

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ**  
**FAKULTA STROJNÍ**

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Možnosti měření profilu povrchu s využitím souřadnicové měřicí  
techniky**

THE POSSIBILITIES OF MEASURING THE SURFACE PROFILE WITH THE USE OF THE  
COORDINATE MEASURING MACHINES

Autor:	Ivana Tomšů
Studijní program:	Výroba a ekonomika ve strojírenství
Studijní obor:	Technologie, materiály a ekonomika strojírenství
Vedoucí práce:	Ing. Jan Urban

PRAHA 2018



# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení:	Tomšů	Jméno:	Ivana	Osobní číslo:	459861
Fakulta/ústav:	Fakulta strojní				
Zadávací katedra/ústav:	Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie				
Studijní program:	Výroba a ekonomika ve strojírenství				
Studijní obor:	Technologie, materiály a ekonomika strojírenství				

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Možnosti měření profilu povrchu s využitím souřadnicové měřicí techniky**

Název bakalářské práce anglicky:

**The possibilities of measuring the surface profile with the use of the coordinate measuring machines**

Pokyny pro vypracování:

1. Definice profilu povrchu, profil R,W,P
2. Přístroje pro měření profilu povrchu
3. Senzorika a možnosti měření profilu povrchu na CMM
4. Provedení porovnávacích měření obou technologií na etalonech a vybraných součástech

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Jan Urban, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **09.04.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

Ing. Jan Urban  
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) katedry/ústav

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis učitele(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_ Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_ Podpis studentky

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracovala samostatně pod vedením pana Ing. Jana Urbana, a to výhradně s použitím zdrojů uvedených v seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne .....

.....

Podpis

## ANOTACE

Tato bakalářská práce se zaměřuje na využití souřadnicové měřicí techniky pro posuzování profilu povrchu. Nejprve se práce zabývá teorií profilu povrchu, ve které jsou popsány důležité pojmy týkající se problematiky hodnocení a měření profilu povrchu. V druhé kapitole jsou uvedeny metody, jimiž lze profil povrchu kontrolovat. Blíže je popsána dotyková metoda měření a s ní přístroje tuto metodu využívající. Celá následující kapitola se zabývá souřadnicovými měřicími stroji, jejich rozdělením a senzorikou.

Díky této teoretické průpravě bylo možné blíže popsat problematiku možností a způsobů vyhodnocování profilu povrchu na jednotlivých strojích a faktorů, které vyhodnocování ovlivňují. Ve vyhodnocení jsou posuzována měření na jednotlivých strojích, aby mohla být zhodnocena možnost využití souřadnicové měřicí techniky při posuzování profilu povrchu v porovnání s klasickými přístroji běžně využívanými v dílnách i metrologické praxi.

## KLÍČOVÁ SLOVA

metrologie, profil povrchu, vyhodnocení drsnosti povrchu, souřadnicová měřicí technika

## ANNOTATION

This bachelor thesis aims the use of the coordinate measuring machines for surface profile evaluation. First chapter is focused on surface profile theory, introduces important concepts related to surface profile evaluation and measurement. Second chapter describes methods used for the surface profile measurement. Touch probe method is covered in particular detail, along eith devices which use this method. The following chapter deals with coordinate measuring machines, their distribution and sensors.

This theoretical foundation enablesto discuss options and methods of surface profile evaluation on individual machines and factors that influence the evaluation itself. The evaluation includes measurements on individual machines in order to assess the possibility of using coordinate measuring machines in surface profile evaluation compared to standard devices commonly used in the production as well as the metrological utilization.

## KEYWORDS

metrology, surface profile, surface roughness evaluation, coordinate measuring machines

## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych ráda poděkovala Ing. Janu Urbanovi za podmětné připomínky, cenné rady, podklady k dané problematice a zejména za pozitivní a odborné vedení této bakalářské práce.

Dále bych ráda poděkovala společnosti ŠKODA AUTO a.s. za umožnění provedení měření.

# OBSAH

1	Definice profilu povrchu a jeho parametrů .....	10
1.1	Nerovnost povrchu .....	10
1.2	Základní pojmy pro určování profilu povrchu.....	11
1.2.1	Profil povrchu .....	11
1.2.2	Souřadnicový systém .....	11
1.2.3	Střední čáry .....	12
1.2.4	Měřicí dráha.....	12
1.2.5	Filtrace profilu.....	13
1.2.6	P profil – základní profil .....	14
1.2.7	W profil – vlnitost povrchu .....	14
1.2.8	R profil – drsnost povrchu .....	15
1.3	Parametry profilu povrchu .....	16
1.3.1	Výběr parametrů struktury povrchu z ČSN EN ISO 4287 [3].....	16
1.3.2	Výškové parametry .....	17
1.3.3	Délkové parametry .....	19
1.3.4	Křivkové parametry .....	19
1.4	Pravidla tolerování mezí .....	20
1.4.1	Pravidlo 16% .....	20
1.4.2	Pravidlo maxima .....	20
2	Měření profilu povrchu.....	21
2.1	Metody měření povrchu.....	21
2.1.1	Metody kvalitativní.....	21
2.1.2	Metody kvantitativní .....	22
2.2	Dotykové přístroje pro kontrolu profilu povrchu .....	25
2.2.1	Části dotykového měřicího přístroje .....	26
2.2.2	Charakteristické hodnoty přístroje [5].....	27
2.2.3	Dílenské měřicí přístroje .....	27
2.2.4	Laboratorní měřicí přístroje.....	28
3	Senzorika a možnosti měření profilu povrchu na souřadnicových měřicích strojích .....	29
3.1	Motivace .....	29
3.2	Souřadnicová měřicí technika.....	29
3.3	Princip měření pomocí CMM.....	29
3.4	Konstrukční typy CMM .....	30

3.5	Snímací systémy CMM.....	33
3.5.1	Dotykové snímací systémy.....	33
3.5.2	Optické snímací systémy .....	35
3.6	CT systémy snímání .....	36
3.7	Měření profilu povrchu na CMM.....	36
4	Provedení porovnávacích měření.....	37
4.1	Zvolení vzorků.....	37
4.2	Zařízení využitá k měření .....	38
4.2.1	Mahr MarSurf PS 10.....	39
4.2.2	Mahr MarSurf XCR 20 s Perthometer PGK 20 a MarSurf PCV .....	41
4.2.3	Mahr MarSurf LD 120 .....	43
4.2.4	ZEISS PRISMO navigator s konturografem ROTOS.....	45
4.3	Vyhodnocování výsledků měření.....	49
4.3.1	Nejistoty měření .....	49
4.3.2	Reprezentativní hodnota .....	50
4.3.3	Referenční hodnota .....	50
5	Vyhodnocení.....	51
5.1	Vzorek f-1,6: frézování čelní frézou z rychlořezné oceli .....	51
5.2	Vzorek f-3,2: frézování čelní frézou z rychlořezné oceli .....	53
5.3	Vzorek f-12,5: frézování čelní frézou z rychlořezné oceli .....	57
5.4	Vzorek fs-25: frézování čelní frézou ze slinutého karbidu.....	59
5.5	Vzorek fv-12,5: frézování válcovou frézou ze rychlořezné oceli.....	61
5.6	Nejistoty měřených parametrů .....	63
6	Závěr .....	65
7	Seznamy.....	66
7.1	Seznam použitých zkratk .....	66
7.2	Seznam použitých zdrojů .....	67
7.3	Seznam obrázků.....	69
7.4	Seznam tabulek.....	70
7.5	Seznam rovnic.....	71
8	Přílohy .....	71



## ÚVOD

Kvalita povrchu je jedním z významných činitelů ovlivňující kvalitu výrobku. Z hlediska zajištění funkčních vlastností součástí či celé sestavy nelze opomenout profil povrchu. Vyhodnocení jeho parametrů je však nesnadné a ovlivňováno mnoha vlivy, které citelně projevují na výsledcích.

Nyní již disponujeme pokročilou technikou, která je schopná zkoumat povrch velmi podrobně. Nevýhodou je, že se jedná o speciální zařízení, u kterých je složitá manipulace zejména s rozměrnějšími díly.

V dnešní době, kdy se mluví o Průmyslu 4.0, tedy čtvrté průmyslové revoluci, ani metrologie nebyla vynechána ze snahy automatizace a digitalizace. Snahou uskutečňovat měření s minimálním vstupem lidského faktoru do procesu měření, nejvyšší možnou automatizací a dodržáním podmínek přesnosti a opakovatelnosti.

Tato práce se zabývá možnostmi měření profilu povrchu na různých zařízeních. Speciálně se zaměřuje na dotykovou metodu měření profilu povrchu a její aplikaci při kontrole součástí na souřadnicovém měřicím stroji.

Cílem této práce je posoudit a porovnat přesnost systému měření profilu povrchu souřadnicového měřicího stroje se sondou Rotos od firmy ZEISS, měřením v Měrovém středisku společnosti ŠKODA AUTO, a.s., s přístroji, které se běžně používají pro měření profilu povrchu.

# 1 DEFINICE PROFILU POVRCHU A JEHO PARAMETRŮ

Pro náležitě pochopení předmětu této práce je důležité si vymezit základní pojmy, které se budou dále v práci využívat nejen při určování správných postupů a vyhodnocování měření.

Integrita povrchu je soubor vlastností povrchu vytvořených předcházejícími procesy, který predikuje užitou hodnotu výrobku. Profily povrchu jsou jedněmi z nich.

## 1.1 Nerovnost povrchu

Při zhotovování ploch výrobku vznikají na plochách nerovnosti, ať už je technologická metoda jakákoli. Vzniklé nerovnosti mají zásadní vliv na funkci ploch.

Nerovností se označuje 3D útvar, o jaký se liší skutečná plocha od plochy ideální v případě zkoumání plochy plošnou metodou (3D parametry). V případě zkoumání profilovou metodou (2D parametry) jsou nerovnosti úchylkami skutečného povrchu od jmenovitého povrchu profilu. [1]

Pro posuzování nerovnosti povrchu rozlišujeme **nedokonalosti povrchu**, tj. nerovnosti náhodně způsobené během výroby, manipulace, skladování, užíváním součásti (např. rýhy, trhliny, vtisky, staženiny, koroze), a **strukturu povrchu**, což jsou nerovnosti vzniklé působením obráběcích či tvářecích strojů a nástrojů. Při dosahování požadovaného tvaru výrobku tvářením za pomoci lisů, válců, kovadel, forem atd., se jedná o povrch neobrobený. Při třískovém obrábění, jako je soustružení, frézování, vrtání, a metod abrazivního obrábění, kdy se jedná například o lapování, honování, broušení, označujeme povrch jako obrobený. Skutečný povrch, což je povrch, který odděluje těleso od okolního prostředí, má nerovnosti na celé své ploše a můžeme jej rozdělit na anizotropní a izotropní podle uspořádání nerovností. Anizotropní povrch se vyznačuje výrazným směrem nerovností, se kterým se můžeme setkat na příklad u obrábění soustružnickým nožem. Anizotropní povrch proto můžeme rozdělit dvěma na sebe kolmými směry, a to příčným a podélným. [1] [2]



Obr. 1.1: Povrch obráběný soustružením [7]

Podélný směr nerovností je ve směru řezného pohybu nástroje. Při měření profilu anizotropního povrchu měříme ve směru příčném, který lze poznat podle směru posuvu nástroje, který jej obráběl. Izotropní povrch můžeme pozorovat po lapování, kartáčování a ostatních metodách bez vzniku výrazného směru nerovností. [1] [2]

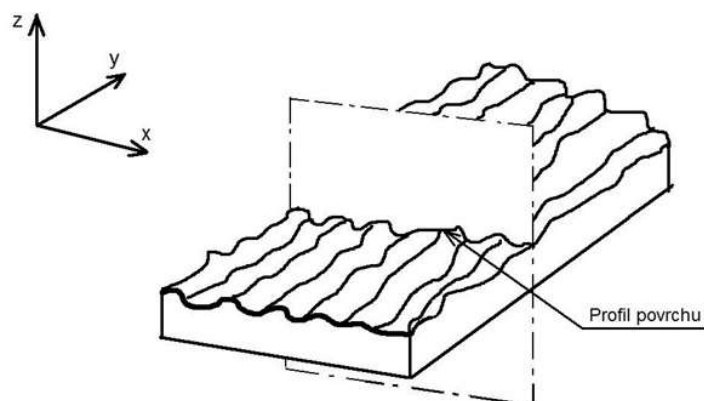
## 1.2 Základní pojmy pro určování profilu povrchu

### 1.2.1 Profil povrchu

Proloží-li se skutečný povrch na něj kolmou<sup>1</sup> rovinou, získáme křivku znázorňující profil povrchu pro 2D metody hodnocení profilu povrchu. Z profilu povrchu odvozují profily R-drsnosti, W-vlnitosti a P-základního profilu, z nichž se dále určují charakteristické parametry. [1]

### 1.2.2 Souřadnicový systém

O souřadnicový systém se z pohledu Geometrických požadavků na výrobky jedná tehdy, když jsou v něm definovány parametry struktury povrchu. Obvykle se využívá pravoúhlý systém kartézských souřadnic (viz. obr. 1.2). Osa X představuje směr snímání a je souběžná se střední čarou, osa Y leží na skutečném povrchu a je kolmá na osu X. Osa Z směřuje z povrchu do okolního prostředí. [3]



Obr. 1.2: Profil povrchu [3]

<sup>1</sup> V praxi se obvykle volí rovina kolmá k rovině rovnoběžné se skutečným povrchem ve vhodném směru, pokud není zadáno jinak. [3]

### 1.2.3 Střední čáry

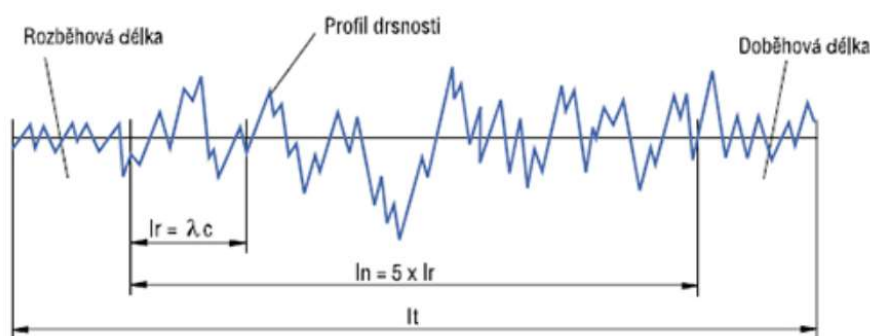
Střední čára profilu drsnosti, je čára odpovídající dlouhovlnné složce profilu potlačené filtrem profilu  $\lambda_c$ . Obdobné tvrzení platí pro střední čáru profilu vlnitosti s rozdílem využití filtru profilu  $\lambda_f$ . Střední čára základního profilu je čára nejmenších čtverců přiléhající jmenovitému tvaru základního profilu. [3]

Pro parametry profilu, pro které je rozhodující výška od osy X, jimiž jsou na příklad výška výstupků nebo hloubka prohlubní, je rozhodující určení polohy osy X vzhledem ke grafickému znázornění profilu. Součty obsahů ploch pod a nad osou X se rovnají.

$$\sum_{i=1}^n S_i = \sum_{i=1}^n S'_i \quad (1.1)$$

### 1.2.4 Měřicí dráha

Celková měřicí dráha  $l_n$ , je délka, na které jsou vyhodnocovány parametry profilu a sestává standardně z pěti za sebou jdoucích jednotlivých měřících drah  $l_r$ . Podle tvaru profilu a parametrů závislých zvolíme velikost základní délky, která má stejnou hodnotu jako hodnota filtru  $\lambda_c$ , což je mezni vlnová délka označovaná též jako *cut-off*. Délku jednotlivé měřicí dráhy  $l_r$  určíme dle normy ISO 4288, podle toho, zda je profil periodický či aperiodický (viz. Tab. 1.2). Při měření periodického profilu se délka dráhy  $l_r$  řídí podle velikosti parametru  $R_{sm}$ , u profilu aperiodického parametry  $R_z$  a  $R_a$ . [4] [9]



Obr. 1.3: Schéma délek vyhodnocovaného profilu [9]

Délka dráhy  $l_r$  se volí z řady: (0,01); (0,03); 0,08; 0,25; 0,8; 2,8; 8 a (25) mm. S výjimkou parametrů  $R_t$  a parametrů křivek ( $R_{mr}(c)$ ,  $R_{dc}$ ,  $R_{mr}$ ), obdobně u  $W$  a  $P$ -parametrů, jsou všechny parametry profilu zjišťovány na základní délce  $l_r$ . Výsledná hodnota parametrů se počítá aritmetický průměr podle počtu jednotlivých drah v celkové měřicí dráze. Celková snímaná dráha

$l_t$  je dráha, kterou urazí snímací systém pro zaznamenání snímaného profilu. Sestává z rozběhu, snímané délky  $l_n$  a doběhu. [4]

Tab. 1.1: Volba mezní vlnové délky periodických profilů [4]

Periodické profily	Mezní vlnová délka (Cut-off)	Jednotlivá měřicí délka	Celková měřicí délka
RSm [mm]	$\lambda_c$ [mm]	$l_r$ [mm]	$l_n$ [mm]
> 0,013 až 0,04	0,08	0,08	0,4
> 0,04 až 0,13	0,25	0,25	1,25
> 0,13 až 0,4	0,8	0,8	4
> 0,4 až 1,3	2,5	2,5	12,5
> 1,3 až 4	8	8	40

Tab. 1.2: Volba mezní vlnové délky aperiodických profilů podle [4]

Aperiodické profily		Mezní vlnová délka (Cut-off)	Jednotlivá měřicí délka	Celková měřicí délka
Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	$\lambda_c$ [mm]	$l_r$ [mm]	$l_n$ [mm]
až 0,02	až 0,1	0,08	0,08	0,4
> 0,02 až 0,1	> 0,1 až 0,5	0,25	0,25	1,25
> 0,1 až 2	> 0,5 až 10	0,8	0,8	4
> 2 až 10	> 10 až 50	2,5	2,5	12,5
> 10 až 80	> 50 až 200	8	8	40

### 1.2.5 Filtrace profilu

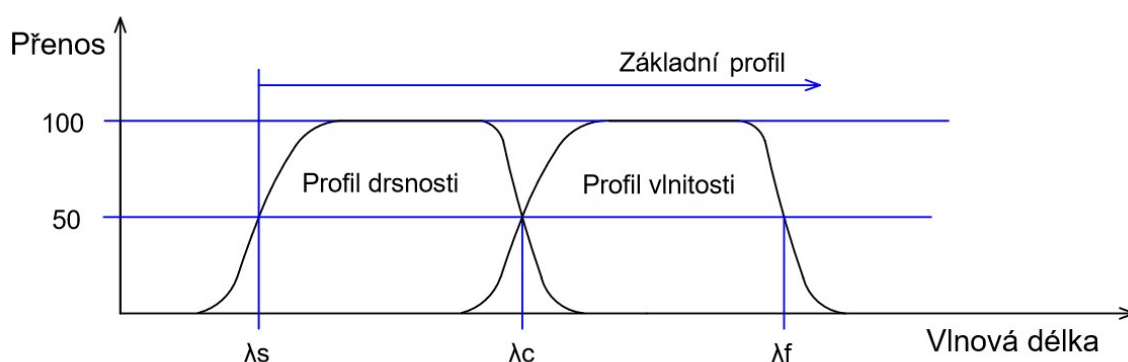
Pro získání křivek k vyhodnocování jednotlivých parametrů profilu je nutné naměřený skutečný profil filtrovat filtry o určité vlnové délce, jak je zobrazeno na obr. 1.4. Postupnou aplikací jednotlivých filtrů rozdělujících profily na krátkovlnné a dlouhovlnné složky získáme tři druhy profilů, což jsou základní profil (P), vlnitost (W) a drsnost (R). [3]

**$\lambda_s$  filtr profilu** určuje rozhraní mezi profilem drsnosti a kratšími vlnovými složkami profilu. [3]

Měřicí přístroje mají hodnoty tohoto filtru předdefinované podle parametrů přístroje, chvění při pohybu snímání a určení prostředí, do kterého je přístroj určen.

**$\lambda_c$  filtr profilu**, též označovaný jako cut-off, je mezní vlnová délka mezi profilem vlnitosti a drsnosti. Při měření je stěžejní, jelikož se rovná jednotlivé měřené délce  $l_r$ , což je pětina celkové měřené délky. Hodnota mezní vlnové délky závisí na hodnotě  $RS_m$  při měření periodického profilu či hodnotách  $Rz$  a  $Ra$  u profilu aperiodického. [3] [4]

**$\lambda_f$  filtr profilu** udává rozhraní mezi vlnitostí a delšími složkami vln, tedy oblastí úchylek tvaru. [3]



Obr. 1.4: Přenosová charakteristika filtrace profilu povrchu [3]

### 1.2.6 P profil – základní profil

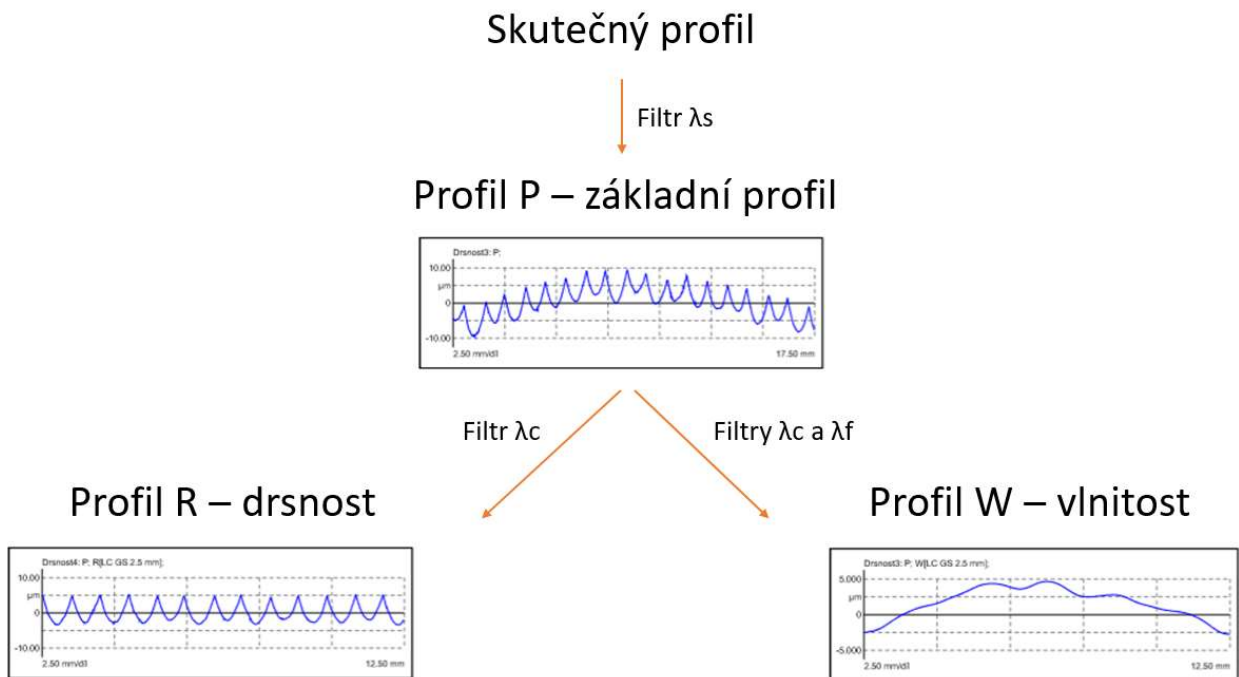
Úplný profil po aplikaci krátkovlnného filtru  $\lambda_s$ . Je základem pro hodnocení parametrů základního profilu. Znázorňuje všechny odchylky od střední čáry profilu. [3]

### 1.2.7 W profil – vlnitost povrchu

Profil vlnitosti je vytvořen postupnou aplikací filtrů  $\lambda_f$  a  $\lambda_c$  ze základního profilu. Dlouhovlnný filtr  $\lambda_f$  v profilu vlnitosti způsobuje, že se v tomto profilu neprojevují dlouhovlnné podíly, které jsou přiřazeny tvaru. Jedná se po základním profilu o další stupeň nepravidelnosti, zjišťovaných na jednotlivých krátkých vyhodnocovacích úsecích. Vzdálenosti nejvyšších a nejnižších bodů jsou větší než u drsnosti a odpovídajícím způsobem je větší rovněž délka testovaného úseku. Drsnost je makrogeometricky pokryta vlnitostí. Grafické znázornění je záměrně pozměněno. [1] [3]

## 1.2.8 R profil – drsnost povrchu

Profil drsnosti je odvozený ze základního profilu P potlačením dlouhovlnných složek použitím filtru  $\lambda_c$ . Profil je záměrně pozměněn a je základem pro hodnocení parametrů drsnosti. Drsnost je malými nepravidelnostmi, jemně strukturovanými mikrogeometrickými odchylkami od ideálního profilu. Vyhodnocují se na jednotlivých krátkých úsecích v řádech mikrometrů. Na výkresové dokumentaci se většinou udává pouze hodnota  $R_a$ , která ovšem není dostatečně vypovídající o stavu drsnosti. Proto se vyhodnocují další hodnoty, které nám již dávají větší přehled o skutečné drsnosti povrchu. [1] [3]



Obr. 1.5: Schématické znázornění postupu filtrace profilu povrchu

..

