpk_{1_O}} \tag{72}$$

$$1 - \alpha = 0,95$$

$$P = 0,0002 < \alpha = 0,05$$

Mann-Whitney Test and CI: M_Rpk_P; M_Rpk_O

	N	Median
M_Rpk_P	10	81,58
M_Rpk_O	10	168,25

Point estimate for ETA1-ETA2 is -84,35
 95,5 Percent CI for ETA1-ETA2 is (-111,90;-67,10)
 W = 55,0
 Test of ETA1 = ETA2 vs ETA1 not = ETA2 is significant at 0,0002

Obr. 51. Mann-Whitney test pro Rpk_P, Rpk_O

Tab. 12. Testování hypotéz pro Rpk, Rk, Rvk

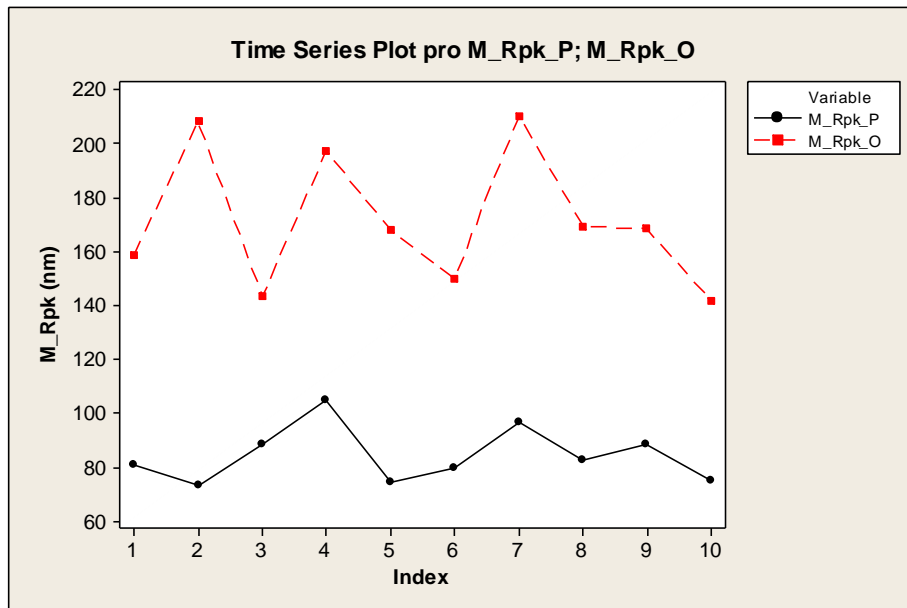
	Parametr	Hypotéza H_0	P –Value [-]
Před povlakováním	M_{Rpk_P}	Zamítám	< 0,05
	M_{Rk_P}	Zamítám	< 0,05
	M_{Rvp_P}	Zamítám	< 0,05
Po povlakování	M_{Rpk_O}	Zamítám	< 0,05
	M_{Rk_O}	Zamítám	< 0,05
	M_{Rvp_O}	Zamítám	< 0,05

M_{Rpk} - Medián redukované výšky výstupku

M_{Rk} - Medián redukované výšky jádra

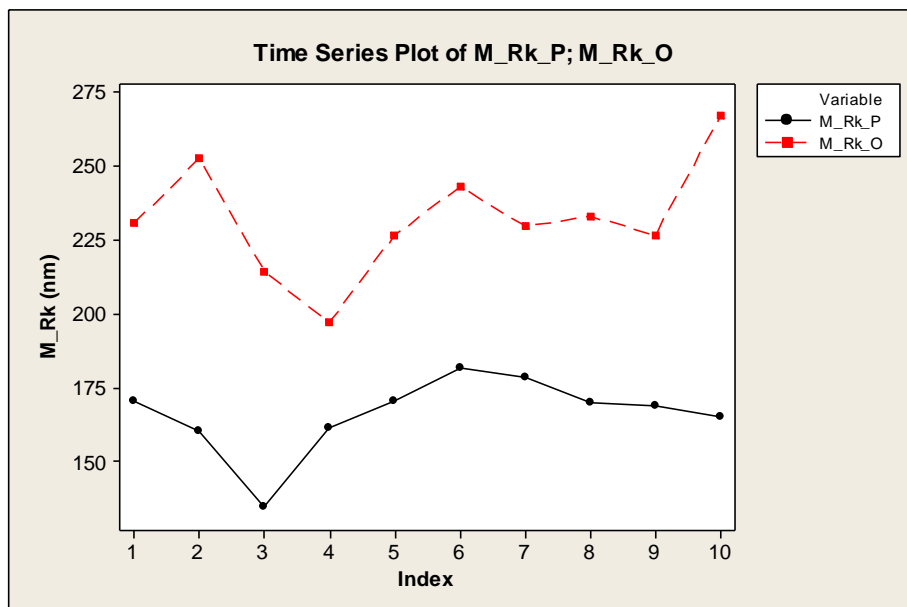
M_{Rvp} - Medián redukované hloubky prohlubně

Redukovaná výška výstupku R_{pk} je rozdílná po povlakování, proto zamítám H_0 ve prospěch H_A . Mann-Whitney test prokázal vliv povlakování na změnu členitost povrchu.



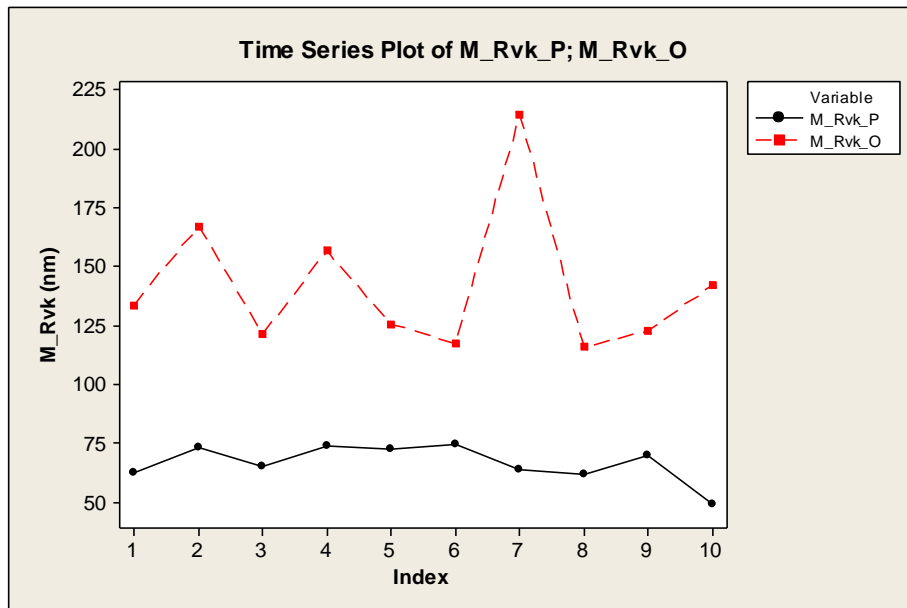
Obr. 52. Graf srovnání mediánů pro Rpk_P a Rpk_O

Naměřené hodnoty po povlakování pro mediány parametru Rpk jsou znatelně vyšší, než hodnoty mediánů před povlakováním. Rozptyl hodnot mediánů pro parametr Rpk po povlakování nabývá vyšších hodnot mediánů, než u hodnot před povlakováním (Obr. 52).



Obr. 53. Graf srovnání mediánů pro Rk_P a Rk_O

Naměřené hodnoty mediánů po povlakování pro parametr Rk jsou opět vyšší, než hodnoty mediánů před povlakováním. Rozptyl hodnot mediánů pro parametr Rk po povlakování se však nijak výrazně neliší od hodnot před povlakováním (Obr. 53).



Obr. 54. Graf srovnání mediánů pro Rvk_P a Rvk_O

Naměřené hodnoty po povlakování pro mediány parametrů Rvk jsou opět vyšší, než hodnoty mediánů před povlakováním. Rozptyl hodnot pro mediány parametru Rvk po povlakování se naopak od předchozího parametru liší velmi výrazně od hodnot před povlakováním (Obr. 54). U všech tří hodnot mediánů pro parametry Rk , Rpk , Rvk byla hodnota mediánů vyšší u vzorků po povlakování, než u vzorků před povlakováním. Rozptyl hodnot mediánů se nejvíce shodoval u parametru Rk . Naopak nejvýraznější rozdíl rozptylů mediánu byl zjištěn u parametru Rvk .

ZÁVĚR

U všech testovaných vzorků se vyskytly značné problémy s vlnitostí. Proto jsem provedl odfiltrování nerovností podle Gaussovského filtru o volené základní délce 0,20mm dle ČSN EN ISO 4287 a ČSN EN ISO 4288. Parametry, na které jsem se zaměřil z hlediska jakosti povrchu byly R_a , R_p , R_v a R_z . Po naměření těchto parametrů jsem provedl grafické vyhodnocování numerických hodnot pomocí Boxplot diagramů. Následně jsem využil teorie hypotéz a to především Kruskal-Wallis test a Mann-Whitney test pro neparametrickou statistiku.

Dále jsem také zjistil, že podle ČSN EN ISO 25178-2 při povlakování vzorků dojde ke snížení jakosti povrchů u všech vzorků ve smyslu parametru S_p . Ke snížení jakosti povrchů u všech vzorků vlivem povlakování dojde i u parametrů R_{pk} , R_k , R_{vk} .

Statisticky jsem dokázal, že jakost povrch před a po povlakování se statisticky významně liší. Po povlakování došlo ke snížení fraktálové dimenze d_O u všech 10 vzorků, to znamená, že technologie měla zásadní vliv na výpočet fraktálové dimenze. Povrch všech vzorků je tedy na základě těchto informací po povlakování méně členitý.

Diplomová práce, které jsem se věnoval splnila mé očekávání. Získal jsem nový rozhled v problematice hypotéz a fraktálů. Měl jsem možnost snímat si jednotlivé části vzorků na Taylor Hobson přístroji. Vyzkoušel jsem různé matematické metody pro zkoumání povrchu a statisticky jsem je vyhodnotil. Tato zkušenost mě obohatila o cenné znalosti, zlepšila moje dovednosti ve zpracovávání dat a v neposlední řadě mi pomohla sestavit doporučení pro statistické vyhodnocení měřeného povrchu jako celku.

Na závěr diplomové práce můžu konstatovat, že předem zadané cíle byly splněny. Při kompletním posuzování kvality povrchu destiček bude velmi záležet na typech statistických metod. Cílem bylo najít vhodné statistické metody, které klasifikují povrch zkoumaných částí destiček. Tohoto cílu byl patřičně dosaženo.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie část 1: měření drsnosti povrchu dotykovými profilometry*. Ostrava, 2004.
- [2] JURENA, Pavel. *Snímání a hodnocení jakosti broušeného povrchu kontaktním a bezkontaktním způsobem: laserový snímač*. Zlín, 2011. Dostupné z WWW: <<http://digilib.k.utb.cz/handle/10563/16302>>.
- [3] Dotykové, nebo bezdotykové měření struktury povrchu: Dotykový způsob měření. MM: průmyslové spektrum. 2005(6). Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/dotykovne-nebo-bezdotykovne-merenistruktury-povrchu.html>>.
- [4] JANEČKO, O. *Kontrola struktury povrchu*. Diplomová práce
- [5] Physikalisch – Technische Bundesanstalt (PTB) Profilmethod.htm Dostupný z WWW: <http://www.ptb.de/index_en.html>.
- [6] Talysurf CLI [online]. 2004 [cit. 2010-11-14]. Dostupné z WWW: <[http://www.imecoth.cz/Download/Prospekty/CLI%20\(CZ\).pdf](http://www.imecoth.cz/Download/Prospekty/CLI%20(CZ).pdf)>.
- [7] NOVÁK, Z. *Prostorové měření a hodnocení textury povrchu přístroji Taylor Hobson Ltd*. [online]. Brno, Dostupný z WWW: <http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2_Novak_3D_mereni_textury.pdf>.
- [8] Talysurf CLI, 3D Surface Profiling Systems. Dostupné z WWW: <http://www.fdi.hu/cli_systems.pdf>.
- [9] LEXT OLS4000 Laser Confocal Microscopes. Olympus [online]. 2011 [cit. 2012-06-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.olympus-ims.com/en/metrology/ols4000/>>.
- [10] Fraktální geometrie a fraktály [online], [cit. 2013- 04-2], Dostupné z WWW: <<http://www.ksr.tul.cz/fraktaly/geometrie.html>>.
- [11] Příklady fraktálů [online], [cit. 2013- 04-3], Dostupné z WWW: <<http://www.ksr.tul.cz/fraktaly/rozdeleni.html#koch>>.
- [12] PODRÁBSKÝ T., POSPÍŠILOVÁ S., JULIŠ M. *Nástrojové oceli* [online]. 2007 [cit. 2010-11-14]. Dostupné z WWW:

<<http://ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/HMT-K/04-Nastrojove%20oceli.pdf>>.

[13] Hypotéza. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 9.marec 2013 [cit. 2013-04-26]. Dostupné z WWW:

<<http://sk.wikipedia.org/wiki/Hypotéza>>.

[14] Testování statistických hypotéz. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. Addbot. Wikimedia Foundation, [cit. 2015-01-20]. Dostupné z WWW:

<http://cs.wikipedia.org/wiki/Testování_statistických_hypotéz>.

[15] PATA V., Přednášky: *Testování hypotéz*, 2012.

[16] Testování hypotéz ve statistice. Dostupné z WWW:

<<http://cit.vfu.cz/statpotr/POTR/Teorie/Predn3/hypotezy.htm>>.

[17] Metoda ANOVA [online], [cit. 2013- 05-2], Dostupné z WWW:

<<http://cit.vfu.cz/statpotr/POTR/Teorie/Predn3/ANOVA.htm>>.

[18] Základy statistiky [online], [cit. 2013- 05-2], Dostupné z WWW:

<<http://files.cfkr.eu/200000080-0f29110223/ZAKLADYstatistikySKRIPTA2.pdf>>.

[19] ČSN EN ISO 25178-2 Geometrické specifikace produktu (GPS) - *Textura povrchu Plocha - Část 2 Termíny, definice a parametry textury povrchu*.

[20] V-4 Materiály a povrchové úpravy forem pro vstřikování plastů, Teoretická část katalogu, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.

