

VIŠJA STROKOVNA ŠOLA ACADEMIA

MARIBOR

**MEDMETODNE INDUSTRIJSKE MERITVE KOT
PODLAGA ZA AKREDITACIJO ISO/IEC 17025
PRESKUŠEVALNIH LABORATORIJEV**

Kandidat: Tadej Jevšek

Vrsta študija: študent izrednega študija

Študijski program: Strojništvo

Mentor predavatelj: dr. Darko Friščić, univ. dipl. gosp. inž.

Mentor v podjetju: dr. Aleš Slak, univ. dipl. inž. str.

Lektor: Špela Fele, univ. dipl. slov.

Prevod v tuji jezik: mag. Tadej Ian

Maribor, 2025

IZJAVA O AVTORSTVU DIPLOMSKEGA DELA

Podpisani/a Tadej Jevšek, sem avtor/ica diplomskega dela z naslovom Medmetodne industrijske meritve kot podlaga za akreditacijo ISO/IEC 17025:2017 preskuševalnih laboratorijev, ki sem ga napisal/a pod mentorstvom dr. Darka Friščića, univ. dipl. gosp. inž.

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- je predloženo delo izključno rezultat mojega dela,
- sem poskrbel/a, da so dela in mnenja drugih avtorjev, ki jih uporabljam v predloženi nalogi, navedena oz. citirana skladno s pravili Višje strokovne šole Academia Maribor,
- se zavedam, da je plagiatorstvo – predstavljanje tujih del oz. misli, kot moje lastne kaznivo po Zakonu o avtorski in sorodnih pravicah (Uradni list RS, št. 16/07 – uradno prečiščeno besedilo, 68/08, 110/13, 56/15 in 63/16 – ZKUASP); prekršek pa podleže tudi ukrepom Višje strokovne šole Academia Maribor skladno z njenimi pravili,
- skladno z 32.a členom ZASP dovoljujem Višji strokovni šoli Academia Maribor objavo diplomskega dela na spletnem portalu šole.

Škofja Loka, Oktober 2025

Podpis študenta:

ZAHVALA

Iskreno cenim podporo, usmerjanje in razpoložljivost profesorja dr. Darka Friščića, univ. dipl. gosp. inž., ki mi je stal ob strani med pripravo celotnega diplomskega dela. Njegova ažurnost in pripravljenost pomagati pri vseh vprašanjih, povezanih z dokumentacijo in potekom dela, sta bili neprecenljivi.

Hvaležen sem tudi ostalim predavateljem na Višji strokovni šoli Academia, ki so mi s svojimi predavanji podali znanja, na katerih sem osnoval teoretični in praktični del diplomskega dela. Velika zahvala gre tudi moji družini, ki mi je ves čas stala ob strani in me spodbujala ter s tem pripomogla k uresničitvi vseh zadanih ciljev.

Posebna zahvala gre tudi mentorju v podjetju, dr. Alešu Slaku, univ. dipl. inž. str., vodji laboratorija v podjetju Iskra ISD d. o. o. in dr. Andreju Podnarju, univ. dipl. inž. str., za usmeritve pri izboru konkretne tematike in podporo pri raziskovalnem delu. Prav tako se zahvaljujem vsem sodelavcem v podjetju Iskra ISD d. o. o., ki so mi omogočili dostop do pomembnih notranjih virov in tako bistveno pripomogli k izvedbi raziskave.

POVZETEK

V uvodnem delu diplomskega dela so bili predstavljeni zastavljeni cilji, namen in osnovne trditve, ki jih je bilo treba preko celotnega diplomskega dela potrditi ali zavrniti. Za preverjanje trditev so bili uporabljeni moderne merilne metode in najsodobnejši standardi, ki se uporabljajo v meroslovju. Zelo pomembni sta bili uporaba smernic akreditacijske hiše in implementacija mednarodnih akreditacijskih standardov posameznih merilnih metod. To se je neposredno odražalo pri vseh meritvah in dejavnostih v našem akreditacijskem merilnem laboratoriju. Sledili sta študija zahtev akreditacijske hiše, ki so narekovale potek študije oblikovanja referenčnega kosa, in posledično sama implementacija pri izdelavi končnega modela. Ta model je služil za vnaprej dogovorjeno uporabo obdelovalnih metod za izdelavo referenčnega kosa na modernem obdelovalnem centru CNC. Pri sami zasnovi referenčnega kosa je bila vključena tudi vnaprejšnja izbira merilnih metod. To se je odražalo pri načrtovanju in zasnovi ter navsezadnje izdelavi potrebnih merilnih programov za vsako merilno metodo, ki je na koncu služila za pridobitev akreditacije merilnih postopkov. Izbira merilnih metod v tem delu je bila sistematična in izkustveno naravnana. Meritve v laboratoriju so pokazale, da vsak merjenec ni primeren za vsako metodo. Merilne metode, ki so bile uporabljene v tem diplomskem delu in so tudi metode, ki se v laboratoriju uporabljajo vsakodnevno, so metode 3D-skeniranja z belo strukturirano svetlobo, računalniško podprta tomografija, optični koordinatni merilni stroj in nazadnje najbolj razširjena ter raziskana metoda uporabe merilnega koordinatnega stroja. Za končno dosego potrditve smernic diplomskega dela so pridobljene meritve na vsaki merilni metodi, ki so bile analizirane in na koncu primerjalno medsebojno vrednotene. Ključna za pridobitev realne slike meritev sta bila uporaba in upoštevanje merilnih negotovosti ter merilnih pogreškov vsake merilne metode. Sami rezultati so prikazali sliko medsebojnih odstopanj, ki so se vrednotili z metodnimi merilnimi pogreški. Zaključek analize medsebojnih merilnih metod je prikazal dejansko odstopanje vsake merilne metode, ki se je na koncu tudi zaključila z nepogrešljivo medsebojno medmetodno primerjalno analizo rezultatov. Dobljeni izsledki so služili kot vodilo pri dokazovanju določenih zastavljenih hipotez tega diplomskega dela.

Ključne besede: *akreditacijski referenčni kos, akreditacijski standardi, merilna negotovost, mostovni KMS, računalniško podprta tomografija, 3D-skeniranje, optični KMS.*

ABSTRACT

Intermethod industrial measurements as a basis for ISO/IEC 17025:2017 accreditation of testing laboratories

The introductory part of the bachelor's thesis presented the set goals, purpose, and basic claims that had to be confirmed or rejected throughout the entire thesis. Modern measurement methods and the most modern standards used in metrology were used to verify the claims. The use of the accreditation house guidelines and the implementation of international accreditation standards for individual measurement methods were very important. This was directly reflected in all measurements and activities in our accredited measurement laboratory. A study of the accreditation house's requirements and, consequently, the implementation in the production of the final model followed. The former dictated the course of the study of the design of the reference piece. This model served for the pre-agreed use of machining methods for the production of the reference piece on a modern CNC machining center. The design of the reference piece also included a pre-selection of measurement methods. This was reflected in the planning and design and, ultimately, the production of the necessary measurement programs for each measurement method that ultimately served to obtain accreditation of measurement procedures. The selection of measurement methods in this thesis was systematic and empirically oriented. Measurements in the laboratory showed that not every measured object is suitable for every method. The measurement methods that were used in this bachelor's thesis and that are also methods that are used daily in the laboratory are the 3D scanning methods with white structured light, computer-aided tomography, optical coordinate measuring machine, and, finally, the most widespread and researched method of using a coordinate measuring machine. To finally achieve confirmation of the guidelines of the bachelor's thesis, measurements were obtained for each measurement method. They were analyzed and eventually compared with each other. The key to obtaining a real picture of the measurements was the use and consideration of measurement uncertainties and measurement errors of each measurement method. The results showed a picture of mutual deviations that were evaluated with the method of measurement errors. The conclusion of the analysis of mutual measurement methods showed the actual deviation of each measurement method, which ultimately ended with an indispensable inter-method comparative analysis of the results. The results obtained served as a guide in proving certain hypotheses of this thesis.

Keywords: *accreditation reference piece, accreditation standards, measurement uncertainty, bridge CMM, computed tomography, 3D scanning, optical CMM.*

Kazalo vsebine

1	UVOD	10
1.1	OPIS PODROČJA IN OPREDELITEV PROBLEMA	12
1.2	NAMEN, CILJI IN OSNOVNE TRDITVE	13
1.3	PREDPOSTAVKE IN OMEJITVE	14
1.4	UPORABLJENE RAZISKOVALNE METODE	14
2	PRIMERJAVA MEDMETODNIH MERITEV	16
2.1	IDEJNA ZASNOVA PROCESA METODOLOGIJE DELA	16
2.1.1	<i>Predstavitev podjetja Iskra ISD d. o. o.</i>	17
2.2	UPORABA MEDNARODNIH STANDARDOV ZA ZAGOTAVLJANJE AKREDITIRANIH METOD IN VREDNOTENJA REZULTATOV ..	18
2.2.1	<i>Smernice akreditacijskih standardov na področju metrologije</i>	18
2.2.2	<i>Uporabljeni standardi v akreditacijskem laboratoriju</i>	19
2.3	METODOLOGIJA ZASNOVE IN KONSTRUKCIJSKA REŠITEV REFERENČNEGA KOSA	20
2.3.1	<i>Pregled smernic razvoja referenčnih modelov v svetu</i>	20
2.3.2	<i>Uporaba in upoštevanje zahtev pri izdelavi referenčnega kosa</i>	22
2.3.3	<i>Konstrukcija in izdelava referenčnega modela</i>	24
2.4	METODOLOGIJA NAPREDNEJŠIH MERILNIH METOD	27
2.4.1	<i>Uporabljene merilne metode pri dokazovanju ustreznosti referenčnega kosa</i>	27
2.4.1.1	<i>Merilni koordinatni stroj</i>	27
2.4.1.2	<i>Merilni optični koordinatni stroj</i>	29
2.4.1.3	<i>Računalniško podprta tomografija – CT</i>	31
2.4.1.4	<i>3D Optični skener s strukturirano svetlobo</i>	33
2.4.2	<i>Implementacija in programska zasnova merilnih metod na referenčnem kosu</i>	35
2.4.3	<i>Izdelava merilnih programov v PC-DMIS podjetja Hexagon</i>	36
2.4.4	<i>Izdelava merilnih programov v programu za merjenje PolyWorks podjetja InnovMetric</i>	38
2.5	POGREŠKI IN MERILNA NEGOTOVOST MERILNIH METOD	43
2.5.1	<i>Teoretični model merilne negotovosti</i>	43
2.5.2	<i>Parametri akreditacijskega laboratorija</i>	43
2.5.3	<i>Pridobljene merilne negotovosti</i>	44
2.6	EKONOMSKA UPRAVIČENOST	46
3	DISKUSIJA DOBLJENIH REZULTATOV NA PODLAGI PRIMERJAVE	50
3.1	UVOD V DISKUSIJO IN PREGLED MERITEV	50
3.2	PODROBNA ANALIZA IN VREDNOTENJE PRIDOBLENIH REZULTATOV PO METODAH	50
3.3	MEDSEBOJNA PRIMERJALNA ANALIZA DOBLJENIH REZULTATOV IN NJHOVA MEDSEBOJNA DEVIACIJA	55
4	SKLEP	59
5	VIRI IN LITERATURA	61

Kazalo slik

SLIKA 1: LOGOTIP PODJETJA ISKRA ISD.....	17
SLIKA 2: PRIMER UNIVERZALNEGA REFERENČNEGA KOSA	21
SLIKA 3: IZRIS 3D-MODELA V PROGRAMU CREO	24
SLIKA 4: REFERENČNI KOS PO ANODIZACIJI	25
SLIKA 5: DELAVNIŠKA RISBA REFERENČNEGA KOSA.....	26
SLIKA 6: KOORDINATNI MERILNI STROJ HEXAGON GLOBAL S	27
SLIKA 7: SKICA – KOORDINATNI MERILNI STROJ (KMS)	28
SLIKA 8: OPTIČNI MERILNI STROJ HEXAGON OPTIV M443	29
SLIKA 9: SKICA – OPTIČNI MERILNI STROJ (OPTIV).....	30
SLIKA 10: RAČUNALNIŠKO PODPRT TOMOGRAF ZEISS METROTOM G2 (CT).....	31
SLIKA 11: PRIKAZ DELOVANJA RAČUNALNIŠKE TOMOGRAFIJE (CT).....	32
SLIKA 12: 3D-OPTIČNI MERILNI SKENER AICON STEREOSCAN NEO	33
SLIKA 13: SKICA – 3D-OPTIČNI SKENER S STRUKTURIRANO SVETLOBO	34
SLIKA 14: PRIMERJAVA ODVZEMA TOČK – CILINDER	35
SLIKA 15: PRIMERJAVA ODVZEMA TOČK – KROGLA	36
SLIKA 16: PROGRAM PC-DMIS ZA MERITVE NA KMS.....	37
SLIKA 17: PROGRAM OPTOCAT ZA IZVAJANJE MERITEV NA 3D-SKENERJU	37
SLIKA 18: POLYWORKS CAD – PRIKAZ PROGRAMA	38
SLIKA 19: POLYWORKS SLIKOVNI PRIKAZ IZDELANEGA REFERENČNEGA KOSA	39
SLIKA 20: POLYWORKS 3D-SKENER MERITEV	40
SLIKA 21: POLYWORKS MERITVE CT.....	40
SLIKA 22: PROGRAM METROTOM OS.....	41
SLIKA 23: PROGRAM VOLUME GRAPHICS MAX	42
SLIKA 24: DIGITALNI MERILNIK TEMPERATURE, VLAGE IN ATMOSFERSKEGA TLAKA.....	44
SLIKA 25: PRIKAZ TEMPERATURE V PROSTORU MED IZVAJANJEM MERITEV	44
SLIKA 26: MERITVE – KOORDINATNI MERILNI STROJ.....	51
SLIKA 27: MERITVE – OPTIČNI KOORDINATNI MERILNI STROJ – MERJENJE S TIPALOM.....	52
SLIKA 28: MERITVE – OPTIČNI KOORDINATNI MERILNI STROJ – MERJENJE Z OPTIKO	53
SLIKA 29: MERITVE S POMOČJO RAČUNALNIŠKE TOMOGRAFIJE – CT	54
SLIKA 30: MERITVE – 3D-SKENER	55
SLIKA 31: MEDMETODNA PRIMERJAVA MERITEV	57
SLIKA 32: REZULTATI MERITEV PO DVIGU MERILNE NEGOTOVOSTI NA OPTIČNEM KOORDINATNEM MERILNEM STROJU.....	58

Kazalo tabel

TABELA 1: POPIS NAJBOLJ UPORABLJENIH SMERNIC IN STANDARDOV V INDUSTRIJI.....	18
TABELA 2: POPIS ELEMENTOV PREVERJANJA	22
TABELA 3: PRIDOBLENA MERILNA NEGOTOVOST	45
TABELA 4: INVESTICIJSKI STROŠKI AKREDITIRANJA	47
TABELA 5: LETNI STROŠKI AKREDITIRANJA	47
TABELA 6: SKUPNI PREDVIDENI STROŠKI	48
TABELA 7: MOŽNI PRIHRANKI	48
TABELA 8: FINANČNA UPRAVIČENOST PROJEKTA.....	49

KAZALO KRATIC IN OKRAJŠAV

CT Računalniška tomografija (angl. Computed tomography)

KMS Koordinatni merilni stroj (angl. Coordinate Measuring Machine)

OMM Koordinatni optični merilni stroj (angl. Optical Measuring Machine)

CAD Računalniško podprto konstruiranje (angl. Computer Aided Design)

STL Format datoteke, ki izvira iz stereo litografskega sistema CAD (angl. Standard Tessellation Language)

GUM Vodnik za izražanje merilne negotovosti (angl. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement)

ILAC Mednarodno združenje akreditacijskih organov (angl. International Laboratory Accreditation Cooperation)

MRA Sporazum o medsebojnem priznavanju akreditacij (angl. Mutual Recognition Arrangement)

SI Mednarodni sistem enot (angl. International System of Units)

MPE Največja dovoljena napaka na dolžinskem merjenju (angl. Maximum Permissible Error)

1 UVOD

V podjetju Iskra ISD d. o. o. kot na splošno v vsej moderni industriji, še posebej v stroki strojništva, v zadnjem času prihaja do vedno večjih potreb in zahtev s strani kupcev po zagotavljanju kakovosti, sledljivosti in proizvodjanju izdelkov po najvišjih standardih. Merjenje mehanskih lastnosti, dimenzij, oblikovnih toleranc in površinskih lastnosti neposredno vpliva na varnost, funkcionalnost in skladnost končnih izdelkov. Točnost in sledljivost meritev sta bistvenega pomena. Posledica tega je, da je ključnega pomena proces spremljanja in zagotavljanja kakovosti izdelkov, pri katerem pa lahko sama zahtevnost in kompleksnost posameznega izdelka privedeta do težav s kontrolo in dokazovanjem ustreznosti po zahtevanih določenih specifikacijah. Za dosego tega je treba vključevati najvišje kriterije in standarde ter uporabljati najmodernejše tehnološko napredne merilne metode. V moderni metrologiji zahtevnost merilnih postopkov in merjenje kompleksnih dimenzij privedeta do uporabe multidisciplinarnih merilnih metod. Rezultat tega je polno kvalitativno vrednotenje posameznega merilnega izdelka. To omogoča, da imajo preskuševalni laboratoriji v industriji vedno bolj pomembno in ključno vlogo pri zagotavljanju skladnosti izdelkov s tehničnimi specifikacijami, regulativnimi zahtevami in pričakovanji naročnikov. Moderni standardi določajo splošne zahteve in smernice za usposobljenost preskuševalnih ter kalibracijskih laboratorijev. Za pridobitev in vzdrževanje akreditacije za multidisciplinarne meritve mora laboratorij izkazovati tehnično usposobljenost, kar vključuje sledljivost meritev, validacijo metod z mejniki merilne negotovosti, kontrolirano okolje, redno sodelovanje v preskusih usposobljenosti in na koncu tudi akreditiran ter usposobljen kader. Tu pa v veliko primerih prihaja do težav, saj z obstoječimi referenčnimi kosi ne moremo izvesti meritev po vseh metodah, da bi bile medsebojno primerjalno ovrednotene. Medmetodne meritve, kot oblika primerjalne analize različnih merilnih postopkov, predstavljajo učinkovit način za interno preverjanje zanesljivosti merilnih postopkov. Gre za primerjave med rezultati, pridobljenimi z različnimi metodami ali instrumenti, v okviru istega laboratorija ali med več laboratoriji in omogočajo identifikacijo sistemskih napak, izboljšujejo merilne postopke ter zagotavljajo podatke, potrebne za izpolnjevanje zahtev standarda.