## 1.3 Parametry profilu povrchu

Názvy geometrických parametrů profilu povrchu jsou R-parametry, vycházející z profilu drsnosti, W-parametry z profilu vlnitosti a P-parametry, které se získávají ze základního profilu. [3]

### 1.3.1 Výběr parametrů struktury povrchu z ČSN EN ISO 4287 [3]

Tab. 1.3: Výběr ze souboru základních parametrů [3]

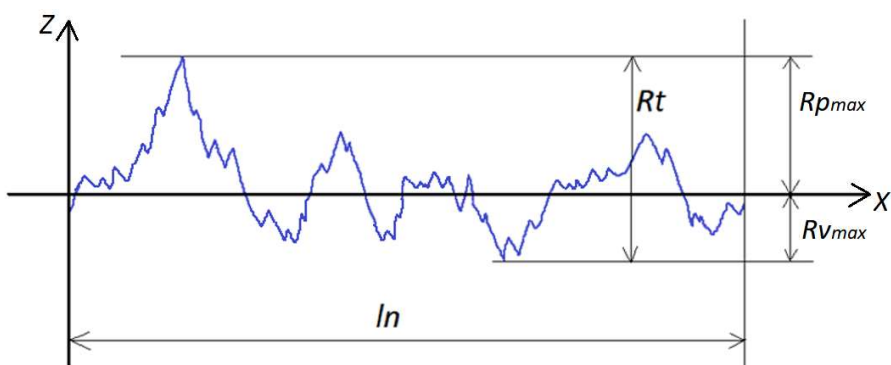
Parametry struktury povrchu		Označení	
Výškové	Výstupky a prohlubně	Celková výška profilu	$R_t, W_t, P_t$
		Největší výška profilu (aritmetická střední hodnota)	$R_z, W_z, P_z$
		Největší výška výstupku	$R_p, W_p, P_p$
		Největší výška prohlubně	$R_v, W_v, P_v$
		Maximální výška profilu	$R_{max}, W_{max}, P_{max}$
	Průměrné hodnoty	Průměrná aritmetická úchylka	$R_a, W_a, P_a$
		Průměrná kvadratická úchylka profilu	$R_q, W_q, P_q$
		Průměrná výška prvku profilu	$R_c, W_c, P_c$
		Šikmost profilu	$R_{sk}, W_{sk}, P_{sk}$
		Špičatost profilu	$R_{ku}, W_{ku}, P_{ku}$
Délkové	Průměrná šířka prvku profilu (střední vzdálenost prohlubní)	$R_{Sm}, W_{Sm}, P_{Sm}$	
Hybridní	Průměrný kvadratický sklon profilu	$R_{dq}, W_{dq}, P_{dq}$	
Křivkové a příbuzné	Materiálový (nosný) poměr profilu	$R_{mr}(c), W_{mr}(c), P_{mr}(c)$	
	Vzájemný materiálový poměr (→ Abbotova křivka)	$R_{mr}, W_{mr}, P_{mr}$	
	Rozdíl výšky úseku profilu	$R_{dc}, W_{dc}, P_{dc}$	



### 1.3.2 Výškové parametry

**Rt, Wt, Pt** – Celková výška profilu drsnosti, vlnitosti nebo profilu základního – vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými čarami s osou X, které ohraničují profil s nejvyšším výstupkem<sup>2</sup> profilu  $Z_p$  a největší prohlubní  $Z_v$  v rozsahu vyhodnocované délky  $l_n$ .

$$R_t, W_t, P_t = Z_{p_{max}} + Z_{v_{max}} \quad (1.2)$$



Obr. 1.6: Grafické znázornění parametru  $R_t$  (příklad profilu drsnosti)

**Rv, Wv, Pv** – Hloubka největší prohlubně profilu uvnitř jednotlivé měřicí dráhy  $l_r$ . Dříve byla používána zkratka  $R_m$ .

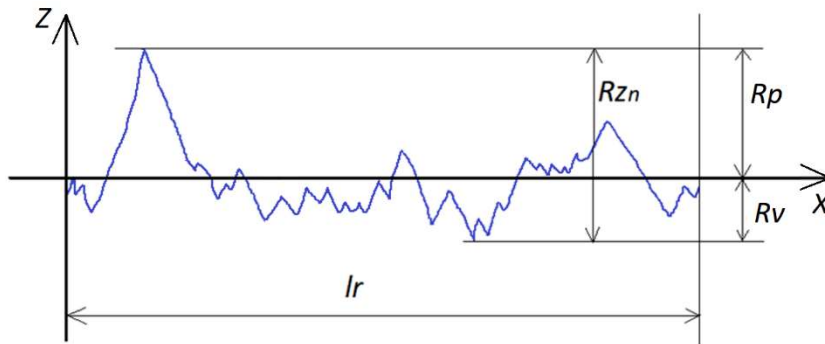
**Rp, Wp, Pp** – Výška nejvyššího výstupku profilu na jednotlivé dráze  $l_r$ .

**Rmax, Wmax, Pmax** – Maximální výška profilu odpovídá  $R_{z_{max}}$ ,  $W_{z_{max}}$ ,  $P_{z_{max}}$ , což je největší jednotlivá výška profilu uvnitř celkové měřicí dráhy.

**Rz, Wz, Pz** – Celková výška profilu vypočtená jako aritmetická střední hodnota z jednotlivých hloubek, ze za sebou následujících jednotlivých měřených drah. Jednotlivá hloubka  $R_{z_n}$  je složena z výšky výstupku  $R_v$  a prohlubně  $R_p$  na vyhodnocované dráze  $l_r$ . Obr. 1.7 se znázorněním parametru  $R_{z_n}$  obdobně platí pro profil vlnitosti a základní profil.

$$R_z = \frac{1}{n} (R_{z_1} + R_{z_2} + \dots + R_{z_n}) \quad (1.3)$$

<sup>2</sup> Výstupkem ( $Z_p$ ), anglicky *peak*, se rozumí z povrchu ven směřující část posuzovaného profilu spojující dva přilehlé body průsečíku profilu s osou X. To samé platí pro prohlubeň ( $Z_v$ ), anglicky *valley*, nicméně prohlubeň směřuje do materiálu, tedy do záporné oblasti osy Z. Prohlubeň přilehlá výstupku tvoří prvek profilu [3]



Obr. 1.7: Grafické znázornění parametru  $Rz_n$  (příklad profilu drsnosti)

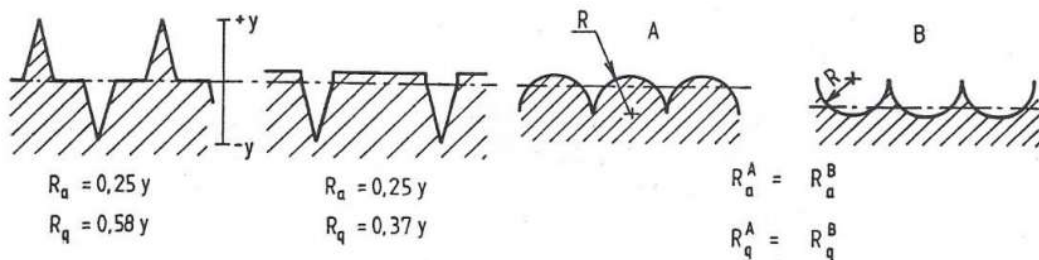
**Rq, Wq, Pq** – Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu. Pro označení parametru  $Rq$  se též používá RMS (Root Mean Square).

$$Rq, Wq, Pq, = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l |Z^2(x)| dx} \quad (1.4)$$

**Ra, Wa, Pa** – Úchylka aritmetického průměru hodnot posuzovaného profilu. Jedná se o aritmetický průměr hodnot  $Z(x)$  v rozsahu jednotlivé délky  $l_r$ .

$$Ra, Wa, Pa = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (1.5)$$

Pro  $Ra$  se také užívá označení AA (Arithmetic Average) nebo CLA (Central Line Average). Parametr  $Ra$  se hojně využívá ve výkresové dokumentaci, každopádně jeho výpovědní hodnota není směrodatná, kvůli tomu, že jeho hodnotu sice prohlubně a výstupky profilu drsnosti ovlivňují, ale tato hodnota již nevypovídá o jejich výšce, popřípadě hloubce, množství, vzdálenosti ani tvaru. Na obrázku 1.8 je jsou jasně znázorněny různé profily drsnosti povrchu, které mají však stejné hodnoty  $Ra$ , což by mohlo výrazně ovlivnit výslednou funkci plochy. Tento parametr se využívá kvůli opakovatelnosti měření, nicméně o skutečném tvaru profilu povrchu nevypovídá.



Obr. 1.8: Ukázka variability profilů se stejnou hodnotou parametru  $Ra$  [8]

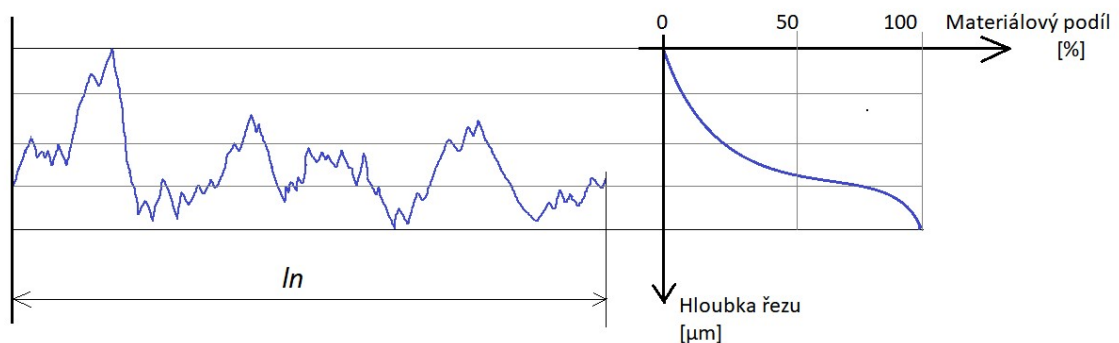
### 1.3.3 Délkové parametry

**RSm, WSm, PSm** – Aritmetický průměr šířek prvků profilu v rozsahu základní délky, kdy  $m$  jsou prvky profilu a  $Xs$  jejich šířka.

$$RSm, WSm, PSm = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Xs_i \quad (1.6)$$

### 1.3.4 Křivkové parametry

**Rmr, Wmr, Pmr** – vzájemný materiálový (nosný) podíl profilu drsnosti je parametr uváděný v procentech, díky kterému lze sestavit Abbotovu (nosnou) křivku, která znázorňuje, kolik procent materiálu, v poměru k okolnímu prostředí, se vyskytuje v určité výšce profilu. Jako základní vyhodnocení se doporučuje v 50 % hloubky  $Rz$ , pak je parametr označován jako  $Rmr(0,5)$ , obecně  $Rmr(c)$ . Proměnná  $c$  označuje hladinu řezu, ve které se parametr vyhodnocuje. [3]



Obr. 1.9: Ukázka vyhodnocení Abbotovy křivky (vpravo) z profilu drsnosti

Materiálový podíl se hojně využívá při zkoumání schopností povrchu, jeho integrity, určování vhodnosti využití a zlepšování kvality procesu, ve kterém bude funkční plocha zapojena. Automobilovém průmyslu se zabývá především ložisky. Lze zkoumat, jak vhodný je povrch pro mazivo, zdali nestéká a drží se v prohlubních, aby nedocházelo k suchému tření. Při uložení s přesahem je třeba zaměřit se na špičky profilu kvůli dřením a vzniku vibrací.

## 1.4 Pravidla tolerování mezí

Ve výkresové dokumentaci lze předepsat horní, dolní či obě meze. Pokud je předepsaná pouze jedna hodnota a není uvedeno jinak, jedná se o horní mez. Při předepisování mezí struktur povrchu se standardně používají dvě pravidla:

### 1.4.1 Pravidlo 16%

Jestliže na měřeném povrchu méně nebo právě šestnáct procent naměřených hodnot parametru na vyhodnocované délce přesahuje předepsanou hodnotu horní meze, je považován za přijatelný. Pravidlo se značí **(16%)**, ale nepředepisuje se. Pro dolní mez platí, že je povrch přijatelný, nebude-li více než šestnáct procent naměřených hodnot menších, než je stanovena dolní mez. Zjednodušeně pravidlo šestnácti procent znamená, že pouze jedna šestina měřených hodnot smí přesahovat horní mez, popř. nedosahovat dolní meze. [4]

### 1.4.2 Pravidlo maxima

Pravidlo maxima, ve výkresové dokumentaci značené **max**, je striktní v tom, že žádná naměřená hodnota parametru na celém kontrolovaném povrchu nesmí přestoupit ani v jediném případě předepsanou hodnotu meze. Pouze tehdy je povrch přijatelný. [4]

## 2 MĚŘENÍ PROFILU POVRCHU

Měření profilu povrchu lze realizovat různými metodami. Je důležité vybrat vhodnou metodu měření pro danou aplikaci pro dosažení optimálních výsledků s přihlédnutím na ekonomičnost procesu. Každý náklad se odráží ve výsledné ceně výrobku, ať už jde o odpisy strojů, mzdy zaměstnanců, údržbu či kalibraci. Je nutné si předem určit priority, jestli se vyplatí přesný, ale velice drahý, měřicí stroj, méně přesný stroj, který nezaručí nejvyšší možnou kontrolu, nebo zadat vypracování měření externí firmě, pokud je z ekonomického pohledu příznivější tato varianta. Ať už se zvolí jakákoliv možnost, je vhodné znát metody a stroje, jakými lze profil povrchu hodnotit.

### 2.1 Metody měření povrchu

Vývoj zkoumání profilu povrchu šel od zkoušek nehem až k diamantovým hrotům. Od kvalitativních zkoušek s využitím lidských smyslů, například porovnávání zkoumaného povrchu se vzorkovnicí drsností (viz. obr. 2.1), se dostáváme ke kvantitativním metodám s využitím snímacích systémů a převodu informací do digitálního výstupu. Kalibrace se ovšem stále provádí s využitím etalonů drsnosti, nicméně přesnost jak etalonů, tak snímacích zařízení, stoupá. Zrychlování, automatizace a zpřesňování metod pro měření profilu povrchu jde ruku v ruce s konkretizací požadavků na kvalitu povrchu a novými možnostmi obráběcích procesů.



Obr. 2.1: Kruhová vzorkovnice drsností povrchu [10]

#### 2.1.1 Metody kvalitativní

Princip kvalitativních metod tkví v porovnání reálného povrchu s etalonem drsnosti. Při kvalitativním hodnocení povrchu především záleželo na zkušenostech, schopnostech, odbornosti, pečlivosti a dodržování předepsaných postupů posuzujícího pracovníka. Protože je při této metodě využíváno smyslů pracovníka, mohlo dojít k nepřesnosti měření. Povrchy se porovnávají hmatem, zrakem, s využitím lup a komparačních mikroskopů. Vždy je ovšem nutné porovnávat

povrch s etalonem drsnosti, proto přesnější určení hodnot vyžaduje dostatek etalonů s různými parametry. Důležité je také zajistit pracovníkovi vhodné ergonomické podmínky zajišťující pracovní pohodu, především dostatečné osvětlení. Kvalitativní metody je možné využít v běžné výrobě, kde není potřeba přesného měření povrchu. To může být ve výrobcích, kde se buď nemusí příliš dbát o kvalitu povrchu například v mezioperační fázi, nebo je obrobený povrch výrazně lepší, než je předepsaná mez a je důležité zkoumat povrch kvůli trhlinám a jiným povrchovým vadám. Z moderních velkovýrob tato metoda již téměř vymizela. [12]

### 2.1.2 Metody kvantitativní

Kvantitativní metody měření profilu povrchu využívají matematický popis parametrů, z něhož vyhodnocují data. Kvantitativní metody měření se dále dělí na měření bezdotykové a dotykové. [6]

#### **Dotykové metody měření**

Dotykové měření profilu povrchu využívá snímače, který opisuje skutečný povrch a předává velikosti úchylek povrchu v měřené délce do vyhodnocovacího zařízení přístroje. Vyhodnocovací zařízení může být přímo v přístroji nebo jím je počítač s příslušným vyhodnocovacím systémem. V něm se vyhodnocují příslušné parametry a zaznamenává grafické znázornění profilu povrchu. Přesnost měření ovlivňuje materiál, poloměr a úhel hrotu snímače, zadané parametry základní a vyhodnocované délky, přítlačná síla, rychlost posuvu snímače. Běžně se při této metodě využívají profiloměry. Metodu dotykového měření nelze aplikovat vždy. Měřený povrch se v některých případech může poškodit (je měkký) nebo být pro snímací zařízení nedostupný. Blíže je popsáno v kapitole 2.2.

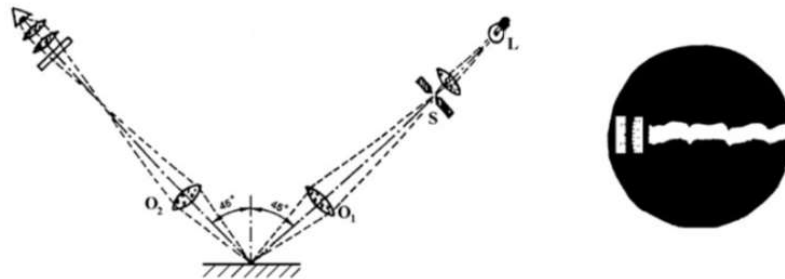
#### **Bezdotykové metody měření**

Pokud měříme profil povrchu, u kterého by měření měřicím hrotem nemuselo přesné či proveditelné, je možné použít optické metody měření povrchu. Principy bezdotykových metod spočívají ve využití lomu světla nebo jeho složení o různých vlnových délkách. Úskalími bezdotykových metod jsou lesklý či metalický povrch, který nadstandardně odráží světlo, a nečistoty, které zařízení zaznamená místo skutečného povrchu. Zároveň měření značně znesnadňují nekonzistentní nebo nedostatečné světelné podmínky. [12]

Bezdotykové metody lze dále dělit:

### Metoda světelného řezu

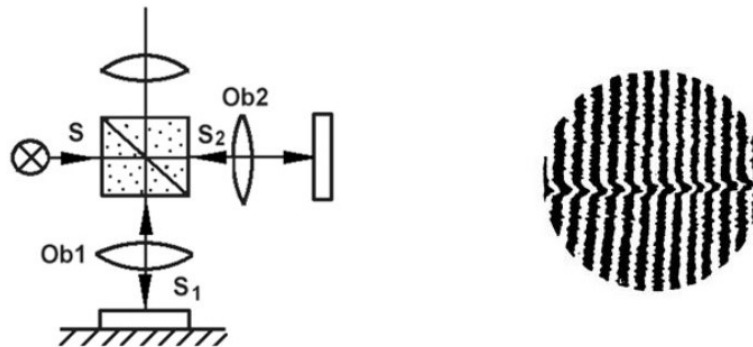
Tato metoda využívá tenký svazek paprsků světla, který pod sklonem  $45^\circ$  dopadá na zkoumaný povrch a odráží se od nerovností profilu. Odraz se následně zkoumá pomocí mikroskopu. Princip je zobrazen na obr. 2.2. [13]



Obr. 2.2: Metoda světelného řezu [13]

### Metoda interference světla

K tomuto způsobu se využívá princip interference světla. Paprsek prochází skrz polopropustné zrcátko, které jej rozděljuje na dvě složky. Složka propuštěná dopadá na zkoumaný povrch a odráží se. Vlivem různých vzdáleností odrazu, tedy nerovnostmi, mění propuštěná složka paprsku svou frekvenci. Obe složky paprsku se setkají v okuláru, kde vytvoří interferenční obraz povrchu. Zařízení využívající tuto metodu se označuje interferometr. [13]



Obr. 2.3: Schéma principu interferometru a jeho výstup (vpravo) [13]

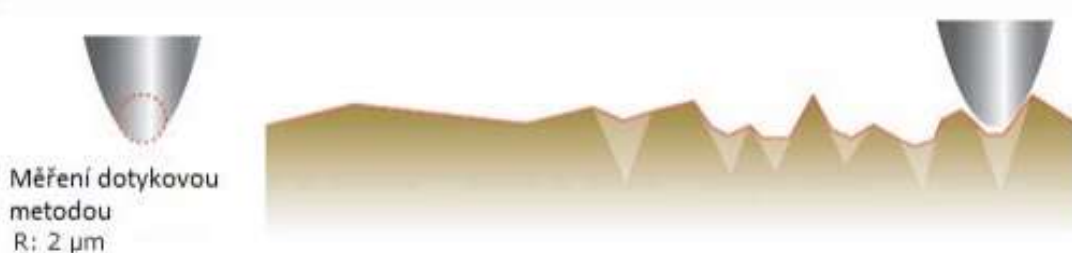
### Metoda optického hrotu

Optickým hrotem je ohnisko laseru, kterým se snímá zkoumaný povrch. Na obrázcích 2.4 a 2.5 lze pozorovat rozdíl v měření povrchu pomocí laseru a dotykovým snímačem, kdy je u obou metod využit stejný poloměr snímacího hrotu. V případě měření dotykem se snímač kvůli své velikosti

nedostane do užších prohlubní a tím ovlivňuje měření. Laser disponuje menším průměrem optického hrotu a díky tomu se dostane i do užších prohlubní.



Obr. 2.4: Měření profilu povrchu laserem [14]



Obr. 2.5: Měření profilu povrchu profiloměrem [14]

### Metoda konfokální

Konfokální mikroskop je druh mikroskopu, který detekuje světlo pouze z ohniskové roviny, a tím je dána jeho větší rozlišovací schopnost. Konfokální rastrové měřicí mikroskopy jsou schopné rozlišit povrch v rozlišení i přesnějším než v mikronech. Zároveň jsou schopny přesného třídimenzionálního měření struktury povrchu. Tato metoda se může využívat v kombinaci s teplotní mapou povrchu.