[21] HOTAŘ V., *Možnosti popisu průmyslových dat pomocí fraktální geometrie*, Technická univerzita v Liberci, 2012.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

σ	[-]	Odchylka
R	$[\mu m]$	Parametr vypočítaný z profilu drsnosti
\bar{x}	[-]	Odhad aritmetického průměru
s	[-]	Výběrový rozptyl
T	$[s^{-1}]$	Perioda
H	[-]	Hypotéza
CLI	[-]	Command line interface
Σ	[-]	Suma (Součet)
F	[-]	Funkce
$1 - \beta$	[-]	Síla testu
s^2	[-]	Rozptyl výběrových souborů
μ	[-]	Populační průměr výběrového souboru
\tilde{x}	[-]	Prostřední hodnota výběrového souboru, seřazená dle velikosti
Rpk	$[\mu m]$	Redukovaná výška výstupku
Rvk	$[\mu m]$	Redukovaná hloubka prohlubně
Rk	$[\mu m]$	Redukovaná výška jádra
ČSN	[-]	Česká státní norma
EN	[-]	Evropská norma
3D	[-]	Trojrozměrný prostor
n	[-]	Počet měření výběrového souboru
α	[-]	Chyba I. druhu
$1 - \alpha$	[-]	Konfidenční úroveň
$1 - \beta$	[-]	Síla testu

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Princip měření dotykovým profilometrem [1].....</i>	12
<i>Obr. 2. Diamantový kužel dotykového přístroje [4].....</i>	13
<i>Obr. 3. Měřicí hrot [5].....</i>	13
<i>Obr. 4. Porovnání snímání hrotem a laserovým paprskem [9].....</i>	14
<i>Obr. 5. Princip laserového snímače [6]</i>	15
<i>Obr. 6. Snímač Talisurf CLI [8].....</i>	16
<i>Obr. 7. Snímač Talysurf CLI 2000 [8].....</i>	17
<i>Obr. 8. Snímač Talysurf CLI 1000 [8].....</i>	18
<i>Obr. 9. Snímač Talysurf CLI 500 [8].....</i>	18
<i>Obr. 10. Voštinová struktura [11].....</i>	22
<i>Obr. 11. Kochova vložka [11].....</i>	23
<i>Obr. 12. Cantorovy množiny [11]</i>	24
<i>Obr. 13. Příklady fraktálů vzniklých afinními transformacemi</i>	24
<i>Obr. 14. Příklady fraktálů vzniklých afinními transformacemi algoritmem IFS [11].....</i>	25
<i>Obr. 15. Struktura na struktuře [11]</i>	25
<i>Obr. 16. Pokrývající dimenze - pokrývání bodů, křivky a plochy koulemi [10]</i>	30
<i>Obr. 17. Ukázka Studentova rozdělení ($DF=28$) [17]</i>	37
<i>Obr. 18. Ukázka Fisherova rozdělení ($DF_1=17, DF_2=8$) [17].....</i>	39
<i>Obr. 19. Výpočet parametrů S_{pk} a S_{vk} [19]</i>	48
<i>Obr. 20. Povlakovaný měřený vzorek 40mm x 40mm x10mm</i>	50
<i>Obr. 21. Graf popouštění [20]</i>	52
<i>Obr. 22. Měřicí přístroj Talysurf CLI 500.....</i>	53
<i>Obr. 23. Uložení vzorku.....</i>	54
<i>Obr. 24. Kalibrace přístroje</i>	54
<i>Obr. 25. Popis měřicího přístroje</i>	55
<i>Obr. 26. Základní nastavení</i>	56
<i>Obr. 27. Nastavení odrazivosti</i>	56
<i>Obr. 28. Průběh měření.....</i>	57
<i>Obr. 29. Výsledek měření.....</i>	57
<i>Obr. 30. A)Vyrovnaní nasnímaného povrchu B)Filtrace drsnosti.....</i>	58
<i>Obr. 31. Foto simulace povrchu vzorku</i>	58
<i>Obr. 32. Destička 3D zobrazení.....</i>	59

<i>Obr. 33. Profil povrchu snímaného vzorku</i>	59
<i>Obr. 34. Hodnoty získané z profilu povrchu</i>	59
<i>Obr. 35. Naměřené hodnoty parametrů drsnosti pro destičku 1</i>	60
<i>Obr. 36. Označování směru měření</i>	60
<i>Obr. 37. Graf Boxplot pro Ra_{EW_P} (Měřeno ve směru East-West \leftrightarrow)</i>	61
<i>Obr. 38. Graf Boxplot pro Ra_{NS_P} (Měřeno ve směru North-South \updownarrow)</i>	61
<i>Obr. 39. Kruskal-Wallis test pro Ra_{EW_P}</i>	62
<i>Obr. 40. Mann-Whitney Test pro Sp_P, Sp_O</i>	64
<i>Obr. 41. Graf Boxplot srovnání 3D parametrů dle ČSN EN ISO 25178-2</i>	65
<i>Obr. 42. Postup získání fraktální dimenze</i>	66
<i>Obr. 43. Fraktálová analýza vzorek 1 A)Před povlakováním B)Po povlakování</i>	67
<i>Obr. 44. Popis metody počítání čtverců [21]</i>	67
<i>Obr. 45. Richardson-Mandelbrotův graf [21]</i>	68
<i>Obr. 46. Rozptyl fraktálové dimenze</i>	69
<i>Obr. 47. Konfidenční interval pro d_P</i>	70
<i>Obr. 48. Konfidenční interval pro d_O</i>	71
<i>Obr. 49. Graf naměřených R_k parametrů pro vzorek 1, krok 0,4mm před povlakováním</i>	73
<i>Obr. 50. Graf naměřených R_k parametrů pro vzorek 1, krok 0,4mm po povlakování</i>	73
<i>Obr. 51. Mann-Whitney test pro Rpk_P, Rpk_O</i>	74
<i>Obr. 52. Graf srovnání mediánů pro Rpk_P a Rpk_O</i>	75
<i>Obr. 53. Graf srovnání mediánů pro Rk_P a Rk_O</i>	75
<i>Obr. 54. Graf srovnání mediánů pro Rvk_P a Rvk_O</i>	76

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Výběr statistické metody [16].....</i>	33
<i>Tab. 2. Platnost nulové nebo alternativní hypotézy [16].....</i>	35
<i>Tab. 3. Specifikace materiálu [20]</i>	50
<i>Tab. 4. Technické parametry přístroje</i>	53
<i>Tab. 5. Testování hypotéz pro R_a, R_p, R_v, R_z.....</i>	63
<i>Tab. 6. Naměřené hodnoty parametrů pro Mann-Whitney test</i>	64
<i>Tab. 7. Testování hypotéz pro parametry S_p, S_v, S_a, S_z.....</i>	65
<i>Tab. 8. Výsledky fraktálových analýz</i>	69
<i>Tab. 9. Fraktálová dimenze</i>	70
<i>Tab. 10. Fraktálové dimenze před povlakováním</i>	71
<i>Tab. 11. Fraktálové dimenze po povlakování</i>	72
<i>Tab. 12. Testování hypotéz pro R_{pk}, R_k, R_{vk}</i>	74

