

Nadogradnja uređaja za ispitivanje hrapavosti Perthometer S8P

Grbavac, Maja

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:200672>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-18**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Maja Grbavac

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Doc. dr. sc. Gorana Baršić, dipl. ing.

Student:

Maja Grbavac

Zagreb, 2020.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorici doc. dr. sc. Gorani Baršić na pomoći pruženoj tijekom pisanja rada te svojoj obitelji na podršci.

Maja Grbavac



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite
Povjerenstvo za diplomске radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MAJA GRBAVAC** Mat. br.: 0035201023

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Nadogradnja uređaja za ispitivanje hrapavosti Perthometer S8P**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The upgrade of stylus instrument Perthometer S8P**

Opis zadatka:

Tehnički protokoli ključnih EURAMET usporedbi parametara hrapavosti uključuju definirane položaje mjernih tragova s obzirom na dimenzije mjernih površina etalona hrapavosti. Uređaj za ispitivanje hrapavosti Perthometer S8P nema mogućnost pozicioniranja igle ticala s obzirom na mjernu površinu predmeta mjerenja. Nemogućnost pozicioniranja igle ticala prema pozicijama definiranim u tehničkom protokolu usporedbe posljedično rezultira mjerenjem traga na drugoj poziciji, a što utječe na ostvarene mjerne rezultate parametara hrapavosti. Zbog navedenog ograničenja mjernog uređaja u diplomskom radu potrebno je:

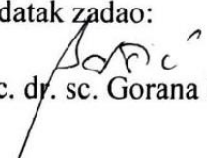
1. Detaljno opisati značajke mjernog uređaja Perthometer S8P i njegovu namjenu.
2. Predložiti i implementirati rješenje nadogradnje mjernog uređaja Perthometer S8P kojim će se osigurati mogućnost pozicioniranja igle ticala s obzirom na mjernu površinu predmeta mjerenja.
3. Definirati izbor položaja mjernih tragova s obzirom na veličinu mjerne površine etalona i zahtijevanu graničnu vrijednost Gauss-ovog filtera.
4. Provesti mjerenja parametara hrapavosti na etalonima različitih veličina mjernih površina i zahtijevanih graničnih vrijednosti Gauss-ovog filtera.
5. Donijeti zaključak o uspješnosti provedene nadogradnje uređaja za ispitivanje hrapavosti Perthometer S8P.

U radu je potrebno navesti literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
14. studenog 2019.

Rok predaje rada:
16. siječnja 2020.

Predviđeni datum obrane:
20. siječnja do 24. siječnja 2020.

Zadatak zadao:

doc. dr. sc. Gorana Baršić

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. HRAPAVOST I PARAMETRI HRAPAVOSTI	2
2.1. Hrapavost	2
2.2. Parametri hrapavosti	4
3. ELEKTRONIČKO-MEHANIČKI UREĐAJ S TICALOM	8
3.1. Uređaji s ticalom	8
3.2. Perthometer S8P	10
4. PRIJEDLOG I IMPLEMENTACIJA NADOGRAĐNJE MJERNOG UREĐAJA.....	11
4.1. Prijedlog i model nadogradnje mjernog uređaja	11
4.2. Potreba za nadogradnjom	14
4.3. Implementacija nadogradnje mjernog uređaja	16
4.3.1. Način povezivanja elemenata mjernog sustava.....	16
4.3.2. Elementi vizijskog sustava – kamera	17
4.3.3. Elementi vizijskog sustava – osvjetljenje.....	21
4.3.4. Translacijski elementi	22
5. ODREĐIVANJE POLOŽAJA MJERNIH TRAGOVA NA UZORKU.....	24
5.1. Način raspodjele mjernih točaka na mjernoj površini.....	24
5.2. Određivanje početnih točaka mjerenja	32
6. PROVOĐENJE MJERENJA	36
6.1. Vizualni pregled etalona pomoću kamere	36
6.2. Dovođenje ticala, kamere i translacijskih elemenata u vezu.....	40
6.3. Mjerenje	45
6.3.1. Mjerenje etalona pravokutne geometrije profila	45
6.3.2. Mjerenje etalona trokutaste geometrije profila	52
6.3.3. Mjerenje etalona iregularne geometrije profila.....	59
6.4. Analiza mjernih rezultata	67
7. ZAKLJUČAK	68
LITERATURA.....	70

POPIS SLIKA

Slika 1.	Komponente topografije površine	2
Slika 2.	Vrijednosti električnog <i>cut-off</i> filtra.....	3
Slika 3.	Karakteristične duljine ispitivanja.....	3
Slika 4.	Filtrirani i nefiltrirani profili hrapavosti.....	5
Slika 5.	Amplitudni parametri hrapavosti (R_a , R_z)	5
Slika 6.	Amplitudni parametri hrapavosti (R_t , R_v)	6
Slika 7.	Uzdužni parametri hrapavosti	6
Slika 8.	Abott – Firestone krivulja.....	7
Slika 9.	Konstrukcija uređaja s ticalom	8
Slika 10.	Prikaz vanjskog vođenja.....	9
Slika 11.	Prikaz vođenja s nožicom.....	9
Slika 12.	Uređaj Perthometer S8P	10
Slika 13.	Model nadograđenog mjernog uređaja Perthometer S8P	12
Slika 14.	Dijelovi nadograđenog mjernog uređaja Perthometer S8P	13
Slika 15.	Dijelovi nadograđenog mjernog uređaja Perthometer S8P	13
Slika 16.	Etaloni korišteni za potrebe međulaboratorijskih usporedbi.....	14
Slika 17.	Način provođenja umjeravanja prema EURAMET protokolu.....	15
Slika 18.	Prikaz LED osvjetljenja (lijevo) te sustav bez osvjetljenja (desno).....	16
Slika 19.	Osnovni dijelovi digitalne kamere	17
Slika 20.	Radni parametri leće.....	18
Slika 21.	Odnos žarišne duljine i vidnog polja	19
Slika 22.	Kamera DFK 72BUC02	20
Slika 23.	Telecentrični objektiv te prikaz načina rada objektiva.....	20
Slika 24.	Interakcija svjetlosti i osvjetljivanje površine	21
Slika 25.	LED osvjetljenje te prikaz načina rada osvjetljenja	22
Slika 26.	Kontrolor (gore) i translacijski element (dolje).....	23
Slika 27.	Raspored tragova mjerenja – Tip 1	26
Slika 28.	Raspored tragova mjerenja – Tip 2	27
Slika 29.	Raspored tragova mjerenja – Tip 1	28
Slika 30.	Raspored mjernih tragova – Tip 3	29
Slika 31.	Raspored mjernih tragova – Tip 4	30
Slika 32.	Raspored mjernih tragova – Tip 3	31
Slika 33.	Redoslijed mjerenja etalona	32
Slika 34.	Raspored mjernih tragova – Tip 3	33
Slika 35.	Raspored mjernih tragova – Tip 2	34
Slika 36.	Raspored mjernih tragova – Tip 1	35
Slika 37.	Prvi dio mjerne površine sa slijedom pravokutnih brazdi.....	37
Slika 38.	Drugi dio mjerne površine sa slijedom pravokutnih brazdi	37
Slika 39.	Treći dio mjerne površine sa slijedom pravokutnih brazdi	38
Slika 40.	Prvi dio mjerne površine sa iregularnim profilima hrapavosti.....	39
Slika 41.	Drugi dio mjerne površine sa iregularnim profilima hrapavosti	39
Slika 42.	Treći dio mjerne površine sa iregularnim profilima hrapavosti	40

Slika 43.	Prikaz incijalizacije translacijskih elemenata.....	41
Slika 44.	Uzorak postavljen na translacijske elemente.....	41
Slika 45.	Nitni križ kamere usklađen sa ishodištem koordinatnog sustava na uzorku.....	42
Slika 46.	Dovođenje igle ticala u točku ishodišta na uzorku.....	43
Slika 47.	Način unošenja pomaka translacijskog elementa u smjeru X osi	44
Slika 48.	Način unošenja pomaka translacijskog elementa u smjeru Y osi	44
Slika 49.	Grafički prikaz prvog traga iz prve serije mjerenja (pravokutni profil).....	45
Slika 50.	Grafički prikaz drugog traga iz prve serije mjerenja (pravokutni profil).....	46
Slika 51.	Grafički prikaz trećeg traga iz prve serije mjerenja (pravokutni profil)	46
Slika 52.	Grafički prikaz četvrtog traga iz prve serije mjerenja (pravokutni profil)	46
Slika 53.	Grafički prikaz petog traga iz prve serije mjerenja (pravokutni profil)	47
Slika 54.	Grafički prikaz šestog traga iz prve serije mjerenja (pravokutni profil)	47
Slika 55.	Grafički prikaz prvog traga iz druge serije mjerenja (pravokutni profil).....	47
Slika 56.	Grafički prikaz drugog traga iz druge serije mjerenja (pravokutni profil).....	48
Slika 57.	Grafički prikaz trećeg traga iz druge serije mjerenja (pravokutni profil)	48
Slika 58.	Grafički prikaz četvrtog traga iz druge serije mjerenja (pravokutni profil)	48
Slika 59.	Grafički prikaz petog traga iz druge serije mjerenja (pravokutni profil)	48
Slika 60.	Grafički prikaz šestog traga iz druge serije mjerenja (pravokutni profil)	49
Slika 61.	Grafički prikaz prvog traga iz treće serije mjerenja (pravokutni profil)	49
Slika 62.	Grafički prikaz drugog traga iz treće serije mjerenja (pravokutni profil)	49
Slika 63.	Grafički prikaz trećeg traga iz treće serije mjerenja (pravokutni profil).....	50
Slika 64.	Grafički prikaz četvrtog traga iz treće serije mjerenja (pravokutni profil)	50
Slika 65.	Grafički prikaz petog traga iz treće serije mjerenja (pravokutni profil).....	50
Slika 66.	Grafički prikaz šestog traga iz treće serije mjerenja (pravokutni profil)	51
Slika 67.	Etalon od stakla postavljen na pomične translacijske elemente.....	52
Slika 68.	Nitni križ usklađen sa ishodištem koordinatnog sustava uzorka.....	53
Slika 69.	Grafički prikaz prvog traga iz prve serije mjerenja (trokutasti profil)	53
Slika 70.	Grafički prikaz drugog traga iz prve serije mjerenja (trokutasti profil)	54
Slika 71.	Grafički prikaz trećeg traga iz prve serije mjerenja (trokutasti profil).....	54
Slika 72.	Grafički prikaz četvrtog traga iz prve serije mjerenja (trokutasti profil)	54
Slika 73.	Grafički prikaz petog traga iz prve serije mjerenja (trokutasti profil)	54
Slika 74.	Grafički prikaz šestog traga iz prve serije mjerenja (trokutasti profil)	55
Slika 75.	Grafički prikaz prvog traga iz druge serije mjerenja (trokutasti profil)	55
Slika 76.	Grafički prikaz drugog traga iz druge serije mjerenja (trokutasti profil)	55
Slika 77.	Grafički prikaz trećeg traga iz druge serije mjerenja (trokutasti profil).....	56
Slika 78.	Grafički prikaz četvrtog traga iz druge serije mjerenja (trokutasti profil)	56
Slika 79.	Grafički prikaz petog traga iz druge serije mjerenja (trokutasti profil)	56
Slika 80.	Grafički prikaz šestog traga iz druge serije mjerenja (trokutasti profil)	56
Slika 81.	Grafički prikaz prvog traga iz treće serije mjerenja (trokutasti profil)	57
Slika 82.	Grafički prikaz drugog traga iz treće serije mjerenja (trokutasti profil)	57
Slika 83.	Grafički prikaz trećeg traga iz treće serije mjerenja (trokutasti profil).....	57
Slika 84.	Grafički prikaz četvrtog traga iz treće serije mjerenja (trokutasti profil).....	58
Slika 85.	Grafički prikaz petog traga iz treće serije mjerenja (trokutasti profil).....	58
Slika 86.	Grafički prikaz šestog traga iz treće serije mjerenja (trokutasti profil).....	58

Slika 87.	Postavljanje etalona izrađenog od čelika na translacijske elemente	59
Slika 88.	Usklađivanje položaja nitnog križa kamere i ishodišta koordinatnog sustava uzorka	60
Slika 89.	Grafički prikaz prvog traga iz prve serije mjerenja (iregularni profil).....	60
Slika 90.	Grafički prikaz drugog traga iz prve serije mjerenja (iregularni profil).....	61
Slika 91.	Grafički prikaz trećeg traga iz prve serije mjerenja (iregularni profil)	61
Slika 92.	Grafički prikaz četvrtog traga iz prve serije mjerenja (iregularni profil).....	61
Slika 93.	Grafički prikaz petog traga iz prve serije mjerenja (iregularni profil)	62
Slika 94.	Grafički prikaz šestog traga iz prve serije mjerenja (iregularni profil)	62
Slika 95.	Grafički prikaz prvog traga iz druge serije mjerenja (iregularni profil).....	62
Slika 96.	Grafički prikaz drugog traga iz druge serije mjerenja (iregularni profil).....	63
Slika 97.	Grafički prikaz trećeg traga iz druge serije mjerenja (iregularni profil)	63
Slika 98.	Grafički prikaz četvrtog traga iz druge serije mjerenja (iregularni profil).....	63
Slika 99.	Grafički prikaz petog traga iz druge serije mjerenja (iregularni profil)	63
Slika 100.	Grafički prikaz šestog traga iz druge serije mjerenja (iregularni profil)	64
Slika 101.	Grafički prikaz prvog traga iz treće serije mjerenja (iregularni profil)	64
Slika 102.	Grafički prikaz drugog traga iz treće serije mjerenja (iregularni profil)	64
Slika 103.	Grafički prikaz trećeg traga iz treće serije mjerenja (iregularni profil)	65
Slika 104.	Grafički prikaz četvrtog traga iz treće serije mjerenja (iregularni profil)	65
Slika 105.	Grafički prikaz petog traga iz treće serije mjerenja (iregularni profil)	65
Slika 106.	Grafički prikaz šestog traga iz treće serije mjerenja (iregularni profil)	66
Slika 107.	Nepodudaranje početnih točaka mjerenja	67

POPIS TABLICA

Tablica 1. Referentne <i>cut-off</i> vrijednosti	4
Tablica 2. Osnovni podaci o uređaju Perthometer S8P	10
Tablica 3. Referentne duljine te duljine uzimanja tragova.....	25
Tablica 4. Tip rasporeda mjernih tragova u ovisnosti o λc te duljini mjerne površine.....	32
Tablica 5. Iznosi koordinata početnih točaka prvog mjenog etalona	33
Tablica 6. Iznosi koordinata početnih točaka drugog mjenog etalona	34
Tablica 7. Iznosi koordinata početnih točaka trećeg mjenog etalona	35
Tablica 8. Iznosi vrijednosti aritmetičkih sredina parametara hrapavosti (pravokutni profil)51	
Tablica 9. Iznosi vrijednosti aritmetičkih sredina parametara hrapavosti (trokutasti profil) .59	
Tablica 10. Iznosi vrijednosti aritmetičkih sredina parametara hrapavosti (iregularni profil). 66	

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
ln	mm	duljina ispitivanja
lt	mm	duljina vrednovanja
lr	mm	referentna duljina
Rz	μm	najveća visina profila
Ra	μm	srednje aritmetičko odstupanje ordinate $Z(x)$
RSm	μm	srednji korak elementa profila
R	μm	raspon
λ_c	mm	granica između valne duljine hrapavosti i valovitosti (<i>cut-off</i>)
s	m	radna udaljenost između leće i predmeta
s'	m	udaljenost slike od leće
f	m	žarišna (fokalna) duljina
h	m	visina predmeta
h'	m	visina slike
M		uvećanje
X	mm	duljina mjerne površine etalona
Y	mm	širina mjerne površine etalona
L_1	mm	pomak etalona u smjeru osi X
L_2	mm	pomak etalona u smjeru osi Y
T_{px}	mm	koordinate početne točke mjerenja (os X)
T_{py}	mm	Koordinate početne točke mjerenja (os Y)

SAŽETAK

U uvodnom dijelu rada je definiran pojam hrapavosti površina te su opisani 2D parametri hrapavosti, a detaljnije oni koji su se mjerili u eksperimentalnom dijelu rada. Nakon toga opisani su elektroničko-mehanički uređaji s ticalom; njihova opća konfiguracija te sustavi vođenja ticala. Navedene su i greške koje se mogu javiti prilikom mjerenja korištenjem uređaja s ticalom. Detaljnije je opisan mjerni uređaj Perthometer S8P na kojem su se provodila mjerenja.

U nastavku rada predložena je nadogradnja mjernog uređaja Perthometer S8P kojom bi se osigurala točnost pozicioniranja mjerne igle ticala. Opisani su nadograđeni elementi (kamera i translacijski elementi) te su navedene njihove tehničke specifikacije. Potom je naveden način povezivanja elemenata s uređajem za mjerenje hrapavosti pomoću kojeg se osiguravala potrebna krutost sustava.

Detaljno je opisan način određivanja položaja mjernih tragova na uzorku te način određivanja koordinata početnih mjernih točaka na mjernoj površini etalona. Naveden je utjecaj dimenzija mjerne površine etalona te iznos potrebnog *cut-offa* na raspored mjernih tragova na mjernoj površini. Predložena su četiri različita načina raspodjele mjernih tragova na mjernoj površini s obzirom na ograničenja. Potom su odabrani etaloni koji su se koristili za mjerenje. Prema njihovim dimenzijama i potrebnom *cut-offu* odabrani su prikladni rasporedi mjernih tragova na mjernoj površini za svaki od etalona te su izračunate koordinate početnih mjernih točaka.

Potom je opisan način na koji su se, preko mjerenog etalona, u odnos dovodili položaj mjerne igle ticala, položaj nitnog križa kamere te položaj translacijskih elemenata. Nakon povezivanja tih triju elemenata, etalon se pomoću translacijskih elemenata pomicao na izračunate koordinate početnih točaka te se provodilo mjerenje tragova na mjernoj površini etalona. Rezultati mjerenja su potom prikazani grafički i brojčano te su komentirani ostvareni rezultati.

Ključne riječi: hrapavost, parametri hrapavosti, etalon, elektroničko-mehanički uređaj s ticalom, vizijski sustav, translacijski element, pozicioniranje

SUMMARY

The introductory part of the paper explains the term surface roughness and describes 2D roughness parameters, in more detail those measured in the experimental part of the paper. After that, the measuring stylus devices are described; their general configuration and the ways to guide the probe. Mistakes that may occur when measuring with stylus device are listed. A Perthometer S8P measuring device is especially described because it was used for measurements in the experimental part of the project.

An upgrade of the Perthometer S8P measuring device is proposed to ensure the accuracy of the positioning of the measuring needle of the stylus measuring device. Upgrade elements (camera and translational elements) are described and their technical specifications are listed. Afterwards it is stated how these upgrade elements are connected to the roughness measuring device to provide the required rigidity to the system.

The method of determining the position of the measuring traces on the sample and the way of calculating the coordinates of the initial measuring points on the measuring surface of the standard are described in detail. The influence of the dimensions of the measuring surface of the roughness standard and the influence of the required cut-off on the arrangement of measuring traces on the measuring surface is described. Four different ways of distributing measuring traces on the measuring surface are proposed given the limitations. The standards that were used for the measurement were then selected. According to their dimensions and the required cut-off, suitable arrangements of the measuring traces on the measuring surface were selected for each of the standards and the coordinates of the initial measuring points were calculated.

Paper then describes how the position of the measuring needle, the position of the camera's cross, and the position of the translational elements were brought into the relationship via measured roughness standard. After connecting these three elements, the standard moved with translational elements to the positions of the starting points and trace measurements were carried out on the measurement surface of the standard. The measurement results are presented graphically and numerically. Obtained results were then commented.

Key words: roughness, roughness parameters, roughness standard, stylus device, vision system, translational element, precise positioning

1. UVOD

Pouzdana kvantitativna informacija o stanju površinske teksture ključna je za proizvodnju mehaničkih komponenti koje će odgovarati propisanim tolerancijama, a koje su potrebne za prikladno funkcioniranje komponenti. Tekstura površine je vrlo važna jer utječe na svojstva i kvalitetu površine. Dostupne su brojne metode koje se mogu koristiti za karakterizaciju stanja površine mjerenjem parametara hrapavosti. Ove metode mogu se podijeliti na one koje uključuju izravan kontakt mjernog ticala s površinom te beskontaktno metode

Najčešće korišteni uređaji za mjerenje hrapavosti su elektroničko-mehanički uređaji s ticalom (eng. *stylus instruments*). Elementi uređaja s ticalom te njihova međuovisnost definirani su normom ISO 3274:1996 *Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Nominal characteristics of contact (stylus) instruments*. Uređajem s ticalom mjere se parametri hrapavosti na način da je ticalo, odnosno igla ticala, u fizičkom kontaktu s mjerenom površinom dok pretvornik pretvara vertikalne pomake ticala, koji odgovaraju topografiji mjerne površine, u električne signale koje potom šalje u računalo gdje se ti signali dalje obrađuju. Igla ticala koja je u fizičkom kontaktu s mjernom površinom uobičajeno je izrađena od dijamanta.

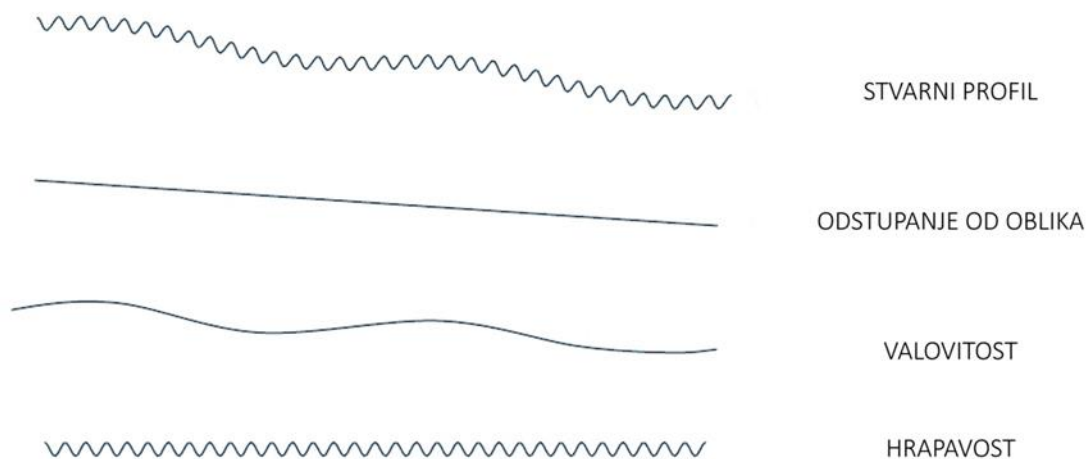
Suvremeni mjerni uređaji s ticalom posjeduju brojne komponente koje olakšavaju mjerenje te omogućuju detaljan uvid u stanje površine. Dakle, ne samo da se pomoću uređaja s ticalom mogu mjeriti iznosi parametara hrapavosti, već se mogu doznati informacije o oštećenjima na površini te o naprezanjima unutar materijala. Suvremeni mjerni uređaji također sadrže i vizijski sustav pomoću kojeg se može vidjeti položaj ticala iznad mjerenog uzorka. Ukoliko je potrebno izmjeriti jedan određeni dio uzorka, a dio uzorka koji se mjeri je vrlo malen, pomoću kamere se može utvrditi gdje se točno treba dovesti ticalo i u kojoj točki se mjerenje mora započeti. Stoga vizijski sustav omogućava točno pozicioniranje ticala na uzorku prije samog mjerenja.

Elektroničko-mehanički uređaj s ticalom Perthometer S8P, korišten za mjerenja u ovom diplomskom radu, ne sadrži vizijski sustav te nema mogućnost točnog pozicioniranja ticala na mjernoj površini uzorka. Stoga ne posjeduje mogućnost mjerenja hrapavosti površine iz određene točke na mjernoj površini. Nadogradnjom uređaja Perthometer S8P vizijskim sustavom te parom translacijskih elemenata, omogućilo se točno pozicioniranje ticala na mjernoj površini te mogućnost mjerenja točno određenog dijela mjerne površine.

2. HRAPAVOST I PARAMETRI HRAPAVOSTI

2.1. Hrapavost

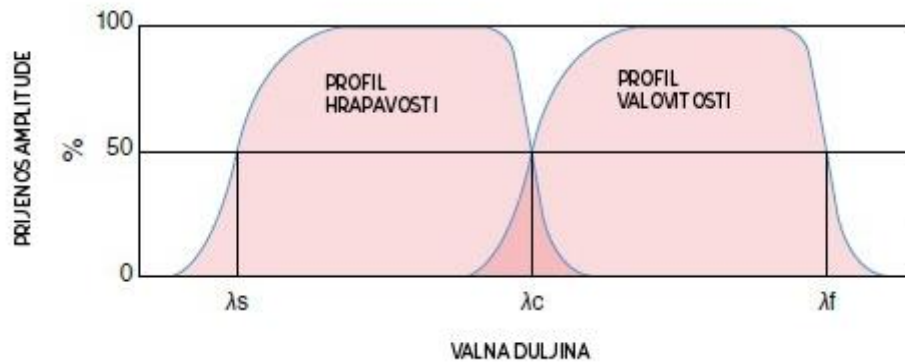
Hrapavost se može definirati kao dio teksture površine. Tekstura površine odnosi se na fine nepravilnosti površine, odnosno na bregove i dolove koji su dobiveni na površini putem postupka oblikovanja. Dakle, tekstura površine se sastoji od dvije komponente već spomenute hrapavosti, i valovitosti. Valovitost je komponenta površinske nepravilnosti većih valnih duljina nego komponenta hrapavosti te je najčešće posljedica prisutnih vibracija tijekom procesa izrade. Također postoje i odstupanja od oblika koja su većih valnih duljina od hrapavosti i valovitosti. Na idućoj slici prikazane su komponente topografije površine.



Slika 1. Komponente topografije površine [1]

Hrapavost površine je rezultat postupaka obrade te je svojstvena određenoj tehnologiji, a ne stroju. Ona ne uključuje valovitost, odstupanje od oblika te površinske greške. Hrapavost je kvantificirana odstupanjima u smjeru vektora normale realne površine u odnosu na idealnu površinu. Hrapavost karakteriziraju visoke frekvencije, kratkih valnih duljina. Filtracijom profila površine, tj. određivanjem koje će se valne duljine propuštati, moguće je izdvojiti hrapavost od valovitosti i odstupanja od oblika. To znači da se propuštanjem kratkih valnih duljina može izdvojiti hrapavost. Prema normi ISO 3274:1996 *Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Nominal characteristics of contact (stylus) instruments* jedina dozvoljena filtracija profila jest korištenjem Gaussovog filtra.

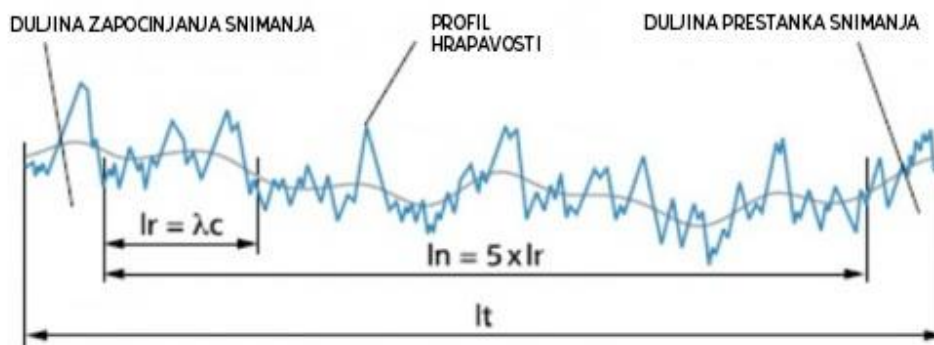
Pojam *cut-off* javlja se kod filtriranja profila površine. On predstavlja granične vrijednosti električnog filtra (λ_s , λ_f , λ_c) te numerički određuje graničnu frekvenciju ispod ili iznad koje su komponente izdvojene ili eliminirane. Na idućoj slici mogu se vidjeti grafički prikazane vrijednosti filtra u odnosu na valovitost i hrapavost.



Slika 2. Vrijednosti električnog *cut-off* filtra [3]

Filter λ_s definira granicu između valne duljine hrapavosti površine i kraćih valnih duljina koje su prvenstveno posljedica „šuma“ mjernog uređaja. Filter λ_c definira granicu valnih duljina hrapavosti i valovitosti dok λ_f predstavlja granicu valne duljine valovitosti i komponenti većih valnih duljina.

Duljina ispitivanja l_t , duljina vrednovanja l_n i referentna duljina l_r su karakteristične duljine ispitivanja. Iznos granične vrijednosti filtra λ_c jednaka je vrijednosti referentne duljine. Na idućoj slici prikazane su karakteristične duljine ispitivanja. [1] [2]



Slika 3. Karakteristične duljine ispitivanja [4]

Cut-off vrijednosti koje se koriste za umjeravanje mjernih uređaja s ticalom određuju se prema zahtjevima norme ISO 4288:1996 *Geometric Product Specification (GPS) — Surface texture: profile method — Rules and procedures for the assessment of surface texture*. Iduća tablica prikazuje referentne *cut-off* vrijednosti za periodičke i neperiodičke profile iz norme ISO 4288:1996.

Tablica 1. Referentne cut-off vrijednosti [5]

REFERENTNA DULJINA	DULJINA VREDNOVANJA	PERIODIČKI PROFIL	NEPERIODIČKI PROFIL	
			$Rz, \mu\text{m}$	$Ra, \mu\text{m}$
$lr(\lambda c), \text{mm}$	$ln = 5 \times lr, \text{mm}$	RSm, mm	$Rz, \mu\text{m}$	$Ra, \mu\text{m}$
0,08	0,4	> 0,013 do 0,04	do 0,1	do 0,02
0,25	1,25	>0,04 do 0,13	>0,1 do 0,5	>0,02 do 0,1
0,8	4	>0,13 do 0,4	>0,5 do 10	>0,1 do 2
2,5	12,5	>0,4 do 1,3	>10 do 50	>2 do 10
8,0	40	>1,3 do 4	>50	>10

2.2. Parametri hrapavosti

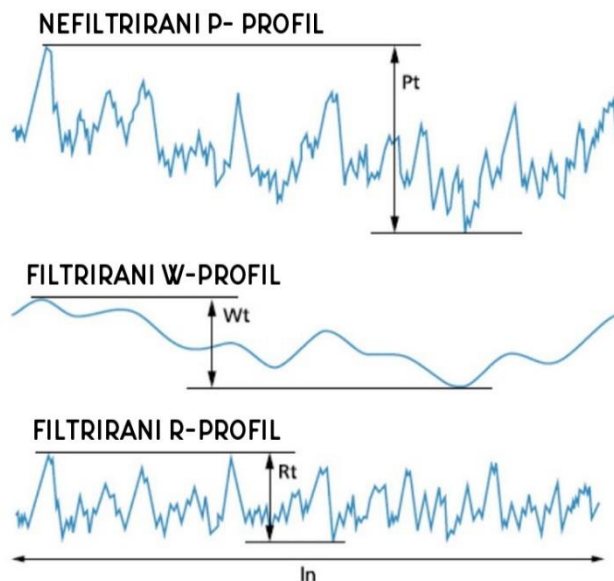
Svi parametri profila površine se računaju i određuju u ovisnosti o vrsti profila. Profili se dijele na tri vrste te uz svaku vrstu dolazi određeni prefiks. Vrste su:

- Hrapavost uz koji dolazi prefiks **R**
- Primarni profil **P**
- Valovitost **W**

Parametri hrapavosti profila površine za 2D mjerni sustav se mogu podijeliti u iduće skupine:

- Uzdužni parametri – opisuju varijacije u lateralnim osima profila
- Amplitudni parametri – opisuju varijacije u smjeru vertikalne osi profila
- Hibridni parametri – opisuju varijacije kao kombinacije uzdužnih i amplitudnih karakteristika profila
- Krivuljni i srodni parametri - opisuju varijacije na krivuljama dobivene iz uzdužnih i amplitudnih karakteristika profila.