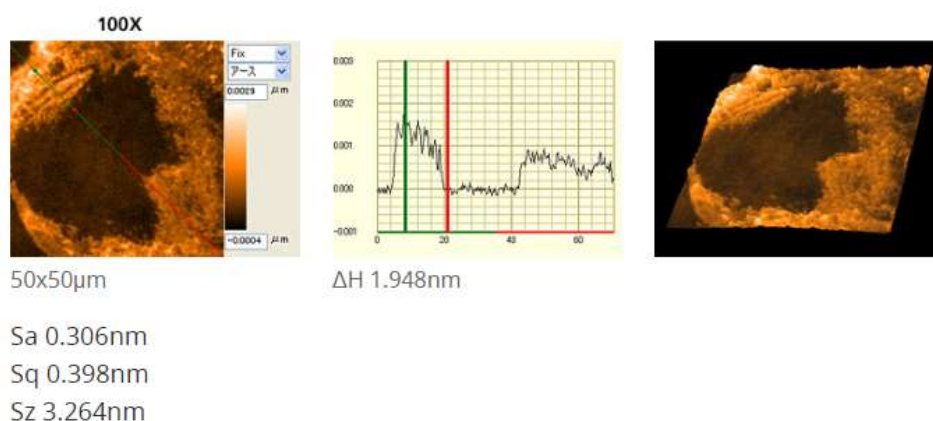
### Metoda bílého světla

Metoda bílého světla se označuje CLA (Chromatic Length Aberration). Princip spočívá v rozkladu bílého světla na vlnové délky. V každém bodě povrchu je pak zaostřena jen konkrétní vlnová délka. Spektrometr vychýlí světlo na maticový senzor, kde je každému bodu přiřazena poloha, která se následně počítačově zpracovává. Vyhodnocení je možné v trojrozměrném prostoru za použití speciálních softwarů. [16] Interferometry pracující se spektrem bílého světla dosahují výškového rozlišení až v jednotkách pikometrů. Na obr. 2.6 je příklad pracoviště s interferometrickým mikroskopovým systémem od firmy Nikon a na obr. 2.7 příklad vyhodnocení destičky z karbidu křemíku při stonásobném zvětšení na tomto zařízení. [17]





Obr. 2.6: Pracoviště interferometrického mikroskopového systému s využitím bílého světla BW-S507 [17]



Obr. 2.7: Digitální záznam měření ze zařízení BW-S507 [17]

## 2.2 Dotykové přístroje pro kontrolu profilu povrchu

Podle normy ČSN EN ISO 3274 je dotykový přístroj takový měřicí přístroj, který zaznamenává a zkoumá profil povrchu snímacím hrotem, získává úchytky ve formě profilu povrchu a vypočítává parametry. [5]

Dotykové přístroje pro měření povrchu jsou v praxi běžně užívány. Jsou méně citlivé na nečistoty než metody bezdotykové a vyrábí se ve velké škále rozlišení, přesností a velikostí. Od nejmenších dílenských ručních profiloměrů přes laboratorní profiloměry s možností měření kontury na stejném přístroji až po souřadnicové měřicí stroje. Zároveň lze dotykové přístroje poměrně snadno zařadit do automatizované a plně robotizované výroby.

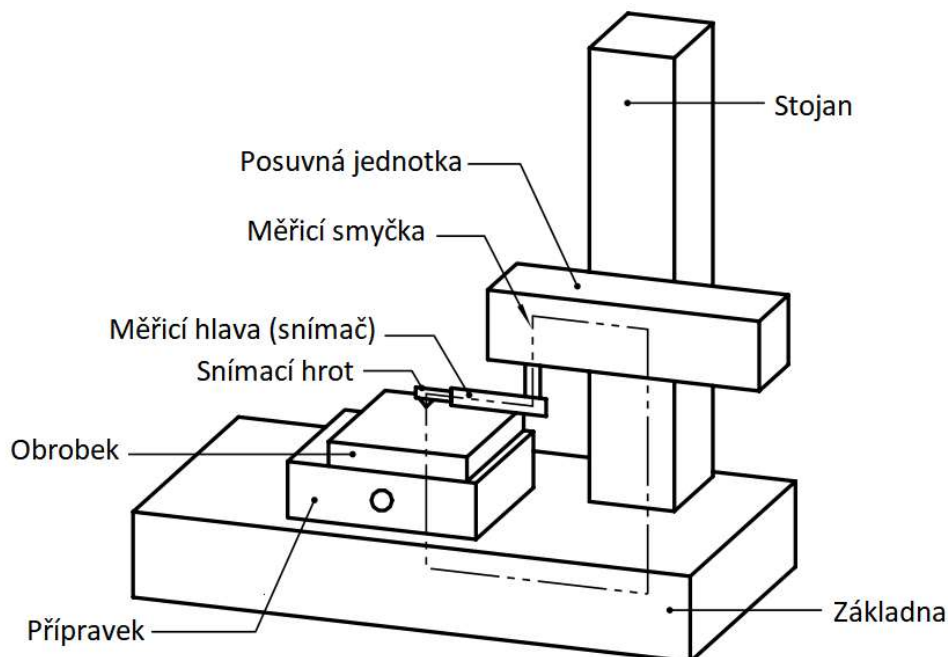
Vymezení názvů dotykových měřicích přístrojů profilu povrchu užívaných v praxi:

- Profiloměr, profilometr – Zařízení schopné vyhodnocovat vybrané parametry profilu drsnosti, vlnitosti a základního profilu.
- Drsnoměr – Jedná se o zažité, neodborný termín. Drsnoměr se liší tím, že nevyhodnocuje parametry základního profilu, ani profilu vlnitosti. Některé profiloměry bývají výrobci označovány drsnoměry.

### 2.2.1 Části dotykového měřicího přístroje

Komponenty dotykového měřicího přístroje můžeme rozlišit na dvě části podle funkce: mechanická a elektronická.

**Mechanická část** sestává ze statických a pohyblivých součástí. Základní stacionární součástí přístroje je přesná, přímá základna vyrovnaná rovnoběžně se snímacím zařízením. Na základnu se umísťuje přípravek s upnutým obrobkem určeným ke kontrole. Další důležitou komponentou je rameno se snímacím hrotem, jehož přímočarý vratný pohyb v ose X je zajištěn elektromotorem, případně pneumaticky. Rychlost posuvu systému volí již automaticky podle měřené délky. Snímací hrot se pohybuje konstantní rychlostí a snímá nerovnosti povrchu. Příklad přístroje na obr. 2.8 má jako další mechanické části stojan a posuvnou jednotku, zajišťující vertikální a horizontální posuv mimo oblast měření. [5] [12]



Obr. 2.8: Příklad měřicí smyčky dotykového přístroje [5]

**Elektronická část** přístroje transformuje mechanické vjemy zachycené snímacím hrotem na elektrický signál, který se dále zpracovává. Převodníky signálu pracují na principu piezoelektrickém (pro dílenské drsnoměry), magnetoelektrickém, indukčním (pro přesné měření). [12]

## 2.2.2 Charakteristické hodnoty přístroje [5]

### Geometrie hrotu snímače

Ideálním tvarem hrotu je kužel s kulovou špičkou o následujících hodnotách:

- Vrcholový úhel kužele: 60°, 90°
- Poloměr špičky:  $r_{tp} = 2 \mu\text{m}, 5 \mu\text{m}, 10 \mu\text{m}$

### Statická měřicí (přítlačná) síla

Jmenovitá hodnota statické měřicí síly ve střední poloze hrotu, tedy síly, kterou působí špička snímacího hrotu v klidové střední poloze na povrch, je doporučena 0,00075 N. Jmenovitá rychlost změny měřicí síly je 0 N/m. Materiálem hrotu je obvykle diamant, proto se musí dbát na to, aby přítlačná síla nedosahovala vyšších hodnot kvůli možnému poškození materiálu a také na tom závislém zkreslení výsledků.

### Mezní vlnová délka filtru profilu (cut-off)

Jedná se o hodnoty filtru  $\lambda c$ . Využívají se hodnoty z řady: (...; 0,08; 0,25; 0,8; 2,5; 8; ...) mm. Záleží ovšem na možnostech měřicího přístroje.

## 2.2.3 Dílenské měřicí přístroje

Dílenské měřicí přístroje profilu povrchu jsou většinou mobilní zařízení, která jsou schopna naměřit a ihned na místě vyhodnotit určité parametry profilu povrchu, a to bez připojení do elektrické sítě. Tyto přístroje mají nyní již standardně možnost digitálního výstupu a obvykle mají integrovaný display či zařízení přídavné zařízení s ním. Vyznačují se svou kompaktností a jednoduchou obsluhou, na kterou není potřeba specializovaného pracovníka metrologie. Zároveň nejsou stacionární, tedy je možné například umístit na povrch obrobku stále upnutém v obráběcím stroji bez nutnosti jeho vyjmutí, a provést kontrolu povrchu. Jsou schopny provádět kontrolu povrchu v dílenských podmínkách zahrnující otřesy, vibrace, znečištění a proměnlivé teplotní podmínky. Tato zařízení mívají ovšem omezení ve variabilitě vyhodnocovaných

parametrů a v přesnosti měření. Výrobci je obvykle označují jako drsnoměry, jelikož jsou tyto přístroje uzpůsobené především pro rychlou kontrolu profilu drsnosti, tedy R-parametrů. Na obr. 2.9 je příklad ručního drsnoměru od firmy Mitutoyo, který je schopný měřit parametry drsnosti a základního profilu. [18] [19]



Obr. 2.9: Drsnoměr Surf test SJ-210 [18]

## 2.2.4 Laboratorní měřicí přístroje

Laboratorní měřicí přístroje jsou uzpůsobeny pro laboratorní podmínky (čisté prostředí, referenční teplota 20 °C, šetrné zacházení). Jsou přesnější než dílenské drsnoměry, avšak i jejich obsluha je složitější a vyžaduje odborné znalosti. Zároveň jsou citlivější na seřízení a prostředí, ve kterém se nacházejí. Přístroj se ovládá skrz program na PC či ovládacím panelem u přístroje. Je zapotřebí speciálních počítačových softwarů pro vyhodnocování profilu povrchu a jeho parametrů. Laboratorní přístroje zvládají vyhodnotit mnoho různých parametrů všech tří filtrací profilu povrchu, proto bývají označovány profiloměry. Některá zařízení pro měření profilu povrchu jsou schopna měřit a vyhodnocovat i konturu povrchu pomocí konturografu. Příklad takového pracoviště od společnosti Mahr lze pozorovat na obrázku 2.10. [18]



Obr. 2.10: Pracoviště pro měření drsností a kontur Marsurf XCR 20 [19]

## 3 SENZORIKA A MOŽNOSTI MĚŘENÍ PROFILU POVRCHU NA SOUŘADNICOVÝCH MĚŘICÍCH STROJÍCH

### 3.1 Motivace

Dnešní doba v průmyslu je význačná snahou o zvýšení produktivity, kvality a naprostou automatizaci, robotizaci a digitalizaci, jinak je tento trend označován jako Průmysl 4.0. Koncept byl představen v roce 2013 na veletrhu EMO v Hannoveru v Německu jako Industrie 4.0 a zabýval se zaměřením, cíli a dopadem čtvrté průmyslové revoluce. Koncept navazuje na výzkumnou platformu SmartFactory již z roku 2005. [20]

Jelikož s produkcí nedílně souvisí metrologie (zkoumání kvality výroby a jakosti výrobků), jsou kladeny vysoké nároky i na tento vědní obor. Kvůli stále se zvyšujícímu důrazu na kvalitu, produktivitu a objem produkce je nutné i metrologické technologie nadále inovovat a rozvíjet.

### 3.2 Souřadnicová měřicí technika

Pro souřadnicové měřicí stroje se používá také anglické označení CMM (Coordinate Measuring Machine), případně české označení SMS. První stroj spadající do této kategorie byl vyvinut skotskou společností Ferranti v padesátých letech 20. století [22]. Jedná se o měřicí stroje pracující v kartézských i nekartézských souřadnicích, vyhodnocující geometrické charakteristiky zkoumaného prvku. Různé typy konstrukcí a výběr z mnoha měřicích taktik je velkou předností CMM a činí z nich téměř univerzální přístroje pro kontrolu kvality. Využití těchto strojů je nyní téměř nezbytné pro automobilový a letecký průmysl. Využívá se ovšem i v jiných odvětvích průmyslu jako v elektrotechnice nebo u speciálních biomedicínských aplikací. CMM nabízí velkou škálu využití od skenování mikroprocesorů, přes reverzní inženýrství až po kontrolu velkoobjemových odlitků. Zároveň jsou souřadnicové měřicí stroje schopné dosahovat vysoké produktivity a výsledky náležitě digitálně zpracovávat. Počáteční investice není zanedbatelná, ale její návratnost je ve velkosériových výroбах velmi pravděpodobná. [21]

### 3.3 Princip měření pomocí CMM

Základní princip měření pomocí CMM spočívá v nasnímání bodů pomocí snímacího systému a následné vyhodnocení souřadnic jednotlivých bodů. Ty lze při vyhodnocování metodami analytické geometrie proložit křivkami a s jejich polohami dále pracovat. Lze vyhodnocovat tvar,

základní geometrické charakteristiky, polohu nebo pomocí mračka bodů z některých optických skenovacích metod dosáhnout metodami reverzního inženýrství zhotovení CAD modelu. Plného potenciálu systému lze dosáhnout plánováním měření v programu k tomu určeném s využitím CAD modelu součásti. [22]

### 3.4 Konstrukční typy CMM

Kvůli variabilitě schopností měření existuje mnoho různých konstrukčních typů CMM. Z pohledu souřadnicového systému je možné je rozdělit na CMM s kartézským a nekartézskými systémy a jejich kombinaci. S CMM s kartézským souřadnicovým systémem se lze setkat v klasických výrobních střediscích bez nutnosti speciálních podmínek. Jedná se o dílenské a laboratorní CMM.

**Dílenské CMM** zaujímají místo přímo ve výrobních halách. Jsou odolnější vůči znečištění, vibracím a změnám teploty než laboratorní CMM. Jsou sestaveny z klasických komponent jako jsou servomotory, kuličková ložiska apod. Nejčastěji jsou dílenské CMM stojanové nebo výložníkové konstrukce. Stojanová konstrukce s horizontálním ramenem je především určena pro automobilový průmysl např. kontrola karosérií. Její základna je obvykle na úrovni podlahy a po jejích stranách se pohybují jeden či dva stojany s vodorovnými rameny. Výložníková konstrukce je vhodná do výrob s menšími součástmi (CMM DuraMax na obr. 3.1 má měřicí rozsah 500 mm x 500 mm x 500 mm a nosnost 100 kilogramů). Takové stroje jsou vhodné jak na mezioperační kontroly, tak na konečnou kontrolu kvality povrchu. Díky jejich menším celkovým rozměrům je s nimi jednodušší manipulace než s ostatními dílenskými a laboratorními CMM kartézského souřadnicového uspořádání. [21] [25]



Obr. 3.1: Výložníkový CMM DuraMax od firmy Carl Zeiss [25]

Oproti tomu **laboratorní CMM** obvykle zaujímají větší prostor a mají větší měřicí rozsahy s menšími nejistotami měření. Nejsou však už tolik odolné vůči otřesům a je nutné je umístit do klimatizované místnosti pro udržení stálé referenční teploty. Důležité, přesné součásti laboratorních strojů se sice vyrábí z materiálů s co možná nejmenší teplotní roztažností (kompozitní materiály na bázi uhlíkových vláken, sklokeramika aj.), nicméně kvůli velikosti a nárokům na přesnost stroje je nutné udržovat prostředí o stálé referenční teplotě. Nesmíme také opomenout, že na měřené součásti teplota také působí a ovlivňuje je. Součásti stroje jsou navrženy s enviromentálními předpoklady laboratoře, což zapříčiňuje jejich citlivost na nečistoty. Čistota a bezprašnost prostředí dopomáhá stroji k delší době životnosti. Příkladem komponent náchylných na nečistoty je aerostatické ložisko zajišťující pohyb mostové konstrukce CMM po základní desce. V případě, že se mezi ložisko a pojezd dostane nečistota větší, než je vzduchový polštář, může třecími účinky ložisko poškodit a zapříčinit nedostatečný zdvih tlakovým vzduchem, který uniká rýhami, a tím nemožnost přesného měření a pohybu mechanické části CMM. Zároveň jsou však laboratorní CMM přesnější a je možnost používat složitější snímací systémy než u dílenského CMM. Dílenské CMM nejsou koncipovány pro aktivní snímací systémy<sup>3</sup>, proto jim postačuje váha závěsného uložení snímačů do 20 gramů. Zatímco laboratorní konstrukce mívají možnost závěsného uložení snímačů i o váze 600 gramů. Nejčastější konstrukce stroje se využívá



*Obr. 3.2: Laboratorní CMM mostové konstrukce – Zeiss Contura [25]*

---

<sup>3</sup> Profil povrchu nelze měřit bez hlavice aktivního snímacího systému. Tedy jej nelze měřit na dílenských CMM.

mostová<sup>4</sup>. V případě výroby, kde je nutné měřit velkoobjemové díly, např. letecký, těžký a energetický průmysl, se využívá robustní portálová konstrukce. [21] [25]

S **nekartézským** uspořádáním souřadnicového systému (souřadnicový systém s využitím úhlů) u CMM, což může být např. systém polární, sférický nebo cylindrický, se můžeme setkat u mobilních strojů jako jsou měřicí ramena (vyráběná s dotykovými, optickými snímači nebo multisenzorově) a laser trackery. Laser trackery jsou výhodné pro měření velkoobjemových výrobků přímo ve výrobě, ale v průběhu snímacího procesu se nesmí přerušit paprsek laseru mezi optickou hlavicí a odražečem (anglicky *reflector*), což je koule s vnitřním zrcadlovým hexagonem, s jejíž pomocí se zaměřuje poloha v prostoru díky odrazu laserového paprsku. [23]



Obr. 3.3: Variace odražečů a Laser Tracker Radian od API (vpravo) [23]

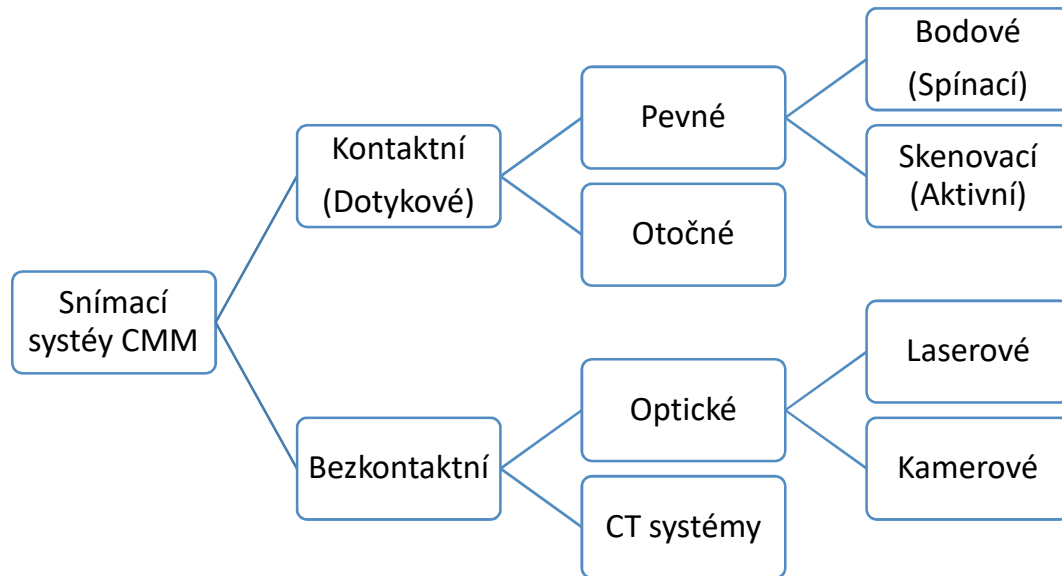
---

<sup>4</sup> *Bridge* (v překladu *most*) konstrukce CMM se v české literatuře a katalozích firem často označuje portálová konstrukce, a naopak *gantry* typ konstrukce CMM, což je v překladu *portál*, se uvádí jako mostová konstrukce. V této práci je využíváno označování podle anglických názvů konstrukcí laboratorních CMM.



## 3.5 Snímací systémy CMM

Součástí CMM zajišťující snímání bodů je snímací systém. Při výběru nového zařízení je třeba si určit, jaké snímací zařízení bude k měření zapotřebí, případně jestli se bude jednat o více druhů snímačů. Jejich rozčlenění je znázorněno schématem na obr. 3.4.



Obr. 3.4: Druhy snímacích systémů

Snímací systémy můžeme rozdělit na základě fyzikálního principu snímání bodů na dotykové, optické a CT systémy.

### 3.5.1 Dotykové snímací systémy

Snímání povrchu dotekem se provádí sondami s různou konstrukcí. Konstrukčně sestává z mechanismu zaznamenávání doteku, spojovacích elementů, dříku a snímače. Dříkem se označuje komponenta obvykle kruhového průřezu, která spojuje snímač se zbývajícími komponenty mechanismu (spojovacím elementem nebo spínačem). Dřík bývá zhotovován z titanu a jeho slitin, kompozitu (karbonová vlákna). Pro spínací systémy se nejčastěji využívá kompozitní dřík pro svou nízkou hmotnost, teplotní stálost a dostatečnou pevnost v ohybu. Je důležité, aby se dřík neprohýbal, protože jakákoliv deformace není žádoucí. [26]

Existují různé tvarové možnosti snímače pro různé aplikace. Nejčastěji se užívá zakončení snímacího systému přesnou kuličkou o různých průměrech, obvykle vyrobenou ze syntetického

rubínu ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Dalšími možnostmi tvaru snímače jsou talířové snímače z tvrzené ocele nebo keramiky, polokoule, kužele, válce aj. Snímače mohou být vyrobeny z rubínu, nitridu křemíku, karbidu wolframu, keramiky, ocele, diamantu nebo s diamantovým povlakem. Příklad aplikace, kdy je nevhodné použití rubínového snímače je při zkoumání povrchu s čistým hliníkem. Hliník se vzhledem ke své afinitě ke kyslíku pokrývá tenkou vrstvou oxidu hlinitého ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), který se po doteku transferuje na snímač a tím mění jeho geometrii. Takto degradovaný snímač již nelze použít na přesné měření. [26]

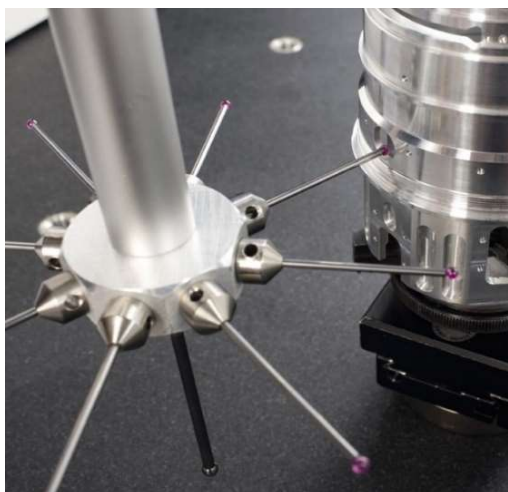
V okamžiku fyzického dotyku snímače s povrchem snímané součásti vyše pružný spínač signál, díky němuž systém zaregistruje dotek o určitých souřadnicích. Setkáváme se se spínacími, aktivními a otočnými konstrukcemi sond.

**Spínací systém** funguje na principu tří bodů a vychýlení snímače, který je na body napojený. Každý z bodů funguje jako spínač a vysílá signál do systému pro odměřování. Nevýhody spínací sondy jsou pomalé nájezdové časy pro zaznamenání bodů a tím i delší čas celkového měření a riziko prohýbání sondy. Mechanismus je oproti jiným možnostem odolnější vůči nečistotám a také disponuje nižší hmotností než aktivní snímací systémy. Využívá se především jako snímací systém na dílenských CMM.