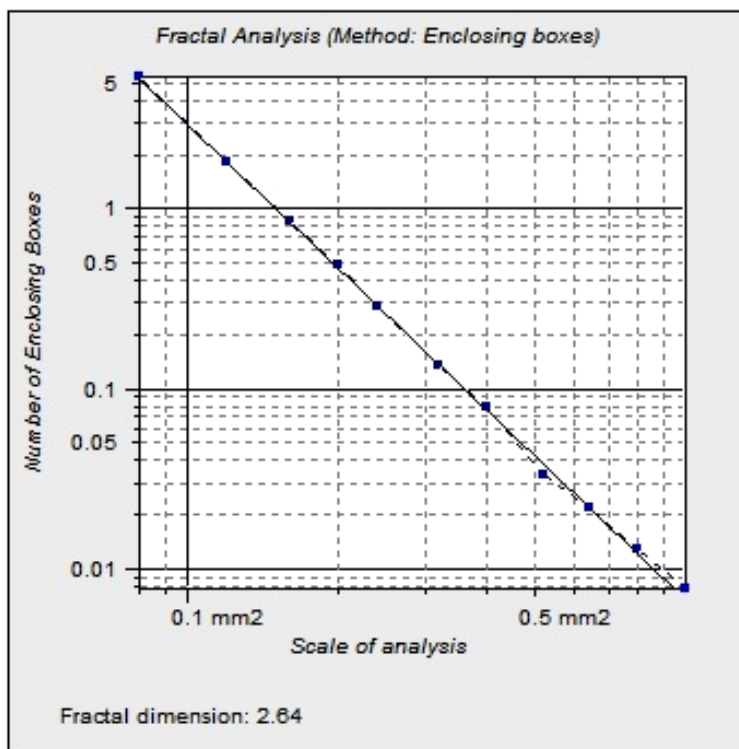
SEZNAM PŘÍLOH

P I GRAFY FRAKTÁLOVÝCH DIMENZÍ

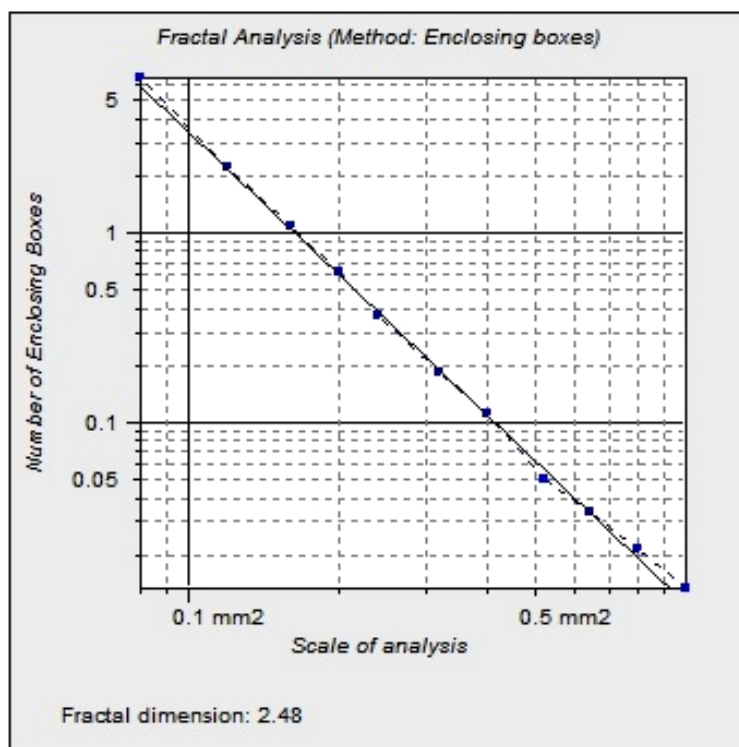
P II GRAFY NAMĚŘENÝCH PARAMETRŮ - GRAFY BOXPLOT

P III PŘEKLADOVÝ SLOVNÍK

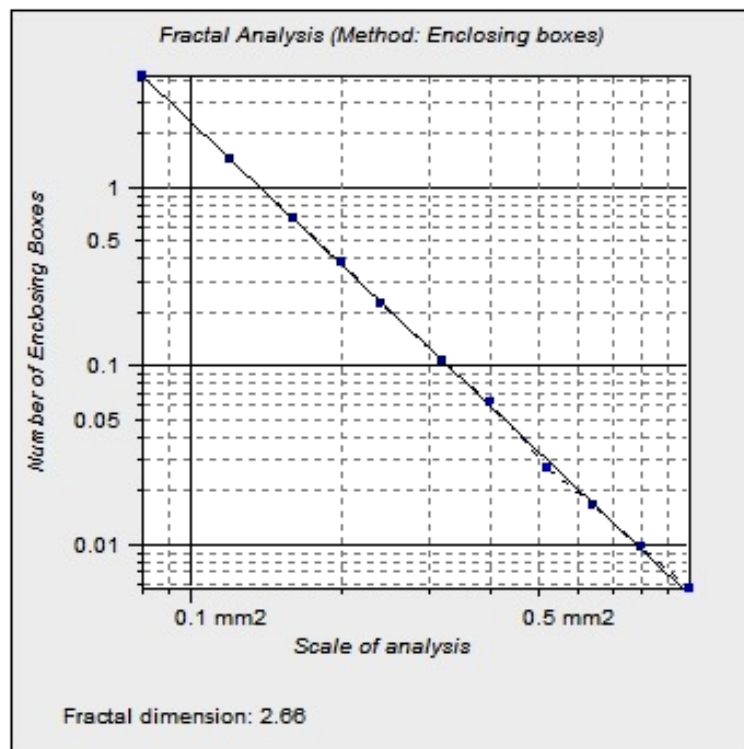
PI GRAFY FRAKTÁLOVÝCH DIMENZÍ



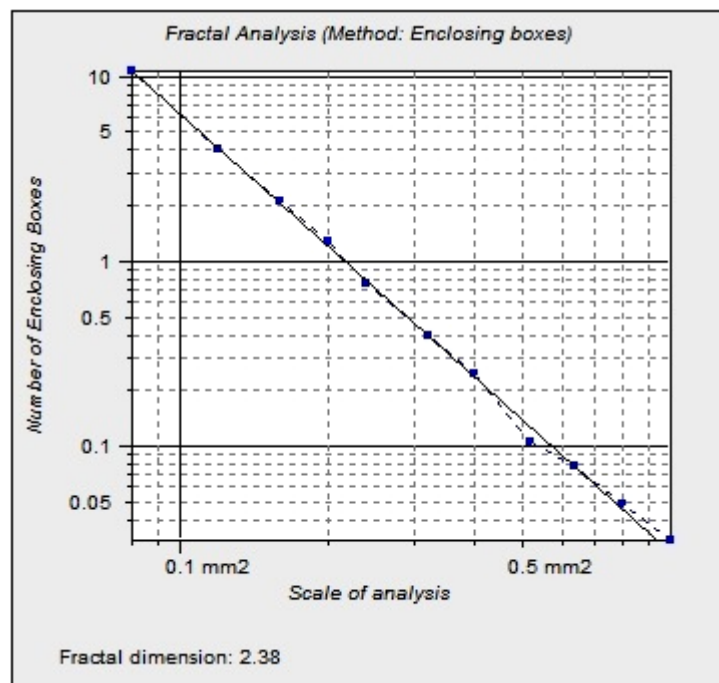
Graf č. 1 Vzorek 1 před povlakováním



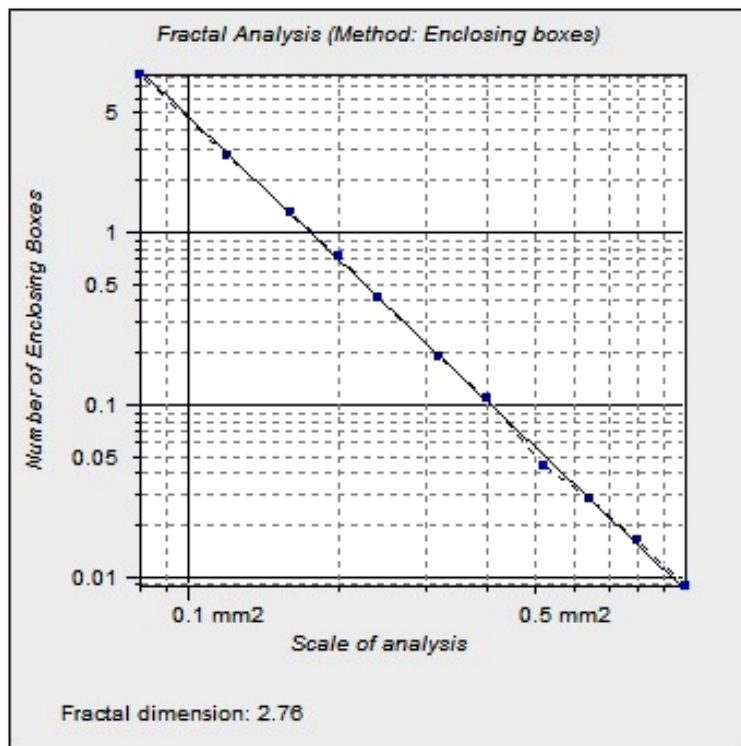
Graf č. 2 Vzorek 1 po povlakování



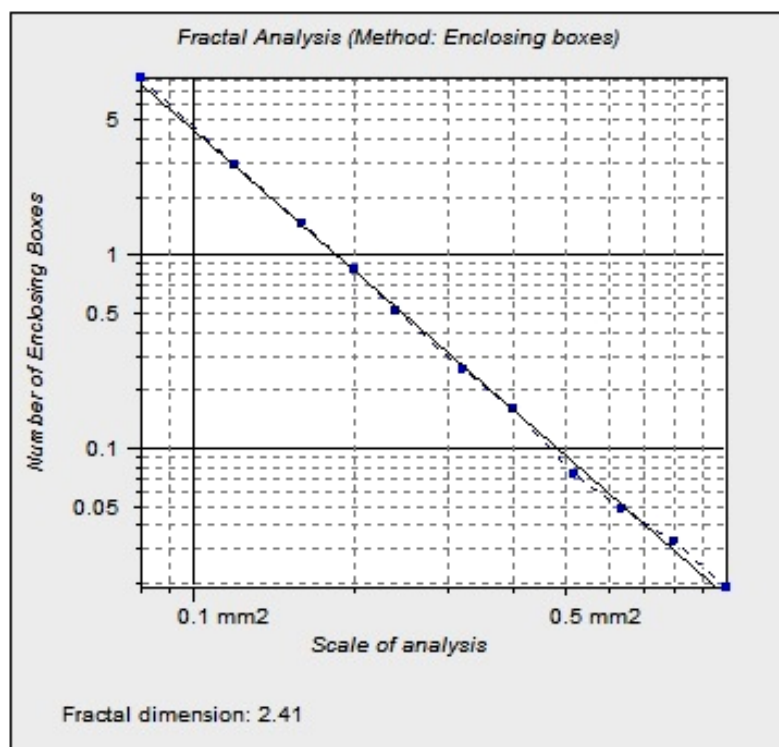
Graf č. 3 Vzorek 2 před povlakování



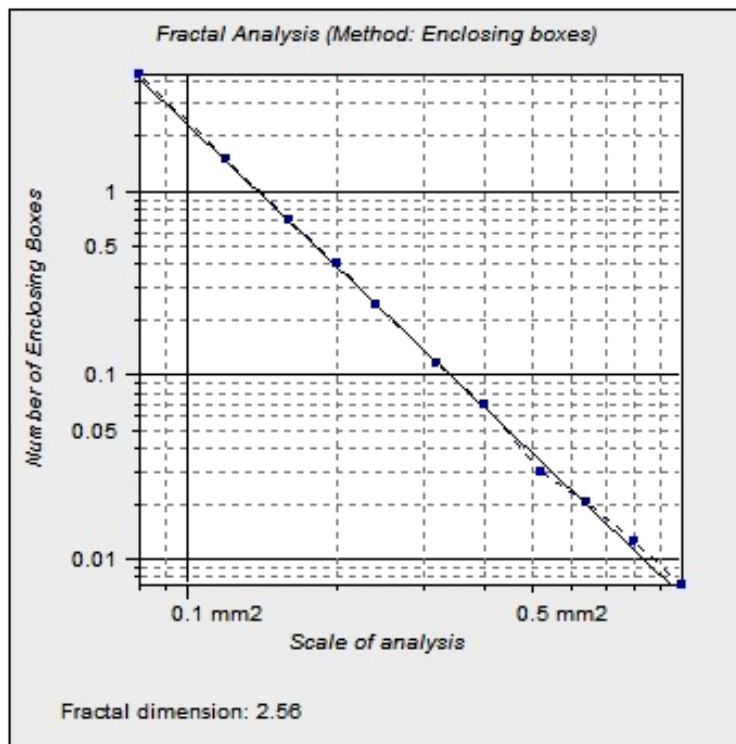
Graf č. 4 Vzorek 2 po povlakování



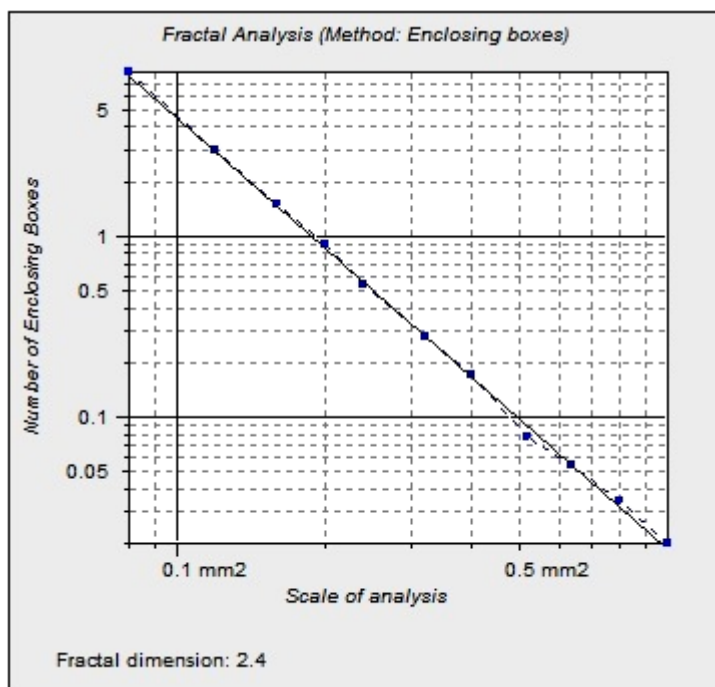
Graf č. 5 Vzorek 3 před povlakováním



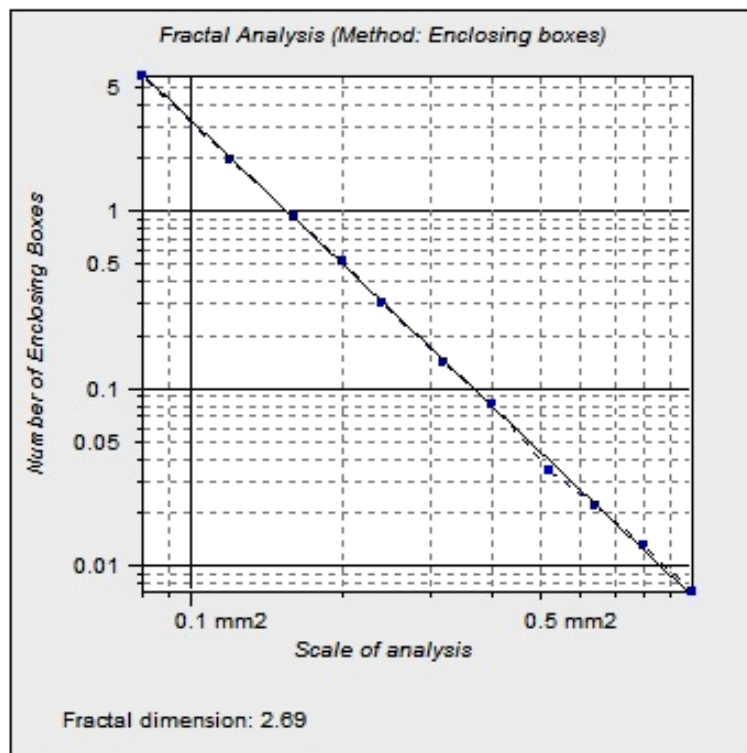
Graf č. 6 Vzorek 3 po povlakování



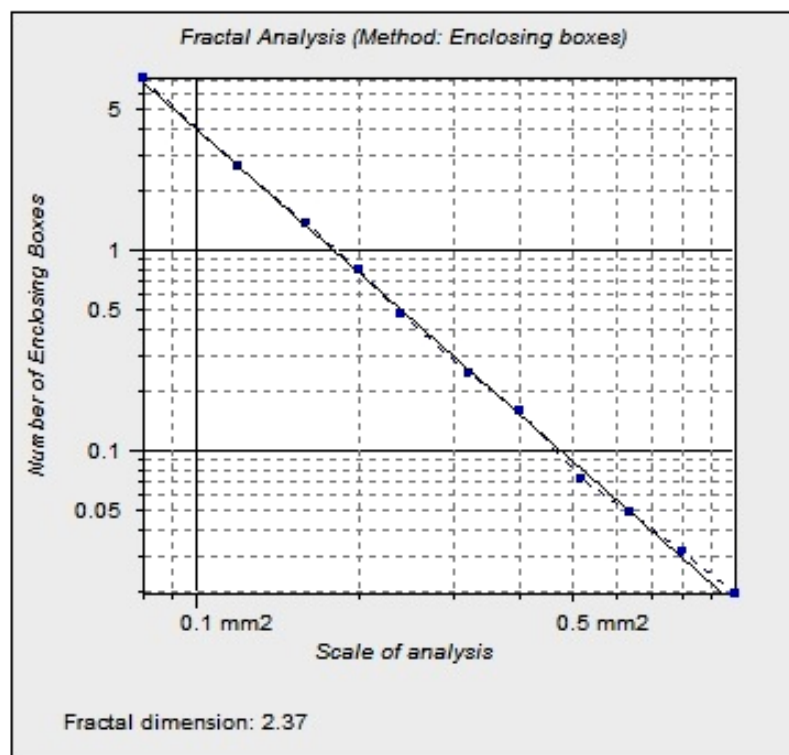
