



# Teorijske osnove mjeriteljstva





## Sadržaj

1.	Uvod.....	3
2.	Osnovni pojmovi u mjeriteljstvu.....	3
2.1.	Međunarodni sustav mjernih jedinica (SI) ( <i>Le System International d’Unites</i> ).....	4
2.1.1.	Definicije osnovnih SI jedinica .....	6
2.1.2.	Pisanje naziva i znakova jedinica i veličina .....	8
2.2.	Mjerne pogreške .....	10
2.3.	Mjerne metode.....	14
2.4.	Mjerna nesigurnost .....	15
3.	Koordinatno mjeriteljstvo .....	15
3.1.	Sustav tolerancija duljinskih mjera i dosjeda .....	16
3.2.	Teorijske osnove tolerancija oblika i položaja GD&T .....	18
3.2.1.	Sustav tolerancija oblika i položaja .....	18
3.3.	Trokoordinatni mjerni uređaji TMU ( <i>Coordinate Measuring Machine – CMM</i> ).....	30
3.3.1.	Princip mjerenja.....	31
3.3.2.	Postupak mjerenja.....	33
3.3.3.	Izvori pogrešaka .....	35
3.3.4.	Mjerenje trokoordinatnim mjernim uređajem – primjer iz prakse .....	37
3.4.	Optički 3D digitalizatori (skeneri).....	40
3.4.1.	Princip rada optičkih 3D digitalizatora.....	41
3.4.2.	Mjerenje optičkim digitalizatorom – primjer iz prakse .....	42
	Literatura .....	49
	Kazalo slika .....	51
	Kazalo tablica .....	53
	Popis ključnih pojmova .....	54
	Impresum.....	55



# 1. Uvod

Mjeriteljstvo (metrologija) engl. *Metrology*, znanost je o mjerenju i njegovoj primjeni. Mjeriteljstvo se bavi različitim aspektima mjerenja, uključujući definiranje mjernih jedinica, razvoj etalona, umjeravanje mjernih instrumenata, osiguravanje točnih i preciznih mjerenja odnosno osiguravanje kvalitete i pouzdanosti rezultata mjerenja. Mjeriteljstvo se razvijalo tijekom vremena zahvaljujući razvoju znanosti i tehnologije. Razvijale su se i tehnike mjerenja i sustavi mjernih jedinica s jedne strane, a s druge strane mjeriteljstvo postaje temelj znanstvenih i tehničkih spoznaja, jer povećanje kvalitete rezultata mjerenja pridonosi razumijevanju i primjeni znanja. Od mjeriteljstva se očekuje da bude korak ispred ili barem na razini razvoja ostalih područja znanosti i tehnologije jer su točna i precizna mjerenja jedan od preduvjeta za stalni znanstveni i tehnološki napredak.

Mjeriteljstvo ima posebno značajnu ulogu u područjima gdje su točnost i preciznost rezultata mjerenja od bitnog značaja. Točna i precizna mjerenja ključna su za osiguravanje kvalitete proizvoda, a u nekim područjima točna mjerenja su ključna i za osiguravanje njihove sigurnosti. Cilj mjeriteljstva je praćenje i kontrola različitih parametara proizvodnog procesa, povećanje učinkovitosti tih procesa, međunarodna usklađenost proizvoda i, u konačnici, zadovoljstvo kupca.

## 2. Osnovni pojmovi u mjeriteljstvu

Da bi se osiguralo razumijevanje, nedvosmisleno tumačenje, dosljednost i međunarodna usklađenost mjeriteljskih pojmova, definicije u mjeriteljstvu često su standardizirane putem zakona, normi, vodiča i drugih preporuka. Norme pružaju zajednički okvir za postizanje konzistentnih i pouzdanih rezultata mjerenja, te potiču suradnju i usklađivanje na globalnoj razini.

Definicije osnovnih mjeriteljskih pojmova dane su u nastavku.

**Mjerenje** (engl. *Measurement*) je proces eksperimentalnoga dobivanja jedne ili više vrijednosti veličine koje joj se mogu razumno pripisati.

**Rezultat mjerenja** (engl. *Measurement result*) je skup vrijednosti veličine koje se pripisuju mjerenoj veličini zajedno sa svim ostalim dostupnim bitnim podacima.

Napomena: Mjerni se rezultat općenito izražava jednom vrijednošću mjerene veličine i mjernom nesigurnošću. Mjerni rezultat se može pokazati i u obliku funkcije gustoće vjerojatnosti.

**Mjerna nesigurnost** (engl. *Measurement uncertainty*) je parametar pridružen rezultatu mjerenja koji opisuje rasipanje vrijednosti koje bi se razumno moglo pripisati mjerenoj veličini. Riječ "nesigurnost" znači sumnju i, prema tome u najširem smislu "mjerna nesigurnost" znači sumnju u valjanost mjernog rezultata. Mjerna nesigurnost je parametar koji opisuje kvalitetu rezultata mjerenja.

**Mjerni etalon** (engl. *Measurement standard*) je ostvarenje definicije dane veličine, s iskazanom

vrijednošću veličine i mjernom nesigurnošću, koja se upotrebljava kao referencija.

**Umjeravanje** (engl. *Calibration*) je skup postupaka kojima se u određenim uvjetima uspostavlja odnos između vrijednosti veličina koje pokazuje neko mjerilo ili mjerni sustav ili vrijednosti koje pokazuje neka materijalizirana mjera ili neka referencijska tvar i odgovarajućih vrijednosti ostvarenih etalonima.

**Sljedivost** (engl. *Traceability*)

Svojstvo mjernog rezultata ili vrijednosti nekog etalona po kojemu se on može dovesti u vezu s navedenim referencijskim etalonima (obično državnim ili međunarodnim) neprekinutim lancem usporedaba koje imaju utvrđene mjerne nesigurnosti.

### **Pojmovi vezani uz mjerila i mjerne instrumente**

**Nazivno područje** (engl. *Nominal range*) je područje pokazivanja koje se obično izražava svojom donjom i gornjom granicom.

**Nazivna vrijednost** (engl. *Nominal value*) je zaokružena približna vrijednost značajke mjerila, a služi kao uputa za njegovu upotrebu (planparalelna granična mjerka 100 mm).

**Mjerno područje** (engl. *Measuring range*) je skup vrijednosti mjerenih veličina za koje se pogreška mjerila mora nalaziti unutar navedenih granica.

**Rezolucija** (engl. *Resolution*) je najmanja razlika između pokazivanja pokaznog uređaja koja se može jasno definirati.

**Točnost mjerila** (engl. *Accuracy*) je sposobnost mjerila da daje odzive bliske referentnoj vrijednosti.

**Pogreška (pokazivanja) mjerila** (engl. *Error*) je pokazivanje mjerila koje je oduzeto od referentne vrijednosti odgovarajuće ulazne veličine.

**Granična pogreška MPE** (engl. *Maximum permissible error*) je krajnja vrijednost pogreške dopuštene specifikacijama i ostalim propisima koji se odnose na određeno mjerilo.

Definicije mjeriteljskih pojmova preuzete su iz važećih ISO i JCGM normi navedenih u popisu literature.

## 2.1. Međunarodni sustav mjernih jedinica (SI) (*Le System International d'Unites*)

U Republici Hrvatskoj primjenjuju se mjerne jedinice Međunarodnog sustava jedinica (SI), decimalni višekratnici i nižekratnici mjernih jedinica, iznimno dopuštene jedinice izvan SI i složene mjerne jedinice. <https://www.bipm.org/documents/20126/41483022/SI-Brochure-9-EN.pdf>

Zakonite mjerne jedinice u Republici Hrvatskoj uređuje:

- Zakon o mjeriteljstvu (Narodne novine NN 74/14, 111/18, 114/22).  
<https://www.zakon.hr/z/699/Zakon-o-mjeriteljstvu>
- Pravilnik o mjernim jedinicama (NN 88/15).  
[https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2015\\_08\\_88\\_1737.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2015_08_88_1737.html)
- Pravilnik o izmjenama Pravilnika o mjernim jedinicama (NN 16/20).  
[https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2020\\_02\\_16\\_396.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2020_02_16_396.html)

Međunarodni sustav jedinica (SI) temelji se na sedam osnovnih mjernih jedinica. Nazivi i znakovi osnovnih SI jedinica i veličina prikazani su u tablici 1.

Veličina		SI jedinica	
Naziv	Znak	Naziv	Znak
duljina	$L, l, x, r$	metar	m
masa	$m$	kilogram	kg
vrijeme	$t$	sekunda	s
električna struja	$I, i$	amper	A
termodinamička temperatura	$T$	kelvin	K
količina tvari	$n$	mol	mol
svjetlosna jakost	$I_v$	kandela	cd

Tablica 1. Osnovne SI jedinice

Napomena:

Decimalne jedinice za masu ne tvore se od kilograma, nego od grama. Znakovi jedinica pišu se uspravnim pismom, a znakovi veličina pišu se kosim pismom.

Od 20. svibnja 2019. godine (Svjetski dan mjeriteljstva) primjenjuju se nove definicije za četiri od sedam osnovnih jedinica SI: kilogram, amper, kelvin i mol. Definicije se temelje na fiksnim numeričkim vrijednostima odgovarajućih konstanti. Numeričke vrijednosti konstanti prikazane su u tablici 2.

Osnovna mjerna jedinica	Konstanta	Simbol	Vrijednost	Jedinica
kg	Planckova konst.	$h$	$6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$	J s
A	Elementarni naboj	$e$	$1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$	C
K	Boltzmannova konst.	$k$	$1,380\ 649 \times 10^{-23}$	J K <sup>-1</sup>
mol	Avogadrova konst.	$N_A$	$6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$	mol <sup>-1</sup>
s	Frekvencija prijelaznih hiperfinih razina osnovnog stanja atoma <sup>133</sup> Cs	$\Delta\nu_{Cs}$	9 192 631 770	Hz
Cd	Svjetlosna učinkovitost	$K_{cd}$	683	Lm W <sup>-1</sup>
m	Brzina svjetlosti u vakuumu	$c$	299 792 458	m s <sup>-1</sup>

Tablica 2. Numeričke vrijednosti konstanti

### 2.1.1. Definicije osnovnih SI jedinica

#### Jedinica vremena

Sekunda, simbol s, je SI jedinica vremena. Definira se tako da se uzme da fiksna brojčana vrijednost frekvencije cezija  $\Delta\nu_{Cs}$ , frekvencije hiperfine tranzicije neperturbiranog osnovnog stanja atoma cezija 133, iznosi 9 192 631 770 kada je izražena u jedinici Hz, koja je jednaka jedinici s<sup>-1</sup>.

#### Jedinica duljine

Metar, simbol m, je SI jedinica duljine. Definira se tako da se uzme da fiksna brojčana vrijednost brzine svjetlosti u vakuumu  $c$  iznosi 299 792 458 kada je izražena u jedinici m/s, pri čemu se sekunda definira na temelju vrijednosti  $\Delta\nu_{Cs}$ .

#### Jedinica mase

Kilogram, simbol kg, je SI jedinica mase. Definira se tako da se uzme da fiksna brojčana vrijednost Planckove konstante  $h$  iznosi  $6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$  kada je izražena u jedinici J s, koja je jednaka jedinici kg m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>, pri čemu se metar i sekunda definiraju na temelju vrijednosti  $c$  i  $\Delta\nu_{Cs}$ .

#### Jedinica električne struje

Amper, simbol A, je SI jedinica električne struje. Definira se tako da se uzme da fiksna brojčana vrijednost elementarnog naboja  $e$  iznosi  $1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$  kada je izražena u jedinici C, koja je jednaka jedinici A s, pri čemu se sekunda definira na temelju vrijednosti  $\Delta\nu_{Cs}$ .

#### Jedinica termodinamičke temperature

Kelvin, simbol K, je SI jedinica termodinamičke temperature. Definira se tako da se uzme da fiksna

brojčana vrijednost Boltzmannove konstante  $k$  iznosi  $1,380\ 649 \times 10^{-23}$  kada je izražena u jedinici  $\text{J K}^{-1}$ , koja je jednaka jedinici  $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$ , pri čemu se kilogram, metar i sekunda definiraju na temelju vrijednosti  $h$ ,  $c$  i  $\Delta\nu_{Cs}$ .

### Jedinica množine (količine tvari)

Mol, simbol mol, je SI jedinica množine (količine tvari). Jedan mol sadrži točno  $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$  elementarnih jedinki. Taj je broj fiksna brojčana vrijednost Avogadrove konstante,  $N_A$ , kada je izražena u jedinici  $\text{mol}^{-1}$  i naziva se Avogadrov broj.

Količina tvari u sustavu, simbol  $n$ , je mjera broja pojedinačno navedenih elementarnih jedinki. Elementarna jedinka može biti atom, molekula, ion, elektron, druga čestica ili druga pojedinačno navedena skupina čestica.

### Jedinica svjetlosne jakosti

Kandela, simbol cd, je SI jedinica svjetlosne jakosti u danom smjeru. Definira se tako da se uzme da fiksna brojčana vrijednost svjetlosne učinkovitosti monokromatskog zračenja frekvencije  $540 \times 10^{12}$  Hz,  $K_{cd}$ , iznosi 683 kada je izražena u jedinici  $\text{lm W}^{-1}$ , koja je jednaka jedinici  $\text{cd sr W}^{-1}$  ili  $\text{cd sr kg}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^3$ , pri čemu se kilogram, metar i sekunda definiraju na temelju vrijednosti  $h$ ,  $c$  i  $\Delta\nu_{Cs}$ .

Predmetci za tvorbu decimalnih jedinica prikazani su u tablici 3.

Faktor	Predmetak	Znak	Faktor	Predmetak	Znak
$10^{30}$	quetta	Q	$10^{-30}$	quecto	q
$10^{27}$	ronna	R	$10^{-27}$	ronto	r
$10^{24}$	jota	Y	$10^{-24}$	jokto	y
$10^{18}$	eksa	E	$10^{-18}$	ato	a
$10^{15}$	peta	P	$10^{-15}$	femto	f
$10^{12}$	tera	T	$10^{-12}$	piko	p
$10^9$	giga	G	$10^{-9}$	nano	n
$10^6$	mega	M	$10^{-6}$	mikro	$\mu$
$10^3$	kilo	k	$10^{-3}$	mili	m
$10^2$	hekto	h	$10^{-2}$	centi	c
$10^1$	deka	da	$10^{-1}$	deci	d

Tablica 3. Predmetci za tvorbu decimalnih jedinica

Vrijednosti, nazivi i znakovi binarnih predmetaka za tvorbu binarnih informatičkih jedinica prikazani su u tablici 4.

Vrijednost binarnog predmetka	Naziv	Znak
$2^{10} = 1,024 \times 10^3$	kibi	Ki
$2^{20} = 1,048\,576 \times 10^6$	mebi	Mi
$2^{30} = 1,073\,741\,824 \times 10^9$	gibi	Gi
$2^{40} = 1,099\,511\,6278 \times 10^{12}$	tebi	Ti
$2^{50} = 1,125\,899\,9068 \times 10^{15}$	pebi	Pi
$2^{60} = 1,152\,921\,5046 \times 10^{18}$	exbi	Ei
$2^{70} = 1,180\,591\,6207 \times 10^{21}$	zebi	Zi
$2^{80} = 1,208\,925\,8196 \times 10^{24}$	yobi	Yi

Tablica 4. Vrijednosti, nazivi i znakovi binarnih predmetaka za tvorbu informatičkih jedinica

Napomena: Predmetci su potencije broja 10 (a ne npr. potencije broja 2). Primjer: jedan kilobit predstavlja 1000 bita, a ne 1024 bita.

Osim osnovnih SI jedinica u okviru SI sustava koriste se:

- Izvedene jedinice SI s posebnim nazivima i znakovima.
- Jedinice izvan SI koje se upotrebljavaju s Međunarodnim sustavom jedinica.
- Jedinice i nazivi jedinica koje su dopuštene samo u posebnim područjima.

( <https://www.bipm.org/documents/20126/41483022/SI-Brochure-9-EN.pdf>)

## 2.1.2. Pisanje naziva i znakova jedinica i veličina

**Znakovi jedinica** se pišu uspravnim pismom.

m,            s,            Pa,            Ω,            L ili l  
metar    sekunda    paskal    om    litra

**Predmetak** je dio jedinice koji se stavlja ispred znaka jedinice bez odvajanja.

nm            cm            dag            mK            dL  
nanometar    centimetar    dekagram    milikelvin    decilitar

**Nazivi i znakovi predmetaka koji odgovaraju potencijama:**

$2^{10}$              $2^{20}$              $2^{30}$              $2^{40}$              $2^{50}$              $2^{60}$   
kibi (Ki)    mebi (Mi)    gibi (Gi)    tebi (Ti)    pebi (Pi)    eksbi (Ei)

Primjer: 1 KiB = 1024 B



Jedan kibibajt = 1024 bajta

Množenje znakova jedinica se mora označiti razmakom ili točkom (·) na polovini visine slova.

N m ili N · m                      m s ili m · s  
Njutnmetar      umnožak metra i sekunde

Dijeljenje znakova jedinica označava se vodoravnom crtom, kosom crtom (/) ili negativnim eksponentom.

m/s    ili     $\frac{m}{s}$     ili    m s<sup>-1</sup>  
metar u sekundi

Primjer: J = kg m<sup>2</sup> s<sup>-2</sup>

Znakovi veličina pišu se kosim pismom (kurzivom).

<i>L, l, x, r</i>	<i>m</i>	<i>A</i>	<i>n</i>
duljina	masa	ploština	količina tvari

Kad se znakovi veličina množe ili dijele, može se upotrebljavati bilo koja od sljedećih metoda:

$ab, a b, a \cdot b, a \times b, a/b, \frac{a}{b}, ab^{-1}$

Kad se brojevi množe treba se upotrebljavati samo znak množenja × .

25 × 60,5; 2,3 × 10<sup>-6</sup>

Kad se vrijednosti veličina množe, treba se upotrebljavati znak množenja × ili zagrade.

(53 m/s) × 10,2 s ili (53 m/s)(10,2 s)

Znak računskih postupaka ili znak jednakosti treba pisati s razmakom ispred i iza njega.

$\Delta L = a + b \cdot L$   
 $F = ma$  ili  $F = m \cdot a$  ili  $F = m \times a$  ili  $F = m a$

**Zadaci za vježbu** – Točni odgovori su podebljani

1. Na koliko je osnovnih veličina utemeljen Međunarodni sustav jedinica SI?
  - a) šest
  - b) osam
  - c) sedam**
2. Koja od veličina nije osnovna veličina prema Međunarodnom sustavu jedinica SI?
  - a) količina tvari
  - b) gustoća**
  - c) jakost svjetlosti
3. Što je ispravno napisano?
  - a) miligram**
  - b) mili-gram
4. Što je ispravno napisano?
  - a)  $t = 30,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$**
  - b)  $t = 30,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$
  - c)  $t = 30,2^{\circ} \text{C}$
5. Znakovi veličina pišu se kurzivom.
  - a) da**
  - b) ne
6. Što je ispravno napisano?
  - a)  $25 \times 60,5$**
  - b)  $25 \cdot 60,5$
7. Osnovna jedinica za vrijeme je t.
  - a) da
  - b) ne**
8. Objasnite razliku između zapisa jedinica: ms i m s.  
**ms – milisekunda**  
**m s – metar puta sekunda**
9. Objasnite razliku između zapisa jedinica: kB i KiB.  
**kB – kilobajt (1000 bajta)**  
**KiB – kibibajt (1024 bajta)**
10. Sukladno SI sustavu objasnite razliku između oznaka: t i *t*.  
**t – mjerna jedinica tona**  
***t* – oznaka za vrijeme**

## 2.2. Mjerne pogreške

Cilj mjerenja je što točnije odrediti vrijednost veličine koja se mjeri. Poznato je da izmjerena vrijednost gotovo nikada nije prava vrijednost. Razlog je u tome što se prilikom svakog mjerenja događaju pogreške. Razlozi za pogreške mogu biti različiti: od neispravnog mjernog instrumenta, utjecaj okoline u kojoj se mjeri veličina, pogrešno očitavanje s mjernog uređaja, nekompetentnosti mjeritelja i sl.