V tem diplomskem delu bo obravnavana vloga medmetodnih industrijskih meritev kot podpora za akreditacijo preskuševalnih laboratorijev v stroki strojništva. Predstavljene bodo temeljne zahteve standarda ISO/IEC 17025:2017, izpostavljen pomen zanesljivih meritev v industrijskem okolju, razčlenjene vrste medmetodnih meritev in analizirano, kako te meritve

prispevajo k izpolnjevanju zahtev akreditacijskega postopka. Poseben poudarek bo namenjen praktičnemu primeru iz industrijskega laboratorija, kjer bodo opravljene primerjalne meritve dimenzij GD&T z različnimi metodami. Na osnovi tega primera bo prikazano, kako rezultati medmetodnih meritev podpirajo dokazovanje usposobljenosti laboratorija.

V teoretičnem delu tega diplomskega dela bo predstavljen model poteka zasnove referenčnega kosa in opisane izbrane metodologije, po katerih so se izvajale meritve, kot vzvod za dokazovanje medmetodnih primerljivosti ter s tem dokazovanje smiselnosti in ustreznosti referenčnega kosa. V delu sledijo predstavitev vseh uporabljenih merilnih strojev in pripadajoče opreme ter posamezni opisi delovanja programske opreme, ki je bila potrebna za operativnost pri izvajanju merjenja referenčnega kosa. Vodilo diplomskega dela je bil standard ISO/IEC 17025:2017, ki predstavlja mednarodno priznana osnovo za vzpostavljanje in ocenjevanje kompetentnosti ter dodeljevanje akreditacije preskuševalnih in kalibracijskih laboratorijev. Namen standarda ni neposredno zagotavljanje kakovosti meritev, ampak dokazovanje, da laboratoriji svoje meritve izvajajo v skladu z zahtevami in načeli danega standarda. Pridobitev akreditacije po tem standardu predstavlja pomembno konkurenčno prednost, obenem pa laboratoriju omogoča sodelovanje v zahtevnih dobaviteljskih verigah in mednarodnem prostoru.

V eksperimentalni del je vključena analiza dobljenih rezultatov z različnimi merilnimi metodami, ki so bile potrebne za pripravo akreditacije izbranih merilnih metod pri Slovenski akreditaciji. Analizi rezultatov sledita medsebojna primerjava rezultatov in diskusija izvedenih meritev po metodologiji izvedbe meritev. Pri izvajanju meritev z različnimi postopki prihaja do odstopanj v medsebojnih rezultatih, ki pa morajo biti za uspešno akreditacijo znotraj zahtev akreditacijskega standarda. Kot merilne metode so bile uporabljene moderne in industrijsko priznane metode. Eksperimentalni del je podprt z metodami 3D-skeniranja, CT-računalniško podprte tomografije, uporabo klasičnega merilnega koordinatnega stroja KMS in na koncu z uporabo optično podprtega merilnega koordinatnega stroja OMM.

Diplomsko delo se zaključi s potrditvijo ali ovržbo hipotez, določenih ob začetku diplomskega dela. Poleg tega je podano mnenje o ustreznosti referenčnega kosa in hkrati tudi samih merilnih metod, ki so se izvajale na referenčnem kosu.

1.1 Opis področja in opredelitev problema

Metrologija je znanstvena veda o merjenju in obsega vse teoretične in praktične vidike meritev, ne glede na področje uporabe. V strojništvu ima metrologija ključno vlogo, saj omogoča zagotavljanje kakovosti izdelkov, nadzor nad proizvodnimi procesi in zagotavljanje skladnosti z normami in tehničnimi specifikacijami.

Področje metrologije se v strojništvu ukvarja z razvojem, uporabo in kalibracijo merilnih instrumentov, metod in tehnik, ki se uporabljajo pri merjenju različnih fizikalnih veličin, kot so dimenzijske veličine, hrapavost površin, masa, sila, temperatura, tlak in podobno. Te meritve so bistvene za natančnost in ponovljivost mehanskih komponent, kar je še posebej pomembno v visoko zahtevnih industrijah, kot so avtomobilska, letalska, energetika in druge panoge zahtevnega strojništva.

Oprelitev problemov meritev med različnimi postopki merjenja je navedena v nadaljevanju.

Eden izmed temeljnih izzivov v metrologiji strojništva je primerljivost in združljivost meritev, izvedenih z različnimi merilnimi instrumenti, postopki in metodami. Različni postopki merjenja (dotikalni, brezdotikalni, optični, ročni, avtomatizirani oziroma programsko vodeni ipd.) lahko zaradi različnih fizikalnih načinov delovanja, občutljivosti, ločljivosti in merilnega okolja vodijo do razlik v rezultatih meritev.

Glavni problemi vključujejo:

- neujemanje merilnih rezultatov: različne metode lahko podajo različne rezultate zaradi različnih referenc, kalibracijskih standardov, okoljskih pogojev in uporabniških napak;
- merilna negotovost: vsaka metoda ima svojo značilno merilno negotovost, ki lahko vpliva na interpretacijo rezultatov in odločitev v kakovostnem nadzoru;
- kalibracija in sledljivost: vsi merilni postopki morajo biti ustrezno kalibrirani in sledljivi s pomočjo nacionalnih ali mednarodnih etalonov, kar ni vedno enostavno zagotoviti, zlasti pri novih ali netradicionalnih metodah;
- vpliv merilnega okolja: temperatura, vibracije, vlažnost in drugi okoljski dejavniki lahko različno vplivajo na rezultate posameznih merilnih sistemov;
- uporabniška interpretacija: različni operaterji lahko na različne načine interpretirajo merilne rezultate, še posebej če gre za vizualne ali subjektivne meritve.

Za zagotovitev medsebojne primerljivosti meritev so potrebni standardizacija merilnih postopkov, dosledna uporaba normativov (npr. ISO, GPS), uporaba kalibriranih merilnih sistemov in ustrezno usposobljen merilni kader. V praksi to pogosto pomeni uvedbo skupnega referenčnega sistema, izvajanje medlaboratorijskih primerjav in uporabo statističnih metod za analizo dobljenih rezultatov.

Do odločitve za izbiro teme je privedla potreba po izvajanju meritev in pripravi dokumentacije za potrebe izvedbe akreditacijskega postopka po ISO/IEC 17025:2017 na oddelku podjetja, kjer sem zaposlen in močno vpet v sam proces izvedbe.

1.2 Namen, cilji in osnovne trditve

Namen diplomskega dela je raziskati pomen in učinkovitost medmetodnih industrijskih meritev kot orodja za zagotavljanje kakovosti meritev in podporo pri postopkih akreditacije preskuševalnih laboratorijev po standardu ISO/IEC 17025:2017. Rezultat je utemeljena integracija vseh merilnih metod, predstavljenih v tem delu.

Cilji diplomskega dela so:

- opisati in primerjati osnovne merilne metode, ki se uporabljajo v strojništvu,
- oceniti natančnost in zanesljivost različnih metod preko praktičnih meritev,
- izvesti medmetodno primerjavo rezultatov za določene geometrijske značilnosti,
- analizirati vpliv medmetodnih meritev na zanesljivost, sledljivost in primerljivost rezultatov,
- ugotoviti prednosti in slabosti posameznih metod v različnih industrijskih kontekstih,
- predlagati priporočila za izbiro ustrezne metode glede na zahteve merjenja,
- opredeliti stroške pridobitve akreditacije,
- opredeliti upravičenost pridobitve akreditacije.

Hipoteze, ki jih bom preverjal v diplomskem delu, so:

Hipoteza 1: Različne merilne metode (npr. koordinatni merilni stroj, optični sistem, ročna merila) v strojništvu dajejo statistično značilno različne rezultate pri meritvah dimenzij kompleksnih obdelovancev.

Hipoteza 2: Medmetodne meritve pomembno prispevajo k zagotavljanju zanesljivosti rezultatov meritev in uspešni akreditaciji preskuševalnih laboratorijev.

Hipoteza 3: Medmetodne meritve razkrivajo sistemske napake, ki bi sicer ostale neopažene v notranjih kontrolah kakovosti.

Hipoteza 4: Kako zagotoviti kakovost in zanesljivost rezultatov.

1.3 Predpostavke in omejitve

O merilnih metodah najdemo kar nekaj literature, vendar pa za novejša najnaprednejša merilna metoda, kot sta 3D-skener in tomografija CT, skorajda ne obstaja strokovna literatura, s katero bi odgovorili na določena vprašanja, na primer glede obdelave podatkov ali pa samih parametrov skeniranja. Pomagati smo si morali izključno z lastnim znanjem in izvajanjem preizkusov, ki so nam glede na znanje pomagali do želenih rezultatov.

Omejitve, na katere smo naleteli pri izdelavi diplomskega dela, so:

- omejeno število izmerjenih dimenzij za medsebojno primerjavo,
- izdelan samo en oblikovno referenčen kos,
- delna omejitev kompleksnosti meritev in same izdelave referenčnega kosa zaradi združljivosti z vsemi merilnimi metodami,
- nezadostna literatura, še posebej pri najnaprednejših metodah, kot sta 3D-skener in še posebej tomografija CT,
- pri tomografiji CT še ni v večini dokazanih aksiomov oziroma zakonitosti,
- stalno spreminjajoče se zakonitosti merilnih negotovosti tudi s strani akreditacijske hiše,
- cenovno izredno drag postopek akreditiranja.

1.4 Uporabljene raziskovalne metode

V diplomskem delu ugotavljamo, kakšna je razlika v merjenju referenčnega kosa po različnih merilnih postopkih. Zaradi različnih metod merjenja imamo s kupci velikokrat pregledovanje meritev in poenotenje merilnih programov ter merilnih metod med kupcem in nami. Pri pripravi na akreditacijo pa z izvajanjem merjenja z različnimi merilnimi postopki sproti ugotavljamo,

ali je določen merilni program pravilno zasnovan in ne povzroča težav pri primerjavi in nadaljnjem merjenju.

Raziskovalne metode, ki so bile uporabljene v tem diplomskem delu, so:

- opazovanje – pregled in ocena izvedljivosti analize z obstoječimi merilnimi stroji in opremo;
- uporaba osebnih zapiskov/konstruiranje – zasnova izdelka in analiza materiala izdelka;
- kvalitativna metoda – analiza meritev in ugotavljanje možnih merskih napak po različnih merilnih postopkih;
- primerjalna metoda – primerjava različnih merilnih metod, kot so koordinatni merilni stroji (KMS), optični skener (SCAN), koordinatni merilni stroj z optiko (OPTIV) in računalniško podprta tomografija (CT);
- analiza podatkov – analiza različnih standardiziranih postopkov.

2 PRIMERJAVA MEDMETODNIH MERITEV

2.1 *Idejna zasnova procesa metodologije dela*

V tem poglavju bo predstavljena kompletna metodologija procesa diplomskega dela, od analize trga, pregleda zahtev različnih standardov, ki jim mora referenčni kos ustrezati, definicije koncepta, do oblikovanja in konstrukcije referenčnega kosa. Temu je sledila izdelava vse do izvedbe meritev z različnimi merilnimi postopki.

Pregled standardov je bistven del akreditacijskih postopkov po standardu ISO/IEC 17025:2017, ki določa splošne zahteve za usposobljenost preskuševalnih in kalibracijskih laboratorijev.

Standardi v industriji sestavnih delov so ključnega pomena iz več razlogov, ki prispevajo k učinkovitosti, varnosti, kakovosti in mednarodni konkurenčnosti proizvodnje. Standardi določajo dimenzije, tolerance, materiale in druge lastnosti sestavnih delov, kar omogoča, da se deli različnih proizvajalcev med seboj prilegajo in delujejo skupaj brez dodatne prilagoditve. To je ključno npr. pri vijakih, ležajih, priključkih in elektronskih komponentah. Uporaba standardov v industriji sestavnih delov ni le tehnična ali ekonomska izbira, temveč strateška odločitev, ki vpliva na celoten življenjski cikel izdelkov, od razvoja do reciklaže. Standardizacija prispeva k večji učinkovitosti, kakovosti, varnosti in mednarodni primerljivosti.

Izbira tematike diplomskega dela s področja medmetodnih primerjav meritev v kontekstu akreditacije po ISO/IEC 17025:2017 ima zame več strokovnih in praktičnih prednosti, saj se poklicno vsakodnevno srečujem z izvedbo programov za merjenje izdelkov in podrobne analize primerjanja rezultatov različnih metod merjenja. Interne laboratorijske primerjave pa so nujen del sistema zagotavljanja kakovosti v laboratorijih in so pogosto zahtevane za dokazovanje tehnične usposobljenosti v akreditacijskih postopkih. Izbrana tema omogoča meni kot študentu vpogled v realno delovno okolje.

Tovrstna tema združuje znanje s področij meroslovja, kakovosti, statistike, upravljanja sistemov in standardizacije, kar omogoča široko uporabnost.

2.1.1 Predstavitev podjetja Iskra ISD d. o. o.



Slika 1: Logotip podjetja Iskra ISD

Vir: (<https://iskra-isd.com>)

Iskra ISD d. o. o., s sedežem v Kranju na naslovu Savska loka 4, je eno vodilnih slovenskih podjetij na področju mehanske obdelave kovin in izdelave zahtevnih kovinskih komponent. Podjetje je bilo ustanovljeno leta 1941 in trenutno zaposluje približno 500 ljudi. Iskra ISD je eden največjih dobaviteljev natančnih kovinskih in plastičnih komponent v Sloveniji, s poudarkom na avtomobilski, elektronski in gospodinjski industriji. Njihova edinstvenost izhaja iz združevanja devetih sodobnih tehnologij v eni proizvodni liniji, kar jim omogoča celovite rešitve za stranke.

Podjetje se osredotoča predvsem na visoko natančno obdelavo CNC, litje aluminija, brizganje plastike, galvaniziranje in izdelavo orodij. Njihove storitve vključujejo celoten spekter proizvodnega procesa, od konstrukcije in razvoja izdelkov do serijske proizvodnje in končne montaže. Iskra ISD je poznana po integriranem pristopu, visoki kakovosti proizvodov in zanesljivem spoštovanju rokov, kar ji omogoča dolgoročno sodelovanje z mednarodno uveljavljenimi partnerji.

V skladu z zahtevami sodobnega trga podjetje stalno vlaga v razvoj in modernizacijo proizvodnih zmogljivosti ter v digitalizacijo proizvodnih procesov. Poleg tehnične odličnosti daje velik poudarek tudi trajnostnemu razvoju, energetske učinkovitosti in visoki ravni skrbi za zaposlene.

Z več desetletji izkušenj, usmerjenostjo v inovacije in tehnično dovršenostjo predstavlja Iskra ISD stabilnega in kompetentnega partnerja za razvoj in proizvodnjo kompleksnih industrijskih komponent, predvsem na področjih, kjer so ključne natančnost, zanesljivost in tehnična zahtevnost.

2.2 Uporaba mednarodnih standardov za zagotavljanje akreditiranih metod in vrednotenja rezultatov

2.2.1 Smernice akreditacijskih standardov na področju metrologije

Standardi v industriji predstavljajo dogovorjene tehnične smernice, specifikacije ali zahteve, ki se uporabljajo za zagotavljanje kakovosti, varnosti, zanesljivosti in učinkovitosti proizvodov, procesov ali storitev. Njihova uporaba je ključnega pomena za enoten in usklajen razvoj ter delovanje v industrijskem okolju.

Standard je dokument, ki vsebuje tehnična pravila ali smernice, ki jih je oblikovala priznana organizacija s sodelovanjem strokovnjakov, industrije, potrošnikov in regulatornih organov (SIQ, 2023).

Standardi se lahko nanašajo na:

- mere, tolerance, materiale,
- varnostne zahteve,
- preskusne metode,
- sisteme vodenja kakovosti.

Standardi omogočajo, da se sestavni deli različnih proizvajalcev pri združevanju ujemajo skupaj brez prilagoditev in so skladni med seboj (npr. navoji, priključki).

V industrijski metrologiji, kjer je cilj zanesljivo merjenje v proizvodnem inženirstvu, je uporaba smernic in standardov ključna za zagotavljanje kakovosti, skladnosti, varnosti in sledljivosti. V nadaljevanju je pregled glavnih smernic standardov, ki se uporabljajo v tej panogi.