Na idućoj slici prikazani su nefiltrirani primarni profil, filtrirani profil valovitosti te filtrirani profil hrapavosti.

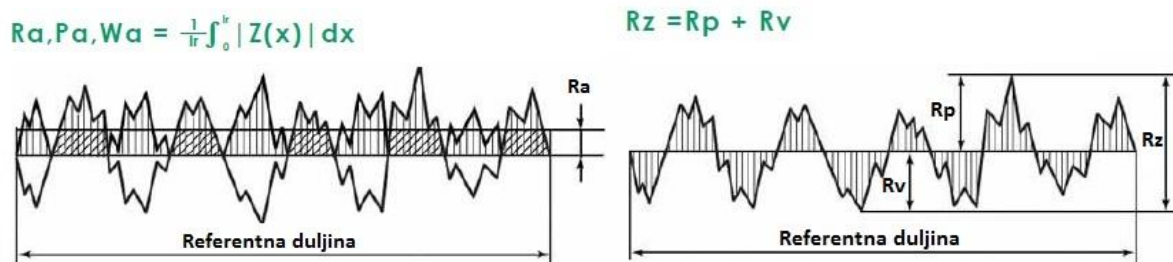


Slika 4. Filtrirani i nefiltrirani profili hrapavosti [4]

Danas je mnogo parametara u upotrebi, no jedan od najčešće korištenih je amplitudni parametar R_a . On predstavlja aritmetičku sredinu apsolutnih odstupanja profila hrapavosti od srednje linije unutar referentne dužine. Ostali amplitudni parametri su:

- R_p – najveća visina vrha profila unutar referentne dužine
- R_v – najveća dubina dola unutar referentne dužine
- R_z – zbroj najveće visine i dubine profila unutar referentne dužine ($R_p + R_v$)
- R_t – ukupna visina profila (suma visine najvećeg vrha profila i dubine najnižeg dola profila unutar duljine ocjenjivanja).

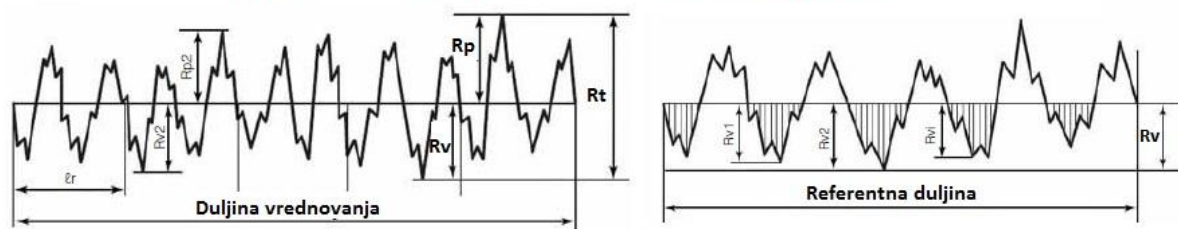
Na slici 5. prikazani su amplitudni parametri hrapavosti R_a i R_z , a na slici 6. amplitudni parametri hrapavosti R_t i R_v .



Slika 5. Amplitudni parametri hrapavosti (R_a , R_z) [6]

$$Rt, Pt, Wt = \max(Rpi) + \max(Rvi)$$

$$Rv = |\min(Z(x))|$$



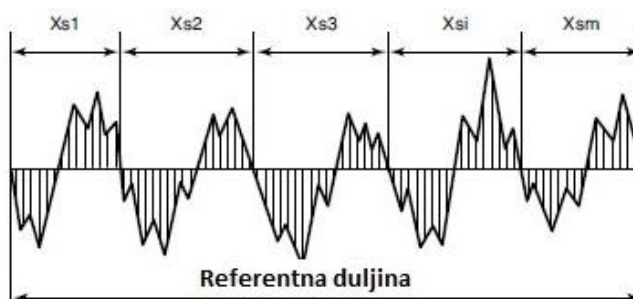
Slika 6. Amplitudni parametri hrapavosti (Rt , Rv) [6]

Često korišteni uzdužni parametri su:

- RSm – srednji korak elementa profila
- HSC (*high spot count*) – broj lokalnih vrhova profila unutar dužine vrednovanja.

Na idućoj slici prikazan je uzdužni parametar hrapavosti RSm .

$$RSm, PSm, WSm = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Xsi$$



Slika 7. Uzdužni parametri hrapavosti [6]

Hibridni je parametar samo jedan i naziva se srednji kvadratni nagib profila odnosno $R\Delta q$.

$$R\Delta q = \sqrt{\frac{1}{lr} \int_0^{lr} (\theta(x) - \bar{\theta})^2 dx}, \quad \bar{\theta} = \frac{1}{lr} \int_0^{lr} \theta(x) dx, \quad \text{gdje je } \theta \text{ nagib profila u danoj točki.}$$

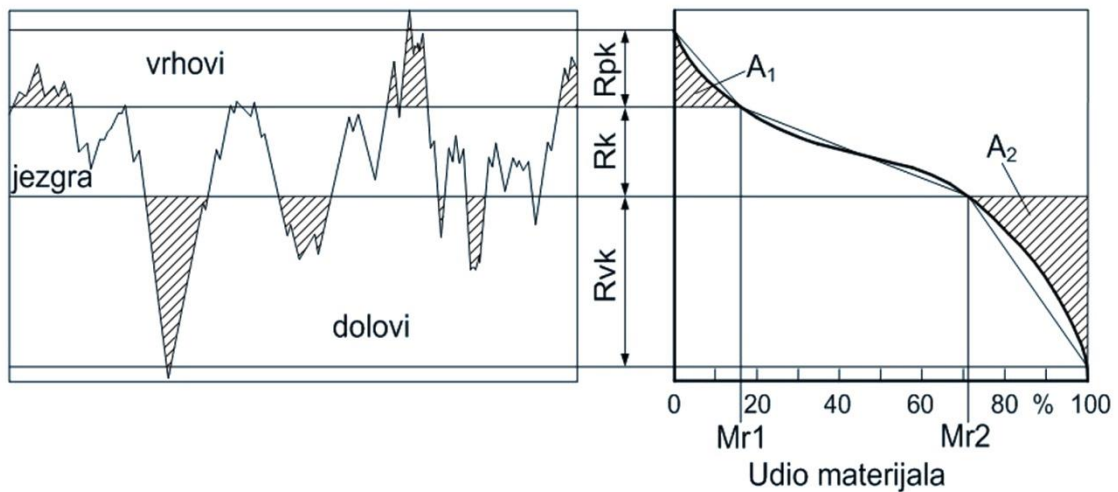
Krivuljni i srodni parametri posebni su po tome što se temelje na krivulji udjela materijala profila, odnosno na Abbott – Firestone krivulji. Koriste se za karakterizaciju tribološki slojevitih površina. Krivuljni i srodni parametri koriste se onda kada je teško samo sa amplitudnim parametrom (npr. Ra) zadovoljavajuće okarakterizirati stanje površine. Uzrok nemogućnosti prikaza amplitudnim parametrima je slojevitost površine koja nastaje uslijed redosljeda operacija obrade (gruba obrada nakon koje slijedi fina obrada kojom se uklanjaju grubi vrhovi). Dolovi u tom slučaju ostaju netaknuti. Gornja površina dobivena brušenjem te netaknuti dolovi u analizi se promatraju odvojeno.

Parametri hrapavosti za krivulju udjela materijala mogu se podijeliti na:

- Rpk – reducirana visina vrha profila, dio profila koji će u tijeku eksploatacije biti prvi istrošen

- **Rk** – dubina jezgre hrapavosti profila, dio profila s povećanom nosivosti koja preuzima osnovna opterećenja i bitno utječe na karakteristike i životni vijek površine
- **Rvk** – reducirana dubina dolova profila, dio profila koji ima sposobnost zadržavanja ulja u dubokim žljebova koji su stvoreni pri strojnoj obradi površine
- **$Mr1$** – relativni udio materijala u vrhovima
- **$Mr2$** – relativni udio ulja u dolovima
- **$A1$** - površina materijala vrhova profila
- **$A2$** – površina maziva dolova profila. [1] [2] [7]

Na slici 8. prikazana je Abbott – Firestone krivulja.



Slika 8. Abbott – Firestone krivulja [1]

Dio uređaja koji je u kontaktu sa površinom najčešće je napravljen od dijamanta ili safira te je vrh pažljivo oblikovan u piramidalni ili stožasti obliku. S obzirom na oblik vrha ticala (veličina radijusa r), dolovi na mjerenoj površini, čije dimenzije su manje od dimenzija radijusa ticala, često ostanu nezabilježeni. Očekivano, neki će parametri biti pod većim utjecajem oblika vrha nego ostali. Posebnu pozornost također treba obratiti i na mjerne sile ticala tijekom mjerenja zbog mogućeg oštećenja površine uzorka.

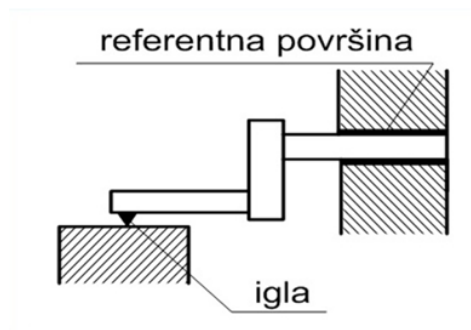
Postoje tri vrste pogrešaka koje se mogu javiti tijekom mjerenja uređajem s ticalom. To su:

- greške zbog radijusa vrha ticala
- greške zbog izvedbe referentne površine
- greške zbog pogrešno odabrane *cut-off* vrijednosti.

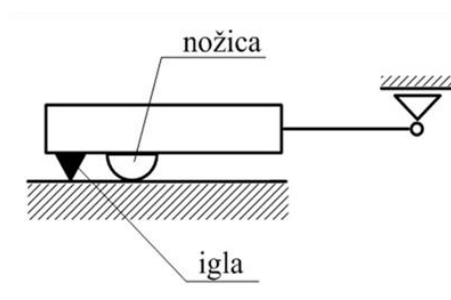
Prema ISO 3274: 1996 idealan oblik vrha ticala je stožac sa zaobljenim vrhom. Nazivne dimenzije su:

- radijus vrha: 2 μm , 5 μm ili 10 μm
- kut: 60°, 90° (ako nije specificirano, primjenjuje se 60°).

Pogreške također mogu proizaći i iz načina vođenja. Dvije su vrste vođenja: vanjsko vođenje i vođenje s nožicom. Na slici 10. te na slici 11. prikazani su načini vođenja ticala mjernog uređaja. [2] [7]



Slika 10. Prikaz vanjskog vođenja [2]



Slika 11. Prikaz vođenja s nožicom [2]

3.2. Perthometer S8P

Uređaj na kojem se provodilo mjerenje za potrebe eksperimentalnog dijela ovog rada je uređaj s ticalom Perthometer S8P, proizvođača Mahr-Perthen. Uređaj koristi kontaktnu metodu mjerenja te je namijenjen mjerenju 2D parametara hrapavosti. Perthometer S8P se umjerava prema vodiču DKD-R 4-2 *Calibration of measuring instruments and standards for roughness measuring technique*. Na slici 12. prikazan je uređaj Perthometer S8P, a u tablici 2. navedeni su osnovni podaci o uređaju te njegovu načinu rada. [2]



Slika 12. Uređaj Perthometer S8P [2]

Tablica 2. Osnovni podaci o uređaju Perthometer S8P [2]

Proizvođač	Feinprüf Perthen GmbH, Njemačka
Tragovi	Od 4 do 128 sa 8064 točaka po tragu
Duljina očitavanja [mm]	0,56; 1,75; 5,6; 17,5; 56,0
Standardni mjerni putovi [mm]	0,4; 1,25; 4,0; 12,5; 40
Cut-off (granične valne dužine) [mm]	0,025; 0,08; 0,25; 0,8; 2,5; 8,0
Mjerni opseg [μm]	±12,5μm, ±62,5μm, ±125μm, ±625μm, ±2500μm
Profili	D – direktni G – ispravljeni P – ispravljen bez početnog i završnog dijela W – valovitost R – hrapavost
Tip filtera	Gaussov filter, RC filter, osni filteri (cut-off kod 75% i 50%)

4. PRIJEDLOG I IMPLEMENTACIJA NADOGRAĐNJE MJERNOG UREĐAJA

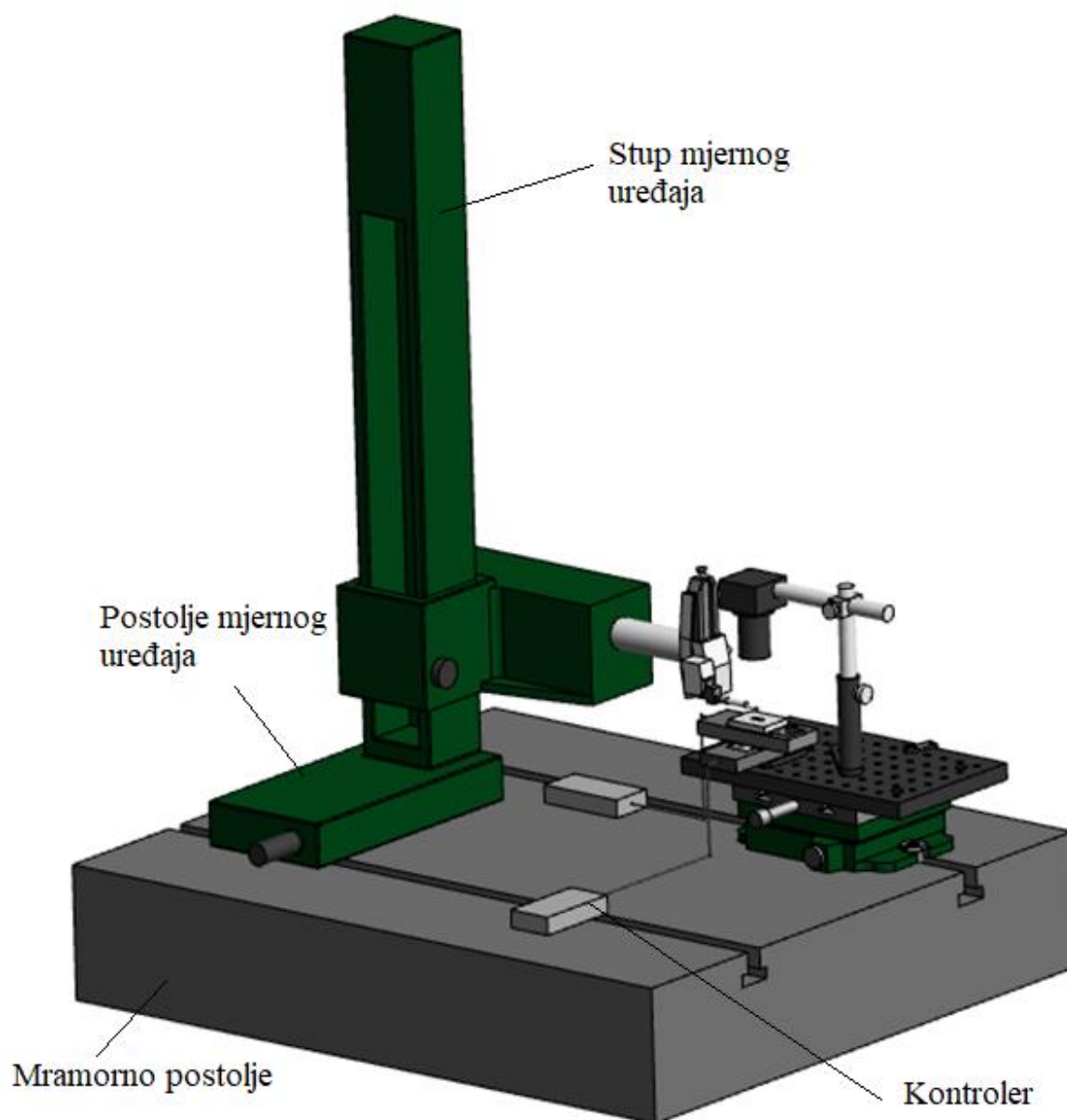
4.1. Prijedlog i model nadogradnje mjernog uređaja

Suvremeni elektroničko-mehanički uređaji s ticalom sadrže brojne komponente koje omogućavaju bolju ponovljivost mjernih rezultata te jednostavnije korištenje uređaja. Jedna od tih komponenti je vizijski sustav koji se sastoji od kamere i osvjetljenja. Korištenjem vizijskog sustava prilikom mjerenja hrapavosti na uzorku, dobiva se mogućnost pregleda mjerne površine uzorka s većim uvećanjem te mogućnost točnog pozicioniranja igle ticala mjernog uređaja. Bez korištenja vizijskog sustava prilikom mjerenja, nije moguće odrediti točku u kojoj počinje mjerni put koji ticalo prelazi tijekom mjerenja.

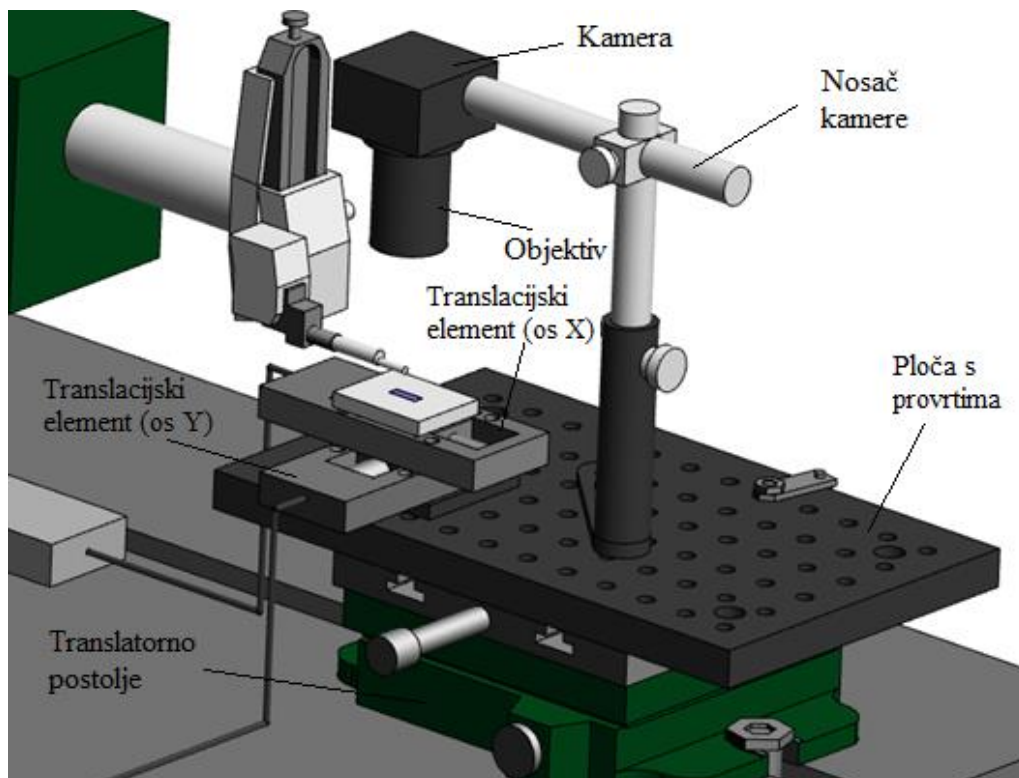
Prilikom mjerenja hrapavosti uzorka na uređaju Perthometer S8, postavljanjem uzorka na mjerni stolić te spuštanjem mjerne igle ticala na uzorak, ticalo započinje ispitivati površinu iz točke na uzorku koja ima neodređene koordinate. Ukoliko su koordinate točke nepoznate, ticalo nije moguće ponovno dovesti točno u tu točku te ponovno mjeriti hrapavost po istoj putanji na uzorku.

Elektroničko-mehanički mjerni uređaj s ticalom Perthometer S8P ne uključuje vizijski sustav te nema mogućnost točnog pozicioniranja mjerne igle ticala. Kako bi se osigurala bolja ponovljivost mjernih rezultata kao posljedica mogućnosti pozicioniranja igle ticala na definirane koordinate na mjernom uzorku, na uređaj su u okviru ovog diplomskog rada, ugrađeni vizijski sustav, koji se sastojao od kamere i LED osvjetljenja, te sustav translacijskih elemenata koji su upravljani preko kontrolera i računala, a koji omogućuju pomicanje uzorka kroz točno definirane pomake u x i y smjeru. Stoga je nakon nadogradnje uređaja bilo potrebno preko uzorka povezati poziciju centra kamere, početnu poziciju igle mjernog ticala te translacijske elemente dovesti u poziciju u kojoj njihov početni pomak iznosi nula. Nakon usklađivanja ta tri elementa mjernog sustava, moglo se početi sa mjerenjem. Pomoću kamere mogao se odrediti položaj mjernog ticala u odnosu na mjernu površinu, te su se prema tom položaju računale početne točke mjernih tragova na mjernoj površini. Položaj u kojem se nalazi mjerna igla ticala, u odnosu na mjernu površinu uzorka, prije početka mjerenja je fiksna (položaj ticala ne može se mijenjati). Stoga su translacijski elementi omogućavali pomicanje uzorka na koordinate izračunatih točki, tako da igla ticala započinje mjerenje hrapavosti iz točno određene točke.

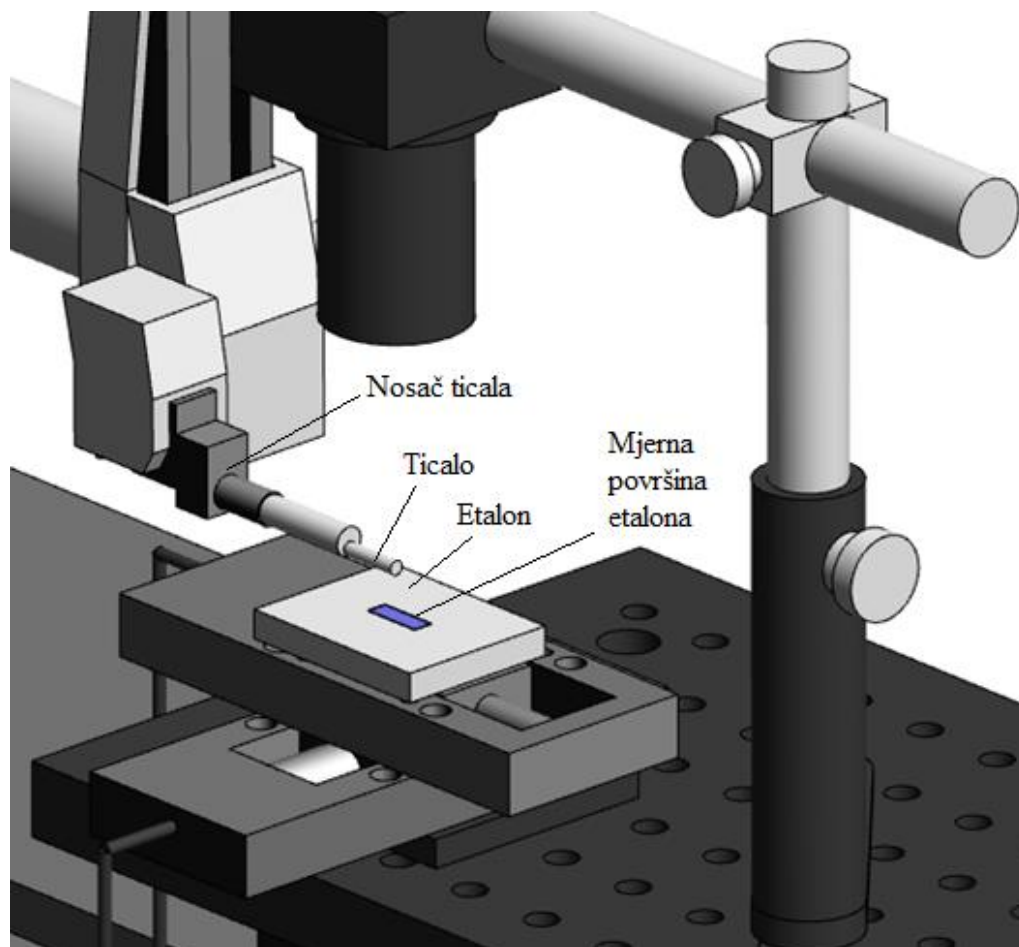
Na slici 13., slici 14. i slici 15. prikazan je model nadograđenog mjernog uređaja te međuodnos elemenata uređaja.



Slika 13. Model nadograđenog mjernog uređaja Perthometer S8P



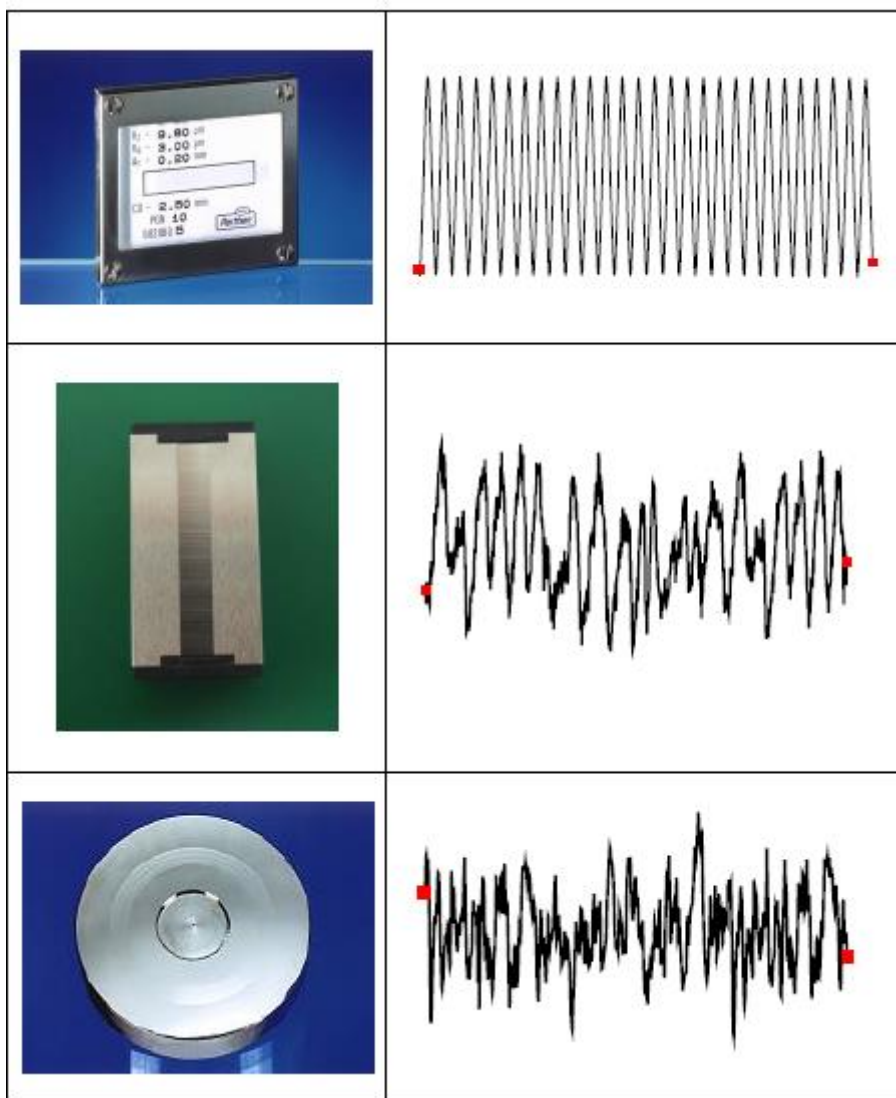
Slika 14. Dijelovi nadograđenog mjernog uređaja Perthometer S8P



Slika 15. Dijelovi nadograđenog mjernog uređaja Perthometer S8P

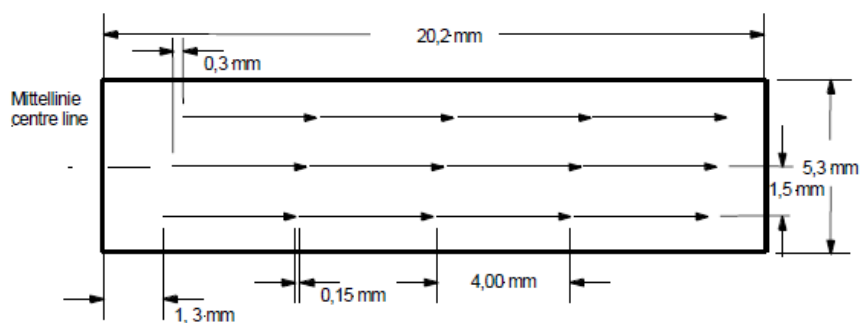
4.2. Potreba za nadogradnjom

Laboratorij za precizna mjerenja dužina Fakulteta strojarstva i brodogradnje već dugi niz godina sudjeluje u međulaboratorijskim usporedbama koje organizira EURAMET (*The European Association of National Metrology Institutes*) – europsko udruženje nacionalnih mjeriteljskih instituta, čiji je cilj razvoj integrirane i međunarodno konkurentne mjerne infrastrukture na području Europe. Sljedeće međulaboratorijske usporedbe najavljene su za 2021. godinu te će se na njima mjeriti etalon dubine (brazda), etalon regularnog profila hrapavosti trokutaste geometrije te etalon koji sadržava neregularne profile hrapavosti. Na slici 16. prikazani su etaloni koji se koriste za potrebe međulaboratorijskog umjeravanja. Crvenom bojom na profilu hrapavosti označene su početne točke mjerenja. Da bi mjerenje profila moglo započinjati u točno određenim točkama, uređaj za mjerenje hrapavosti treba moći precizno pozicionirati mjernu iglu ticala na mjernoj površini etalona. [8]



Slika 16. Etaloni korišteni za potrebe međulaboratorijskih usporedbi [8]

S obzirom da u međulaboratorijskim usporedbama sudjeluju brojni laboratoriji, njihovi uređaji za mjerenje hrapavosti se razlikuju. Određeni laboratoriji posjeduju suvremene uređaje za mjerenje hrapavosti koji posjeduju već navedene elemente mjernog sustava poput vizijskog sustava te naprednih programa za obradu dobivenih rezultata. S obzirom da tehnički protokol za umjeravanje etalona hrapavosti preporučuje da se unutar mjerne površine etalona točno odrede pozicije mjernih tragova te njihove početne točke, laboratoriji koji se koriste modernijim mjernim uređajima s lakoćom mogu ispuniti taj zahtjev. Na idućoj slici prikazana je preporuka za provođenje mjerenja iz tehničkog protokola za međulaboratorijsko umjeravanje.