Graf č. 7 Vzorek 4 před povlakováním



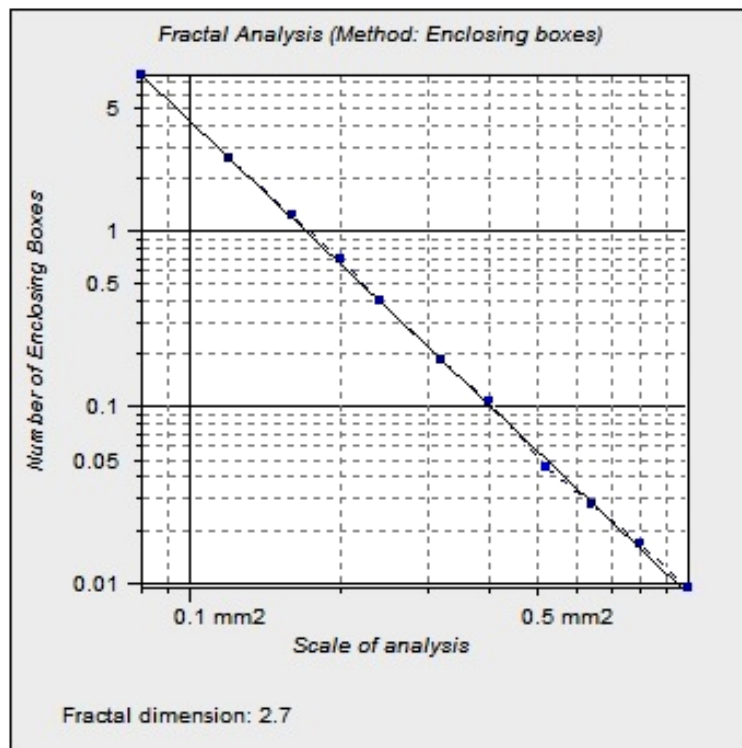
Graf č. 8 Vzorek 4 po povlakování



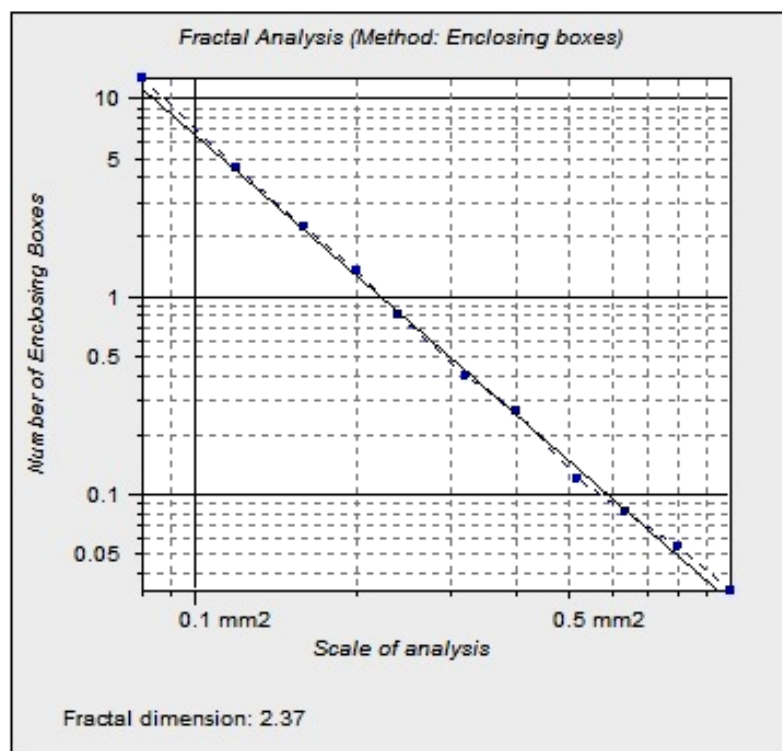
Graf č. 9 Vzorek 5 před povlakováním



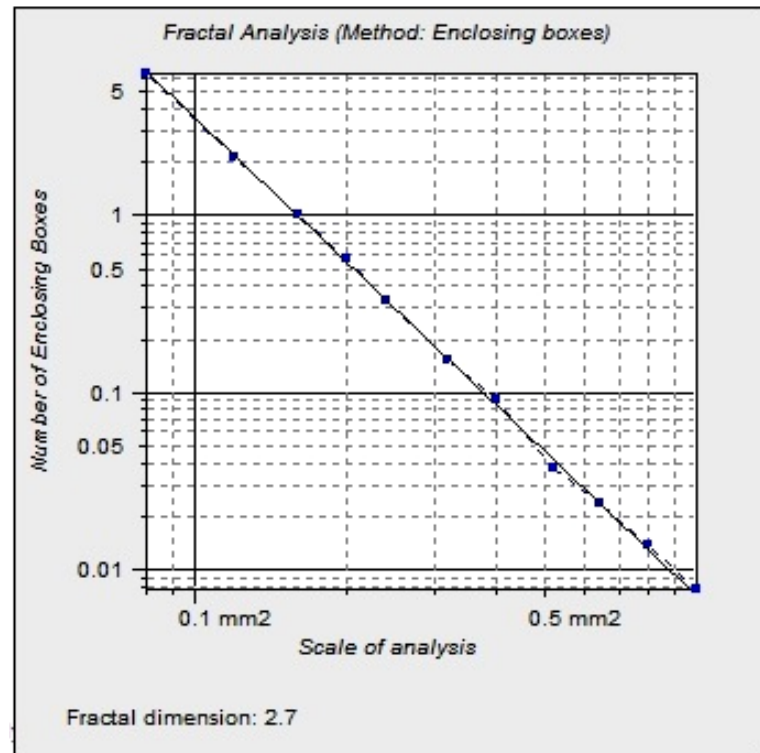
Graf č. 10 Vzorek 5 po povlakování



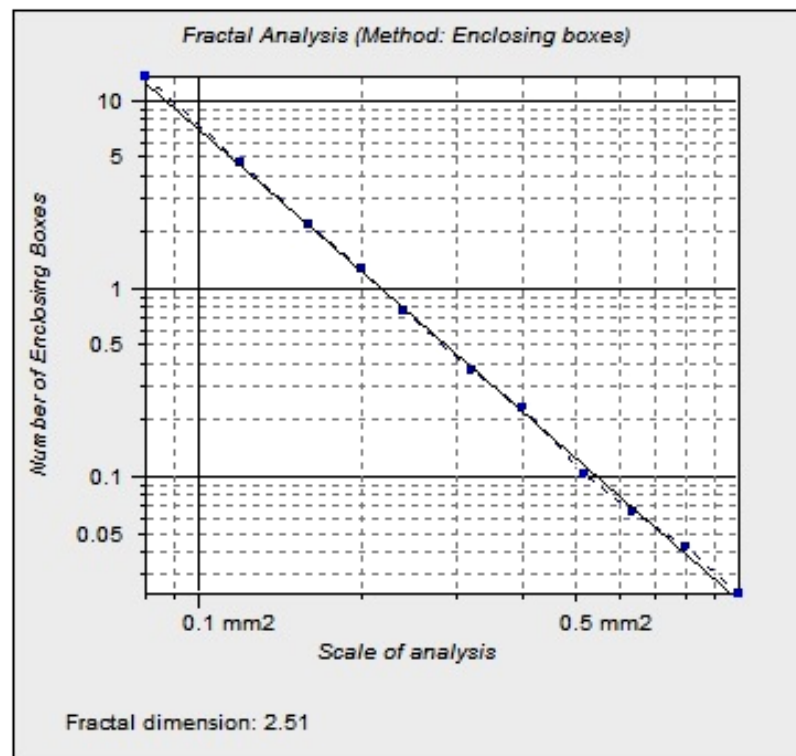
Graf č. 11 Vzorek 6 před povlakováním



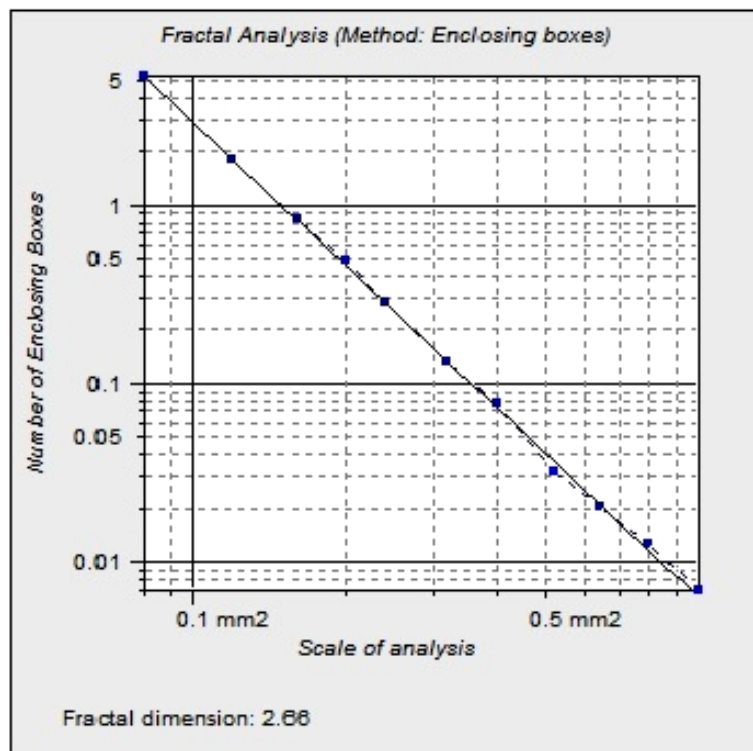
Graf č. 12 Vzorek 6 po povlakování



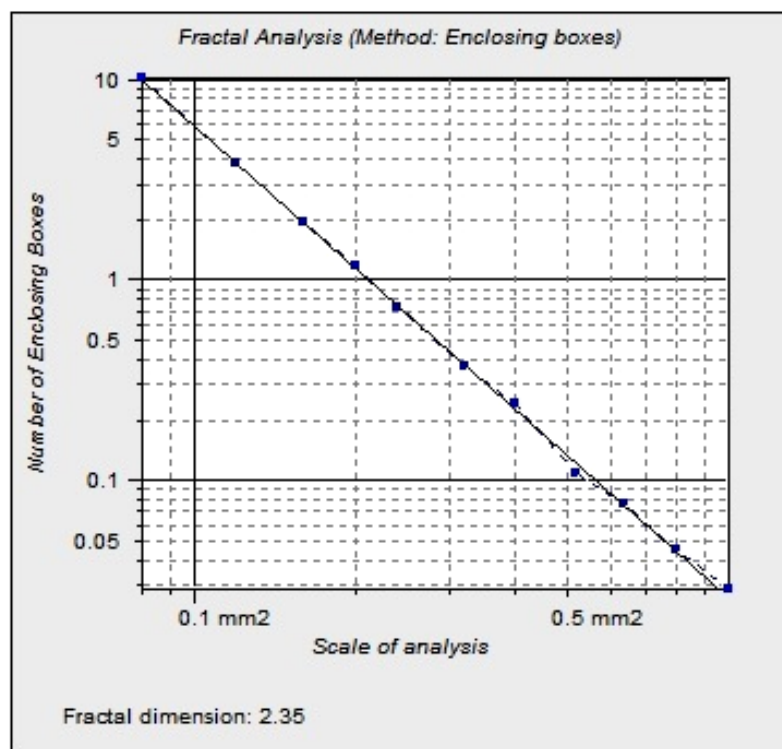
Graf č. 13 Vzorek 7 před povlakováním



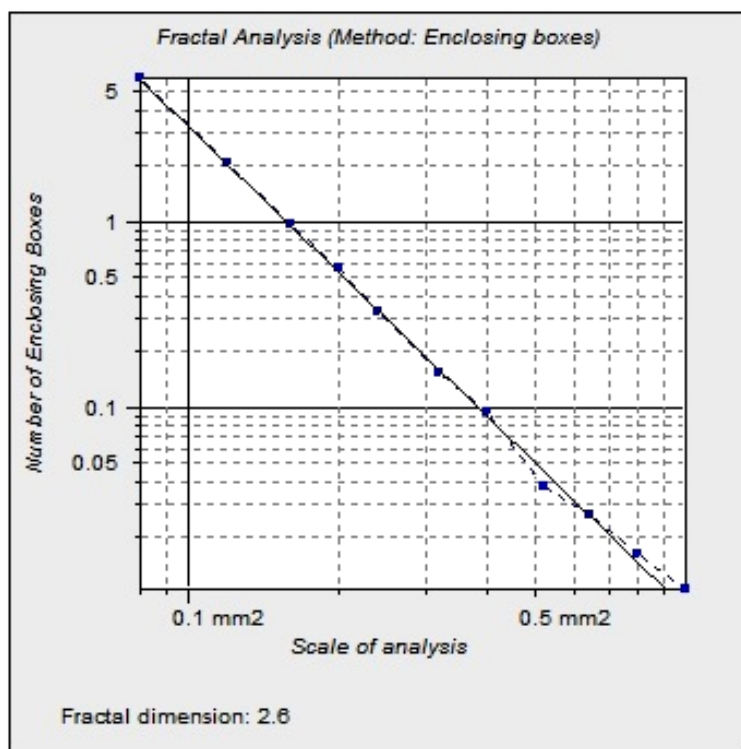
Graf č. 14 Vzorek 7 po povlakování



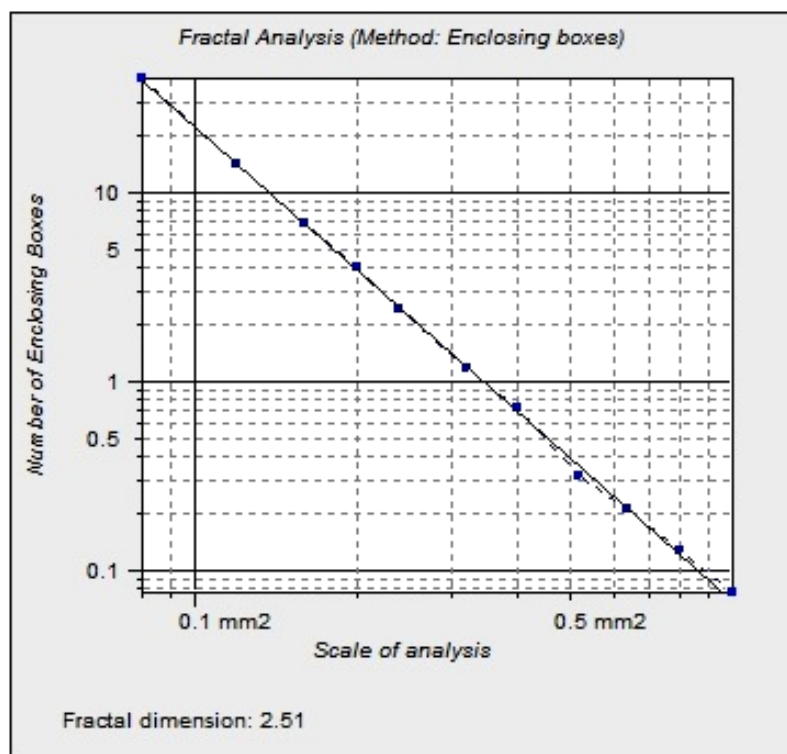
Graf č. 15 Vzorek 8 před povlakováním



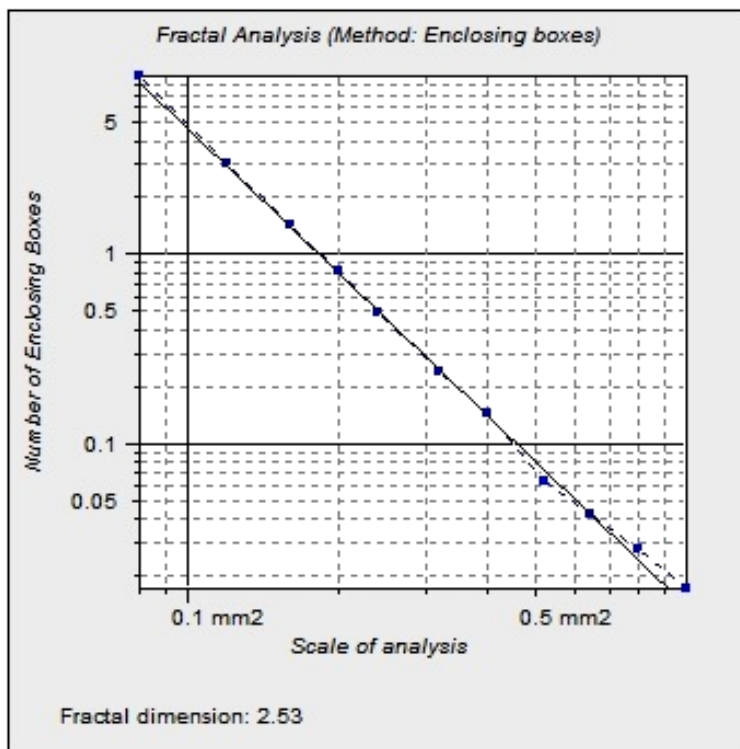
Graf č. 16 Vzorek 8 po povlakování



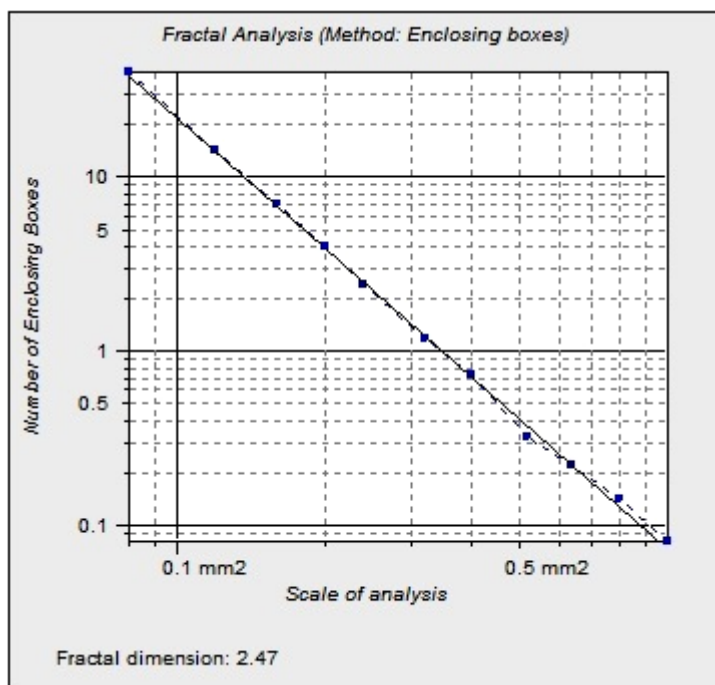