Tabela 1: Popis najbolj uporabljenih smernic in standardov v industriji

Standard / dokument	Opis	Primer uporabe
IATF 16949:2016	Standard za kakovost v avtomobilski industriji z meroslovnimi zahtevami	Nadzor nad merili v proizvodnji motornih delov

ISO/DIS 2768:2025	Splošne tolerance za mere brez določenih toleranc	Uporaba pri kosih brez posebej določenih toleranc
ISO 9001:2015	Osnovni sistem kakovosti s poudarkom na sledljivosti	Vzpostavitev kakovostnega sistema za dobavitelja
ISO/IEC 17025:2017	Zahteve za preskusne in kalibracijske laboratorije	Akreditacija laboratorija za merjenje trdote kovin
ISO 14253-1:2017	Skladnost rezultatov glede na tolerance in negotovost	Odločanje o skladnosti ohišij menjalnikov
ISO 1101:2017	Toleriranje oblik, pozicije in orientacije komponent	Definiranje toleranc za montažne luknje v karoseriji
ISO 16742:2014	Dimenzijsko toleriranje plastičnih oblikovanih delov	Definiranje toleranc brizganja izdelkov iz termoplastike
ISO 5459:2024	Datumi in reference	Pravilno razbiranje risb

Vir: (<https://www.iso.org/standards.html>)

Standardi v industriji se uporabljajo zato, da zagotovijo kakovost in zanesljivost izdelkov in storitev, skladnost z zakonodajo in regulativo, medsebojno primerljivost in združljivost (npr. delov, sistemov), varnost za uporabnike in okolje, učinkovitost proizvodnih procesov, lažje sodelovanje med podjetji na domačem in mednarodnem trgu.

Standardi torej omogočajo doslednost, transparentnost in izboljšano konkurenčnost v industriji.

2.2.2 Uporabljeni standardi v akreditacijskem laboratoriju

ISO/IEC 17025:2017 je ključni standard za laboratorije, ki želijo zagotavljati zanesljive, sledljive in mednarodno primerljive rezultate meritev ter delovati skladno z zahtevami akreditacijskih postopkov.

Akreditacijski organi (v Sloveniji: Slovenska akreditacija – SA) presojuje skladnost laboratorijev s standardom ISO/IEC 17025:2017. Akreditacija dokazuje usposobljenost in omogoča vpis v mednarodne baze (ILAC MRA).

Standard ISO/IEC 17025:2017 določa zahteve, ki jih morajo izpolnjevati preskusni in kalibracijski laboratoriji, da zagotovijo veljavne rezultate, izkažejo tehnično usposobljenost ter vzdržujejo zaupanje strank in akreditacijskih organov.

Standard je sestavljen iz 8 poglavij, ključni pa sta poglavji 6 (Zahteve glede virov) in 7 (Procesne zahteve). Poglavja pokrivajo organizacijo, nepristranskost, usposobljenost osebja, opremo, okolje, metode preskušanja/kalibracije, merilno negotovost, poročanje in sistem kakovosti.

Ključne zahteve standarda so:

- tehnična usposobljenost osebja in merilne opreme,
- sledljivost meritev do enot SI,
- ovrednotenje merilne negotovosti (po GUM),
- validacija in uporaba ustreznih metod,
- nepristranskost in zaupnost podatkov,
- sistem vodenja kakovosti z notranjimi presojami in izboljšavami.

Primeri uporabe standarda so naslednji:

- kalibracija merilnih naprav v industriji (npr. temperatura, tlak, dolžina),
- preskušanje materialov v gradbeništvu ali farmaciji,
- notranje meritve v avtomobilski proizvodnji (npr. kontrola motorjev) (ISO 17025:2017, 2017).

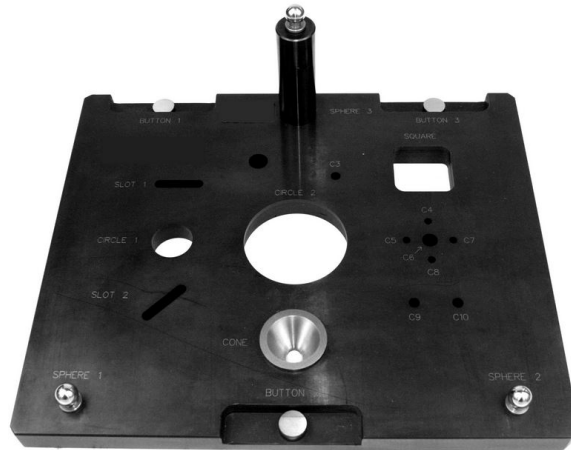
2.3 Metodologija zasnove in konstrukcijska rešitev referenčnega kosa

2.3.1 Pregled smernic razvoja referenčnih modelov v svetu

Pri želji izvesti meritve z nekim standardnim univerzalnim merjencem z različnimi merilnimi metodami smo naleteli na težavo, saj je CT občutljiv na jeklene izdelke zaradi nezmožnosti penetracije skozi material s tako gostoto in posledično nezmožen kakovostno izvesti meritve (zaradi nezmožnosti preboja gama žarkov se na površini pojavi popačenje merjenca), prav tako je težava z lesketajočimi se izdelki zaradi odboja svetlobe (refleksije), ki predstavljajo težavo

merjenja na optičnem merilnem stroju in skeniranju izdelka na skenerju zaradi leska oziroma refleksije.

Na zgoraj opisane težave smo naleteli pri raziskavi trga in že obstoječih referenčnih kosov z možnostjo nakupa.



Slika 2: Primer univerzalnega referenčnega kosa

Vir: (<https://willrich.com/product/cmm-calibration-artifact/>)

Po tehtnem premisleku in vseh ovirah, ki jih predstavljajo v določeni meri vse merske metode, smo se odločili zasnovati lasten referenčni kos, ki nam bo služil za medmetodne meritve in ne bo imel težav s prebojem gostote materiala ali refleksivno površino, ki merilnim strojem na optični zasnovi ne omogoča dovolj kakovostnega sprejema podatkov merjenja. S predstavniki Slovenske akreditacije smo se dogovorili, kateri oblikovni elementi referenčnega kosa za preverjanje morajo biti prisotni na samem referenčnem kosu.

Pridobili smo tudi ponudbe postopka akreditacije takšnega referenčnega kosa pri akreditiranih laboratorijih in ponudbe za medlaboratorijsko primerjavo meritev referenčnega kosa.

2.3.2 Uporaba in upoštevanje zahtev pri izdelavi referenčnega kosa

V sodelovanju s strokovnjaki iz industrije, zaposlenimi na Slovenski akreditaciji, smo načrtali smernice glede elementov, potrebnih za izvajanje meritev. Zahteve in predloge smo implementirali pri izrisu referenčnega kosa. Pri zasnovi smo upoštevali vse omejitve posameznih metod in se odločili za najbolj optimalno rešitev.

Tabela 2: Popis elementov preverjanja

	Št. kote	Element preverjanja	Razlaga
Dimenzija	1	Premer	Meritev premera na zgornjem robu zunanjšega konusa
Dimenzija	2	Premer	Meritev premera na zunanjem konusu na globini 5 mm
Dimenzija	3	Premer	Meritev premera na zunanjem konusu na globini 20 mm
Dimenzija	4	Kot	Meritev polovičnega kota zunanjšega konusa
Dimenzija	5	Pravokotnost	Meritev pravokotnosti zunanjšega konusa na ravnino A
Dimenzija	6	Premer	Meritev premera na zgornjem robu notranjšega konusa
Dimenzija	7	Premer	Meritev premera na notranjem konusu na globini 5 mm
Dimenzija	8	Premer	Meritev premera na notranjem konusu na globini 15 mm
Dimenzija	9	Kot	Meritev polovičnega kota notranjšega konusa
Dimenzija	10	Pravokotnost	Meritev pravokotnosti notranjšega konusa na ravnino A

Dimenzija	11	Ravnost	Meritev ravnosti ravnine A, določene po sliki 3 (Direktiva Slovenske akreditacije SA)
Dimenzija	12	Premer	Meritev premera na notranjem cilindru na globini 2 mm
Dimenzija	13	Premer	Meritev premera na notranjem cilindru na globini 10 mm
Dimenzija	14	Vzporednost	Meritev vzporednosti zgornje ravnine zunanjšega konusa na ravnino A
Dimenzija	15	Premer	Meritev premera notranjega cilindra na notranjem konusu na globini 3 mm
Dimenzija	16	Razdalja	Meritev višine zunanjšega konusa do ravnine A
Dimenzija	17	Razdalja	Meritev višine notranjega konusa do ravnine A
Dimenzija	18	Vzporednost	Meritev vzporednosti zgornje ravnine notranjega konusa na ravnino A
Dimenzija	19	Razdalja	Meritev razdalje med dvema kroglama 1–2
Dimenzija	20	Razdalja	Meritev razdalje med dvema kroglama 2–3
Dimenzija	21	Radij	Meritev radija polmeseca
Dimenzija	22	Radij	Meritev radija krogle
Dimenzija	23	Razdalja	Meritev razdalje med dvema ploskvama

Vir: (Lastni vir)

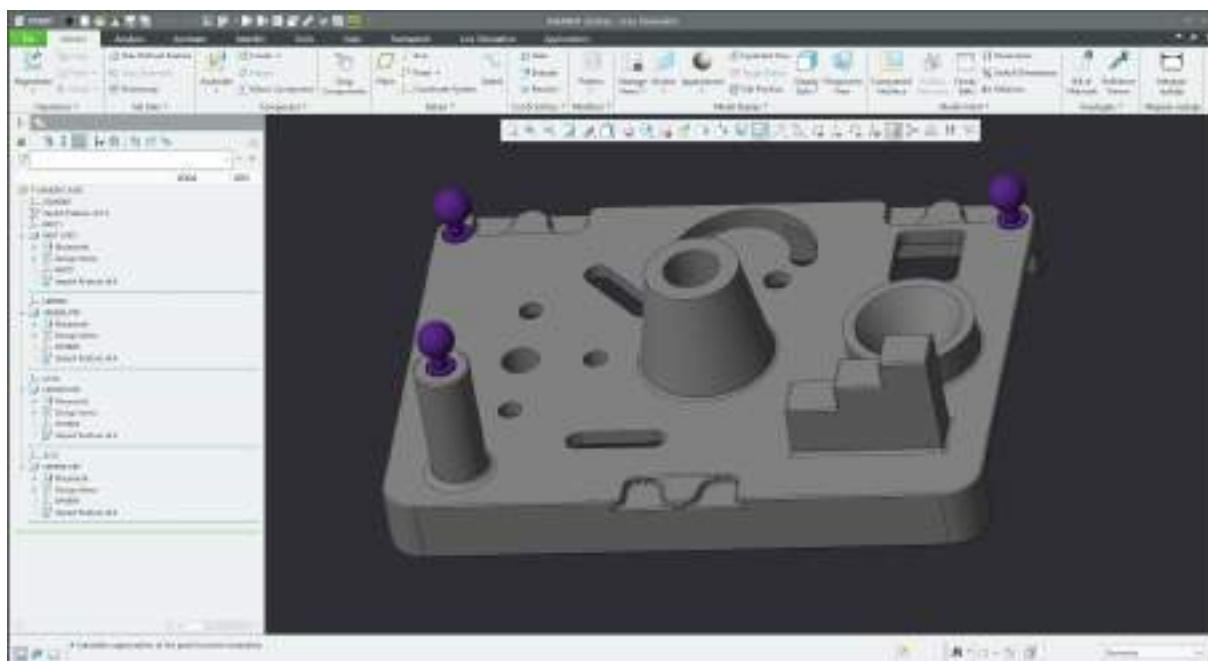
S temi geometrijsko določenimi elementi se ključno preverjajo rezultati meritve posamezne merilne metode in pri medsebojni merilni primerjavi.

2.3.3 Konstrukcija in izdelava referenčnega modela

Po tehtnem razmisleku sta sledili konstrukcijska zasnova in izdelava 3D-modela in dokumentacije. Izris je bil skonstruiran v programu, namenjenem za 3D-modeliranje. Za začetek smo določili zunanje dimenzije in samo debelino referenčnega kosa ter nato modelirali 3D-elemente, ki so nam jih pri Slovenski akreditaciji predlagali za elemente merskega preverjanja. Z idejo po čim lažji izdelavi smo 3D-model prilagodili za potrebe strojne obdelave CNC. Pomembna je bila tudi določitev pravilnega materiala. Zaradi omejitve moči žarkov gama pri skeniranju na tomografu CT je bilo treba izbrati pravilni material na podlagi gostote, skozi katero lahko žarki stroja nedeformirano preдреjo. V našem primeru smo izbrali material AL6083, ki ga lahko uporabimo na vseh merilnih strojih.

Izdelava referenčnega kosa je potekala na 5-osnem rezkalnem stroju CNC Hermle C400.

Sama izdelava pa je potekala v štirih vpetjih. Na kocki aluminija se je najprej obdelala zadnja stran. Sledila je obdelava leve in desne strani referenčnega kosa, ki se uporablja kot držalo za roke. Zadnja stran obdelave pa je bila stran, kjer so vsi natančni elementi. Kot običajno se je najprej obdelalo na grobo z 1 mm dodatka na steno, po popustitvi notranjih napetosti je sledila fina obdelava.



Slika 3: Izris 3D-modela v programu Creo

Vir: (Lastni vir)

Po izdelavi je bilo ugotovljeno, da je referenčni kos preveč refleksiven in se svetloba preveč odbija od površine ob osvetlitvi na podlagi. Odločili smo se, da bomo kos poslali na postopek anodizacije aluminija. Pri izbiri barve samega nanosa anodizacije smo prosili podjetje, ki opravlja storitev, da nam pošlje vzorce, ki smo jih testirali na merilnih strojih z optičnim delovanjem. Pri obeh merilnih strojih na optični osnovi je refleksija svetlobe najmanj vplivala na delovanje in pridobivanje podatkov v primeru mat zelene barve površine merjenca.



Slika 4: Referenčni kos po anodizaciji

Vir: (Lastni vir)

2.4 Metodologija naprednejših merilnih metod

2.4.1 Uporabljene merilne metode pri dokazovanju ustreznosti referenčnega kosa

V podpoglavjih, ki sledijo, bodo opisani vse merilne metode, ki so bile uporabljene pri izvajanju meritev za potrebe akreditiranja, in delovanje posameznih strojev in sistemov, vključno z opisom standardov posamezne merilne metode, po katerem deluje merilni stroj ali merilna oprema.

2.4.1.1 Merilni koordinatni stroj



Slika 6: Koordinatni merilni stroj Hexagon Global S

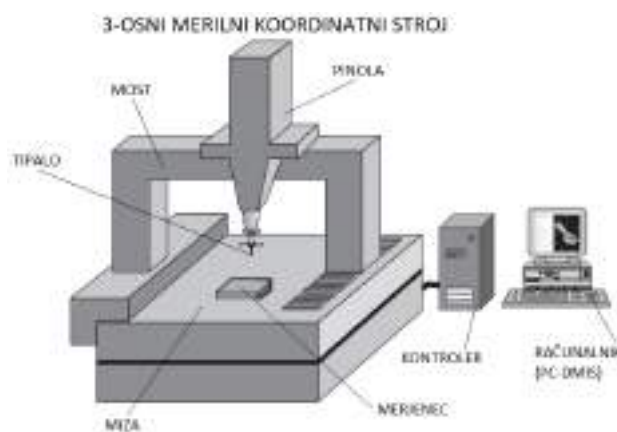
Vir: (Lastni vir)

Koordinatni merilni stroj je naprava, ki se uporablja za natančno merjenje dimenzij in geometrijskih lastnosti predmetov. Deluje tako, da s pomočjo merilne glave in sonde zaznava točke na površini predmeta ter jih pretvori v tridimenzionalne (vektorsko določene) koordinate. Koordinatni merilni stroj je visoko natančna naprava, namenjena dimenzijskemu vrednotenju

ter merjenju in popisu obdelovancev. Zasnovan je kot mostovni tip stroja, kjer se miza premika v Y-smeri, glava s sondo pa po mostu v X-smeri in navpično v Z-smeri. Osnovna podlaga je običajno izdelana iz granita ali drugih površinsko trdih materialov z možnostjo obdelave z natančno in gladko površino, ki zagotavljajo minimalno toplotno raztezanje in vibracije. Upravljanje stroja poteka preko računalnika z merilnim programom PC-DMIS, ki je povezan s kontrolno enoto ali kontrolerjem. Ta neposredno krmili osi in vodi tipalo. Med merjenjem tipalo ob dotiku merjenca preko kontrolerja prenaša izmerjene vrednosti v računalnik.

Rezultati meritev se lahko podajajo v oblikah, kot sta:

- neposreden izpis iz programa PC-DMIS,
- posreden izpis, ki se izdela na osnovi neposrednega poročila in vnese v Excelov obrazec.



Slika 7: Skica – koordinatni merilni stroj (KMS)

Vir: (<https://www.zjmdc.com/CompanyNews/smc-inspection.html>)

Merilni stroj v našem laboratoriju, 3D-merilni stroj Hexagon Global S Green, deluje v skladu z naborom standardov ISO 10360:2021, ki določajo postopke sprejema in ovrednotenja zmogljivosti sistemov CMM.

Serijski Global S uporablja standarde za brezhibne sprejemne in ponovno preveritvene teste kakovosti ter omogoča primerjavo med proizvajalci.

Stroj se običajno ob nakupu dostavlja z izraženimi vrednostmi MPE in je certificiran v skladu z zgoraj omenjenim standardom (Željko, 2021).