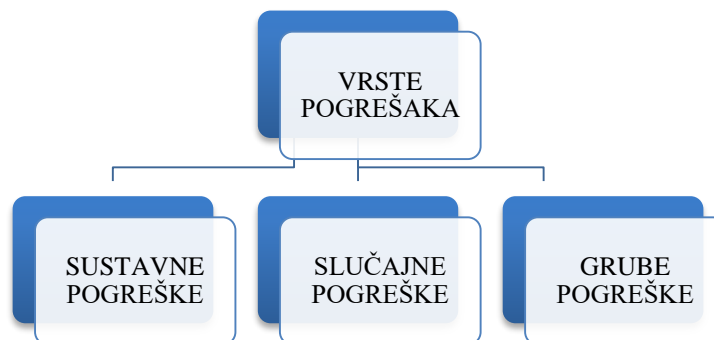
Pogreška se definira kao razlika između izmjerene vrijednosti veličine i referentne vrijednosti veličine. Drugim riječima pogreška je definirana kao:

$$\text{POGREŠKA} = \text{POGREŠNO} - \text{TOČNO}$$

$$\text{Pogreška} = \text{izmjereno} - \text{referentna vrijednost}$$

pri čemu je referentna vrijednost izmjerena vrijednost veličine nekoga mjernog etalona zanemarive mjerne nesigurnosti ili dogovorena vrijednost veličine.

Pogreške se prema uzroku nastajanja dijele na sustavne, slučajne i grube pogreške.



Slika 1. Vrste pogrešaka

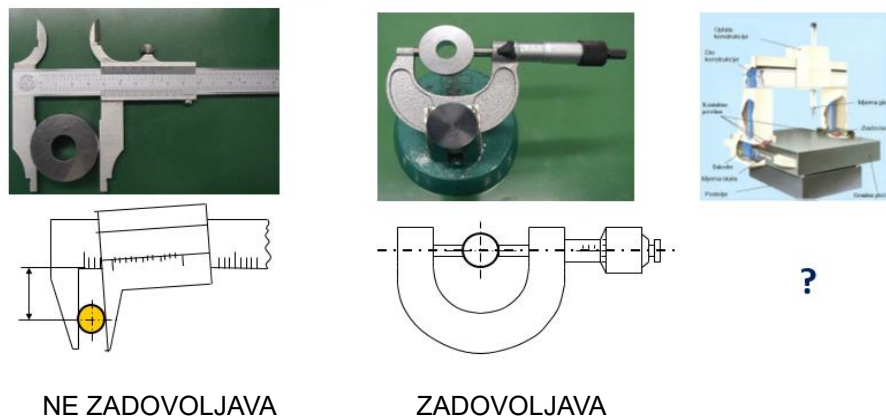
**Sustavne pogreške** su mjerne pogreške koje u tijeku ponovljenim mjerenja iste veličine ostaju stabilne ili se mijenjaju na predvidljiv način. Nastaju kao posljedica neodgovarajuće metode mjerenja, loše konstrukcije, deformacija i istrošenosti mjernih uređaja. Sustavne pogreške dovode do netočnosti rezultata mjerenja.

Primjer sustavne pogreške je Abbeova pogreška (pogreška prvog reda). Abbeova pogreška se javlja kada tijekom mjerenja nije zadovoljen Abbeov princip mjerenja.

### Abbeov princip mjerenja

Kako bi se uklonila pogreška prvoga reda, predmet mjerenja se treba nalaziti u produžetku mjerne skale. Abbeov princip mjerenja je zadovoljen kod mjerenja mikrometrom, dok kod mjerenja pomičnim mjerilom Abbeov princip nije zadovoljen.

## ABBEOV PRINCIP MJERENJA (Abbeova pogreška)



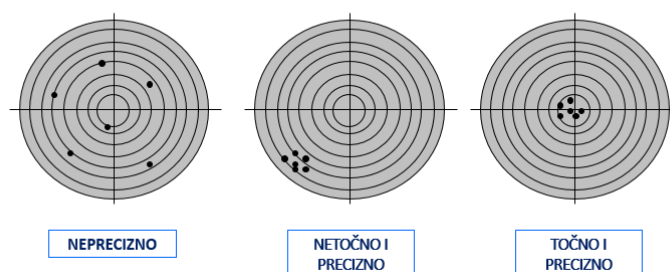
Slika 2. Abbeov princip mjerenja (Abbeova pogreška)

**Slučajne pogreške** su mjerne pogreške koje se tijekom ponovljenih mjerenja iste veličine mijenjaju na nepredvidljiv način. Uzroci slučajnih pogrešaka su nesavršenost uređaja i osjetila, promjenjivost okolišnih uvjeta, neiskustvo i sl. U literaturi ih je moguće naći i pod izrazom neodredljive pogreške. Takve pogreške, kao što i sam naziv govori, ne mogu se prepoznati ni odrediti pa se iz istih razloga ne mogu ni otkloniti. Slučajne pogreške dovode do nepreciznosti rezultata mjerenja.

**Grube pogreške** su pogreške koje svojim iznosom značajno odstupaju od ostalih rezultata. One nastaju nepažnjom mjeritelja, primjenom neodgovarajuće mjerne opreme ili neodgovarajuće metode mjerenja, korištenjem neispravnog mjernog instrumenta i dr. Rezultate mjerenja koji sadrže grube pogreške najčešće je moguće lako uočiti i izbaciti iz analize. U graničnim slučajevima kada je teško razlučiti radi li se o gruboj pogrešci ili rezultat mjerenja pripada mjernom nizu potrebno je koristiti statističke testove na osnovi kojih su definirani kriteriji za određivanje grube pogreške. Najčešće korišteni testovi su: 3s test, Grubbsov test i Dixonov test.

Točnost i preciznost su značajni termini u mjeriteljstvu i najčešće se javljaju zajedno. Točnost i preciznost, odnosno netočnost i nepreciznost grafički su prikazani na slici 3.

## Točnost i preciznost

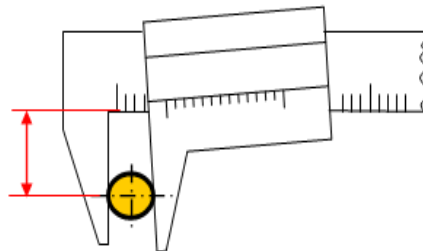


Slika 3. Točnost i preciznost

Nema smisla govoriti o točnosti u slučaju loše preciznosti!

**Zadaci za vježbu** – Točni odgovori su podebljani.

- Što predstavlja razlika između rezultata mjerenja i referentne vrijednosti?
  - a) sustavni pomak**
  - b) ponovljivost rezultata mjerenja
  - c) obnovljivost rezultata mjerenja
- Sustavna pogreška u tijeku niza mjerenja iste veličine:
  - a) ostaje stabilna i ne mijenja se
  - b) ostaje stabilna ili se mijenja na predvidiv način**
  - c) mijenja se na nepredvidiv način
- Slučajna pogreška u tijeku niza mjerenja iste veličine:
  - a) ostaje stabilna i ne mijenja se
  - b) ostaje stabilna ili se mijenja na predvidiv način
  - c) mijenja se na nepredvidiv način**
- Mjerenje se provodi pomičnim mjerilom kako je prikazano na slici. Je li zadovoljen Abbeov princip mjerenja?
  - a) da
  - b) ne**



- Koliko iznosi pogreška mjerenja ako je izmjerena vrijednost 20,005 mm, a vrijednost referentnog etalona 20,0010 mm?
  - a) 0,005 mm
  - b) – 0,006 mm
  - c) 0,004 mm**
  - d) – 0,004 mm
- Kakvo vrijeme pokazuje precizan sat?

**Precizan sat pokazuje točno vrijeme ili vrijeme s konstantnom pogreškom.**

## 2.3. Mjerne metode

Mjerne metode se mogu podijeliti na izravne (direktne), usporedbene (diferencijske) i posredne s obzirom na to kako se određuju vrijednosti mjerene veličine. Metoda u kojoj se vrijednost mjerene veličine određuje izravno, bez mjerenja drugih veličina funkcijski povezanih s mjernom veličinom naziva se izravna ili direktna mjerna metoda. Metoda u kojoj se mjerena veličina uspoređuje s istovrsnom veličinom poznate vrijednosti, malo različitom od mjerene veličine, a mjeri se razlika između tih dviju vrijednosti, naziva se diferencijska ili usporedbena metoda. Metoda u kojoj se vrijednost mjerene veličine određuje mjerenjem drugih veličina koje su s njom funkcijski povezane, naziva se posredna mjerna metoda. Primjeri izravne mjerne metode su mjerenja mikrometrom, i pomičnim mjerilom, a primjer mjerenja usporedbenom metodom umjeravanje etalona duljine primjenom komparatora.

S obzirom na način određivanja mjerne točke, poznajemo aktivne i pasivne mjerne metode. Ako dolazi do kontakta mjernog instrumenta i predmeta mjerenja radi se o aktivnoj mjernoj metodi. Pri tome kontakt može biti ostvaren između mjernog ticala i predmeta mjerenja ili nekog oblika energije kao što su projicirano svjetlo, infracrvene zrake, rendgenske zrake i predmeta mjerenja. Kod primjene pasivnih mjernih metoda mjerni instrument ne ostvaruje kontakt s mjernom površinom, a informacije o položaju mjerne točke se dobivaju snimanjem predmeta mjerenja s pomoću kamera. Pasivne mjerne metode ne zahtijevaju dodatni vanjski izvor energije za definiciju položaja mjerne točke, ali se služe oznakama na površini mjenog predmeta. Primjer aktivne mjerne metode su mjerenja koordinatnim mjernim uređajem (slike 4.a i 4.b), primjer pasivne mjerne metode je optički mjerni sustav TRITOP, ARAMIS, PONTOS (slika 5).



Slika 4. Primjer mjernih uređaja temeljenih na aktivnoj mjernoj metodi: a) TMU Erowa, b) 3D digitalizator ATOS

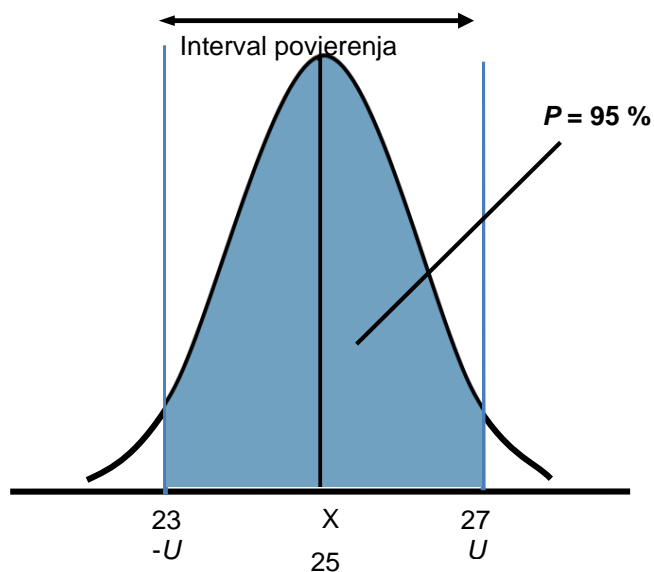


Slika 5. Primjeri pasivnih optičkih mjernih sustava (TRITOP, ARAMIS, PONTOS)

## 2.4. Mjerna nesigurnost

MJERNA NESIGURNOST je definirana kao parametar pridružen rezultatu mjerenja koji opisuje rasipanje vrijednosti koje bi se razumno moglo pripisati mjerenoj veličini. Potpuna mjeriteljska informacija koja uključuje rezultat mjerenja i mjernu nesigurnost grafički je prikazana na slici 6.

Rezultat mjerenja:  $d = 25 \mu\text{m}$   
 Proširena mjerna nesigurnost:  $U = 2 \mu\text{m}, k = 2, P = 95 \%$



Slika 6. Potpuna mjeriteljska informacija

Uz pretpostavku normalne raspodjele rezultata mjerenja proširena mjerna nesigurnost  $U$  i faktor proširenja  $k = 2$  određuju interval koji ima razinu povjerenja od približno 95 %. Drugim riječima očekuje se da interval od (23 – 27)  $\mu\text{m}$  obuhvaća 95 % vrijednosti.

## 3. Koordinatno mjeriteljstvo

Koordinatno mjeriteljstvo je područje koje potječe iz mjeriteljstva geometrijskih značajki. Koordinatno mjeriteljstvo podrazumijeva provođenje mjerenja i trodimenzionalno snimanje geometrijskih objekata primjenom koordinatnih mjernih uređaja CMM (engl. *Coordinate Measuring Machine*). Koordinatnim mjernim uređajem CMM provode se mjerenja koordinata u prostoru na površini mjernog predmeta. Koordinatnim mjerenjima se određuju dimenzije, oblici i položaji objekta (predmeta mjerenja) u trodimenzionalnom prostoru korištenjem koordinatnog sustava. Primjena koordinatnih mjerenja je donijela znatne promjene na području dimenzijskog mjeriteljstva. Umjesto mjerenja dimenzija pomoću udaljenosti dviju točaka koordinatna mjerenja registriraju koordinate točaka uzorkovane s mjerne površine, pružajući tako sveobuhvatne informacije o geometriji predmeta mjerenja. Izlaz iz procesa mjerenja je skup koordinata površinskih točaka predmeta, čijom analizom se mogu promatrati detalji površinskog oblika, procjena karakteristika geometrijskih elemenata (veličine i udaljenosti) i njihova odstupanja od nazivnih vrijednosti. CMM je danas najčešća metoda za mjerenje i provjeru dimenzijskih i GD&T tolerancija.

GD&T – tolerancije oblika i položaja (engl. *Geometric Dimensioning and Tolerancing*).

### 3.1. Sustav tolerancija duljinskih mjera i dosjeda

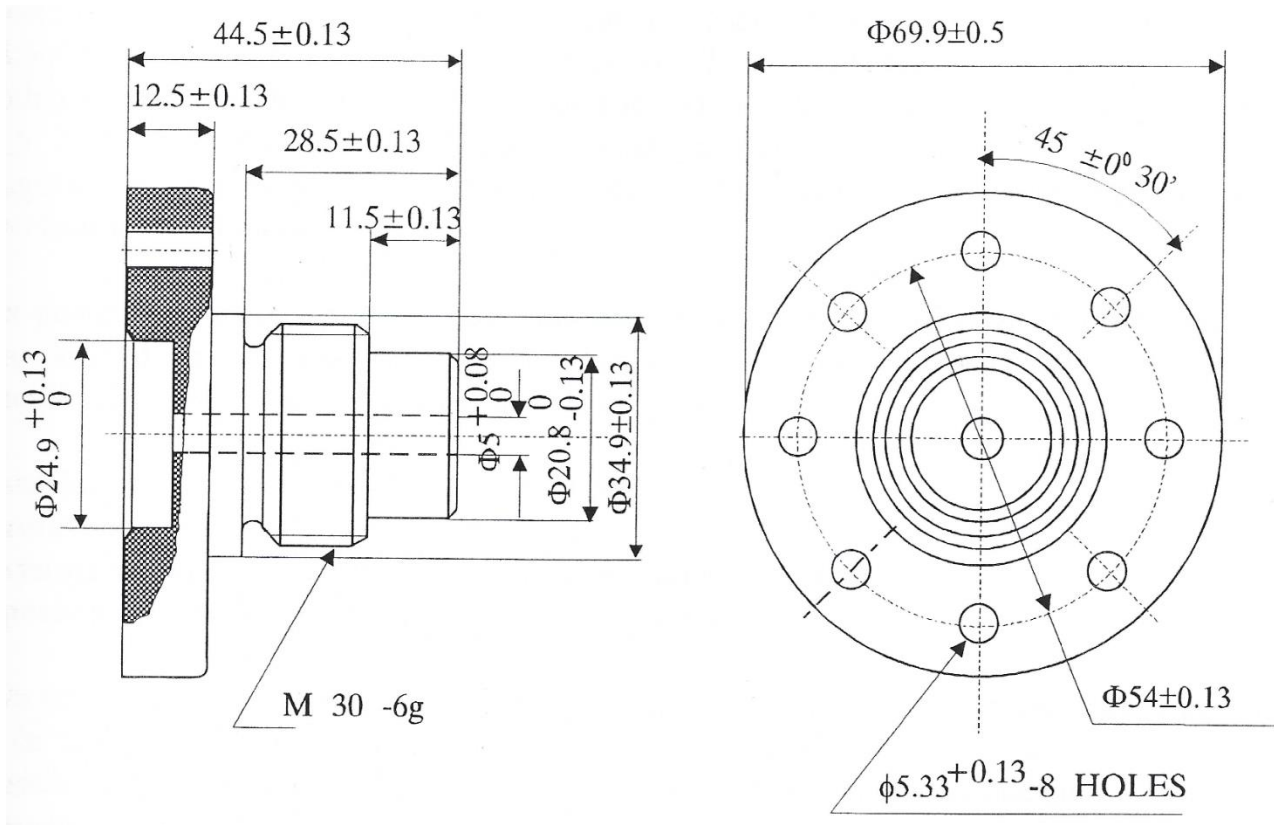
Sustav duljinskih mjera i dosjeda definiran je normom ISO 286-2:2010.

Primjer radnog komada (spojnica) dimenzioniran u sustavu tolerancija duljinskih mjera prikazan je na slici 7 a spoj kućišta, osovine i spojnice na slici 8. Konstruktor je naveo zahtjeve za radni komad, a od proizvođača se očekuje razumijevanje postavljenih zahtjeva i izrada sukladnog proizvoda.

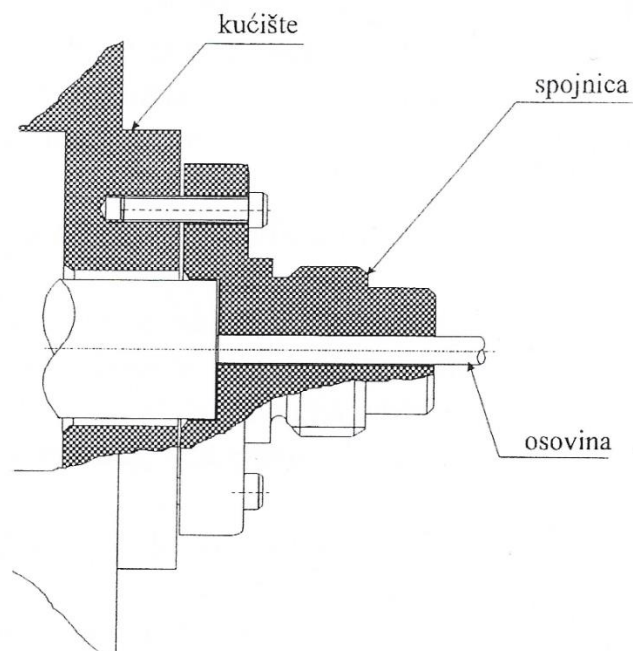
Analizom crteža prikazanog na slici 7. može se uočiti da se većina dimenzija i tolerancija odnosi na *veličinu značajke* spojnice. Svakom dimenzijom i pripadajućom tolerancijom utvrđene su granice unutar kojih se treba nalaziti značajka.

Otkrivanje pogrešaka značajki u ovako dimenzioniranom sustav značajno će ovisiti o primijenjenoj metodi mjerenja. Ako na primjer, promjer  $\phi 20,8$  ima izbočinu koja se nalazi izvan granice cilindričnosti, mjerenjem promjera (dijametralno) pomoću mikrometra, pogreška bi se mogla previdjeti jer je na inom presjeku promjer unutar tolerancija. Kada bi se kontrola provodila pomoću mjernog prstena izbočina bi se otkrila, a komad odbacio. Ovakvi slučajevi jasno pokazuju da je važno znati funkciju komada i povezanost njegovih značajki.