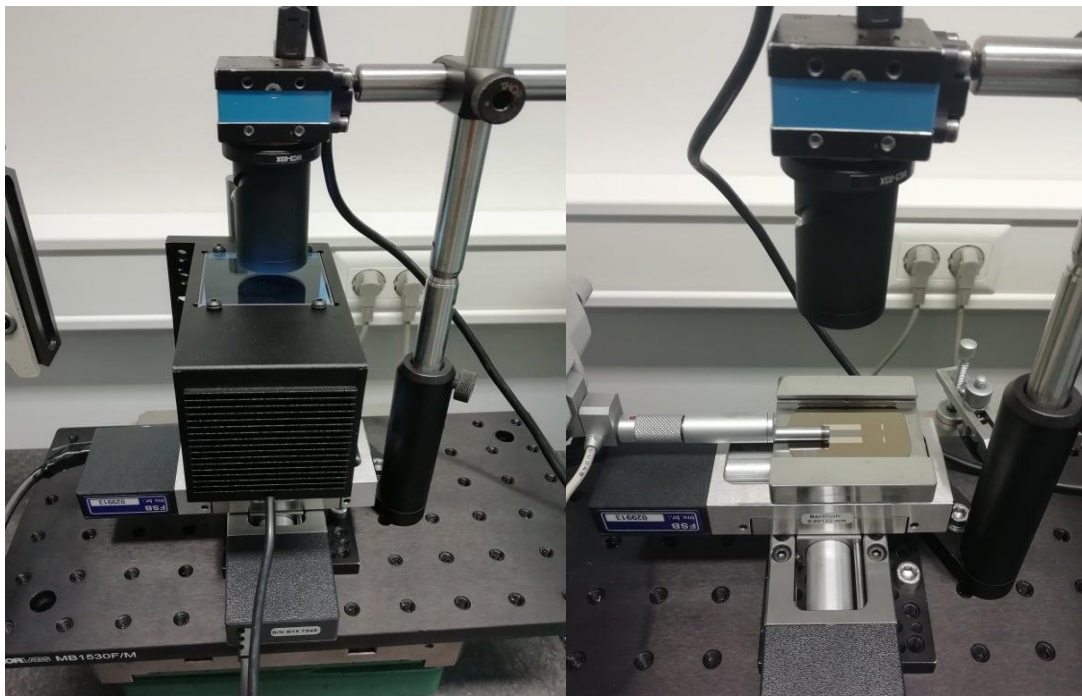
Slika 17. Način provođenja umjeravanja prema EURAMET protokolu [8]

Laboratorij za precizna mjerenja dužina Fakulteta strojarstva i brodogradnje sudjeluje u međulaboratorijskim usporedbama parametara hrapavosti u okviru EURAMET-a korištenjem uređaja Perthometer S8P koji nema mogućnost točnog pozicioniranja ticala na mjerne površine uzorka te njime nije moguće provoditi mjerenja parametara hrapavosti po preddefinirani mjernim tragovima. Ovom nadogradnjom uređaj Perthometer S8P bi se mogao približiti modernijim mjernim uređajima te osigurati bolju ponovljivost mjernih rezultata parametara hrapavosti.

4.3. Implementacija nadogradnje mjernog uređaja

4.3.1. Način povezivanja elemenata mjernog sustava

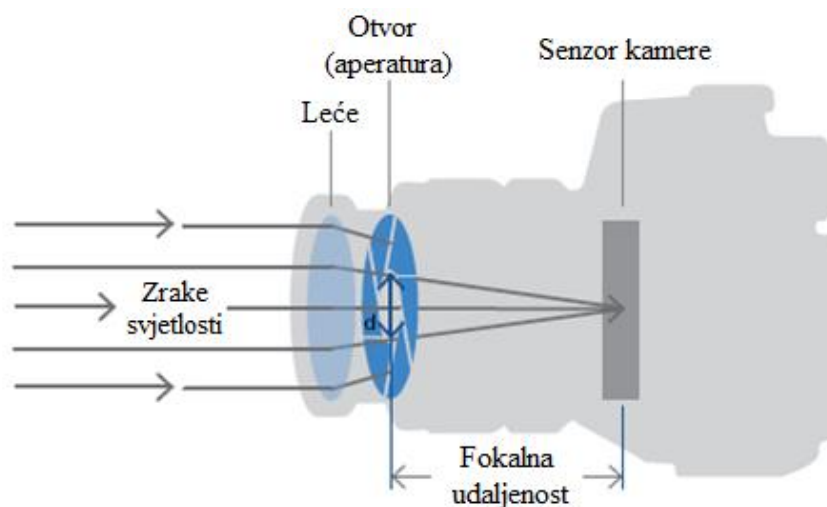
Mjerni uređaj nalazi se na masivnoj mramornoj ploči. Translatorno postolje s mikrometarskim vijcima kruto je vezano za mramornu ploču pomoću lastinog repa te vijka i matice. Na postolje je postavljena ploča koja je također kruto povezana sa stolićem preko lastinog repa i vijčane veze. Za ploču su pomoću vijčane veze kruto vezani postolje kamere i translacijski elementi. Svi elementi mjernog sustava, uključujući kameru i translacijske elemente bili su kruto vezani, da bi se onemogućili neželjeni pomaci koji bi mogli utjecati na mjerne rezultate. S obzirom da se radilo o mjernim rezultatima reda veličine nanometra, svaki neželjeni pomak u sustavu izazvao bi promjene u rezultatima. Također, mjerni uzorci bili su dodatno učvršćeni dvostranom ljepljivom trakom da bi se spriječilo pomicanje uzorka prilikom mjerenja kao posljedica povlačenja uzorka zbog djelovanja mjerne sile. Prije mjerenja, svaki uzorak se dodatno vizualno ispitivao pomoću kamere te osvjetljenja koje se pričvršćivalo na nosač koji je vezan na ploču. S obzirom da je osvjetljenje tijekom mjerenja svojim položajem ometalo pristup postavljanju mjernog ticala, ono se skidalo nakon što se uzorak vizualno pregledao. Na idućoj slici prikazan je konačan izgled nadograđenog mjernog sustava sa i bez dodatnog osvjetljenja.



Slika 18. Prikaz LED osvjetljenja (lijevo) te sustav bez osvjetljenja (desno)

4.3.2. Elementi vizijskog sustava – kamera

Digitalna kamera je uređaj koji se koristi za snimanje, pohranjivanje i prijenos slika. Svjetlost koja se reflektira od snimani predmet prikuplja se i fokusira pomoću optičkog sustava (leća), odnosno objektivu. Fokusirana svjetlost potom stiže do senzora unutar kamere koji pretvara intenzitet i frekvenciju elektromagnetskog zračenja u informaciju putem elektroničkih procesa. Informacije se potom šalju do računala na koje je kamera priključena ili se spremaju na memorijske kartice. Tehnologija kamera znatno je napredovala u posljednjih nekoliko desetljeća razvojem CCD i CMOS senzora, koji su dali doprinos poboljšanju razlučivosti slike te brzini i kvaliteti kamere. Na idućoj slici prikazana je shema digitalne kamere. [9] [10]



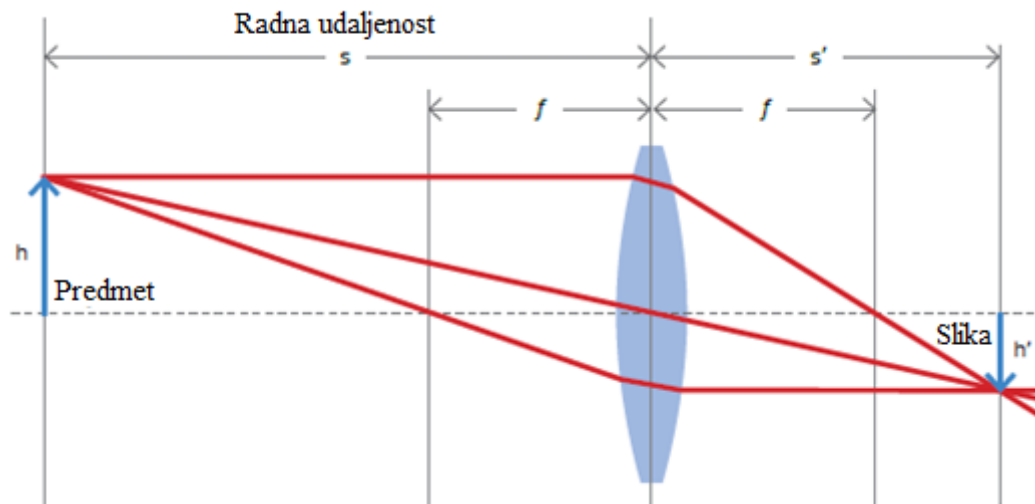
Slika 19. Osnovni dijelovi digitalne kamere [9]

Glavna svrha leća je da prikupe svjetlost reflektiranu od snimani objekt te usmjere tu svjetlost do foto-osjetljivog senzora koji će stvoriti sliku tog objekta. Objektiv se može sastojati od samo jedne leće ili biti kombinacija više leća. Prilikom odabira optičkog sustava mora se voditi računa o mnogobrojnim parametrima. Parametri su:

- Vidno polje (eng. *Field of view* – *FoV*) – najveća površina koja se može vidjeti objektivom te prenijeti do senzora
- Radna udaljenost (eng. *Working Distance* – *WD*) – udaljenost između objektivu i predmeta na kojoj je slika oštra (fokusirana)
- Dubina polja (eng. *Depth of Field* – *DoF*) – maksimalan raspon (između najbliže i najdalje točke na objektu) u kojem se objekt i dalje nalazi u prihvatljivom fokusu
- Veličina senzora – veličina aktivnog dijela senzora kamere
- Uvećanje (eng. *Magnification* – *M*) – odnos između veličine slike i snimanog predmeta

- Rezolucija – najmanja udaljenost između dvije točke koja se i dalje može vidjeti pomoću leća

Na idućoj slici prikazan je jednostavan model rada te osnovni radni parametri leće.



Slika 20. Radni parametri leće [9]

Model prikazuje tanku leću izrađenu iz jednog dijela stakla sa vrlo malim simetričnim iskrivljenjima na površini. Pretpostavka je da je debljina leće mnogo manja od radijusa iskrivljenja površine. Na taj način se umanjuje utjecaj debljine leće na prolazak svjetlosti. Iz slike se može izvesti sljedeći odnos:

$$\frac{1}{s'} + \frac{1}{s} = \frac{1}{f} \quad (1.1)$$

Gdje je:

s – radna udaljenost, udaljenost između leće i predmeta

s' - udaljenost slike od leće

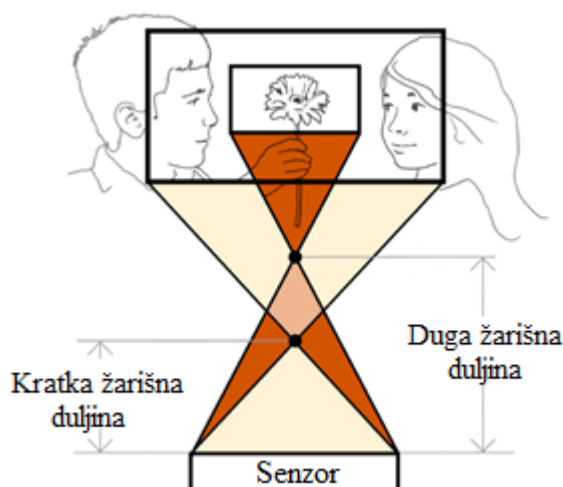
f – žarišna (fokalna) duljina, udaljenost leće od žarišta (točke u kojoj zraka siječe optičku os)

h – visina predmeta

h' - visina slike.

Na slici 20. prikazana je konvergentna leća. Sredinom leće prolazi optička os (označena isprekidanom crtom). Sa slike se može vidjeti da se zraka 1, koja dolazi na leću paralelno sa optičkom osi, prilikom prolaska kroz leću lomi te siječe optičku os na udaljenosti f . Zraka 2, koja prolazi kroz centar leće, se ne lomi te ne mijenja smjer nakon prolaska kroz leću. Zraka 3 koja optičku os siječe na udaljenosti f prije prolaska kroz leću, nakon prolaska postaje paralelna optičkoj osi. U digitalnim kamerama koje se koriste u industrijskim vizijskim sustavima nalaze se konvergentne leće, tj. leće koje fokusiraju svjetlost na senzor.

Žarišna duljina i vidno polje obrnuto su proporcionalni. Što je vidno polje veće to će žarišna duljina biti kraća i obrnuto. Na idućoj slici prikazan je odnos žarišne duljine i vidnog polja.



Slika 21. Odnos žarišne duljine i vidnog polja [9]

Uvećanje M pokazuje omjer između visine predmeta i visine dobivene slike.

$$M = \frac{h'}{h} \quad (1.2)$$

Gdje je:

h' - visina slike

h - visina snimanog objekta

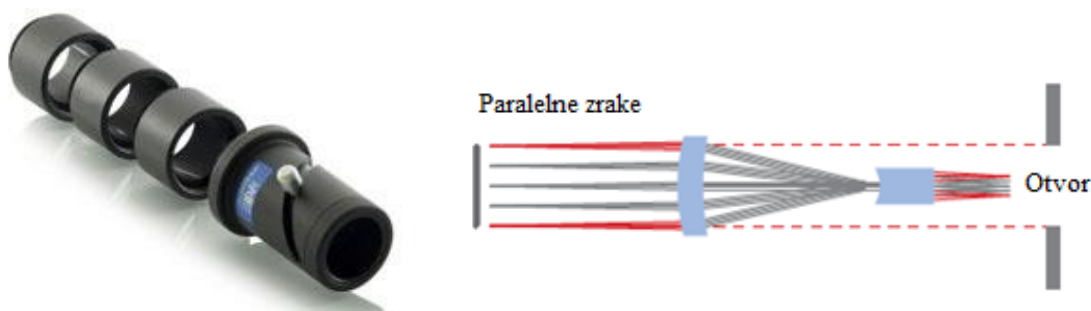
Uvećanje i vidno polje također su obrnuto proporcionalni. Vidno polje smanjuje se porastom uvećanja, dok se smanjenjem uvećanja vidno polje povećava. Radna udaljenost povećava se s rastom uvećanja. [9] [10]

Kamera koja se koristila u okviru ovog diplomskog rada bila je kamera proizvođača *The Imaging Source*, a model kamere je DFK 72BUC02. Rezolucija kamere je 2595×1944 , a veličina piksela $2,2 \mu\text{m}$. Veličina senzora iznosi $5,79 \times 4,27 \text{ mm}$. Na idućoj slici prikazana je korištena kamera. [11]



Slika 22. Kamera DFK 72BUC02 [11]

Objektiv koji se koristio za snimanje uzorka bio je telecentričan, što znači da je prikupljao samo one zrake koje su bile paralelne optičkoj osi. S obzirom da su zrake paralelne optičkoj osi, uvećanje objektiva neovisno je o radnoj udaljenosti te pomoću njega nije moguće snimati velika vidna polja. Zbog toga prednji dio telecentričnog objektiva mora biti velik najmanje onoliko koliko i vidno polje koje se želi snimati. To ga čini pogodnim za ispitivanja manjih površina, kao što su površine etalona. Objektiv je proizvela tvrtka *Opto Engineering*, a njegov model je MC3-03X. Na idućoj slici prikazan je korišteni telecentrični objektiv te njegov način rada. [12]



Slika 23. Telecentrični objektiv te prikaz načina rada objektiva [12]

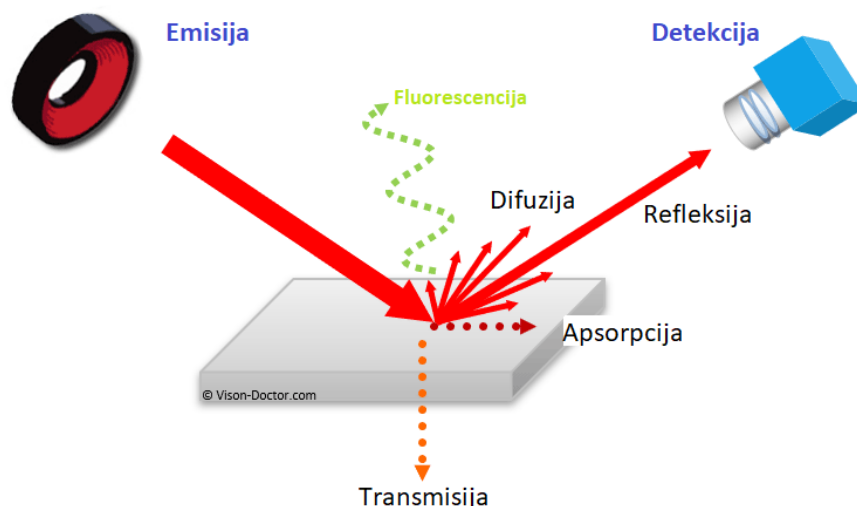
Kamera je bila povezana pomoću USB priključka na računalo, preko kojeg se moglo upravljati kamerom te na kojem se vidjela slika koju kamera snima u stvarnom vremenu. Kamerom se upravljalo programom *Microsoft Visual Basic*.

4.3.3. Elementi vizijskog sustava – osvjetljenje

Ključnu ulogu u vizijskom sustavu mjernog uređaja igra svjetlost te njezina interakcija s ispitivanim predmetom, objektivom i senzorom kamere. Pravilnim se odabirom osvjetljenja u velikoj mjeri utječe na kvalitetu dobivene slike. Stoga se može reći da je osvjetljenje jedna od najvažnijih komponenti vizijskog sustava. Ukoliko predmet prilikom snimanja nije adekvatno osvjetljen, može doći do gubitka informacija na dobivenoj slici. Na karakteristike etalona koji se promatra može se utjecati vrlo malo ili nikako, stoga se pomoću optimizacije osvjetljenja i pozicije kamere postiže potrebna kvaliteta slike.

Prilikom prolaska svjetlosti iz jednog medija u drugi (npr. iz zraka u materijal nekog predmeta), dolazi do tri pojave; svjetlost se može odbiti od površinu, može se apsorbirati u predmet i pretvoriti u drugi oblik energije (npr. u toplinu) te može doći do transmisije, odnosno potpunog prolaska svjetlosti kroz predmet.

Ukoliko se svjetlost reflektira od površine koje su nalik zrcalu, upadni kut zrake svjetlosti bit će istog iznosa kao i kut pod kojim se zraka reflektirala od površinu. Ako je površina na koju se svjetlost reflektira neravna, doći će do difuzije (raspršenja) svjetlosti, odnosno zraka svjetlosti će se reflektirati pod mnogo različitih kutova. Prilikom transmisije, odnosno prolaska svjetlosti kroz predmet, predmet apsorbira dio svjetlosti koji se najčešće pretvara u toplinu. Na idućoj slici prikazana je interakcija svjetlosti te površine osvjetljenog predmeta. [13]



Slika 24. Interakcija svjetlosti i osvjetljivanje površine [13]

Izborom pravilne orijentacije osvjetljenja poboljšava se kontrast tamnih i svijetlih polja na slici. To je ujedno i glavna zadaća osvjetljenja, da poveća kontrast onih dijelova slike koji će se mjeriti. Ukoliko slika nije dovoljno kontrastna, postoji mogućnost da program koji obrađuje sliku neće biti u mogućnosti procesuirati dobivenu sliku.

Dakle pomoću orijentacije osvjetljenja te intenziteta svjetla potrebno je postići dovoljan kontrast dijelova slike koji se mjere te smanjiti kontrast na onim dijelovima slike koji su nevažni za mjerenje.

S obzirom da se pomoću elektroničko-mehaničkog uređaja s ticalom mogu ispitivati uzorci izrađeni od različitih materijala te različitog stupnja obrade površine, bitno je da prilikom snimanja uzorka ne dođe do prevelike refleksije svjetlosti što bi umanjilo kvalitetu slike. Stoga se za osvjetljenje mjerne površine etalona koristilo kontinuirano LED koaksijalno osvjetljenje proizvođača *Opto Engineering* model LTCXC, koje je omogućavalo jednoličnu osvjetljenost svih dijelova mjerne površine. Zbog toga je bilo prikladno za korištenje pri ispitivanju visoko reflektivnih površina. Na slici 25. prikazano je jedno takvo osvjetljenje te način njegovog načina rada. Nakon što zrake izađu iz izvora svjetlosti one putuju do razdjelnika snopa gdje se lome pod kutom od 45° te okomito padaju na ispitivani uzorak. Koaksijalno osvjetljenje pogodno je za korištenje u kombinaciji s telecentričnim objektivom zbog toga jer su zrake reflektirane od ispitivani predmet paralelne sa optičkom osi leća u objektivu. Jakost svjetlosti može se regulirati pomoću regulatora jakosti svjetlosti koji je povezan sa osvjetljenjem. Svjetlost koja se reflektira od ispitivani etalon, potom putuje do kamere koja se nalazi direktno iznad osvjetljenja. [14] [15] [16]



Slika 25. LED osvjetljenje te prikaz načina rada osvjetljenja [16]

4.3.4. Translacijski elementi

Pomoću translacijskih elemenata moguće je bilo pomicati uzorak u odnosu na ticalo te dovesti uzorak u potreban položaj prije početka mjerenja. Proizvođač translacijskih elemenata je CONEX, a naziv modela je MFA-CC. Translacijski elementi su izrađeni od čelika te sadrže integrirani regulator koji omogućuje pomake od $0,1 \mu\text{m}$. Pomiču se pomoću istosmjernog motora te sadrže okretne vijke visoke rezolucije koji omogućavaju pouzdano kretanje i odstupanja

malih iznosa. Jedan translacijski element se može linearno pomicati samo po jednoj osi. Stoga su za pomicanje uzorka po osi X te po osi Y bila potrebna dva translacijska elementa. Translacijski elementi su preko kontrolera povezani sa upravljačkom jedinicom, odnosno računalom, te im se preko programa *Conex CC Utility* zadaje željeni linearni pomak u milimetrima.

Nakon što se pomak unese u program, on se pretvara u napon koji se šalje do istosmjernog motora unutar translacijskog elementa te koji potom pomiče pokretni dio translacijskog elementa preko okretnih vijaka visoke rezolucije.

Prije svakog pomaka, translacijski elementi morali su biti dovedeni u svoju inicijalnu točku, odnosno u točku u kojoj pomak iznosi nula. Pomaci translacijskih elemenata su ograničeni na 25 mm po X osi uzroka te na 25 mm po Y osi uzorka. Maksimalna brzina pomicanja translacijskih elemenata iznosi 2,5 mm/s, a maksimalna opteretivost 10 N. Na idućoj slici prikazan je kontroler i translacijski element. [17]



Slika 26. Kontroler (gore) i translacijski element (dolje) [17]

5. ODREĐIVANJE POLOŽAJA MJERNIH TRAGOVA NA UZORKU

5.1. Način raspodjele mjernih točaka na mjernoj površini

Položaj mjernih tragova na uzorku bio je uvjetovan mjernom površinom uzorka, odnosno dužinom stranica mjerne površine. U ovom diplomskom radu ispitivala su se tri etalona hrapavosti različitih dimenzija mjernih površina. Duljina ispitivanja l_t , odnosno duljina snimljenog profila u funkciji je granične vrijednosti Gaussovog filtra λ_c . Odabir vrijednosti λ_c definiran je normom ISO 4288:1996 te je u funkciji iznosa nazivnih vrijednosti parametara hrapavosti R_{Sm} , R_a ili R_z . S povećanjem nazivnih vrijednosti parametara hrapavosti, rastu i vrijednosti *cut-offa*. Prema tome, za očekivati je da mjerne površine viših vrijednosti parametara hrapavosti moraju biti i većih dimenzija. Zbog navedenog, izbor položaja mjernih tragova na etalonu definiran je s obzirom na dimenzije mjerne površine uzorka te na vrijednost *cut-offa*.

S obzirom na dimenzije mjerne površine te iznos *cut-offa*, tragovi su bili raspoređeni po površini uzorka na način da se ona cjelovito ispita. Dakle, mjerni tragovi nisu smjeli biti koncentrirani na jednom djelu mjerne površine. Odlučeno je da se prilikom ispitivanja mjerne površine načini 6 mjernih tragova, odnosno šest profila hrapavosti jednoliko raspoređenih po mjernoj površini. Početna točka, odnosno ishodište prema kojem su se određivale koordinate svih ostalih početnih točaka mjerenja, nalazilo se u donjem lijevom kutu mjerne površine uzorka s obzirom da su translacijski elementi bili postavljeni tako da prilikom promjene položaja svojeg pomičnog dijela pomiču etalon na desno (pozitivan smjer osi X) te prema gore (pozitivan smjer osi Y). Duljina mjerne površine etalona, odnosno os X, bila je jedan od uvjeta za izradu rasporeda tragova. Mjerni tragovi su se razlikovali po duljini s obzirom na iznos *cut-offa*. Ukoliko se radilo o većem *cut-offu*, tragovi su imali veću duljinu, te su morali biti raspoređeni tako da se ni u jednom trenutku ne nalaze izvan mjerne površine etalona. Stoga je bilo važno uskladiti duljinu mjerne površine etalona i duljinu mjernih tragova prilikom određivanja koordinata njihovih početnih točaka.

Duljina snimljenog profila odgovara duljini od sedam referentnih duljina lr , a koje ovise od iznosu *cut-offa* (λ_c). Prilikom mjerenja ticalo se kreće s desna na lijevo. U idućoj tablici prikazani su iznosi referentnih duljina i duljina uzimanja tragova.

Tablica 3. Referentne duljine te duljine uzimanja tragova

REFERENTNA DULJINA	DULJINA TRAGOVA
$lr(\lambda_c)$, mm	$lt = 7 \times lr$, mm
0,08	0,56
0,25	1,75
0,8	5,6
2,5	17,5
8,0	56

S obzirom na iznos *cut-offa* te dimenzije mjerne površine etalona hrapavosti, izrađena su četiri tipa raspodjele mjernih tragova po mjernoj površini etalona, gdje je:

λ_c – iznos *cut-offa*

X – duljina mjerne površine etalona

Y – širina mjerne površine etalona

l_t - duljina uzimanja tragova

L_1 - pomak etalona po osi X

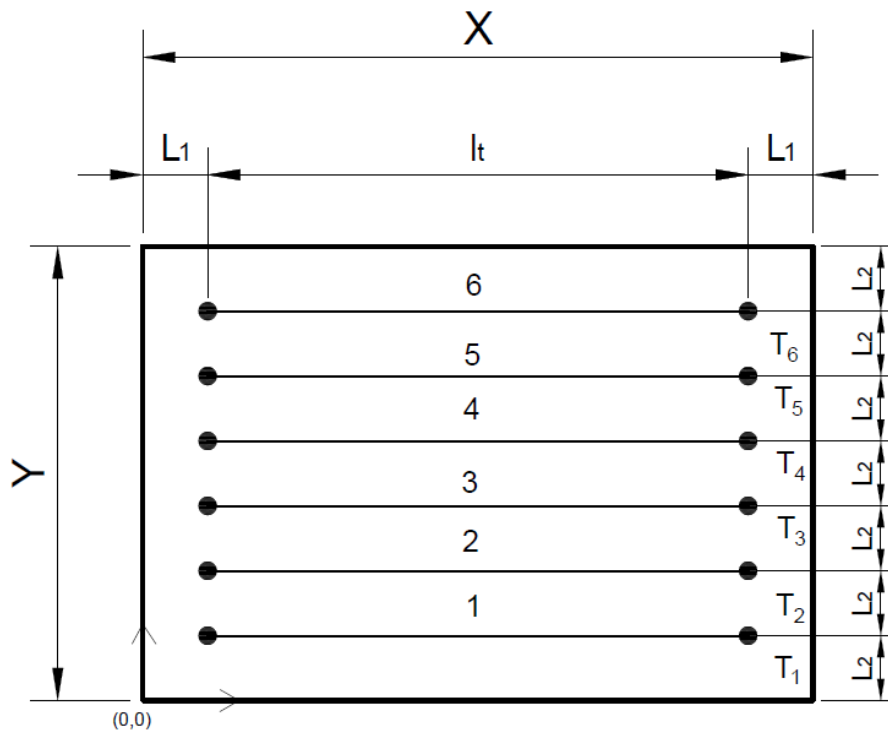
L_2 – pomak etalona po osi Y

T_{pxi} – koordinate početne točke mjerenja po osi X

T_{pyi} – koordinate početne točke mjerenja po osi Y

Raspodjele mjernih tragova:

1. Ako je $\lambda_c = 2,5 \text{ mm}$, $X = 22 \text{ mm} - 25 \text{ mm}$, $l_t = 17,5 \text{ mm}$, položaj tragova bit će kako je prikazano na slici 27.



Slika 27. Raspored tragova mjerenja – Tip 1

Etalon je moguće mjeriti ukoliko su zadovoljeni sljedeći uvjeti:

$$X \geq 2 \times L_1 + l_t \quad (2.1)$$

$$L_1 \leq \frac{X - l_t}{2} \quad (2.2)$$

$$Y \geq 7 \times L_2 \quad (2.3)$$

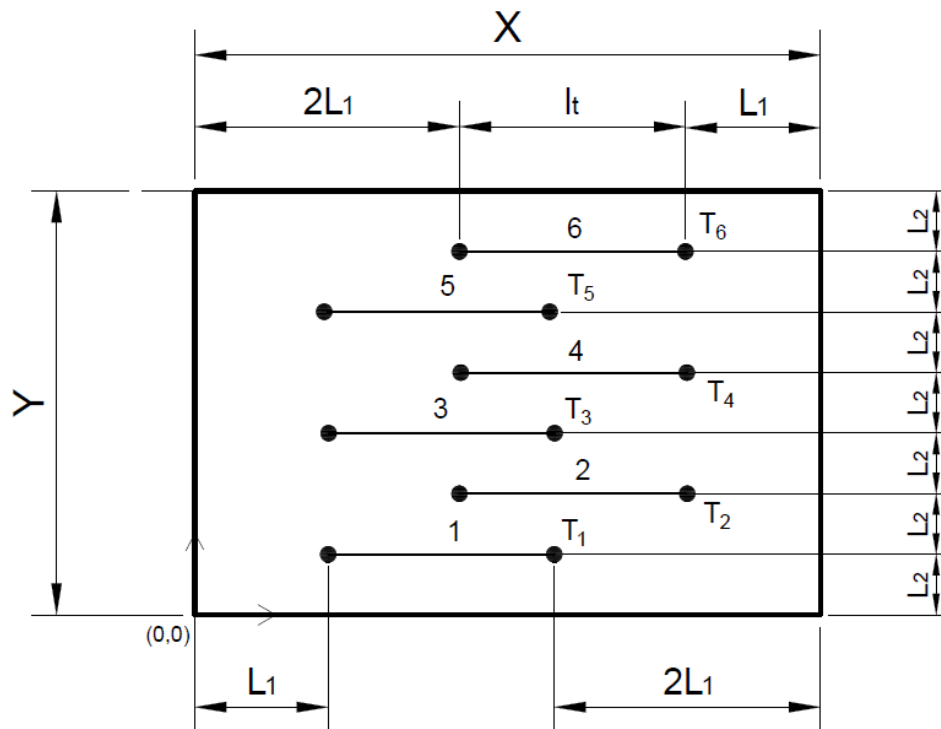
$$L_2 \leq \frac{Y}{7} \quad (2.4)$$

Pomaci etalona po X i Y osi, odnosno koordinate početnih točaka računaju se na idući način:

$$T_{pxi} = L_1 + l_t \quad (2.5)$$

$$T_{pyi} = \sum_{i=1}^6 L_{2i} \quad (2.6)$$

2. Ako je $\lambda_c = 0,8 \text{ mm}$, $X = 12 \text{ mm} - 25 \text{ mm}$, $l_t = 5,6 \text{ mm}$, onda su tragovi raspoređeni kako je prikazano slikom 28.