**Aktivní systém** znamená v tomto tématu řízení přitlačné síly snímacího systému v různých polohách stroje. Jeho základem je mechanismus zvaný paralelogram. Nejdůležitějšími částmi paralelogramu jsou tři elektromagnety (cívky, jimiž prochází elektrický proud) orientované podle jednotlivých os. Každý elektromagnet se ovládá příslušným proudem, jehož velikost závisí na složce vektoru síly ve směru doteku kolmého ke zkoumanému povrchu. Díky korektnímu zadání přitlačné síly lze předcházet deformaci snímače nebo komponent snímacího zařízení, poškození měřené součásti, nepřesnostem měření. Aktivní snímací sondy se dají stavebnicově sestavit podle tvarové složitosti kontrolované součásti. Sondy mohou disponovat jedním jednoduchým dotekem nebo sestavením komplikovaných doteků v různých směrech, délkou a velikostí snímacího doteku. Příklad sestavení sondy VAST s devíti snímači od společnosti Carl ZEISS je zobrazen na obr. 3.5. Tento druh snímacího systému byl vyvinut na základě požadavků rychlosti a opakovatelnosti snímání. Je schopen kontinuálního skenování bodů, což urychluje proces měření. Nejvhodnější uplatnění je ve výrobcích s velkosériovou produkcí.

**Otočné snímací systémy** (též indexovatelné nebo polohovatelné) využívají teorie, že nejpřesnějšího zaznamenání bodů lze dosáhnout dotekem kolmo k měřenému povrchu. Proto byla vyvinuta indexovatelná zařízení až s pěti osami, tři zajišťující strojem a dva otočné pohyby. Díky polohovatelnosti sondy můžeme využívat jednodušší konfigurace snímací hlavy. Problémem otočných sond je horší opakovatelnost v porovnání s pevnými snímacími systémy. Zároveň každá osa zařazená do pohybu celého mechanismu stroje disponuje určitou chybou polohování.

S každým pohybem v dané ose se chyba načítá, proto polohovatelná sonda nedosahuje takových přesností jako aktivní. Zároveň je nutné polohovatelný systém častěji kalibrovat pro udržení dostatečné přesnosti měření. Ukázka otočného pětiosého snímacího systému od firmy Renishaw je vidět na obr. 3.6. [27]



Obr. 3.5: Ukázka konfigurace snímacího systému VAST [31]



Obr. 3.6: Pětiosý snímací systém REVO [27]

### 3.5.2 Optické snímací systémy

Optické snímací systémy jsou založené na bezkontaktním způsobu snímání. Aplikace je možná i v případech, kdy dotykové systémy nedostačují např. z rozměrových důvodů. Snímače pracují na principu triangulační metody a jsou vybaveny CCD senzorem s diodovým nebo laserovým nasvícením. Problém ve snímání optickými senzory spočívá ve snímání lesklých povrchů kvůli negativním odrazům světelných paprsků a přesnosti měření u kamerových systémů. Kamerový



Obr. 3.7: Snímač LineScan od firmy Carl Zeiss [31]

systém pracuje na principu rozeznávání světla a tmy, a tím vyhodnocuje hrany zkoumané součásti. Proto nedostatečné či proměnlivé světelné podmínky nebo lesk materiálu způsobují zařízení problémy s vyhodnocováním.

### 3.6 CT systémy snímání

Princip počítačové tomografie (CT – Computed Tomography), využívaný v medicíně, proniká do průmyslu ve formě snímacích zařízení, především v oblasti nedestruktivní defektoskopie a reverzního inženýrství. Pomocí rentgenové tomografie mohou být měřeny vady součástí v trojrozměrném prostoru ostatními snímacími zařízeními nezjistitelné (póry, trhliny, bubliny, vměstky). Schopnost CT systému prozářit materiál ovšem nezávisí pouze na výkonu stroje a rentgenové výbojky, ale také na chemickém složení materiálu zkoumané součásti. [28]

### 3.7 Měření profilu povrchu na CMM

Se snahou provádět jakostní kontroly součástí na jediném stroji, a tím zvyšovat produktivitu měření, přichází i možnost kontroly profilu povrchu přímo na CMM. Pro tyto účely byly navrženy speciální snímače pracující na principu dotykového měření profilu povrchu. Výhoda oproti klasickým dotykovým přístrojům spočívá v až pětiosém pohybu snímacího zařízení. Kdy pohyb v osách X, Y a Z zajišťuje CMM a dvě osy rotace výměnné snímací zařízení. S adaptací profiloměru se setkáváme u laboratorních CMM, kdy je možné měření profilu povrchu kombinovat s jinými snímacími systémy. Kvůli nutné přesnosti měření profilu povrchu se užívají sondy s vlastním měřicím zařízením integrovaným ve výměnné sondě. Pro užití sondy s možností měření profilu povrchu je nutné připojit ji k hlavě s paralelogramem (aktivní systém).



Obr. 3.8: Hlava SURFTEST [18]

## 4 PROVEDENÍ POROVNÁVACÍCH MĚŘENÍ

V praktické části se práce zabývá kontrolou povrchu vzorků na čtyřech různých zařízeních pro měření profilu povrchu. Účelem je zjistit, který z přístrojů zajišťuje nejspolehlivější kontrolu profilu.

### 4.1 Zvolení vzorků

Vzorovými povrchy jsou vzorky drsnosti ze standardního vzorníku Supraphon frézování pro gramofonové desky. Vzorkovnice je v dobrém stavu, používaná, letitá (z roku 1959). Vzorkovnice byla k měření poskytnuta Ústavem technologie obrábění, projektování a metrologie na ČVUT v Praze.

V první řadě vzorníku (shora) z obr. 4.1 jsou zastoupeny vzorky čelního frézování nástrojem z rychlořezné oceli (f). Vzorky z druhé řady byly obráběny čelním frézováním nástroji ze slinutého karbidu (fs). V třetí řadě jsou zastoupeny vzorky frézování válcovou frézou z rychlořezné oceli (fv). Na obr. 4.2 je zobrazen průvodní list měřených vzorků<sup>5</sup>. Označování vzorků při jednotlivých měřeních vychází z označení na průvodním listu. Před každým měřením byly vzorky náležitě očištěny ubrousky z mikrovlákna a průmyslovým technickým lihem, aby se zabránilo ovlivnění měření nečistotami. Všechna měření byla prováděna v klimatizovaných laboratořích.



Obr. 4.1: Vzorkovnice frézování

<sup>5</sup> Na průvodním listu je čelní frézování nástrojem z RO označeno jako hoblování. Vzorky však podle struktury povrchu vykazují známky po obrábění frézováním, proto je v této práci tato operace označena jako frézování (f).

GRAMOFONOVÉ ZÁVODY n. p.		ZÁVOD 2 - PRAHA		PRAHA XI, BOŘIHOVA č. 85		PRŮVODNÍ LIST		Číslo 4544																																																																																																																																					
Kolečko 59 1015		Stupeň přesnosti 2		Kaseta 2																																																																																																																																									
<p>Vzorky drsností povrchu pro porovnávací ohodnocování drsnosti povrchu jsou označeny hodnotami Hs (střední aritmetická výška mikronerovnosti) měřenými v tisícinách milimetru (<math>\mu</math>) a jsou odstupňovány podle praktické řady stupňů drsnosti stanovených normou CSN 01 4450 — drsnosti povrchu. V tabulce jsou uvedeny sítě naměřených hodnot Hs. Hodnoty Hsk jsou přepočteny z naměřených hodnot Hs. Hodnoty Hmax jsou informativní.</p> <p>Sada plochých vzorků hoblovaných nástroji RO.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Číslo vzorku</th> <th rowspan="2">Označení vzorku</th> <th colspan="2">Střed. naměř. bodu</th> <th rowspan="2">Informativní Hsk <math>\mu</math></th> <th rowspan="2">Informativní Hmax <math>\mu</math></th> <th rowspan="2">Výrobní označení vzorku</th> </tr> <tr> <th>Hs <math>\mu</math></th> <th>Hsk <math>\mu</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>16</td><td>F — 1,6</td><td>1,49</td><td>1,64</td><td></td><td></td><td>31-16-28-26</td></tr> <tr><td>17</td><td>F — 3,2</td><td>2,98</td><td>3,27</td><td></td><td></td><td>13-17-05-06</td></tr> <tr><td>18</td><td>F — 6,3</td><td>5,36</td><td>5,89</td><td></td><td></td><td>33-18-14-22</td></tr> <tr><td>19</td><td>F — 12,5</td><td>11,25</td><td>12,38</td><td></td><td></td><td>32-19-31-07</td></tr> <tr><td>20</td><td>F — 25</td><td>24,0</td><td>26,4</td><td></td><td></td><td>32-20-30-06</td></tr> </tbody> </table> <p>Sada plochých vzorků frézovaných čelně nástroji Sk.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Číslo vzorku</th> <th rowspan="2">Označení vzorku</th> <th colspan="2">Střed. naměř. bodu</th> <th rowspan="2">Informativní Hsk <math>\mu</math></th> <th rowspan="2">Informativní Hmax <math>\mu</math></th> <th rowspan="2">Výrobní označení vzorku</th> </tr> <tr> <th>Hs <math>\mu</math></th> <th>Hsk <math>\mu</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>21</td><td>FS — 1,6</td><td>1,52</td><td>1,75</td><td></td><td></td><td>41-21-03-20</td></tr> <tr><td>22</td><td>FS — 3,2</td><td>3,46</td><td>3,97</td><td></td><td></td><td>17-22-21-27</td></tr> <tr><td>23</td><td>FS — 6,3</td><td>5,36</td><td>6,16</td><td></td><td></td><td>3-23-07-30</td></tr> <tr><td>24</td><td>FS — 12,5</td><td>11,38</td><td>13,08</td><td></td><td></td><td>32-24-26-05</td></tr> <tr><td>25</td><td>FS — 25</td><td>25,25</td><td>29,04</td><td></td><td></td><td>33-25-12-09</td></tr> </tbody> </table> <p>Sada plochých vzorků frézovaných válcovou frézou nástroji RO.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Číslo vzorku</th> <th rowspan="2">Označení vzorku</th> <th colspan="2">Střed. naměř. bodu</th> <th rowspan="2">Informativní Hsk <math>\mu</math></th> <th rowspan="2">Informativní Hmax <math>\mu</math></th> <th rowspan="2">Výrobní označení vzorku</th> </tr> <tr> <th>Hs <math>\mu</math></th> <th>Hsk <math>\mu</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>26</td><td>FV — 1,6</td><td>1,54</td><td>1,84</td><td></td><td></td><td>13-26-11-14</td></tr> <tr><td>27</td><td>FV — 3,2</td><td>3,46</td><td>4,15</td><td></td><td></td><td>42-27-03-20</td></tr> <tr><td>28</td><td>FV — 6,3</td><td>5,29</td><td>6,35</td><td></td><td></td><td>11-28-22-19</td></tr> <tr><td>29</td><td>FV — 12,5</td><td>11,75</td><td>14,1</td><td></td><td></td><td>11-29-23-05</td></tr> <tr><td>30</td><td>FV — 25</td><td>21,0</td><td>25,2</td><td></td><td></td><td>1-30-12-02</td></tr> </tbody> </table>										Číslo vzorku	Označení vzorku	Střed. naměř. bodu		Informativní Hsk $\mu$	Informativní Hmax $\mu$	Výrobní označení vzorku	Hs $\mu$	Hsk $\mu$	16	F — 1,6	1,49	1,64			31-16-28-26	17	F — 3,2	2,98	3,27			13-17-05-06	18	F — 6,3	5,36	5,89			33-18-14-22	19	F — 12,5	11,25	12,38			32-19-31-07	20	F — 25	24,0	26,4			32-20-30-06	Číslo vzorku	Označení vzorku	Střed. naměř. bodu		Informativní Hsk $\mu$	Informativní Hmax $\mu$	Výrobní označení vzorku	Hs $\mu$	Hsk $\mu$	21	FS — 1,6	1,52	1,75			41-21-03-20	22	FS — 3,2	3,46	3,97			17-22-21-27	23	FS — 6,3	5,36	6,16			3-23-07-30	24	FS — 12,5	11,38	13,08			32-24-26-05	25	FS — 25	25,25	29,04			33-25-12-09	Číslo vzorku	Označení vzorku	Střed. naměř. bodu		Informativní Hsk $\mu$	Informativní Hmax $\mu$	Výrobní označení vzorku	Hs $\mu$	Hsk $\mu$	26	FV — 1,6	1,54	1,84			13-26-11-14	27	FV — 3,2	3,46	4,15			42-27-03-20	28	FV — 6,3	5,29	6,35			11-28-22-19	29	FV — 12,5	11,75	14,1			11-29-23-05	30	FV — 25	21,0	25,2			1-30-12-02
Číslo vzorku	Označení vzorku	Střed. naměř. bodu		Informativní Hsk $\mu$	Informativní Hmax $\mu$	Výrobní označení vzorku																																																																																																																																							
		Hs $\mu$	Hsk $\mu$																																																																																																																																										
16	F — 1,6	1,49	1,64			31-16-28-26																																																																																																																																							
17	F — 3,2	2,98	3,27			13-17-05-06																																																																																																																																							
18	F — 6,3	5,36	5,89			33-18-14-22																																																																																																																																							
19	F — 12,5	11,25	12,38			32-19-31-07																																																																																																																																							
20	F — 25	24,0	26,4			32-20-30-06																																																																																																																																							
Číslo vzorku	Označení vzorku	Střed. naměř. bodu		Informativní Hsk $\mu$	Informativní Hmax $\mu$	Výrobní označení vzorku																																																																																																																																							
		Hs $\mu$	Hsk $\mu$																																																																																																																																										
21	FS — 1,6	1,52	1,75			41-21-03-20																																																																																																																																							
22	FS — 3,2	3,46	3,97			17-22-21-27																																																																																																																																							
23	FS — 6,3	5,36	6,16			3-23-07-30																																																																																																																																							
24	FS — 12,5	11,38	13,08			32-24-26-05																																																																																																																																							
25	FS — 25	25,25	29,04			33-25-12-09																																																																																																																																							
Číslo vzorku	Označení vzorku	Střed. naměř. bodu		Informativní Hsk $\mu$	Informativní Hmax $\mu$	Výrobní označení vzorku																																																																																																																																							
		Hs $\mu$	Hsk $\mu$																																																																																																																																										
26	FV — 1,6	1,54	1,84			13-26-11-14																																																																																																																																							
27	FV — 3,2	3,46	4,15			42-27-03-20																																																																																																																																							
28	FV — 6,3	5,29	6,35			11-28-22-19																																																																																																																																							
29	FV — 12,5	11,75	14,1			11-29-23-05																																																																																																																																							
30	FV — 25	21,0	25,2			1-30-12-02																																																																																																																																							
Kontroloval																																																																																																																																													
23. 11. 59 Datum																																																																																																																																													

Obr. 4.2: Průvodní list vzorkovnice

## 4.2 Zařízení využitá k měření

Ve všech případech byly k měření využity snímací doteky (tedy dotyková metoda měření) s diamantovým hrotem s vrcholovým úhlem  $60^\circ$  a rádiusem špičky  $2\mu\text{m}$ . Na přístrojích od společnosti Mahr bylo použito totéž snímací rameno.

Měřicími zařízeními byl dílenský ruční drsnoměr MarSurf PS 10, laboratorní profiloměr s možností měření kontur MarSurf PCV s Perthometerem PGK pro měření profilu povrchu. Dalším přístrojem, který byl také vybavením Fakulty strojní ČVUT v Praze, je MarSurf LD 120. Všechny tři přístroje jsou od společnosti Mahr. Posledním měřicím zařízením byl souřadnicový měřicí stroj Prismo navigator s vyměnitelnou hlavicí Rotos od firmy Carl ZEISS, ke kterému umožnila přístup společnost ŠKODA AUTO a.s. v závodě v Mladé Boleslavi.

### 4.2.1 Mahr MarSurf PS 10

Dílenský ruční drsnoměr k mobilnímu využití. Vhodný na měření hřídelů, velkých i malých součástí. Je určený pro rychlou kontrolu drsnosti v dílenském prostředí i na obrobku upnutém ve stroji. Disponuje vyjímatelnou posuvnou jednotkou pro měření drsnosti a dodává se s jedním normovaným snímačem. Není nutné mít přístroj zapojený do sítě, má totiž vestavěný akumulátor, který je podle výrobce schopný na jedno nabití vykonat 1200 měření. Kryt snímače je vybavený integrovaným, vyjímatelným etalonem drsnosti, je tedy neustále k dispozici pro kalibraci přístroje. Ovládání je snadné a intuitivní, tedy není potřeba odborné obsluhy. Na dotykovém displeji lze upravovat nastavení přístroje, sledovat vyhodnocované parametry a grafy. Protokoly se ukládají přímo do paměti přístroje s možností přídatné paměťové karty. [29]

#### Parametry

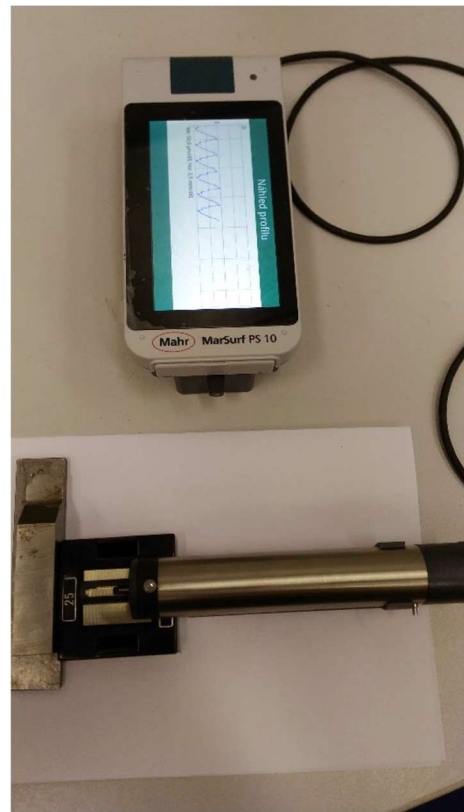
Měřicí rozsah:	350 $\mu\text{m}$
Rozlišení profilu:	8 nm
Celková dráha $l_n$ podle ISO/JIS:	1,25 mm, 4,0 mm, 12,5 mm
Snímač:	Indukční snímač s patkou
Síla při měření:	cca 0,7 mN
Zdvih:	$\pm 200 \mu\text{m}$
Rozměry přístroje:	160 mm x 77 mm x 50 mm
Filtr $\lambda$ s:	0,008 mm



Obr. 4.3: Mahr MarSurf PS 10 [29]

## Provedení měření

Po provedení kalibrace pomocí etalonu drsnosti byla prováděna měření vzorků. Vzorky byly zajištěny kovovými součástmi, aby bylo zamezeno nežádoucímu pohybu vzorku při snímání. Na každém vzorku bylo prováděno pět měření rovnoměrně rozmístěno po ploše vzorku. Začátky měřicí dráhy byly přibližně v jedné přímce. Jelikož se jedná o periodický profil, měřicí dráha byla v kolmém směru vůči stopě po obrábění. Variace s vyjmutým snímacím systémem (obr. 4.4) byla zvolena kvůli snaze o minimální ovlivnění snímacího systému stisky tlačítek mezi měřeními. Jednotlivá měření se ukládala do paměti stroje a následně byla přenesena přes USB na PC. Přístroj byl schopen z požadovaných parametrů vyhodnocovat pouze parametry drsnosti. Byly tedy vyhodnoceny parametry  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$  a  $R_{Sm}$ . Příkladem protokolu je obr. 4.5, kdy se jedná o frézování čelní frézou se jmenovitým parametrem  $R_a$  1,6  $\mu\text{m}$  a čtvrté měření tohoto vzorku.



Obr. 4.4: Kontrola vzorků na PS 10

<b>Mahr</b>		SPM ngvr		MarSurf PS 10 1.00-21	
Datum vytvoření:	17.04.2018 13:10	Lt:	4,8 mm		
Přístroj:	MarSurf PS 10 (5321)	Ls:	8,0 $\mu\text{m}$		
Snímač:	PHT 350	VB:	+/- 200,0 $\mu\text{m}$		
		Vt:	1,0 mm/s		
		Body:	9600		
F-1,6-4					
<b>R[LC ISO 16610-21 0,8 mm]</b>					
$R_a$	1,411 $\mu\text{m}$				
$R_z$	6,148 $\mu\text{m}$				
$R_{max}$	6,303 $\mu\text{m}$				
$R_{Sm}$	216,176 $\mu\text{m}$				

Obr. 4.4: Příklad protokolu z PS 10 vzorku f-1,6



## 4.2.2 Mahr MarSurf XCR 20 s Perthometer PGK 20 a MarSurf PCV

MarSurf XCR 20 je laboratorní stacionární přístroj pro měření struktury povrchu. Disponuje dvěma odnímatelnými hlavicemi – posuvná jednotka pro kontrolu kontur MarSurf PCV a posuvná jednotka pro kontrolu drsnosti Perthometer PGK 20. PGK je ovšem schopno vyhodnocovat parametry nejen R-drsnosti, ale také W-vlnitosti a P-základního profilu. Přístroj lze ovládat skrz řídicí panel přístroje nebo pomocí počítačového softwaru MarWin. Mezi jednotlivými taktikami měření (obrysy nebo profil povrchu) lze snadno přepínat i s výměnou mechanických součástí. Jednotky jsou upnuty na stojanu MarSurf ST 750 pomocí kombinovaného upínače jednotek. Základnou je žulový stůl s možností uchycení přípravku měřeného dílu.

Díky vyhodnocování v SW MarWin lze všechna měření uložená jako PICS Rules File na různých přístrojích od společnosti Mahr opětovně otevřít a s hodnotami pracovat.

### Parametry

#### MarSurf PCV – konturograf

Posuv: 0,2 mm - 200 mm

Zdvih: 50 mm

Odchylka vedení: <1  $\mu\text{m}$  / 200 mm

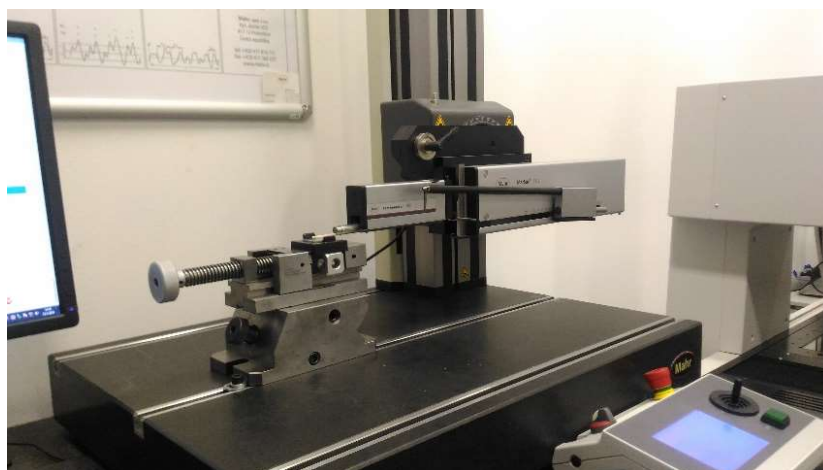
#### Perthometer PGK 20 – drsnoměr

Zdvih:  $\pm 250 \mu\text{m}$

Celková dráha  $l_n$  podle ISO/JIS: 1,25 mm, 4,0 mm, 12,5 mm

Maximální celková délka měření: 17,5 mm

Filtr  $\lambda$ s: 0,0025 mm



Obr. 4.5: Sestava přístroje se zařízením PGK 20

## Provedení měření

Kalibrace jednotky PGK probíhala pomocí skleněného kalibrovaného etalonu drsnosti za využití parametru  $Ra$ . Vzorky byly sevřeny v dílenském svěráku podloženy dílcem, aby nedocházelo k ohybu nosiče vzorku a všechny vzorky byly měřeny ve stejné výšce. Při výměně vzorků bylo nutné rychloposuvem ovládaným na PC nebo pomocí konzole uvolnit prostor pro výměnu vzorků, aby nedošlo k poškození zařízení. Na obr. 4.7 je ukázán detail měření. U prvního z měření každého



Obr. 4.6: Ukázka etalonu drsnosti Mahr PGN - 3 [30]

vzorku se podle tabulky (tab. 1.1) pro periodický profil byla zhodnocena správnost nastaveného filtru  $\lambda c$  a tím i vyhodnocované délky, která byla standardní podle ČSN EN ISO 4288, tedy pět délek základní délky. Vzorky, jejichž hodnota parametru  $RSm$  vyžadovala podle normy délku  $ln$  40 mm, tedy délku  $\lambda c$  přes 8 mm byly měřeny s filtrem  $\lambda c$  2,5 mm kvůli jak možnostem vyhodnocení s touto hodnotou jako maximální, a tak rozměru vzorku, který má v kolmém směru vůči stopě po nástroji 22 mm. Protokoly byly vyhodnocovány po pěti měřeních v PDF formátu. Zároveň byly ukládány i plány měření pro možnost opětovného načtení měření v SW MarWin. Na jednotce PGK bylo možné vyhodnotit všechny požadované parametry pro tuto práci:  $Ra$ ,  $Rz$ ,  $Rmax$ ,  $RSm$ ,  $Pa$ ,  $Pt$ ,  $Wa$ ,  $Wt$ .