Slika 7. Spojnica dimenzionirana u sustavu tolerancija duljinskih mjera i dosjeda



Slika 8. Spoj kućišta osovine i spojnice

Moguće je postaviti pitanje međudnosa ili položaja provrta promjera  $\phi 24,9$ ;  $\phi 5$ ;  $\phi 20,8$ ; itd.

Svi promjeri se na crtežu nalaze na istoj osi. Očekuje li se savršena izrada njihovog odnosa ili bi njihov međuodnos trebalo tolerirati? Može se zaključiti da tolerancije veličina kontroliraju samo dimenzije dok funkcija nekog komada i povezanost njegovih značajki nisu obuhvaćene sustavom tolerancija duljinskih mjera i dosjeda.

## 3.2. Teorijske osnove tolerancija oblika i položaja GD&T

Tolerancije oblika i položaja GD&T je naziv za jezik simbola i normi, na tehničkim crtežima koji definiraju geometrije i oblike dijelova i sklopova koji se trebaju proizvesti. Pravila, simboli, definicije, zahtjevi, zadane vrijednosti i preporučene metode za određivanje i tumačenje GD&T utvrđeni su normama:

ISO GPS (geometrijska specifikacija proizvoda) je uspostavila Međunarodna organizacija za standardizaciju.












ASME Y14.5 (*The American Society of Mechanical Engineers*) osnovalo je Američko društvo inženjera strojarstva.

Ova dva sustava se prvenstveno razlikuju po svojim osnovnim principima tolerancije, načinu prikazivanja, metodama izračuna i vrstama tolerancija. Prije implementacije GD&T-a, mora se odlučiti koji sustav treba primijeniti.

Zahtjevi na sustav tolerancija oblika i položaja propisani su normom HRN EN ISO 1101:2017 Geometrijske specifikacije proizvoda (GSP) -- Geometrijske tolerancije -- Tolerancije oblika, orijentacije, smještaja i vrtnje (ISO 1101:2017; EN ISO 1101:2017)  
*Geometrical product specifications (GPS) -- Geometrical tolerancing -- Tolerances of form, orientation, location and run-out (ISO 1101:2017; EN ISO 1101:2017).*

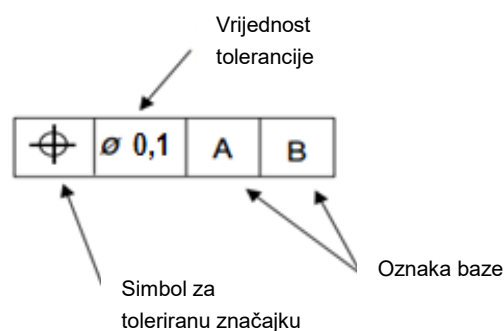
### 3.2.1. Sustav tolerancija oblika i položaja

Značajke, osnovni simboli i zahtjevi za definiranje baze, kod mjerenja određene značajke, u sustavu tolerancija, oblika i položaja prikazani su u tablici 5.

Tolerancija	Značajka	Simbol	Baza
Oblik	Pravocrtnost	—	NE
	Ravnost		NE
	Kružnost	○	NE
	Cilindričnost		NE
Orijentacija	Okomitost		DA
	Kutnost		DA
	Paralelnost	//	DA
Lokacija	Položaj		DA ili NE
	Koaksijalnost		DA
	Simetričnost		DA
Profil	Linijski profil		NE
	Površinski profil		NE
Netočnost okretanja	Kružna netočnost okretanja		DA
	Ukupna netočnost okretanja		DA

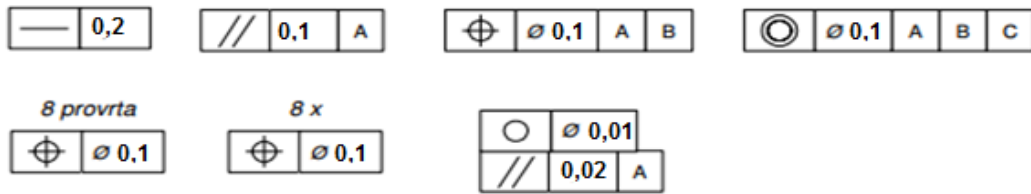
Tablica 5. Sustav tolerancija oblika i položaja

Zahtjevi za toleranciju daju se u pravokutnom okviru podijeljenom na dva ili više dijelova (slika 9.).



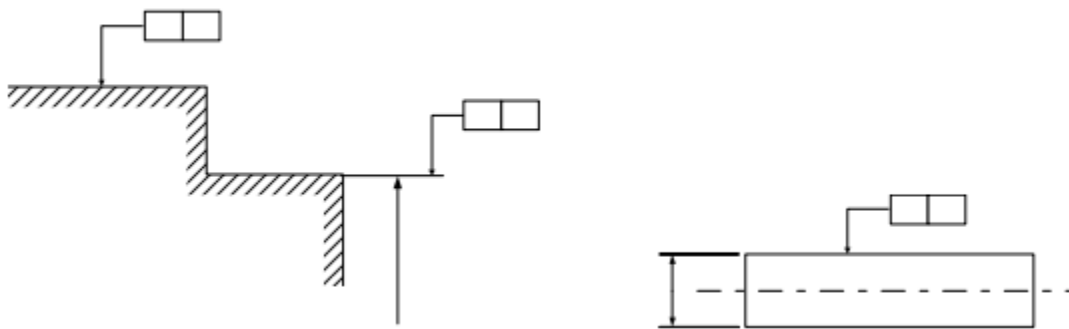
Slika 9. Tolerancijski okvir

Oznaka za bazu piše se u okviru nakon vrijednosti tolerancije. Zajednička baza koja se sastoji od dviju baza piše se zajedno "A-B". Ako je važan redoslijed više baza, tada se one pišu odijeljeno, dok je redoslijed s lijeva na desno zadan prema važnosti. Ako redoslijed baza nije važan, slova se pišu u istom okviru. Dodatne oznake, poput „8 provrta“, pišu se iznad okvira. Primjeri označavanja tolerancija dani su na slici 10.

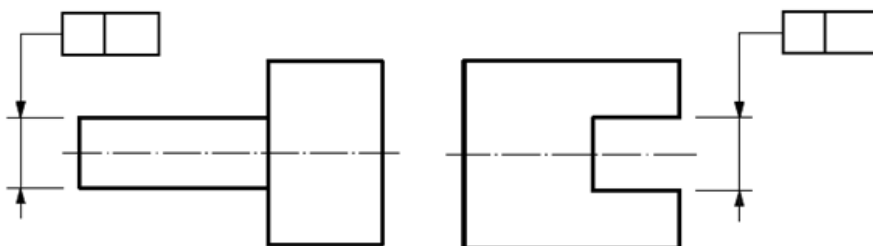


Slika 10. Označavanje tolerancija

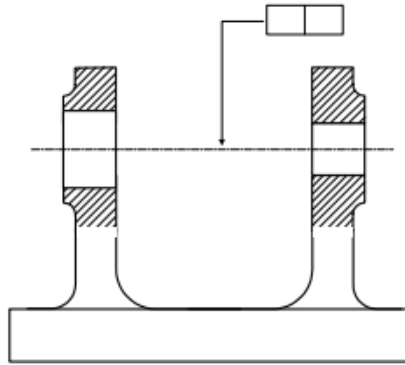
Tolerancijski okvir i tolerirani element dovode se u vezu pomoću pokazne linije. Ako se tolerancija odnosi na stvarnu značajku (pravac ili ploha) strelica pokazne linije dodiruje konturu elementa ili pomoćnu kotu tako da je strelica odmaknuta od strelice kotne crte (slika 11). Ako se tolerancija odnosi na izvedenu značajku (npr. os cilindra) strelica pokazne crte postavlja se u produžetku strelice kotne crte (slika 12). Ako se tolerancija odnosi na sve središnjicom prikazane osi ili srednje geometrijske ravnine, strelica dodiruje središnjicu (slika 13).



Slika 11. Primjeri kada se tolerancija primjenjuje na liniju ili površinu



Slika 12. Primjeri kada se tolerancija primjenjuje na izvedene značajke - os (lijevo) i središnju površinu (desno)




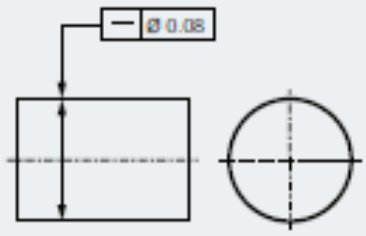
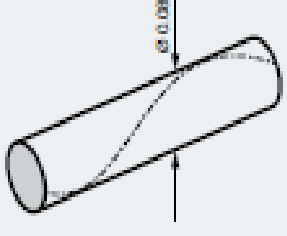


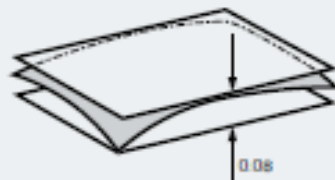

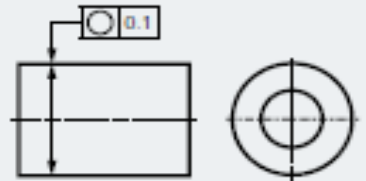
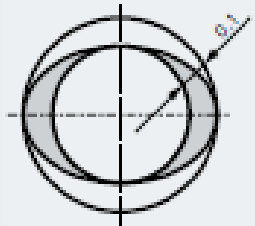

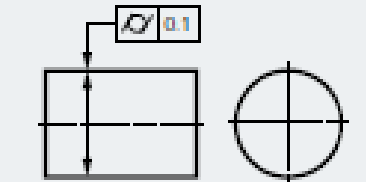
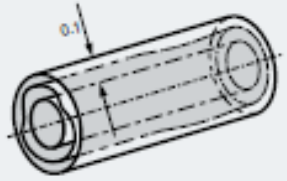

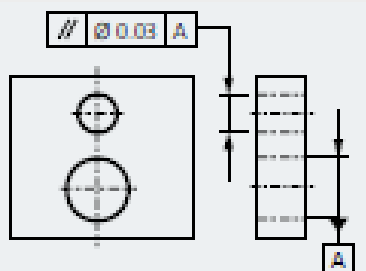
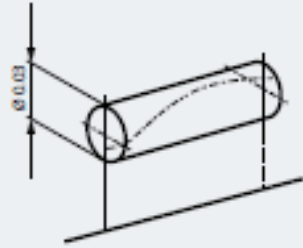
Slika 13. Primjer kada se tolerancija odnosi na sve središnjicom prikazane osi


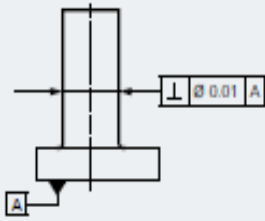
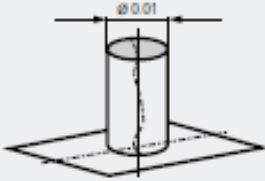

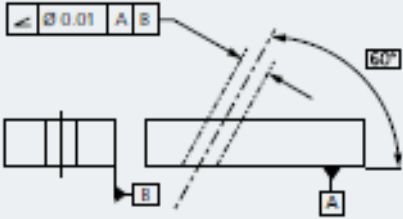
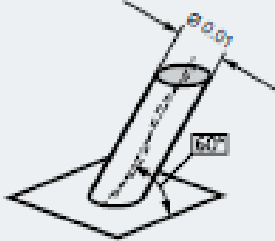

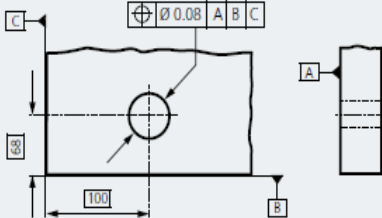
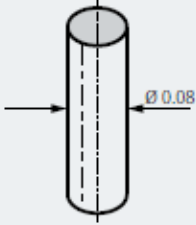

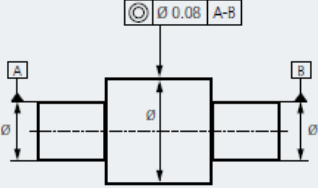
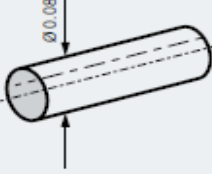
Dva osnovna pravila na kojima se temelji sustav tolerancija oblika i položaja opisani su normom ISO 2692. To su minimalni zahtjevi za materijalom LMC (*Least Material Condition*) i maksimalni zahtjevi za materijalom MMC (*Maximum Material Condition*).


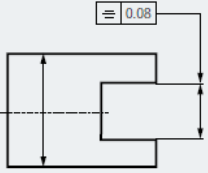
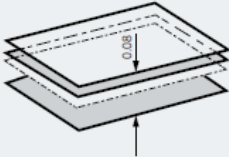





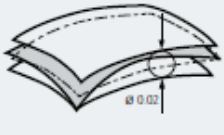
Maksimalno stanje materijala MMC je stanje u kojem značajka sadrži maksimalnu količinu materijala unutar navedenih granica, na primjer minimalni promjer provrta i maksimalni promjer osovine. Uvjet maksimuma materijala navodi se u tolerancijskom okviru nakon vrijednosti zone tolerancije, a označava se velikim slovom M upisanim u kružnicu.

Minimalno stanje materijala LMC razmatrane izvedene značajke sadrži minimalnu količinu materijala unutar navedenih granica (npr. maksimalni promjer provrta, minimalni promjer osovine). Uvjet minimuma materijala navodi se u tolerancijskom okviru nakon vrijednosti zone tolerancije, a označava se velikim slovom L upisanim u kružnicu.

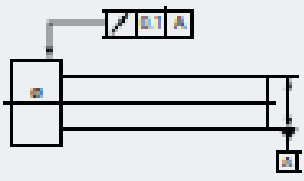
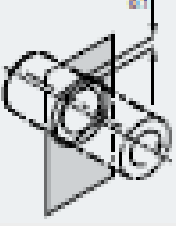
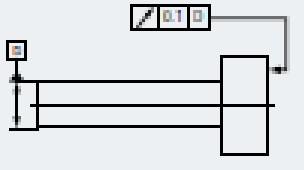
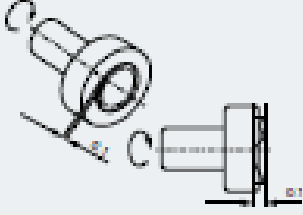
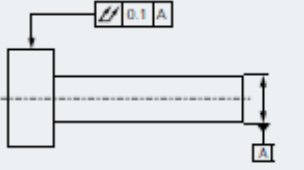
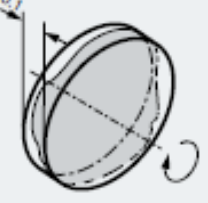
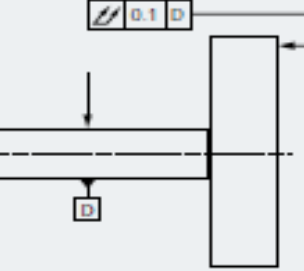
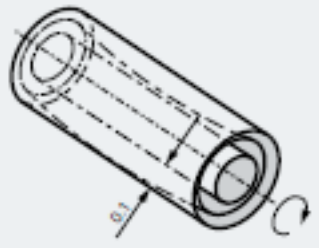
Primjeri primjene tolerancija oblika, položaja, orijentacije, profila i netočnosti okretanja prikazani su u tablici 6.

Simbol i tolerirana značajka	Specifikacije na crtežu i obrazloženje		
	Specifikacije na crtežu	Zona tolerancije	Obrazloženje
Tolerancije oblika			
Pravocrtnost 			Izvedena središnja linija cilindra (izvedena karakteristika) označena u kontrolnom okviru značajke nalazit će se unutar cilindrične zone tolerancija promjera 0,08.
Ravnost 			Izvedena površina će se nalaziti između dviju paralelnih ravnina udaljenih 0,08.
Kružnost 			Izvedena obodna linija u svakom poprečnom presjeku cilindra nalazit će se između dviju koncentričnih kružnica u istoj ravnini, na udaljenosti od 0,1.
Cilindričnost 			Izvedena bočna površina cilindra nalazit će se između dvaju koaksijalnih cilindara radialno odaljena 0,1.
Tolerancije orijentacije			
Paralelnost 			Izvedena središnja linija (izvedena karakteristika) nalazit će se unutar cilindra promjera 0,03 koji je paralelan s

			referentnom linijom A.
Okomitost 			Izvedena središnja linija (izvedena karakteristika) nalazit će se unutar cilindra promjera 0,01 okomito na referentnu bazu A.
Kut nagiba 			Izvedena središnja linija (izvedena karakteristika) nalazit će se unutar cilindra promjera 0,01, koji se nalazi pod kutom od 60° u odnosu na referentnu ravninu A.
<b>Tolerancije položaja</b>			
Lokacija 			Izvedena središnja linija (izvedena karakteristika) nalazit će se unutar cilindrične tolerancijske zone promjera 0,08 čija os je okomita na baznu ravninu A, udaljena za 68 od baze B i za 100 od baze C (teorijski točno mjesto osi provrta).
Koaksijalnost 			Izvedena središnja linija (izvedena karakteristika) cilindra označena u kontrolnom okviru značajke nalazit će se unutar cilindra promjera 0,08

			koji je koaksijalan u odnosu na zajedničku referentnu os A-B.
<p>Simetričnost</p> 			<p>Izvedena središnja površina nalazit će se između dviju paralelnih ravnina udaljenih 0,08 koje su simetrične sa središnjom referentnom ravninom.</p>
<b>Tolerancije profila</b>			
<p>Oblik profila linije</p> 			<p>U svakom dijelu, paralelno s ravninom projekcije, izvedena linija profila nalazit će se između dviju ekvidistantnih linija koje obavijaju krugove promjera 0,04, a čiji su centri smješteni na liniji koja posjeduje idealan geometrijski oblik.</p>
<p>Oblik profila površine</p> 			<p>Izvedena površina će se nalaziti između dviju ekvidistantnih površina koje obavijaju kugle s promjerom od 0,02, čija su središta smještena na površini te tako imaju idealan geometrijski oblik.</p>



Tolerancija netočnosti okretanja			
Kružna netočnost okretanja  ↗ radijalno			Izvedena obodna linija koja je okomita na referentnu liniju A, u svakom poprečnom presjeku cilindra, nalazit će se u istoj ravnini, između dviju koncentričnih kružnica radijalno udaljenih 0,1.
			U svakom cilindričnom presjeku čija se os podudara s referentnom osi D, izvedena linija će se nalaziti između dviju kružnica okomitih na referentnu os D i udaljenih 0,1.
Ukupna netočnost okretanja  ↗↘ radijalno			Označena površina će se nalaziti između dvaju koaksijalnih cilindara radijalno udaljenih za 0,1 čije se osi podudaraju s referentnom linijom A.
			Izvedena površina će se nalaziti između dviju paralelnih ravnina udaljenih 0,1 okomito na referentnu ravnu liniju D.

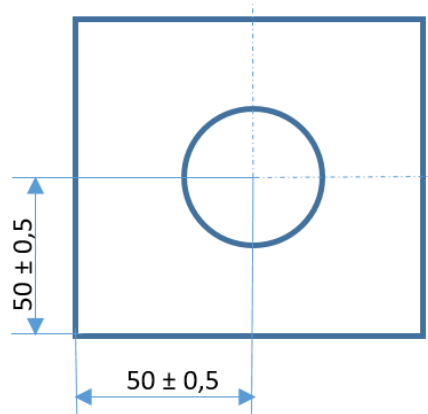
Tablica 6. Primjeri primjene tolerancija oblika, položaja, orijentacije, profila i netočnosti okretanja

Za ostale simbole i označavanja te primjenu GD&T sustava potrebno je kontaktirati ostale ISO GPS ili ANSI norme ovisno o tome koji sustav se koristi.