Slika 28. Raspored tragova mjerenja – Tip 2

Etalon je moguće mjeriti ukoliko su zadovoljeni sljedeći uvjeti:

$$X \geq 3 \times L_1 + l_t \quad (2.7)$$

$$L_1 \leq \frac{X - l_t}{3} \quad (2.8)$$

$$Y \geq 7 \times L_2 \quad (2.9)$$

$$L_2 \leq \frac{Y}{7} \quad (2.10)$$

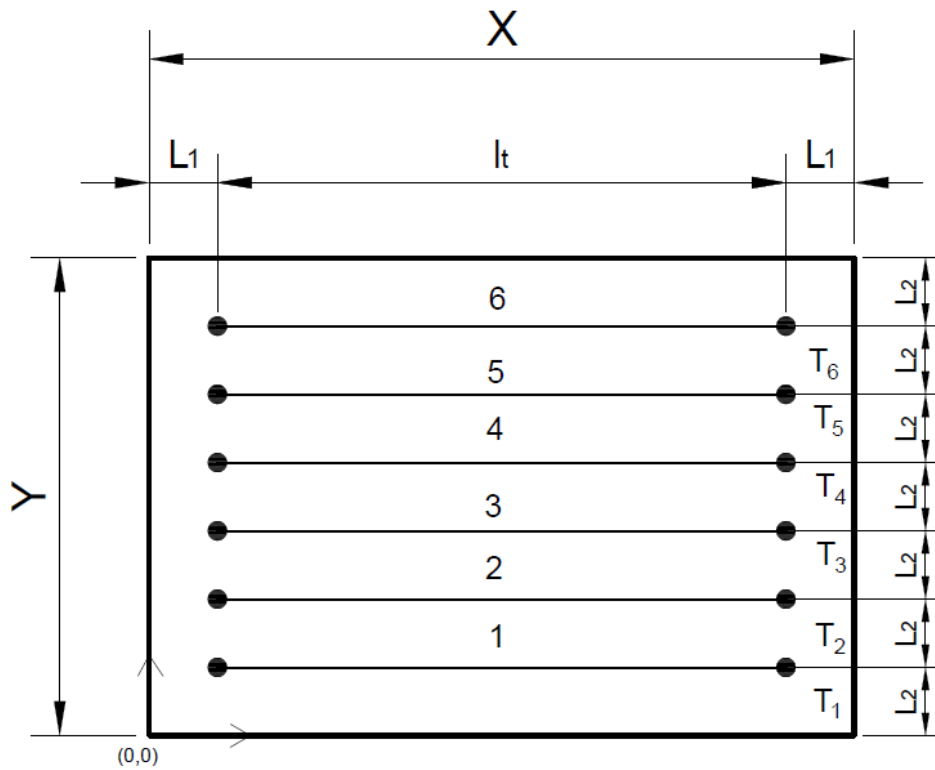
Pomaci etalona po X i Y osi, odnosno koordinate početnih točaka računaju se na idući način:

$$T_{px(1,3,5)} = L_1 + l_t \quad (2.11)$$

$$T_{px(2,4,6)} = 2L_1 + l_t \quad (2.12)$$

$$T_{pyi} = \sum_{i=1}^6 L_{2i} \quad (2.13)$$

3. Ako je $\lambda_c = 0,8 \text{ mm}$, $X = 8 \text{ mm} - 12 \text{ mm}$, $l_t = 5,6 \text{ mm}$, položaj tragova bit će kako je prikazano na slici 29.



Slika 29. Raspored tragova mjerenja – Tip 1

Etalon je moguće mjeriti ukoliko su zadovoljeni sljedeći uvjeti:

$$X \geq 2 \times L_1 + l_t \quad (2.14)$$

$$L_1 \leq \frac{X - l_t}{2} \quad (2.15)$$

$$Y \geq 7 \times L_2 \quad (2.16)$$

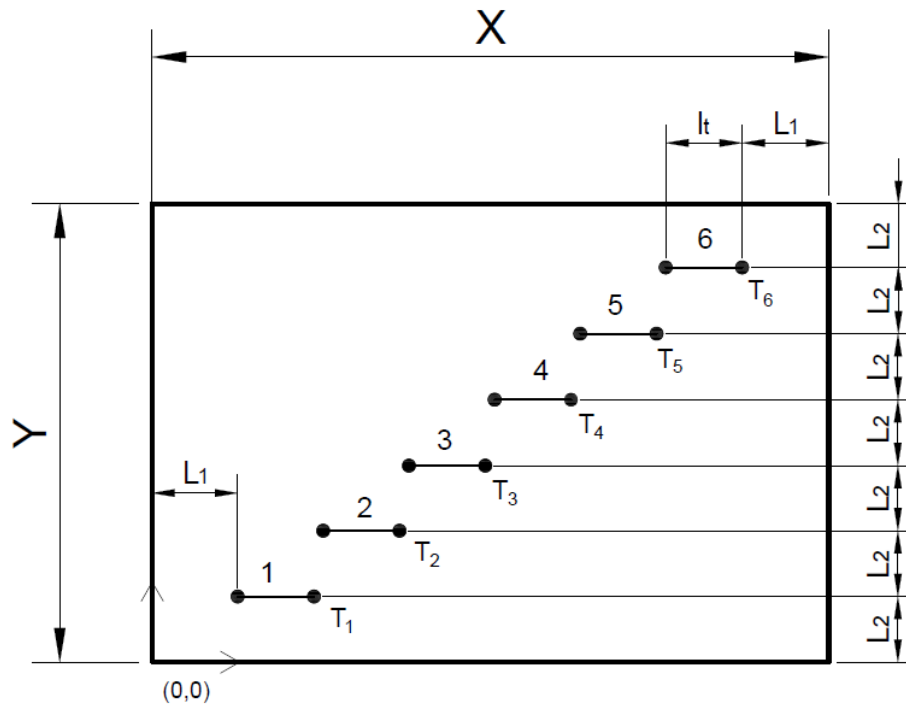
$$L_2 \leq \frac{Y}{7} \quad (2.17)$$

Pomaci etalona po X i Y osi, odnosno koordinate početnih točaka računaju se na idući način:

$$T_{pxi} = L_1 + l_t \quad (2.18)$$

$$T_{pyi} = \sum_{i=1}^6 L_{2i} \quad (2.19)$$

4. Ako je $\lambda_c = 0,25$ mm, $X = 12$ mm - 25 mm, $l_t = 1,75$ mm, onda su tragovi raspoređeni kako je prikazano slikom 30.



Slika 30. Raspored mjernih tragova – Tip 3

Etalon je moguće mjeriti ukoliko su zadovoljeni sljedeći uvjeti:

$$X \geq 7 \times L_1 + l_t \quad (2.20)$$

$$L_1 \leq \frac{X - l_t}{7} \quad (2.21)$$

$$Y \geq 7 \times L_2 \quad (2.22)$$

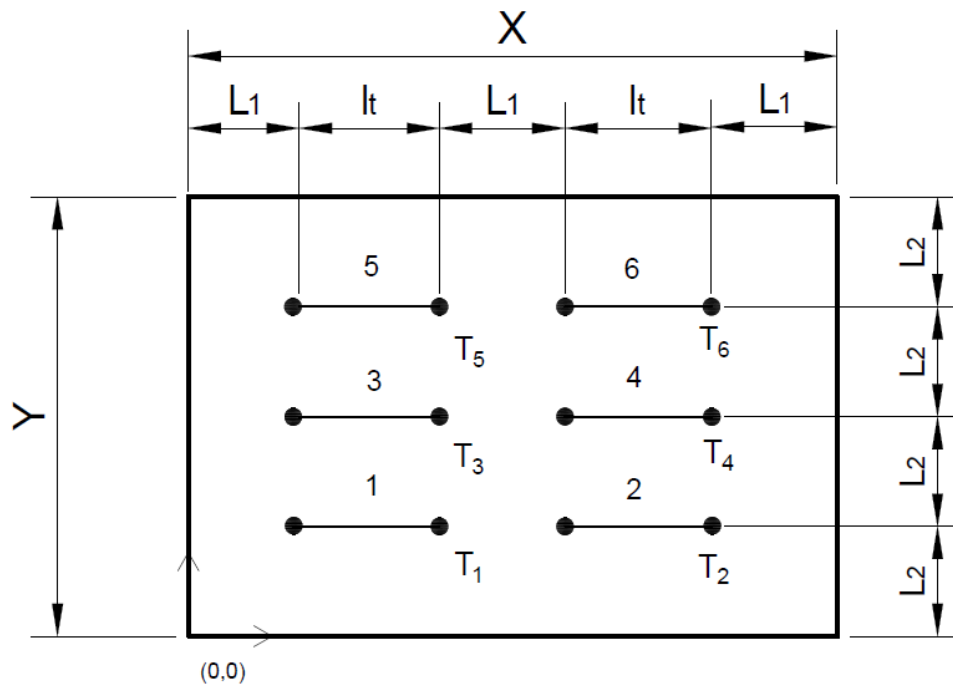
$$L_2 \leq \frac{Y}{7} \quad (2.23)$$

Pomaci etalona po X i Y osi, odnosno koordinate početnih točaka računaju se na idući način:

$$T_{pxi} = l_t + \sum_{i=1}^6 L_{1i} \quad (2.24)$$

$$T_{pyi} = \sum_{i=1}^6 L_{2i} \quad (2.25)$$

5. Ako je $\lambda_c = 0,25$ mm, $X = 8$ mm - 12 mm, $l_t = 1,75$ mm, onda su tragovi raspoređeni kako je prikazano slikom 31.



Slika 31. Raspored mjernih tragova – Tip 4

Etalon je moguće mjeriti ukoliko su zadovoljeni sljedeći uvjeti:

$$X \geq 3 \times L_1 + 2 \times l_t \quad (2.26)$$

$$L_1 \leq \frac{X - 2 \times l_t}{3} \quad (2.27)$$

$$Y \geq 4 \times L_2 \quad (2.28)$$

$$L_2 \leq \frac{Y}{4} \quad (2.29)$$

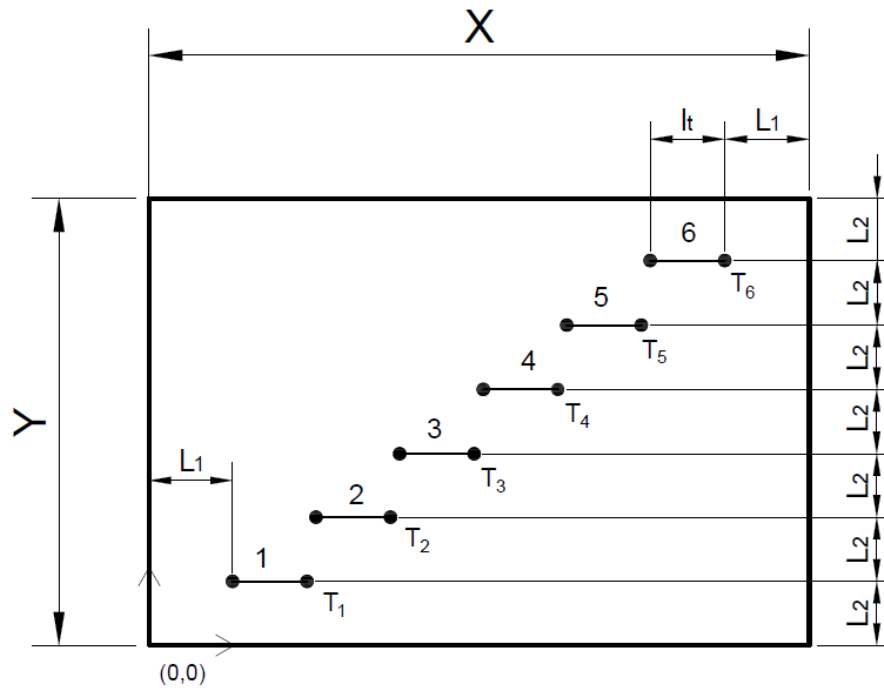
Pomaci etalona po X i Y osi, odnosno koordinate početnih točaka računaju se na idući način:

$$T_{px(1,3,5)} = L_1 + l_t \quad (2.30)$$

$$T_{px(2,6,4)} = 2L_1 + 2l_t \quad (2.31)$$

$$T_{pyi} = \sum_{i=1}^3 L_{2i} \quad (2.32)$$

6. Ako je $\lambda_c = 0,08 \text{ mm}$, $X = 8 \text{ mm} - 12 \text{ mm}$, $l_t = 0,56 \text{ mm}$, onda su tragovi raspoređeni kako je prikazano slikom 32.



Slika 32. Raspored mjernih tragova – Tip 3

Etalon je moguće mjeriti ukoliko su zadovoljeni sljedeći uvjeti:

$$X \geq 7 \times L_1 + l_t \quad (2.33)$$

$$L_1 \leq \frac{X - l_t}{7} \quad (2.34)$$

$$Y \geq 7 \times L_2 \quad (2.35)$$

$$L_2 \leq \frac{Y}{7} \quad (2.36)$$

Pomaci etalona po X i Y osi, odnosno koordinate početnih točaka računaju se na idući način:

$$T_{pxi} = l_t + \sum_{i=1}^6 L_{1i} \quad (2.37)$$

$$T_{pyi} = \sum_{i=1}^6 L_{2i} \quad (2.38)$$

U idućoj tablici ukratko su prikazani odnos *cut-offa*, duljine etalona te pripadajućeg tipa raspodjele mjernih tragova po mjernoj površini etalona.

Tablica 4. Tip rasporeda mjernih tragova u ovisnosti o λ_c te duljini mjerne površine

λ_c (mm)	l_t (mm)	X (mm)	Tip
2,5	17,5	25-22	1
0,8	5,6	25-12 12-8	2 1
0,25	1,75	25-12 12-8	3 4
0,08	0,56	12-8	3

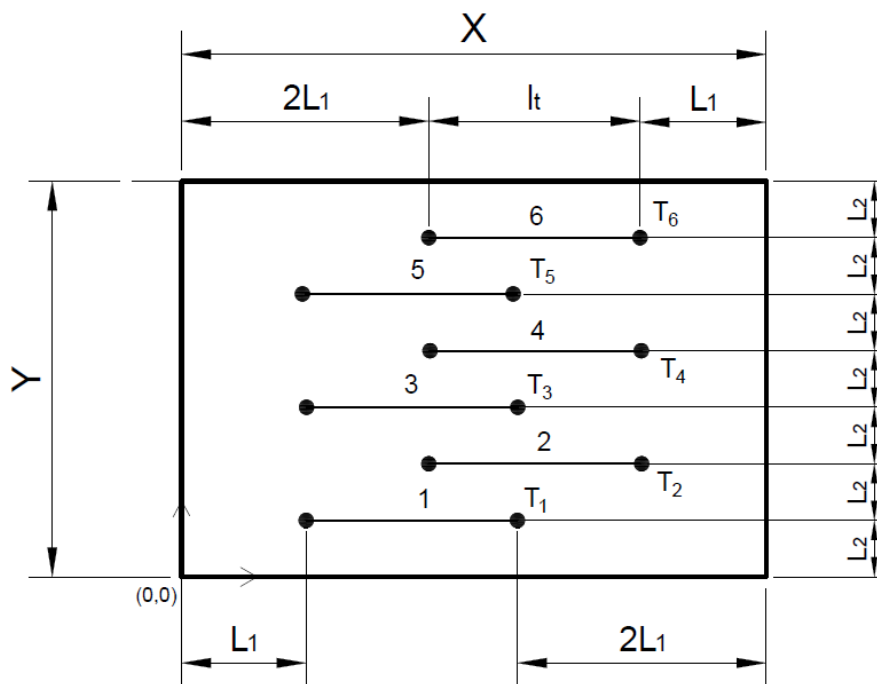
5.2. Određivanje početnih točaka mjerenja

Kako bi se provela mjerenja korištenjem različitih distribucija mjernih tragova odabrana su tri etalona s različitim dimenzijama mjernih površina, različitog zahtjeva na vrijednost *cut-offa* te različitih vrsta profila hrapavosti. Na slici 33. prikazana su tri etalona koja su se koristila za mjerenje u okviru ovog diplomskog rada. Brojevima je označen redoslijed njihova mjerenja. Mjerna površina prvog etalona na slici omeđena je crnim linijama te je izrađena u staklu. Sadržava regularni trokutasti profil hrapavosti. Mjerna površina drugog etalona hrapavosti izrađena je od silicija/silicijevog dioksida te sadržava regularni pravokutni profil hrapavosti dok je mjerna površina trećeg etalona izrađena od čelika te sadržava iregularni profil hrapavosti.



Slika 33. Redoslijed mjerenja etalona

Idući se mjerio etalon izrađen od stakla koji je sadržavao regularne profile hrapavosti trokutaste geometrije. Dimenzije mjerne površine tog etalona iznosile su $15 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$, a normom ISO 4288:1996 zahtijevana vrijednost *cut-offa* iznosila je $0,8 \text{ mm}$. Prema zadanim podacima se iz tablice 4. mogao odabrati način na koji će tragovi mjerenja biti jednoliko raspoređeni po mjernoj površini etalona. S obzirom da se duljina etalona nalazi u intervalu od 12 mm do 25 mm te da *cut-off* iznosi $0,8 \text{ mm}$, odabire se raspored Tipa 2. Na idućoj slici prikazan je raspored Tipa 2.



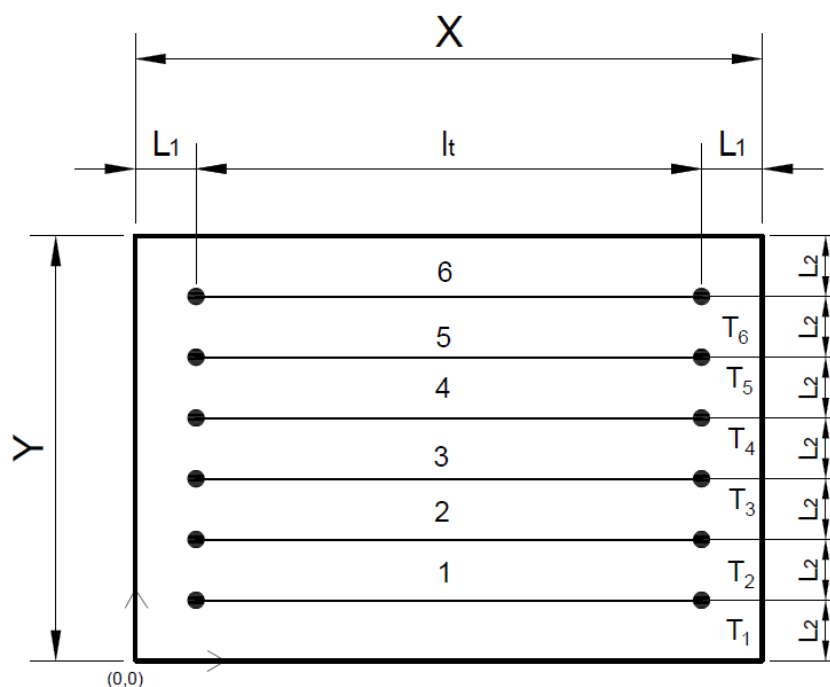
Slika 35. Raspored mjernih tragova – Tip 2

U idućoj tablici prikazani su podaci koji su bili potrebni za izračunavanje koordinata točaka te koordinate početnih točaka s obzirom na ishodište koordinatnog sustava pridruženog mjernoj površini etalona.

Tablica 6. Iznosi koordinata početnih točaka drugog mjenenog etalona

λ_c (mm)	0,8	Redni broj točke	Koordinate točaka	
			X	Y
Tip	2			
l_t (mm)	5,6	T_1	8,733333333	0,714285714
X (mm)	15	T_2	11,866666667	1,428571429
Y (mm)	5	T_3	8,733333333	2,142857143
$L1$ (mm)	3,133333333	T_4	11,866666667	2,857142857
$L1'$ (mm)	6,266666667	T_5	8,733333333	3,571428571
$L2$ (mm)	0,714285714	T_6	11,866666667	4,285714286

Posljednji se mjerio etalon čija je mjerna površina izrađena od čelika te čije su dimenzije iznosile 40 mm × 30 mm. S obzirom da se radilo o mjernoj površini čija je duljina veća od referentne vrijednosti duljine mjerne površine pomoću koje se određivao raspored tragova na uzorku, mjerio se samo jedan dio mjerne površine čije su dimenzije bile 25 mm × 25 mm. Normom ISO 4288:1996 zahtijevana vrijednost *cut-offa* iznosila je 2,5 mm. Prema tablici 4. odabrao se raspored tragova Tipa 1. Na idućoj slici prikazan je raspored tragova Tipa 1.



Slika 36. Raspored mjernih tragova – Tip 1

U idućoj tablici prikazani su podaci koji su bili potrebni za izračunavanje koordinata točaka te koordinate početnih točaka s obzirom na ishodište koordinatnog sustava pridruženog mjernoj površini etalona.

Tablica 7. Iznosi koordinata početnih točaka trećeg mjerenog etalona

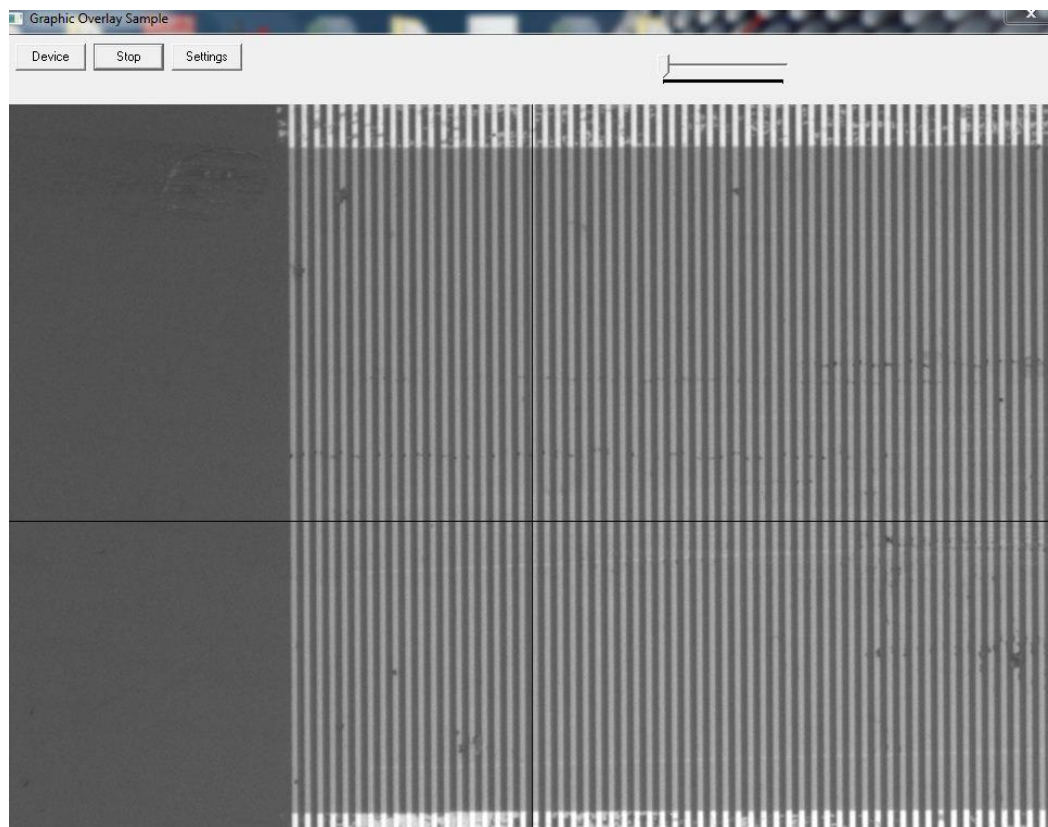
λ_c (mm)	2,5	Redni broj točke	Koordinate točaka	
			X	Y
Tip	1			
lt (mm)	17,5	T_1	21,25	3,571428571
X (mm)	25	T_2	21,25	7,142857143
Y (mm)	25	T_3	21,25	10,71428571
$L1$ (mm)	3,75	T_4	21,25	14,28571429
$L1'$ (mm)	/	T_5	21,25	17,85714286
$L2$ (mm)	3,571428571	T_6	21,25	21,42857143

6. PROVOĐENJE MJERENJA

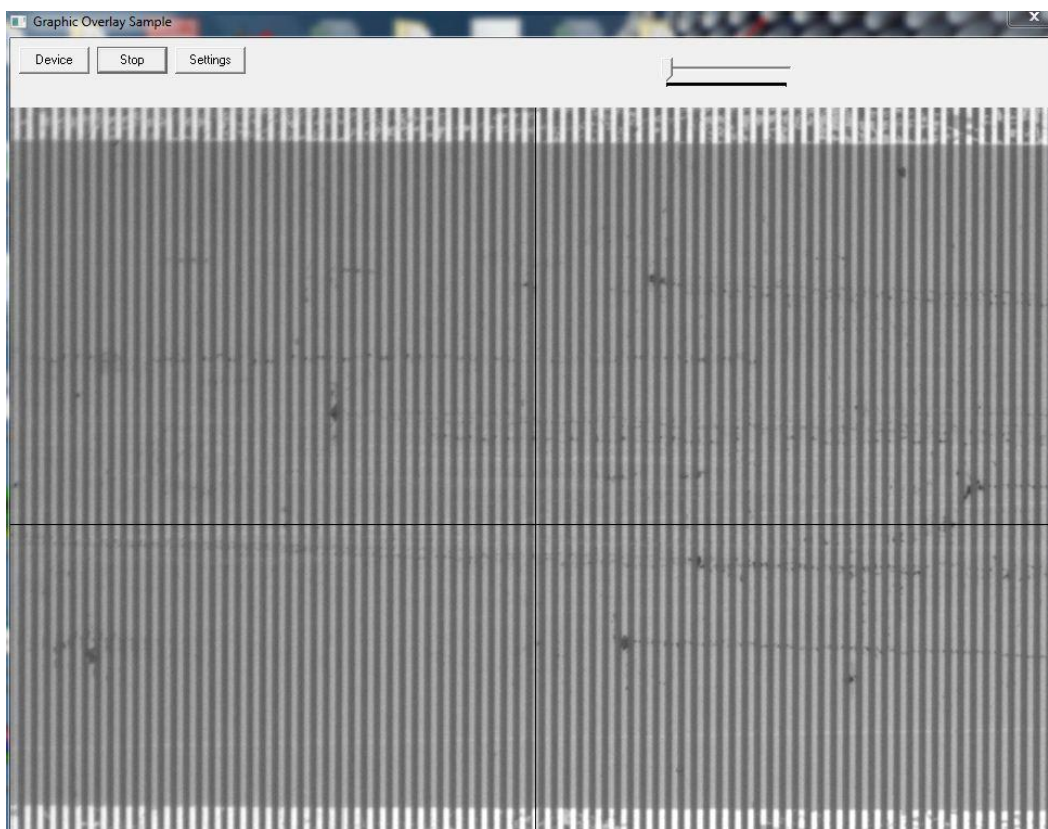
6.1. Vizualni pregled etalona pomoću kamere

Prije mjerenja parametara profila hrapavosti, svaki se etalon vizualno ispitao pomoću kamere. Stoga je prilikom svakog vizualnog ispitivanja bilo potrebno dodati osvjetljenje pomoću kojeg se omogućavao bolji pregled stanja mjernih površina na etalonima. Etaloni su se pregledavali kako bi se utvrdilo postoje li određena veća oštećenja na mjernoj površini etalona vidljiva pomoću kamere, a koja bi značajno mogla utjecati na mjerni rezultat. Izborom osvjetljenja znatno se utječe na kvalitetu dobivene slike te na mogućnost uočavanja nepravilnosti na mjernoj površini etalona. Nakon što bi se etalon pregledao, osvjetljenje se skidalo sa nosača kamere kako bi se omogućio nesmetan prolazak ticala prilikom mjerenja hrapavosti uzorka.

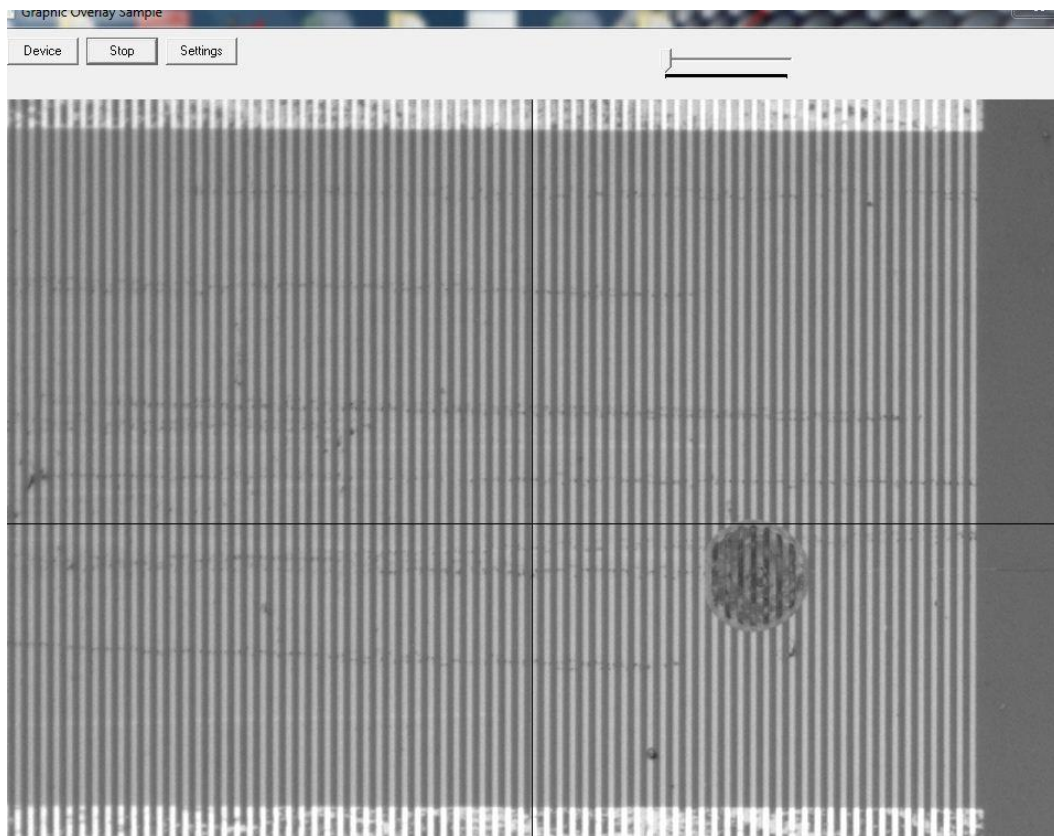
Etalon izrađen od stakla nije bilo moguće pregledati na ovakav način, s obzirom da je bijela podloga postavljena ispod staklene mjerne površine prejako reflektirala svjetlost koja je padala na mjernu površinu, te zbog toga kamera nije bila u mogućnosti snimiti sliku. Etalon izrađen od silicijevog dioksida te čelični etalon bilo je moguće vizualno ispitati. Korištenjem ispravnog osvjetljenja jasno se može vidjeti pravilni raspored pravokutnih profila hrapavosti kao i pojedina oštećenja nastala na mjernoj površini etalona koja prilikom mjerenja mogu utjecati na mjerne rezultate. Na slici 37., slici 38. te slici 39. prikazana je mjerna površina etalona sa slijedom pravokutnih brazdi.