Obr. 4.7: Detail měření s jednotkou PGK

### 4.2.3 Mahr MarSurf LD 120

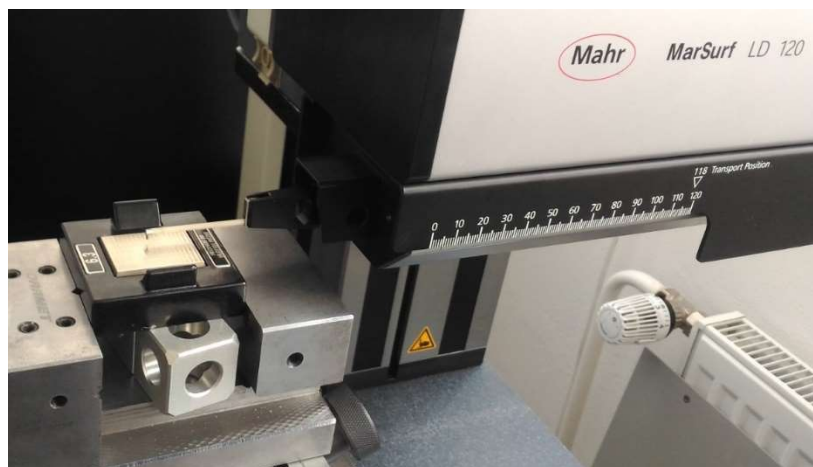
MarSurf LD 120 je zařízení schopné kontroly profilu povrchu i kontury v jednom měření. Stejně jako u PGK se jedná o laboratorní stacionární měřicí přístroj využívající PC se SW MarWin. Soubory obsahující plány měření byly ukládány pro případ opětovného načtení a vyhodnocení dalších parametrů. Protokoly byly stejně jako na PGK ukládány do PDF souboru. Tato dvě pracoviště se lišila především možností měřit a vyhodnocovat parametry profilu povrchu a zároveň kontury u LD 120.

#### Parametry

Posuv:	0,1 mm - 120 mm
Zdvih:	10 mm - 20 mm
Přesnost vedení:	1 + L/100 $\mu$ m
Celková dráha <i>ln</i> podle ISO/JIS:	1,25 mm, 4,0 mm, 12,5 mm, 40 mm
Filtr $\lambda$ s:	0,0025 mm



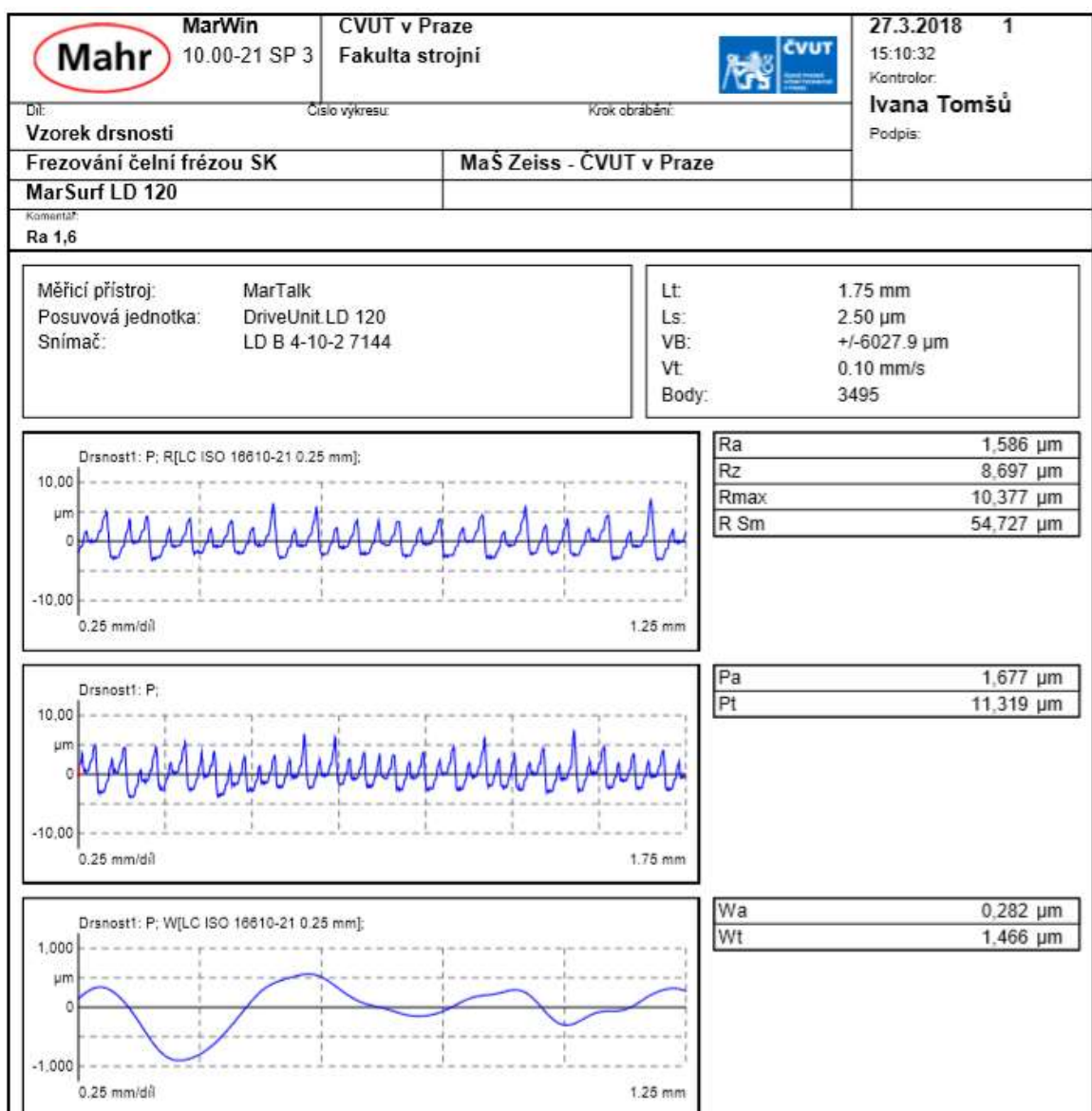
Obr. 4.8: Pracoviště s přístrojem MarSurf LD 120



Obr. 4.9: Detail měření na LD 120

## Provedení měření

Postup měření se téměř neliší od měření pomocí jednotky PGK. Rozdíl byl ve snadnějším ovládní přístroje v rychloposuvech, kdy postačuje zadat přístroji počítačově souřadnice, kam má hlavice jet. Tím se zlepšuje opakovatelnost měření. LD 120 disponuje i filtrem  $\lambda c$  8 mm, který z rozměrových důvodů nemohl být na kontrolu vzorků aplikován. Detail měření lze vidět na obr. 4.9. Vzorky byly měřeny opět se stejným měřicím ramenem jako v předešlých dvou případech. Byly vypočteny všechny požadované parametry. Z profilu drsnosti parametry  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$  a  $R_{Sm}$ , ze základního profilu  $P_a$  a  $P_t$ , z profilu vlnitosti parametry  $W_a$ ,  $W_t$ . Ukázka protokolu je k nahlédnutí na obr. 4.10.



Obr. 4.10: Ukázka protokolu ze zařízení LD 120

#### 4.2.4 ZEISS PRISMO navigator s konturografem ROTOS

ZEISS PRISMO navigator je souřadnicový měřicí stroj mostového typu (obr. 4.11). Mostová konstrukce je vyrobena z kompozitních materiálů na bázi uhlíkových vláken a keramiky kvůli minimální hmotnosti, teplotní roztažnosti a vysoké pevnosti. Přesné odměřovací prvky jsou vyrobeny z teplotně neutrální sklokeramiky s minimálním koeficientem teplotní roztažnosti jako je materiál ZERODUR od společnosti SCHOTT [32]. Ke stroji je nutný přívod tlakového vzduchu, který vyžadují aerostatická vzduchová ložiska, pro zajištění pohybu mechanické části stroje. Díky tomu se stroj pohybuje plynulým pohybem i v nízkých rychlostech. Pro tlumení vibrací je stroj vybaven elastomerovými ložisky. Jako odkladač pro senzory slouží multisenzorový zásobník pro hlavici VAST. Stoj automaticky vyměňuje senzory podle spuštěného plánu měření. Hlavice VAST po upnutí senzoru přečte informace na talířku senzoru a tím ověří správnost senzoru. PRISMO navigator využívá řídicí a vyhodnocovací Software Calypso. [31]



Obr. 4.11: ZEISS PRISMO navigator s hlavicí VAST a upnutým zařízením Rotos

ZEISS ROTOS je senzor pro kontrolu povrchu kompatibilní s hlavou VAST. Samotný snímací systém Rotos disponuje kluznou patkou, kterou snímá doteky a snímacím ramenem s diamantovým kuželem normované geometrie. Kluzná patka slouží jako dotykový snímač a zároveň snižuje riziko poškození snímače profilu. Rotos je samostatnou jednotkou, která komunikuje se zařízením přenosem dat pomocí Bluetooth do PC a následném přenosu do jednotky řízení stroje. Během měření snímací zařízení není zapojené do elektrické sítě což znamená, že

počet měření na jedno nabití je závislé na výdrži baterie. Nabíjení probíhá automaticky po zařazení Rotosu do zásobníku. Díky pohybu snímacího zařízení je možné, bez pohybu s měřenou součástí, provést měření v různých směrech. Samotná hlavice rotuje kolem svislé osy celých 360°. Naklápění ve vertikálním směru snímací smyčky je omezeno konstrukcí snímače, ale dosahuje devadesáti pěti stupňů do záporné a šedesáti pěti stupňů do kladné části osy Z (maximální natočení zobrazena na obr. 4.12). Požadavky na hodnocení profilu směřují ke kontrolám v předepsaných směrech a na různých pozicích na součástech. Se zařízením Rotos lze měřit bez manipulace se součástí, tedy v různých směrech a náklonech měřicího zařízení. Další výhodnou je, že měřený povrch nemusí splňovat podmínku rovnoběžnosti se základnou. V případě měření na součásti, která tuto podmínku nespĺňuje, by musela být upnuta do složitého přípravku, aby ji bylo možné měřit na laboratorním profiloměru. [31]



Obr. 4.12: Maximální natočení zařízení Rotos [33]

## Parametry

### Prismo navigator

Přesnost vedení:	1,0 + L/350 $\mu\text{m}$
Měřicí rozsah:	900 mm x 1800 mm x 700 mm

### Rotos

Rotace kolem osy Z:	360°
Rotace kolem osy X:	- 95° až 65°
Maximální celková délka měření:	17,5 mm
Maximální rozlišení profilu (osa X):	0,1 nm
Rychlost posuvu:	0,25 až 1 mm/s
Měřicí rozsah (osa Z):	1000 $\mu\text{m}$

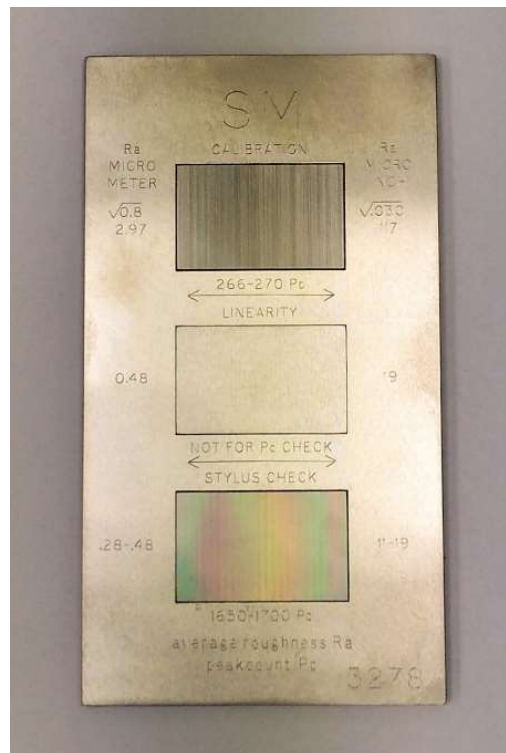
Maximální rozlišení profilu (osa Z): 0,05 nm  
Rozlišitelná hodnota  $Ra$ : >0,5  $\mu\text{m}$   
Filtr  $\lambda$ s: 0,0025 mm

### Provedení měření

Před samotným měřením vzorků byla potřeba jak hlavní snímací konfiguraci, tak Rotos kalibrovat. Standardní časový interval mezi kalibracemi CMM v Měrovém středisku GQH/11 ŠKODA AUTO je 8-12 hodin za provozu stroje. Tudíž kalibrace probíhá vždy na konci nebo začátku směny. Kalibrace polohy referenčního snímače probíhá snímáním bodů na přesné kalibračním artefaktu, v tomto případě přesné koule. Výsledkem je přenesení polohy ze středu referenčního snímače na střed kalibrační koule. Dále je potřeba kalibrovat zařízení Rotos, u kterého se musí kalibrovat, jak dotek kluzné patky, tak snímání profilu povrchu. Dotek se kalibruje opět pomocí kalibrační koule příjezdem kolmo na povrch koule v různých směrech a náklonech (viz obr. 4.13). Stroj díky této kalibraci získá údaje o poloze středu doteku Rotosu vůči poloze upnutého referenčního snímače do hlavy VAST. Dále se kalibruje snímání profilu povrchu pomocí etalonu drsnosti (na obr. 4.14). To probíhá jako na předešlých strojích zadáním hodnoty  $Ra$  etalonu a následným snímáním profilu povrchu ve třech měřicích drahách. Výsledkem kalibrace je odchylka od referenční hodnoty.

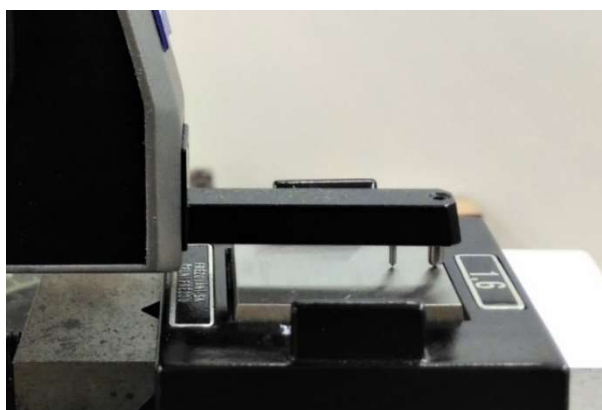


Obr. 4.14: Zařízení ZEISS Rotos s kalibrační koulí



Obr. 4.13: Etalony drsnosti pro ZEISS PRISMO

Po upnutí vzorku do svěráku bylo provedeno zaměření plochy měření referenčním snímačem vedeného pomocí kombinovaného ručního ovladače<sup>6</sup> (ovládajícího polohu a pohyb snímacího zařízení) pomocí pěti bodů na vzorku, dvou příjezdem proti směru osy X, dva proti ose Y a jednoho příjezdem osou Z (shora). Dále bylo nutné definovat polohou snímače bezpečnostní kvádr pro měření kvůli prevenci kolize snímacího zařízení. Díky jednoduchosti tvaru vzorků bylo možné pracovat bez obtíží s absencí CAD modelu součásti. V programu Calypso se nadefinovaly měřené dráhy v zaměřené rovině pomocí vytváření plánu měření pro kontrolu profilu povrchu. Bylo definováno pět drah snímání na zaměřeném vzorku. Díky přesné poloze ve svěráku se snadnou výměnou vzorků bylo měření na každém vzorku prováděno na stejných místech s minimální odchylkou polohy jednotlivých vzorků, což implikuje schopnost opakovatelnosti měření. Pro každý vzorek se pouze spustil plán měření a zařízení již samo snímalo automaticky každou z pěti drah plánu měření. Detail snímání lze vidět na obr. 4.15. Oproti ostatním využitým zařízením pro měření profilu povrchu nebylo nutné snímač po snímání jedné měřicí dráhy ručně (fyzicky, pomocí ovladače nebo souřadnic zadaných do PC) posouvat k další požadované dráze měření. Snímání podle předdefinovaného plánu měření probíhalo automaticky a vyhodnocovalo požadované parametry.



Obr. 4.15: Detail snímání profilu povrchu zařízením Rotos



Obr. 4.16: Detail ve směru snímání zařízením Rotos

<sup>6</sup> Tzv. „joystick“ na ovládacím panelu



## 4.3 Vyhodnocování výsledků měření

Pro zhodnocení přesnosti vyhodnocovaných hodnot je nejprve nasnadě uvést možnosti, jakými mohou vznikat nejistoty měření a zároveň jaké vlivy mohou správnost měření ovlivňovat.

### 4.3.1 Nejistoty měření

Při žádném měření nelze teoreticky naměřit skutečnou hodnotu, jelikož vždy působí faktory, ať už interní či externí, které hodnotu měřené veličiny ovlivňují. Nejistotou měření je interval (rozptyl ve 2D) kolem naměřené hodnoty, v němž se s určitou pravděpodobností vyskytuje skutečná hodnota měřené veličiny. Stoprocentní pravděpodobnost, že se v nejistotě měření vyskytuje skutečná hodnota, by zahrnovala hodnoty z nekonečně velkého intervalu.

Nejistotu způsobuje řada vlivů. Podle charakteru příčiny vlivu mohou být nejistoty odhadnuty např. přístupem dokumentu GUM. Podle něj lze složky nejistot rozlišit na složky nejistoty typu A a typu B, které se od sebe liší charakterem původu nejistot a způsobem vyhodnocování. [34]

Základními vlivy na měření jsou [34]:

1. Lidský faktor (subjektivní vnímání, nepozornost, nepřesnost, nedodržování postupů aj.)
2. Prostředí (náhodné vlivy, teplota, osvětlení, hlučnost, vibrace atd.)
3. Měřicí metoda (výběr metody, postupy měření)
4. Měřicí vybavení (dostatečné informace o vybavení, metrologické confirmace kalibračních nejistot, způsob výběru měřených vzorků)
5. Manipulace a zacházení s měřicím vybavením

#### Nejistoty typu A

Složky nejistot typu A způsobují náhodné a systematické chyby měření a vyhodnocují se pomocí statistické analýzy série pozorování. Rozdělují se do tří základních kategorií [34]:

1. Nezávislé na čase (projevují se náhodně v průběhu času, příkladem jsou chyby za podmínek opakovatelnosti a reprodukovatelnosti)
2. Vznikající na základě specifických podmínek měření
3. Vznikající na základě náhodné heterogenity materiálu

#### Nejistoty typu B

Skupina složek nejistot typu B je způsobena opět jak náhodnými chybami, tak chybami systematickými (na bázi odchylek). Nejistoty vznikající systematickými chybami mohou být

korigovány, zatímco náhodné chyby nikoliv. Nejistoty typu B se hodnotí jinými metodami než statistickou analýzou. [34]

Obvyklými zdroji nejistot typu B jsou [34]:

1. Etalony a měřidla, které byly kalibrovány externích laboratořích
2. Fyzikální konstanty použité pro výpočty a zaokrouhlování dílčích výpočtů
3. Statisticky neřešitelné působení prostředí
4. Odlišnosti v uspořádání měřicích přístrojů a provedení měření
5. Vady nebo nedostatek rozlišovacích možností měřidel

### Normální rozdělení

Při počítání nejistot se nejčastěji využívá standardní nejistota. Tou se rozumí nejistota měření vyjádřena pomocí směrodatné odchylky. Odhadem směrodatné odchylky  $\sigma$  je v normálním rozdělení (Gaussova křivka) výběrová směrodatná odchylka  $s$ . Výběrová směrodatná odchylka se počítá pomocí vztahu [35]:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (4.1)$$

kdy  $n$  je počet naměřených hodnot,  $x_i$  jednotlivé naměřené hodnoty a  $\bar{x}$  jejich aritmetický průměr. Aritmetický průměr  $\bar{x}$  se počítá pomocí vztahu [35]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.2)$$

#### 4.3.2 Reprezentativní hodnota

Reprezentativní hodnota jednotlivých parametrů profilu povrchu měřených na určitém stroji je v této práci určována podle vzorce:

$$R_r = \bar{x} + s \quad (4.3)$$

#### 4.3.3 Referenční hodnota

Vzhledem k stáří vzorků a k nim přiřazeným informacím z průvodního listu (obr. 4.2) nelze považovat naměřené hodnoty jako referenční. Zároveň pro hodnoty  $Ra$  12,5 a 25  $\mu\text{m}$  nemohl být z rozměrových důvodů v některých případech měření, které to vyžadovaly, zvolen parametr  $\lambda_c$  podle normy ČSN EN ISO 4288.

## 5 VYHODNOCENÍ

Jednalo se o 15 vzorků měřených pětkrát na každém přístroji každý. Tři přístroje vyhodnocovaly osm parametrů, jeden přístroj čtyři (PS 10). Pro každý vzorek byly vypočteny průměrné hodnoty a nejistoty jednotlivých parametrů na příslušných strojích. Po sečtení příslušných hodnot byly zjištěny hodnoty reprezentativní. Jednalo se o zpracování 300 hodnot získaných měřením z přístroje PS 10 a po 600 hodnotách z měření jednotkami PGK, LD 120 a Rotos. Dohromady se tedy jednalo o 2 100 hodnot. Pro tuto práci byly vybrány některé z nich k vyhodnocení. Zbylé hodnoty lze nalézt v příloze s protokoly z měření.

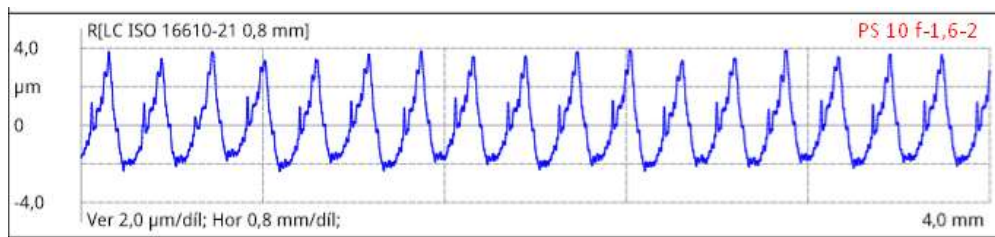
Naměřené hodnoty zobrazené v tabulkách byly zaokrouhleny na 4 desetinná místa.