## Zadaci za vježbu

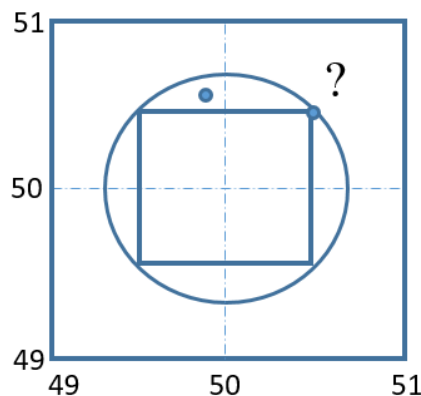
### Zadatak 1.

Na slici 14. prikazana je tolerancija položaja duljinskim mjerama. Potrebno je prikazati zonu unutar koje se mora nalaziti središte provrta. Ako se kao zona tolerancije navede kružna zona, koliko iznosi promjer kružne zone?



Slika 14. Tolerancija položaja duljinskim mjerama

### Rješenje



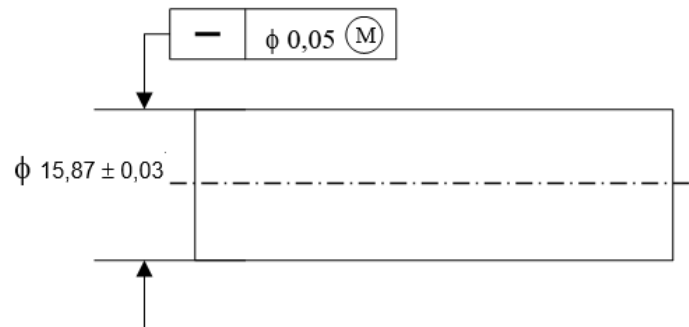
Slika 15. Zadano tolerirano polje unutar kojega se smije naći središte provrta

Na slici 15. je kvadratom prikazano zadano tolerirano polje unutar kojega se smije naći središte provrta. Ako se utvrđene koordinate središta provrta nalaze izvan kvadrata izvodi se zaključak da predmet ne ispunjava zadanu toleranciju. S obzirom na funkcionalnost provrta, može se zaključiti da je na taj način značajno smanjen tolerancijski prostor. Ako se kao zona tolerancije navede kružna zona tada bi se utvrđene koordinate središta provrta nalazile unutar zone tolerancije. Promjer kružne zone iznosi 1,41.

Zadatak 2.

Uvjeti minimuma i maksimuma materijala (HRN EN ISO 2692:2021)

Predmet mjerenja dimenzioniran je u sustavu tolerancija oblika i položaja (slika 16.).



Slika 16. Predmet mjerenja dimenzioniran u sustavu tolerancija oblika i položaja

Odredite dopušteno odstupanje od pravocrtnosti ako je stvarni promjer osovine 15,86 mm.

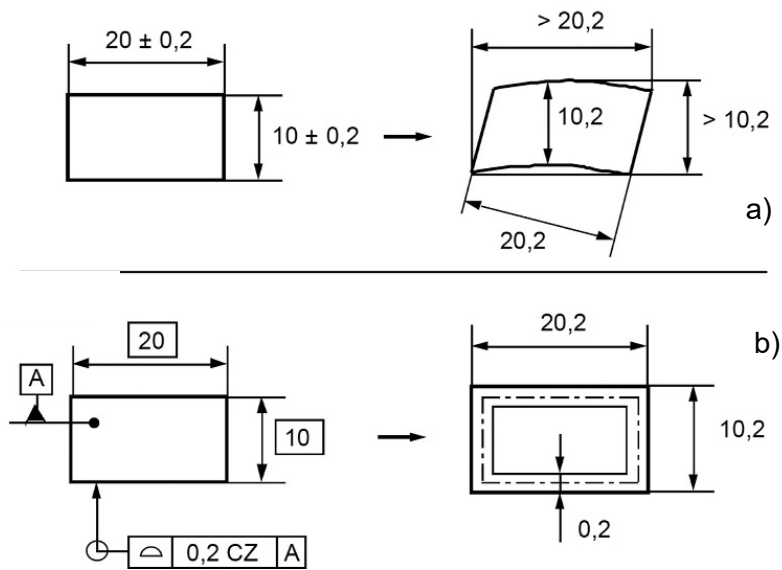
**Rješenje**

Promjer osovine / mm	Dopušteno odstupanje od pravocrtnosti / mm
15,90	0,05
15,89	0,06
15,88	0,07
15,87	0,08
<b>15,86</b>	<b>0,09</b>
15,85	0,10
15,84	0,11

Tablica 7. Rješenje

Zadatak 3.

Protumačite sustave tolerancija.



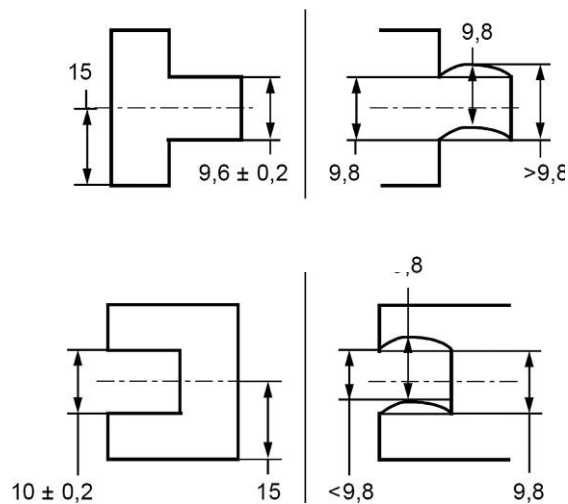
Slika 17. Primjer 1: a) Sustav tolerancija dimenzijskih mjera i dosjeda  
b) Sustav tolerancija oblika i položaja

Rješenje

Toleriranje u sustavu dimenzijskih mjera i dosjeda (slika 17. a) je neprikladno, jer efektivna duljina i visina mogu premašiti ograničenja dimenzija. Ispravan izbor (prema namjeri dizajna) je toleriranje u sustavu odstupanja od oblika i položaja GD&T (Slika 17. b).

Zadatak 4.

Protumačite sustav tolerancija:



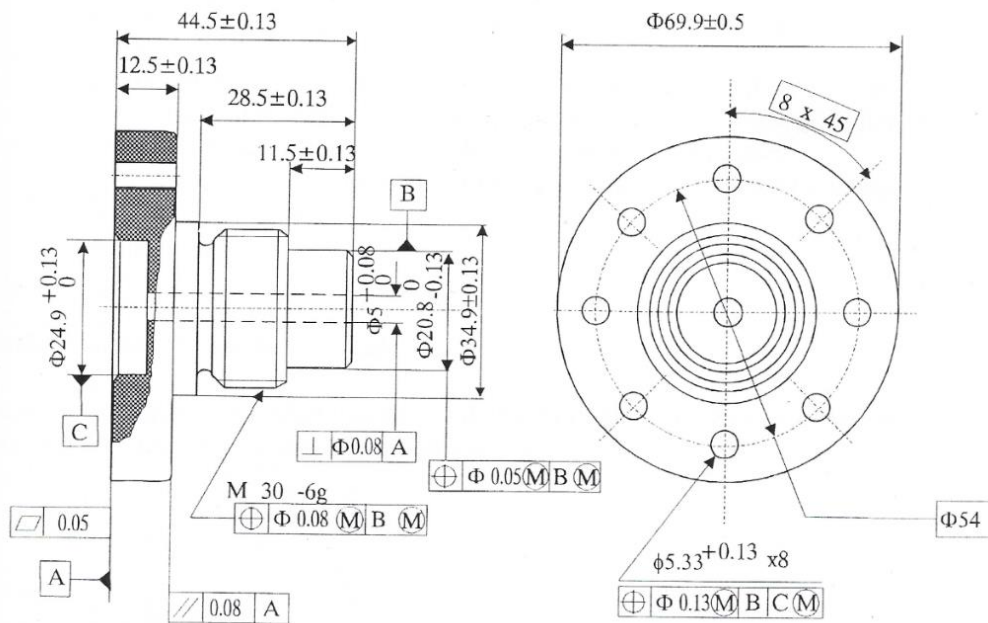
Slika 18. Primjer 2: Sustav tolerancija dimenzijskih mjera i dosjeda

## Rješenje

Toleriranje u sustavu dimenzijskih mjera i dosjeda (slika 18.) je neprikladno jer efektivan promjer može premašiti dopuštenu vrijednost. Ispravan izbor (prema namjeri dizajna) bio bi toleriranje u sustavu odstupanja od oblika i položaja GD&T.

## Zadatak 5.

Na slici je nacrtana spojnica u sustavu tolerancija, oblika i položaja. Obrazložite specifikacije i zone tolerancija prikazane na crtežu. Je li predmet mjerenja jednoznačno definiran?



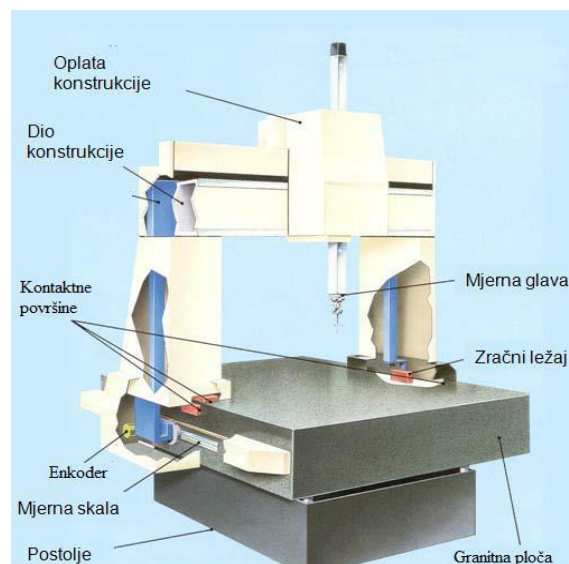
Slika 19. Spojnica u sustavu tolerancija, oblika i položaja

Rješenje: Predmet je jednoznačno definiran.

### 3.3. Trokoordinatni mjerni uređaji TMU (*Coordinate Measuring Machine – CMM*)

Razvoj suvremenih 3D mjernih sustava, kontaktnih i beskontaktnih, rezultirao je pojavom brojnih novih trokoordinatnih mjernih sustava. Danas se pod pojmom trokoordinatni mjerni uređaji TMU podrazumijevaju općenito svi mjerni uređaji za prostorno određivanje mjernih točaka. Unatoč brzom razvoju trokoordinatnih mjernih sustava u praksi je još uvijek uobičajeno da se pod pojmom trokoordinatni mjerni uređaj smatra uređaj s kontaktnim ticalom za mjerenje u diskretnim točkama. U nastavku teksta pod nazivom trokoordinatni mjerni uređaj podrazumijevat će se mjerni uređaj s kontaktnim ticalom za mjerenje u diskretnim točkama.

Općeniti prikaz trokoordinatnog mjernog uređaja prikazan je na slici 20.

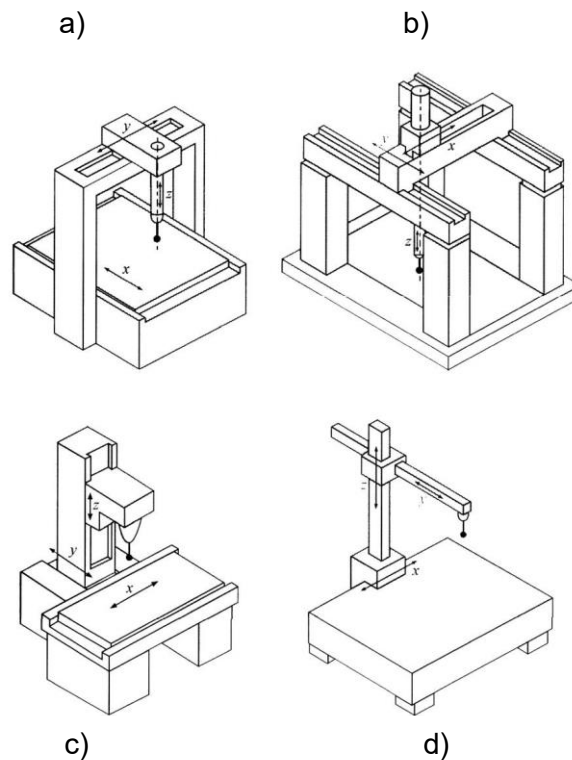


Slika 20. Trokoordinatni mjerni uređaj

TMU se mogu svrstati u četiri temeljne konstrukcijske izvedbe (slika 21.):

- portalna izvedba
- mosna izvedba
- stupna izvedba
- izvedba s bočnim stupom (vodoravnom pinolom).

Portalna izvedba TMU-a zbog visoke krutosti omogućuje postizanje relativno visokih točnosti mjerenja uz vrlo širok raspon granica mjernog prostora. Portalni TMU ima mjerni prostor obujma od 0,2 m<sup>3</sup> do 10 m<sup>3</sup>. Koristi se za mjerenje blokova motora, kućišta strojeva i sl. Portalni tip izvedbe najčešće se primjenjuje.



Slika 21. Temeljne konstrukcijske izvedbe trokoordinatnih mjernih uređaja

a) portalna izvedba, b) mosna izvedba, c) stupna izvedba d) izvedba s bočnim stupom

Kako bi se ostvarila točnost koju garantiraju proizvođači, najstrože zahtjeve proizvođači postavljaju na temperaturu prostora u kojemu je smješten TMU (za TMU visokih točnosti temperatura mora biti u granicama  $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ ), odnosno na vremenske i prostorne temperaturne gradijente.

### 3.3.1. Princip mjerenja

Princip mjerenja koordinatnih sustava se značajno razlikuje od mjerenja konvencionalnim mjerilima (pomično mjerilo, mikrometar, dužinski mjerni uređaji, itd.). Konvencionalnim mjerilima se mjere udaljenosti između dviju susjednih točaka dok se koordinatnim mjerenjima uzorkuju točke s površine predmeta mjerenja, a izlaz je skup koordinata točaka zapisanih kao  $x_i$ ,  $y_i$ ,  $z_i$ . Uzorkovane točke opisuju osnovne geometrijske elemente.

#### Geometrijski elementi

Uzorkovane točke se grupiraju ovisno o osnovnoj geometrijskoj značajki kojoj pripadaju. Kada se promatra nazivna geometrija predmeta mjerenja (CAD model) može se uočiti da se sastoji od osnovnih geometrijskih elemenata (točka, pravac, ravnina, kružnica, cilindar, itd...). Geometrijski elementi mogu biti klasificirani kao idealni ili neidealni ovisno o kontekstu. Idealni geometrijski

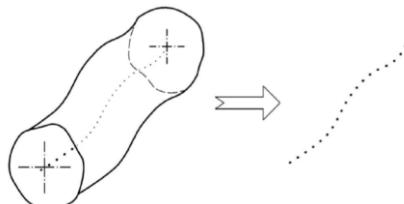
elementi se odnose na nazivni model dok se neidealni geometrijski elementi odnose na skin model i realni predmet mjerenja. Geometrijski elementi su potrebni za definiranje geometrije predmeta mjerenja i imenovani su prema vrsti kojoj pripadaju. Minimalan broj točaka za definiranje osnovnih geometrijskih elemenata prikazan je u tablici 8.

Geometrijski element	Minimalan broj točaka
točka	1
linija	2
ravnina	3
kružnica	3
cilindar	5
konus	6
kugla	4
torus	7
elipsa	5

Tablica 8. Minimalan broj točaka za definiranje osnovnih geometrijskih elemenata

Geometrijski se elementi mogu definirati kao supstitutivni, sastavni ili izvedeni.

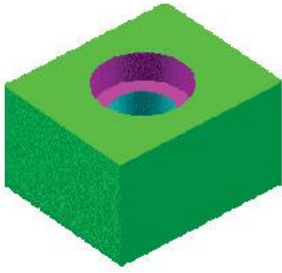
- Supstitutivni geometrijski elementi su idealni geometrijski elementi koji su dobiveni iz neidealnih geometrijskih elemenata prema određenim algoritmima usklađivanja (*fitting algorithms*).
- Sastavni geometrijski elementi predstavljaju dijelove (linije ili površine) i pripadaju površini bez obzira na njihovu prirodu (nazivni, neidealni, realni).
- Izvedeni geometrijski elementi se određuju matematičkim povezivanjem uzorkovanih točaka na mjerenoj površini sa željenom nominalnom geometrijom. Primjer je os cilindra, središte kružnice, kugle ili ravnina simetrije.
- Primjer izvedenog geometrijskog elementa je os neidealnog cilindra (slika 22.).



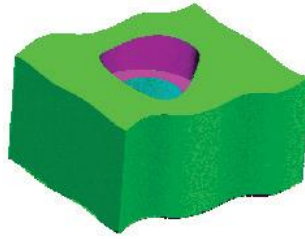
Slika 22. Primjer izvedenog geometrijskog elementa

Geometrijski elementi s obzirom na prikaz (model) geometrije predmeta mjerenja prikazani su na slici 23.

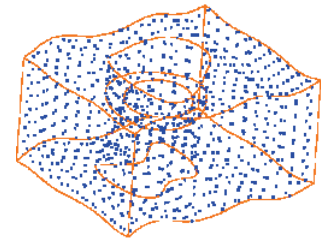




Nazivni model definira idealan predmet mjerenja s oblicima i dimenzijama (crteži i CAD modeli).



Skin (neidealni) model definira predmet mjerenja s dimenzijskim i geometrijskim tolerancijama.



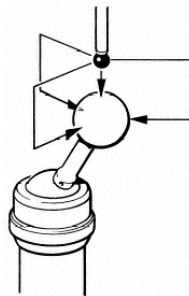
Realan (stvarni) model -rezultat je obrade predmeta mjerenja.

Slika 23. Geometrijski elementi s obzirom na prikaz (model) geometrije predmeta mjerenja

### 3.3.2. Postupak mjerenja

Mjerenje se provodi u sljedećim koracima:

- **Podešavanje (ugađanje) sustava mjerne sonde** (mjerni senzor + mjerno ticalo) u odnosu na referentnu točku glave senzora, a uglavnom se koristi umjerna kuglica (pod uvjetom da se primjenjuje trodimenzionalni elektromehanički senzor). Procesom podešavanja mjernog senzora definira se koordinatni sustav mjernog senzora kao i promjer vrha mjernog ticala i korekcija dužine ticala u odnosu na referentno mjerno ticalo (slika 24.).



Slika 24. Podešavanje (ugađanje) mjernog ticala

Prvo podešavanje se provodi ručno. Nakon što je mjerno ticalo prvi put podešeno sljedeća podešavanja se mogu obaviti automatski pod uvjetom da referentna kugla ne mijenja svoj položaj u radnom prostoru uređaja. Suvremeni TMU-i imaju automatsko podešavanje ticala.

- **Određivanje položaja i orijentacije radnog predmeta** (postavljanje koordinatnog sustava radnog predmeta u odnosu na koordinatni sustav mjernog uređaja).

Pri postavljanju koordinatnog sustava predmeta mjerenja (proces poravnavanja predmeta), potrebno je definirati mjerne baze. Pri tome je najbolje koristiti tehničku dokumentaciju.

Proces poravnavanja predmeta je definiranje položaja predmeta mjerenja u softveru TMU.

Za proces poravnavanja koriste se mjerne baze tj. osnovni geometrijski elementi promatranog predmeta.