Slika 37. Prvi dio mjerne površine sa slijedom pravokutnih brazdi

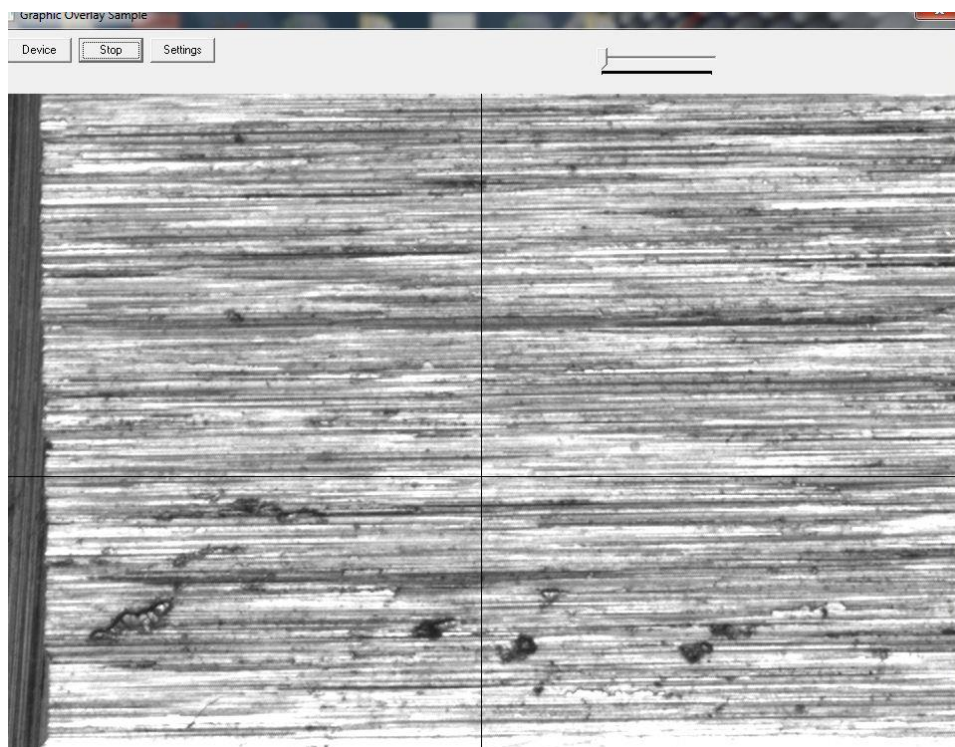


Slika 38. Drugi dio mjerne površine sa slijedom pravokutnih brazdi

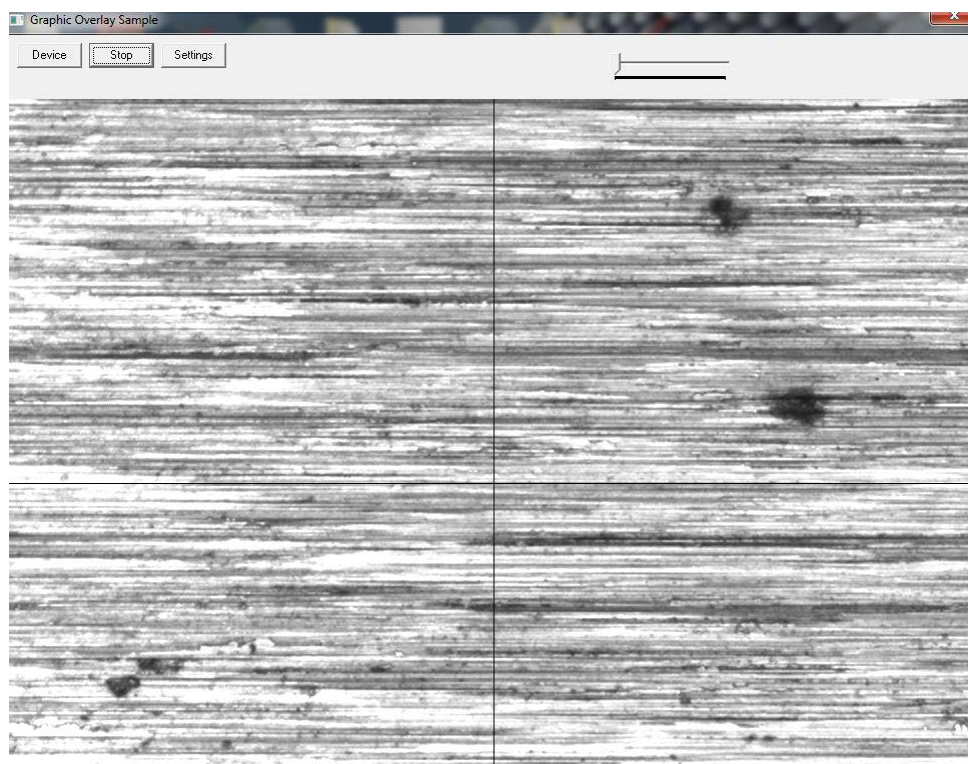


Slika 39. Treći dio mjerne površine sa slijedom pravokutnih brazdi

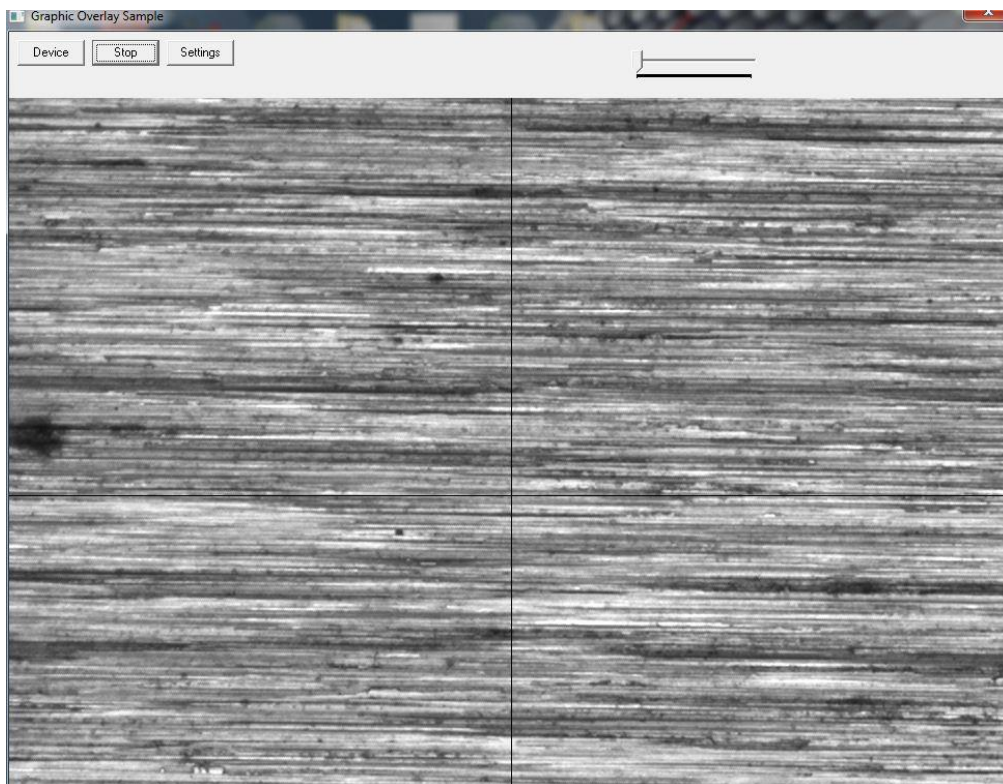
Na slici 40., slici 41. te slici 42. prikazan je dio površine čeličnog etalona sa iregularnim profilima hrapavosti na kojoj se mogu uočiti određena oštećenja.



Slika 40. Prvi dio mjerne površine sa iregularnim profilima hrapavosti



Slika 41. Drugi dio mjerne površine sa iregularnim profilima hrapavosti

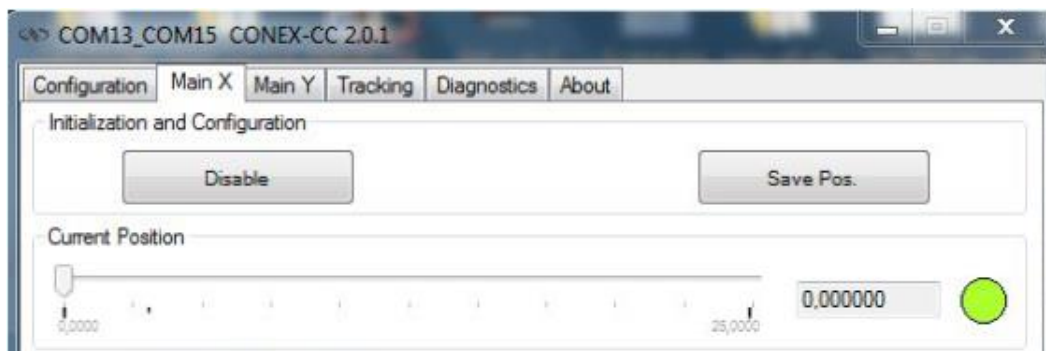


Slika 42. Treći dio mjerne površine sa iregularnim profilima hrapavosti

6.2. Dovođenje ticala, kamere i translacijskih elemenata u vezu

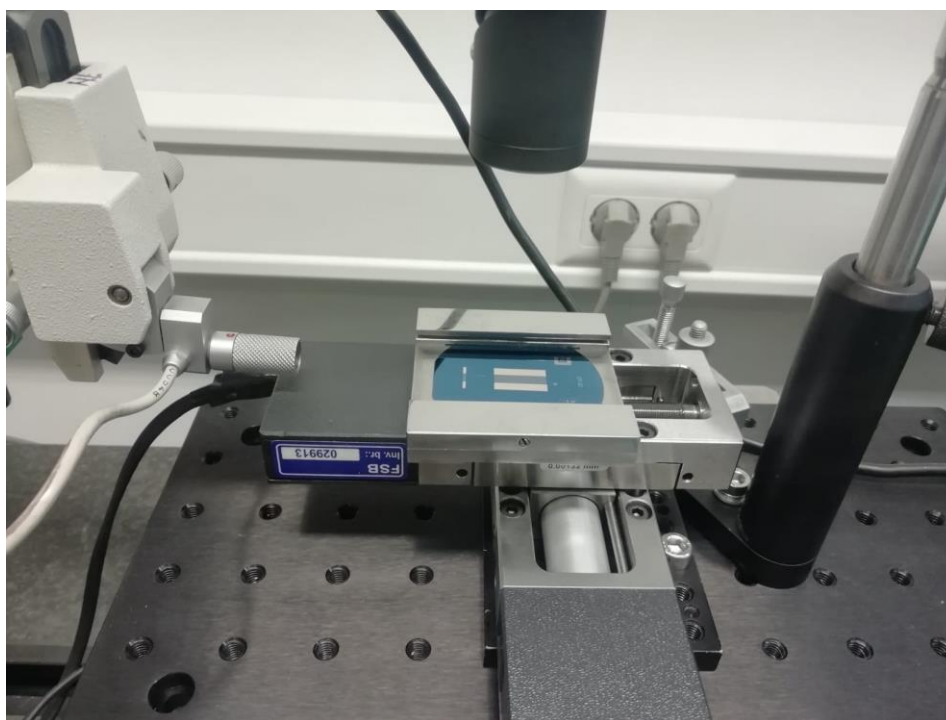
Nakon što su svi elementi mjernog sustava bili kruto povezani, potrebno je bilo u vezu dovesti početnu točku na kojoj se nalazi igla mjernog ticala prije početka mjerenja, središnju točku kamere te translacijske elemente u položaju u kojem je njihov pomak iznosio nula. Ta tri elementa mjernog sustava u vezu su se dovodila preko mjerenog etalona. Nakon što su sva tri elementa bila dovedena u jednu zajedničku točku na uzorku, ta je točka označavala ishodište koordinatnog sustava na etalonu. S obzirom da je odlučeno da ishodište koordinatnog sustava bude postavljeno u donji lijevi kut mjerne površine etalona, to je bila točka u kojoj su se trebali povezati položaji mjerne igle ticala, kamera te položaj translacijskih elemenata.

Prvi korak povezivanja triju elementa bio je inicijalizacija translacijskih elemenata. Dakle, pomoću programa namijenjenog za unos pomaka, translacijski elementi bili su dovedeni u točke u kojima pomak iznosi nula, odnosno u kojima pomak iznosi 25 mm. Na idućoj slici nalazi se prikaz sučelja *Conex CC Utility* programa nakon što su translacijski elementi dovedeni u početnu poziciju.



Slika 43. Prikaz inicijalizacije translacijskih elemenata

Drugi korak bio je postavljanje ispitivanog uzorka na translacijski element. S obzirom da su se u okviru ovog diplomskog rada ispitivala tri različita uzorka, korake dovođenja u vezu bilo je potrebno ponoviti tri puta. Uzorci su se, radi bolje ponovljivosti rezultata te bolje stabilnosti, pričvršćivali pomoću dvostrane ljepljive trake koja je bila zalijepljena na onu stranu uzorka koja je bila u dodiru sa translacijskim elementom. Na idućoj slici prikazan je uzorak koji je postavljen na translacijske elemente.

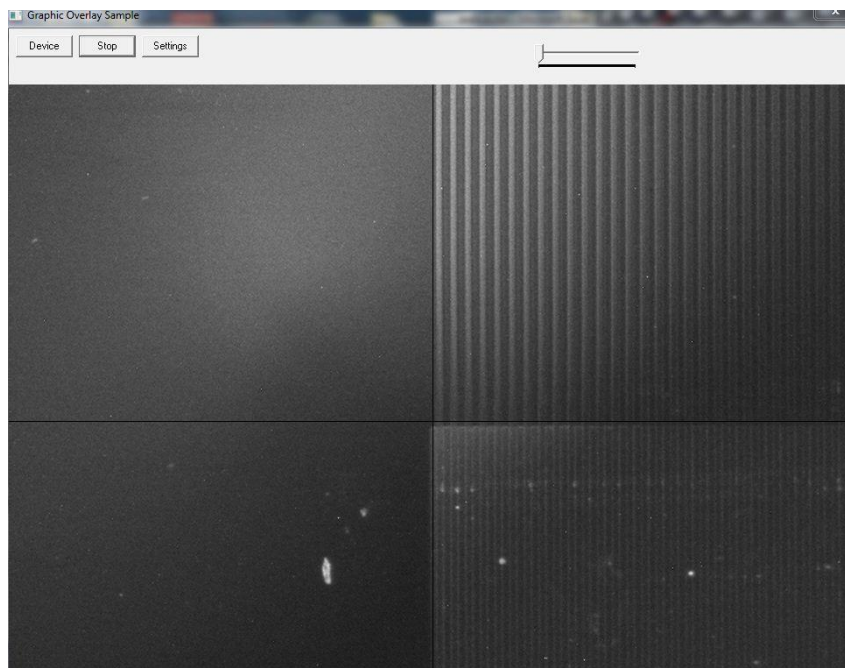


Slika 44. Uzorak postavljen na translacijske elemente

Treći korak bio je dovođenje središta nitnog križa kamere u točku na uzorku za koju je odlučeno da će biti ishodište koordinatnog sustava uzorka. Nitni križ predstavljao je vertikalnu i horizontalnu liniju koje su bile podesive u programu pomoću kojeg se promatra područje koje kamera snima. One su se sjekle točno u središtu vidnog polja kamere.

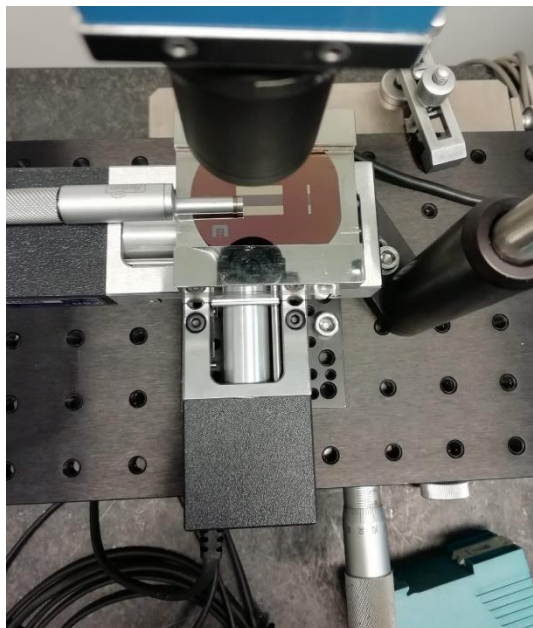
Nitni križ se u određeno ishodište dovodio pomicanjem uzorka ili pomicanjem kamere pomoću njenog nosača, dok se točka ishodišta koordinatnog sustava ne bi približno uskladila sa središtem nitnog križa.

Na idućoj slici može se vidjeti da je kao točka ishodišta odabrana točka u donjem lijevom kutu mjerne površine etalona.



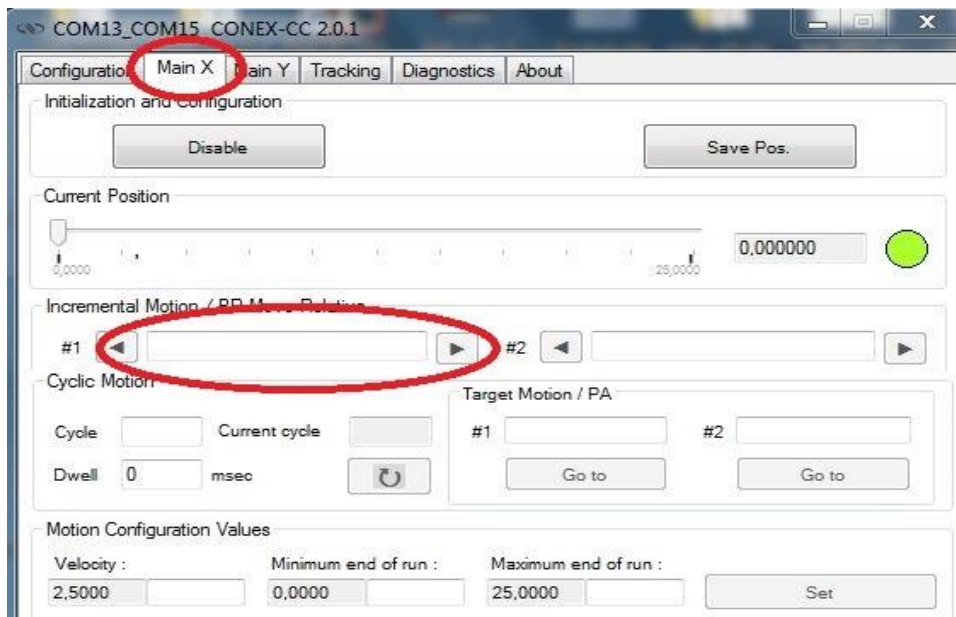
Slika 45. Nitni križ kamere uskladen sa ishodištem koordinatnog sustava na uzorku

Četvrti korak je dovođenje igle ticala u točku na etalonu gdje se nalazi sjecište nitnog križa kamere. S obzirom da su poznate dimenzije ticala i položaj mjerne igle na ticalu te dimenzije mjerne površine etalona, računanjem se moglo odrediti gdje treba postaviti ticalo da bi se donji lijevi kut mjerne površine etalona nalazio točno ispod mjerne igle ticala. Za pomicanje etalona, s obzirom da je početna točka ticala u prostoru fiksna te se ne može mijenjati, koristilo se translatorno postolje s mikrometarskim vijkom pomoću kojeg se etalon dovodio u poziciju na kojoj se donji lijevi kut mjerne površine nalazio ispod mjerne igle ticala.

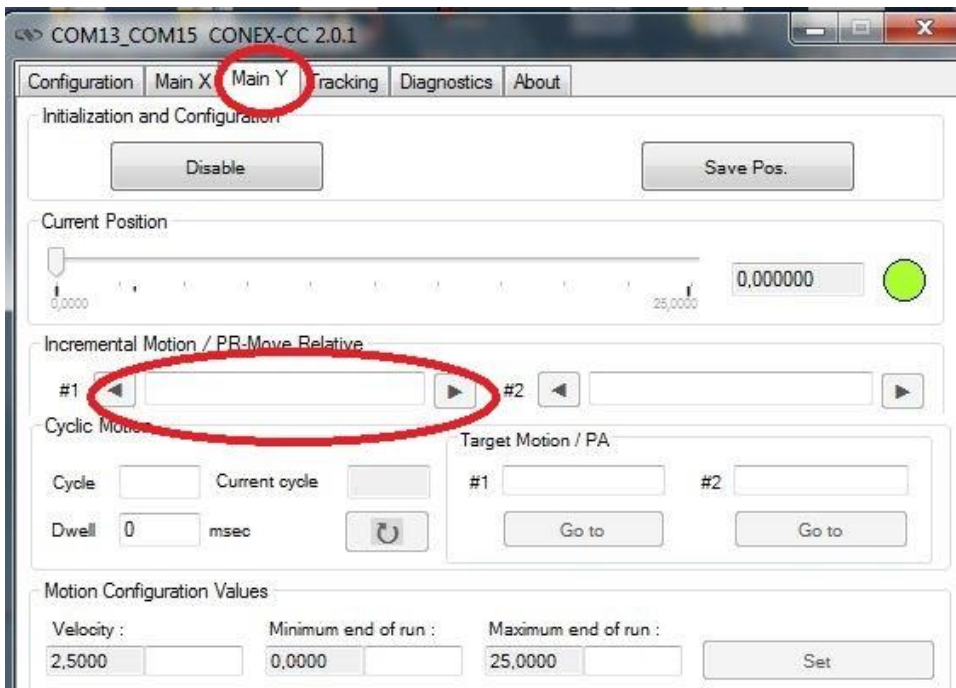


Slika 46. Dovođenje igle ticala u točku ishodišta na uzorku

Nakon što su pomaci translacijskih elemenata iznosili nula te nakon što su se nitni križ kamere i mjerna igla ticala doveli u zajedničku točku u donjem lijevom kutu mjerne površine etalona, moguće je bilo početi unositi koordinate točki iz tablice 5., tablice 6. i tablice 7. u program *Conex CC Utility* koji je potom sukladno unesenim vrijednostima koordinata pomicao etalon. Nakon što bi translacijski elementi pomaknuli etalon na željenu poziciju, ticalo mjernog uređaja se spuštalo na uzorak te se mjerio jedan trag. Potom bi se uzorak pomoću translacijskih elemenata pomaknuo na koordinate iduće točke te bi se mjerio idući trag. Na taj način mjerilo se šest tragova koji su se nalazili na različitim pozicijama, a čije su početne točke imale različite koordinate. Na slici 47. i slici 48. prikazano je sučelje programa *Conex CC Utility* te je crvenom bojom označena kućica za unošenja pomaka.



Slika 47. Način unošenja pomaka translacijskog elementa u smjeru X osi



Slika 48. Način unošenja pomaka translacijskog elementa u smjeru Y osi

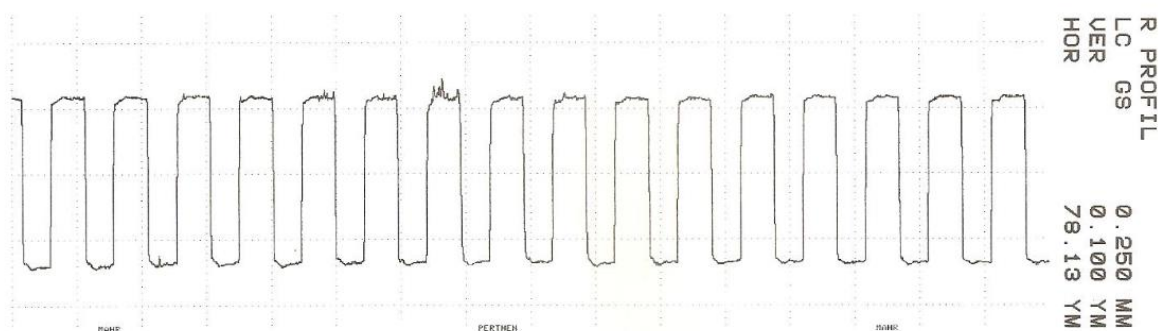
6.3. Mjerenje

6.3.1. Mjerenje etalona pravokutne geometrije profila

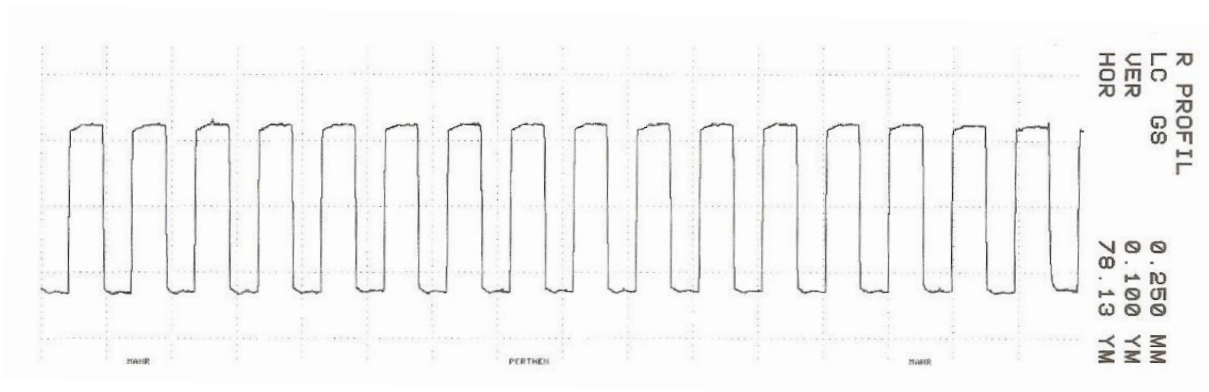
Na svakom etalonu provedene su tri serije s po šest snimljenih profila hrapavosti. Svaki od tih šest tragova započinjao je u točki točno određenih koordinata, stoga je bilo moguće više puta mjeriti isti mjerni trag na uzorku. Dakle, na svakom etalonu snimljeno je osamnaest profila hrapavosti.

Prvi etalon koji je mjereno bio je etalon čija je mjerna površina izrađena od silicijevog dioksida sa slijedom pravokutnih brazdi. Nakon što su u istu poziciju dovedeni nitni križ kamere te početna pozicija mjerne igle ticala kao što je prikazano na slici 45. te na slici 46., potrebno je bilo početi unositi pomake u program za upravljanje translacijskim elementima. U program su se unosile koordinate početnih točaka izračunate u tablici 5. te su se translacijski elementi pomicali sukladno unesenim vrijednostima. Nakon što bi se obavilo mjerenje svih šest tragova iz jedne serije, translacijski elementi su se vraćali na poziciju u kojoj njihov pomak iznosi nula te su se ponovno unosile koordinate početnih točaka počevši od prve točke i ponovno su se provodila mjerenja istih mjernih tragova.

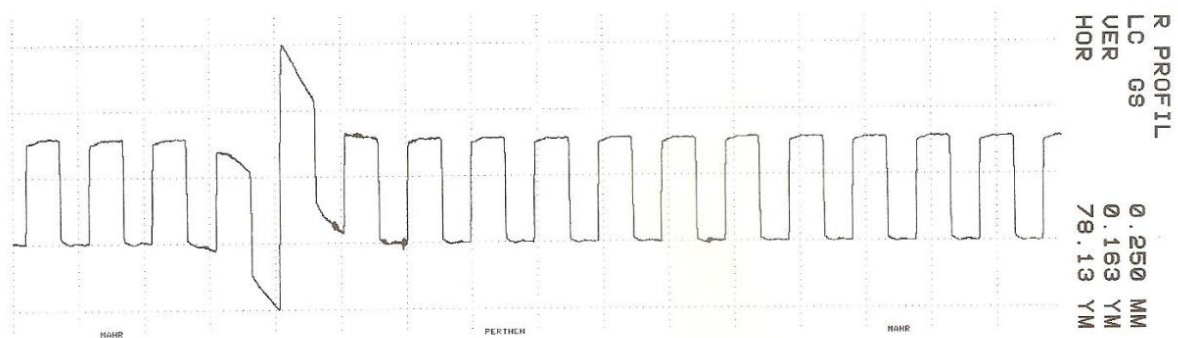
Na slici 49., slici 50., slici 51., slici 52., slici 53. i slici 54. prikazani su grafički rezultati prve serije mjerenja etalona sa slijedom pravokutnih brazdi čija je mjerna površina izrađena od silicijevog dioksida.