Graf č. 17 Vzorek 9 před povlakováním



Graf č. 18 Vzorek 9 po povlakování

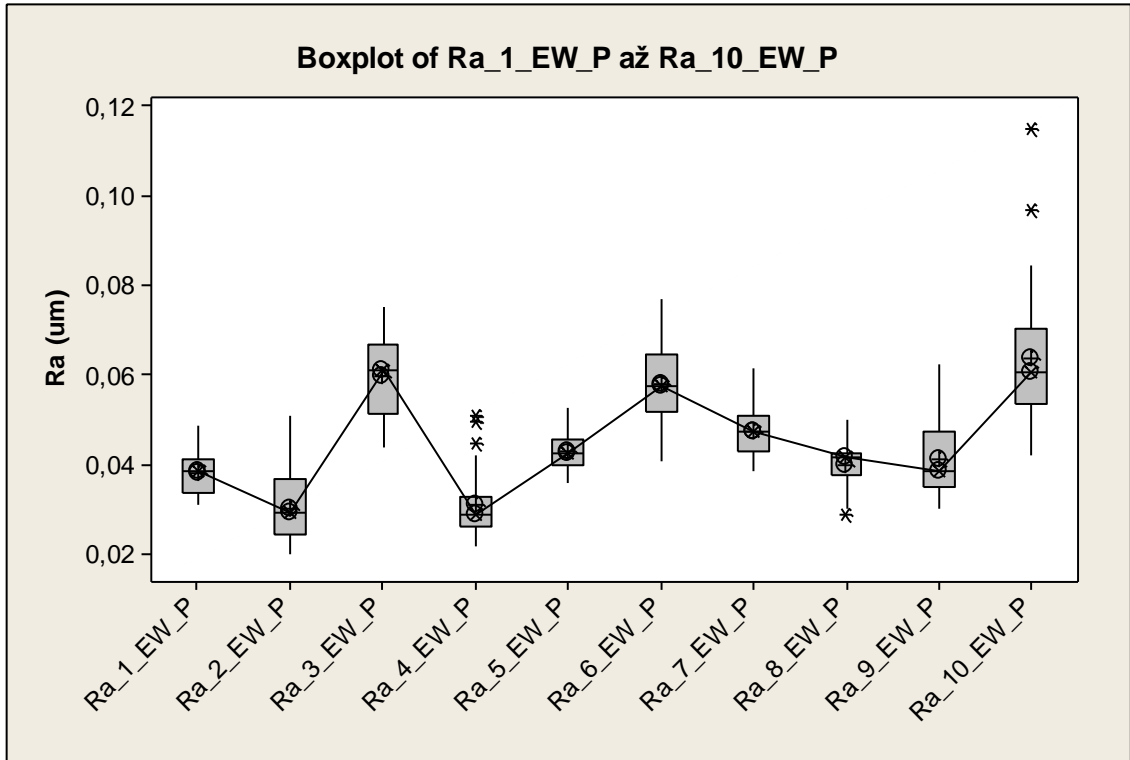


Graf č. 19 Vzorek 10 před povlakováním

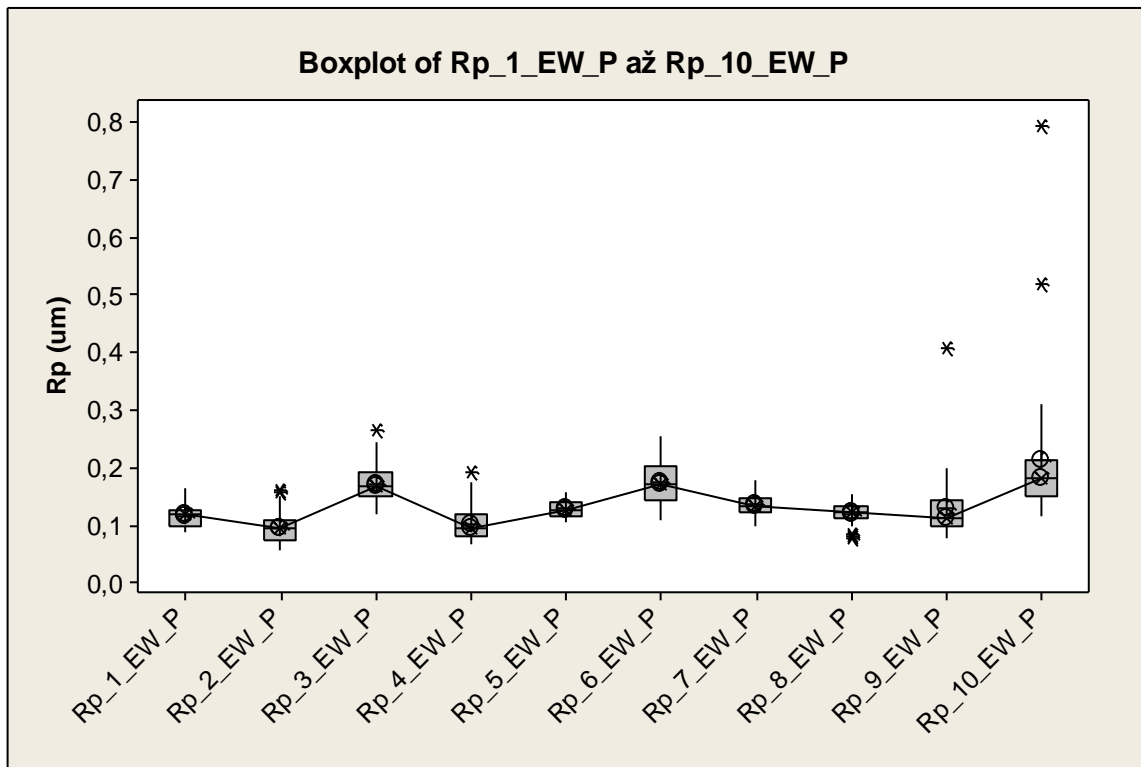


Graf č. 20 Vzorek 10 po povlakování

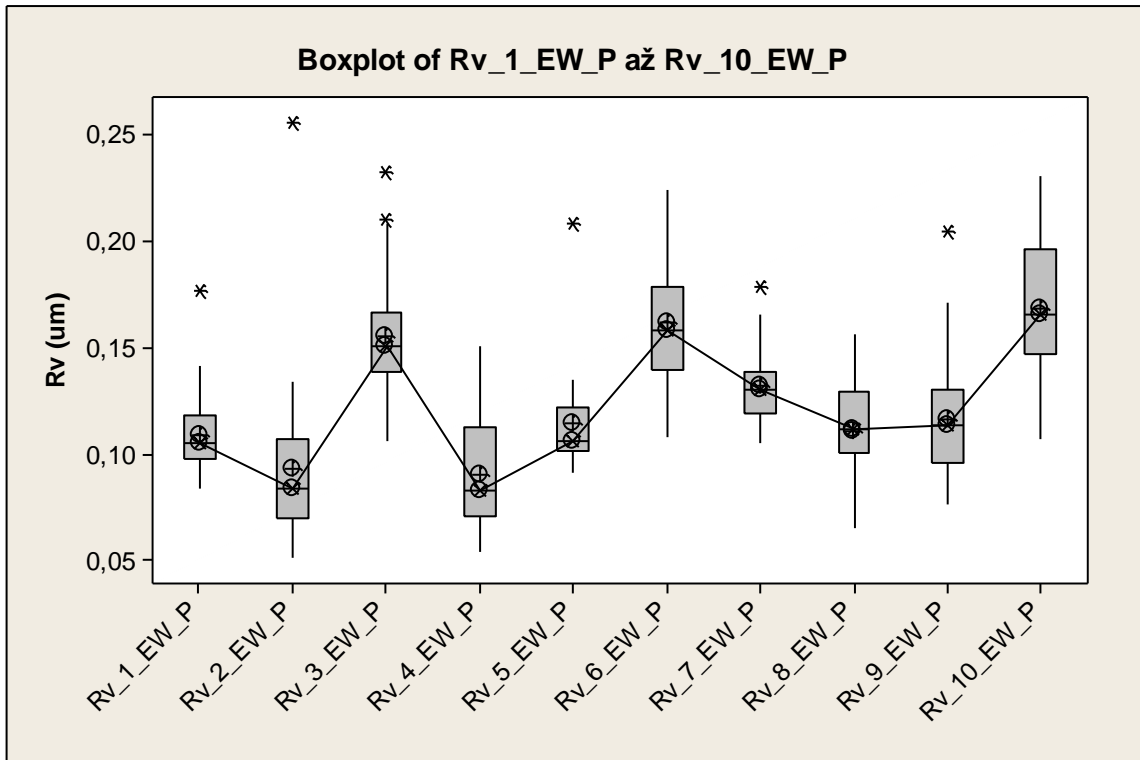
P II GRAFY NAMĚŘENÝCH PARAMETRŮ - GRAFY BOXPLOT



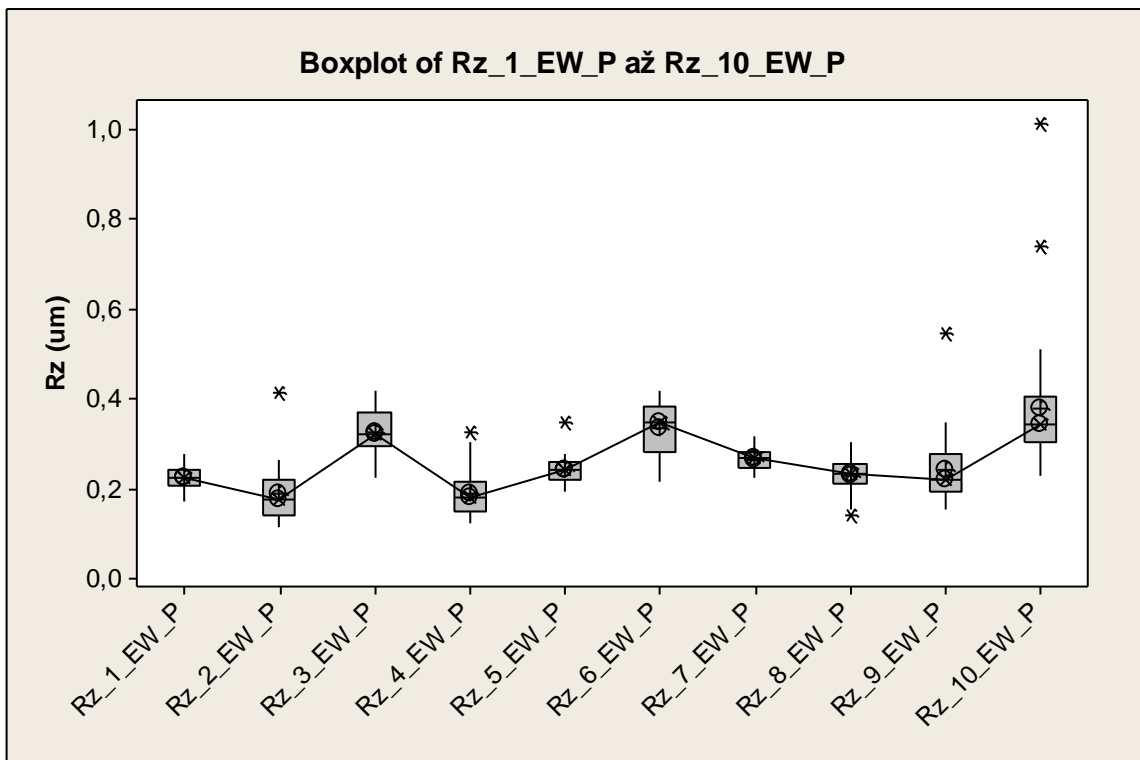
Graf č. 21 Srovnání parametrů Ra_EW_P ve směru East-West před povlakováním



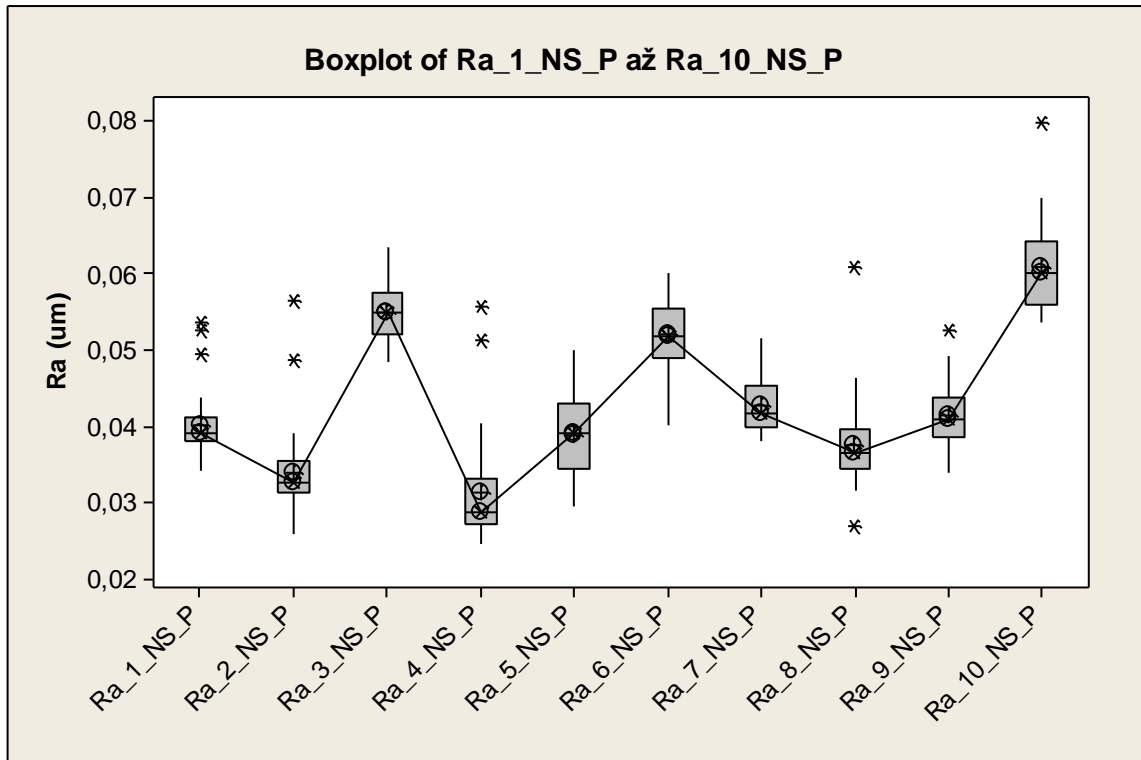
Graf č. 22 Srovnání parametrů Rp_EW_P ve směru East-West před povlakováním



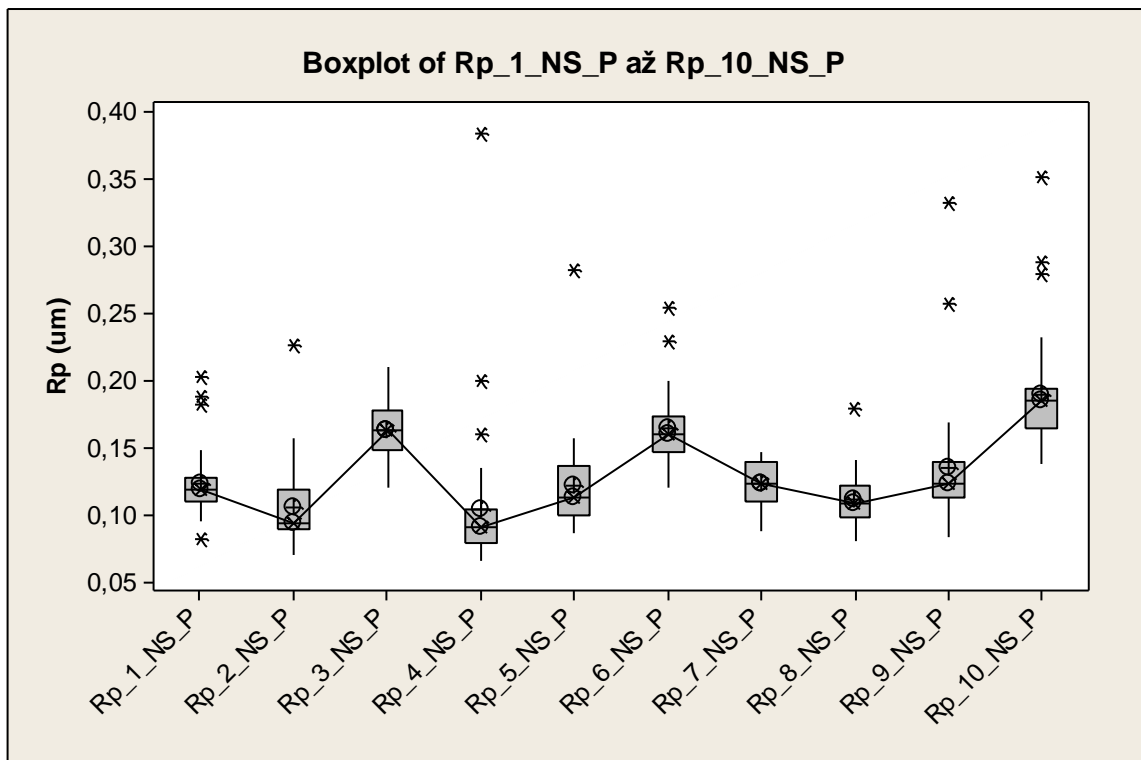
Graf č. 23 Srovnání parametrů Rv_EW_P ve směru East-West před povlakováním



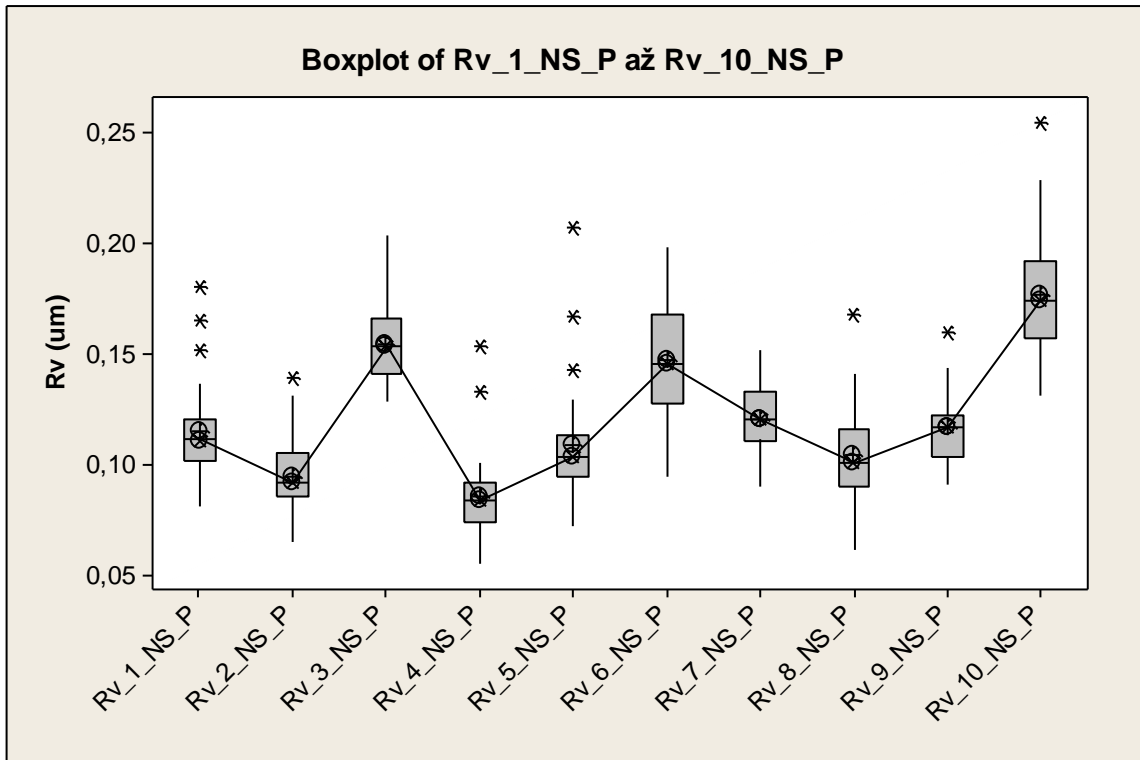
Graf č. 24 Srovnání parametrů Rz_EW_P ve směru East-West před povlakováním