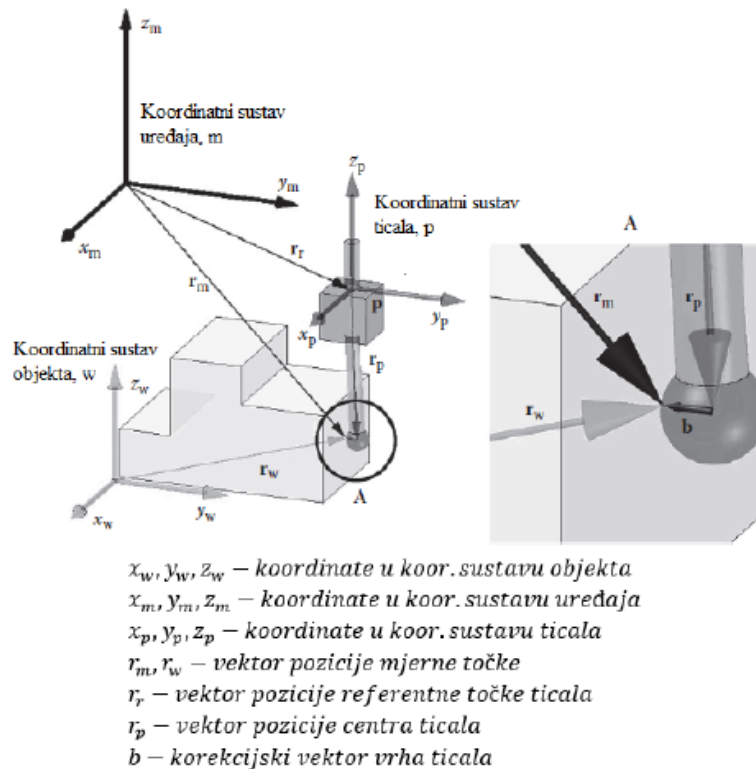
U oba slučaja programiranja, bez CAD modela (on line) ili s CAD modelom (off line) poravnavanje se mora provesti ručno. U prvom slučaju moraju se definirati geometrijski elementi koji će se koristiti kod definiranja koordinatnog sustava predmeta mjerenja uzorkovanjem točaka s površine tih elemenata.

U drugom slučaju se, koordinatni sustav definira CAD modelom. Da bi softver znao gdje se nalazi predmet mjerenja moraju se ručno uzorkovani geometrijski elementi od kojih se definira koordinatni sustav.

Pri definiranju geometrijskih elemenata treba voditi računa o strategiji uzorkovanja (broj i položaj mjernih točaka koje opisuju realnu geometriju elementa) jer neadekvatno definirani elementi mogu dovesti do loše postavljenog koordinatnog sustava predmeta.

- **Uzorkovanje točaka** s površine predmeta mjerenja i izračunavanje supstitutivne geometrije.
- **Procjena geometrijskih karakteristika** radnog predmeta.
- **Izveštaj** o rezultatima mjerenja.

Cjelokupni proces mjerenja s koordinatnim mjernim uređajem se može opisati kao transformacija prave (realne) pozicije  $\mathbf{p}$  točke mjernog objekta u njezinu izmjerenu poziciju  $\mathbf{rm}$  unutar koordinatnog sustava uređaja. Taj postupak se može podijeliti na mjerenje točke i mjerenje pozicije ticala. Potproces mjerenja točke je transformacija vektora pozicije točke  $\mathbf{p}$  u poziciju centra mjernog ticala unutar koordinatnog sustava ticala  $\mathbf{rp}$ , uz uračunavanje korekcijskog vektora vrha ticala  $\mathbf{b}$ . Dodavanjem vektora pozicije mjernog ticala, dobivamo koordinate mjerne točke unutar koordinatnog sustava uređaja (slika 25.).

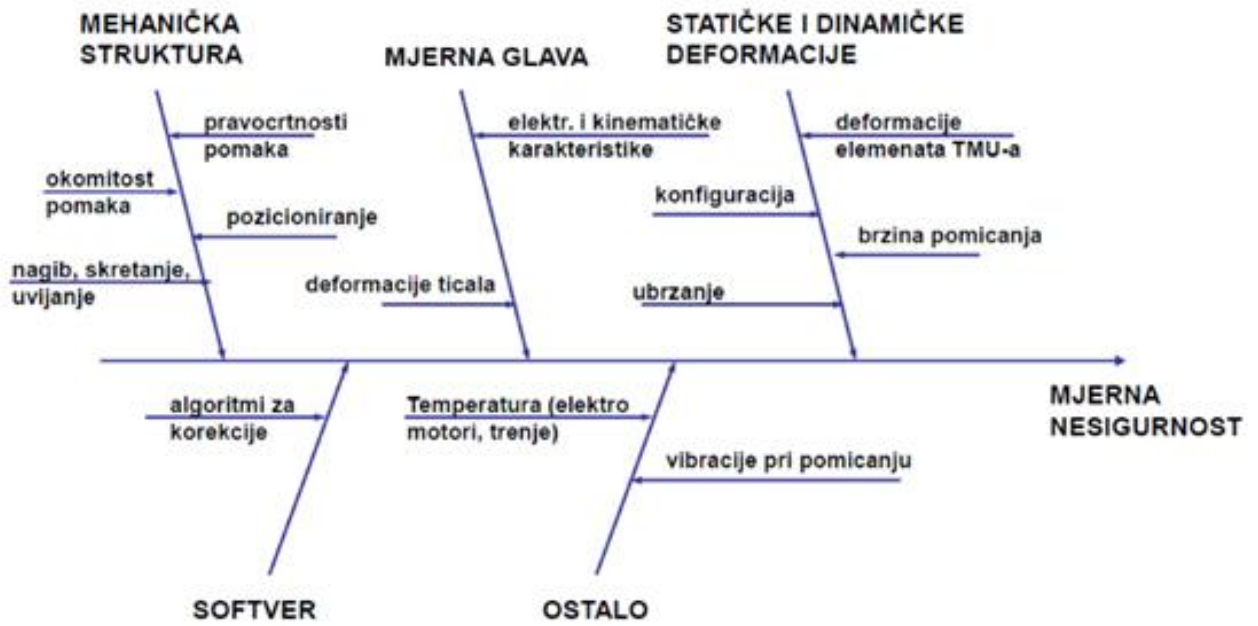


Slika 25. Vektorski dijagram mjerjenja površinske točke mjernog objekta

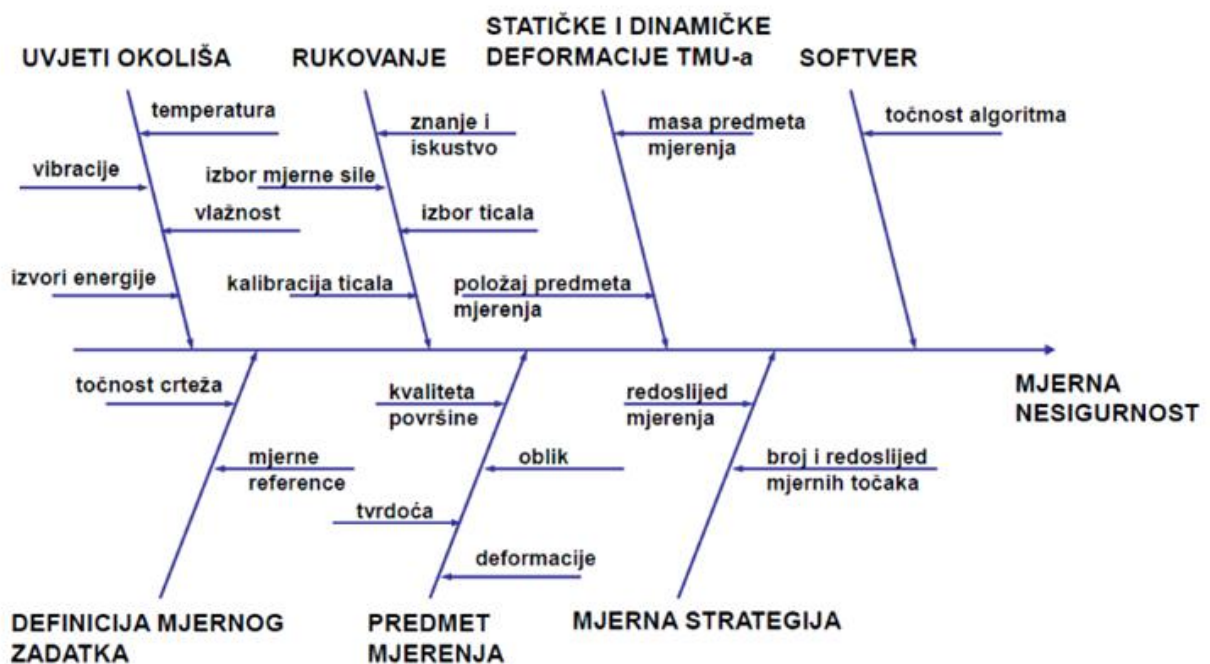
Prilikom procjenjivanja položaja mjerne točke na objektu unutar koordinatnog sustava mjernog uređaja, vektorska udaljenost između referentne točke mjernog sustava i mjerne točke mora se dodati vektoru pozicije referentne točke u koordinatnom sustavu mjernog uređaja (slika 25.).

### 3.3.3. Izvori pogrešaka

Trokoordinatni mjerni uređaj (TMU) složen je mjerni instrument. Postoji velik broj izvora pogrešaka koji uzrokuju smanjenje točnosti mjerjenja i povećanje nesigurnosti rezultata mjerjenja. Izvori pogrešaka zbog unutarnjih i vanjskih utjecaja na mjernu nesigurnost prikazani su na slikama 26. i 27.



Slika 26. Izvori pogrešaka - unutarnji utjecaji na mjernu nesigurnost



Slika 27. Izvori pogrešaka - vanjski utjecaji na mjernu nesigurnost

### 3.3.4. Mjerenje trokoordinatnim mjernim uređajem – primjer iz prakse

Provedeno je mjerenje aluminijskog odljevka poklopca diferencijala. Mjerenja su provedena na trokoordinatnom mjernom uređaju Ferranti Merlin 750 u u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Mjerenja su provedena u okviru izrade diplomskog rada. Tehnička dokumentacija koja uključuje plan mjerenja dana je u privitku 1.

Prije početka mjerenja trokoordinatnim mjernim uređajem potrebno je postupak mjerenja dobro isplanirati. Postupak mjerenja uključuje pripremu predmeta mjerenja, pripremu trokoordinatnog mjernog uređaja, podešavanje (ugađanje) mjernog uređaja, postavljanje mjernog uzorka u poziciju za mjerenje, a nakon toga slijedi mjerenje i obrada rezultata. Mjerenja se provode u kontroliranim (laboratorijskim) uvjetima, u kojima je moguće osigurati temperaturu u rasponu  $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ .

#### Priprema predmet mjerenja (mjerni uzorak)

Prije početka postupka mjerenja potrebno je pripremiti mjerni uzorak. S mjernog uzorka treba ukloniti sve nečistoće i strana tijela koja nisu sastavni dio mjernog uzorka te osigurati stabilnost i fiksnu poziciju mjernog uzorka u odnosu na mjerni uređaj kako se ne bi utjecalo na rezultate mjerenja. Predmet mjerenja prikazan je na slici 28.



Slika 28. Predmet mjerenja - aluminijski odljevak poklopca diferencijala

#### Priprema mjernog uređaja

Priprema trokoordinatnog mjernog uređaja se sastoji od pokretanja računala, upravljačke jedinice mjernog uređaja te, ako prethodno nije spojen, spajanja na komprimirani zrak koji koriste zračni ležajevi. Potrebno je osigurati da radna površina mjernog uređaja bude čista i bez zapreka posebno na dijelovima po kojima klize zračni ležajevi. Zbog principa rada i konstrukcije TMU-a nečistoće na kliznim stazama mogu uzrokovati kvar na osjetljivim zračnim ležajevima i tako onesposobiti uređaj.

## Podešavanje (ugađanje) mjernog uređaja

Podešavanje (ugađanje) je proces korekcije mjernog instrumenta. Ugađanjem se smanjuje (u idealnom slučaju poništava) sustavna pogreška. Sam proces podešavanja trokoordinatnog mjernog uređaja temelji se na određivanju promjera kuglice na vrhu mjernog ticala. Ugađanje se provodi tako da se vrhom mjernog ticala očitavaju mjerne točke po površini etalona za ugađanje (slika 29.).



Slika 29. Postupak ugađanja



Slika 30. Etalon za ugađanje

Etalon za ugađanje (slika 30.) je čelična fino ispolirana kugla promjera  $(30 \pm 0,001)$  mm. Podešavanjem se utvrđuje vrijednost promjera kuglice vrha ticala u trenutnoj orijentaciji te se ta vrijednost koristi za korekciju sustava. Za svaku orijentaciju mjerne glave potrebno je provesti zasebno podešavanje. Za potrebe mjerenja u ovom radu bila je potrebno podešavanje 6 orijentacija mjernog ticala  $70 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$  te dvije orijentacije ticala  $20 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ . Postupak podešavanja se sastoji od dovođenja ticala u blizinu etalona za ugađanje tako da je vrh ticala postavljen u smjeru središta etalona. Nakon toga se pokrene postupak u softveru, gdje uređaj automatski izmjeri desetak točaka po površini etalona. Ticala su izabrana na osnovi plana mjerenja, prema kojemu je procijenjeno da se tim ticalima mogu izmjeriti tražene značajke na mjernom komadu. Zbog kompleksnosti geometrije mjernog uzorka i konstrukcijske izvedbe mjerne glave, bilo je potrebno odabrati i dugačko mjerno ticalo kako bi se mogle izmjeriti sve potrebne značajke. Postoji mogućnost izmjene ticala u procesu mjerenja, ali je nakon svake izmjene ticala potrebno ponoviti postupak ugađanja što produljuje proces mjerenja. Prije početka mjerenja potrebno je definirati koje će sve orijentacije mjernog ticala biti potrebne za dobivanje svih mjernih točaka.

**Napomena:** U praksi se za postupak podešavanja (ugađanja) uređaja vrlo često koristi termin kalibracija (umjeravanje) što nije ispravno ali je uobičajeno.

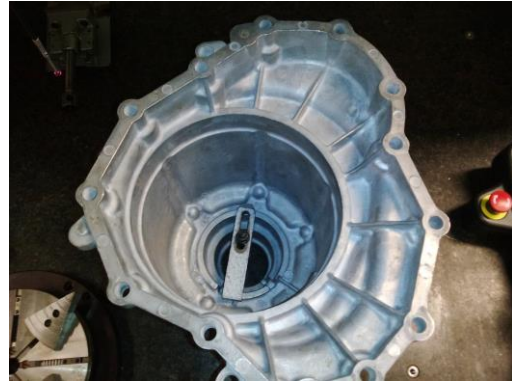
## Postavljanje mjernog uzorka

Jedan od najvažnijih zadataka u postupku mjerenja TMU-om je postavljanje mjernog uzorka, odnosno njegovo učvršćenje. Važno je osigurati da se mjerni uzorak uslijed procesa mjerenja ne pomakne kako se ne bi dobili pogrešni rezultati. Ako dođe do pomicanja uzorka, potrebno je ponoviti

postupak mjerenja. Kod mjernih uzoraka kompleksnije geometrije i zahtjevnije tehničke dokumentacije osim učvršćenja samog uzorka, potrebno je osigurati uvjete za mjerenje svih traženih značajki. Ponekad je potrebno izraditi stezne naprave kako bi se omogućio pristup svim značajkama i osiguralo optimalno rješenje prilikom mjerenja. Za potrebe ovog rada nije konstruirana posebna naprava koja bi omogućila optimalan prihvat mjernog uzorka nego su korištene značajke predmeta mjerenja.



Slika 31. Učvršćenje mjernog uzorka za stol



Slika 32. Učvršćenje mjernog uzorka s druge strane

Kao što je vidljivo na slikama 31. i 32. učvršćenje mjernog uzorka pomoću njegovih značajki, otežava proces mjerenja i pokriva određeni dio geometrije uzorka. Zbog steznih komada koji se nalaze unutar mjernog uzorka, nije moguće obaviti mjerenje na tim mjestima. Važno je napomenuti da je prilikom učvršćenja uzorka potrebno misliti i na silu pritezanja kako ne bi došlo do pomaka ili deformacije mjernog uzorka. Učvršćenje mjernog uzorka i izbor sile pritezanja stvar je iskustva i subjektivne procjene mjeritelja.

### Postupak mjerenja

Postupak mjerenja, odnosno uzimanja mjernih točaka po površini mjernog uzorka (slika 33.) provodi se fizičkim kontaktom mjernog ticala po površini uzorka. Potrebno je stanovito radno iskustvo mjeritelja, kako bi dobro procijenio na kojem mjestu i na koji način treba uzeti mjerne točke.



Slika 33. Postupak uzimanja mjerne točke na površini mjernog uzorka

Mjerni uzorak je mjeran iz dviju pozicija. U tom slučaju svaka pozicija predstavlja zasebno mjerenje. Na mjernom planu (privitak 1.) su definirane baze od kojih se mjeri i koje definiraju koordinatni sustav. Da bi bilo moguće provesti mjerenje u dvije pozicije, mora postojati mogućnost definiranja tih baza u objema pozicijama. U protivnom bi trebalo definirati koordinatni sustav prema nekim drugim elementima, što bi dovelo do promjene mjernog plana. Izvješće o mjerenju dano je u privitku 2.

### 3.4. Optički 3D digitalizatori (skeneri)

Optički 3D digitalizatori (skeneri) su beskontaktni mjerni uređaji koji na mjerni objekt projiciraju uzorke paralelnih linija i snimaju ih pomoću dviju digitalnih kamera. Za svaki pojedini piksel u kamerama, 3D skener određuje trodimenzionalne koordinate pripadajuće točke sa snimane površine. Time se stvara poligonizirana mreža koja detaljno opisuje oblik digitaliziranog objekta. Svi GOM ATOS 3D digitalizatori koriste tehnologiju plavog svjetla. Razlog za korištenje plavog svjetla u postupku projiciranja kodiranog uzorka na površinu mjernog objekta je što plava svjetlost ima najkraću valnu duljinu i vrlo je malo zastupljena u okolišu. To ima za posljedicu da je 3D digitalizator manje osjetljiv na okolišne uvjete i može bez ikakvih problema provoditi postupak digitalizacije na dnevnom svjetlu.

S obzirom na interakciju mjernog senzora i mjernog objekta, poželjno je da provođenje mjerenja aktivnim projekcijskim sensorima bude neovisno o optičkim karakteristikama površine mjernog objekta, udaljenosti predmeta i o uvjetima lokalnog osvjetljenja. Udaljenost predmeta i uvjete osvjetljenja uglavnom je moguće prilagoditi trenutnim mjernim zahtjevima, dok su optička svojstva površine zapravo u funkciji materijala mjernog objekta, njegovih površinskih svojstava te korištenog izvora svjetla. Ako je materijal transparentan (npr. staklo, neke vrste polimera, pleksiglas i sl.) svjetlost prolazi kroz materijal bez refleksije i povratne informacije u senzor. Problem se javlja i kod izrazito sjajnih (npr. strojno obrađenih, zrcalnih predmeta od metala) površina, gdje se javlja refleksija zrake koja ima usmjereni intenzitet. Kod oba slučaja problem se rješava matiranjem površine mjernog uzorka nanošenjem tankog sloja praha. Postupak matiranja površine je jednostavan i izvodi se s pomoću sprejeva (slika 34.).