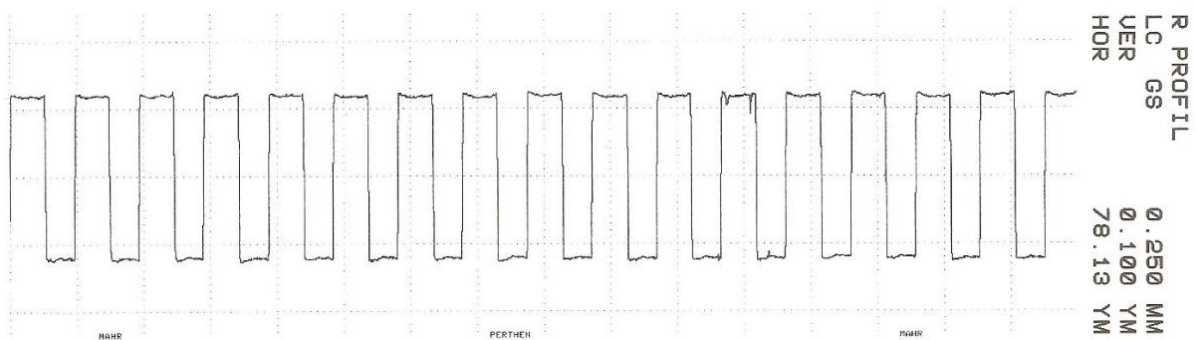
Slika 49. Grafički prikaz prvog traga iz prve serije mjerenja (pravokutni profil)



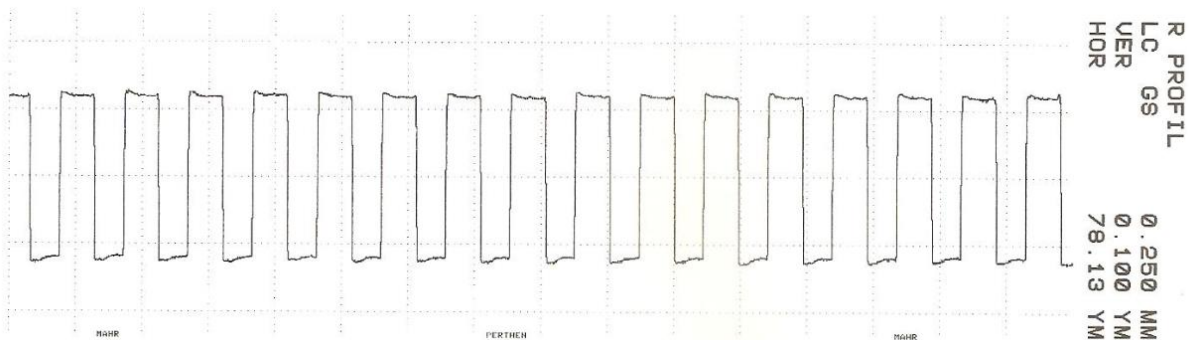
Slika 50. Grafički prikaz drugog traga iz prve serije mjerenja (pravokutni profil)



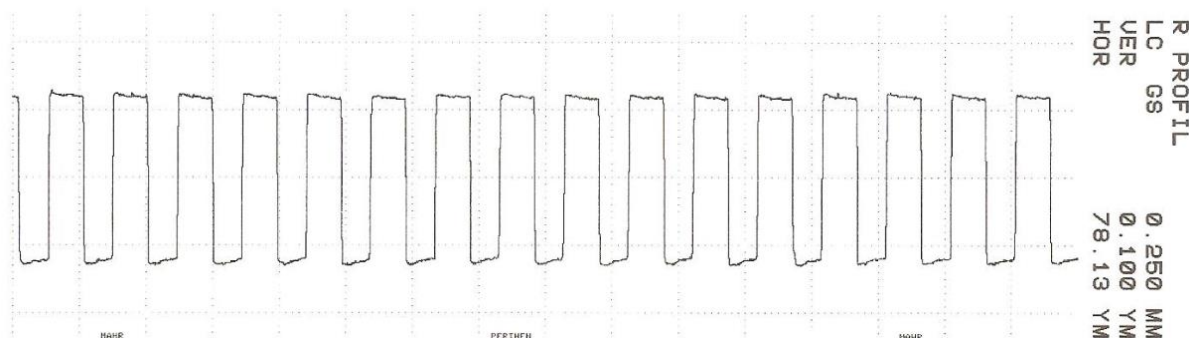
Slika 51. Grafički prikaz trećeg traga iz prve serije mjerenja (pravokutni profil)



Slika 52. Grafički prikaz četvrtog traga iz prve serije mjerenja (pravokutni profil)

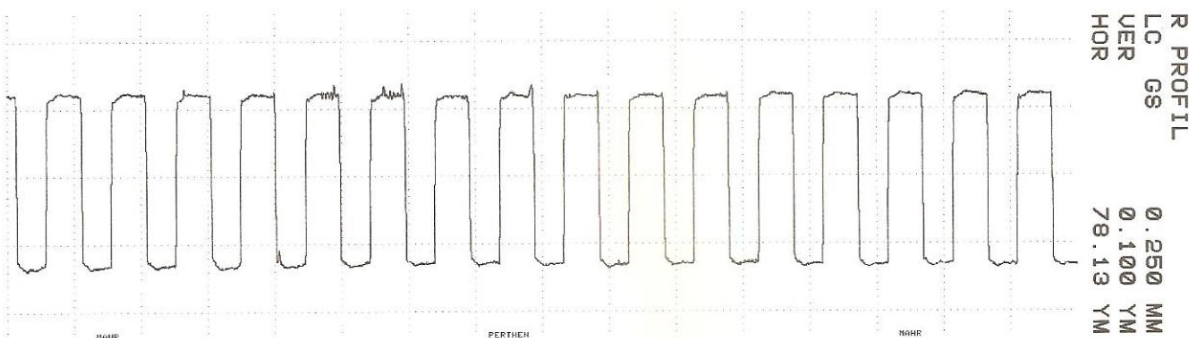


Slika 53. Grafički prikaz petog traga iz prve serije mjerenja (pravokutni profil)

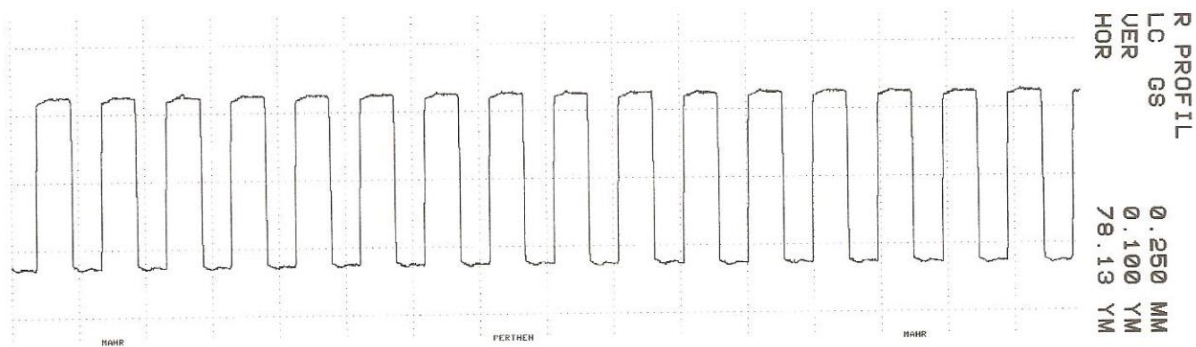


Slika 54. Grafički prikaz šestog traga iz prve serije mjerenja (pravokutni profil)

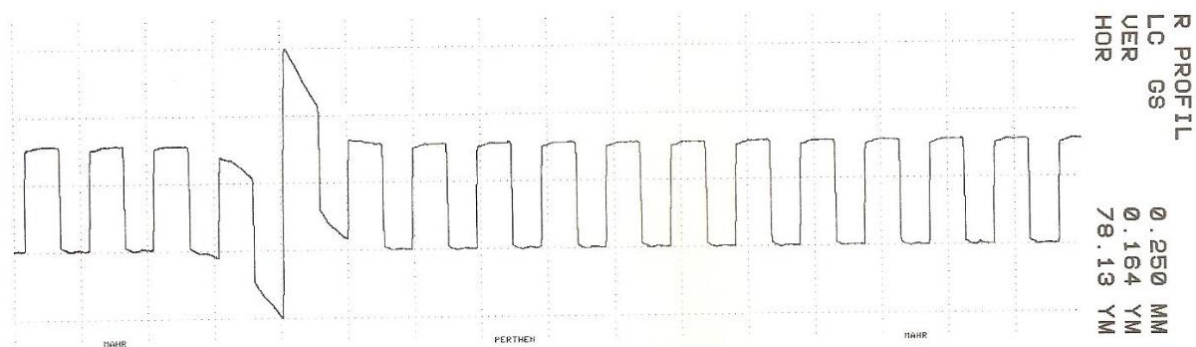
Na slici 55., slici 56., slici 57., slici 58., slici 59. te slici 60. prikazani su grafički rezultati druge serije mjerenja etalona sa slijedom pravokutnih brazdi.



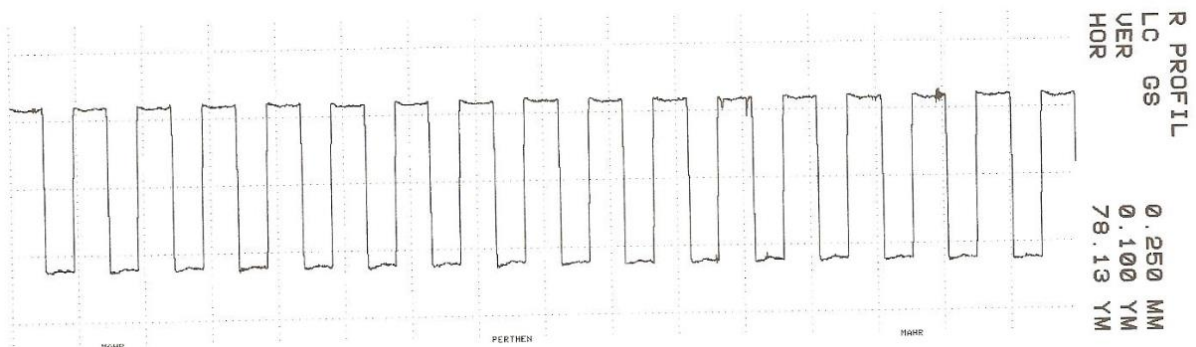
Slika 55. Grafički prikaz prvog traga iz druge serije mjerenja (pravokutni profil)



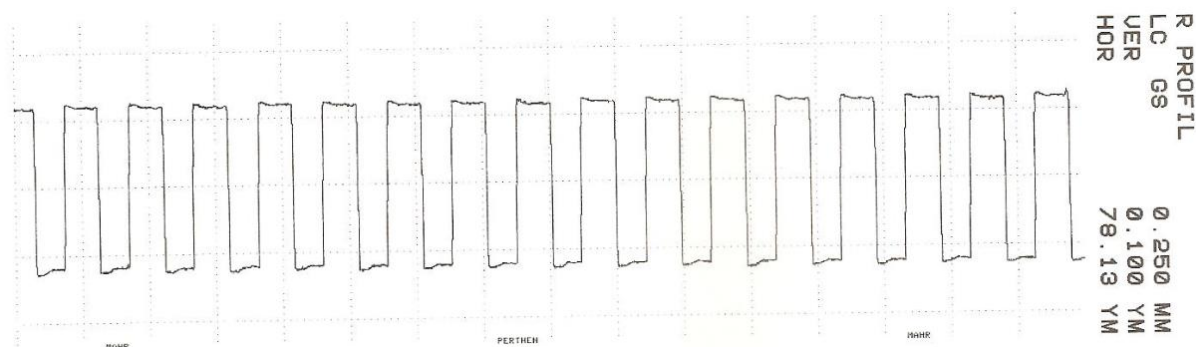
Slika 56. Grafički prikaz drugog traga iz druge serije mjerenja (pravokutni profil)



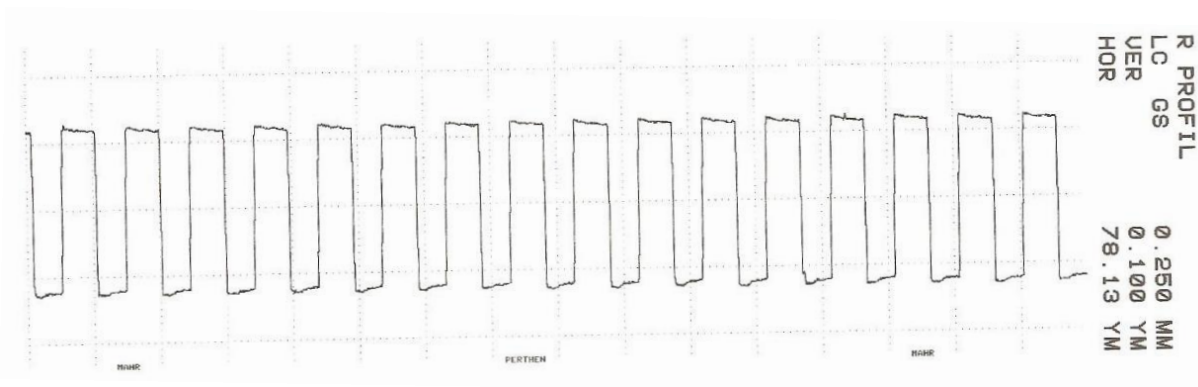
Slika 57. Grafički prikaz trećeg traga iz druge serije mjerenja (pravokutni profil)



Slika 58. Grafički prikaz četvrtog traga iz druge serije mjerenja (pravokutni profil)

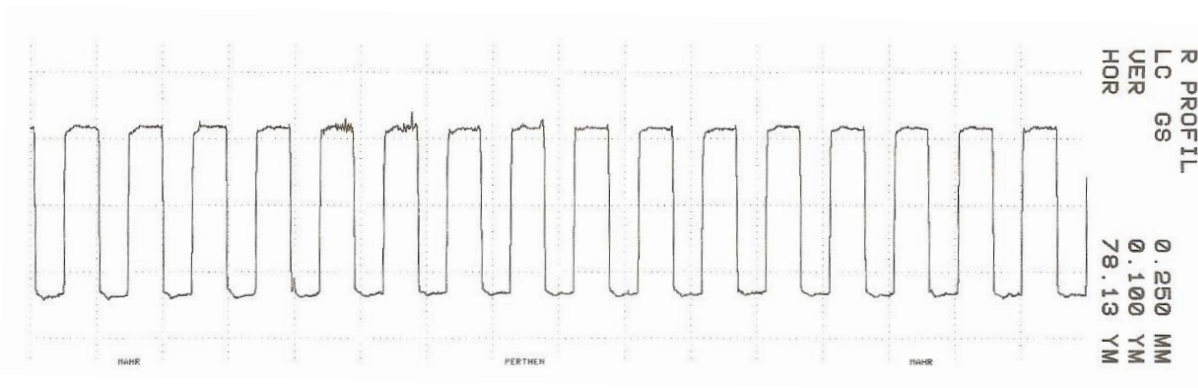


Slika 59. Grafički prikaz petog traga iz druge serije mjerenja (pravokutni profil)

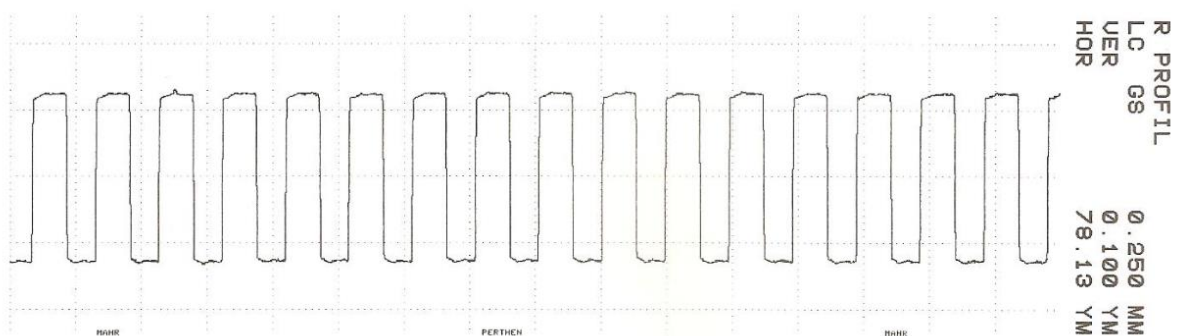


Slika 60. Grafički prikaz šestog traga iz druge serije mjerenja (pravokutni profil)

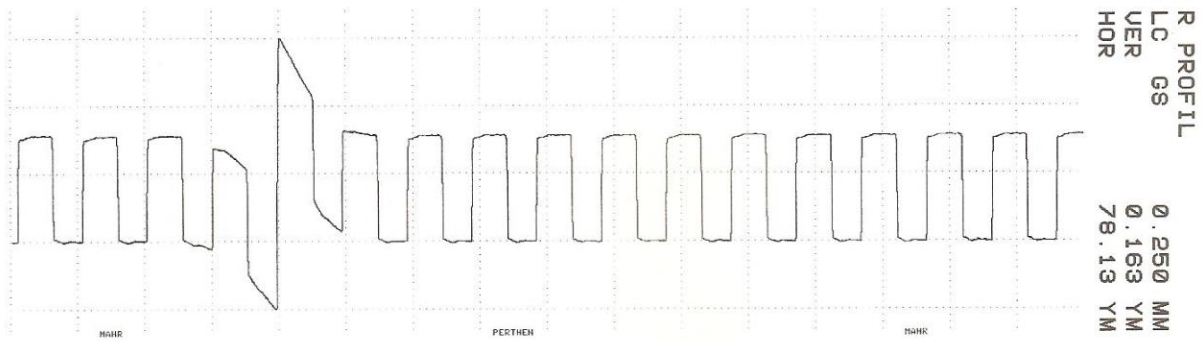
Na slici 61., slici 62., slici 63., slici 64., slici 65. te slici 66. prikazani su grafički rezultati treće serije mjerenja etalona sa slijedom pravokutnih brazdi.



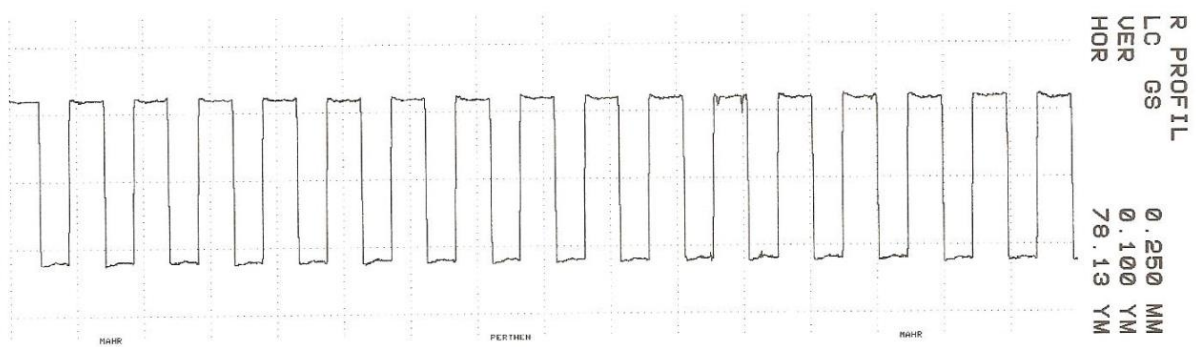
Slika 61. Grafički prikaz prvog traga iz treće serije mjerenja (pravokutni profil)



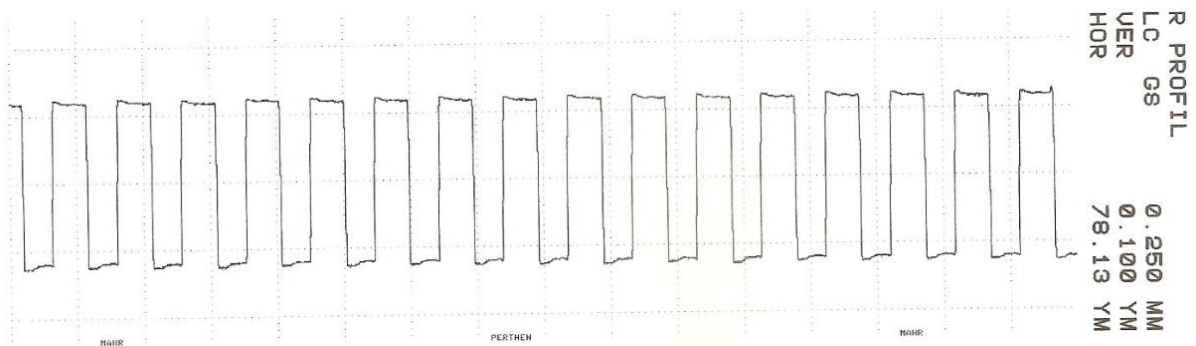
Slika 62. Grafički prikaz drugog traga iz treće serije mjerenja (pravokutni profil)



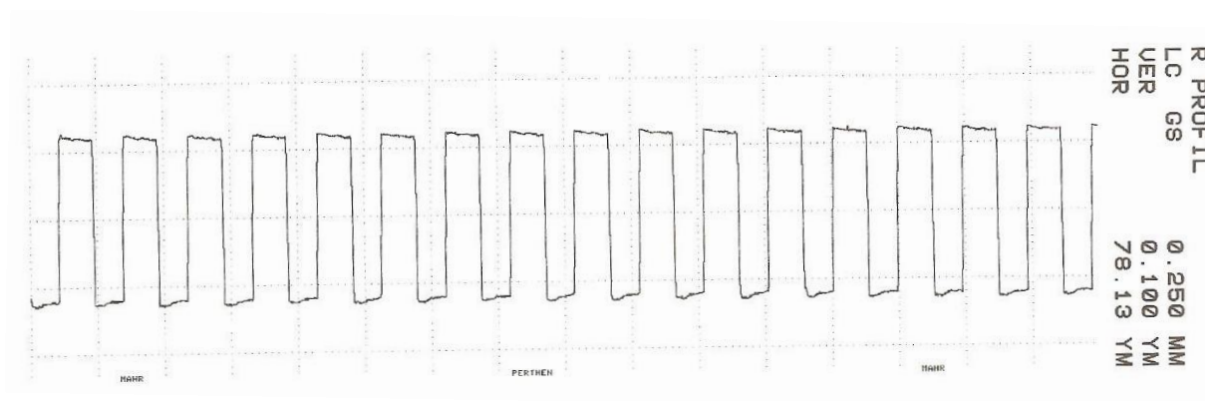
Slika 63. Grafički prikaz trećeg traga iz treće serije mjerenja (pravokutni profil)



Slika 64. Grafički prikaz četvrtog traga iz treće serije mjerenja (pravokutni profil)



Slika 65. Grafički prikaz petog traga iz treće serije mjerenja (pravokutni profil)



Slika 66. Grafički prikaz šestog traga iz treće serije mjerenja (pravokutni profil)

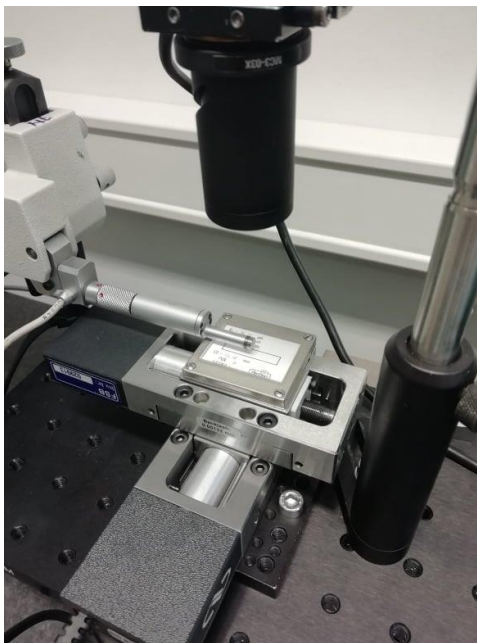
U idućoj tablici prikazane su vrijednosti aritmetičkih sredina parametara hrapavosti R_a i R_z te raspon tih parametara (R) dobivenih mjerenjem svih triju serija tragova na mjernoj površini sa slijedom pravokutnih brazdi.

Tablica 8. Iznosi vrijednosti aritmetičkih sredina parametara hrapavosti (pravokutni profil)

Seriya mjerenja br.	$R_z, \mu\text{m}$	$R, \mu\text{m}$	$R_a, \mu\text{m}$	$R, \mu\text{m}$
1.	0,273	0,095	0,121	0,012
2.	0,272	0,092	0,121	0,013
3.	0,271	0,092	0,121	0,011

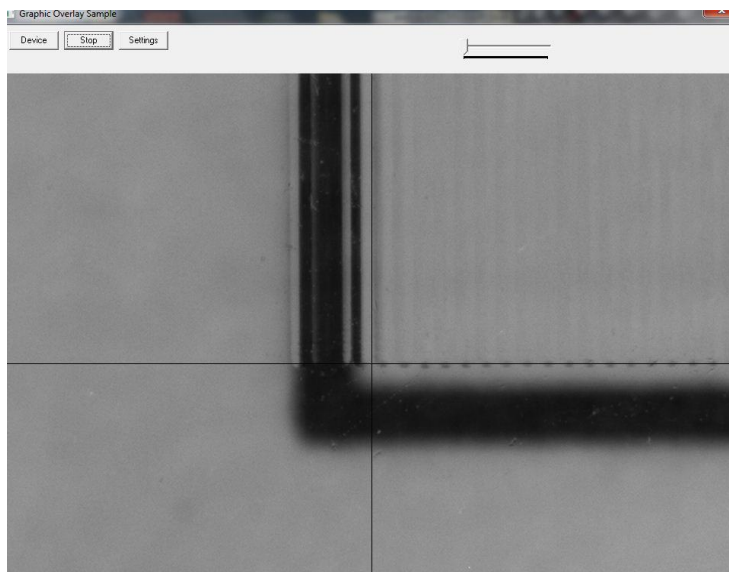
6.3.2. Mjerenje etalona trokutaste geometrije profila

Potom se mjerio etalon izrađen od stakla koji sadržava regularne profile hrapavosti trokutaste geometrije. Prije početka mjerenja potrebno bilo je potrebno translacijske elemente dovesti u položaj u kojem njihov pomak iznosi nula. Na idućoj slici prikazan je etalon postavljen na translacijske elemente.



Slika 67. Etalon od stakla postavljen na pomične translacijske elemente

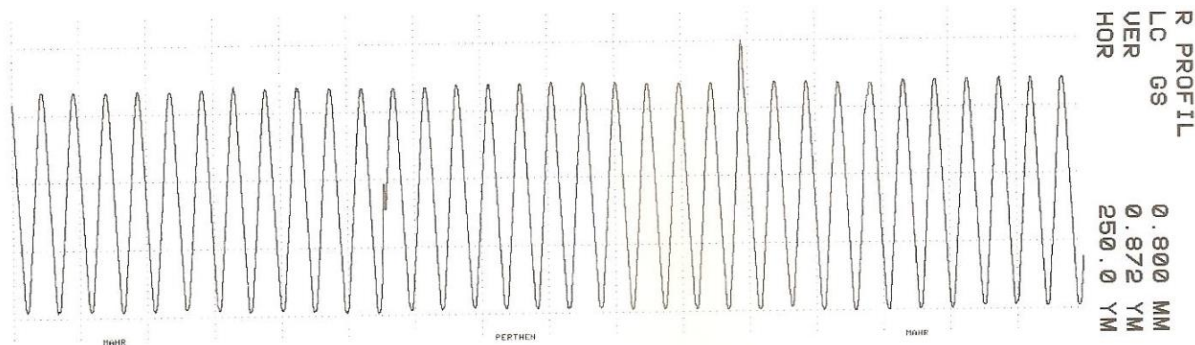
Nakon što je etalon postavljen na inicijalizirane translacijske elemente, potrebno je bilo uskladiti središte nitnog križa kamere te početni položaj mjere igle ticala. Na idućoj slici prikazano je središte nitnog križa kamere usklađenog sa određenim ishodištem koordinatnog sustava na mjernoj površini etalona.



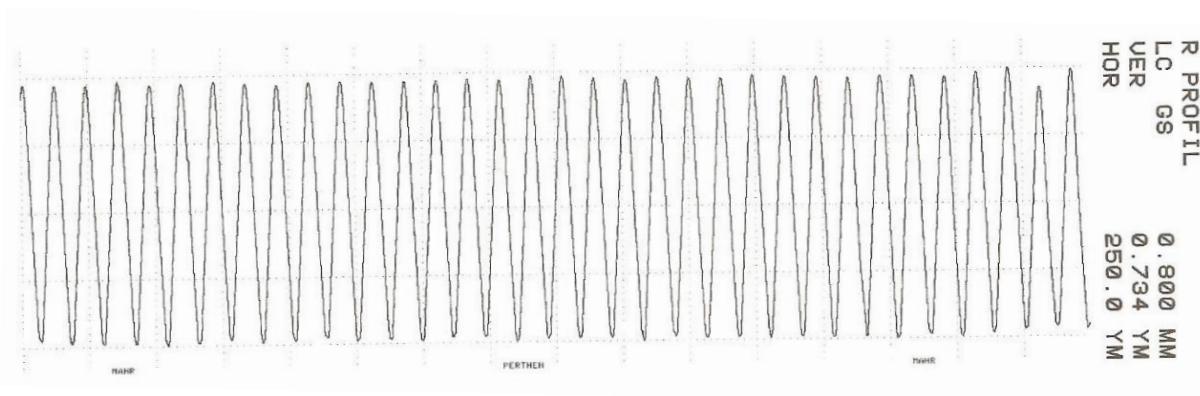
Slika 68. Nitni križ usklađen sa ishodištem koordinatnog sustava uzorka

Nakon što su u istu poziciju dovedeni nitni križ kamere te početna pozicija mjerne igle ticala, moglo se započeti sa unošenjem vrijednosti koordinata početnih točaka iz tablice 6. u program *Conex CC Utility*. Mjerile su se tri serije po šest tragova, a rezultati mjerenja prikazani su na idućim slikama.

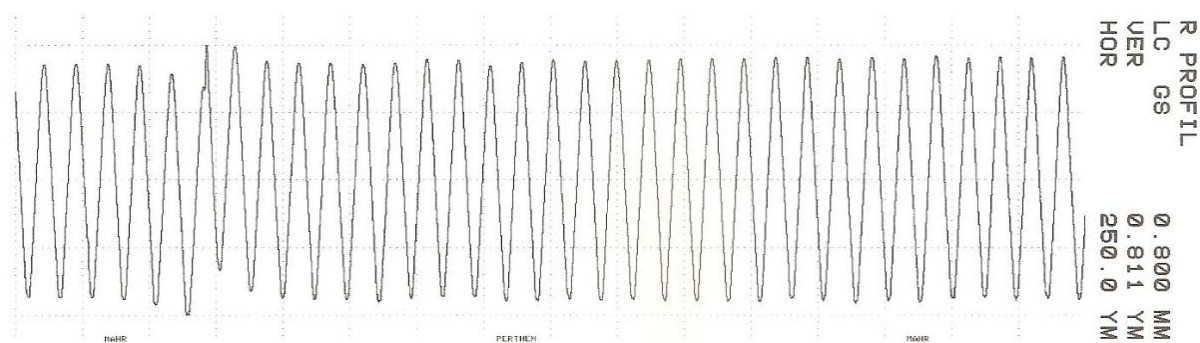
Na slici 69., slici 70., slici 71., slici 72., slici 73. i slici 74. prikazani su grafički rezultati prve serije mjerenja staklenog etalona sa slijedom brazdi trokutaste geometrije.