### 5.1 Vzorek f-1,6: frézování čelní frézou z rychlořezné oceli

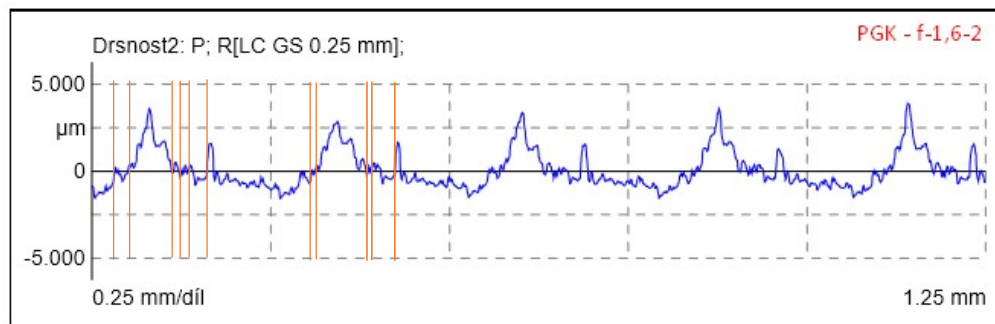
Tabulka zobrazuje ovlivnění reprezentativních hodnot za nevhodně zvoleného filtru  $\lambda_c$ . Filtry zvolené v souladu s normou jsou označeny zeleně a nevhodně zvolené hodnoty filtru červeně. Předělová hodnota mezi hodnotou filtru 0,25 a 0,8 mm je  $RSm$  0,13 mm (podle tabulky 1.1). Při měření se zařízeními značky Marh (PS 10, PGK a LD 120) byly hodnoty  $RSm$ , podle kterých se určuje hodnota cut-off (jinak značeno  $\lambda_c$ ,  $L_c$ ), zpracovávány v mikrometrech, ačkoliv je základní jednotkou milimetr. To vedlo k chybě obsluhy přístroje. Z grafického znázornění drsnosti na obr. 5.2 je také zřejmé, že byl vzorek měřen z opačné strany (o 180° natočený) než u všech ostatních měření. Tato skutečnost by ovšem neměla hodnoty nijak výrazně ovlivnit. Dále lze pozorovat anomálie u zařízení Rotos, které na rozdíl od laboratorních profiloměrů, udává hodnotu  $RSm$  v rozmezí, kdy je na místě zvolit cut-off 0,25 mm, přičemž hodnoty v tab. 5.1 dokazují, že bylo namísto zvolit filtr 0,8 mm, tedy podle hodnot  $RSm$  nesprávný. Parametr  $RSm$  označuje průměrnou šířku prvku profilu (prvek profilu je složený z výstupku a jemu přidružené prohlubně). Na obr. 5.2 je oranžovými čarami naznačeno, kde přibližně končí jednotlivé prvky podle profilu drsnosti v prvních dvou základních délkách. Parametry však vyhodnocovací program počítá z naměřených bodů, tedy je přesnější. Zařízení Rotos na CMM nasnívalo 9 601 bodů, ze kterých program Calypso vyhodnocoval parametry. MarSurf LD 120 nasnímal 11 184 bodů (rychlost posuvu  $v_t = 0,5$  mm/s) a MarSurf PGK 3 500, což bylo dáno kratší měřenou délkou a rychlostí posuvu 0,1 mm/s. Všechna tři zařízení určená do laboratorního prostředí používají stejnou velikost  $\lambda_s$ , který filtruje nejkratší vlnové složky. Měřená délka u obr. 5.4 je delší, než má být s cut-offem dle normy kvůli tomu, že hodnoty i graf byly generovány zpětně z měření s hodnotou cut-off 0,8 mm.

Tab. 5.1: Reprezentativní hodnoty měření vzorku f-1,6

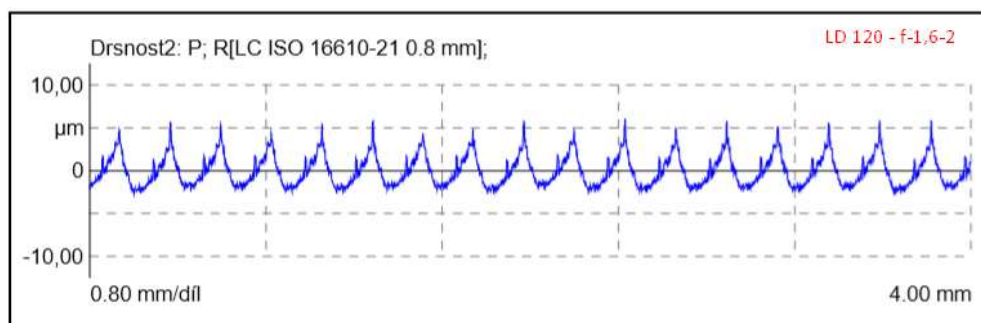
f-1,6	filtr $\lambda c$	Ra	Rz	Rmax	RSm	Pa	Pt	Wa	Wt
Měřicí zařízení	[mm]	[ $\mu m$ ]	[ $\mu m$ ]	[ $\mu m$ ]	[mm]	[ $\mu m$ ]	[ $\mu m$ ]	[ $\mu m$ ]	[ $\mu m$ ]
PS10	0,8	1,4208	6,5415	7,0134	0,2326	-	-	-	-
PGK	0,25	0,8190	5,1067	5,8423	0,1352	1,5648	8,4685	0,8501	3,1706
LD120	0,8	1,5627	8,4699	8,9644	0,1925	1,6058	10,3611	0,3685	1,1301
Rotos	0,25	0,8881	4,9247	5,6142	0,0744	1,8700	9,4908	0,6936	3,7441
Rotos	0,8	1,4661	7,0138	7,3954	0,1021	1,4987	8,4456	0,3447	1,4508
Vzorkovnice	-	1,49							



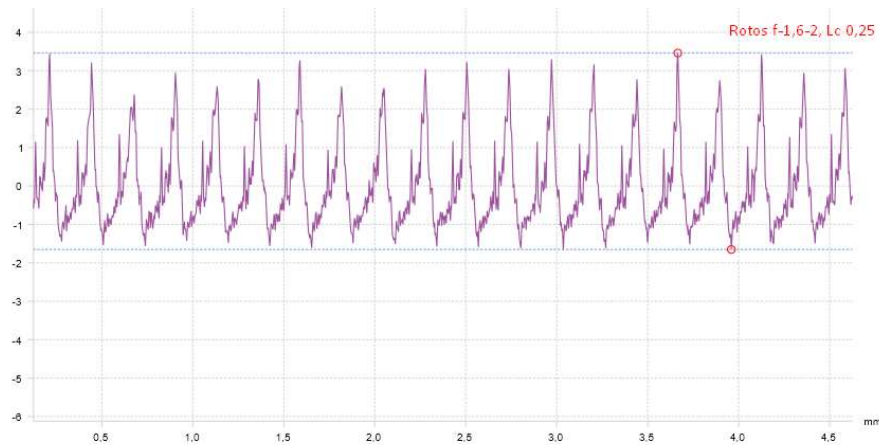
Obr. 5.1: Profil drsnosti na vzorku f-1,6 při druhém měření ručním drsnoměrem PS 10



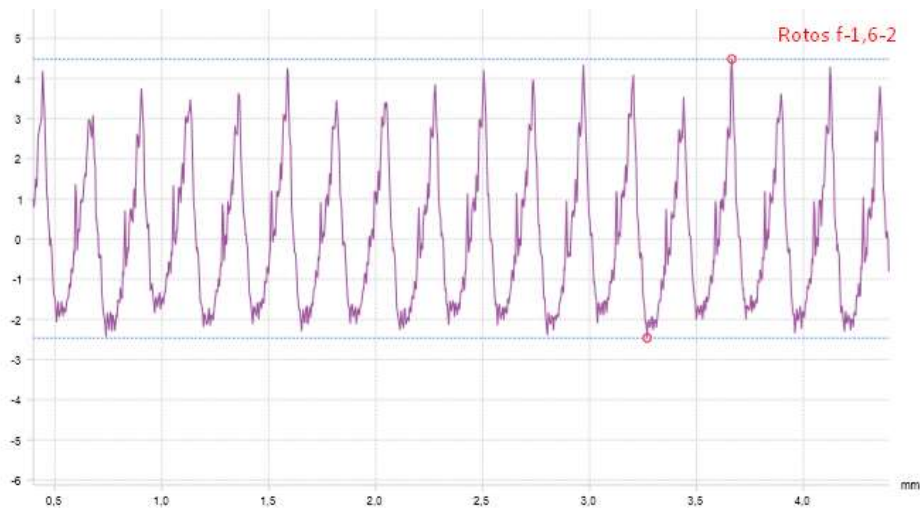
Obr. 5.2: Profil drsnosti vzorku f-1,6 laboratorní jednotkou profiloměru PGK



Obr. 5.3: Profil drsnosti vzorku f-1,6 laboratorním profiloměrem LD 120



Obr. 5.4: Profil drsnosti vzorku f-1,6 při  $\lambda_c = 0,25$  mm měřený na CMM pomocí jednotky Rotos



Obr. 5.5: Profil drsnosti vzorku f-1,6 při  $\lambda_c = 0,8$  mm měřený na CMM s jednotkou Rotos

## 5.2 Vzorek f-3,2: frézování čelní frézou z rychlořezné oceli

V tabulce 5.2 jsou vypočtené průměrné hodnoty z pěti měření vzorku f-3,2. V tomto případě byla na všech přístrojích zvolena stejná hodnota cut-off 0,8 mm. Při měření na jednotce Rotos jsou patrné odchylky od laboratorních profiloměrů (jednotek PGK a LD 120) zejména u výškových parametrů výstupků a prohlubní ( $R_z$ ,  $R_{max}$ ,  $P_t$ ,  $W_t$ ) a délkového parametru  $R_{Sm}$ , podobně jako v kapitole 5.1. Nyní však menší naměřená hodnota neovlivnila hodnotu filtru  $\lambda_c$ .

Tabulka 5.2 znázorňuje vypočtené směrodatné odchylky. Kýžená hodnota výběrové směrodatné odchylky je co nejbližší nule. Minimální hodnoty s jednotlivých parametrů jsou označeny žlutě. Jak bylo očekáváno, ruční drsnoměr PS 10 vyhodnotil parametry drsnosti dostatečně spolehlivě (průměrné hodnoty nevykazují velké odchylky od hodnot laboratorních

profiloměru), ale nejistoty měření jsou větší než u laboratorního profiloměru PGK, který v tomto případě obstál nejlépe. Nepřesnosti v jednotlivých měření drsnoměrem PS 10 mohlo ovlivnit právě jeho určení. Vzorek nebyl měřen v pevném upnutí a pohyby měřicí jednotky, vyjma pohybů měřicího ramena, také mohly nastat. V případě měření na obrobku stále upnutém v obráběcím stroji, kdy by obsluha z tvarových důvodů musela zařízení při měření držet, by výsledky vykazovaly jistě větší odchylky. Je nutno říci, že přes náročnost podmínek využití dílenského ručního drsnoměru, PS 10 obstává jako vhodné, sice méně přesné zařízení pro kontrolu profilu povrchu.

Snímání a výpočty parametrů krátkovlnných složek profilu s nejmenší odchylkou zajišťuje v tomto případě jednotka Perthometer PGK 20. Při měření tohoto vzorku snímal 11 200 bodů a jeho směrodatná odchylka měření parametru  $R_{Sm}$  je o tři řády menší než u zařízení Rotos. Rotos však dokazuje svoji spolehlivost u parametrů základního profilu a profilu vlnitosti. Nasnímal opět 9 601 bodů (pro porovnání – PS 10 nasnímal 9 600 bodů), což je pro tyto dvě filtrace profilu povrchu dostačující k objektivnosti.

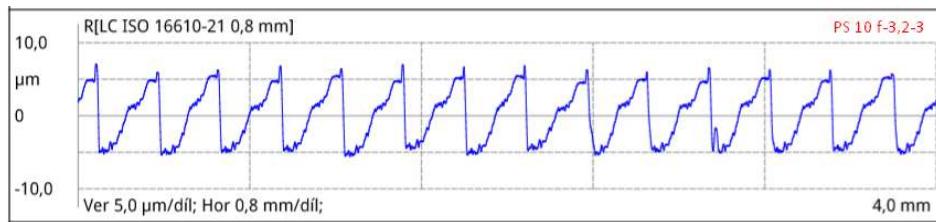
Oproti profilu drsnosti měla jednotka PGK problémy při konzistentnosti měření dlouhovlnných složek v případě tohoto vzorku.

Tab. 5.2: Průměrné hodnoty měření vzorku f-3,2

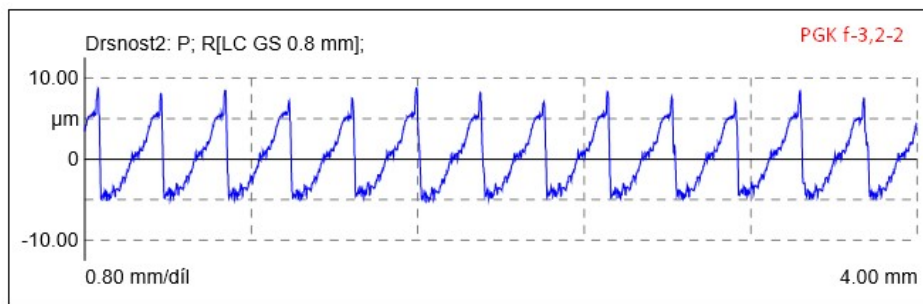
f-3,2	Ra	Rz	Rmax	RSm	Pa	Pt	Wa	Wt
Měřicí zařízení	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[mm]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]
PS10	3,1600	12,1166	12,9116	0,2863	-	-	-	-
PGK	3,1311	13,6272	13,9821	0,3071	3,2124	16,0734	0,5358	1,6412
LD120	3,1226	14,2498	14,9168	0,2861	3,1652	16,3418	0,4530	1,4082
Rotos	3,0405	12,7616	13,1313	0,1828	3,1184	15,5174	0,5556	2,1953
Vzorkovnice	2,98 - s							

Tab. 5.3: Hodnoty výběrových směrodatných odchylek měření vzorku f-3,2

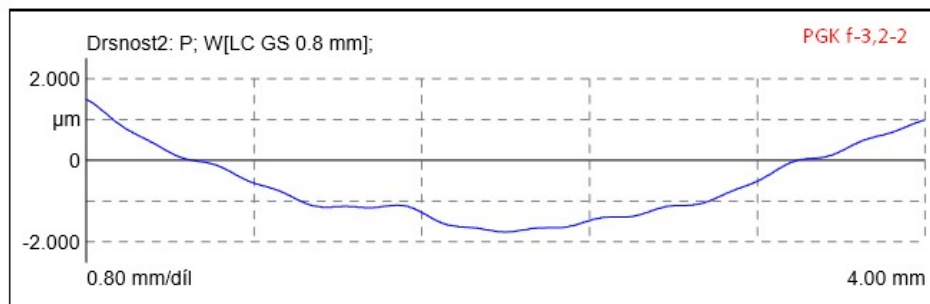
f-3,2	Ra	Rz	Rmax	RSm	Pa	Pt	Wa	Wt	počet MIN
Měřicí zařízení	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[mm]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	-
PS10	0,1029	0,2249	0,2240	0,0017	-	-	-	-	0
PGK	0,0496	0,0883	0,1243	0,0004	0,0563	1,1498	0,2768	1,0120	3
LD120	0,0170	0,2015	0,6933	0,0019	0,0468	1,1098	0,1495	0,5640	2
Rotos	0,0238	0,2777	0,3529	0,0318	0,0215	0,8075	0,1903	0,5389	3



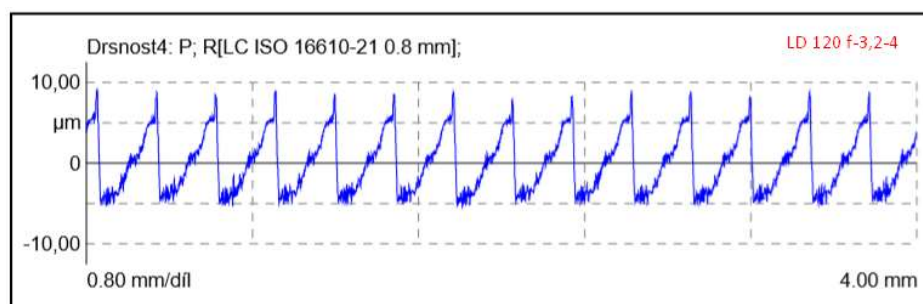
Obr. 5.6: Profil drsnosti vzorku f-3,2 z PS 10



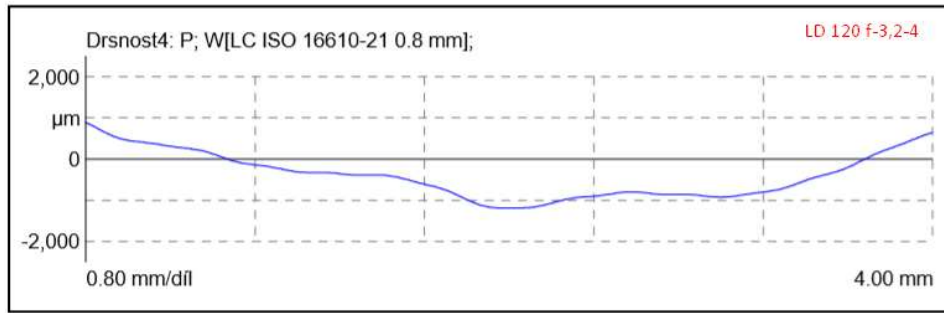
Obr. 5.7: Profil drsnosti vzorku f-3,2 z PGK



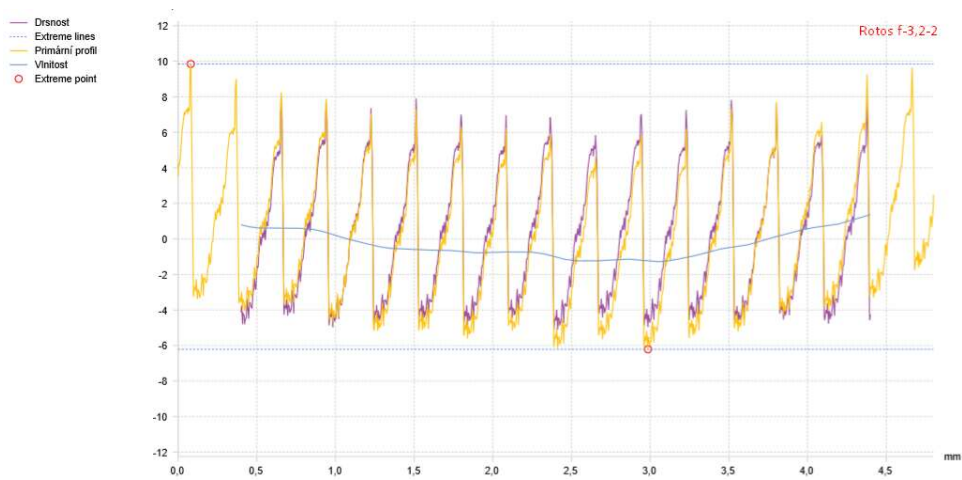
Obr. 5.8: Profil vlnitosti vzorku f-3,2 z PGK



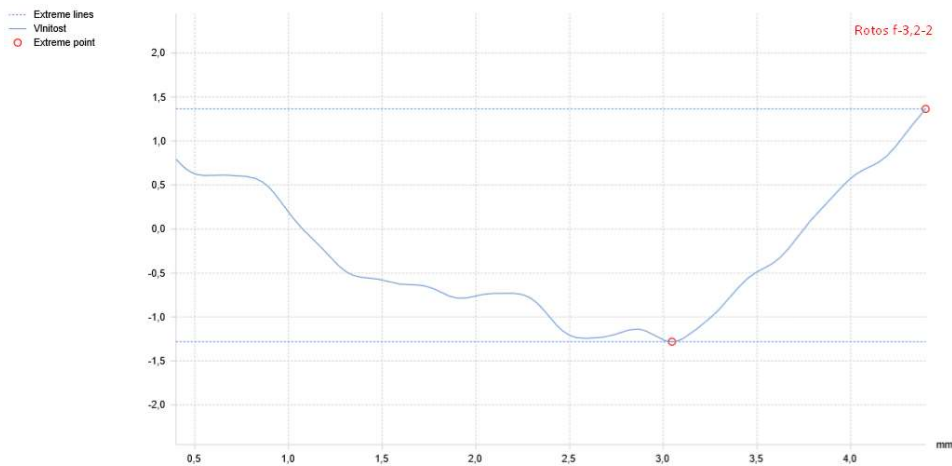
Obr. 5.9: Profil drsnosti vzorku f-3,2 z LD 120



Obr. 5.10: Profil vlnitosti vzorku f-3,2 z LD 120



Obr. 5.11: R, W, P profil vzorku f-3,2 měřené jednotkou Rotos



Obr. 5.12: Profil vlnitosti vzorku f-3,2 měřený na CMM PRISMO jednotkou Rotos



### 5.3 Vzorek f-12,5: frézování čelní frézou z rychlořezné oceli

Vzorek f-12,5 byl měřen na všech přístrojích s natavením  $\lambda_c$  na 2,5 mm což bylo ve všech případech podle normy ČSN EN ISO 4288.

Podle tabulky reprezentativních hodnot je zřejmé, že PS 10 byl schopný rozlišit délkový parametr  $RSm$  podobně jako ostatní zařízení, nicméně výškové parametry profilu drsnosti už vyhodnocoval s velkou odchylkou. Pracoval s 30 000 nasnímanými body na 12,5 mm měřené délky rychlostí posuvu 1 mm/s. Nicméně PS 10 vykazuje na grafickém znázornění profilu drsnosti (obr.5.13) před nejvyššími body výstupků určité záseky. Tento efekt může být způsoben nedostatečnou stabilitou a tuhostí měřicí soustavy v kombinaci s přítlačnou silou a rychlostí posuvu.

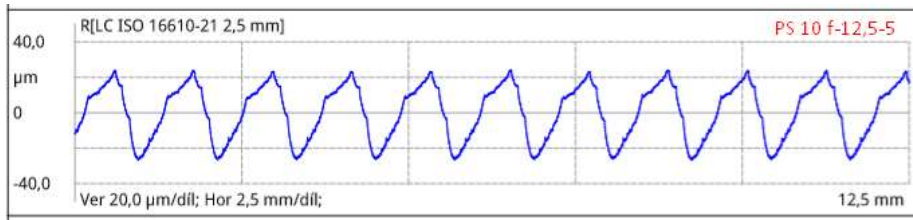
Laboratorní profiloměry si naopak s povrchem vzorku f-12,5 poradily velice dobře. Z tabulky směrodatných odchylek lze pozorovat, že jednotky PGK a LD 120 měly nejmenší nejistoty měření. Také jejich grafické vyobrazení na obr. 5.14 a 5.15 vypadá téměř identicky. Jednotka Rotos, v případech měření parametrů  $Ra$ ,  $Rmax$ ,  $Pa$ ,  $Pt$ , vykazovala také malou chybovost. Opět nasníkala právě o jeden bod více než PS 10. MarSurf PGK nasnímal 11 666 a LD 120 17 495 bodů. Rychlost posuvu byla však poloviční. Z toho je zřejmé, že přesnost měření závisí více na rychlosti posuvu než na počtu nasnímaných bodů.