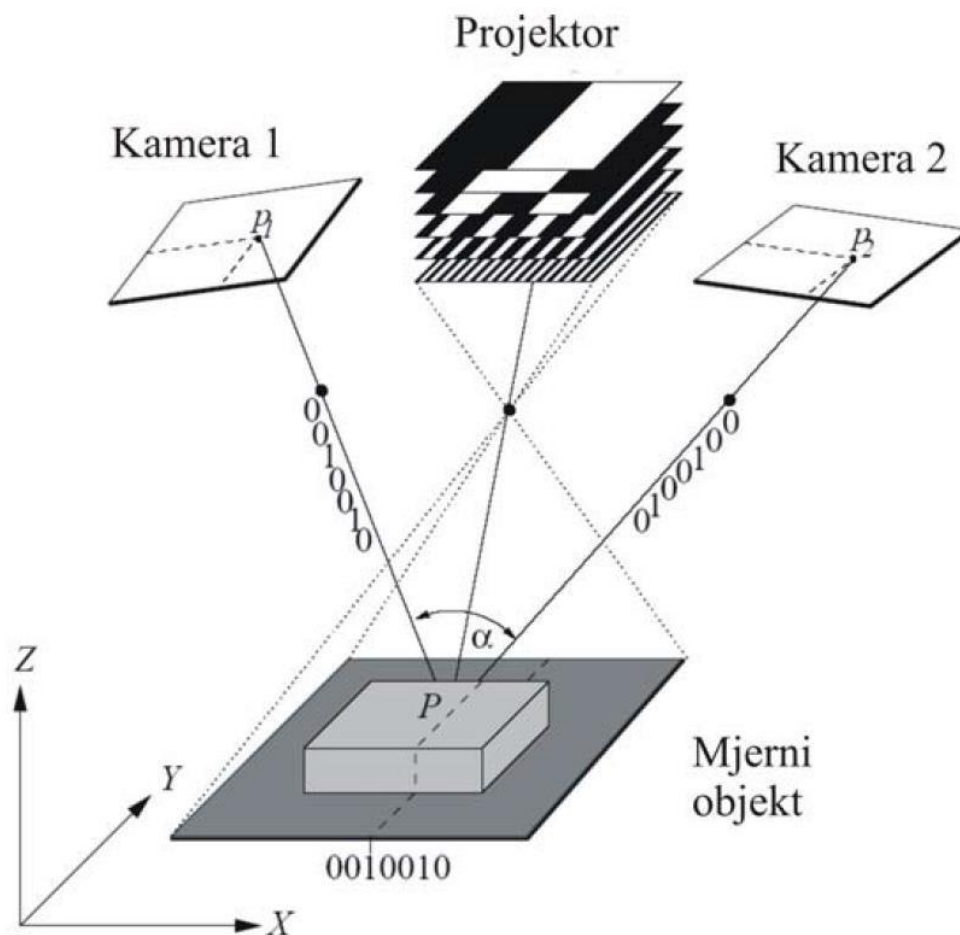
Slika 34. Sprejevi za korištenje u 3D skeniranju



Za matiranje se koriste sprejevi s otopinom titanijevog dioksida u alkoholu. Jednostavnim sprejanjem površine i nanošenjem jednolikog tankog sloja otopine, alkohol isparava s površine objekta, a sloj titanijevog dioksida elektrostatski ostaje na površini objekta.

### 3.4.1. Princip rada optičkih 3D digitalizatora

Princip rada sustava temelji se na kombinaciji triangulacije i projiciranja rasterskog uzorka linija (slika 35.), korištenjem nekoherentnog izvora svjetla. Centralno postavljen projektor projicira unaprijed određenu rastersku strukturu na površinu mjernog objekta. To omogućuje jednoznačnu prostornu rekonstrukciju površine pomoću analize snimaka snimljenih s lijevom i desnom kamerom. Projektor služi kao pomoćno sredstvo za rješavanje problema jednoznačnosti, tj. prepoznavanje identičnih slikovnih osjeta objektne mjerne točke (stereoparova) u svakoj od kamera (točke P1 i P2). Stereoparovi se određuju pomoću metode epipolarne ravnine i metode izjednačavanja zrakovnog snopa, a ti postupci su detaljno objašnjeni u literaturi.



Slika 35. Princip rada digitalizatora ATOS

Neki od ATOS prijenosnih optičkih 3D digitalizatora nove generacije prikazani su na slici 36.



Slika 36. ATOS prijenosni optički 3D digitalizatori

### 3.4.2. Mjerenje optičkim digitalizatorom – primjer iz prakse

Optičkim digitalizatorom ATOS CORE 300 izmjeren je uzorak aluminijskog odljevka poklopca diferencijala koji je mjerjen i trokoordinatnim mjernim uređajem.

#### Priprema mjernog uzorka

3D digitalizatori ATOS CORE u radu koriste referentne točke s pomoću kojih se referenciraju u prostoru. Referentne točke su crni i -bijeli markeri u obliku samoljepljivih naljepnica koji se lijepe po površini mjernog uzorka.



Slika 37. Referentne točke

Kako bi se dobili rezultati digitalizacije cijelog mjernog uzorka potrebno je uzorak skenirati iz više pozicija. Naime, 3D digitalizator u pojedinom skenu (opažaju) može dobiti rezultat samo po površini

mjernog uzorka koja mu je u tom opažaju bila vidljiva i unutar mjernog volumena. Stoga se u postupku digitalizacije pomiče mjerni uzorak ispred 3D digitalizatora ili se 3D digitalizator okreće oko mjernog uzorka. Da bi se pojedini skenovi spojili u cjelinu, odnosno da bi se dobila geometrija mjernog uzorka u jedinstvenom oblaku točaka koriste se referentne točke koje softver automatski prepoznaje prilikom digitalizacije i na taj način spaja pojedine skenove.



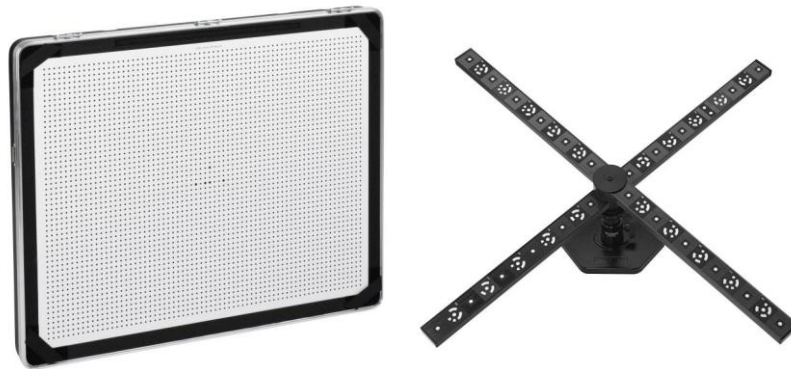
Slika 38. Mjerni uzorak s referentnim točkama

Postoji mogućnost digitalizacije površine objekta bez referentnih točaka, ali u tom slučaju ne vrijede tehnički podaci o graničnoj pogrešci instrumenta koji su deklarirani od proizvođača. Dakako, rezultat takve digitalizacije nije namijenjen u mjeriteljske i inspekcijske svrhe. Takav pristup se najčešće koristi za skeniranje povijesno vrijednih predmeta i umjetnina koje ne smiju doći u interakciju sa stranim tijelima ili kod digitalizacije površina gdje se digitalizacija radi samo zbog vizualizacije nekog objekta.

Prije mjerenja, sjajne i reflektirajuće površine potrebno je matirati s pomoću spreja. Pošto se radi o lijevanom sirovcu koji nema strojno obrađenih površina te mu je površina relativno hrapava i blago matirana nije bilo potrebe za sprejanjem površine mjernog objekta osim za matiranjem malog dijela unutrašnjosti mjernog uzorka. Kako se u udubini unutrašnjosti mjernog uzorka nalaze dva relativno uska utora, prilikom procesa skeniranja dolazilo je do duple refleksije projiciranog uzorka. Iz navedenog razloga provedeno je matiranje površine s pomoću spreja. Mjerenja su provedena u laboratoriju tvrtke Topomatika u Zagrebu na temperaturi  $24\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ .

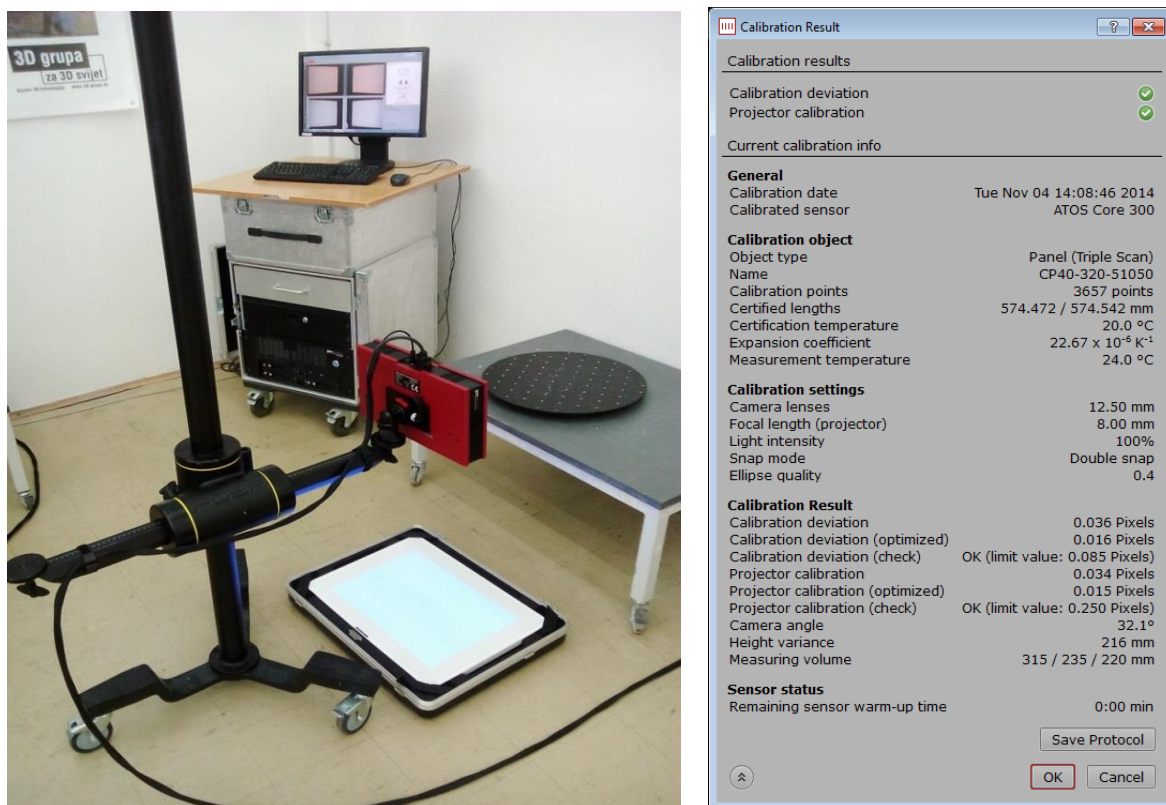
### **Podešavanje mjernog sustava**

Prije početka mjerenja sustav je potrebno podesiti. Postupkom podešavanja (ugađanja) povezuju se unutarnji i vanjski parametri sustava. Postupak podešavanja mjernog senzora ATOS CORE provodi se s pomoću ploče ili križa za podešavanje (slika 39).



Slika 39. Objekti za podešavanje optičkih mjernih sustava: ploča i križ

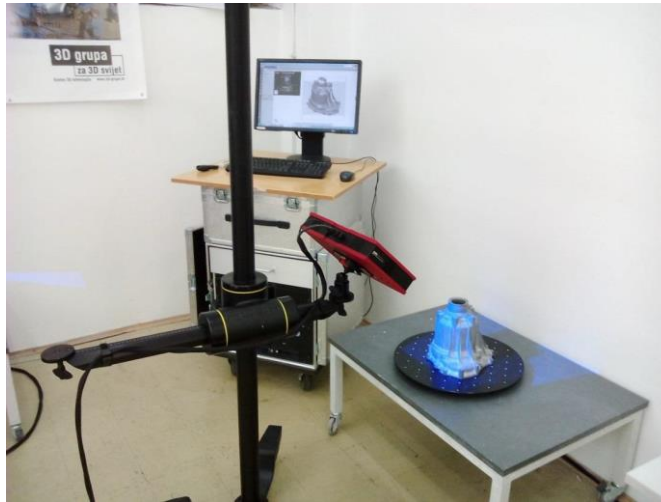
Objekti za podešavanje imaju poznatu geometriju i materijal izrade s poznatim koeficijentom toplinskog širenja. Potrebno je izmjeriti temperaturu objekta za podešavanje kako bi se u postupku podešavanja (ugađanja) mogla provesti temperaturna korekcija. Postupak ugađanja sastoji se od snimanja 18 pozicija. Jedna pozicija i rezultati podešavanja prikazani su na slici 40.



Slika 40. Podešavanje mjernog uređaja i rezultati podešavanja

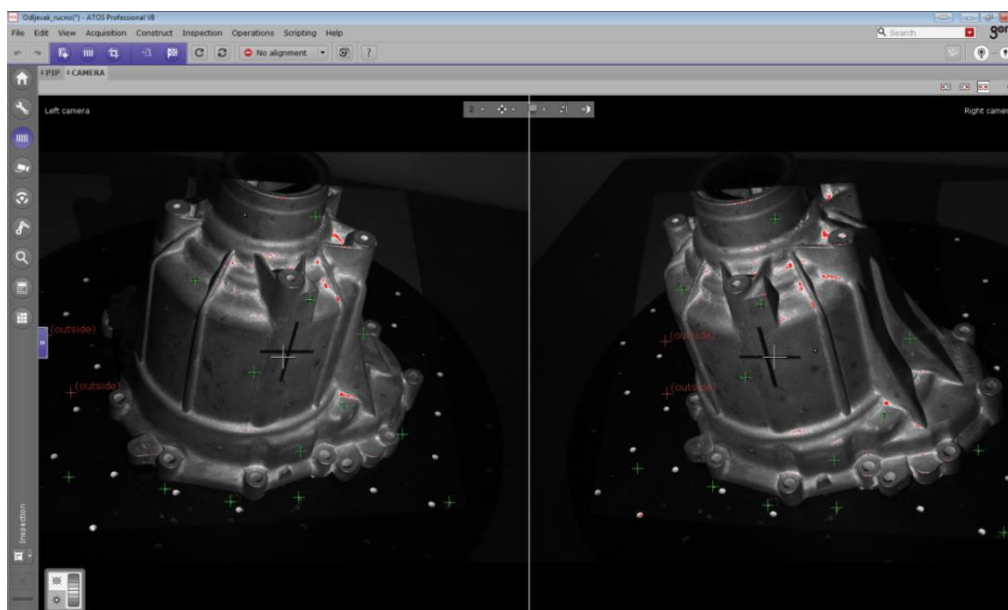
## Digitalizacija 3D skenerom ATOS CORE

Nakon pripreme objekta i podešavanja senzora treba postaviti mjerni uzorak u mjerni volumen skenera (slika 41). Prije početka digitalizacije potrebno je kratko analizirati mjerni plan kako bi se uzorak postavio tako da postupak digitalizacije bude što jednostavniji i brži.

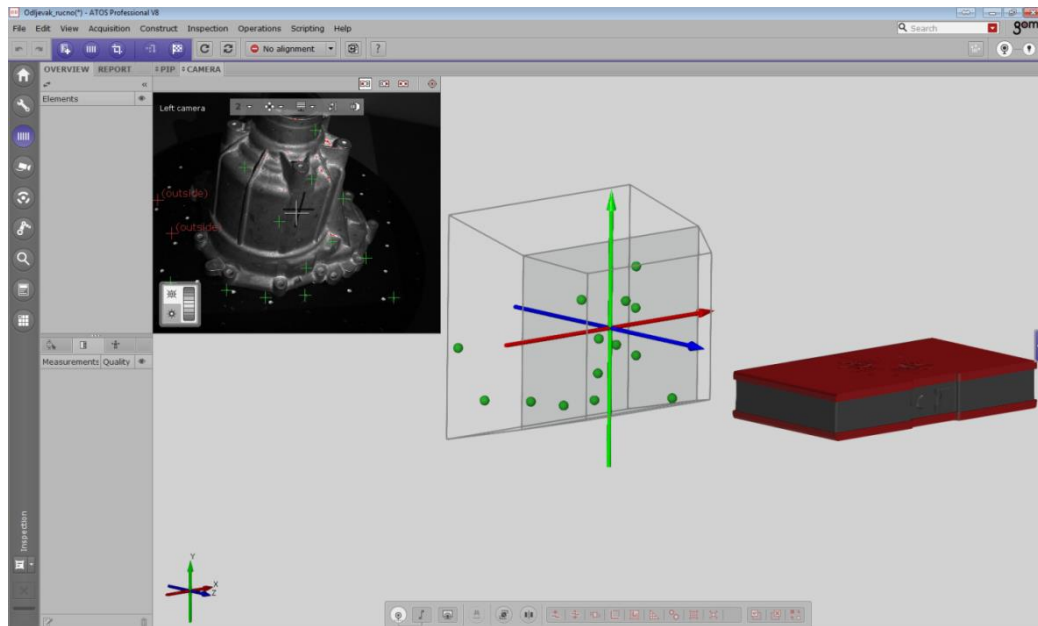


Slika 41. Postavljanje objekta mjerenja u mjerni volumen 3D skenera

Kada se mjerni uzorak nalazi u mjernom volumenu senzora, softver automatski prepoznaje referentne točke zalijepljene po uzorku (slika 42). One su označene križićima. Tada se također prikaže virtualni prikaz skenera, s mjernim volumenom te referentnim točkama koje su trenutno vidljive, što nam pomaže pri namještanju uzorka i pokazuje gdje se uzorak trenutno nalazi u odnosu na 3D skener (slika 43).

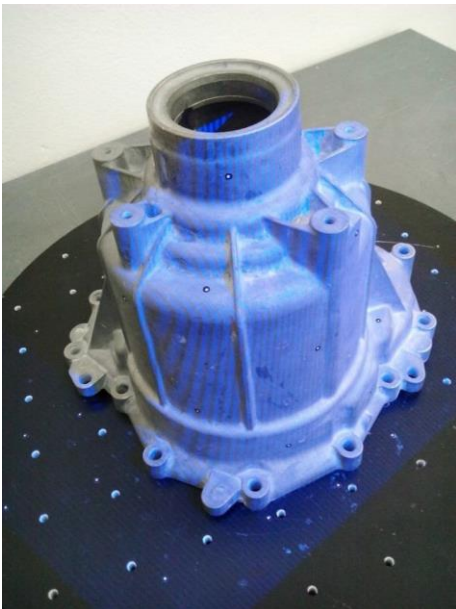


Slika 42. Slika predmeta mjerenja lijeve i desne kamere

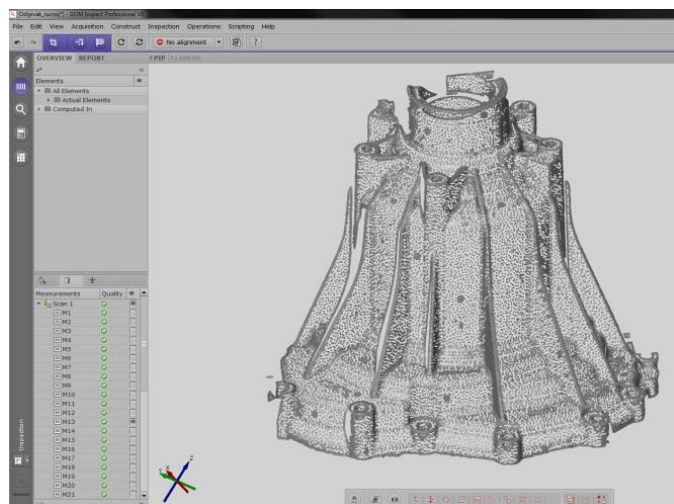


Slika 43. Virtualni prikaz mjernog volumena skenera

Prilikom postupka skeniranja senzor pomoću projektora projicira kodirano svjetlo na objekt, a kamere snimaju uzorak (slika 44.a). Za svaki piksel u kameri dobijemo jednu mjernu točku na površini objekta skeniranja, a ona je ekvivalentna jednom doticaju mjernog ticala kod TMU-a. Ako je mjerni volumen senzora potpuno ispunjen, to znači da je u jednom skenu s 5 MP kamerom dobiveno pet milijuna točaka na površini objekta (slika 44.b). Zbog velike količine podataka, softver prikazuje samo 10 % točaka na površini objekta.