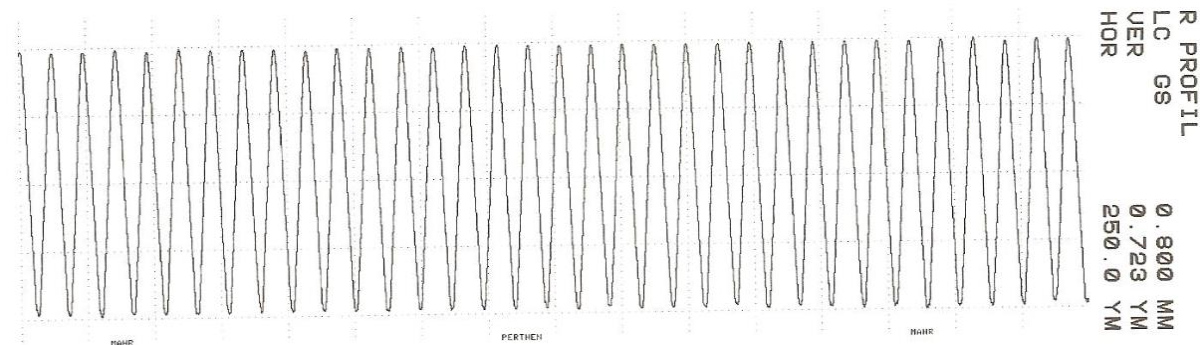
Slika 69. Grafički prikaz prvog traga iz prve serije mjerenja (trokutasti profil)



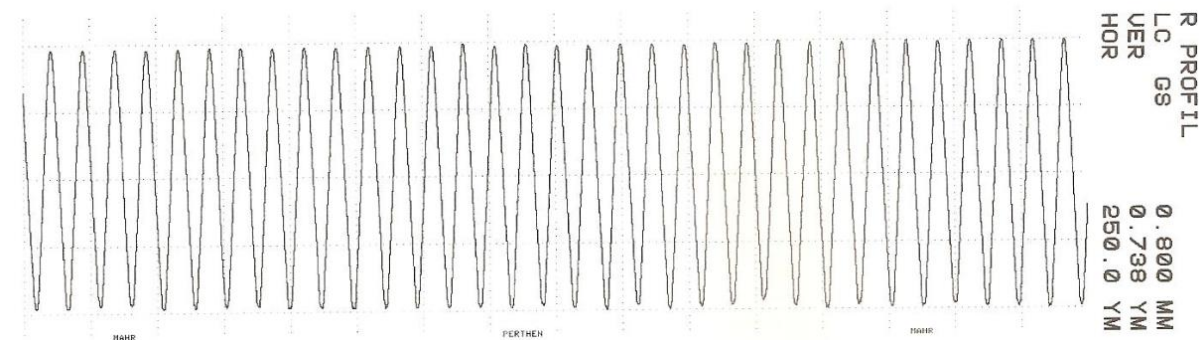
Slika 70. Grafički prikaz drugog traga iz prve serije mjerenja (trokutasti profil)



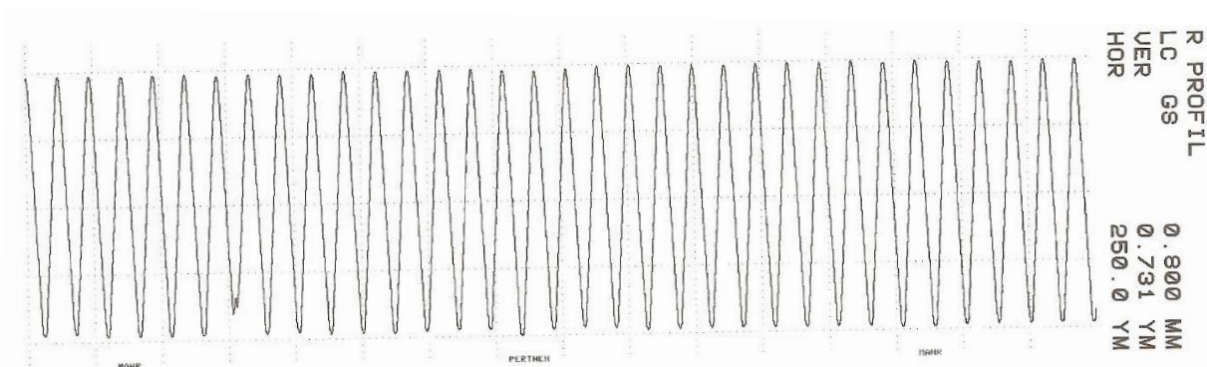
Slika 71. Grafički prikaz trećeg traga iz prve serije mjerenja (trokutasti profil)



Slika 72. Grafički prikaz četvrtog traga iz prve serije mjerenja (trokutasti profil)

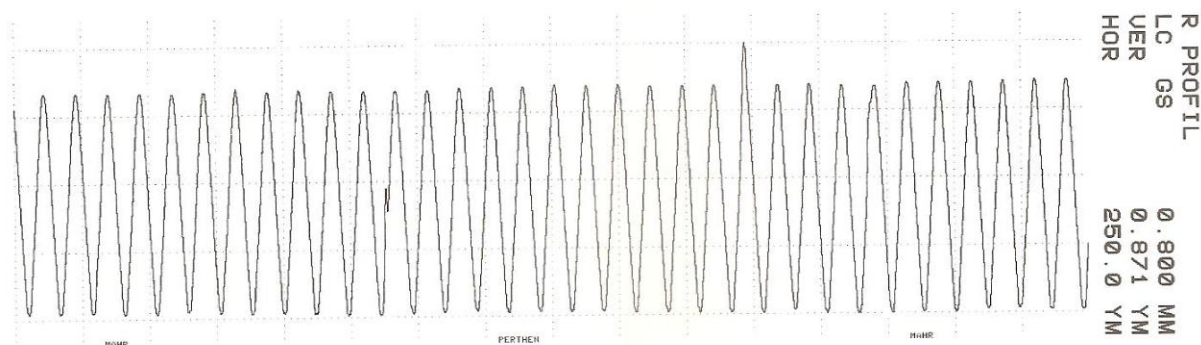


Slika 73. Grafički prikaz petog traga iz prve serije mjerenja (trokutasti profil)

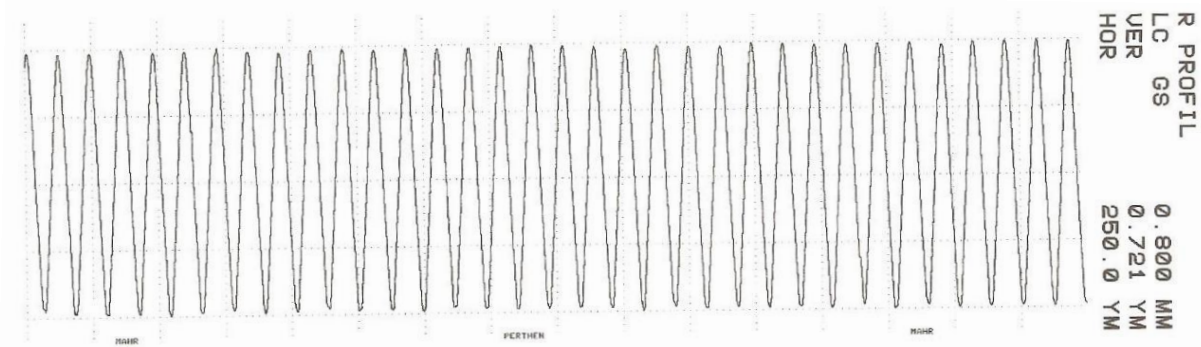


Slika 74. Grafički prikaz šestog traga iz prve serije mjerenja (trokutasti profil)

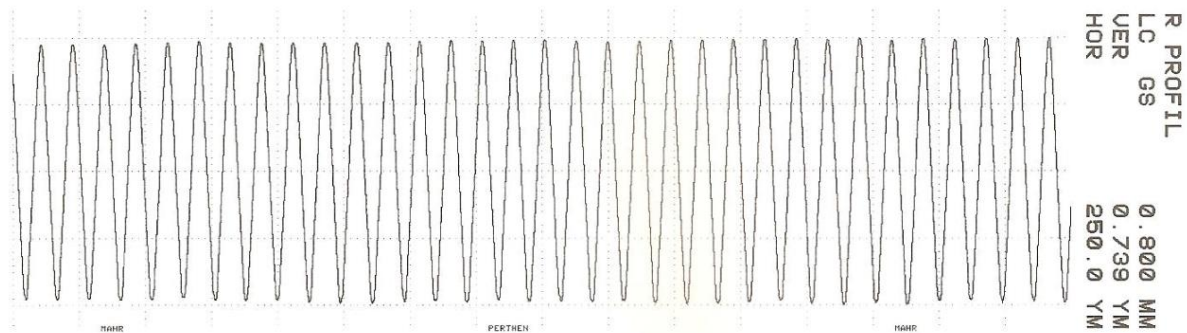
Na slici 75., slici 76., slici 77., slici 78., slici 79. i slici 80. prikazani su grafički rezultati druge serije mjerenja staklenog etalona sa slijedom brazdi trokutaste geometrije.



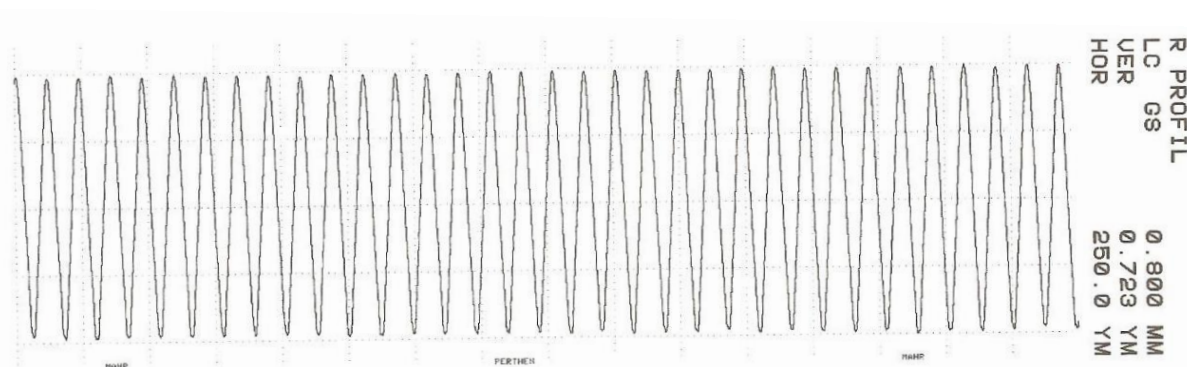
Slika 75. Grafički prikaz prvog traga iz druge serije mjerenja (trokutasti profil)



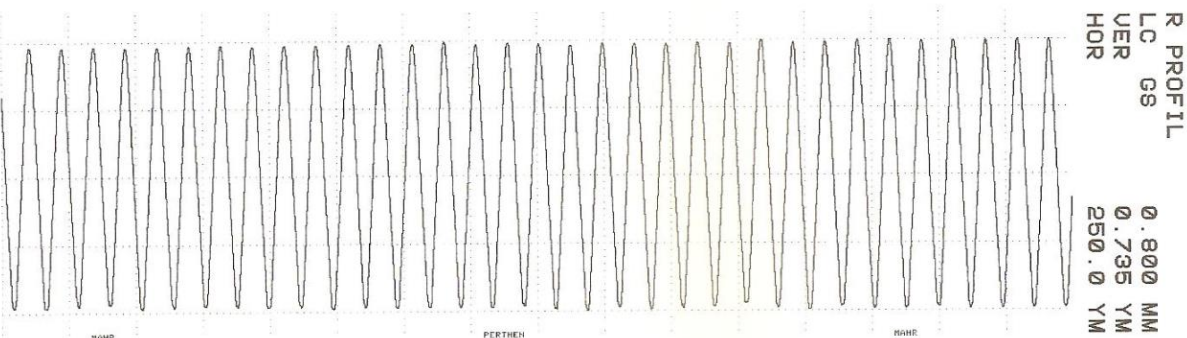
Slika 76. Grafički prikaz drugog traga iz druge serije mjerenja (trokutasti profil)



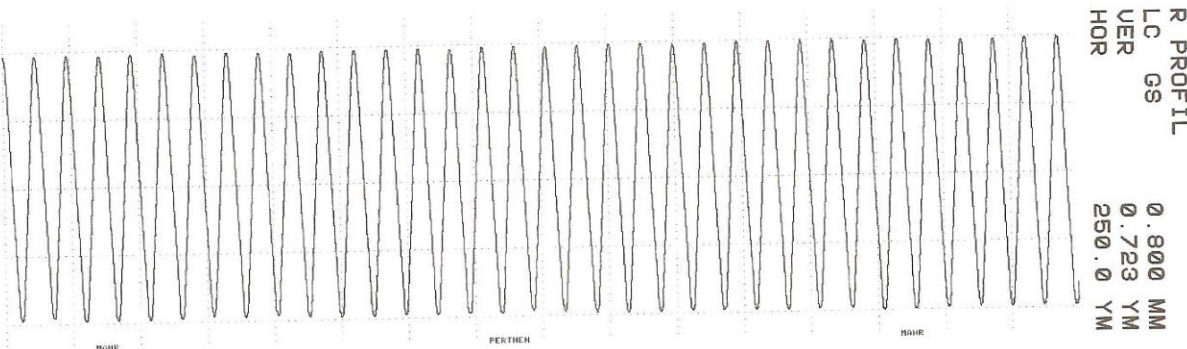
Slika 77. Grafički prikaz trećeg traga iz druge serije mjerenja (trokutasti profil)



Slika 78. Grafički prikaz četvrtog traga iz druge serije mjerenja (trokutasti profil)

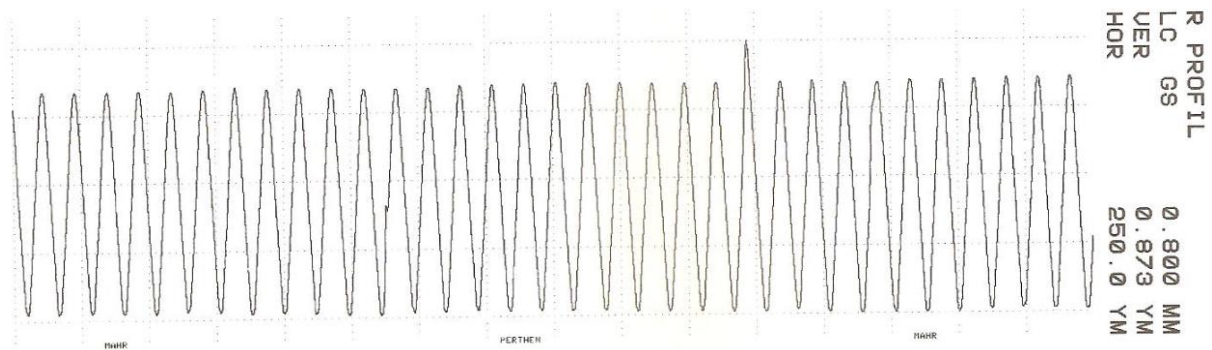


Slika 79. Grafički prikaz petog traga iz druge serije mjerenja (trokutasti profil)

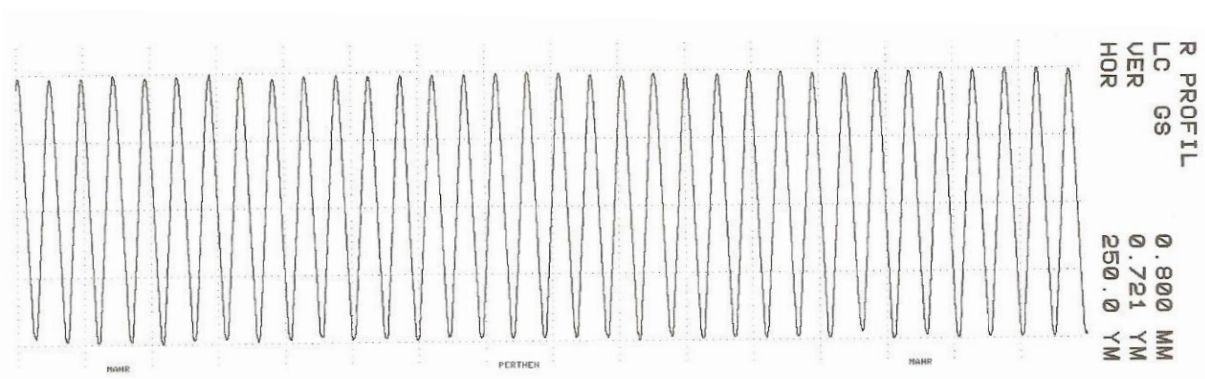


Slika 80. Grafički prikaz šestog traga iz druge serije mjerenja (trokutasti profil)

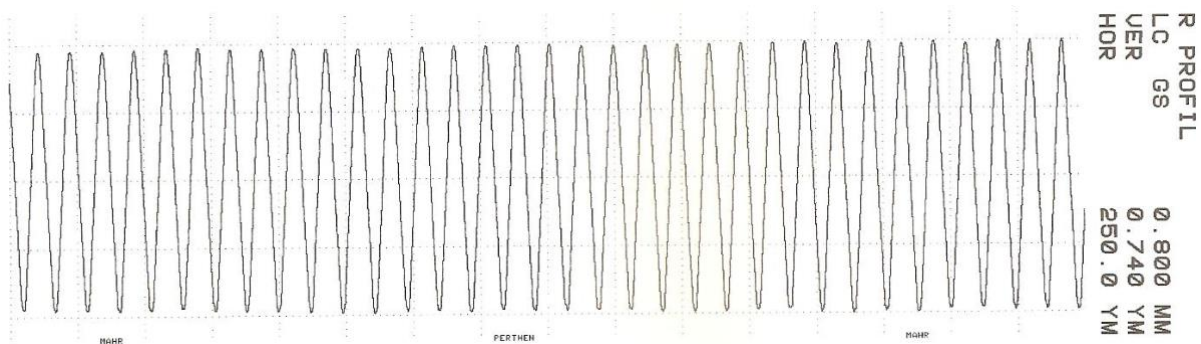
Na slici 81., slici 82., slici 83., slici 84., slici 85. te slici 86. prikazani su grafički rezultati treće serije mjerenja staklenog etalona sa slijedom brazdi trokutaste geometrije.



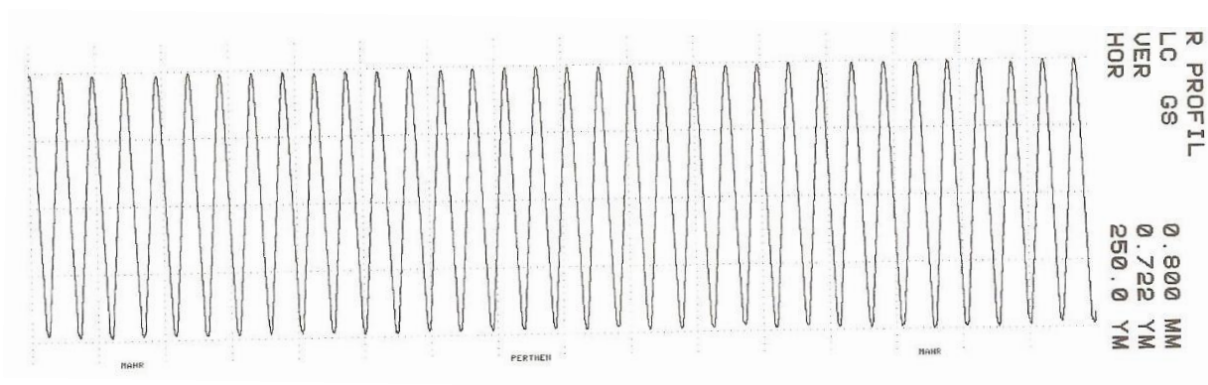
Slika 81. Grafički prikaz prvog traga iz treće serije mjerenja (trokutasti profil)



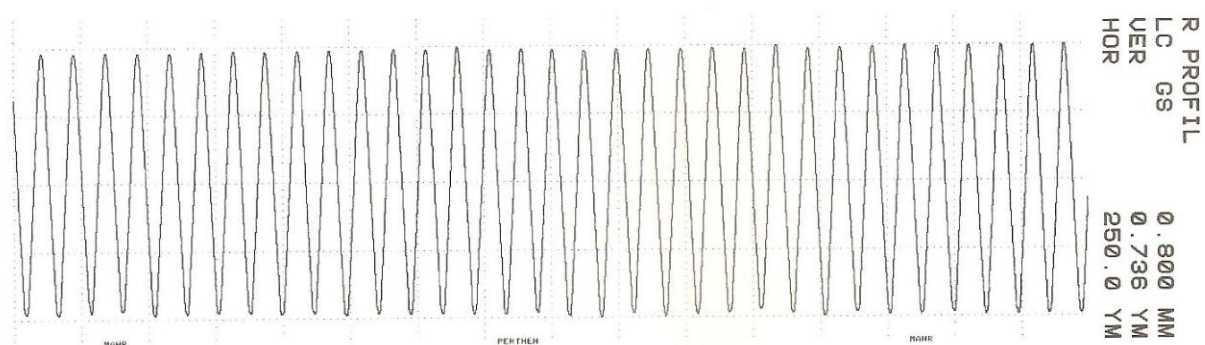
Slika 82. Grafički prikaz drugog traga iz treće serije mjerenja (trokutasti profil)



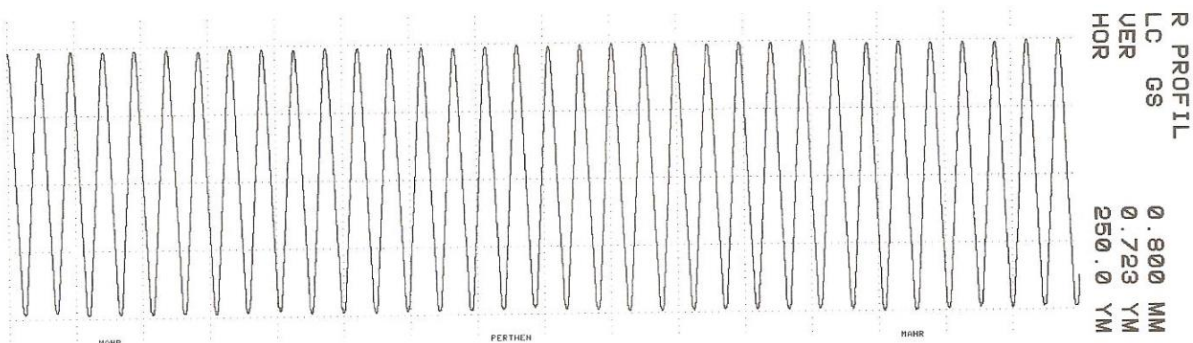
Slika 83. Grafički prikaz trećeg traga iz treće serije mjerenja (trokutasti profil)



Slika 84. Grafički prikaz četvrtog traga iz treće serije mjerenja (trokutasti profil)



Slika 85. Grafički prikaz petog traga iz treće serije mjerenja (trokutasti profil)



Slika 86. Grafički prikaz šestog traga iz treće serije mjerenja (trokutasti profil)

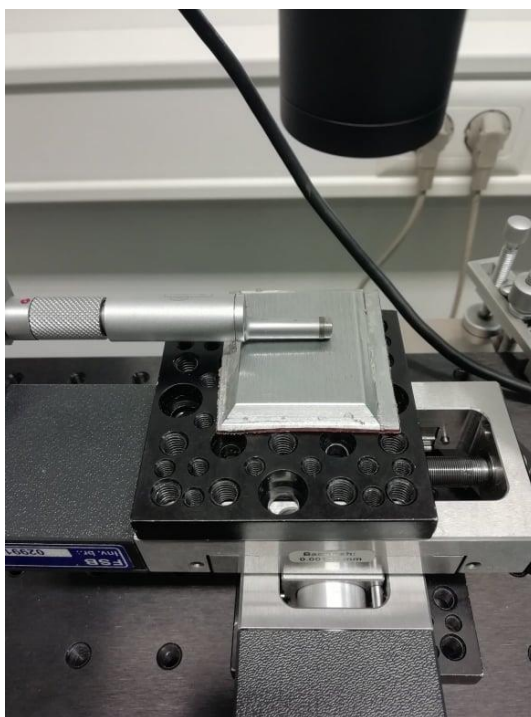
U idućoj tablici nalaze se iznosi aritmetičkih sredina mjerenih parametara hrapavosti i njihovih raspona ostvarenih na trima serijama mjerenja na mjernoj površini s regularnim profilom hrapavosti trokutaste geometrije.

Tablica 9. Iznosi vrijednosti aritmetičkih sredina parametara hrapavosti (trokutasti profil)

Seriya mjerenja br.	R_z , μm	R , μm	R_a , μm	R , μm
1.	2,932	0,189	0,857	0,031
2.	2,905	0,179	0,856	0,029
3.	2,907	0,188	0,856	0,028

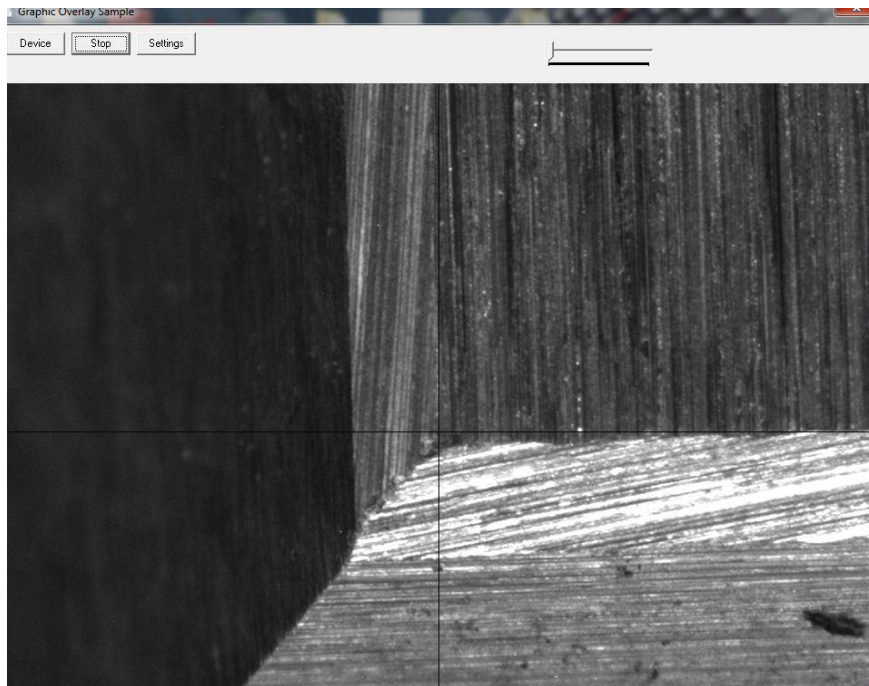
6.3.3. Mjerenje etalona iregularne geometrije profila

Naposljetku se mjerio etalon izrađen od čelika sa slijedom profila iregularne geometrije. Na idućoj slici prikazan je etalon izrađen od čelika postavljen na inicijalizirane translacijske elemente.



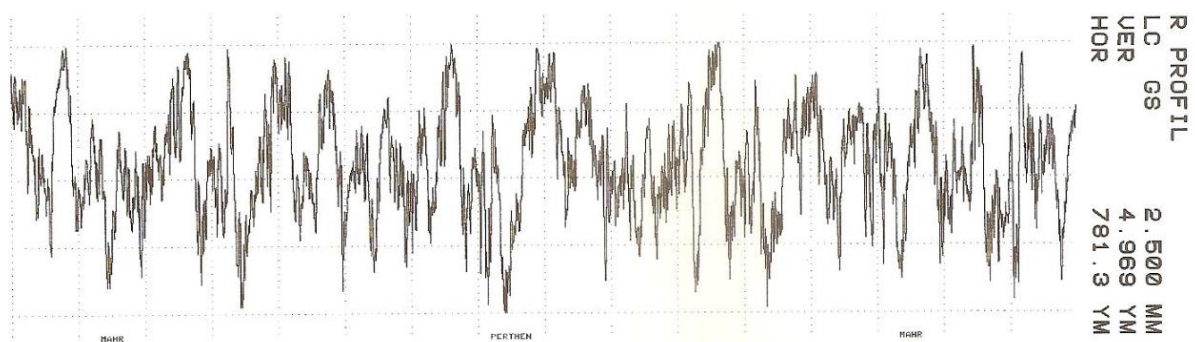
Slika 87. Postavljanje etalona izrađenog od čelika na translacijske elemente

Kao i u prethodna dva mjerenja, bilo je potrebno dovesti u istu poziciju nitni križ kamere te početnu poziciju mjerne igle ticala prije nego što su se mogle početi unositi vrijednosti iz tablice 7. te pomicati etalon na izračunate početne točke mjerenja. Na idućoj slici prikazano je središte nitnog križa koje se nalazi u ishodištu koordinatnog sustava etalona.

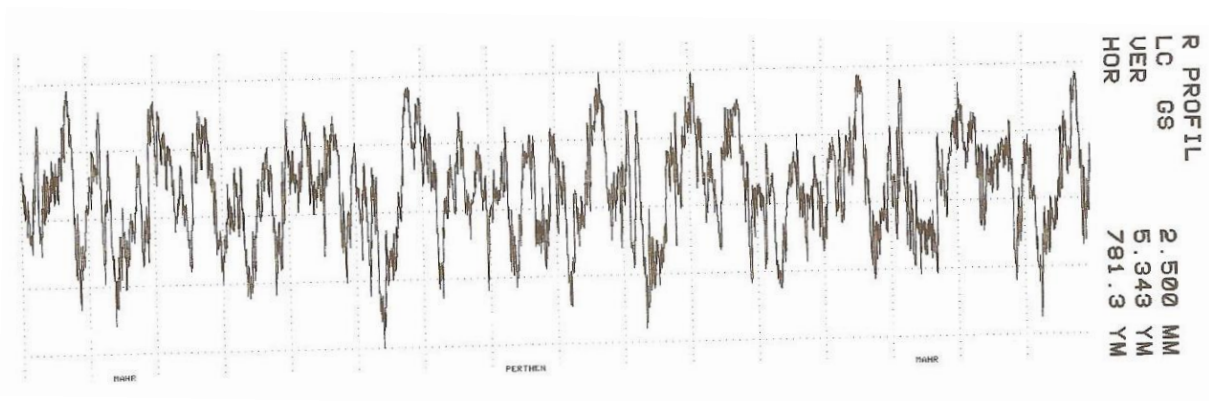


Slika 88. Usklađivanje položaja nitnog križa kamere i ishodišta koordinatnog sustava uzorka

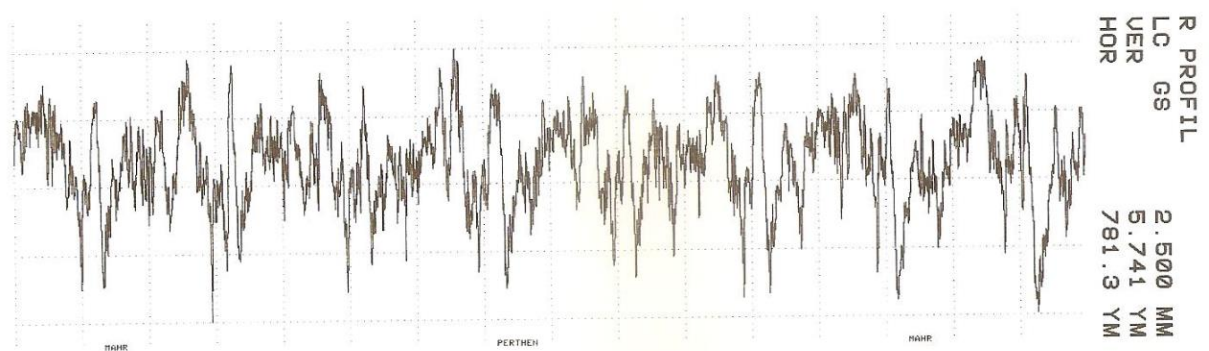
Na slici 89., slici 90., slici 91., slici 92., slici 93. te slici 94. prikazani su grafički rezultati prve serije mjerenja čeličnog etalona koji sadrži profile hrapavosti iregularne geometrije.