Tab. 5.4: Reprezentativní hodnoty měření vzorku f-12,5

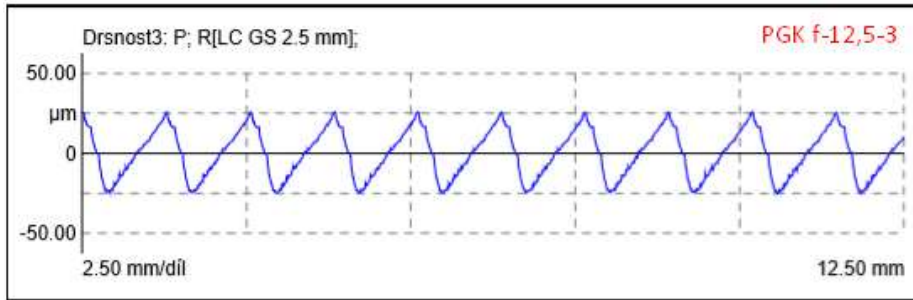
f-12,5	Ra	Rz	Rmax	RSm	Pa	Pt	Wa	Wt
Měřicí zařízení	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[mm]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]
PS10	16,2171	57,7320	58,7867	1,1886	-	-	-	-
PGK	13,0325	51,0368	51,2911	1,2742	13,9578	57,2687	1,1234	5,4448
LD120	13,1915	51,4160	51,7666	1,1899	13,8324	56,8940	1,0940	4,4524
Rotos	12,8385	50,0939	50,3372	1,0186	13,4501	54,6615	1,0111	4,8018
Vzorkovnice	11,25							

Tab. 5.5: Hodnoty výběrových směrodatných odchylek měření vzorku f-12,5

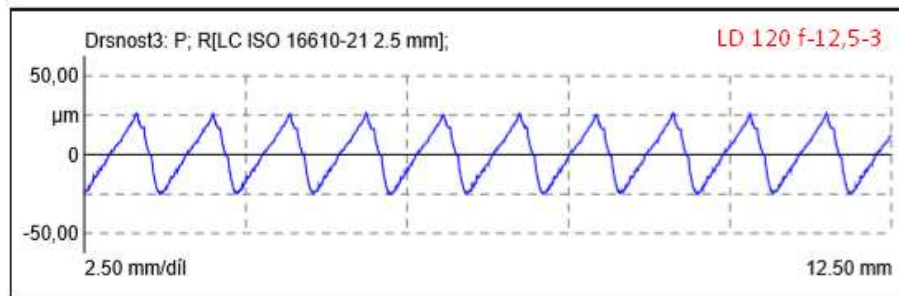
f-12,5	Ra	Rz	Rmax	RSm	Pa	Pt	Wa	Wt	počet MIN
Měřicí zařízení	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[mm]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	-
PS10	1,0205	3,3374	3,7197	0,0034	-	-	-	-	0
PGK	0,1240	0,1283	0,1282	0,0019	0,1216	0,9199	0,0682	0,6252	4
LD120	0,1259	0,1004	0,1670	0,0020	0,0912	0,5652	0,0906	0,3044	4
Rotos	0,1276	0,2327	0,1507	0,1315	0,1002	0,6685	0,1293	0,6555	0



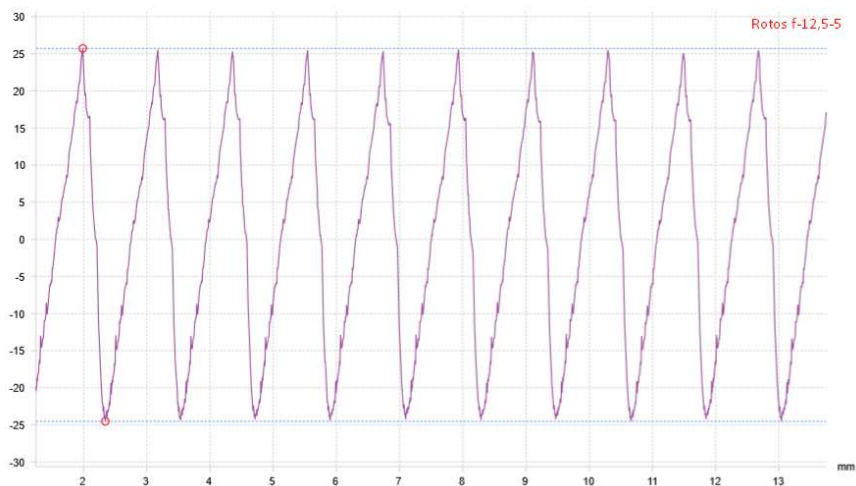
Obr. 5.13: Profil drsnosti vzorku f-12,5 z PS 10



Obr. 5.14: Profil drsnosti vzorku f-12,5 z PGK



Obr. 5.15: Profil drsnosti vzorku f-12, 5 z LD 120



Obr. 5.16: Profil drsnosti vzorku f-12,5 měřený na CMM PRISMO jednotkou Rotos

## 5.4 Vzorek fs-25: frézování čelní frézou ze slinutého karbidu

Všechna měření na vzorku fs-25 byla prováděna s hodnotou cut-off 2,5 mm. Tato hodnota podle normy vyhovuje pouze u měření na jednotce Rotos. Zbylé přístroje naměřily hodnoty  $RSm$  větší než 1,3 mm což znamená, že dle normy měly být měřeny s filtrem  $\lambda c$  hodnoty 8 mm. To by ovšem znamenalo, že by měřená délka musela být 40 mm, což by nebylo proveditelné kvůli velikosti vzorků. Zároveň by byla potíž v tom, že některé přístroje nezpracovávají cut-off delší než 2,5 mm (konkrétně PS 10 a PGK).

Na obr. 5.17 z drsnoměru PS 10 lze opět pozorovat dopad rychlosti posuvu na měřený profil, zatímco měření na profiloměrech PGK a LD 120 nevykazovaly žádné viditelné odchylky od sebe navzájem. Na obr. 5.18 lze vidět profil drsnosti z LD 120. Profil drsnosti měřený na zařízení Rotos (obr. 5.19) je téměř identický s laboratorními drsnoměry. Jediným rozdílem je měřítko os. Taktéž hodnoty z těchto tří zařízení se o mnoho nelišily. Co se lišilo, byly délkové parametry drsnosti zpracovávané drsnoměrem PS 10, které dosahovaly větších hodnot než u zbylých přístrojů.

Velké odchylky při měření na zařízení Rotos od firmy ZEISS oproti zařízením od firmy Marh může způsobovat fakt, že přístroje Marh měřily parametr  $RSm$  v mikrometrech, zatímco Rotos zpracovával hodnoty korektně podle normy, tedy v milimetrech.

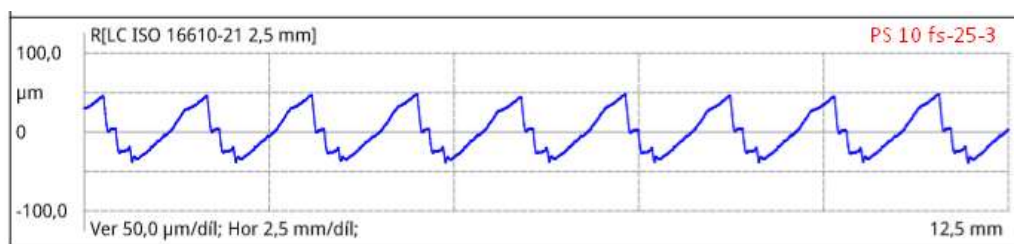
Co je zážející, tak byl v kapitole 5.1 ukázán dopad zvolení nevhodných hodnot cut-offu na hodnoty parametrů. Pokud uvážíme, že Rotos byl nastavený s hodnotou cut-off správnou, měly by ostatní přístroje vyhodnotit parametry drsnosti hodnot menších, než byly vyhodnoceny na zařízení Rotos. Tento předpoklad není ovšem podle reprezentativních hodnot z tab. 5.6 správný. S porovnáním hodnoty  $Ra$  uvedené na průvodním listu vzorkovnice lze uvažovat, že žádné z měření není vypovídající na vzorku s tak hrubým povrchem, jako má vzorek fs-25, kdy se jmenovité hodnotě  $Ra$  nejvíce přiblížil drsnoměr PS 10.

Tab. 5.6: Reprezentativní hodnoty měření vzorku fs-25

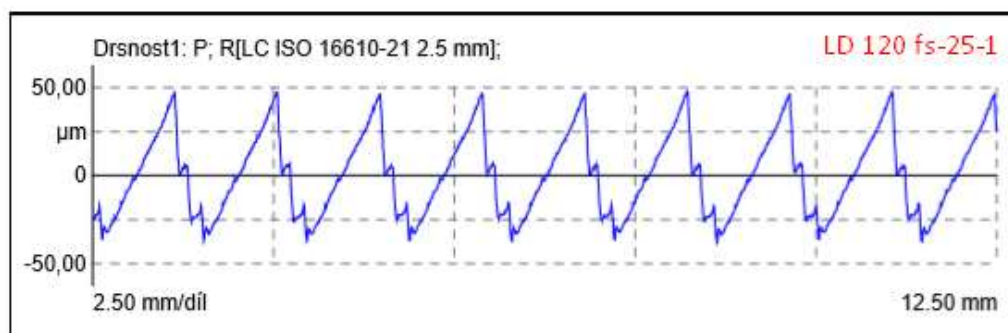
fs-25	$Ra$	$Rz$	$Rmax$	$RSm$	$Pa$	$Pt$	$Wa$	$Wt$
Měřicí zařízení	[ $\mu m$ ]	[ $\mu m$ ]	[ $\mu m$ ]	[mm]	[ $\mu m$ ]	[ $\mu m$ ]	[ $\mu m$ ]	[ $\mu m$ ]
PS10	21,6756	85,9179	87,6928	1,4151	-	-	-	-
PGK	19,0329	83,6071	85,7234	1,5250	22,2081	96,0859	3,5669	13,5914
LD120	19,5835	85,2608	86,4089	1,4191	22,1192	97,1534	2,8451	12,4905
Rotos	19,0800	82,9408	83,8666	0,8901	21,5668	95,3820	2,9607	13,4717
Vzorkovnice	25,25							

Tab. 5.7: Hodnoty výběrových směrodatných odchylek měření vzorku fs-25

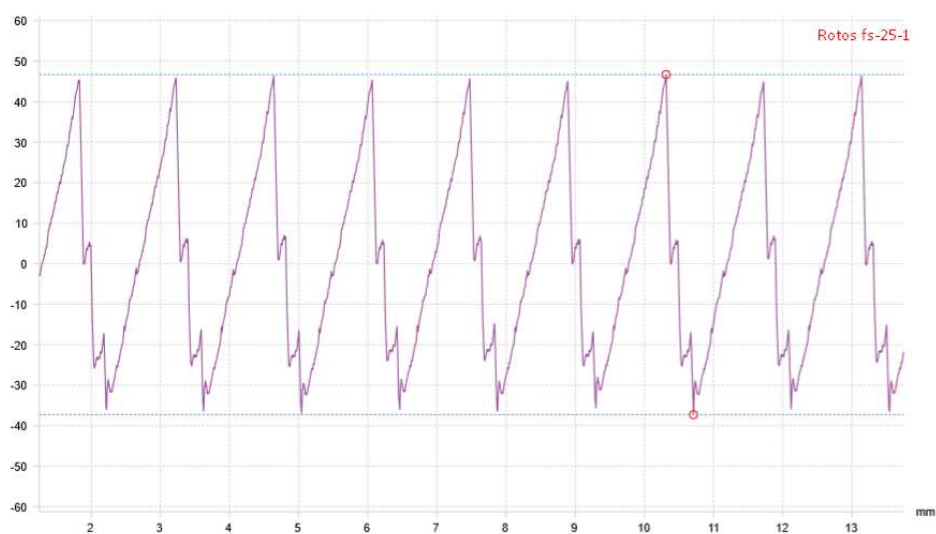
fs-25	Ra	Rz	Rmax	RSm	Pa	Pt	Wa	Wt	počet MIN
Měřicí zařízení	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[mm]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	-
PS10	0,2330	0,4139	0,3548	0,0012	-	-	-	-	0
PGK	0,0662	0,2803	0,3489	0,0025	0,1032	0,9159	0,0542	0,4707	5
LD120	0,1939	0,5934	0,2689	0,0011	0,2538	1,6802	0,1723	1,3163	2
Rotos	0,1208	0,4790	0,4638	0,0908	0,0212	1,0823	0,2123	0,9983	1



Obr. 5.17: Profil drsnosti vzorku fs-25 z PS 10



Obr. 5.18: Profil drsnosti vzorku fs-25 z LD 120



Obr. 5.19: Profil drsnosti vzorku fs-25 měřený na CMM PRISMO jednotkou Rotos

## 5.5 Vzorek fv-12,5: frézování válcovou frézou ze rychlořezné oceli

Tento vzorek byl měřen s hodnotou cut-off 2,5 mm. Všechny vzorky frézování válcovou frézou disponují jednoduchou periodickou strukturou povrchu. Ani tato skutečnost však nezabezpečila konzistenci naměřených dat na jednotlivých přístrojích.

Příklad tohoto vzorku je význačný v tom, že nejmenšími odchylkami naměřených hodnot disponují ruční drsnoměr PS 10 při měření a vyhodnocování profilu drsnosti, a Rotos při profilu vlnitosti a základním. Na druhou stranu lze na obr. 5.20 sledovat z minulých kapitol opakující se záseky při stoupání po výstupcích při kontrole profilu pomocí PS 10 způsobené s největší pravděpodobností kombinací vlivů rychlosti posuvu, přítlačné síly a vůle měřicí soustavy vzorek-měřidlo. Tyto záseky se ovšem opakovaly u každého výstupku, tudíž směrodatná odchylka není nijak výrazná nýbrž naopak, je dokonce nejmenší u parametrů drsnosti.

I přes odchylky v reprezentativních hodnotách parametrů profilu se přístroje PGK a LD 120 téměř shodovaly v grafickém záznamu průběhu profilů. Odchylky v tomto případě nejspíše zapříčinil rozdíl v počtu nasnímaných bodů (PGK - 11 666 bodů, LD 120 - 17 488 bodů).

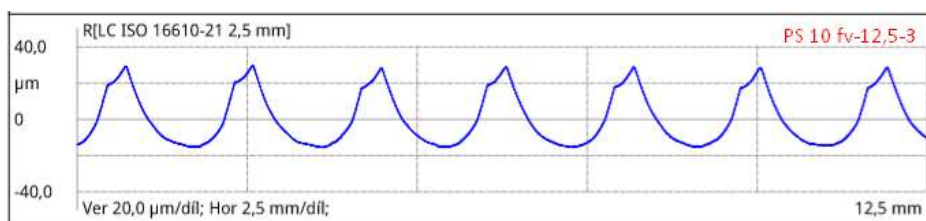
Na obr. 5.22 je pro ukázkou zobrazen souhrnný průběh všech tří profilů povrchu nasnímaný zařízením Rotos. Profil byl nasnímán 30 001 body za rychlosti posuvu 0,5 mm/s. Je zřetelně vidět, že Rotos neměl problémy s profily P a W. V profilu drsnosti se v prohlubních vyskytují určité nerovnosti v rozlišení jednotek mikrometrů, které nelze pozorovat u laboratorních profiloměrů. Tato skutečnost může naznačovat, že je u zařízení Rotos nastavená příliš nízká hodnota filtru  $\lambda_s$ , která má za úkol odfiltrovat nejkratší vlnové složky a tím do měření nezahrnovat nejmenší chvění způsobené samotným pohybem jak měřicí jednotky, tak v tomto případě chvění celého souřadnicového měřicího stroje.

Tab. 5.8: Reprezentativní hodnoty měření vzorku fv-12,5

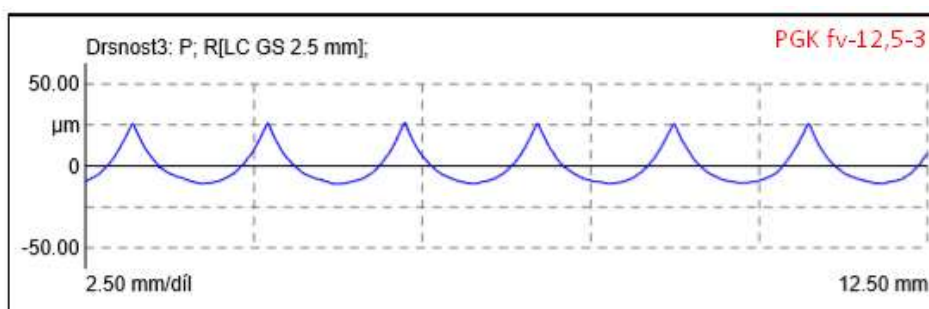
fv-12,5	Ra	Rz	Rmax	RSm	Pa	Pt	Wa	Wt
Měřicí zařízení	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[mm]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]
PS10	12,5198	44,0372	44,9702	1,8651	-	-	-	-
PGK	9,1776	38,5133	38,9168	2,0080	14,0468	57,0777	4,8049	17,4782
LD120	10,2981	41,7091	42,3998	1,8724	14,1679	60,0815	4,2341	15,8476
Rotos	9,4305	39,5219	40,1536	1,8422	13,4269	55,0811	3,9312	15,3365
Vzorkovnice	11,75							

Tab. 5.9: Hodnoty výběrových směrodatných odchylek měření vzorku fv-12,5

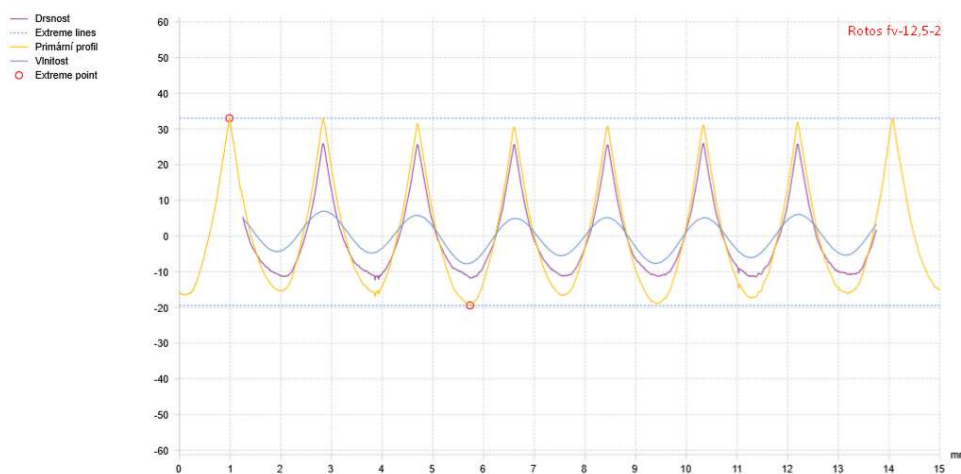
fv-12,5	Ra	Rz	Rmax	RSm	Pa	Pt	Wa	Wt	počet MIN
Měřicí zařízení	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[mm]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	-
PS10	0,2360	0,6170	0,5524	0,0009	-	-	-	-	4
PGK	0,4399	1,6878	1,6191	0,0018	0,8017	2,8772	0,2486	0,7091	0
LD120	0,7281	2,4879	2,4612	0,0014	0,7125	5,2125	0,2813	1,2458	0
Rotos	0,4590	2,0562	1,9641	0,1805	0,6207	2,7536	0,2329	0,5947	4



Obr. 5.20: Profil drsnosti vzorku fv-12,5 z PS 10



Obr. 5.21: Profil drsnosti vzorku fv-12,5 z PGK



Obr. 5.22: R, W, P profil vzorku fv-12,5 měřené jednotkou Rotos

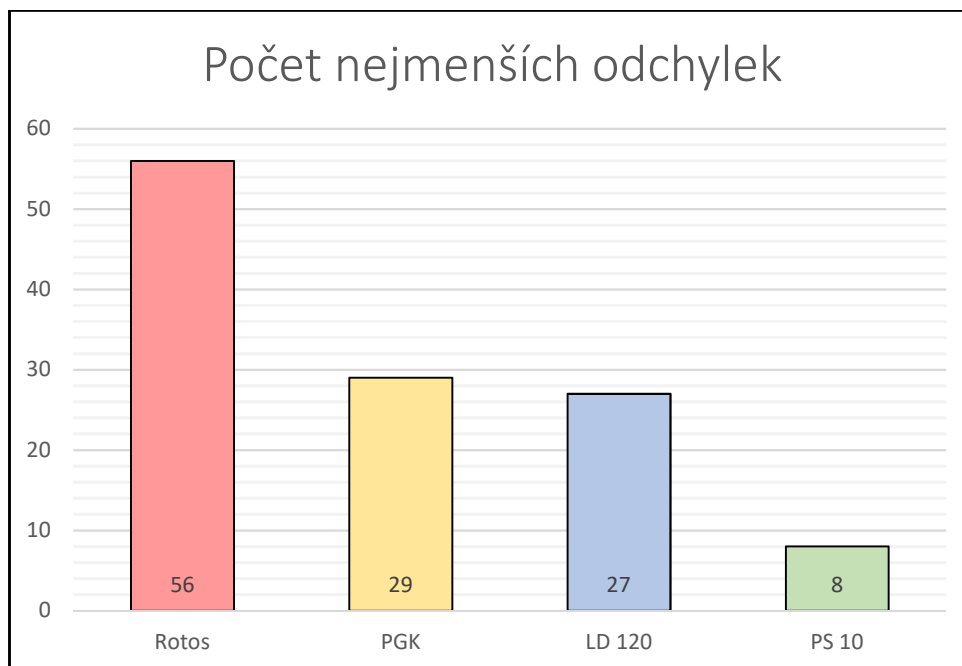
## 5.6 Nejistoty měřených parametrů

Správnost výsledků kontroly se odvíjí od spolehlivosti měření. Aby měření splňovalo podmínky opakovatelnosti je nutné, aby dosahovalo při opakovaných měřeních co nejmenší odchylky jednotlivých naměřených hodnot.

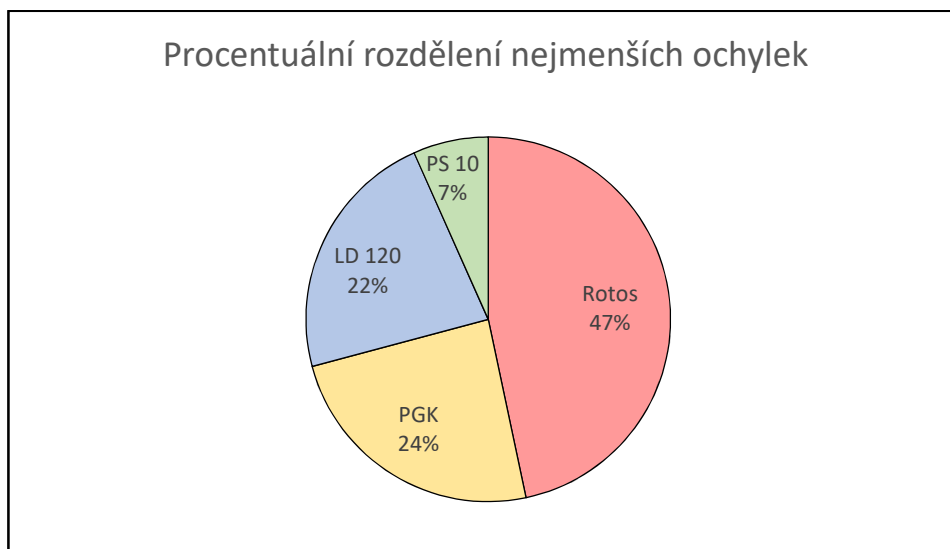
Tabulka 5.10 zobrazuje vyhodnocení nejmenších výběrových směrodatných odchylek jednotlivých parametrů na měřených vzorcích. Je z ní patrné, že Rotos (červená pole) zastává nejvíce konzistentní vyhodnocování parametrů základního profilu a průměrné aritmetické úchyly profilu drsnosti  $Ra$ . V grafech na obr. 5.23 a 5.24 lze vidět, že Rotos dosáhl nejmenších hodnot  $s$  v 47 % naměřených parametrů na všech vzorcích, tedy téměř v polovině případů. Je nutno však podotknout, že se nejedná o posuzování správnosti měření, nýbrž o schopnost opakovatelnosti měření. U každého měření s PS 10 se buď se vzorkem či s měřicí jednotkou pohybovalo manuálně a podle diagramů odchylek je zřejmé, že tím nesplňoval podmínky opakovatelnosti. Druhým extrémem byl právě Rotos, který svým pevným upnutím, přesným řízením a automatickým snímáním bez zásahů člověka dosáhl velice dobrých výsledků ohledně dodržení podmínek opakovatelnosti.