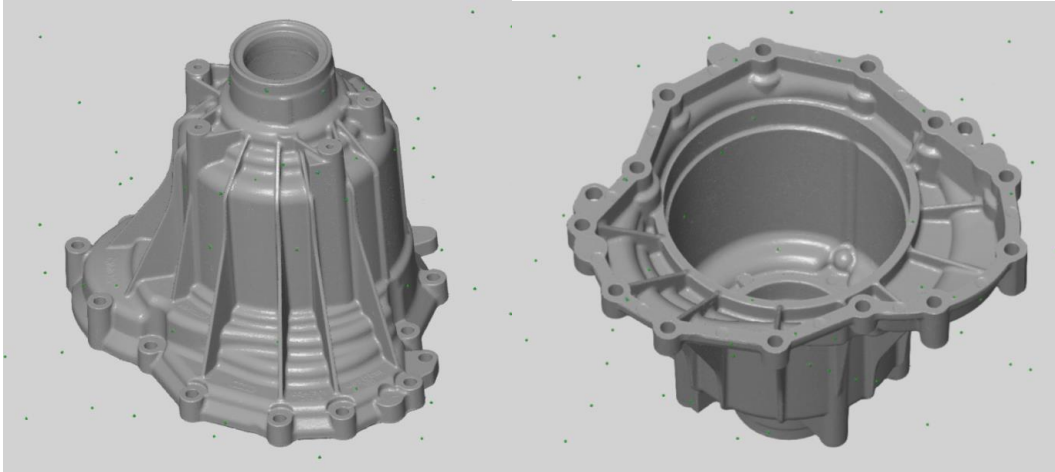
a)



b)

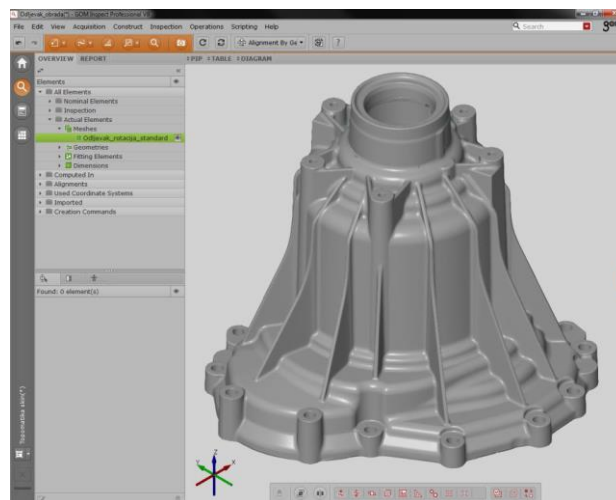
Slika 44. a) Projicirani uzorak skenera na objekt mjerenja b) Prikaz mjernih točaka na mjernom objektu u jednom skenu

Rezultate digitalizacije objiju strana mjernog uzorka potrebno je spojiti. U slučaju spajanja rezultata i dviju mjernih serija, potrebne su minimalno četiri referentne točke koje su zajedničke prvoj i drugoj mjernoj seriji. Obično su to referentne točke zalijepljene po bočnim stranama mjernog uzorka. Spojene mjerne serije prikazane su na slici 45.



Slika 45. Spojene mjerne serije

Na kraju svakog postupka digitalizacije slijedi poligonizacija. Poligonizacija je postupak kojim se iz pojedinačnih oblaka točaka (tzv. skenova) izrađuje poligonalna mreža trokuta u STL formatu. Kako se pojedinačni skenovi na mjestima preklapaju, potrebno je napraviti uniformni oblak točaka na temelju kojega se dolazi do STL datoteke koja je rezultat 3D skeniranja (Slika 46).



Slika 46. Rezultat skeniranja – poligonalna mreža trokuta (STL datoteka)

Na osnovi STL datoteke provedeno je 3D mjerenje i kontrola mjernog uzorka prema mjernom planu (privitak 1).

STL datoteka se kao rezultat 3D skeniranja može koristiti u različite svrhe. Primarna svrha je kontrola uzorka, odnosno 3D mjerenje. Na STL datoteci se provodi mjerenje i kontrola mjernog uzorka prema

mjernom planu ili prema CAD modelu. Druga mogućnost je da se STL datoteka koristi u svrhu povratnog inženjerstva. U slučaju da ne postoji dokumentacija o uzorku moguće je na temelju STL datoteke tehnikama povratnog inženjerstva izraditi CAD model. STL datoteke se također mogu koristiti za arhiviranje. To je posebno zanimljivo na području umjetnosti, ali i u industriji. Naime, modeli se mogu digitalizirati i arhivirati u svrhu stvaranja baze, ali također i u svrhu kontroliranja stanja modela kroz vrijeme eksploatacije. Uzorci se mogu u različitim vremenskim intervalima digitalizirati i međusobno uspoređivati, kako bi se na njima moglo pratiti promjene.

Izvešće o mjerenju dano je u privitku 3.

Analizom i usporedbom rezultata dobivenih trokoordinatnim mjernim uređajem i optičkim digitalizatorom može se zaključiti da postoji značajna razlika u rezultatima mjerenja. Radi se o potpuno različitim mjernim metodama i principima mjerenja. Iako je razlika u broju mjerenih točaka ostvarenih na uzorku neporecivo na strani 3D skenera točnost, rezultata mjerenja je na strani trokoordinatnog mjernog uređaja.

### **Zadaci za vježbu**

Za spojnicu (slika 19.) koja je dimenzionirana u sustavu tolerancija oblika i položaja potrebno je:

- razraditi plan mjerenja
- razraditi postupak mjerenja trokoordinatnim mjernim uređajem LK Metrology Altera
- razraditi postupak mjerenja optičkim skenerom-ATOS Q 8M.



## Literatura

- JCGM 200:2012 International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM) 3rd edition
- The International System of Units, Bureau International des Poids et Mesures, 2019  
<https://www.bipm.org/documents/20126/41483022/SI-Brochure-9-EN.pdf>
- Biserka Runje, Predavanja iz kolegija Teorija i tehnika mjerenja, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2014.
- Amalija Horvatić, Diplomski rad, Statistički alati i metode u mjeriteljstvu, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2013.
- Z. Baršić: Mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja odstupanja od oblika i položaja, Magistarski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 1999.
- ISO 1101:2017 Geometrical product specifications (GPS) — Geometrical tolerancing — Tolerances of form, orientation, location and run-out
- Ivan Marković, Završni rad, Sustav tolerancija oblika, orijentacije, položaja i netočnosti okretanja, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2017.
- Iva Čavar, Završni rad, Geometrijske tolerancije, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2022.
- Alen Grdić, Završni rad, Moderni trokoordinatni mjerni sustavi, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2015.
- Andrea Kunšt, Diplomski rad, Off-line programiranje mjernog robota Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2015.
- HRN EN ISO 286-1:2010 Geometrijske specifikacije proizvoda (GSP) -- ISO-ov kodni sustav za tolerancije linearnih izmjera -- 1. dio: Osnove tolerancija, odstupanja i dosjeda (Geometrical product specifications (GPS) — ISO code system for tolerances on linear sizes — Part 1: Basis of tolerances, deviations and fits)
- HRN EN ISO 286-2:2010 Geometrijske specifikacije proizvoda (GSP) -- ISO-ov kodni sustav za tolerancije linearnih izmjera -- 2. dio: Tablice normiranih razreda tolerancija i graničnih odstupanja za provrte i rukavce (ISO 286-2:2010; EN ISO 286-2:2010)
- Gene R. Cogorno, Geometric Dimensioning and Tolerancing for Mechanical Design, Published by McGraw Hill, 2011
- WHITE PAPER Geometric Dimensioning and Tolerancing (GD&T)  
<https://www.gom.com/en/products/metrology-software/gd-and-t/white-paper-geometric-dimensioning-and-tolerancing>
- ISO 2692:2021 Geometrical product specifications (GPS) — Geometrical tolerancing — Maximum material requirement (MMR), least material requirement (LMR) and reciprocity requirement (RPR)
- ISO 14405-1:2016 Geometrical product specifications (GPS), Dimensional tolerancing, Part 1: Linear sizes
- Georg Henzold, Geometrical Dimensioning and Tolerancing for Design, Manufacturing and Inspection, A Handbook for Geometrical Product Specification Using ISO and ASME Standards, Elsevier, 2021

- Boris Nikolić, Diplomski rad, Utjecaj koordinatnog sustava predmeta mjerenja na razinu točnosti mjernog robota Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2015.
- Branko Štrbac, Procena merne nesigurnosti koordinatnih mernih mašina, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu 2021.
- Danijel Ivšac, Diplomski rad, Usporedba 3D mjernih postupaka u kontroli kvalitete, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2014.
- 3D Skeneri | TOPOMATIKA trodimenzionalno skeniranje, optički mjerni sustavi i računalna obrada d.o.o. [https://topomatika.hr/proizvodi/3d-skeneri/?gclid=CjwKCAiA9ourBhAVEiwA3L5RFkxPBf93l80qnUfE8XYstVzJ8Bnk04kiMR8TVgPPoYjmes0JVuwqJBoC37oQAvD\\_BwE](https://topomatika.hr/proizvodi/3d-skeneri/?gclid=CjwKCAiA9ourBhAVEiwA3L5RFkxPBf93l80qnUfE8XYstVzJ8Bnk04kiMR8TVgPPoYjmes0JVuwqJBoC37oQAvD_BwE)

## Kazalo slika

Slika 1. Vrste pogrešaka .....	11
Slika 2. Abbeov princip mjerenja (Abbeova pogreška) .....	12
Slika 3. Točnost i preciznost .....	12
Slika 4. Primjer mjernih uređaja temeljenih na aktivnoj mjernoj metodi: a) TMU Erowa, b) 3D digitalizator ATOS .....	14
Slika 5. Primjeri pasivnih optičkih mjernih sustava (TRITOP, ARAMIS, PONTOS).....	15
Slika 6. Potpuna mjeriteljska informacija .....	15
Slika 7. Spojnica dimenzionirana u sustavu tolerancija duljinskih mjera i dosjeda .....	17
Slika 8. Spoj kućišta osovine i spojnice .....	17
Slika 9. Tolerancijski okvir .....	19
Slika 10. Označavanje tolerancija .....	20
Slika 11. Primjeri kada se tolerancija primjenjuje na liniju ili površinu .....	20
Slika 12. Primjeri kada se tolerancija primjenjuje na izvedene značajke - os (lijevo) i središnju površinu (desno) .....	20
Slika 13. Primjer kada se tolerancija odnosi na sve središnjicom prikazane osi .....	21
Slika 14. Tolerancija položaja duljinskim mjerama .....	26
Slika 15. Zadano tolerirano polje unutar kojega se smije naći središte provrta .....	26
Slika 16. Predmet mjerenja dimenzioniran u sustavu tolerancija oblika i položaja .....	27
Slika 17. Primjer 1: a) Sustav tolerancija dimenzijskih mjera i dosjeda .....	28
Slika 18. Primjer 2: Sustav tolerancija dimenzijskih mjera i dosjeda .....	28
Slika 19. Spojnica u sustavu tolerancija, oblika i položaja .....	29
Slika 20. Trokoordinatni mjerni uređaj .....	30
Slika 21. Temeljne konstrukcijske izvedbe trokoordinatnih mjernih uređaja .....	31
Slika 22. Primjer izvedenog geometrijskog elementa .....	32
Slika 23. Geometrijski elementi s obzirom na prikaz (model) geometrije predmeta mjerenja.....	33
Slika 24. Podešavanje (ugađanje) mjernog ticala.....	33
Slika 25. Vektorski dijagram mjerenja površinske točke mjernog objekta .....	35
Slika 26. Izvori pogrešaka - unutarnji utjecaji na mjernu nesigurnost .....	36
Slika 27. Izvori pogrešaka - vanjski utjecaji na mjernu nesigurnost .....	36
Slika 28. Predmet mjerenja - aluminijski odljevak poklopca diferencijala .....	37
Slika 29. Postupak ugađanja.....	38
Slika 30. Etalon za ugađanje.....	38
Slika 31. Učvršćenje mjernog uzorka za stol .....	39
Slika 32. Učvršćenje mjernog uzorka s druge strane.....	39
Slika 33. Postupak uzimanja mjerne točke na površini mjernog uzorka.....	39
Slika 34. Sprejevi za korištenje u 3D skeniranju .....	40
Slika 35. Princip rada digitalizatora ATOS .....	41
Slika 36. ATOS prijenosni optički 3D digitalizatori.....	42
Slika 37. Referentne točke .....	42
Slika 38. Mjerni uzorak s referentnim točkama.....	43

Slika 39. Objekti za podešavanje optičkih mjernih sustava: ploča i križ .....	44
Slika 40. Podešavanje mjernog uređaja i rezultati podešavanja .....	44
Slika 41. Postavljanje objekta mjerenja u mjerni volumen 3D skenera .....	45
Slika 42. Slika predmeta mjerenja lijeve i desne kamere .....	45
Slika 43. Virtualni prikaz mjernog volumena skenera .....	46
Slika 44. a) Projicirani uzorak skenera na objekt mjerenja b) Prikaz mjernih točaka na mjernom objektu u jednom skenu .....	46
Slika 45. Spojene mjerne serije .....	47
Slika 46. Rezultat skeniranja – poligonalna mreža trokuta (STL datoteka) .....	47

## Kazalo tablica

Tablica 1. Osnovne SI jedinice .....	5
Tablica 2. Numeričke vrijednosti konstanti.....	6
Tablica 3. Predmetci za tvorbu decimalnih jedinica .....	7
Tablica 4. Vrijednosti, nazivi i znakovi binarnih predmetaka za tvorbu informatičkih jedinica .....	8
Tablica 5. Sustav tolerancija oblika i položaja.....	19
Tablica 6. Primjeri primjene tolerancija oblika, položaja, orijentacije, profila i netočnosti okretanja	25
Tablica 7. Rješenje.....	27
Tablica 8. Minimalan broj točaka za definiranje osnovnih geometrijskih elemenata .....	32

## Popis ključnih pojmova

Međunarodni sustav mjernih jedinica SI

Pogreške mjerenja

Mjerna nesigurnost

Tolerancije oblika i položaja

Koordinatno mjeriteljstvo

Trokoordinatni mjerni uređaji

Optički 3D digitalizatori

# **Impresum**

**Autori: Biserka Runje**

**Lektor:**

**Recenzent: Amalija Horvatić Novak**







Izveštće o mjerenju (LFSB, Zagreb)

Predmet mjerenja: Odljevak\_diplomski  
 Mjeritelj: Danijel Ivšac  
 Datum: 20.11.2014.  
 Lokacija: Laboratorij za precizno mjerenje dužina, FSB, Zagreb  
 Mjerni sustav: Ferranti Merlin 750 (Renishaw TP20, PH10)  
 Temperatura: 20°C

1. strana

(mm)	ACTUAL	NOMINAL	LO-TOL	HI-TOL	DEVIATION	GRAPHIC
ERROR						
Plane:Baza_A						
Flatness	0.155	0.150				+++>
0.005						
Plane:Baza_A--Plane:CP_1						
Length-Zavg	18.628	18.000	-0.200	+0.200	0.628	----+-->
0.428						
Plane:CP_1--Plane:CP_3*						
Length-Zavg	230.380	229.200	-0.500	+0.500	1.180	----+-->
0.680						
Plane:CP_1						
Flatness	0.116	0.200				+--*-
Parallelism	0.200	0.300,FA(Baza_A)				+--*-
Circle:CP_4						
Diameter	154.869	156.000	-1.200	-0.800	-1.131	-*--+----
Circle:CP_6						
X-axis	0.072	364.794			-364.722	
Y-axis	0.148	-207.497			207.645	
Diameter	78.959	80.000	-1.000	-0.500	-1.041	<---+---- -
0.041						
TruePosition2D	0.000			0.300		*----
	DATUM: A,B					
Circle:CP_7						
Diameter	60.410	62.000	-0.600	+0.000	-1.590	<---+---- -
0.990						
Concentricity	0.346	0.300,FA(Baza_B)				+++>
0.046						

```

Circle:CP_8
Diameter      50.842    52.000    -1.200    -1.000    -1.158  -*+----
Circularity    0.017
-----
--
Plane:Baza_A--Plane:CP_11
Length-Zavg   147.000    146.700    -0.500    +0.500    0.300  ---+*-
-----
--
Plane:CP_11
Flatness      0.055      0.150
Parallelism   0.051      0.200,DAT(A)
-----
--
Plane:Baza_A--Plane:CP_12
Length-Zavg   13.808     13.600     -0.200     +0.200     0.208  ---+-->
0.008
-----
--
Plane:CP_12
Flatness      0.064      0.100
-----
--
Circle:Baza_B--Circle:CP_14_1_1
Length-Xavg   1.162      1.130     -0.100     +0.100     0.032  ---+*--
Length_Yavg   96.512     96.440     -0.300     +0.300     0.072  ---+*--
-----
--
Circle:Baza_B--Circle:CP_14_2
Length-Xavg   61.985     62.000     -0.300     +0.300     -0.015 ---*---
Length_Yavg   73.834     73.730     -0.300     +0.300     0.104  ---+*--
-----
--
Circle:Baza_B--Circle:CP_14_3
Length-Xavg   95.338     95.350     -0.300     +0.300     -0.012 ---*---
Length_Yavg   12.470     12.390     -0.200     +0.200     0.080  ---+*--
-----
--
Circle:CP_15_1
X-axis        -1.162     -1.126
Y-axis        96.512     96.457
Z-axis        -18.247    -18.254
Diameter      9.687      9.650     -0.100     +0.100     0.037  ---+*--
TruePosition2D 0.111
0.200
DATUM: A,B
-----
--
Circle:CP_15_2
X-axis        61.985     61.908
Y-axis        73.834     73.898
Z-axis        -18.199    -18.199
Diameter      9.700      9.650     -0.100     +0.100     0.050  ---+*--
TruePosition2D 0.001
0.200
DATUM: A,B
-----
--

```

```

Circle:CP_15_3
X-axis      95.338    95.325                0.013
Y-axis      12.470    12.569                -0.099
Z-axis      -18.342   -18.342                0.000
Diameter     9.699     9.650    -0.100    +0.100    0.049  ---+*--
TruePosition2D 0.001                0.200                *---
                DATUM: A,B

```

```

-----
--
Circle:CP_16_1--Circle:CP_16_2
Lengthmax    268.019    268.700    -0.500    +0.500    -0.681 <---+---    -
0.181

```

```

-----
--
Circle:CP_17_2--Circle:CP_17_3
Lengthmax    240.530    259.270    -0.100    +0.100    -18.740 <---+---    -
18.640

```

```

-----
--

```

2. strana

(mm) ERROR	ACTUAL	NOMINAL	LO-TOL	HI-TOL	DEVIATION	GRAPHIC
Plane:BAZA_A						
Flatness	0.141	0.150				+---*
Plane:BAZA_A--Plane:CP_1						
Length-Zavg	18.899	18.000	-0.200	+0.200	0.899	----+-->
	0.699					
Plane:BAZA_A--Plane:CP_2_4						
Length-Zavg	174.572	174.200	-0.500	+0.500	0.372	----+*-
Plane:BAZA_A--Plane:CP_2_5						
Length-Zavg	174.511	174.200	-0.500	+0.500	0.311	----+*-
Plane:CP_1--Plane:CP_3						
Length-Zavg	230.652	229.200	-0.500	+0.500	1.452	----+-->
	3.952					
Plane:CP_2_4						
Flatness	0.028	0.100				+*--
Parallelism	0.032	0.100,FA(BAZA_A)				+*--
Plane:CP_2_5						
Flatness	0.059	0.100				+*-
Parallelism	0.065	0.100,FA(BAZA_A)				+*-
Plane:CP_3						
Flatness	0.057	0.100				+*-
Parallelism	0.404	0.150,FA(PLN001)				+-->
	0.254					
Circle:BAZA_C						
X-axis	143.784	143.733			0.051	
Y-axis	0.000	0.074			-0.074	
Z-axis	-18.741	-18.738			-0.003	
TruePosition2D	0.102			0.050		+-->
	0.052					
	DATUM: A,B					
Circularity	0.000			0.050		*---
Diameter	9.749	9.753	-0.100	+0.100	-0.004	---*---