2.4.1.2 Merilni optični koordinatni stroj



Slika 8: Optični merilni stroj Hexagon Optiv M443

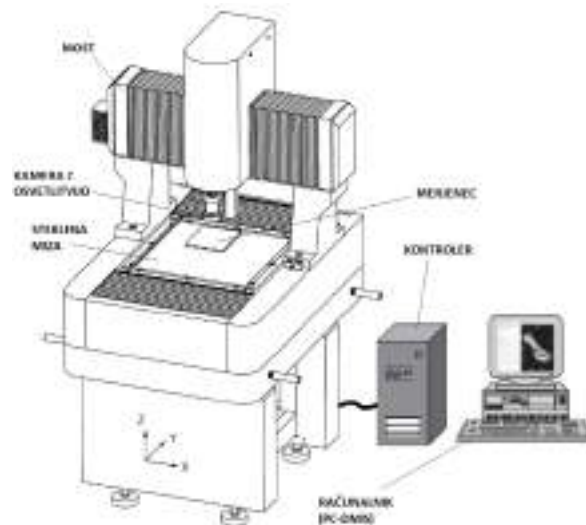
Vir: (Lastni vir)

Optični koordinatni merilni stroj je hibridna merilna naprava, ki uporablja merjenje s tipalom in merjenje s pomočjo svetlobne (slikovne) tehnologije za brezkontaktno merjenje dimenzij, oblik in geometrijskih lastnosti objektov. Zaradi svoje natančnosti in hitrosti se uporablja v industriji za kontrolo kakovosti in avtomatizacijo meritev.

Optični koordinatni merilni stroj je visoko natančna naprava za dimenzijsko preverjanje obdelovancev. Gre za stroj mostovnega tipa, katerega ključna dela sta miza s stekleno ploščo, ki omogoča osvetlitev tudi od spodaj, in merilna glava z vgrajeno kamero in osvetlitvijo. Miza se premika v Y-smeri, pinola pa po notranjem mostu v X-smeri in navpično v Z-smeri.

Delovanje stroja se upravlja preko računalnika z merilnim programom PC-DMIS, ki je povezan s kontrolerjem. Kontroler neposredno krmili gibanje osi in usklajuje delovanje steklene mize in pinole. Optična kamera zazna površino merjenca, predvsem njegove meje, kot močne spremembe kontrasta in preko kontrolerja posreduje izmerjene vrednosti v računalnik.

Pri optičnem merjenju sistem samodejno izostri sliko na površino merjenca v določenih koordinatah in rezultate preko kontrolerja prenese v računalnik. Meritve se ob koncu merilnega programa samodejno zapišejo v vnaprej določeno mapo v obliki PDF in/ali datoteki Excel.



Slika 9: Skica – optični merilni stroj (Optiv)

Vir: (https://www.patentsencyclopedia.com/imgfull/20090310954_02)

Optični oziroma multisenzorski KMS Hexagon deluje v skladu z mednarodnimi standardi ISO 10360:2021, ki definirajo natančnost merilnih sistemov in učinkovitost meritev pri kontaktnih in nekontaktnih postopkih. Z uporabo teh standardov sistemi Optiv omogočajo potrjeno in sledljivo natančnost pri druženju kontaktnih in optičnih metod v enem samem merilnem sistemu (al., 2011).

2.4.1.3 Računalniško podprta tomografija – CT



Slika 10: Računalniško podprt tomograf Zeiss Metrotom G2 (CT)

Vir: (Lastni vir)

Merilni stroj CT je pri uporabi pravih nastavitev in z uporabo primernih algoritmov lahko izredno natančna naprava, namenjena dimenzijskemu merjenju in analizi površinskih odstopanj. Poleg tega predstavlja pomembno orodje za pridobitev formatov vrednotenja, ki so zelo uporabni kot osnova za vzratni inženiring, saj omogoča natančno rekonstrukcijo površinske oblike merjenca. Najmočnejše orodje te naprave pa je možnost globinske analize in vpogleda v strukturo samega merjenca, kjer se lahko ugotavlja napake oziroma pomanjkljivosti določenega postopka izdelave.

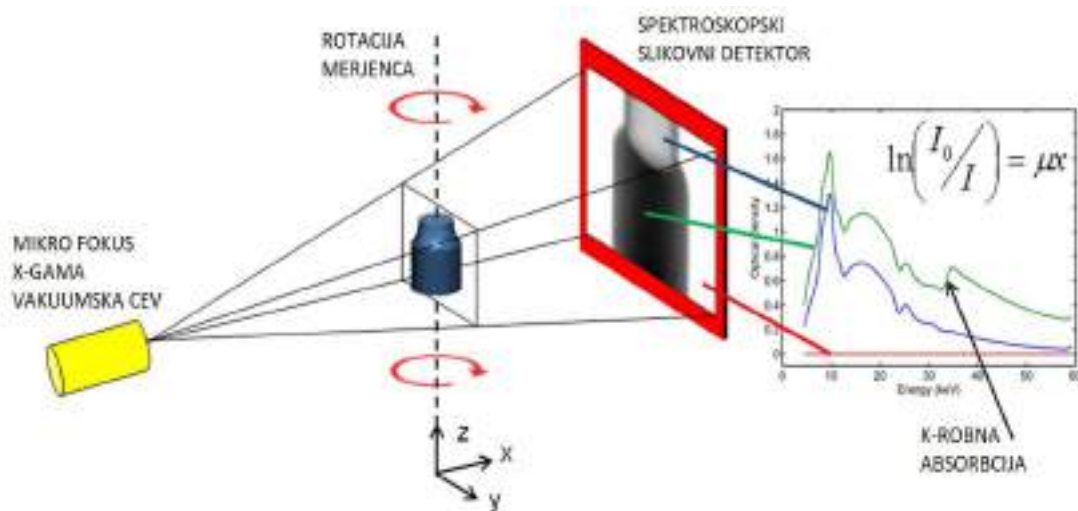
CT (računalniška tomografija) deluje na principu prehajanja rentgenskih žarkov skozi merjenec, pri čemer jih zaznava detektorska plošča. Glavni sestavni deli stroja so masivno ohišje, ki varno zadržuje radiološko sevanje, vakuumsko cev kot glavni vir žarkov in rotacijska plošča s filtri iz različnih materialov, ki odstranjujejo njihov odklon oziroma zaznava deformacije žarkov gama z neprimerno valovno dolžino, ki bi kvarno vplivali na pridobljene podatke, in s tem izboljšujejo kakovost meritve.

Merjenec je nameščen na avtomatsko vrtljivo mizo, ki je opremljena z nosilcem iz materiala z nizko gostoto (npr. stiropor), da ne ovira prehoda žarkov in s tem ne briše meje merjenca ter same oblike vpetja. Miza se med meritvijo vrti, kar omogoča zajem podatkov z vseh zornih

kotov. Pogosto je merjenec na vpenjalu rahlo nagnjen, da se zagotovi optimalni zajem geometrije.

Na koncu merilne poti je detektor, ki sprejema žarke, prepuščene skozi merjenec, in jih pretvarja v digitalne podatke. Ti podatki se nato obdelujejo s pomočjo računalnika in programske opreme Metrotom OS, ki upravlja celoten proces. Meritve potekajo tako, da se ustvari serija posnetkov, ki se nato sestavijo v zaporedje oziroma volumetrični 3D-model merjenca.

Industrijski stroj CT (računalniška tomografija) deluje na podoben način kot medicinski CT. Deluje na višjih močeh in je prilagojen za pregled in analizo industrijskih komponent, katerih gostota je mnogo višja, kot na primer človeško telo. Glavni namen industrijskega CT je neinvazivno pregledovanje notranje strukture objektov, preverjanje kakovosti izdelkov in iskanje napak, kot so razpoke, poroznosti ali nepravilnosti v materialu.



Slika 11: Prikaz delovanja računalniške tomografije (CT)

Vir: (<https://www.nature.com/articles/srep15979>)

Standard, po katerem deluje CT, je VDI/VDE 2630:2018, ki je sklop tehničnih smernic, ki urejajo uporabo računalniške tomografije (CT) za dimenzijsko merjenje. Namen tega standarda je opredeliti termine, vplivne dejavnike, preskusne metode in merilno negotovost, zlasti pri uporabi CT v 3D-metrologiji.

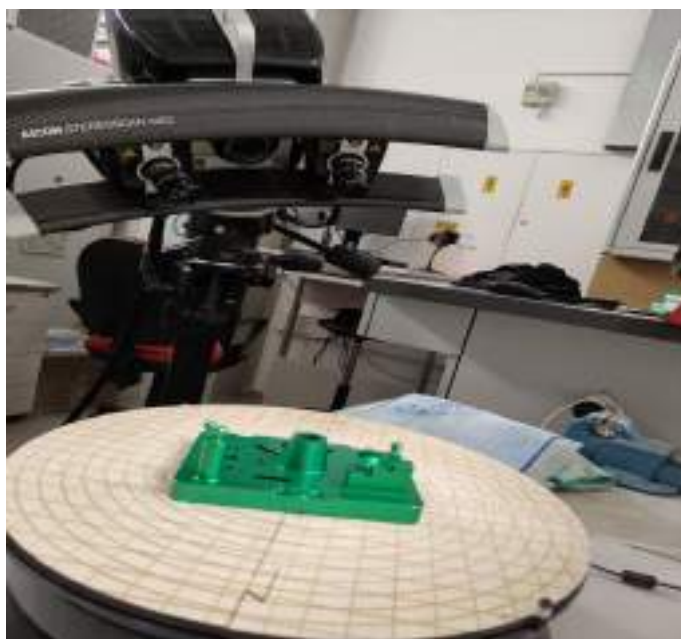
Opređeljuje ključne izraze in osnovne pojme meritev CT, na primer merjenje dolžin, kotov in drugih geometrijskih značilnosti, ki vplivajo na rezultate dimenzijskega merjenja s CT, in daje priporočila za zagotavljanje kakovosti meritev. Velja za aksialne sisteme CT (rotacija materiala

okrog fiksne osi, vzporedne radiografske smeri), tako za konusno (cone-beam) kot loparno (fan-beam) tehnologijo CT (Wenig, 2006).

Vključuje specifikacije za maksimalno dopustno napako (MPE) in metode za preverjanje skladnosti sistema CT glede na standarde CT-KMS.

Metodologija določa testne vzorce (npr. kalibrirane kroglice) in postopke za določanje teh napak.

2.4.1.4 3D Optični skener s strukturirano svetlobo



Slika 12: 3D-optični merilni skener Aicon StereoScan Neo

Vir: (Lastni vir)

Merilni 3D-skener je visoko natančna naprava za dimenzijsko merjenje in analizo površinskih odstopanj. Poleg tega predstavlja izjemno učinkovito orodje za vzratni inženiring, saj omogoča natančno rekonstrukcijo površinske geometrije merjenca.

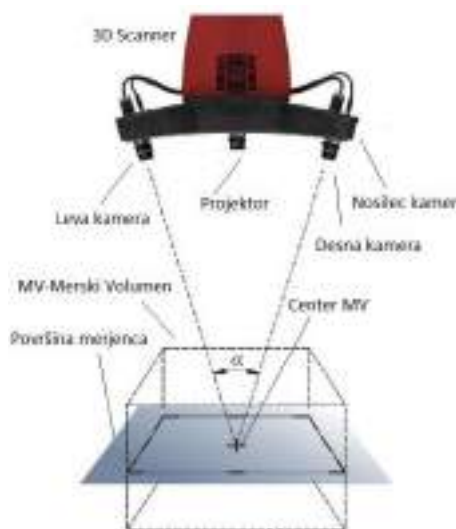
Delovanje 3D-skenerja temelji na principu bele strukturirane svetlobe. Projektor v ohišju skenerja projicira vzorec strukturirane svetlobe na površino merjenca, dve kamere pa zaznavata deformacije tega vzorca. Na podlagi sprememb geometrije svetlobnih linij sistem izračuna natančno obliko merjenca. Projektor in kamere so zamenljivi moduli, kar omogoča prilagajanje meritev glede na zahtevano ločljivost, natančnost in velikost merjenca. Manjši kot je merski

volumen (MV), večja je gostota zapisa točk na določenem merskem volumnu in posledično ločljivost in obratno.

Pri uporabi avtomatske vrtljive mize je ključen postopek prostorske kalibracije skenerja z mizo in merjencem. Med snemanjem si operater pomaga z dvema pomožnima laserjema, ki določata središče oziroma fokus merskega volumna za vsak posnetek. To pomeni, da se lahko položaj skenerja ročno prilagaja glede na geometrijo obdelovanca.

Delovanje sistema se upravlja preko računalnika z namensko programsko opremo Hexagon OptoCAT, ki je neposredno povezana s skenerjem preko mrežnih kartic. Meritve potekajo v obliki zajema posameznih posnetkov, ki se nato zložijo v zaporedje in tvorijo kompleten 3D-model merjenca (T. Tóth in J. Živčák, 2014).

3D-skener je naprava, ki zajema geometrijske podatke objekta in jih pretvori v digitalni tridimenzionalni (3D) model. Uporablja se v različnih panogah, kot so industrijska kontrola, inženiring, medicina, umetnost in zabavna industrija. Rezultat je iz posnetkov kreiran 3D-model v formatu STL.



Slika 13: Skica – 3D-optični skener s strukturirano svetlobo

Vir: (https://www.researchgate.net/figure/Principle-of-measurement-on-GOM-ATOS-II-400-3D-scanner_fig3_288229805)

Primarna standarda za natančnost in delovanje 3D-skenerja sta VDI/VDE 2634:2008, 3. del, in ISO 10360-8:2021, ki zagotavljata okvir za testiranje in potrjevanje kakovosti sistemov 3D-skeniranja, zlasti v industrijskih in metroloških aplikacijah.

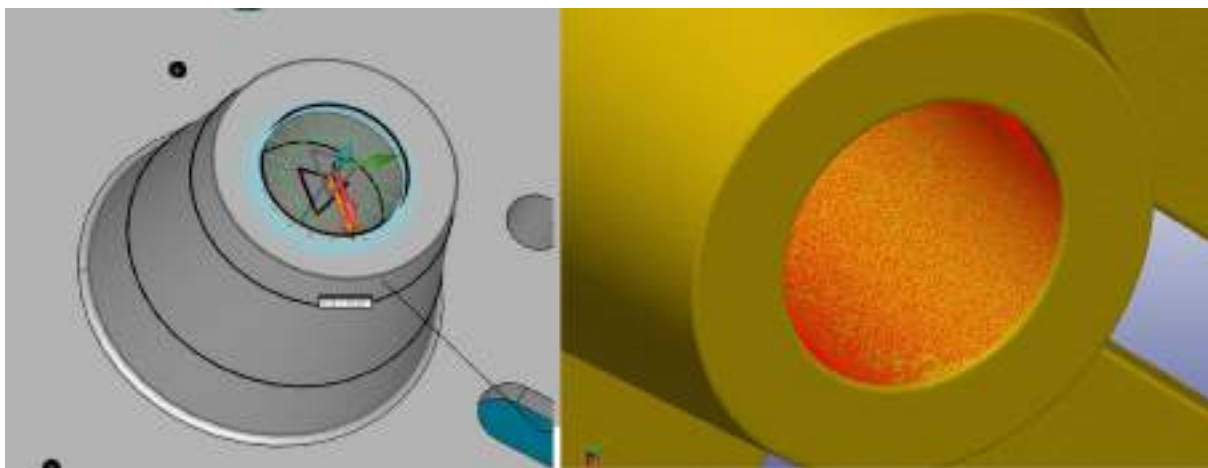
VDI/VDE 2634:2008, 3. del: standard se pogosto uporablja za ocenjevanje natančnosti sistemov 3D-skeniranja.

Osredotoča se na opredelitev preskusnih postopkov in meril sprejemljivosti za različne tehnologije skeniranja.

2.4.2 Implementacija in programska zasnova merilnih metod na referenčnem kosu

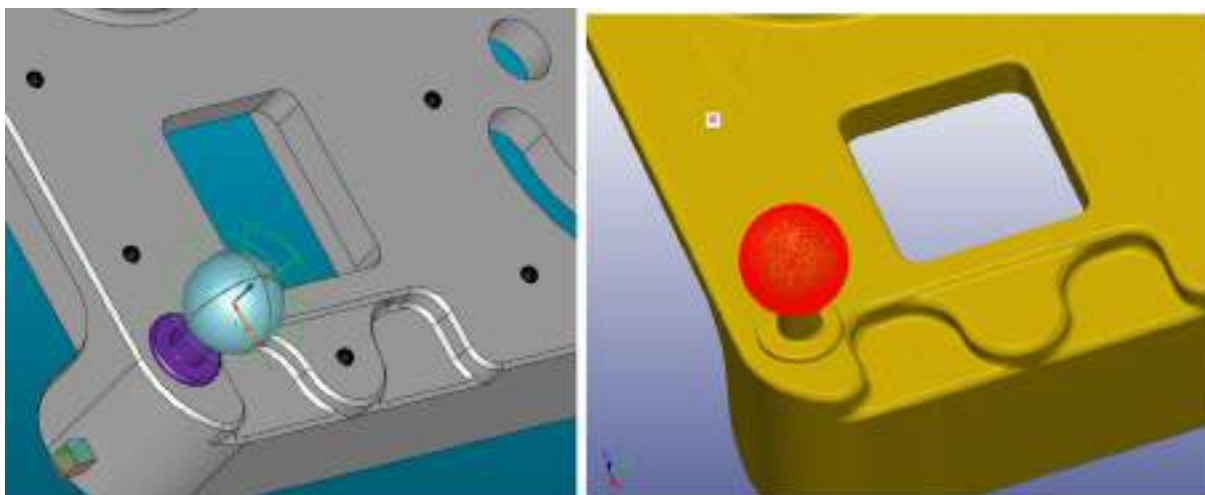
Izdelava merilnih programov v programih, kot sta PC-DMIS in PolyWorks, predstavlja ključen korak pri vzpostavitvi zanesljivega merilnega postopka. Medtem ko je PC-DMIS primarno usmerjen v natančno programiranje poti tipala in meritev na koordinatnem merilnem stroju, omogoča PolyWorks napredno obdelavo in analizo oblakov točk, ki izhajajo iz optičnih meritev in meritev CT. Kombinirana uporaba obeh pristopov omogoča širok spekter aplikacij in zagotavlja sledljivost in ponovljivost rezultatov, kar je bistvenega pomena za kakovostno in standardizirano industrijsko meroslovje.