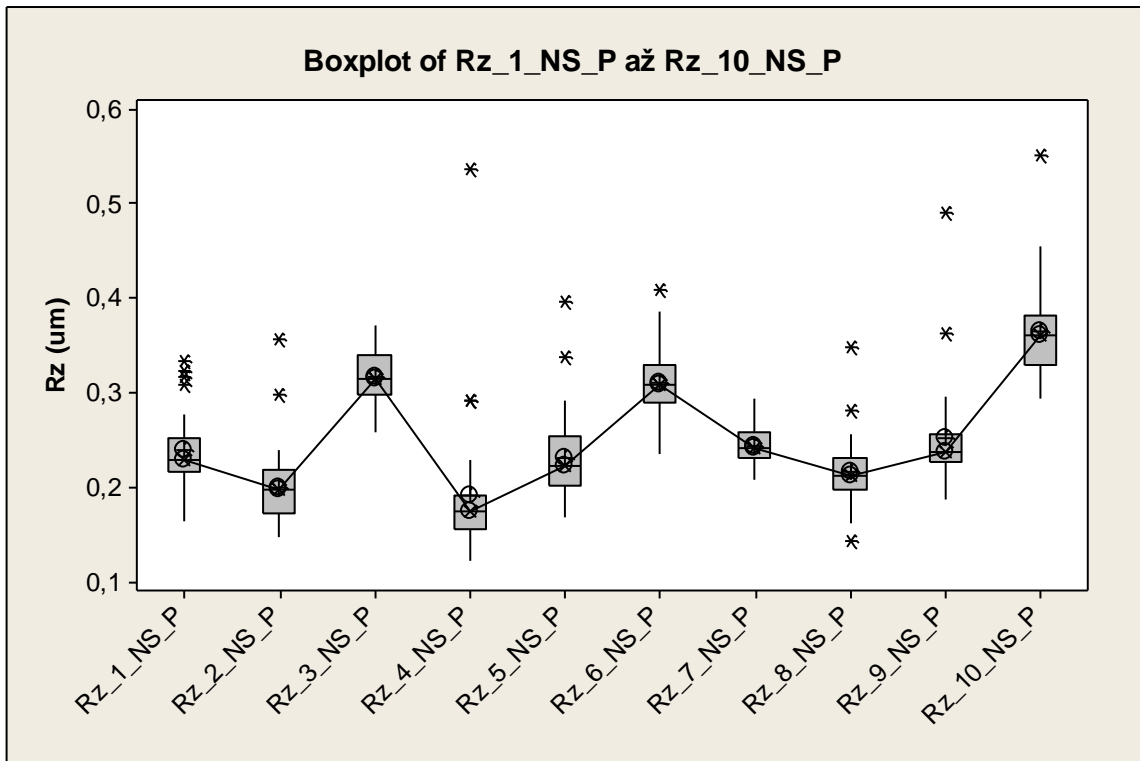
Graf č. 25 Srovnání parametrů Ra_NS_P ve směru North-South před povlakováním



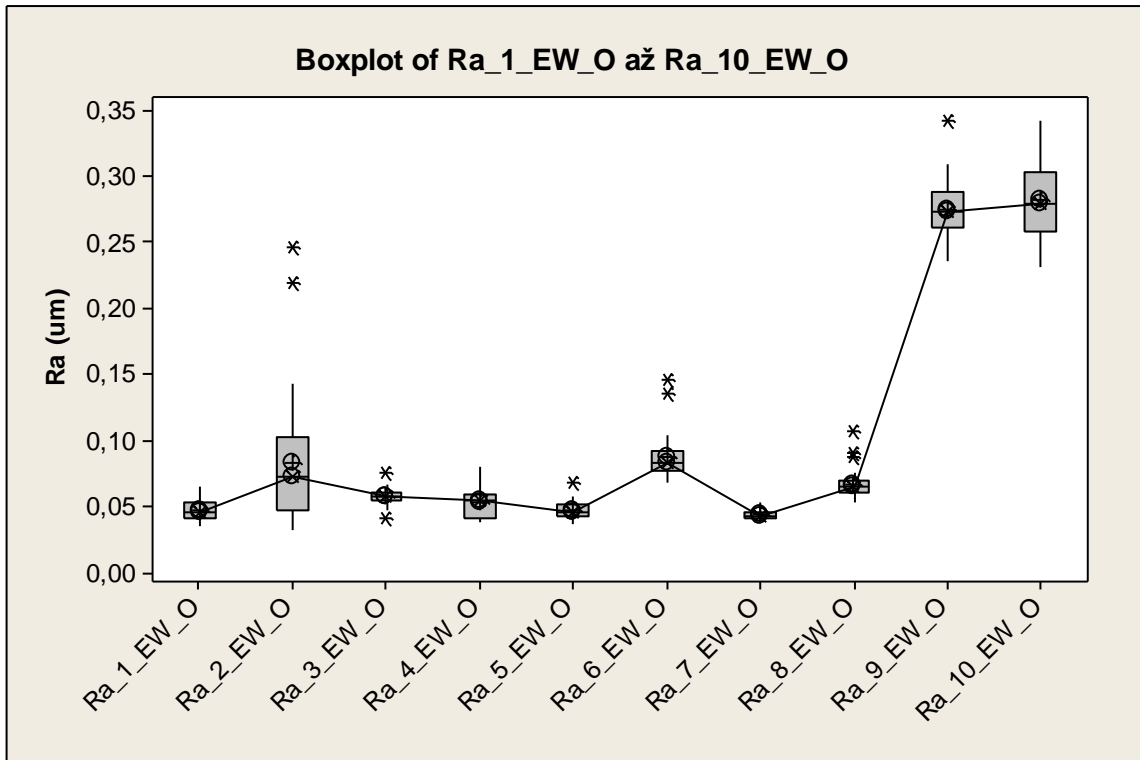
Graf č. 26 Srovnání parametrů Rp_NS_P ve směru North-South před povlakováním



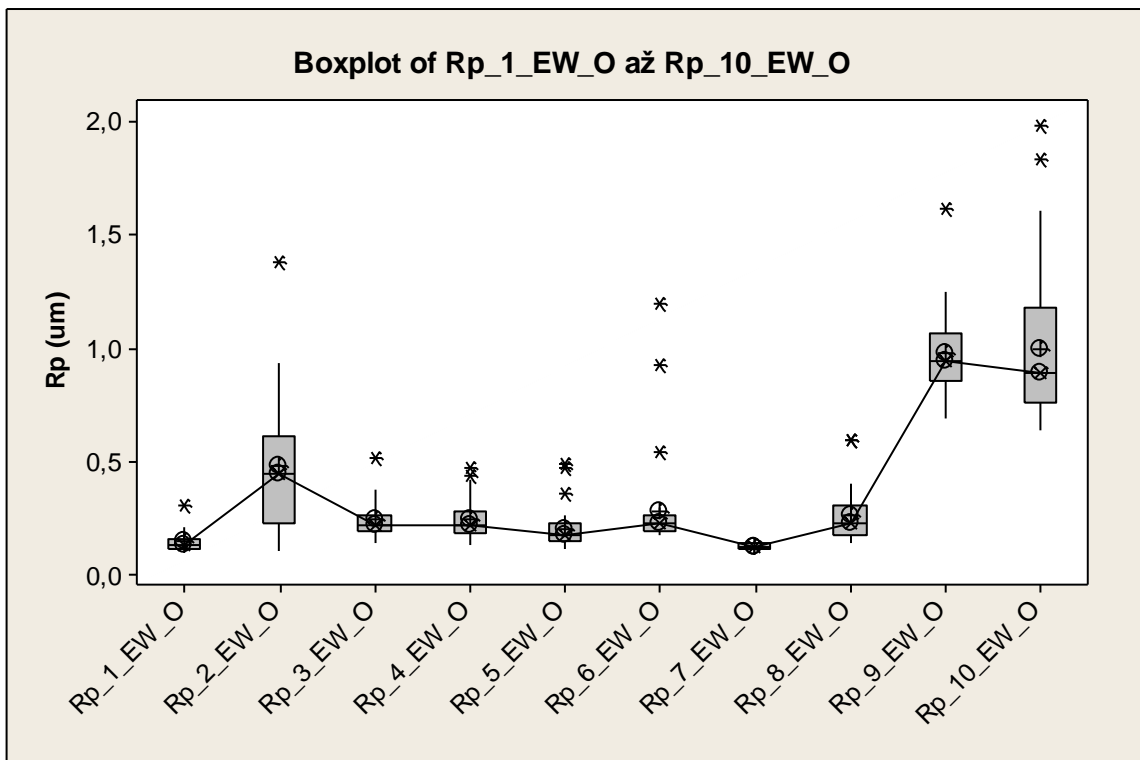
Graf č. 27 Srovnání parametrů Rv_NS_P ve směru North-South před povlakováním



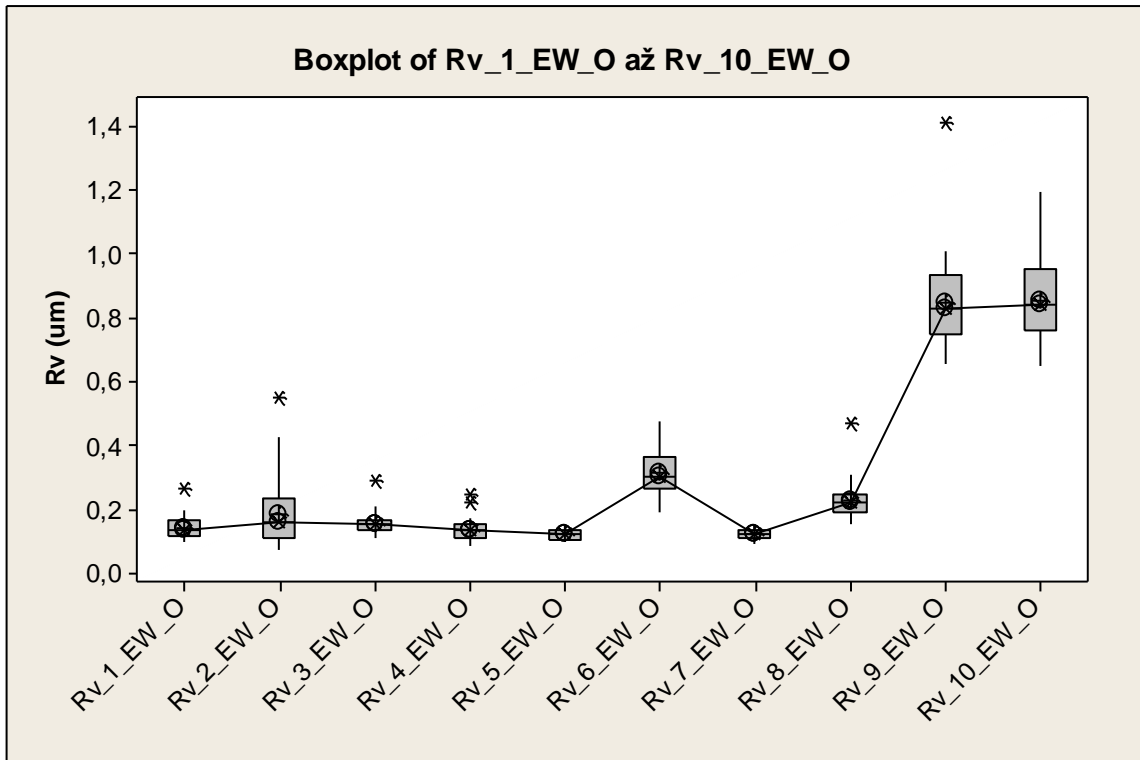
Graf č. 28 Srovnání parametrů Rz_NS_P ve směru North-South před povlakováním



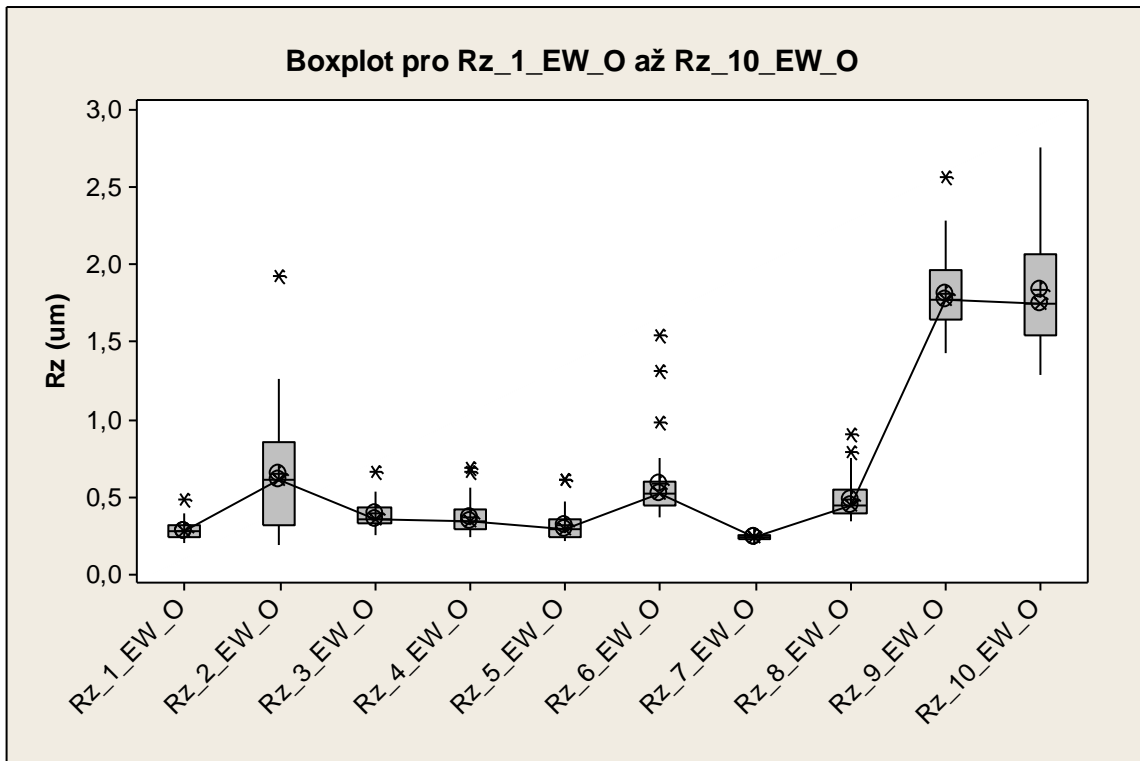
Graf č. 29 Srovnání parametrů Ra_EW_O ve směru East-West po povlakování