Tab. 5.10: Přístroje s nejmenší nejistotou měření

		Ra	Rz	Rmax	RSm	Pa	Pt	Wa	Wt
označení vzorku	přístroj s nejmenší výběrovou směrodatnou odchylkou								
f-	1,6	Rotos	LD 120	LD 120	PGK	Rotos	Rotos	PGK	PGK
	3,2	LD 120	PGK	PGK	PGK	Rotos	Rotos	LD 120	Rotos
	6,3	Rotos	LD 120	PGK	LD 120	Rotos	PGK	LD 120	LD 120
	12,5	PGK	LD 120	PGK	PGK	LD 120	LD 120	PGK	PGK
	25	Rotos	Rotos	Rotos	PGK	LD 120	LD 120	Rotos	PGK
fs-	1,6	Rotos	Rotos	Rotos	PGK	Rotos	Rotos	LD 120	LD 120
	3,2	Rotos	PGK	PS 10	LD 120	LD 120	Rotos	Rotos	PGK
	6,3	Rotos	Rotos	PS 10	PS 10	Rotos	Rotos	PGK	PGK
	12,5	PS 10	PGK	PGK	Rotos	LD 120	Rotos	PGK	Rotos
	25	PGK	PGK	LD 120	LD 120	Rotos	PGK	PGK	PGK
fv-	1,6	Rotos	Rotos	Rotos	PGK	Rotos	Rotos	Rotos	LD 120
	3,2	Rotos	Rotos	Rotos	LD 120	Rotos	Rotos	Rotos	Rotos
	6,3	Rotos	Rotos	Rotos	LD 120	Rotos	Rotos	LD 120	LD 120
	12,5	PS 10	PS 10	PS 10	PS 10	Rotos	Rotos	Rotos	Rotos
	25	Rotos	PGK	Rotos	PGK	Rotos	Rotos	Rotos	Rotos



Obr. 5.23: Graf počtu nejmenších výběrových směrodatných odchylek na jednotlivých přístrojích



Obr. 5.24: Výšečový graf nejmenších hodnot nejstot



## 6 ZÁVĚR

Tato práce se zabývala problematikou měření profilu povrchu. Byla popsána teorie profilu povrchu podle norem a přehled metod, jakými lze povrch kontrolovat. Blíže byly popsány metody dotykové, jelikož těmi se tato práce především zabývá. Dalším cílem bylo popsat možnosti měření na souřadnicových měřicích strojích, jelikož přínos této bakalářské práce spočívá právě v uvedení možnosti měření profilu povrchu na CMM a její zhodnocení v porovnání s jinými přístroji pracujícími na dotykovém principu zkoumání profilu povrchu.

Další část čtenáře provádí teoretickou průpravou o měřených vzorcích, použitých přístrojích, prováděním měření, způsobu vyhodnocování a o vlivech, které měření mohou ovlivňovat.

V části vlastního vyhodnocení jsou popisovány měření na konkrétních vzorcích a zhodnocovány dopady vlivů přístrojů na měření. Pro celkové zhodnocení jsou také rozebírány nejistoty měření na jednotlivých strojích závislé na vzorku a vyhodnocovaném parametru.

Vzhledem k získaným výsledkům měření je zřejmé, že pro tuto oblast metrologie, tedy měření profilu povrchu, platí pravidlo, že kvalita jde ruku v ruce s cenou. Ve výroбах, kde je nutné provést pouze zběžnou kontrolu drsnosti bohatě postačuje využití nových ručních drsnoměrů. Pro měřová střediska a středně velké výroby malých, tvarově rozmanitých součástí je nevhodnějším zařízením laboratorní profiloměr, který spolehlivě kontroluje velkou škálu parametrů profilu povrchu v některých případech i s možností kontroly kontur. Pro sériové a velkosériové výroby, které disponují aktivním snímacím systémem na souřadnicovém měřicím stroji je možnost měření profilu povrchu přímo na CMM velice lukrativní záležitostí. Výsledky z měření této práce ukázaly, že pro základní kontrolu profilu povrchu je konkrétně zařízení Rotos více než dostačující. Při zařazení kontroly profilu povrchu do procesu kontroly součástí na CMM by se bezesporu zvedla produktivita měření, oproti měření na CMM a následně na jiném zařízení pro kontrolu profilu povrchu. Zároveň lze na souřadnicových měřicích stojících kontrolovat i součásti, které z rozměrových důvodů již nelze měřit na laboratorních dotykových přístrojích.

## 7 SEZNAMY

### 7.1 Seznam použitých zkratek

CAD	Computer Aided Design (počítačová podpora konstruování)	
CMM	Coordinated Measuring Machine (souřadnicový měřicí stroj)	
ČSN	česká státní norma	
EN	evropská norma	
ISO	mezinárodní organizace pro normalizaci	
PC	personal computer (osobní počítač)	
EMO	Exposition mondiale de la machine-outil (Světová výstava obráběcích strojů)	
CT	Computed Tomography	
USB	Universal Serial Bus (univerzální sériová sběrnice)	
3D	three-dimensional (trojrozměrný)	
2D	two-dimensional (dvourozměrný)	
R	profil drsnosti	
W	profil vlnitosti	
P	základní profil	
<i>n</i>	počet prvků	
<i>X</i>	délková souřadnice	
<i>Z</i>	výšková souřadnice	
<i>s</i>	výběrová směrodatná odchylka	( $\mu\text{m}$ , mm)
<i>S</i>	plocha	( $\text{mm}^2$ )
<i>ln</i>	vyhodnocovaná délka	(mm)
<i>lr</i>	základní délka	(mm)
<i>lt</i>	celková dráha snímače	(mm)
$\lambda_s$	krátkovlnný filtr	(mm)
$\lambda_c$	mezní vlnová délka (cut-off)	(mm)
$\lambda_f$	dlouhovlnný filtr	(mm)
<i>Zp</i>	výška výstupku	( $\mu\text{m}$ )
<i>Zv</i>	hloubka prohlubně	( $\mu\text{m}$ )
<i>Ra, Wa, Pa</i>	průměrná aritmetická úchylka daného profilu	( $\mu\text{m}$ )
<i>RSm, WSm, PSm</i>	průměrná šířka prvku daného profilu	(mm)
<i>Rz, Wz, Pz</i>	největší výška daného profilu (aritmetická střední hodnota)	( $\mu\text{m}$ )
<i>f</i>	vzorek frézování čelní frézou z rychlořezné oceli	
<i>fs</i>	vzorek frézování čelní frézou ze slinutého karbidu	
<i>fv</i>	vzorek frézování válcovou frézou z rychlořezné oceli	
pm	pikometr	( $10^{-12}$ m)
nm	nanometr	( $10^{-9}$ m)
$\mu\text{m}$	mikrometr	( $10^{-6}$ m)
mm	milimetr	( $10^{-3}$ m)
mN	milinewton	( $10^{-3}$ N)
N/m	newton na metr	
mm/s	milimetr za sekundu	

## 7.2 Seznam použitých zdrojů

- [1] BUMBÁLEK, Bohumil, Vladimír ODVODY a Bohuslav OŠŤÁDAL. *Drsnost povrchu*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989.
- [2] ČSN EN ISO 8785. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Nedokonalosti povrchu - Termíny, definice a parametry*. Český normalizační institut, 2000.
- [3] ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Český normalizační institut, 1999.
- [4] ČSN EN ISO 4288. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*. Český normalizační institut, 1999.
- [5] ČSN EN ISO 3274. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Jmenovité charakteristiky dotykových (hrotových) přístrojů*. Český normalizační institut, 1999.
- [6] ČSN EN ISO 13565-1. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda: povrch mající stratifikované funkční vlastnosti - Část 1: Filtrace a všeobecné podmínky měření*. Český normalizační institut, 1999.
- [7] LEINVEBER, Jan a Josef ŠVERCL. *Technické kreslení a základy deskriptivní geometrie*. 3. přeprac. vyd. Praha: Scientia, 1999. ISBN 80-7183-162-x.
- [8] SLANEC, Karel. *Konstruování: geometrická přesnost výrobků*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02864-x.
- [9] Drsnost povrchu dle DIN EN ISO. *HOMMEL CS s.r.o.* [online]. [cit. 2018-06-18]. Dostupné z: <https://www.hommel-etamic.cz/cz/technicke-informace/drsnost-povrchu-dle-din-en-iso/>
- [10] Kruhové vzorky drsnosti povrchu VP031-3 frézování čelní a válcové. In: *nastrojenaradi.cz* [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://www.nastrojenaradi.cz/kruhove-vzorky-drsnosti-povrchu-vp031-3-frezovani-celni-a-valcove>
- [11] Měřicí technika jako součást výrobního procesu. *MM Spektrum* [online]. 08.03.2016, **2016**(3) [cit. 2018-07-22]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/merici-technika-jako-soucast-vyrobniho-procesu.html>
- [12] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2006. ISBN 9788024812090.
- [13] PETŘKOVSKÁ, Lenka a Lenka ČEPOVÁ. *Metrologie a řízení kvality: učební text*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2771-1.
- [14] Advanced Measurement Performance. *Olympus IMS* [online]. [cit. 2018-06-20]. Dostupné z: <https://www.olympus-ims.com/cs/metrology/ols4000/#>
- [15] KUSÁK, Ivo. Konfokální mikroskop. In: *Ústav fyziky, Fakulta stavební, VUT* [online]. [cit. 2018-07-02]. Dostupné z: [http://fyzika.fce.vutbr.cz/file/kusak/konfokalni\\_mikroskopie.pdf](http://fyzika.fce.vutbr.cz/file/kusak/konfokalni_mikroskopie.pdf)

- [16] Měření drsnosti. *M&B Calibr* [online]. [cit. 2018-07-02]. Dostupné z: <http://www.mbcaltbr.cz/mereni-drsnosti.html>
- [17] White Light Interferometric Microscope Systems. *Nikon: Industrial Metrology* [online]. [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: [https://www.nikon.com/products/industrial-metrology/lineup/wl\\_interferometric/bw-s500\\_bw-d500/index.htm](https://www.nikon.com/products/industrial-metrology/lineup/wl_interferometric/bw-s500_bw-d500/index.htm)
- [18] Produkty. *Mitutoyo* [online]. [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: [http://www.mitutoyo.cz/cs\\_cz/](http://www.mitutoyo.cz/cs_cz/)
- [19] Products. *Mahr: Production Metrology* [online]. [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: <https://www.mahr.com/en-us/Services/Production-metrology/Products/>
- [20] PODIVÍNSKÝ, Tomáš Jan a Tomáš EHLER. NĚMECKÝ FENOMÉN INDUSTRIE 4.0. *CzechTrade* [online]. 2016 [cit. 2018-07-22]. Dostupné z: <https://www.czechtrade.cz/media/czechtrade-media/monitoring/nemecky-fenomen-industrie-4-0>
- [21] NENÁHLO, Čeněk. Souřadnicová měřicí technika. *MM Průmyslové spektrum*. **2011**(3). [online]. [cit. 2018-07-02]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/souradnicova-merici-technika.html>
- [22] BOSCH, John A. *Coordinate measuring machines and systems*. New York: M. Dekker, c1995. ISBN 0824795814.
- [23] Laser trackery. *Hexagon* [online]. [cit. 2018-07-12]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/laser-tracker-systems>
- [24] Measuring Instruments. *Leeport Technology Ltd.*[online]. [cit. 2018-07-10]. Dostupné z: <http://www.leeport.com.hk/lists/index/Leeport-Technology-Ltd-products>
- [25] Carl Zeiss: Průmyslová měřicí technika. *Carl Zeiss* [online]. 2015 [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: [http://www.zeiss.cz/industrial-metrology/cs\\_cz/produkty/systemy/large-cmms/mmz-b.html](http://www.zeiss.cz/industrial-metrology/cs_cz/produkty/systemy/large-cmms/mmz-b.html)
- [26] ZEISS 3D Automation Webshop. *Carl Zeiss* [online]. [cit. 2018-07-12]. Dostupné z: [https://world.probes.zeiss.com/index.php?force\\_sid=u7n49j462i2krqjg816tei7165&](https://world.probes.zeiss.com/index.php?force_sid=u7n49j462i2krqjg816tei7165&)
- [27] Gerald Geake: Technical Illustration. Gerald Geake [online]. 2014 [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: [http://www.geraldgeake.co.uk/images/renscan\\_lg.jpg](http://www.geraldgeake.co.uk/images/renscan_lg.jpg)
- [28] KRUTH, J.P., M. BARTSCHER, S. CARMIGNATO, R. SCHMITT, L. DE CHIFFRE a A. WECKENMANN. Computed tomography for dimensional metrology. *CIRP Annals* [online]. 2011, **60**(2), 821-842 [cit. 2018-07-22]. DOI: 10.1016/j.cirp.2011.05.006. ISSN 00078506. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850611002083>
- [29] Blätterkatalog. In: *Mahr: MahrSurf* [online]. [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: [https://www.mahr.com/onlinecatalogs/Mahr-Metrology/index.html?catalog=Mahr-Metrology-CZ-2017&lang=cs\\_CZ#page\\_460](https://www.mahr.com/onlinecatalogs/Mahr-Metrology/index.html?catalog=Mahr-Metrology-CZ-2017&lang=cs_CZ#page_460)
- [30] Accessory & Probes from Mahr, Inc. *Component Distributors, Inc.* [online]. [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: <https://www.cdiweb.com/ProductDetail/6820602-Mahr-Inc/485980/>

- [31] Contact and optical sensors. In: *Industrial Metrology* [online]. s. 40 [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: [https://applications.zeiss.com/C1257A26006EFF9E/0/E906E71D828B06FEC1257A45002E8D95/\\$FILE/ZEISS\\_Metrology\\_Sensors\\_EN\\_60\\_020\\_00011I.pdf](https://applications.zeiss.com/C1257A26006EFF9E/0/E906E71D828B06FEC1257A45002E8D95/$FILE/ZEISS_Metrology_Sensors_EN_60_020_00011I.pdf)
- [32] Precision material with practically zero expansion. *SCHOTT* [online]. Mainz, Germany, 2018 [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: <https://www.schott.com/english/news/press.html?NID=com5403>
- [33] All Features, One Measuring Machine: The new ZEISS ROTOS roughness sensor. In: *Measuring innovation: Sensor/ZEISS ROTOS*. [cit. 2018-07-25]. Dostupné ke stažení: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/brochures.html?catalog=rotos>
- [34] LUDVÍK, Vladimír. *Nejistoty měření* [online]. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005 [cit. 2018-07-30]. Sborníky technické harmonizace. Dostupné z: [http://www.unmz.cz/sborniky\\_th/sb8/nejistoty.pdf](http://www.unmz.cz/sborniky_th/sb8/nejistoty.pdf)
- [35] Řízení jakosti - 3. Prezentace: Základy statistiky, část 2. [cit. 2018-07-25]. Dostupné ke stažení: <http://utopm.fsid.cvut.cz/?udaj=predmet&id=C42005>

## 7.3 Seznam obrázků

Obr. 1.1: Povrch obráběný soustružením [7]	10
Obr. 1.2: Profil povrchu [3]	11
Obr. 1.3: Schéma délek vyhodnocovaného profilu [9]	12
Obr. 1.4: Přenosová charakteristika filtrace profilu povrchu [3]	14
Obr. 1.5: Schématické znázornění postupu filtrace profilu povrchu	15
Obr. 1.6: Grafické znázornění parametru $R_t$ (příklad profilu drsnosti)	17
Obr. 1.7: Grafické znázornění parametru $R_z$ (příklad profilu drsnosti)	18
Obr. 1.8: Ukázka variability profilů se stejnou hodnotou parametru $R_a$ [8]	18
Obr. 1.9: Ukázka vyhodnocení Abbotovy křivky (vpravo) z profilu drsnosti	19
Obr. 2.1: Kruhová vzorkovnice drsností povrchu [10]	21
Obr. 2.2: Metoda světelného řezu [13]	23
Obr. 2.3: Schéma principu interferometru a jeho výstup (vpravo) [13]	23
Obr. 2.4: Měření profilu povrchu laserem [14]	24
Obr. 2.5: Měření profilu povrchu profiloměrem [14]	24
Obr. 2.6: Pracoviště interferometrického mikroskopového systému s využitím bílého světla BW-S507 [17]	25
Obr. 2.7: Digitální záznam měření ze zařízení BW-S507 [17]	25
Obr. 2.8: Příklad měřicí smyčky dotykového přístroje [5]	26
Obr. 2.9: Drsnoměr Surf test SJ-210 [18]	28
Obr. 2.10: Pracoviště pro měření drsností a kontur Marsurf XCR 20 [19]	28
Obr. 3.1: Výložníkový CMM DuraMax od firmy Carl ZEISS [25]	30
Obr. 3.2: Laboratorní CMM mostové konstrukce – ZEISS Contura [25]	31
Obr. 3.3: Variace odražečů a Laser Tracker Radian od API (vpravo) [24]	32
Obr. 3.4: Druhy snímacích systémů	33
Obr. 3.5: Ukázka konfigurace snímacího systému VAST [25]	35
Obr. 3.6: Pětiosý snímací systém REVO [27]	35
Obr. 3.7: Snímač LineScan od firmy Carl ZEISS [25]	35
Obr. 3.8: Hlava SURFTEST [18]	36

Obr. 4.1: Vzorkovnice frézování	37
Obr. 4.2: Průvodní list vzorkovnice	38
Obr. 4.3: Mahr MarSurf PS 10 [29]	39
Obr. 4.4: Příklad protokolu z PS 10 vzorku f-1,6	40
Obr. 4.5: Sestava přístroje se zařízením PGK 20	41
Obr. 4.6: Ukázka etalonu drsnosti Mahr PGN - 3 [30]	42
Obr. 4.7: Detail měření s jednotkou PGK	42
Obr. 4.8: Pracoviště s přístrojem MarSurf LD 120	43
Obr. 4.9: Detail měření na LD 120	43
Obr. 4.10: Ukázka protokolu ze zařízení LD 120	44
Obr. 4.11: ZEISS PRISMO navigator s hlavicí VAST a upnutým zařízením Rotos	45
Obr. 4.12: Maximální natočení zařízení Rotos [33]	46
Obr. 4.13: Etalony drsnosti pro ZEISS PRISMO	47
Obr. 4.14: Zařízení ZEISS Rotos s kalibrační koulí	47
Obr. 4.15: Detail snímání profilu povrchu zařízením Rotos	48
Obr. 4.16: Detail ve směru snímání zařízením Rotos	48
Obr. 5.1: Profil drsnosti na vzorku f-1,6 při druhém měření ručním drsnoměrem PS 10	52
Obr. 5.2: Profil drsnosti vzorku f-1,6 laboratorní jednotkou profiloměru PGK	52
Obr. 5.3: Profil drsnosti vzorku f-1,6 laboratorním profiloměrem LD 120	52
Obr. 5.4: Profil drsnosti vzorku f-1,6 při $\lambda_c = 0,25$ mm měřený na CMM pomocí jednotky Rotos	53
Obr. 5.5: Profil drsnosti vzorku f-1,6 při $\lambda_c = 0,8$ mm měřený na CMM s jednotkou Rotos	53
Obr. 5.6: Profil drsnosti vzorku f-3,2 z PS 10	55
Obr. 5.7: Profil drsnosti vzorku f-3,2 z PGK	55
Obr. 5.8: Profil vlnitosti vzorku f-3,2 z PGK	55
Obr. 5.9: Profil drsnosti vzorku f-3,2 z LD 120	55
Obr. 5.10: Profil vlnitosti vzorku f-3,2 z LD 120	56
Obr. 5.11: R, W, P profil vzorku f-3,2 měřené jednotkou Rotos	56
Obr. 5.12: Profil vlnitosti vzorku f-3,2 měřený na CMM PRISMO jednotkou Rotos	56
Obr. 5.13: Profil drsnosti vzorku f-12,5 z PS 10	58
Obr. 5.14: Profil drsnosti vzorku f-12,5 z PGK	58
Obr. 5.15: Profil drsnosti vzorku f-12,5 z LD 120	58
Obr. 5.16: Profil drsnosti vzorku f-12,5 měřený na CMM PRISMO jednotkou Rotos	58
Obr. 5.17: Profil drsnosti vzorku fs-25 z PS 10	60
Obr. 5.18: Profil drsnosti vzorku fs-25 z LD 120	60
Obr. 5.19: Profil drsnosti vzorku fs-25 měřený na CMM PRISMO jednotkou Rotos	60
Obr. 5.20: Profil drsnosti vzorku fv-12,5 z PS 10	62
Obr. 5.21: Profil drsnosti vzorku fv-12,5 z PGK	62
Obr. 5.22: R, W, P profil vzorku fv-12,5 měřený jednotkou Rotos	62
Obr. 5.23: Graf počtu nejmenších výběrových směrodatných odchylek na jednotlivých přístrojích	64
Obr. 5.24: Výšečový graf nejmenších hodnot nejistot	64

## 7.4 Seznam tabulek

Tab. 1.1: Volba mezní vlnové délky periodických profilů [4]	13
Tab. 1.2: Volba mezní vlnové délky aperiodických profilů podle [4]	13
Tab. 5.1: Reprezentativní hodnoty měření vzorku f-1,6	52
Tab. 5.2: Průměrné hodnoty měření vzorku f-3,2	54
Tab. 5.3: Hodnoty výběrových směrodatných odchylek měření vzorku f-3,2	54

Tab. 5.4: Reprezentativní hodnoty měření vzorku f-12,5	57
Tab. 5.5: Hodnoty výběrových směrodatných odchylek měření vzorku f-12,5	57
Tab. 5.6: Reprezentativní hodnoty měření vzorku fs-25	59
Tab. 5.7: Hodnoty výběrových směrodatných odchylek měření vzorku fs-25	60
Tab. 5.8: Reprezentativní hodnoty měření vzorku fv-12,5	61
Tab. 5.9: Hodnoty výběrových směrodatných odchylek měření vzorku fv-12,5	62
Tab. 5.10: Přístroje s nejmenší nejistotou měření	63

## 7.5 Seznam rovnic

Rovnice (1.1) Střední čára	12
Rovnice (1.2) Celková výška profilu Rt, Wt, Pt	17
Rovnice (1.3) Celková výška profilu drsnosti (aritmetická střední hodnota) Rz	17
Rovnice (1.4) Průměrná aritmetická úchylka Ra, Wa, Pa	18
Rovnice (1.5) Úchylka aritmetického průměru Rq, Wq, Pq	18
Rovnice (1.6) Aritmetický průměr šířek prvků RSm, WSm, PSm	19
Rovnice (4.1) Výběrová směrodatná odchylka s	50
Rovnice (4.2) Aritmetický průměr	50
Rovnice (4.3) Reprezentativní hodnota Rr	50

## 8 PŘÍLOHY

- CD:
  - Souhrnný protokol PS 10
  - Souhrnný protokol PGK
  - Souhrnný protokol LD 120
  - Souhrnný protokol CMM s Rotos