Pri samem načrtovanju izdelave merilnih programov smo stremeli k samemu delovanju strojev in se na podlagi izkušenj odločili, da pri izdelavi programa PC-DMIS uporabimo tako imenovano metodo scan, kjer tipalo drsi po površini in inkrementalno zajema podatke v visokem obsegu, ker se le tako najbolj približamo ostalim meritvam, ki bodo obdelane in vrednotene s pomočjo oblakov točk v programski opremi PolyWorks.



Slika 14: Primerjava odvzema točk – cilinder

Vir: (Lastni vir)



Slika 15: Primerjava odvzema točk – krogla

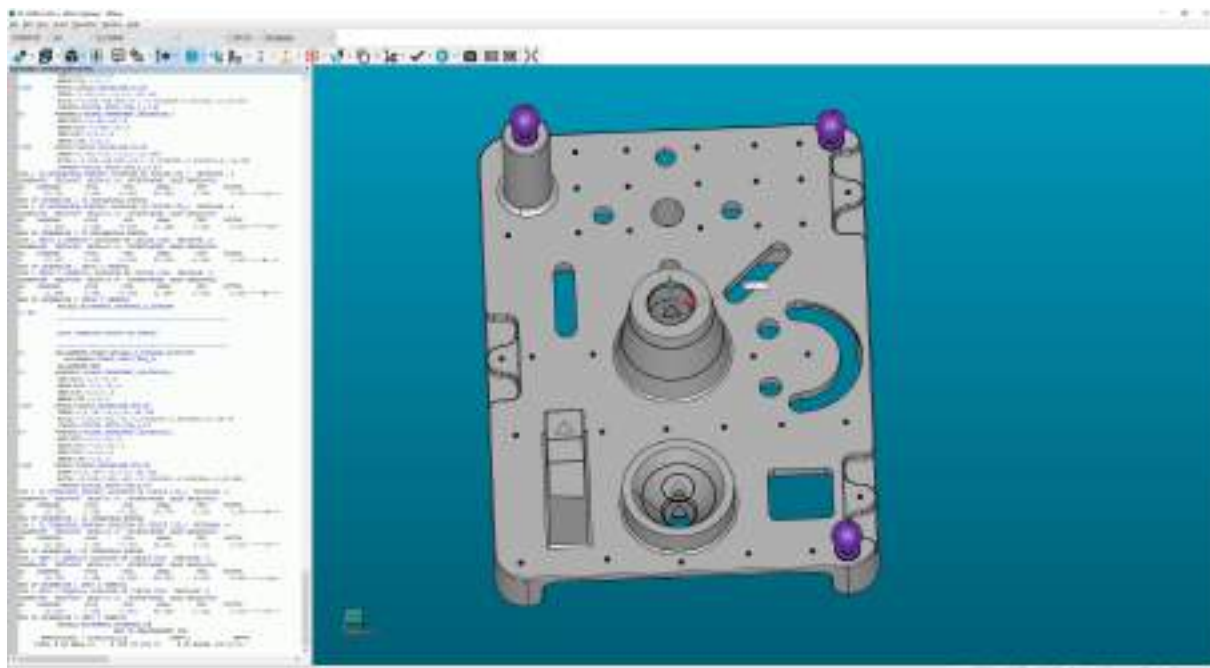
Vir: (Lastni vir)

2.4.3 Izdelava merilnih programov v PC-DMIS podjetja Hexagon

Programska oprema PC-DMIS predstavlja eno najpogostejše uporabljenih orodij za programiranje in neposredno upravljanje koordinatnih merilnih strojev in pridobitev rezultatov. Postopek izdelave merilnega programa poteka po jasno definiranih korakih, ki zagotavljajo sledljivost, ponovljivost in ustreznost merilnih rezultatov.

Prvi korak obsega uvoz modela CAD merjenca v ustreznem formatu (npr. STEP, IGES) in definicijo merilne strategije. V tem delu se določi, katere geometrijske značilnosti bodo predmet meritev in kakšen način tipanja oziroma tipala se bo uporabil. Temu sledi vzpostavitev koordinatnega sistema, ki mora biti usklajen z referenčnim koordinatnim sistemom modela CAD, kar se doseže z izborom primarnih, sekundarnih in terciarnih referenčnih elementov.

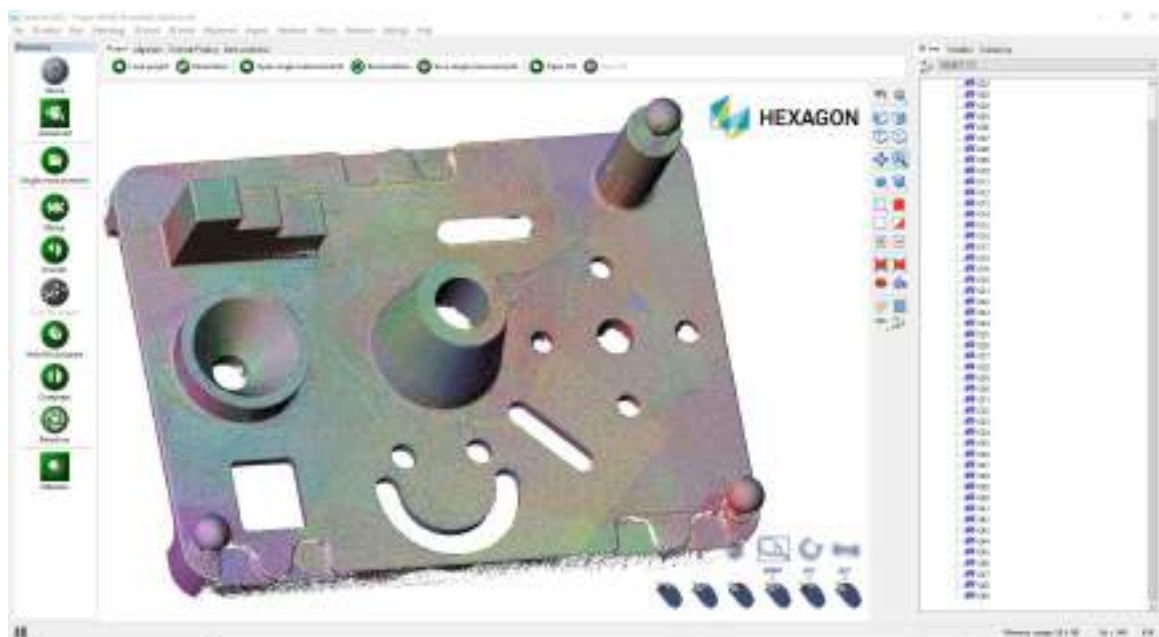
V nadaljevanju se izvede programiranje merilnih ukazov, pri čemer se natančno definirajo poti merilne glave, hitrosti pomikov in varne razdalje. Program omogoča vnos toleranc skladno s tehnično dokumentacijo (GD&T), kar omogoča neposredno ovrednotenje skladnosti izdelka. Pred dejansko izvedbo meritve se program preveri s pomočjo simulacijskega okolja, ki omogoča identifikacijo morebitnih trkov in optimizacijo merilnega časa. Zaključni korak predstavlja izvedba merilnega programa na stroju CMM, pri čemer se rezultati avtomatsko obdelajo in prikažejo v obliki merilnega poročila, ki je lahko integrirano v sistem zagotavljanja kakovosti.



Slika 16: Program PC-DMIS za meritve na KMS

Vir: (Lastni vir)

3D-skener uporablja program OptoCAT za merjenje in sestavljanje oblaka točk, ki popisuje obliko merjenca, ki ga vidijo kamere. Kamere namreč vidijo slike, ki jih potem programska oprema združi skupaj in kreira datoteko STL sestavljenega 3D-objekta, ki ga nato uporabimo pri analizi v programu PolyWorks.



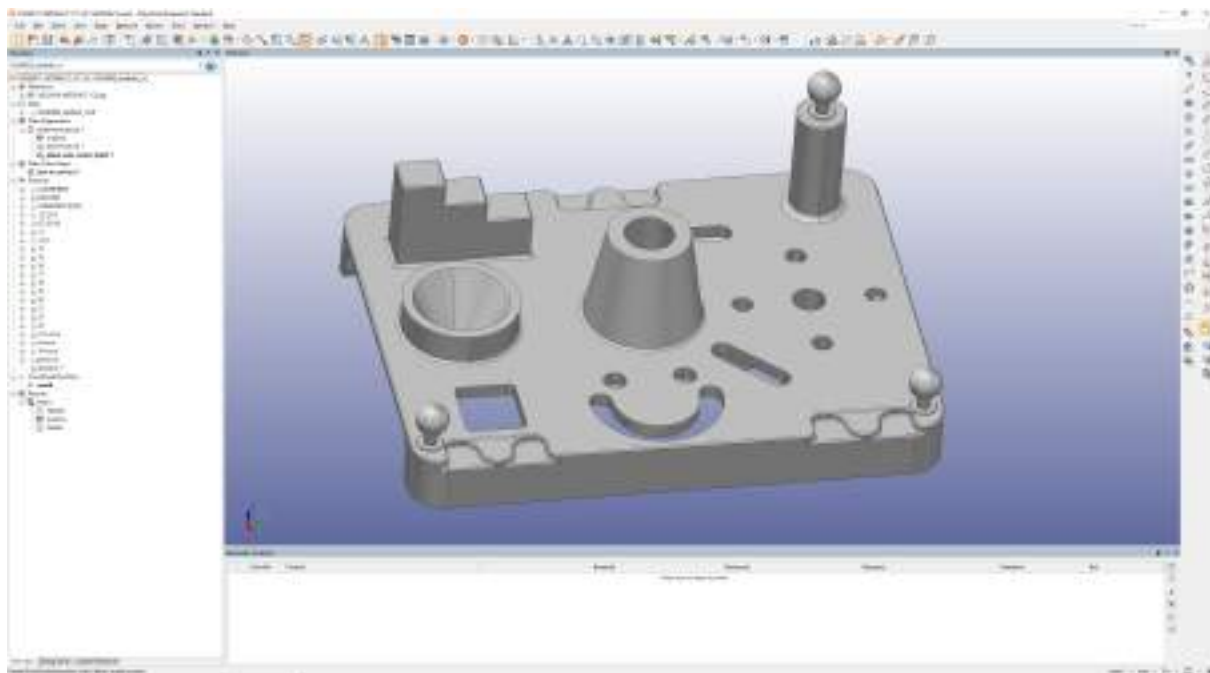
Slika 17: Program OptoCAT za izvajanje meritev na 3D-skenerju

Vir: (Lastni vir)

2.4.4 Izdelava merilnih programov v programu za merjenje PolyWorks podjetja InnovMetric

PolyWorks Inspector je napreden programski paket, namenjen obdelavi podatkov, pridobljenih s pomočjo koordinatnih merilnih strojev, optičnih skenerjev in sistemov CT. V primerjavi s PC-DMIS se osredotoča predvsem na analizo oblakov točk in primerjavo z modelom CAD.

Postopek se začne z uvozom nominalnega modela CAD in izmerjenih podatkov, pridobljenih s pomočjo ustrezne merilne tehnologije. Nato se izvede definicija merilnih elementov, pri čemer uporabnik določi geometrijske značilnosti na modelu CAD, programska oprema pa samodejno priredi te značilnosti dejanskemu oblaku točk. Za zagotovitev primerljivosti se določi poravnava koordinatnega sistema, ki je lahko zasnovana na referenčnih elementih.

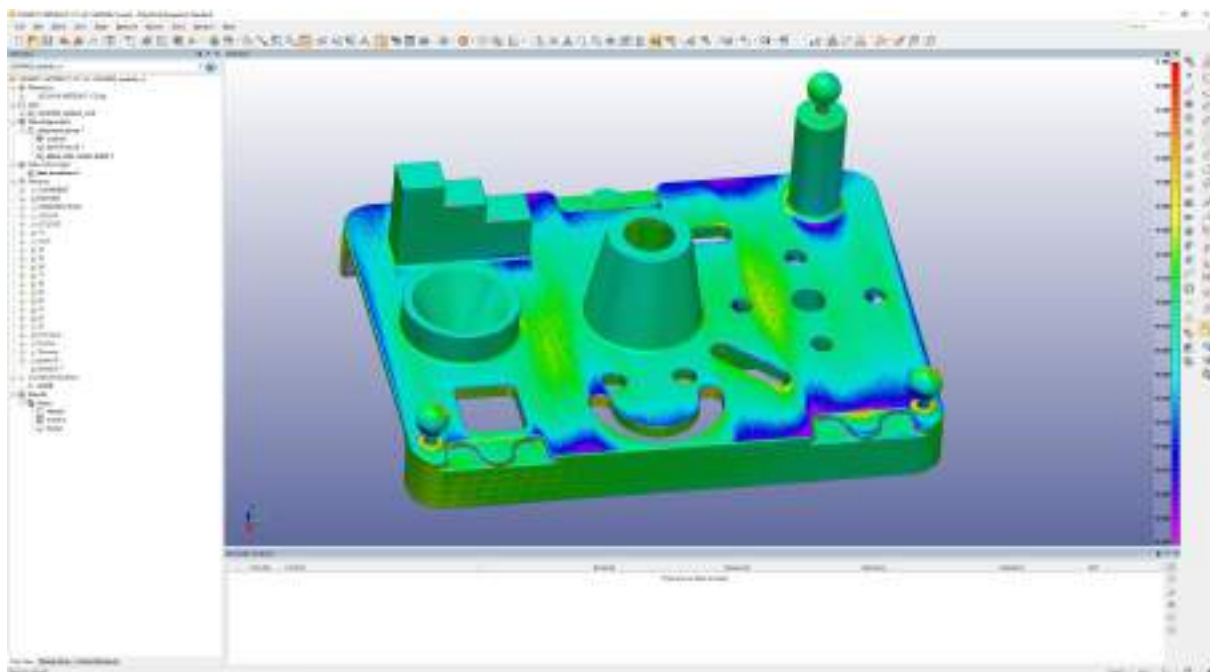


Slika 18: PolyWorks CAD – prikaz programa

Vir: (Lastni vir)

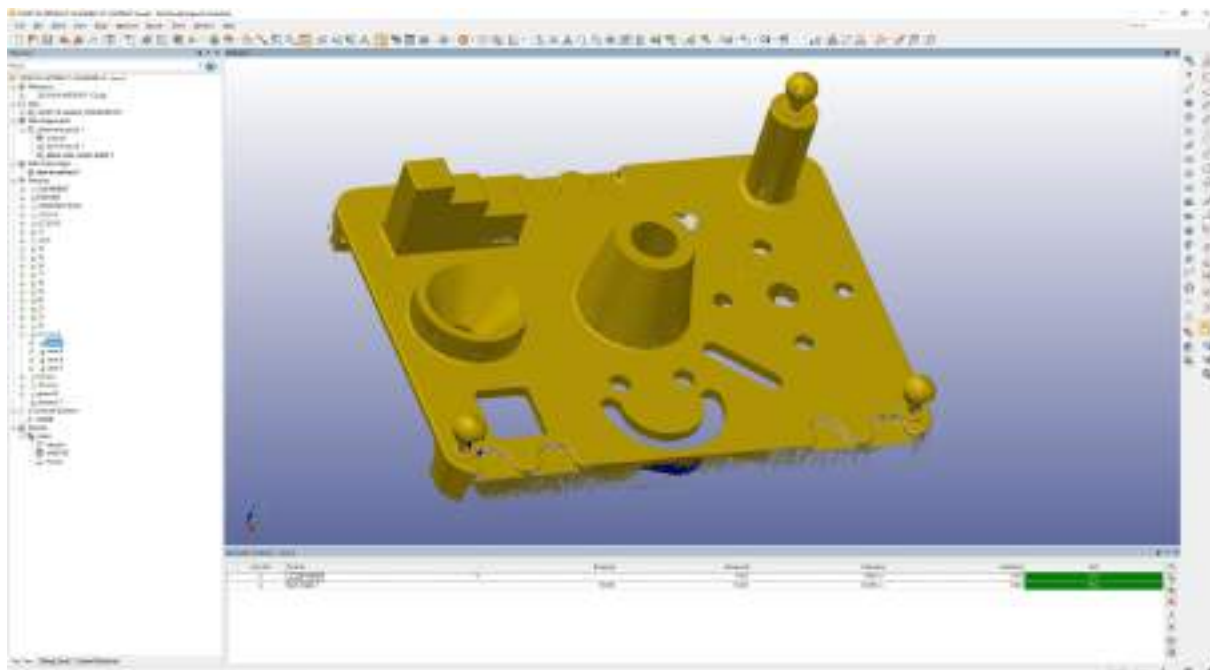
V nadaljevanju se opravi analiza odstopanj, kjer PolyWorks omogoča tako numerične dimenzijske meritve kot tudi vizualno predstavitev razlik v obliki barvnih spektrov. Programska oprema omogoča tudi avtomatizacijo postopkov, kar pomeni, da je mogoče izdelati in pripraviti standardizirane merilne programe, ki se ob uvozu novih podatkov izvedejo samodejno. Tak pristop zagotavlja visoko stopnjo ponovljivosti, zmanjšuje vpliv operaterja in časovno skrajšuje

pridobitev verodostojnih meritev. Rezultati se nato obdelajo in dokumentirajo v obliki standardiziranih merilnih poročil, ki lahko vključujejo grafične prikaze, numerične vrednosti in statistične analize.