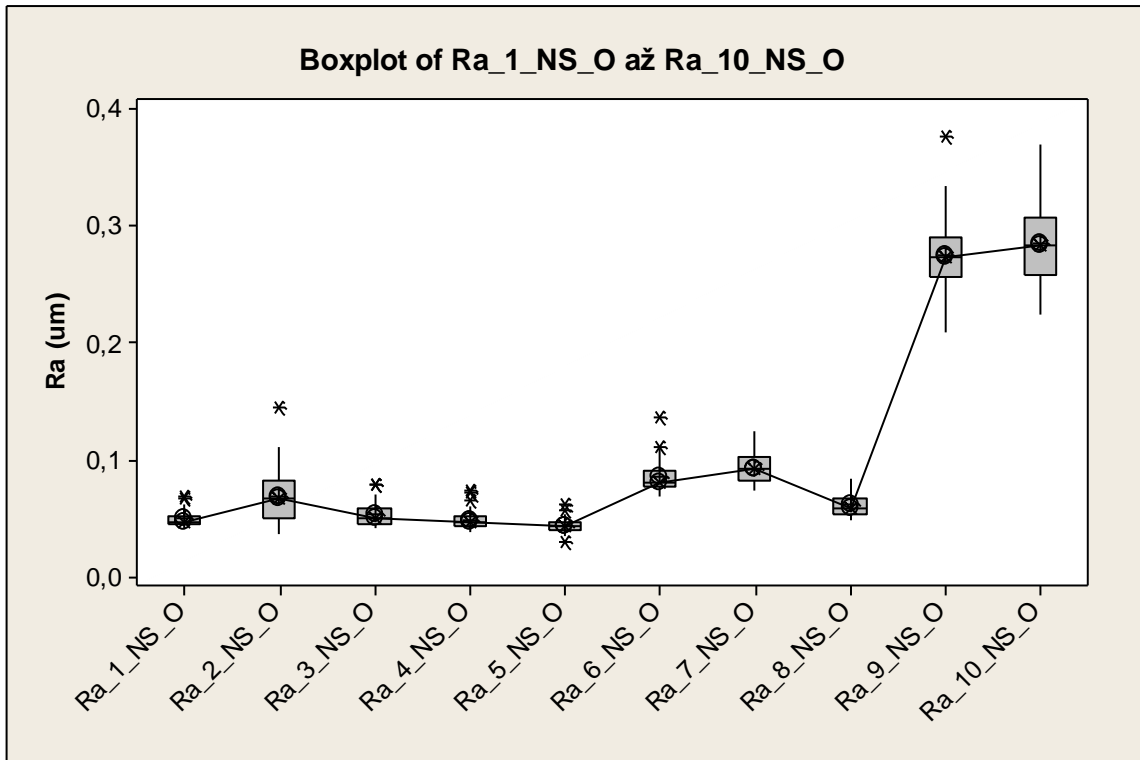
Graf č. 30 Srovnání parametrů Rp_EW_O ve směru East-West po povlakování



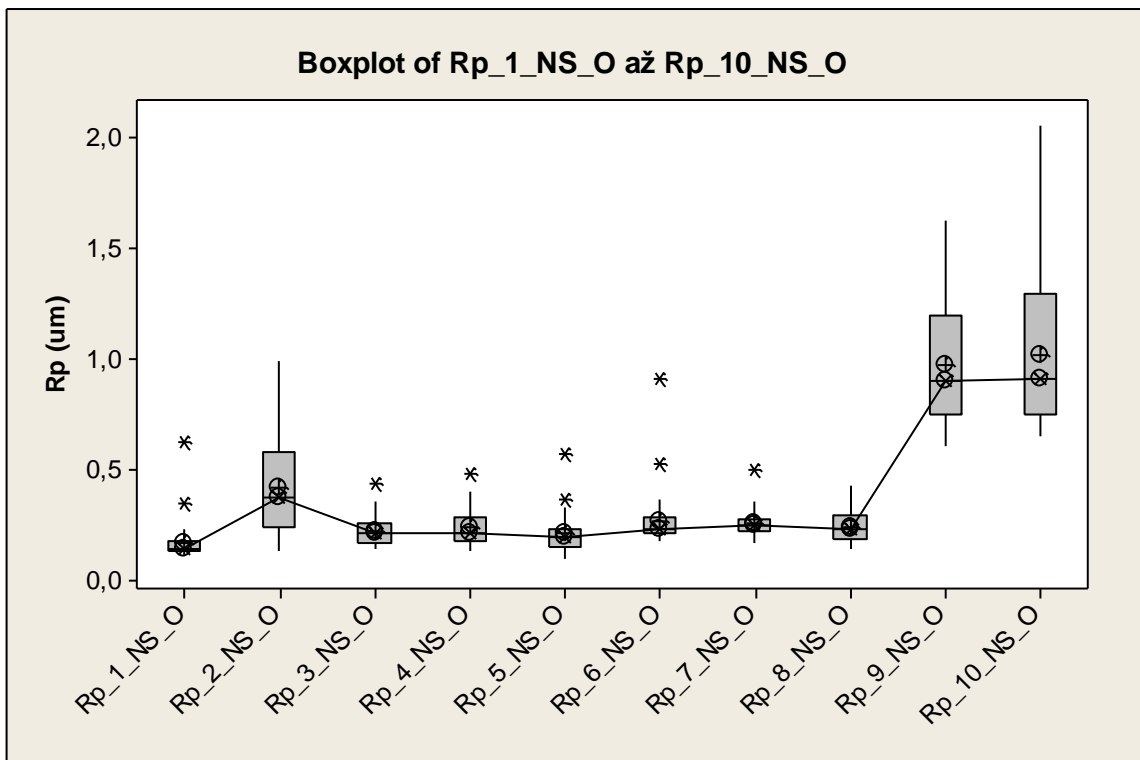
Graf č. 31 Srovnání parametrů Rv_EW_O ve směru East-West po povlakování



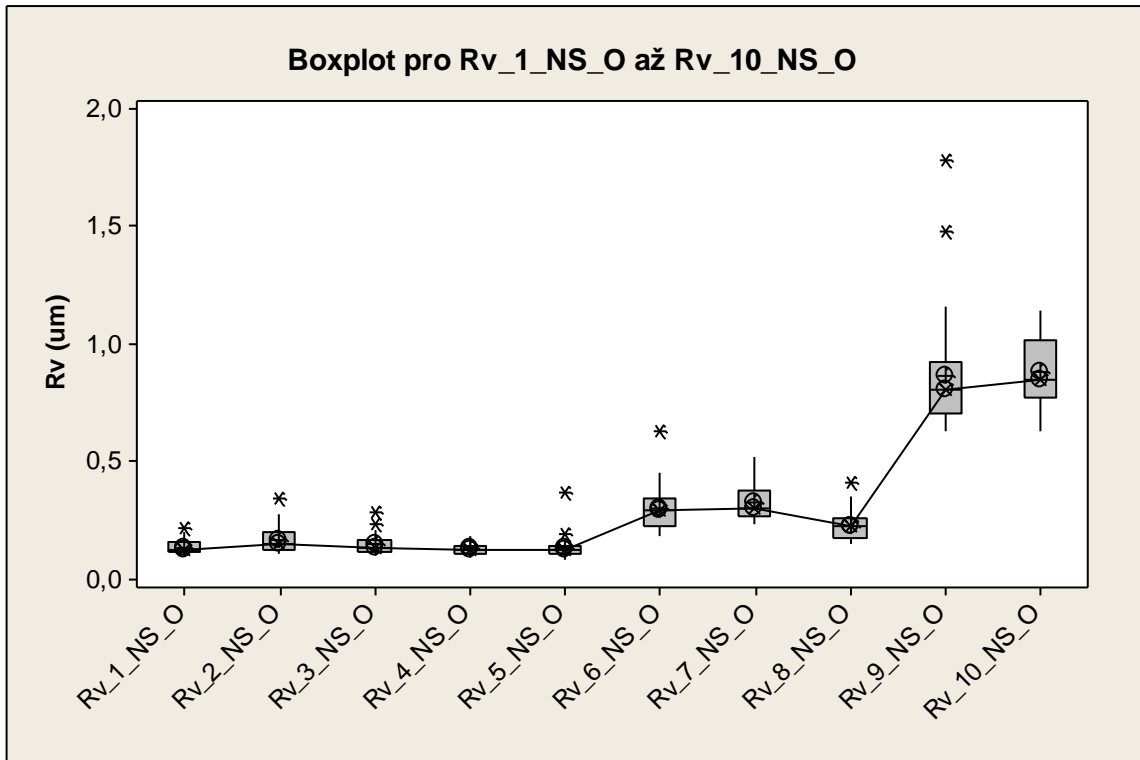
Graf č. 32 Srovnání parametrů Rz_EW_O ve směru East-West po povlakování



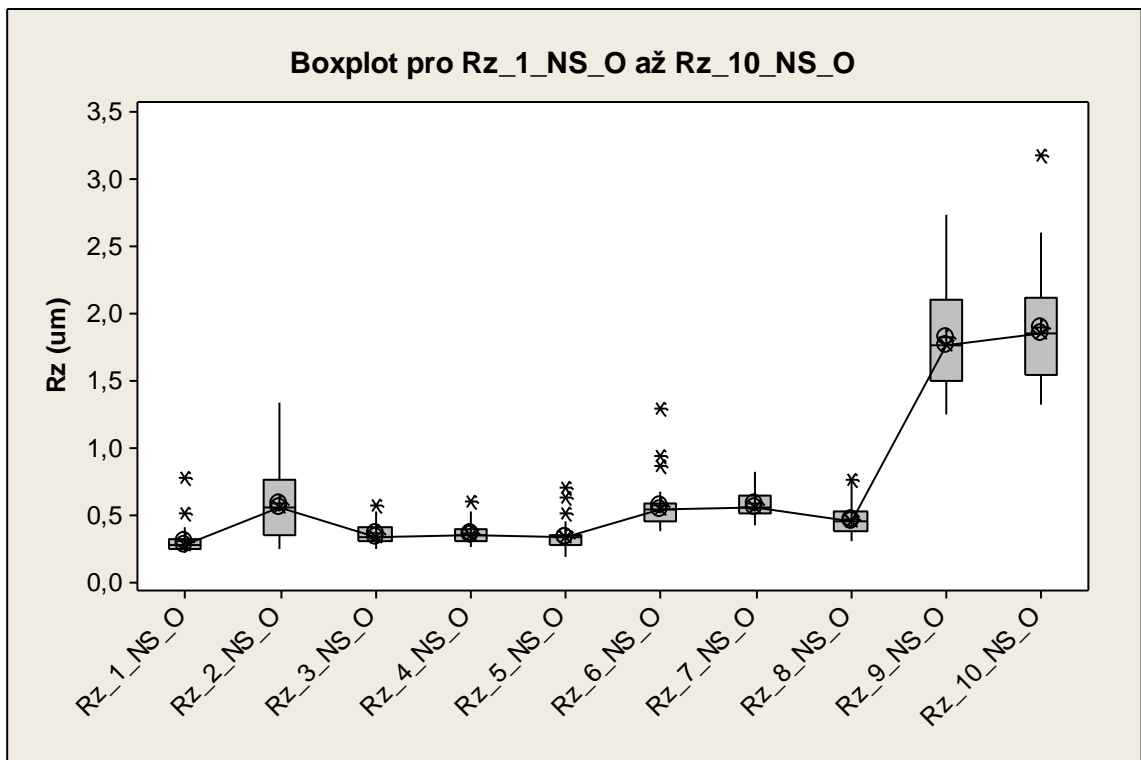
Graf č. 33 Srovnání parametrů Ra_NS_O ve směru North-South po povlakování



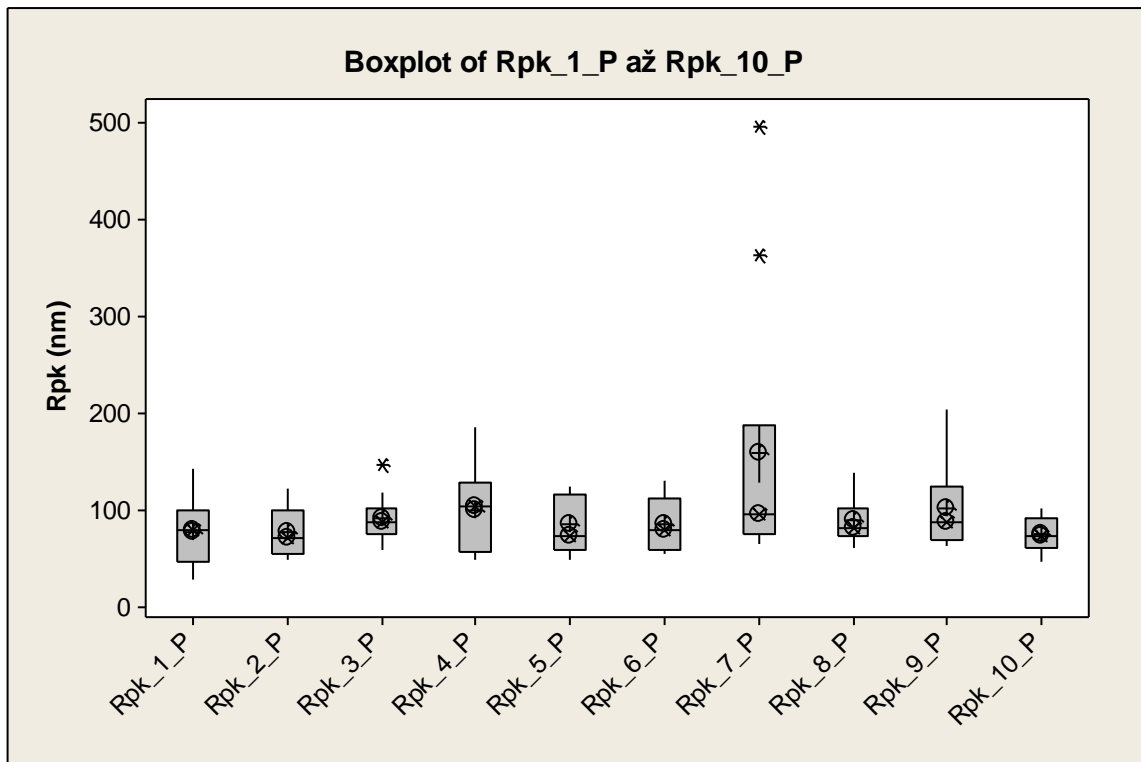
Graf č. 34 Srovnání parametrů Rp_NS_O ve směru North-South po povlakování



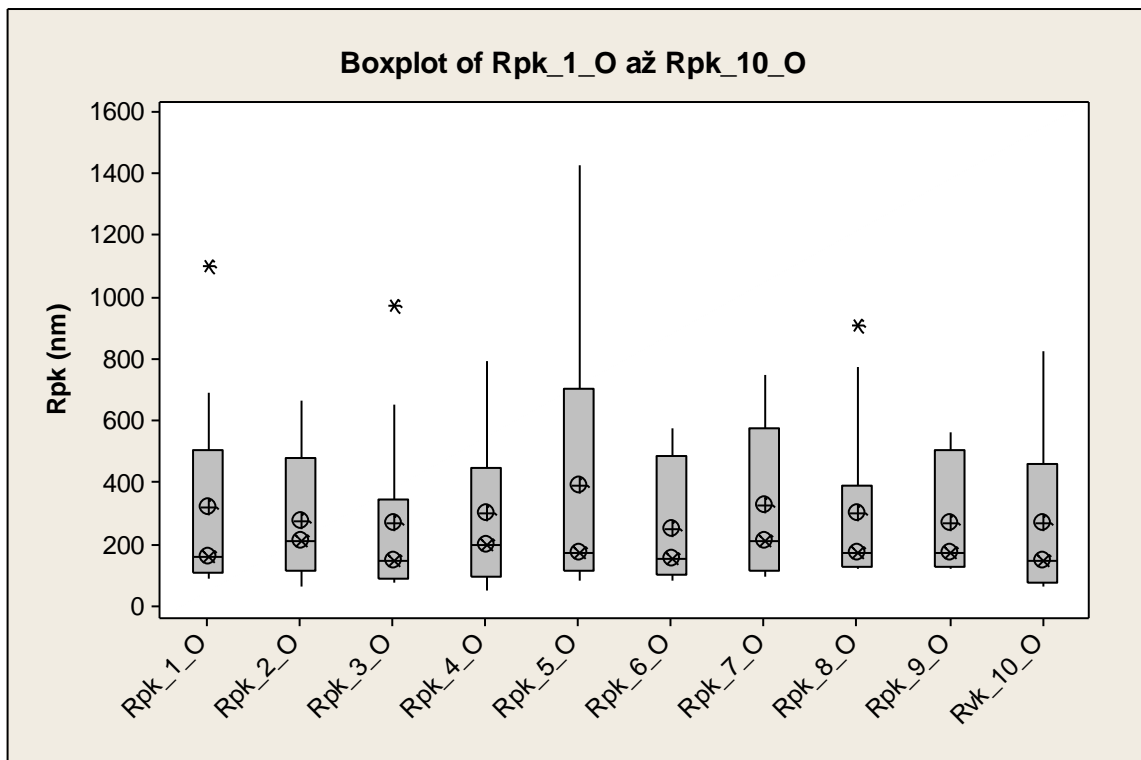
Graf č. 35 Srovnání parametrů Rv_NS_O ve směru North-South po povlakování