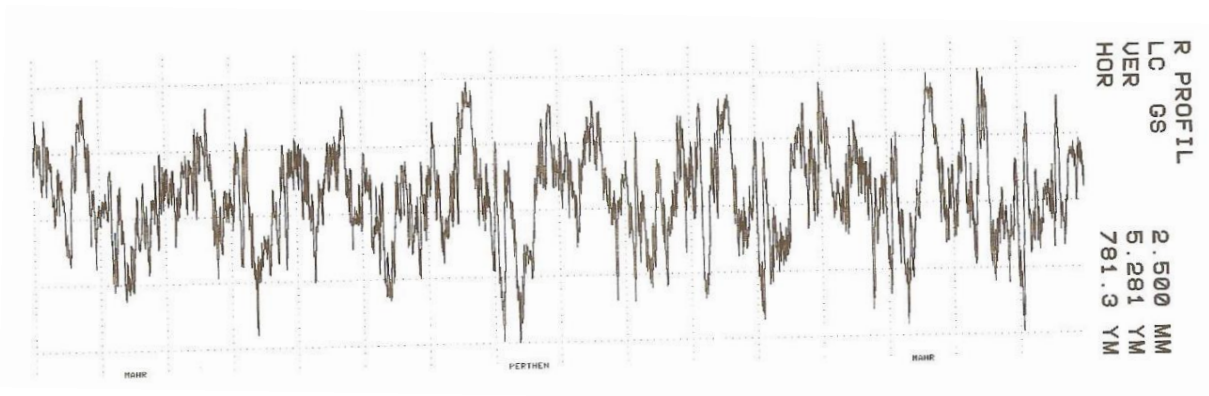
Slika 89. Grafički prikaz prvog traga iz prve serije mjerenja (iregularni profil)



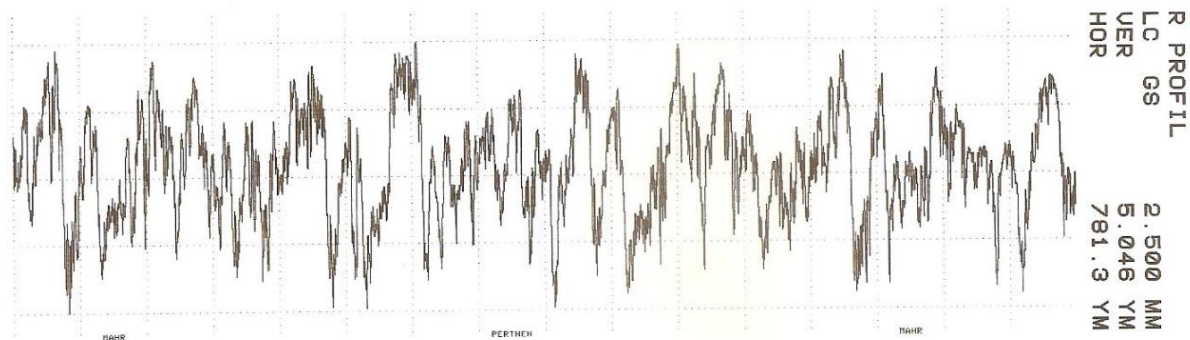
Slika 90. Grafički prikaz drugog traga iz prve serije mjerenja (iregularni profil)



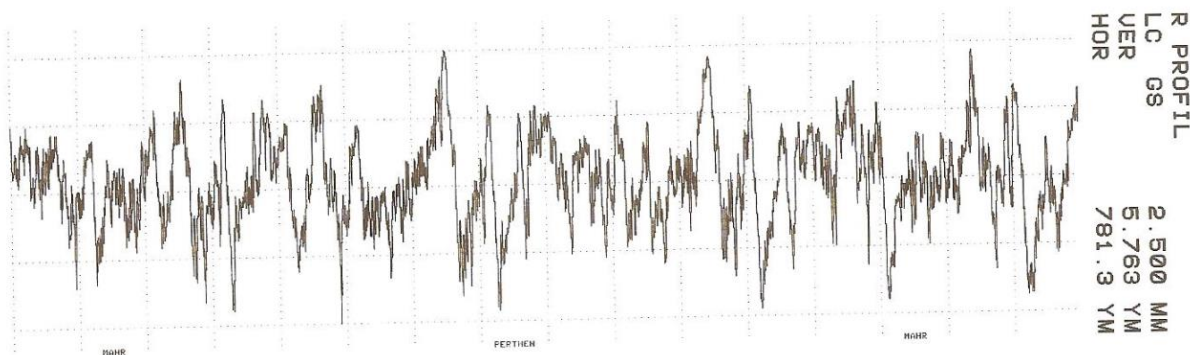
Slika 91. Grafički prikaz trećeg traga iz prve serije mjerenja (iregularni profil)



Slika 92. Grafički prikaz četvrtog traga iz prve serije mjerenja (iregularni profil)

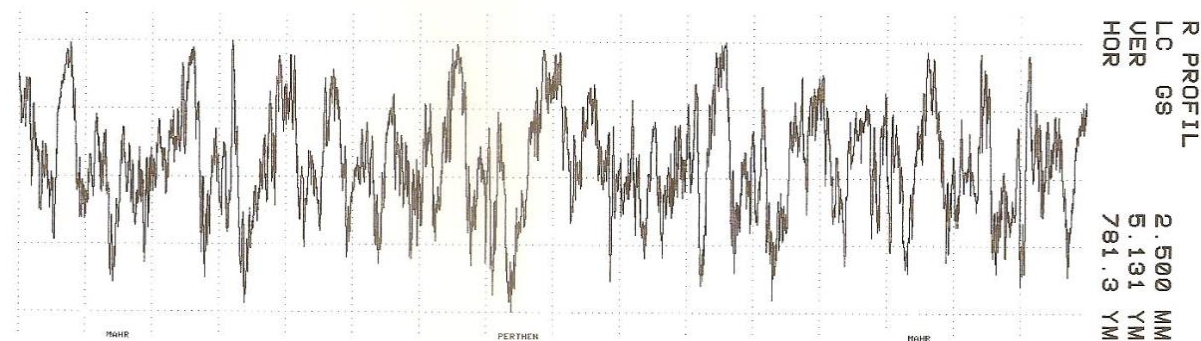


Slika 93. Grafički prikaz petog traga iz prve serije mjerenja (iregularni profil)

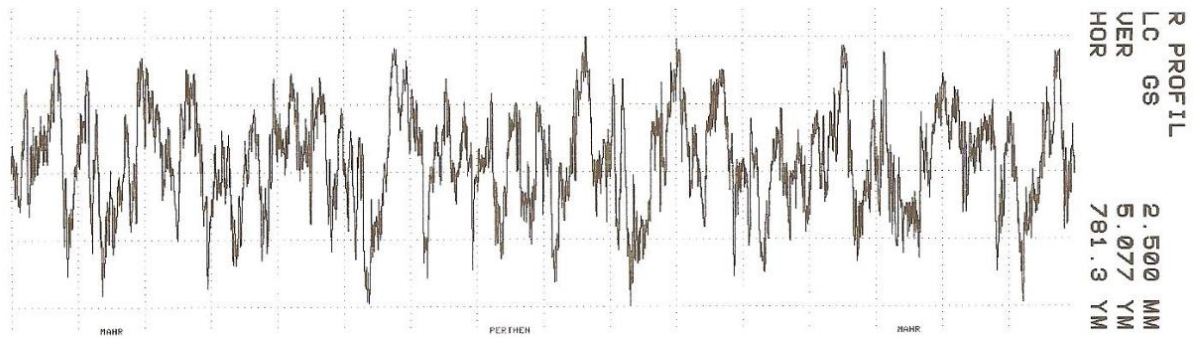


Slika 94. Grafički prikaz šestog traga iz prve serije mjerenja (iregularni profil)

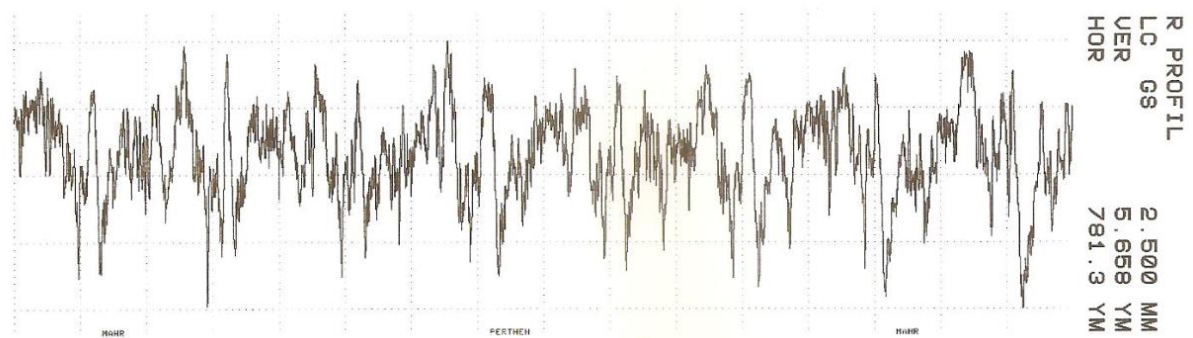
Na slici 95., slici 96., slici 97., slici 98, slici 99. te slici 100. prikazani su grafički rezultati druge serije mjerenja čeličnog etalona koji sadrži profile hrapavosti iregularne geometrije.



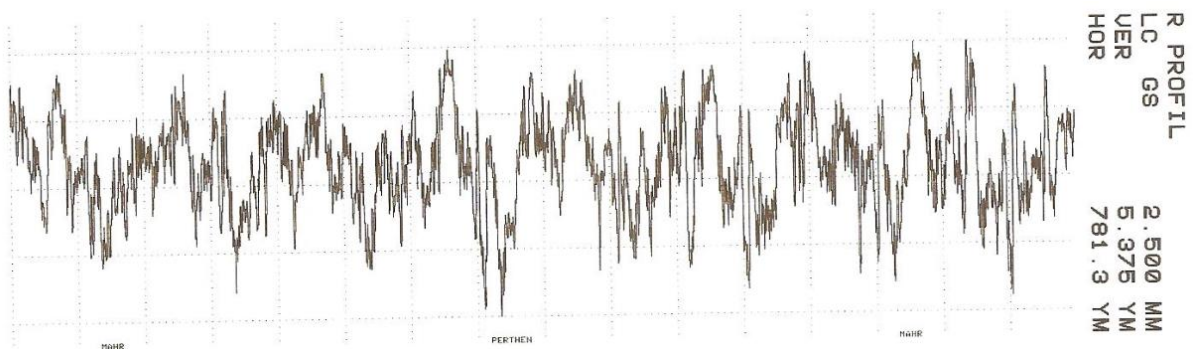
Slika 95. Grafički prikaz prvog traga iz druge serije mjerenja (iregularni profil)



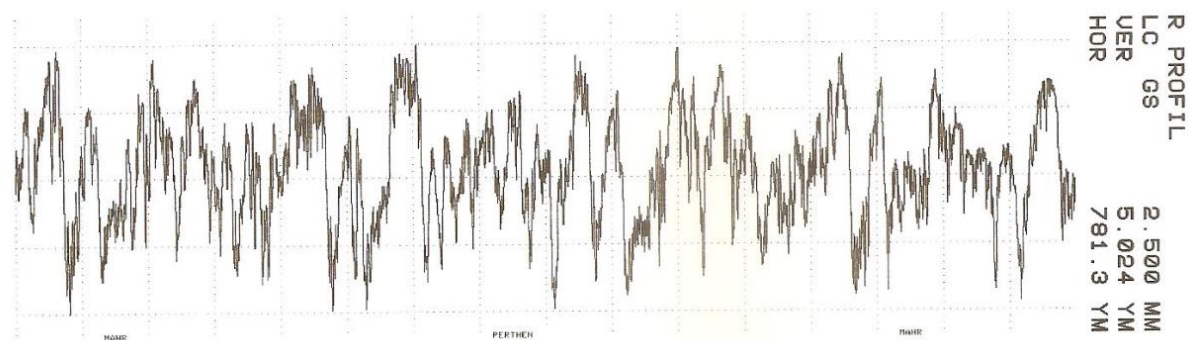
Slika 96. Grafički prikaz drugog traga iz druge serije mjerenja (iregularni profil)



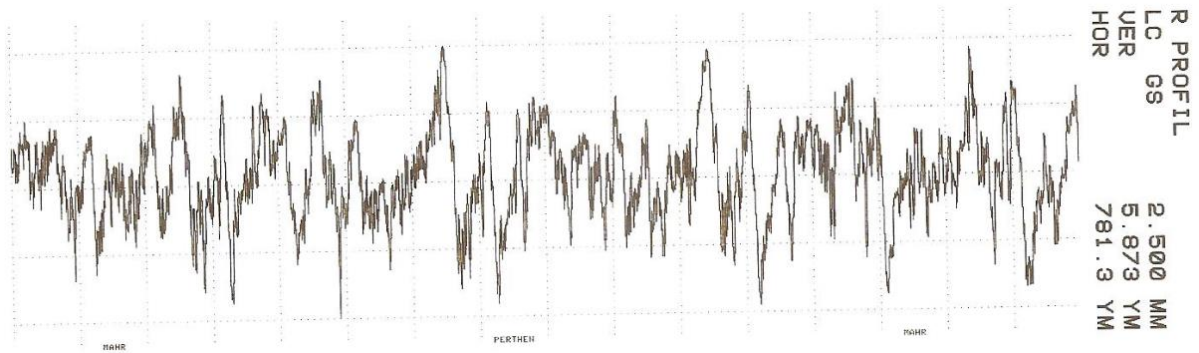
Slika 97. Grafički prikaz trećeg traga iz druge serije mjerenja (iregularni profil)



Slika 98. Grafički prikaz četvrtog traga iz druge serije mjerenja (iregularni profil)

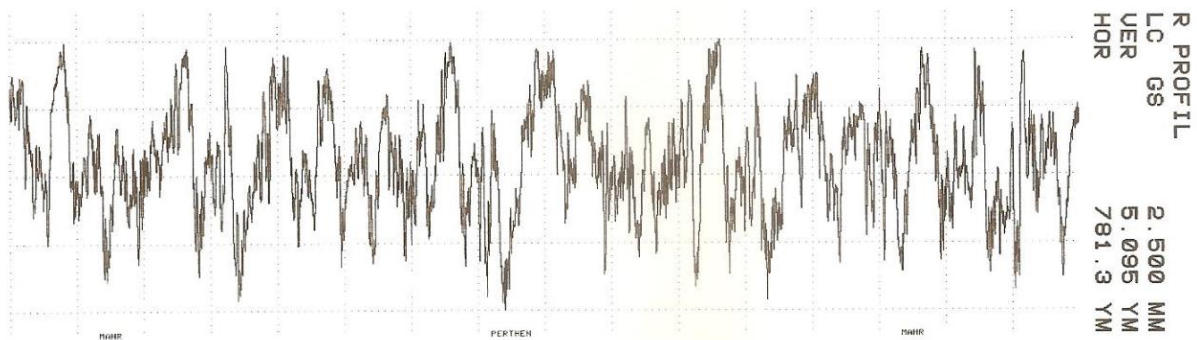


Slika 99. Grafički prikaz petog traga iz druge serije mjerenja (iregularni profil)

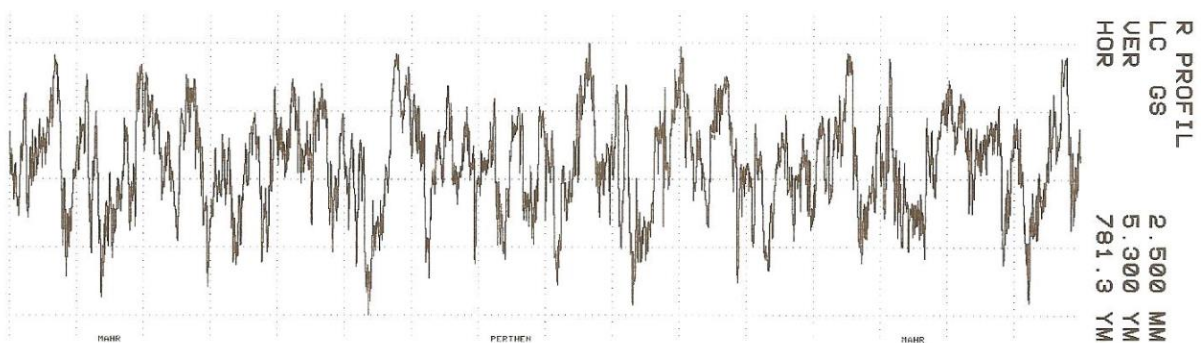


Slika 100. Grafički prikaz šestog traga iz druge serije mjerenja (iregularni profil)

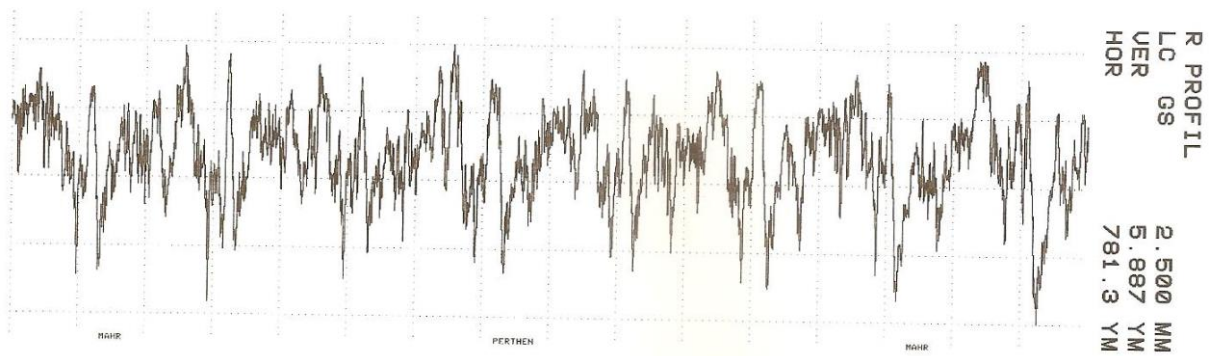
Na slici 101., slici 102., slici 103., slici 104., slici 105. te slici 106. prikazani su grafički rezultati treće serije mjerenja čeličnog etalona koji sadrži profile hrapavosti iregularne geometrije.



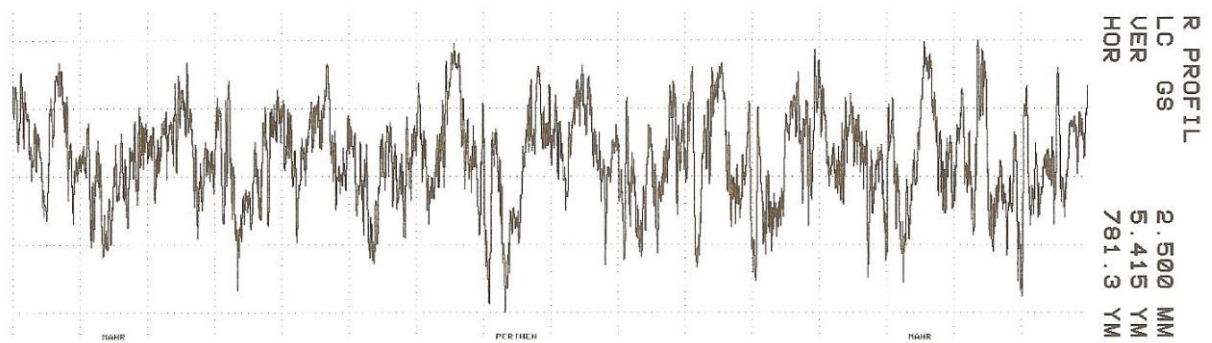
Slika 101. Grafički prikaz prvog traga iz treće serije mjerenja (iregularni profil)



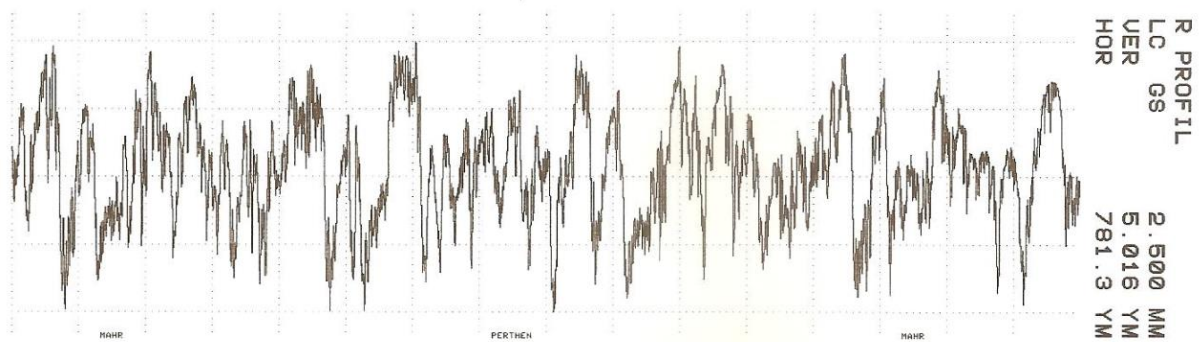
Slika 102. Grafički prikaz drugog traga iz treće serije mjerenja (iregularni profil)



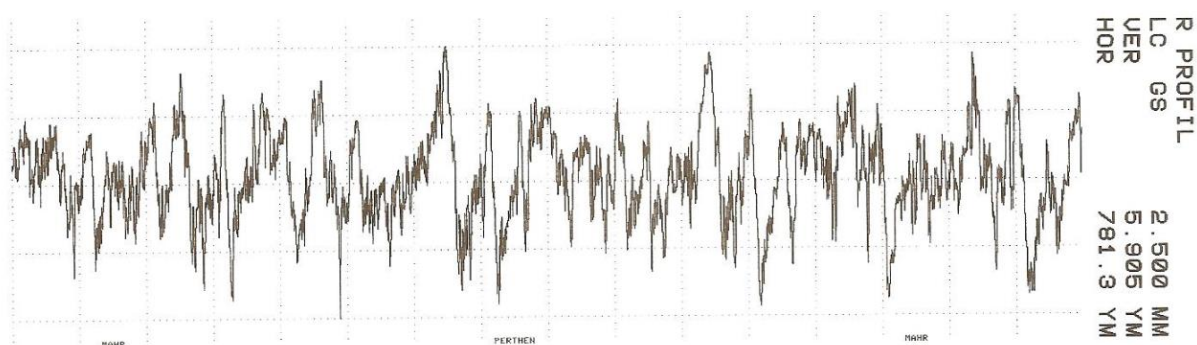
Slika 103. Grafički prikaz trećeg traga iz treće serije mjerenja (iregularni profil)



Slika 104. Grafički prikaz četvrtog traga iz treće serije mjerenja (iregularni profil)



Slika 105. Grafički prikaz petog traga iz treće serije mjerenja (iregularni profil)



Slika 106. Grafički prikaz šestog traga iz treće serije mjerenja (iregularni profil)

U idućoj tablici navedeni su iznosi aritmetičkih sredina mjerenih parametara hrapavosti i njihovih raspona ostvarenih na trima serijama mjerenja etalona mjerne površine koja sadrži profile hrapavosti iregularne geometrije.

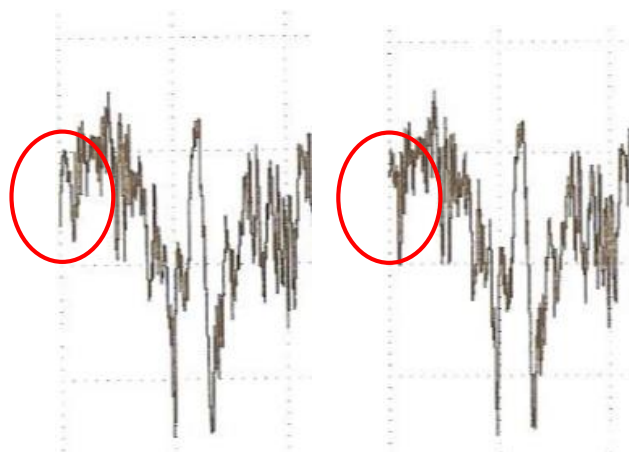
Tablica 10. Iznosi vrijednosti aritmetičkih sredina parametara hrapavosti (iregularni profil)

Seriya mjerenja br.	R_z , μm	R , μm	R_a , μm	R , μm
1.	19,57	2,00	3,11	0,23
2.	19,51	2,46	3,11	0,21
3.	19,64	2,36	3,11	0,20

6.4. Analiza mjernih rezultata

Usporedbom rezultata iz tablice 8., tablice 9. i tablice 10., može se zaključiti da postoje razlike u iznosima aritmetičkih sredina parametra Rz . Za prvi slučaj, odnosno za slučaj etalona načinjenog od silicijevog dioksida sa slijedom pravokutnih brazdi može se zaključiti da je razlika između aritmetičkih sredina parametra Rz zanemariva, dok su kod staklenog etalona sa slijedom trokutastih brazdi te čeličnog etalona s profilima hrapavosti iregularne geometrije razlike većeg iznosa. Pri provedbi mjerenja uočeno je da translacijski elementi nisu u potpunosti stabilni prilikom promjene svoga položaja. U programu pomoću kojeg se upravljalo translacijskim elementima, moglo uočiti da položaj translacijskih elemenata, dok je u mirovanju, varira u iznosu od nekoliko nanometara, a što je moglo utjecati na utvrđene razlike u ostvarenim mjernim rezultatima. Uzrok razlikama u mjernim rezultatima također može biti i posljedica pomaka samog etalona u odnosu na površinu translacijskog elementa. Etalon načinjen od silicijevog oksida veće je težine od drugih dvaju etalona, te postoji manja mogućnost da će prilikom pomicanja translacijskih elemenata, ili zbog djelovanja mjerne sile ticala prilikom provedbe mjerenja, promijeniti svoj početni položaj. Ukoliko bi etalon promijenio svoj početni položaj, promijenile bi se i vrijednosti koordinata početnih točaka mjerenja te ticalo više ne bi mjerilo novi trag po istoj putanji traga iz prethodnog mjerenja. Iako su etaloni bili dodatno pričvršćeni dvostranom ljepljivom trakom, postoji mogućnost da su tijekom pomicanja translacijskih elemenata ili tijekom mjerenja promijenili svoj početni položaj što je naposljetku utjecalo na rezultate mjerenja te razlike u iznosu parametra Rz .

Na grafičkim prikazima pojedinih izmjerenih profila hrapavosti može se uočiti da mjerenje profila nije započeto u istoj točki. Na slici 107. prikazani su uvećani segmenti slike 91. te slike 97. na kojima je vidljivo da se početak profila razlikuje te da mjerenje nije započeto u istoj točki.



Slika 107. Nepodudaranje početnih točaka mjerenja

7. ZAKLJUČAK

Laboratorij za precizna mjerenja dužina Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu već dugi niz godina sudjeluje u međulaboratorijskim usporedbama koje organizira EURAMET-europsko udruženje nacionalnih mjeriteljskih instituta. Tehnički protokoli EURAMET usporedbi parametara hrapavosti uključuju definirane položaje mjernih tragova s obzirom na dimenzije mjernih površina etalona hrapavosti. Laboratorij za precizna mjerenja dužina sudjeluje u međulaboratorijskim usporedbama parametara hrapavosti korištenjem elektroničko-mehaničkog uređaja s ticalom Perthometer S8P koji, u usporedbi s modernim uređajima za mjerenje hrapavosti, nema mogućnost točnog pozicioniranja mjerne igle ticala te stoga nije u mogućnosti mjeriti mjerne tragove koji imaju preddefinirane položaje.

Da bi se omogućilo precizno pozicioniranje mjerne igle uređaja Perthometer S8P, bolja ponovljivost mjernih rezultata te da bi se mogli ispuniti zahtjevi tehničkog protokola, u okviru ovog diplomskog rada na uređaj su ugrađeni vizijski sustav te par translacijskih elemenata. Vizijski sustav sastoji se od LED osvjetljenja te kamere s telecentričnim objektivom koja omogućuje uvećan prikaz mjerne površine etalona. Pomoću para translacijskih elemenata, etalon je moguće pomicati na željene položaje.

S ciljem provjere provedene nadogradnje sustava mjerila su se tri etalona izrađena od različitih materijala, različitih dimenzija te različitog zahtijevanog iznosa *cut-offa*. Na svakom etalonu provedene su tri serije mjerenja s po šest snimljenih profila na kojima su se računali parametri hrapavosti R_a i R_z . Prije provedbe mjerenja bilo je potrebno definirati ishodište koordinatnog sustava preko kojeg su se povezivali položaj mjerne igle uređaja, nitni križ kamere te položaj translacijskih elemenata. S obzirom na veličine mjernih površina etalona i zahtijevane vrijednosti *cut-offa* računale su koordinate početnih točaka mjerenja profila hrapavosti prema definiranom ishodištu. Potom su translacijski elementi pomicali etalon prema vrijednostima izračunatih točaka, te se na taj način uređaju omogućilo precizno pozicioniranje mjerne igle ticala.

Usporedba aritmetičkih sredina parametra hrapavosti R_a triju serija mjerenja na sva tri etalona potvrdila je zadovoljavajuću usporedivost. Usporedbom aritmetičkih sredina parametra hrapavosti R_z kod određenih serija mjerenja utvrđene su razlike. Ukoliko je došlo do nepodudaranja početnih točaka prilikom mjerenja to je rezultiralo većim razlikama u izmjerenim vrijednostima parametara hrapavosti R_z , nego je to slučaj s parametrom R_a .

Prilikom mjerenja uočeno je da upravljačka jedinica ne upravlja dovoljno stabilno translacijskim elementima te da njihov položaj tijekom mirovanja varira. Smatra se da je to uzrok utvrđenim razlikama u ostvarenim mjernim rezultatima. Uzrok razlikama u mjernim rezultatima također može biti i posljedica pomaka samog etalona u odnosu na površinu translacijskog elementa uslijed djelovanja mjerne sile ticala prilikom mjerenja.

LITERATURA

- [1] Runje, B.: *Predavanja iz kolegija Teorija i tehnika mjerenja*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [2] Rudan, D.: *Diplomski rad: Umjeravanje vertikalne komponente elektroničko-mehaničkog uređaja s ticalom*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [3]<https://www.olympus-ims.com/en/metrology/surface-roughness-measurement-portal/terms-and-standards/> (preuzeto 27.5.2019.)
- [4] Mikoleizig G.: *Surface Roughness Measurements of Cylindrical Gears and Bevel Gears on Gear Inspection Machines*, Njemačka, 2015.
- [5] ISO 5436-1:2000. Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method; Measurement standards - Part 1: Material measures
- [6]<https://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/line/maximum-height-of-profile.jsp> (preuzeto 27.5.2019.)
- [7] Leach, R.: *The measurement of surface texture using Stylus instruments*, University of Nottingham, Ujedinjeno Kraljevstvo, 2014.
- [8] Jung-Albrecht, J.: *EURAMET Key Comparison EURAMET.L-K8.2020 Calibration of surface roughness standards*, Braunschweig, 2019.
- [9]https://www.opto-e.com/media/downloads/docs/Basics_Optics_EN.pdf(preuzeto 22.10.2019.)
- [10] Szeliski R.: *Computer Vision: Algorithms and Applications*, Springer, 2010.
- [11] DFK 72BUC02 Technical Reference Manual, The Imaging Source Europe GmbH, 2019.
- [12] MC3-03X PRODUCT DATASHEET, OptoEngineering, 2019.
- [13]<https://www.vision-doctor.com/en/physical-characteristics-of-light.html>(preuzeto 5.11.2019.)
- [14] <https://www.opto-e.com/products/lighting> (preuzeto 6.11.2019.)
- [15] Martin, D.: Basic Lighting Techniques for Machine Vision, SAD (https://www.visiononline.org/userAssets/aiaUploads/file/CVP_Beginning-Lighting-for-Machine-Vision_Daryl-Martin.pdf)
- [16] Optical Imaging Technologies, Catalogue 2019/2020., OptoEngineering, 2019. (https://www.opto-e.com/media/downloads/docs/Catalog_EN_2019_low.pdf)
- [17] Conex, Compact Photonics Control Solutions, Newport, SAD, 2019.