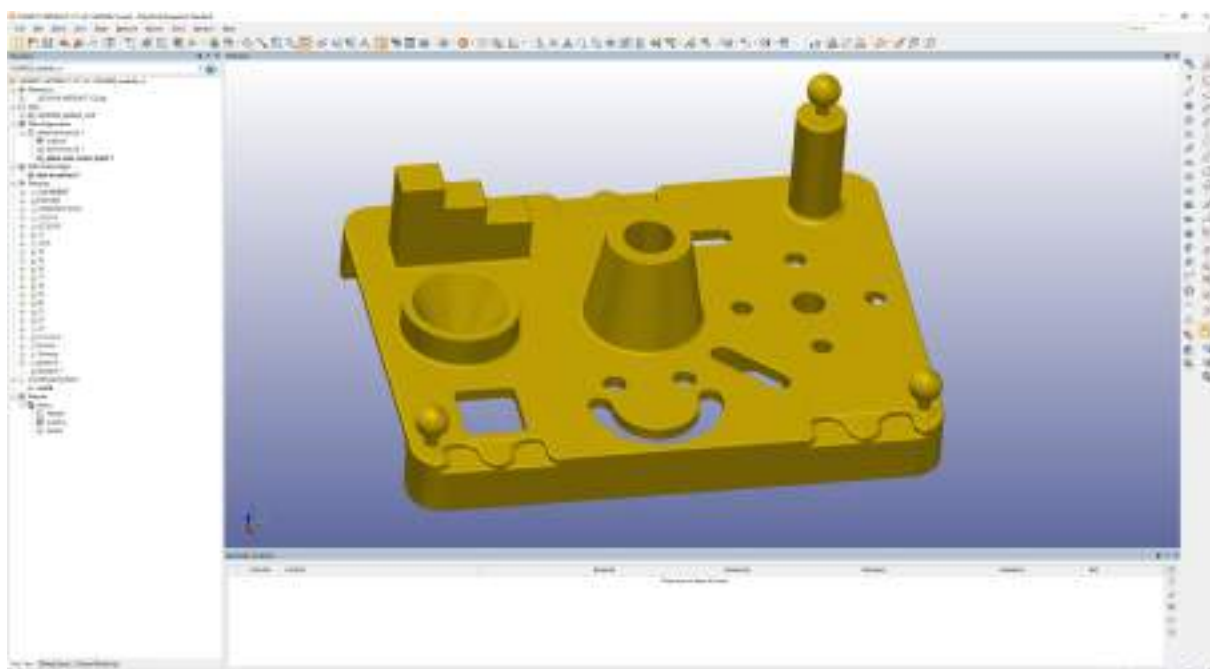
Slika 19: PolyWorks slikovni prikaz izdelanega referenčnega kosa

Vir: (Lastni vir)



Slika 20: PolyWorks 3D-skener meritev

Vir: (Lastni vir)



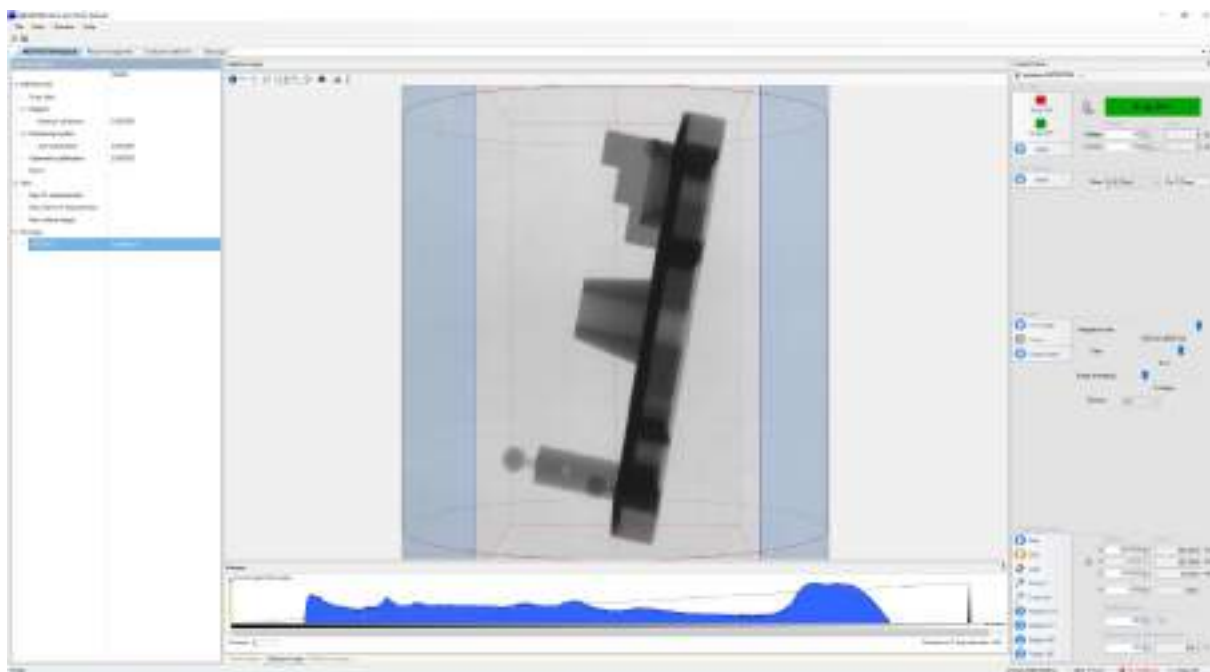
Slika 21: PolyWorks meritve CT

Vir: (Lastni vir)

Za uporabo stroja CT se uporablja programska oprema Metrotom OS podjetja Zeiss.

Stroj brez te opreme ne deluje. Znotraj programa se določuje oddaljenost merjenega objekta od rentgenske cevi, parametre obdelave, kot sta moč in tok, uporabo filtrov za zmanjšanje šumov pri analizi. Rentgenske žarke, ki penetrirajo skozi referenčni kos, ujame detektor in na podlagi gostote materiala določi sivine.

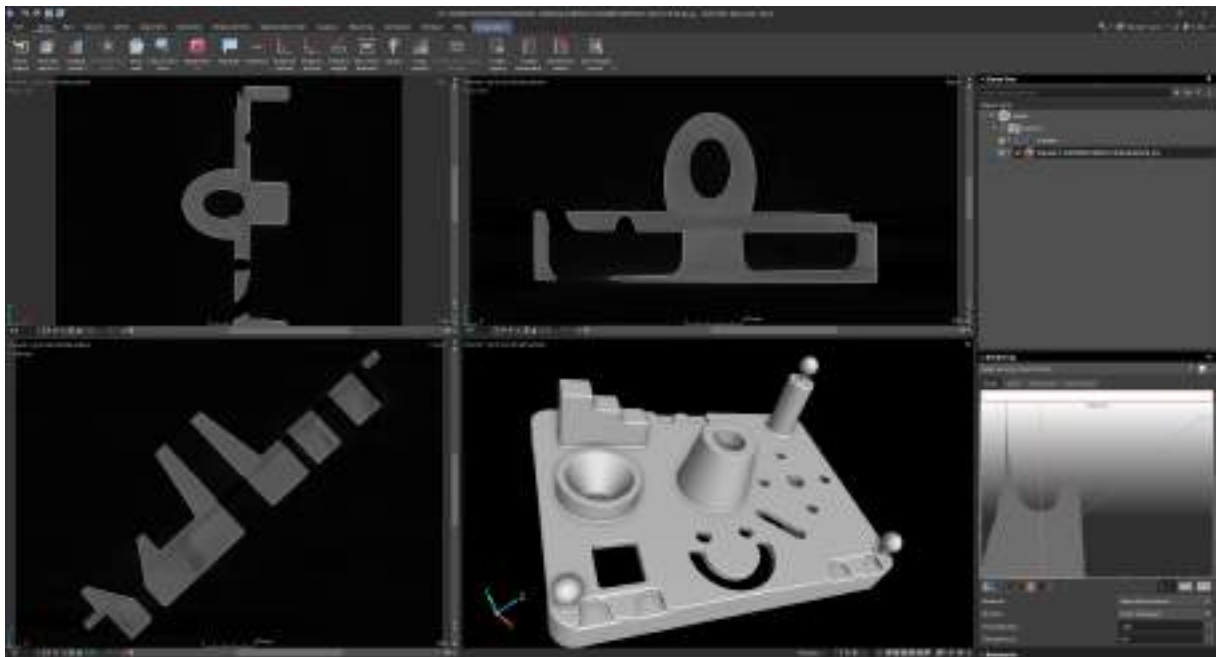
V našem primeru smo imeli pozicioniran kos po višini Z dvignjen na višino 310 mm in po razdalji X za 620 mm oddaljen od vira sevanja. Moč je nastavljena na 145 kV in tok skozi rentgensko cev na 1182 mA. Uporabljen je bil filter, narejen iz bakra, z debelino 0,75 mm. Referenčni kos se je med delovanjem obračal na merilni mizi za 360°, se ustavljal na vsako stopinjo in naredil po 3 posnetke za vsako rotacijo. Postopek je trajal 9 ur.



Slika 22: Program Metrotom OS

Vir: (Lastni vir)

Ko merilni stroj CT zaključi z delovanjem, nam v vnaprej določeno datoteko shrani posnetke, sestavljene v grobe podatke. Te podatke je treba obdelati s posebnim programom, v našem primeru imamo program VG Studio Max, kjer se definira 3D-element, ki so ga rentgenski žarki prestrelili in jih je ujel detektor na stroju CT ter iz njih naredil sivine. Barvna skala se premika od črne barve, kjer je zrak, vse do belih odtenkov, kjer je najbolj gost del referenčnega kosa. Na podlagi sivin nato program VG Studio Max določi 3D-element, ki ga izvozimo kot STL za nadaljnjo obdelavo podatkov.



Slika 23: Program Volume Graphics Max

Vir: (Lastni vir)

Uporaba Gaussovega filtra pri izdelavi programov:

Gaussov filter je nizkoprepustni matematični filter, ki temelji na Gaussovi funkciji (normalna porazdelitev). V kontekstu meritev ga uporabljamo za pravilno pasovno opredelitev sivinskih podatkov oz. za ločevanje različnih komponent površinske topografije, ki se odražajo v različnih odtenkih sivine. S tem se natančneje in bolj jasno analizirata oblika in hrapavost površin.

2.5 Pogreški in merilna negotovost merilnih metod

2.5.1 Teoretični model merilne negotovosti

Merilno negotovost pri merjenju z merilnimi stroji določajo številni parametri, ki jih lahko razdelimo v štiri skupine:

- lastnosti stroja (geometrijske napake, lastnosti tipala, lastnosti osvetlitve in programske kompenzacije),
- lastnosti merjenca (oblika, material, toplotna razteznost, priprava in površina),
- vplivi okolja (temperatura, vlaga, vibracije in čistost zraka),
- dejavniki merilne metode in operaterja (izbira strategije merjenja, obdelava podatkov in izkušnost uporabnika).

2.5.2 Parametri akreditacijskega laboratorija

Temperaturna stabilizacija merjencev je ključnega pomena za zagotavljanje točnosti in ponovljivosti meritev. Zato se obdelovanci pred začetkom merjenja običajno hranijo v merilnici najmanj šest ur, kar imenujemo proces staranja oziroma aklimatizacije. V tem času se njihova temperatura prilagodi okoliškemu pogojem merilnice, ki so vzdrževani po standardu za industrijske laboratorije ISO/IEC 17025:2017 pri $22\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ in relativni vlažnosti $40\% \pm 15\%$. Po končani stabilizaciji so merjenci pripravljeni za natančno dimenzijsko preverjanje.

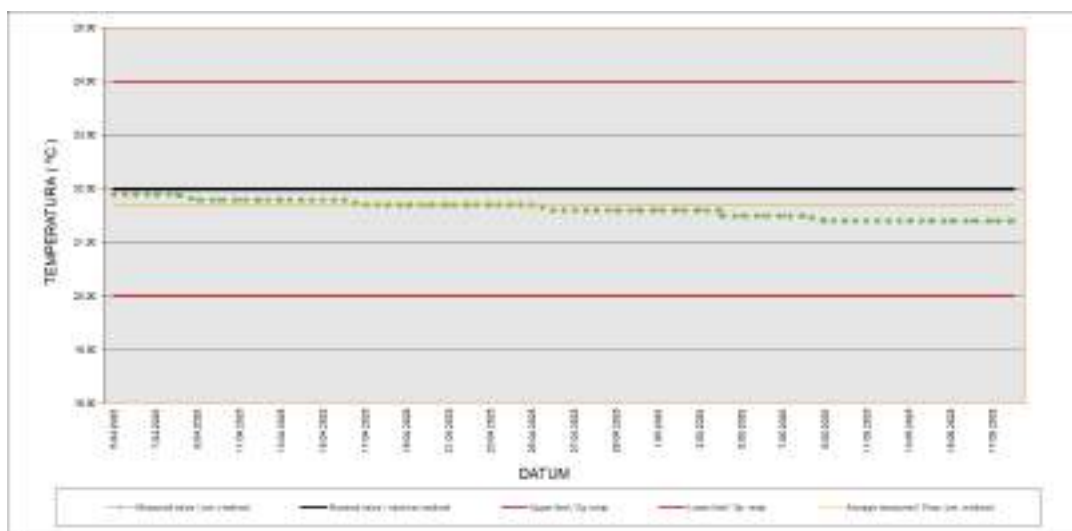
V našem laboratoriju uporabljamo digitalni merilnik temperature, vlage in atmosferskega tlaka EXTECH z avtomatskim zapisovanjem rezultatov v strežnik za lažji nadzor nihanja temperature in vlage.



Slika 24: Digitalni merilnik temperature, vlage in atmosferskega tlaka

Vir: (<https://uk.farnell.com/b/extech-instruments>)

Na sliki 25 je prikazan graf temperature v času izvajanja meritev za potrebe akreditiranja, ki so bile izvedene v aprilu in maju 2025.



Slika 25: Prikaz temperature v prostoru med izvajanjem meritev

Vir: (Lastni vir)

2.5.3 Pridobljene merilne negotovosti

Model negotovosti za koordinatne merilne stroje temelji na smernicah GUM (ISO/IEC Guide 98-3:2008) in standardih ISO 10360:2021 ter VDI/VDE 2617-11:2011, kjer se skupna negotovost izrazi kot kvadratni seštevek posameznih vplivov.

Zelo enostavno zapisana formula za merilno negotovost dolžinske meritve je:

$$U = k * \sqrt{u_{stroj}^2 + u_{merjenec}^2 + u_{okolje}^2 + u_{operater}^2}$$

Kjer je:

U – razširjena merilna negotovost,

k – pokrivni faktor (običajno k = 2 za 95 % verjetnosti),

u_{stroj} – prispevek stroja (MPE, ponovljivost in linearne napake),

u_{merjenec} – prispevek merjenca (toplotna razteznost, kakovost površine),

u_{okolje} – prispevek okolja (temperatura, vibracije, vlaga),

u_{operater} – prispevek operaterja (način merjenja, ponovljivost vpetja).

Izračun pridobljene merilne negotovosti.

Tabela 3: Pridobljena merilna negotovost

Stroj	Merilna negotovost	Opombe
Koordinatni merilni stroj – KMS	$U = 5,0\mu\text{m} + 12 \cdot 10^{-6} \cdot L$	L – nominalna mera
Računalniška tomografija – CT	$U = 40\mu\text{m} + 16 \cdot 10^{-6} \cdot L$	L – nominalna mera
Koordinatni optični merilni stroj	$U = 15\mu\text{m} + 12 \cdot 10^{-6} \cdot L$	L – nominalna mera
3D-skener	$U = 25\mu\text{m} + 5,6 \cdot 10^{-6} \cdot L$	L – nominalna mera

Vir: (Lastni vir)

Rezultati v tabeli so preračunani glede na izvedbo meritev referenčnega kosa po vseh štirih merilnih metodah in podani kot dovoljeno odstopanje rezultatov oziroma merilna negotovost vsakega merilnega postopka posebej.

2.6 Ekonomska upravičenost

Ekonomska upravičenost akreditacije se torej kaže kot uravnoteženost med stroški vzpostavitve in vzdrževanja sistema ter koristmi, ki jih prinaša. Koristi se izražajo v obliki večje konkurenčnosti, znižanja tveganj, boljšega upravljanja kakovosti in možnosti širjenja poslovanja.

Za laboratorij, ki uporablja visoko specializirano in dragoceno merilno opremo (KMS, CT, 3D-skener, optični merilni stroj), je akreditacija ključna tudi za:

- formalno potrjevanje zanesljivosti uporabljenih merilnih oprem in strojev,
- izpolnjevanje zahtev zahtevnih strank,
- zagotavljanje mednarodne prepoznavnosti.

Tako je ekonomska upravičenost projekta akreditacije visoka, še posebej v srednje velikih in velikih industrijskih laboratorijih z ambicijo zagotavljati vrhunske merilne in preskuševalne storitve.

Izračun stroškov akreditacije ISO/IEC 17025:2017.