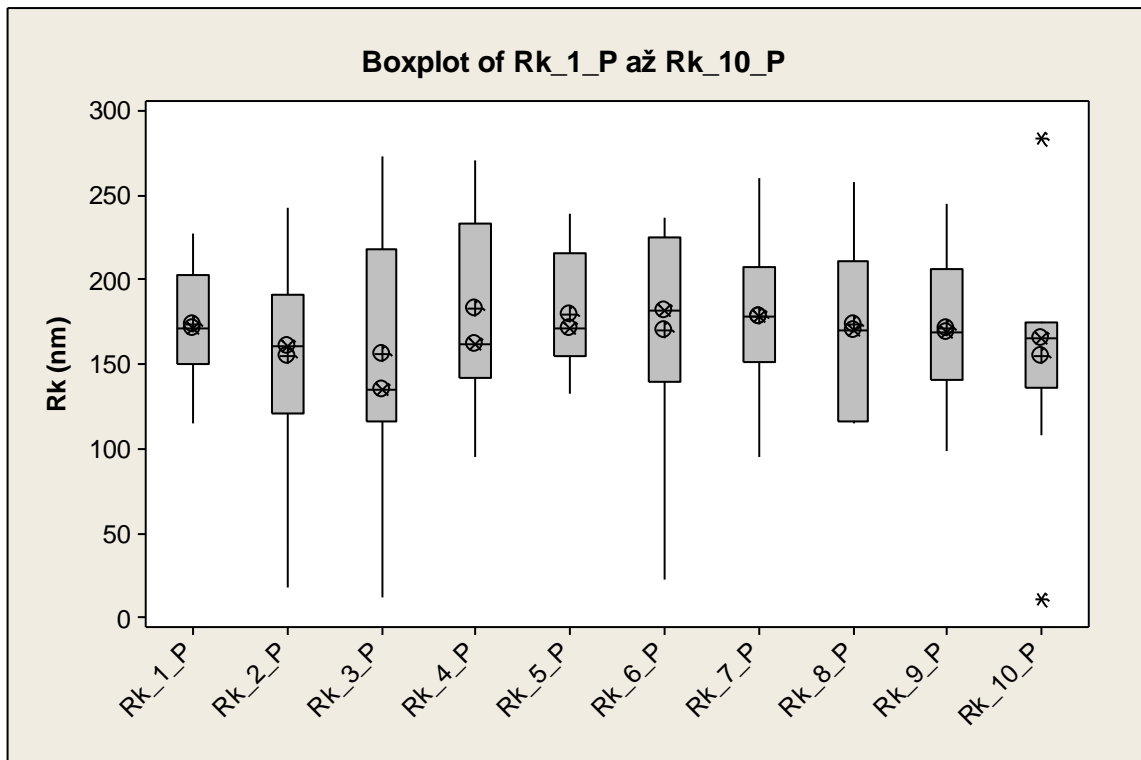
Graf č. 36 Srovnání parametrů Rz_NS_O ve směru North-South po povlakování



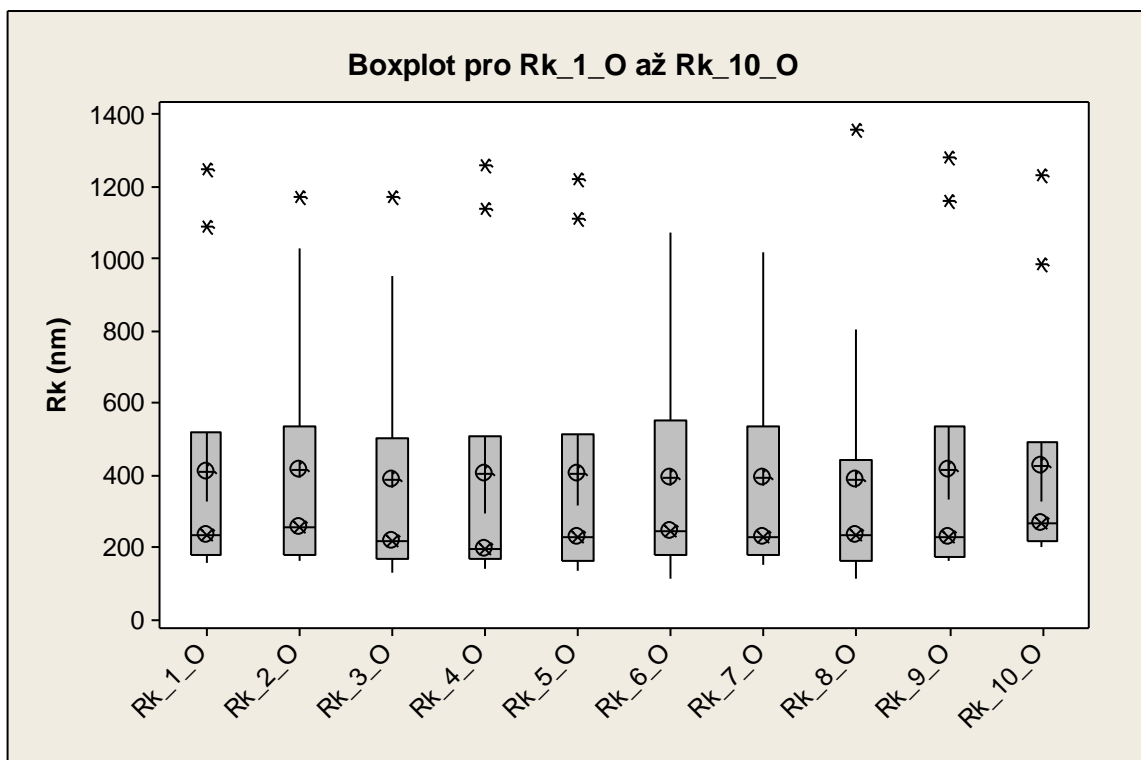
Graf č. 37 Srovnání parametrů Rpk_P před povlakováním



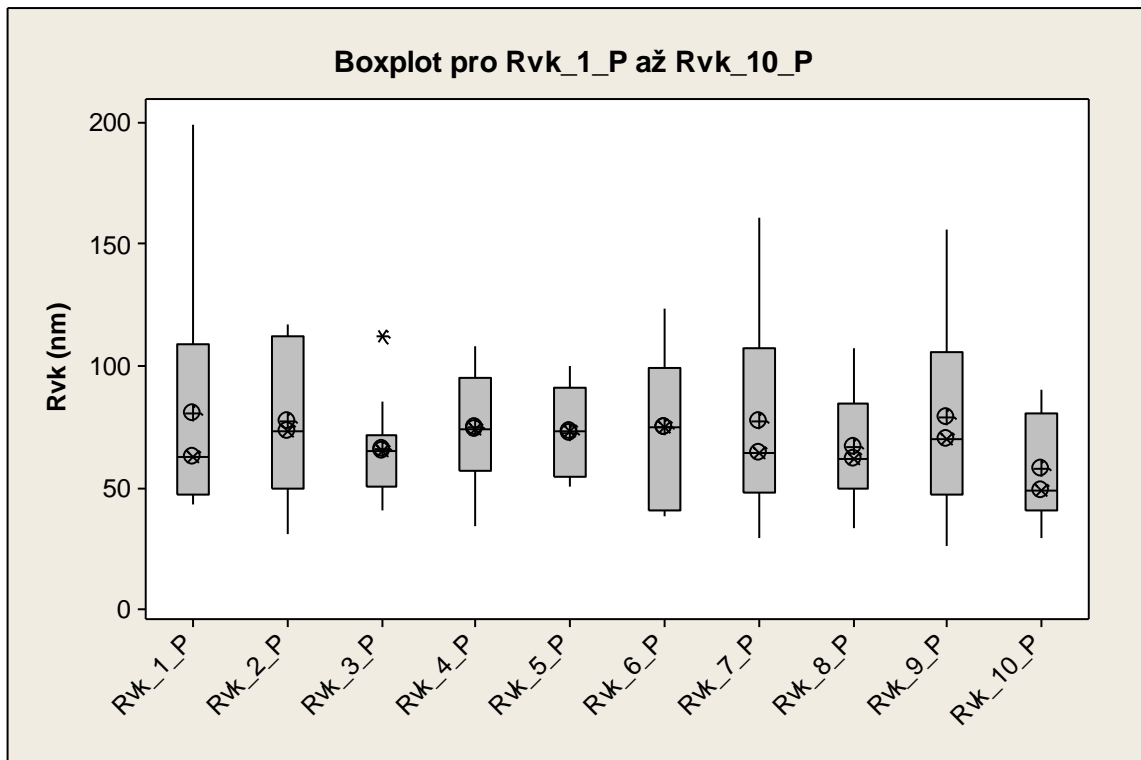
Graf č. 38 Srovnání parametrů Rpk_O po povlakování



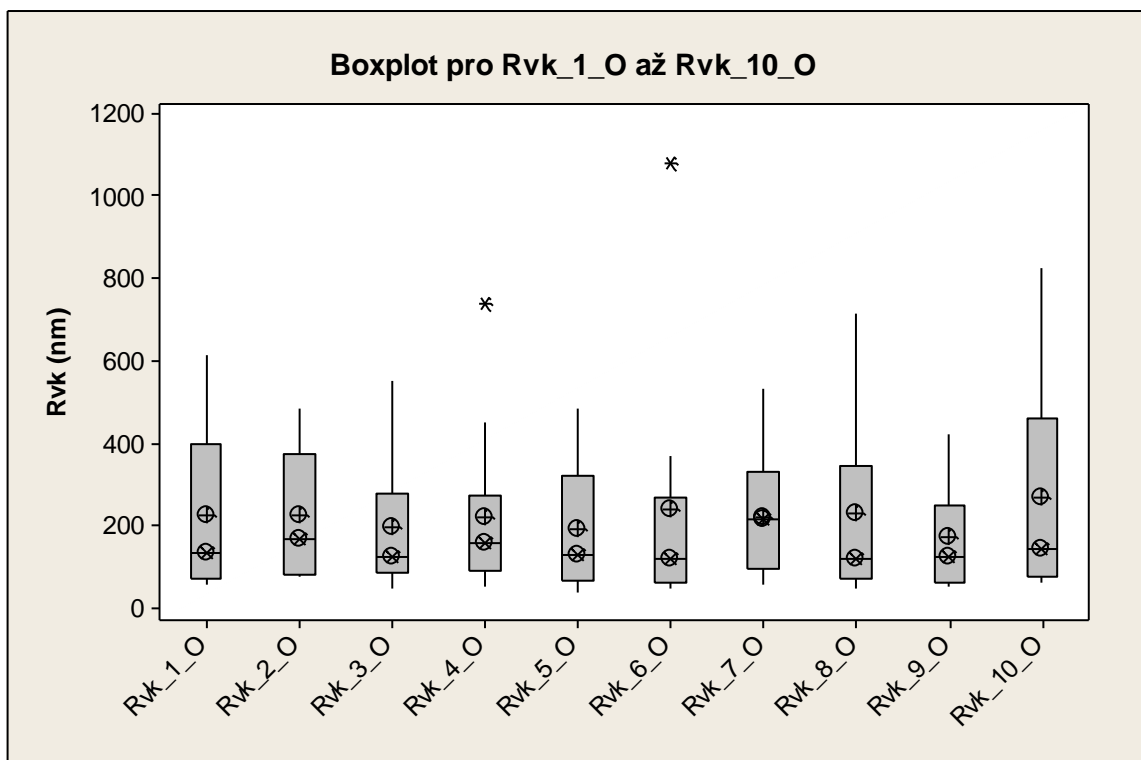
Graf č. 39 Srovnání parametrů Rk_P před povlakováním



Graf č. 40 Srovnání parametrů Rk_O po povlakování



Graf č. 41 Srovnání parametrů Rvk_P před povlakováním



Graf č. 42 Srovnání parametrů Rvk_O po povlakování

PIII PŘEKLADOVÝ SLOVNÍK

Degree of freedom	Stupeň volnosti
Zoom	Přiblížení
Scan	Snímání
Analysis of variace	Analýza odchylky
Levelling	Vyrovňávání
Surface	Povrch
Contour diagram	Diagram obrysů
Photo Simulation	Foto simulace
3D View	3D zobrazení
Color background	Barevné zobrazení
Filter setting	Nastavení filtru
Convert into a series of profiles	Konvertovat do série profilů
Parameters Table	Tabulka parametrů
Variances	Odchylky
Fraktal Analysis	Fraktální analýza
Studies	Studie
Level	Úroveň
Size	Velikost
Speed	Rychlost
File Size	Velikost souboru
Current Surface	Aktuální povrch
Table control	Ovládací tabulka
Scan	Snímat
Gauge	Indikátor

Gauge cover	Víko indikátoru
Measured profile	Měřený profil
Profile extraction	Profil převedení
Current point	Aktuální bod
Graphical Study	Grafická studie
Illustrations	Ukázka
List of Statistical Parameters	Seznam statistických parametrů
Vertical slide	Svislé přejetí
Horizontal slide	Vodorovné přejetí
Emergency stop button	Tlačítko nouzového zastavení
Remove control keypad	Dálkový ovladač klávesnice
Granite base and gantry	Žulový podstavec a jeřáb
Connection panel	Panel připojení
Chromatic Length Aberration	Chromatická délková aberace
Weight capacity	Hmotnostní kapacita
Iteration Function System	Iterace funkce systému
Time Escape Algorithms	Čas únikového algoritmu
Field parameter	Parametr pole
Feature parameter	Parametr prvku
Height	Výška
Ordinate value	Hodnota koordinace
Peak	Pík
Hill	Vrch
Pit	Prohlubeň
Dale	Údolí

Saddle	Sedlo
Course line	Přímka kurzu
Ridge line	Hřebenová přímka
Saddle point	Bod sedla
Topographic feature	Topografický prvek
Areal feature	Plocha prvku
Line feature	Přímka prvku
Point feature	Bod prvku
Contour line	Obrysová přímka
Change tree	Strom změn
Pruning	Pročištění
Local peak height	Místní výška piku
Local pit height	Místní hloubka prohlubně
Peak height	Výška piku
Pit height	Hloubka prohlubně
Height discriminatio	Výška rozlišování
Skewness of the scale-limited surface	Šikmost omezené stupnice povrchu
Kurtosis of the scale-limited surface	Špičatost omezené stupnice povrchu
Core surface	Povrch jádra
Core height	Výška jádra
Reduced peak height	Redukovaná výška piku
Reduced dale height	Redukovaná hloubka údolí
Range	Rozsah