Predpostavke:

- laboratorij ima 5 zaposlenih, od tega 4 operaterje za merilno opremo,
- uporabljene metode: KMS, CT, 3D-skener, optični merilni stroj,
- trajanje projekta vzpostavitve sistema: 12 mesecev.

Investicijski stroški (enkratni).

Tabela 4: Investicijski stroški akreditiranja

Postavka	Cena (EUR)	Opis
Priprava dokumentacije in postopkov	8000	Standardni postopki, ocena tveganj, postopki meritev
Usposabljanje osebja	4000	Tečaji za ISO/IEC 17025:2017, negotovost, sledljivost
Validacija metod (4 metode)	10.000	Meritve, analiza rezultatov, poročila
Svetovalne storitve (po potrebi)	5000	Pomoč pri implementaciji sistema kakovosti
Stroški akreditacije (prijava, ocena)	6000	Prijavnina, ocenjevalci, spremljanje
Skupaj investicijski stroški	33.000	

Vir: (Lastni vir)

Letni operativni stroški.

Tabela 5: Letni stroški akreditiranja

Postavka	Cena (EUR)	Opis
Kalibracija in vzdrževanje opreme	12.000	Redna kalibracija CMM, CT, 3D-skenerja, optičnega stroja
Vodenje sistema kakovosti	8000	Notranje presoje, revizije, dokumentacija
Izvedba internih in medlaboratorijskih primerjav	5000	Organizacija in analiza
Nadaljnje usposabljanje	2000	Posodobitve znanja zaposlenih
Administracija akreditacije	3000	Priprava poročil, komunikacija z akreditacijskim organom
Skupaj letni operativni stroški	30.000	

Vir: (Lastni vir)

Skupni stroški v prvih 3 letih.

Tabela 6: Skupni predvideni stroški

Vrsta stroškov	1. leto (EUR)	2. leto (EUR)	3. leto (EUR)	Skupaj (EUR)
Investicijski stroški	33.000	0	0	33.000
Operativni stroški	30.000	30.000	30.000	90.000
Skupaj	63.000	30.000	30.000	123.000

Vir: (Lastni vir)

Možni prihranki in koristi (predvidena ocena na 3 leta).

Tabela 7: Možni prihranki

Postavka	Vrednost (EUR)	Opis
Zmanjšanje napak in reklamacij	50.000	Manj ponovitev meritev, manj stroškov popravkov
Povečanje tržnega deleža	40.000	Novi naročniki zaradi zaupanja v akreditacijo
Višje cene za akreditirane storitve	30.000	Možnost zaračunavanja višjih cen
Dostop do subvencij in razpisov	15.000	Financiranje razvoja in inovacij
Skupaj koristi	135.000	

Vir: (Lastni vir)

Izplen izvedbe akreditacije.

Tabela 8: Finančna upravičenost projekta

Postavka	Znesek (EUR)
Skupni stroški v 3 letih	123.000
Skupaj prihranki in koristi	135.000
Neto učinek	+12.000

Vir: (Lastni vir)

Obrazložitev:

Projekt akreditacije je ekonomsko upravičen, saj koristi presegajo stroške že v prvih treh letih.

Poleg finančnih koristi laboratorij pridobi večjo verodostojnost in konkurenčnost.

Stroški in koristi so odvisni od velikosti laboratorija, obsega dela in industrije.

3 DISKUSIJA DOBLJENIH REZULTATOV NA PODLAGI PRIMERJAVE

3.1 Uvod v diskusijo in pregled meritev

Pred začetkom izvajanja meritev smo preverili čistost referenčnega kosa in vseh strojev in njihovih komponent, ki jih uporabljamo za izvajanje meritev. Na strojih smo opravili tudi interno kalibracijo vsakega merilnega stroja posebej. Preverjeno je bilo tudi okolje, kjer se izvajajo meritve, zelo pomembni sta temperatura in vlaga v prostoru. Referenčni kos smo dva dni prej pripravili v prostoru, da se stabilizira.

Po končanih meritvah na stroju KMS smo referenčni kos poslali še v dva neodvisna, že akreditirana laboratorija na merjenje, in sicer Lotrič Metrology d. o. o. in Hexagon Slovenija.

Po prejetih rezultatih smo naredili analizo meritev. Ugotovljeno je bilo, da dimenzije, pomerjene pri nas, in dimenzije, pomerjene v medlaboratorijski primerjavi, ne odstopajo za več kot 1 μm . To zadošča kriterijem preverjanja za potrebe akreditiranja po ISO/IEC 17025:2017.

Kot osnovo za nadaljnje merjenje smo po navodilih akreditacijske hiše vzeli povprečje vseh meritev na stroju KMS in te dimenzije postavili kot referenčne vrednosti referenčnega kosa. Ko smo imeli določene nove vrednosti, smo nadaljevali z merjenjem še na ostalih metodah merjenja. Najprej smo pomerili na koordinatnem merilnem stroju z optiko, saj je v osnovi najbolj podoben klasičnemu stroju KMS, nadaljevali smo z metodo 3D-skeniranja in kot zadnjo izbrali metodo preverjanja z uporabo računalniške tomografije.

Cilj diskusije je ugotoviti, kakšna je razlika med dimenzijami, pomerjenimi z različnimi merilnimi postopki, in morebitne napake, ki se lahko pojavijo pri merjenju.

V prihodnje je treba biti pozoren na čistost merjencev, čistost merilnih strojev in strojne opreme, posebna pozornost je namenjena temperaturi, ki naj bo čim bolj konstantna. Merilne stroje je treba tedensko interno kalibrirati, da preprečimo morebitne napake, ki bi se pojavile ob njihovi redni uporabi.

3.2 Podrobna analiza in vrednotenje pridobljenih rezultatov po metodah

V tabeli na sliki 26 so prikazane meritve dimenzij, pomerjenih s koordinatnim merilnim strojem – KMS, povprečje katerih se jemlje v kontrolo ostalih merilnih postopkov.

Kot prikazujejo rezultati, so meritve precej ponovljive in znotraj dovoljenih odstopanj ponovljivosti in natančnosti stroja in strojne opreme.

Merjenje na koordinatnih merilnih strojih je najbolj uporabljena merilna metoda v industriji, zato je tudi najbolj primerna za izbiro kot referenčna vrednost za preverjanje ostalih merilnih metod.

DOBAVITELJ:		IDENT. ŠT. ORODJA:				KUPEC:			TOLERANCE-STANDARD		
Iskra ISD-Merilnica:		/				Slovenska Akreditacija			Splošne tolerance: 1 2 3 4		
Ident. številka izdelka:		Ime izdelka:				Risba:		Datum izdelave:	Ustvaril:		Indeks Poročila:
000262		Artefakt				sestav_artefact_cmm		24.03.2023	S2/V2		I1
Številka	Simbol:	MERA:	Enota:			1	2	3	Odobril:	Podnar	Datum:
na risbi:				+ Tol.:	- Tol.:	Izmerjene vrednosti:			Črna-OK;Modra-1		
									Opombe:		
1	∅	25	mm	+0.20	-0.20	25.023	25.022	25.023	Diameter		
2	∅	26.763	mm	+0.20	-0.20	26.782	26.781	26.782	Diameter		
3	∅	32.053	mm	+0.30	-0.30	32.069	32.069	32.069	Diameter		
4	∠	10	°	+0.50	-0.50	9.995	9.997	9.994	Kot		
5	⊥	0	mm	+0.10	-0.00	0.004	0.004	0.004	Pravokotnost na A		
6	∅	28.785	mm	+0.20	-0.20	28.777	28.779	28.777	Diameter		
7	∅	23.011	mm	+0.20	-0.20	23.025	23.027	23.025	Diameter		
8	∅	11.464	mm	+0.20	-0.20	11.485	11.487	11.485	Diameter		
9	∠	30	°	+0.50	-0.50	29.985	29.985	29.985	Kot		
10	⊥	0	mm	+0.10	-0.00	0.004	0.005	0.004	Pravokotnost na A		
11	□	0	mm	+0.10	-0.00	0.033	0.035	0.033	Ravnost		
12	∅	15	mm	+0.20	-0.20	14.964	14.964	14.964	Diameter		
13	∅	15	mm	+0.20	-0.20	15.000	15.000	15.000	Diameter		
14	///	0	mm	+0.10	-0.00	0.003	0.002	0.003	Vzporednost na A		
15	∅	10	mm	+0.20	-0.20	9.991	9.991	9.991	Diameter		
16		29.897	mm	+0.20	-0.20	29.905	29.905	29.905	Razdalja		
17		10	mm	+0.20	-0.20	10.007	10.007	10.007	Razdalja		
18	///	0	mm	+0.10	-0.00	0.007	0.007	0.007	Vzporednost na A		
19		148	mm	+0.50	-0.50	147.999	147.999	148.000	Razdalja		
20		95.3	mm	+0.30	-0.30	95.254	95.254	95.254	Razdalja		
21	R	20	mm	+1.00	-1.00	19.987	19.987	19.987	Radij		
22	R	5	mm	+0.50	-0.50	5.005	5.005	5.005	Radij		
23		14	mm	+0.20	-0.20	13.998	13.998	13.998	Razdalja		

Slika 26: Meritve – koordinatni merilni stroj

Vir: (Lastni vir)

Zaradi dveh različnih načinov merjenja na optičnem koordinatnem merilnem stroju smo rezultate razdelili na merjenje s tipalom in merjenje s kamero.

Rezultati, prikazani na sliki 27, so bili merjeni na optičnem koordinatnem merilnem stroju, merjenem s tipalom. Rezultati so izredno ponovljivi glede na referenčne vrednosti.

Samo merjenje ni pokazalo nikakršnih napak.

DOBAVITELJ:		IDENT. ŠT. ORODJA:				KUPEC:			TOLERANCE-STANDARD						
Iskra ISD-Merilnica:		/				Slovenska Akreditacija			Splošne tolerance: 1 2 3 4 Risba ISO 2768 mK						
Ident. številka izdelka:		Ime izdelka:				Risba:		Datum izdelave:	Ustvaril:		S2/V2	Indeks Poročila:			
000262		Artefakt				sestav_artefact_cmm		24.03.2023	Izvajalec:	Merilnica					
Številka		Simbol:	MERA:	Enota:	+ Tol.:		- Tol.:		1	2	3	Odobril:	Podnar	Datum:	13.06.2025
na risbi:					Izmerjene vrednosti:		Črna-OK;Modra-1		Opombe:		MS				
1	∅	25	mm	+0.20	-0.20	25.016	25.017	25.016	Diameter		OMM				
2	∅	26.763	mm	+0.20	-0.20	26.775	26.776	26.775	Diameter		OMM				
3	∅	32.053	mm	+0.30	-0.30	32.064	32.064	32.064	Diameter		OMM				
4	△	10	*	+0.50	-0.50	9.997	9.997	9.997	Kot		OMM				
5	⊥	0	mm	+0.10	-0.00	0.011	0.010	0.009	Pravokotnost na A		OMM				
6	∅	28.785	mm	+0.20	-0.20	28.785	28.785	28.785	Diameter		OMM				
7	∅	23.011	mm	+0.20	-0.20	23.034	23.033	23.032	Diameter		OMM				
8	∅	11.464	mm	+0.20	-0.20	11.493	11.492	11.491	Diameter		OMM				
9	△	30	*	+0.50	-0.50	29.987	29.988	29.988	Kot		OMM				
10	⊥	0	mm	+0.10	-0.00	0.008	0.007	0.007	Pravokotnost na A		OMM				
11	□	0	mm	+0.10	-0.00	0.018	0.018	0.018	Ravnost		OMM				
12	∅	15	mm	+0.20	-0.20	14.966	14.966	14.966	Diameter		OMM				
13	∅	15	mm	+0.20	-0.20	15.000	15.000	15.001	Diameter		OMM				
14	///	0	mm	+0.10	-0.00	0.005	0.005	0.005	Vzporednost na A		OMM				
15	∅	10	mm	+0.20	-0.20	9.992	9.992	9.992	Diameter		OMM				
16		29.897	mm	+0.20	-0.20	29.906	29.906	29.905	Razdalja		OMM				
17		10	mm	+0.20	-0.20	10.002	10.007	10.007	Razdalja		OMM				
18	///	0	mm	+0.10	-0.00	0.005	0.004	0.004	Vzporednost na A		OMM				
19		148	mm	+0.50	-0.50	148.003	148.002	148.003	Razdalja		OMM				
20		95.3	mm	+0.30	-0.30	95.258	95.257	95.256	Razdalja		OMM				
21	R	20	mm	+1.00	-1.00	19.991	19.991	19.991	Radij		OMM				
22	R	5	mm	+0.50	-0.50	5.004	5.004	5.004	Radij		OMM				
23		14	mm	+0.20	-0.20	13.998	13.998	13.999	Razdalja		OMM				

Slika 27: Meritve – optični koordinatni merilni stroj – merjenje s tipalom

Vir: (Lastni vir)

Rezultati v nadaljevanju (Slika 28) prikazujejo dimenzijske meritve na optičnem koordinatnem merilnem stroju in pri merjenju s kamero. Rezultati so pokazali možne težave pri odboju svetlobe in pri zaznavanju kamere, saj so lahko težave pri prepoznavanju robov geometrijskih elementov, ki potem vplivajo na rezultate meritev. Največja težava je bila pri dimenzijah, ki vključujejo razdalje po višini merjenja, saj lahko kamera zaradi odseva referenčnega kosa napačno prepozna površino. Vsako meritev je bilo treba pregledati in ročno preveriti elemente. Po kontroli dimenzij so bili rezultati zelo primerljivi med seboj.

DOBAVITELJ:		IDENT. ŠT. ORODJA:					KUPEC:			TOLERANCE-STANDARD						
Iskra ISD-Merilnica:		/					Slovenska Akreditacija			Splošne tolerance: 1 2 3 4 Risba ISO 2768 mK						
Ident. številka izdelka:		Ime izdelka:					Risba:		Datum izdelave:		Ustvaril:		S2/V2	Indeks Poročila:		
000262		Artefakt					sestav_artefact_cmm		24.03.2023		Izvajalec:	Merilnica				
Številka		Simbol:	MERA:	Enota:	+ Tol.:	- Tol.:	1		2		3		Odobril:	Podnar	Datum:	13.06.2025
na risbi:																
1		∅	25	mm	+0.20	-0.20	25.016		25.017		25.016		Opombe:		MS	
2		∅	26.763	mm	+0.20	-0.20							Diameter		OMM	
3		∅	32.053	mm	+0.30	-0.30							Diameter		OMM	
4		△	10	*	+0.50	-0.50							Kot		OMM	
5		⊥	0	mm	+0.10	-0.00							Pravokotnost na A		OMM	
6		∅	28.785	mm	+0.20	-0.20	28.790		28.790		28.790		Diameter		OMM	
7		∅	23.011	mm	+0.20	-0.20							Diameter		OMM	
8		∅	11.464	mm	+0.20	-0.20							Diameter		OMM	
9		△	30	*	+0.50	-0.50							Kot		OMM	
10		⊥	0	mm	+0.10	-0.00							Pravokotnost na A		OMM	
11		□	0	mm	+0.10	-0.00	0.009		0.020		0.011		Ravnost		OMM	
12		∅	15	mm	+0.20	-0.20	14.960		14.960		14.960		Diameter		OMM	
13		∅	15	mm	+0.20	-0.20							Diameter		OMM	
14		///	0	mm	+0.10	-0.00	0.008		0.011		0.017		Vzporednost na A		OMM	
15		∅	10	mm	+0.20	-0.20	9.984		9.983		9.983		Diameter		OMM	
16			29.897	mm	+0.20	-0.20	29.916		29.917		29.901		Razdalja		OMM	
17			10	mm	+0.20	-0.20	10.033		10.023		10.027		Razdalja		OMM	
18		///	0	mm	+0.10	-0.00	0.024		0.010		0.016		Vzporednost na A		OMM	
19			148	mm	+0.50	-0.50	148.007		148.007		148.007		Razdalja		OMM	
20			95.3	mm	+0.30	-0.30	95.270		95.271		95.270		Razdalja		OMM	
21		R	20	mm	+1.00	-1.00	19.982		19.981		19.981		Radij		OMM	
22		R	5	mm	+0.50	-0.50	5.003		5.003		5.003		Radij		OMM	
23			14	mm	+0.20	-0.20	13.993		13.993		13.993		Razdalja		OMM	

Meritve, izvedene s pomočjo računalniške tomografije – CT, prikazane na sliki 29, prikazujejo ponovljivost merjenja in primerljivost posameznih rezultatov, izmerjenih s pomočjo stroja CT. Pri meritvah nismo zaznavali napak.

DOBAVITELJ:		IDENT. ŠT. ORODJA:				KUPEC:			TOLERANCE-STANDARD			
Iskra ISD-Merilnica:		/				Slovenska Akreditacija			Splošne tolerance: 1 2 3 4 Risba ISO 2768 mK			
Ident. številka izdelka:		Ime izdelka:				Risba:		Datum izdelave:	Ustvaril:		S2/V2	Indeks Poročila:
000262		Artefakt				sestav_artefact_cmm		24.03.2023	Izvajalec:	Merilnica		I1
Številka	Simbol:	MERA:	Enota:	+ Tol.:	- Tol.:	1	2	3	Odobril:	Podnar	Datum:	13.06.2025
na risbi:						Izmerjene vrednosti:			Črna-OK;Modra-1			
									Opombe:			
1	∅	25	mm	+0.20	-0.20	24.993	24.993	24.993	Diameter		CT	
2	∅	26.763	mm	+0.20	-0.20	26.757	26.757	26.757	Diameter		CT	
3	∅	32.053	mm	+0.30	-0.30	32.048	32.048	32.049	Diameter		CT	
4	△	10	°	+0.50	-0.50	10.004	10.004	10.004	Kot		CT	
5	⊥	0	mm	+0.10	-0.00	0.002	0.002	0.001	Pravokotnost na A		CT	
6	∅	28.785	mm	+0.20	-0.20	28.760	28.762	28.774	Diameter		CT	
7	∅	23.011	mm	+0.20	-0.20	22.991	22.993	23.004	Diameter		CT	
8	∅	11.464	mm	+0.20	-0.20	11.451	11.454	11.465	Diameter		CT	
9	△	30	°	+0.50	-0.50	29.984	29.983	29.984	Kot		CT	
10	⊥	0	mm	+0.10	-0.00	0.006	0.002	0.002	Pravokotnost na A		CT	
11	□	0	mm	+0.10	-0.00	0.030	0.029	0.026	Ravnost		CT	
12	∅	15	mm	+0.20	-0.20	14.975	14.977	14.979	Diameter		CT	
13	∅	15	mm	+0.20	-0.20	14.975	14.977	14.979	Diameter		CT	
14	//	0	mm	+0.10	-0.00	0.005	0.005	0.005	Vzporednost na A		CT	
15	∅	10	mm	+0.20	-0.20	9.989	9.990	9.992	Diameter		CT	
16		29.897	mm	+0.20	-0.20	29.887	29.889	29.894	Razdalja		CT	
17		10	mm	+0.20	-0.20	9.995	9.997	10.001	Razdalja		CT	
18	//	0	mm	+0.10	-0.00	0.005	0.005	0.005	Vzporednost na A		CT	
19		148	mm	+0.50	-0.50	148.009	148.009	148.010	Razdalja		CT	
20		95.3	mm	+0.30	-0.30	95.260	95.260	95.261	Razdalja		CT	
21	R	20	mm	+1.00	-1.00	19.987	19.990	19.995	Radij		CT	
22	R	5	mm	+0.50	-0.50	4.993	4.992	4.993	Radij		CT	
23		14	mm	+0.20	-0.20	13.995	13.995	13.996	Razdalja		CT	

Slika 29: Meritve s pomočjo računalniške tomografije – CT

Vir: (Lastni vir)

Pri analizi meritev, izvedenih s pomočjo 3D-skenerja, meritve zelo lepo prikazujejo ponovljivost izvedenih meritev. Sam postopek ni prikazal težav z odvzemom podatkov pri merjenju s 3D-skenerjem. Sama struktura površine STL-a referenčnega kosa je bila brez vidnih napak.

DOBAVITELJ:	IDENT. ŠT. ORODJA:					KUPEC:			TOLERANCE-STANDARD			
Iskra ISD-Merilnica:	/					Slovenska Akreditacija			Splošne tolerance: ISO 2768 mK			
Ident. številka izdelka:	Ime izdelka:					Risba:		Datum izdelave:	Ustvaril:		S1/V1	Indeks Poročila:
000262	Artefakt					sestav_artefact_cmm		24.03.2023	Izvajalec:	Merilnica		I1
Številka	Simbol:	MERA:	Enota:	+ Tol.:	- Tol.:	1	2	3	Odobril:	Podnar A.	Datum:	15.06.2025
na risbi:						Izmerjene vrednosti:			Opombe:		MS	
1	∅	25	mm	+0.20	-0.20	25.018	25.023	25.014	Diameter		SCN	
2	∅	26.763	mm	+0.20	-0.20	26.790	26.789	26.781	Diameter		SCN	
3	∅	32.053	mm	+0.30	-0.30	32.071	32.090	32.081	Diameter		SCN	
4	∠	10	°	+0.50	-0.50	10.048	10.020	10.020	Kot		SCN	
5	⊥	0	mm	+0.10	-0.00	0.004	0.003	0.003	Pravokotnost na A		SCN	
6	∅	28.785	mm	+0.20	-0.20	28.796	28.753	28.759	Diameter		SCN	
7	∅	23.011	mm	+0.20	-0.20	23.012	22.999	22.993	Diameter		SCN	
8	∅	11.464	mm	+0.20	-0.20	11.478	11.457	11.462	Diameter		SCN	
9	∠	30	°	+0.50	-0.50	29.973	29.966	29.966	Kot		SCN	
10	⊥	0	mm	+0.10	-0.00	0.001	0.003	0.000	Pravokotnost na A		SCN	
11	□	0	mm	+0.10	-0.00	0.019	0.016	0.016	Ravnost		SCN	
12	∅	15	mm	+0.20	-0.20	14.962	14.959	14.969	Diameter		SCN	
13	∅	15	mm	+0.20	-0.20	15.007	14.959	14.969	Diameter		SCN	
14	//	0	mm	+0.10	-0.00	0.027	0.022	0.021	Vzporednost na A		SCN	
15	∅	10	mm	+0.20	-0.20	9.994	9.972	9.982	Diameter		SCN	
16		29.897	mm	+0.20	-0.20	29.883	29.903	29.903	Razdalja		SCN	
17		10	mm	+0.20	-0.20	9.997	10.002	10.001	Razdalja		SCN	
18	//	0	mm	+0.10	-0.00	0.013	0.013	0.012	Vzporednost na A		SCN	
19		148	mm	+0.50	-0.50	148.003	147.996	147.996	Razdalja		SCN	
20		95.3	mm	+0.30	-0.30	95.268	95.260	95.259	Razdalja		SCN	
21	R	20	mm	+1.00	-1.00	19.975	19.960	19.965	Radij		SCN	
22	R	5	mm	+0.50	-0.50	5.012	5.020	5.015	Radij		SCN	
23		14	mm	+0.20	-0.20	13.976	13.987	13.987	Razdalja		SCN	

Slika 30: Meritve – 3D-skener

Vir: (Lastni vir)

3.3 Medsebojna primerjalna analiza dobljenih rezultatov in njihova medsebojna deviacija

V nadaljevanju sledi prikaz dobljenih rezultatov medmetodne primerjave (Slika 31), kjer so prikazani rezultati povprečja meritev za posamezne metode. Kot referenca je vzeto povprečje meritev stroja KMS. Za vsako metodo posebej sta določena merilna negotovost (U) in izračun relativne napake (E_n).

Relativna napaka E_n , ki se pogosto uporablja v metrologiji ali laboratorijskih primerjavah, je formula za uspešnost ali sprejemljivost rezultata, pogosto je vezana na rezultat laboratorija, referenčno vrednost, razširjeno negotovost laboratorija in razširjeno negotovost referenčne vrednosti. ILAC G8:09/2019 (Guidelines on Decision Rules and Statements of Conformity) je osrednji dokument Mednarodne organizacije za akreditacijo laboratorijev (ILAC), kjer je enačba E_n jasno podana.

$$E_n = \frac{X_{lab} - X_{ref}}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}}$$

Kjer je:

E_n – relativna napaka,

X_{lab} – rezultat laboratorija,

X_{ref} – referenčna vrednost,

U_{lab} – razširjena negotovost laboratorija,

U_{ref} – razširjena negotovost referenčne vrednosti.

Pogoji za uspešnost:

$E_n < 1$ – rezultat je sprejemljiv.

$E_n \geq 1$ – rezultat ni sprejemljiv.

Za vse metode merjenja je bila v osnovi vzeta merilna negotovost, ki nam jo pooblašeni serviserji podajo ob letnih kalibracijah, s katerimi preverijo natančnost posameznega stroja. Pri KMS, 3D-skenerju in optičnem koordinatnem merilnem stroju kalibracijske meritve izvaja Hexagon Slovenija, za stroj CT pa podjetje Zeiss Slovenija. Podatke o vrednosti izvedenih meritev vsak izvajalec za posamezni stroj in merilno metodo poda v certifikatu meritev.

Kot je razvidno iz rezultatov, so merilne metode med seboj izredno primerljive, le pri optičnem koordinatnem merilnem stroju smo imeli pri meritvah z optiko težave z zaznavanjem kamere pri določenih dimenzijah, saj sta na meritev v neki meri vplivala refleksija referenčnega kosa in ostrenje kamere.

Ponujena rešitev je bila pri metodi merjenja z optičnim koordinatnim strojem, in sicer razširitev merilne negotovosti s 15 μm na 20 μm . Akreditacijska hiša je potrdila predlagano rešitev.

koda	opis	NOMINAL	enota	Tol +	Tol -	Optika s kamero			
						povprečje	odstopanje (μm)	U	En.
1	Diameter	$\varnothing$	25	mm	+0.05 -0.05	25.016	-6	15.0	0.40
2	Diameter	$\varnothing$	28.763	mm	+0.05 -0.05				
3	Diameter	$\varnothing$	32.053	mm	+0.05 -0.05				
4	Kot	$\angle$	10	$^{\circ}$	+0.50 -0.50				
5	Pravokotnost na A	$\perp$	0	mm	+0.05 -0.00				
6	Diameter	$\varnothing$	28.785	mm	+0.05 -0.05	28.790	12	15.0	0.78
7	Diameter	$\varnothing$	23.011	mm	+0.05 -0.05				
8	Diameter	$\varnothing$	11.464	mm	+0.05 -0.05				
9	Kot	$\angle$	30	$^{\circ}$	+0.50 -0.50				
10	Pravokotnost na A	$\perp$	0	mm	+0.05 -0.00				
11	Ravnost	$\square$	0	mm	+0.05 -0.00	0.033	-20	20.0	0.99
12	Diameter	$\varnothing$	15	mm	+0.05 -0.05	14.960	-4	20.0	0.19
13	Diameter	$\varnothing$	15	mm	+0.05 -0.05				
14	Vzporednost na A	// //	0	mm	+0.05 -0.00	0.032	9	20.0	0.45
15	Diameter	$\varnothing$	10	mm	+0.05 -0.05	9.983	-8	20.0	0.37
16	Razdalja		29.897	mm	+0.05 -0.05	29.911	6	20.0	0.31
17	Razdalja		10	mm	+0.05 -0.05	10.028	21	20.0	1.00
18	Vzporednost na A	// //	0	mm	+0.05 -0.00	0.017	10	20.0	0.47
19	Razdalja		148	mm	+0.05 -0.05	148.007	8	20.0	0.37
20	Razdalja		95.3	mm	+0.05 -0.05	95.270	16	20.0	0.79
21	Radij	R	20	mm	+0.05 -0.05	19.981	-6	20.0	0.27
22	Radij	R	5	mm	+0.05 -0.05	5.003	-2	20.0	0.10
23	Razdalja		14	mm	+0.05 -0.05	13.993	-5	20.0	0.24

Slika 32: Rezultati meritev po dvigu merilne negotovosti na optičnem koordinatnem merilnem stroju

Vir: (Lastni vir)

4 SKLEP

Za temo diplomskega dela sem si izbral tekoči projekt, ki se je odvijal v našem oddelku. V podjetju smo se odločili, da bi se oddelok merilnice akreditiral po akreditacijskem postopku ISO/IEC 17025:2017. Najprej se je bilo treba dogovoriti, katere merilne postopke bi akreditirali, in spoznati zahteve standarda. S strani Slovenske akreditacijske hiše so nam poslali zahteve postopka pridobivanja akreditacije in predloge za izvedbo meritev. Za izvajanje meritev smo potrebovali univerzalni referenčni kos, ki smo ga določili skupaj z akreditacijsko hišo in je bil izdelan v skladu z navodili Slovenske akreditacije.

Cilj je bil analizirati zastavljene štiri hipoteze in jih na podlagi dobljenih rezultatov potrditi ali ovreči.

H1: Različne merilne metode (npr. koordinatni merilni stroj, optični sistem) v strojništvu dajejo statistično značilno različne rezultate pri meritvah dimenzij kompleksnih obdelovancev.

Na podlagi zbranih meritev pri medmetodni merilni primerjavi smo hipotezo delno potrdili, saj nam rezultati meritev jasno prikazujejo, da so postopki med seboj zelo primerljivi za merjenje vseh vrst geometrijskih elementov, ki so bili izbrani za preverjanje. Težava je bila le pri merjenju z optiko na optičnem merilnem stroju.

Po analizi meritev in dvigu vrednosti merilne negotovosti pri optičnem koordinatnem merilnem stroju pa smo rešili tudi napake, ki se pojavljajo pri merjenju z optiko.

H2: Medmetodne meritve pomembno prispevajo k zagotavljanju zanesljivosti rezultatov meritev in uspešni akreditaciji preskuševalnih laboratorijev.

Hipoteza je potrjena, saj z izvedbo medmetodnih meritev laboratorij preveri, ali različne metode dajejo med seboj primerljive in ponovljive rezultate. Če so odstopanja majhna in pojasnjena, lahko trdimo, da so meritve točne in sledljive. Medmetodne meritve omogočajo oceno merilne negotovosti za posamezne metode v realnih pogojih. Na ta način se ugotovi, ali izračunane negotovosti ustrezajo dejanskemu obnašanju merilnega sistema, kar je ključno za dokazovanje kompetentnosti laboratorija. Zanesljivost rezultatov, potrjena z medmetodnimi meritvami, krepi zaupanje naročnikov, saj so podatki podprti z objektivno primerjavo metod in sledljivi do nacionalnih ali mednarodnih standardov.

H3: Medmetodne meritve razkrivajo sistemske napake, ki bi sicer ostale neopažene v notranjih kontrolah kakovosti.

Če se ne bi odločili za izvedbo kalibracije merilnega laboratorija, verjetno nikoli ne bi zares vedeli, ali je kakšna razlika med različnimi merilnimi metodami. Nekateri naši kupci namreč zahtevajo merjenje kosov po zanje sprejemljivih metodah, saj sami nimajo tako sodobne opreme za izvajanje meritev. V našem laboratoriju lahko enak izdelek preverimo po različnih merilnih metodah, ki pa morajo imeti med seboj enak končni rezultat.

Če bi izvajali posamezne meritve, bi ostala napaka optičnega merilnega stroja skrita in je med vsakodnevnimi aktivnostmi ne bi opazili.

Po primerjavi medmetodnih rezultatov lahko trdimo, da je hipoteza v celoti potrjena.

H4: Kako zagotoviti kakovost in zanesljivost rezultatov.

Kako zagotavljati kakovost in zanesljivost rezultatov, sem se spraševal kar nekaj časa. Delo merilca opravljam že kar nekaj let in so mi nekatere vsakodnevne zahteve pred izvajanjem meritev že rutina. Ko sem ponovno razmislil o pojmi kakovosti in zanesljivosti, sem se postavil v vlogo laika. Odgovor sem imel na dlani.

Kakovost in zanesljivost rezultatov v našem laboratoriju zagotavljamo s periodičnimi kalibracijami posameznih merilnih strojev interno in z enkrat letnim preverjanjem zunanjih izvajalcev po kalibracijskih postopkih preverjanja strojev, opisanih v standardih, po katerih stroji delujejo.

Na začetku postopka priprave na akreditacijski postopek po ISO/IEC 17025:2017 smo v ospredje postavili dejstvo, da dobimo slabe rezultate, in kaj storiti v primeru prevelikih odstopanj med različnimi metodami merjenja. Po izvedbi postopkov lahko trdimo, da merilni stroji dobro in kakovostno služijo svojemu namenu. Za naprej je večji poudarek na čim boljšem usposabljanju osebja, rednem pregledovanju in čiščenju merilnih strojev ter merilne opreme. Dosledno je treba preverjati stroje z internimi kalibracijskimi postopki.

V očeh naših naročnikov je kakovostno preverjanje izdelkov ključnega pomena. Po uspešno opravljeni presoji s strani akreditacijske hiše smo prestali postopek in pridobili certifikat o akreditiranju po postopku ISO/IEC 17025:2017.

5 VIRI IN LITERATURA

- Accreditation, E. (September 2013. rev01). Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration. *Publication reference*, 1–75. Pridobljeno iz <https://www.isobudgets.com/pdf/uncertainty-guides/ea-4-02-m-2013-expression-of-the-uncertainty-of-measurement-in-calibration.pdf>
- al., K. W. (2011). “Uncertainty in Multisensor Coordinate Metrology,” *CIRP Annals. Manufacturing Technology*, 60(1), 2–4. Pridobljeno iz https://www.researchgate.net/publication/257093634_Measurement_uncertainty_evaluation_of_optical_multi-sensor-measurements
- BIPM. (2020). *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)*. Pridobljeno iz https://ilac.org/latest_ilac_news/jcgm-guide-to-uncertainty-in-measurement-gum-6-published/
- Hocken, R. P. (2016). Coordinate Measuring Machines and Systems, 3rd Edition. *CRC Press*.
- ILAC-G17:01/2021. (2021). *Guidelines for Measurement Uncertainty in Testing*.
- ISO 17025:2017, I. (2017). *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*.
- Miljković, D. (2019). *Kakovost in akreditacija laboratorijev*. Fakulteta za strojništvo.
- SIQ. (2023). *Navodila za pripravo laboratorija na postopek akreditacije*.
- T. Tóth in J. Živčák, A. (2014). A Comparison of the Outputs of 3D Scanners. *Procedia Engineering*, 69, 393–401. Pridobljeno iz https://www.researchgate.net/publication/270917467_A_Comparison_of_the_Outputs_of_3D_Scanners
- Wenig, P. K. (2006). Examination of the measurement uncertainty on dimensional measurements by X-ray computed tomography. *ECNDT, We.3.3.1*, 2–10. Pridobljeno iz <https://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/We.3.3.1.pdf>
- Željko, M. (2021). *Metrologija v industrijskem okolju*. Tehniška založba Slovenije.