Slot:CP\_27

X-axis	-90.338	-90.252			-0.086	
Y-axis	-76.352	-76.444			0.092	
Z-axis	-2.245	-2.205			-0.040	
Length	7.854	8.000	-0.100	+0.150	0.146	<---+---
Width	9.342	10.00	-0.100	+0.150	-0.658	<---+---
TruePosition2D	0.011			0.200		*---

DATUM: A,B

-----

--

Circle:CP\_16\_1--Circle:CIR006

Lengthmax	267.279	268.70	-0.100	+0.100	-1.427	<---+---
-----------	---------	--------	--------	--------	--------	----------

267.179

-----

--

Circle:CP\_17\_1--Circle:CP\_17\_2

Length-Xmax	240.539	259.27	-0.100	+0.100	18.731	<---+---
-------------	---------	--------	--------	--------	--------	----------

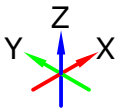
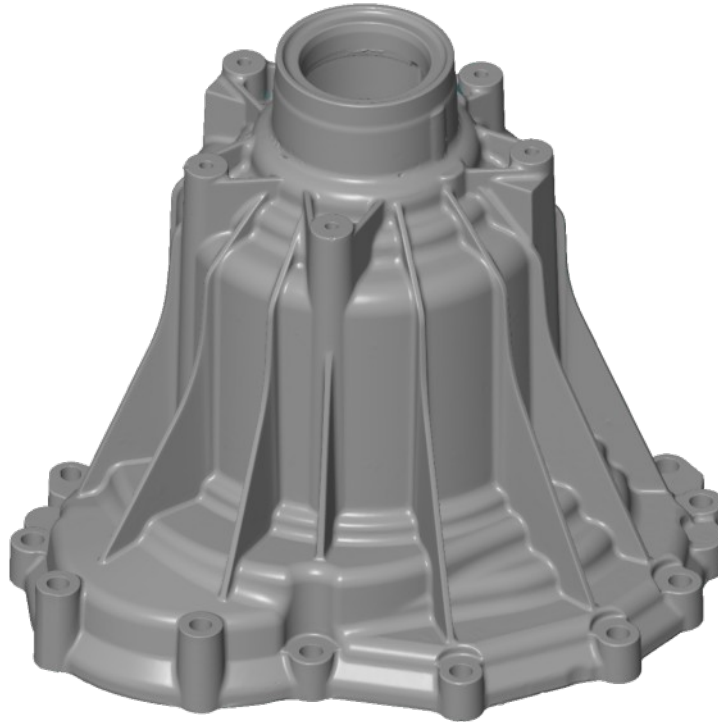
240.439

-----

--

**Datum izdavanja:** 2014-11-26**Izvješće izdao:** Danijel Ivšac, bacc.ing.mech.

**Sjedište:** Ilica 231, 10000 Zagreb - HR  
**Laboratorij:** Fallerovo šetalište 22, 10000 Zagreb - HR  
**T/F:** + 385 1 349 6010; **E:** info@topomatika.hr  
**MB:** 1639129; **Žrn:** 2340009-1110084062 PBZ  
**OIB:** 51475743156



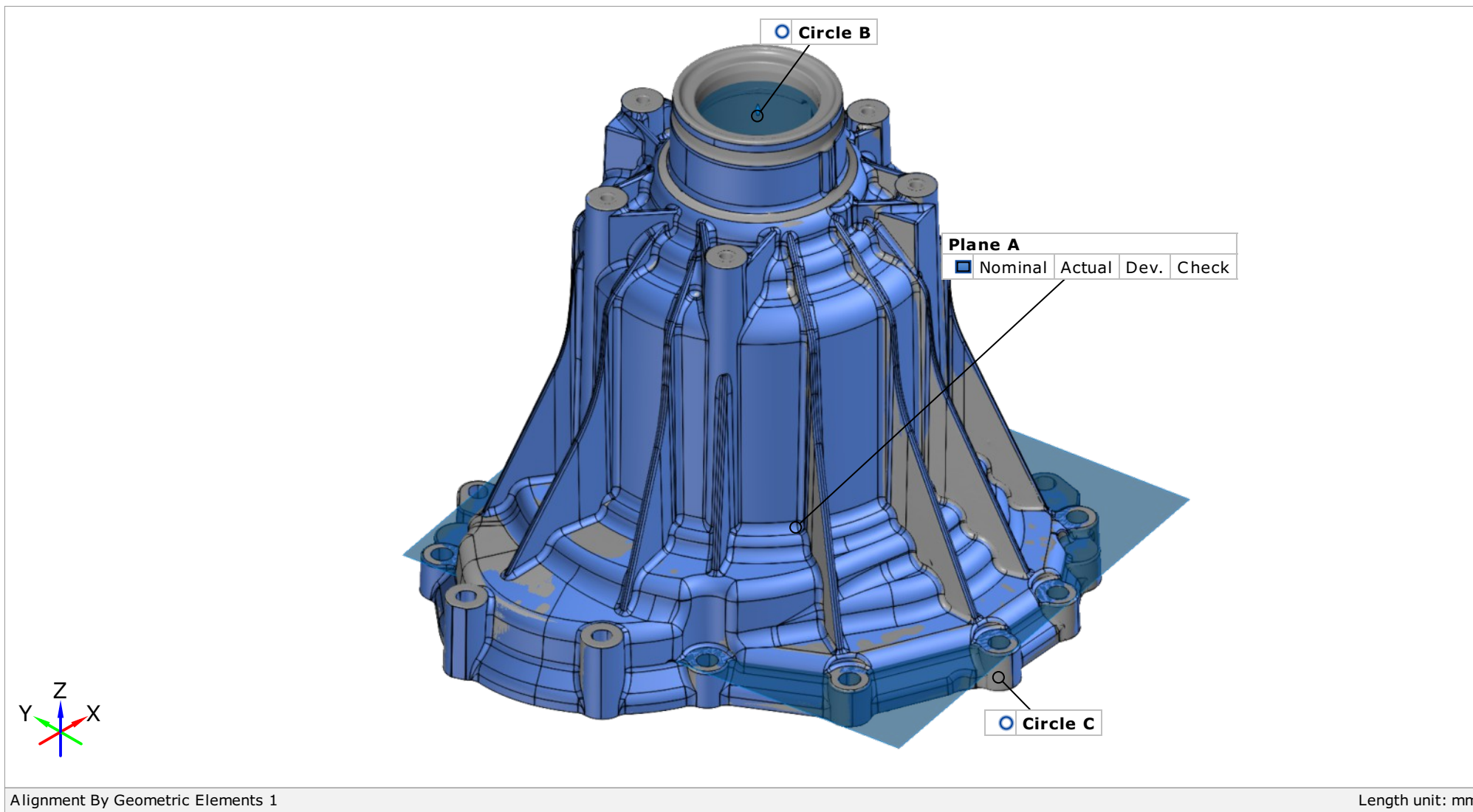
Alignment By Geometric Elements 1

Length unit: mm

**Naručitelj:****Predmet mjerenja:** Aluminijski odljevak**Datum mjerenja:** 2014-11-04**Lokacija:** Topomatika, Fallerovo šetalište 22, Zagreb**Mjeritelj:** Danijel Ivšac**Rezultati mjerenja:** na stranicama 2 do 33**Mjerni sustav:** ATOS CORE 300**Mjerno područje:** 300x230x230**Serijski broj:** 131041**Temperatura i vlažnost:** 24±1°C; 55%±10%**Napomena:**

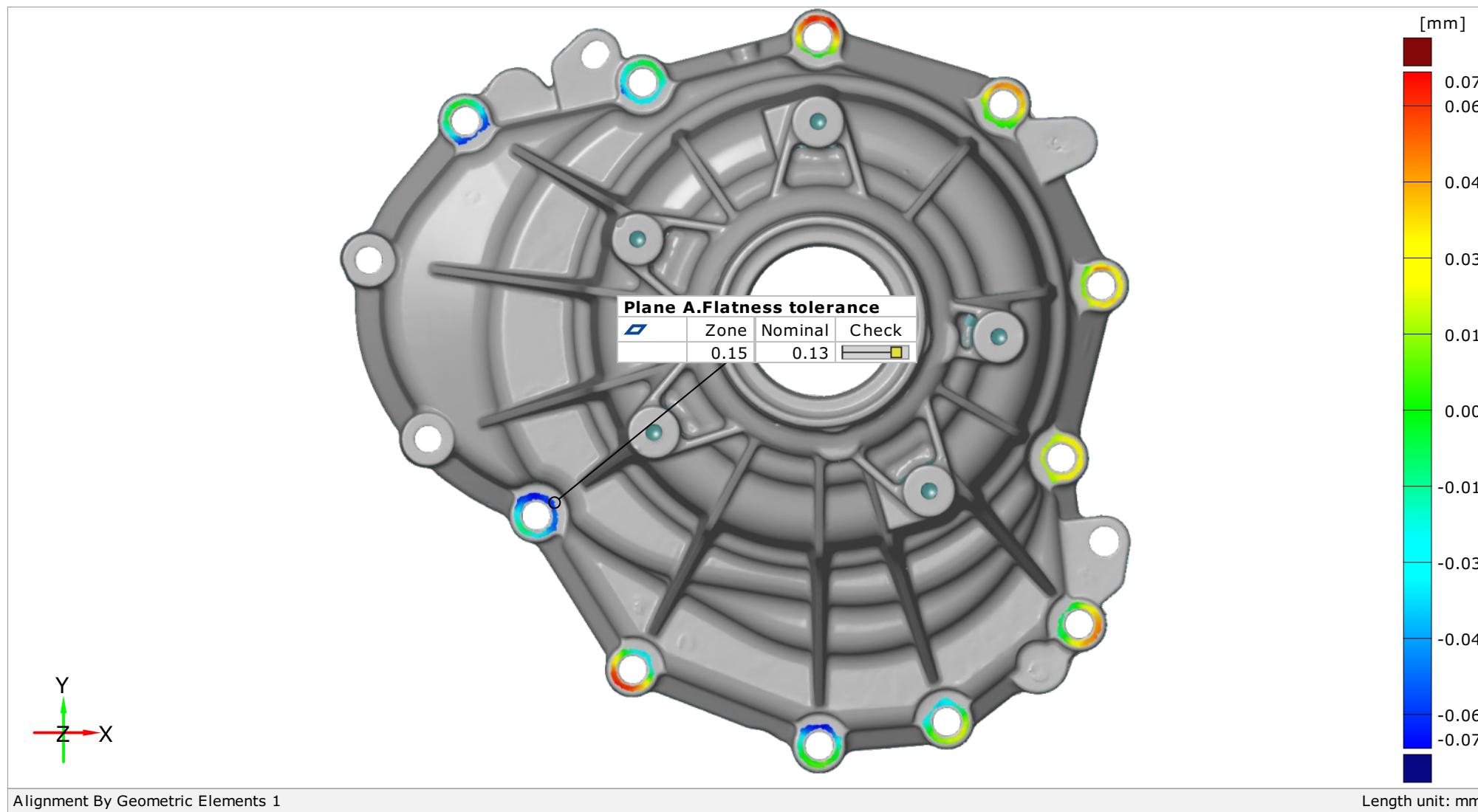
Naslovna .....	1
Sadržaj.....	2
Poravnanje CAD modela i rezultata skeniranja (STL mreže): Plane A - Circle B - Circle C.....	3
Ravnost baze A.....	4
CP 1-3 .....	5
CP 1 Ravnost - Paralelnost.....	6
CP 2 Ravnost - Paralelnost.....	7
CP 3 Ravnost - Paralelnost.....	8
CP 4-13.....	9
CP 11 Ravnost - Paralelnost .....	10
CP 12 Ravnost.....	11
CP 14 X.....	12
CP 14 Y.1.....	13
CP 14 Y.2.....	14
CP 15.....	15
CP 15 Pozicija.....	16
CP 16-17 .....	17
CP 18.....	18
CP 19.....	19
CP 20-21 (Detail E).....	20
CP 22-23 .....	21
CP 24-26 .....	22
CP 27 .....	23
CP 28 - Usporedba površina GO - NO GO $\pm 0,3$ mm.....	24
CP 28 - Usporedba površina GO - NO GO $\pm 0,3$ mm.....	25
Usporedba površina .....	26
Kontrola odstupanja na presjeku X +0,000 mm .....	27
Kontrola debljine stijenke po cijeloj površini.....	28
Kontrola debljine stijenke u točkama.....	29
Tablica.....	30

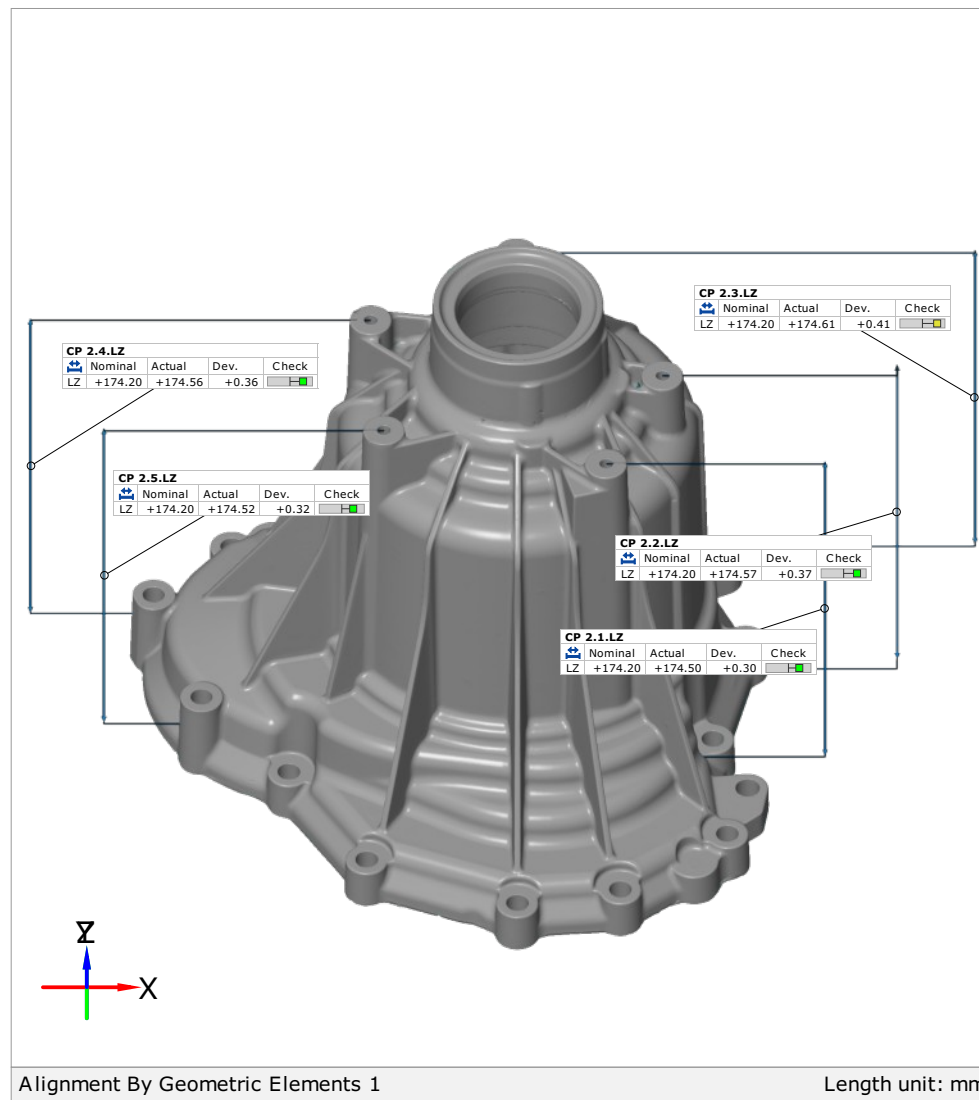
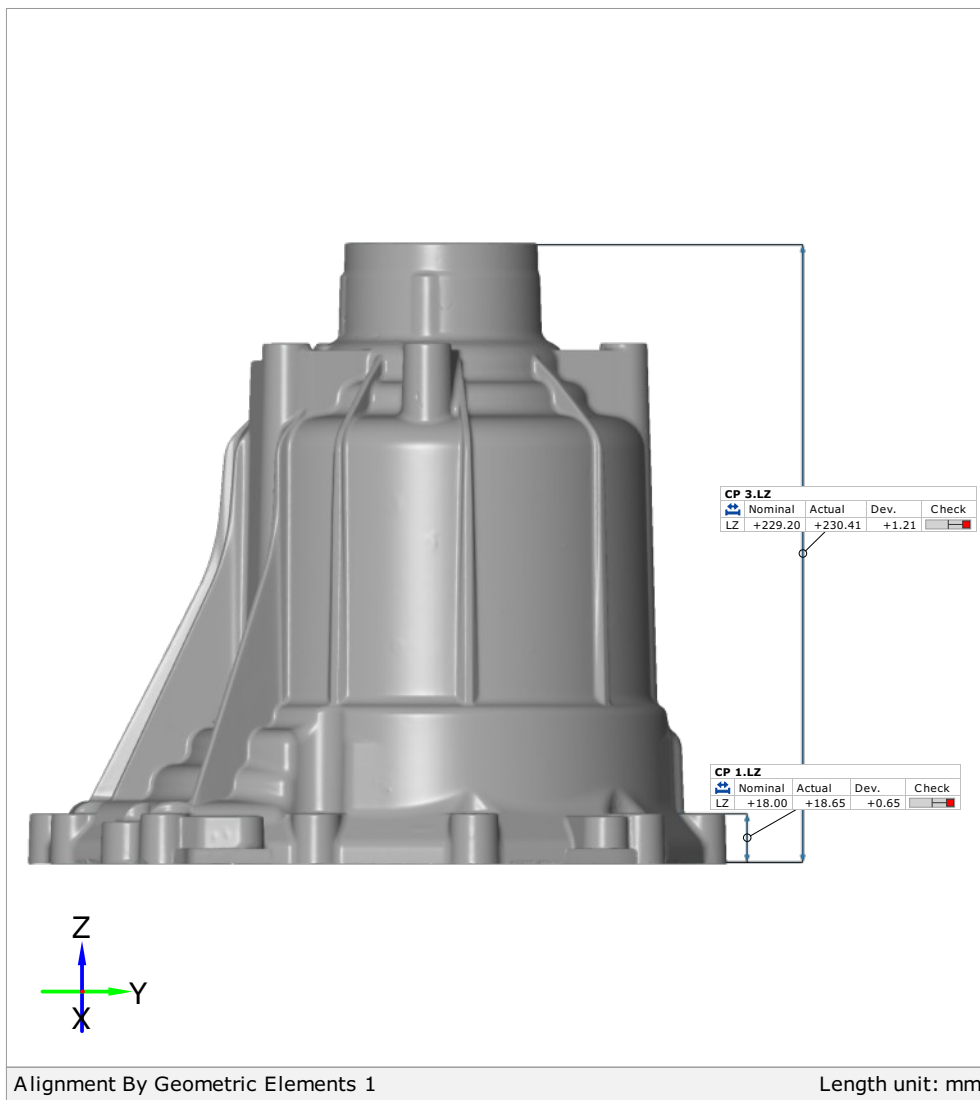




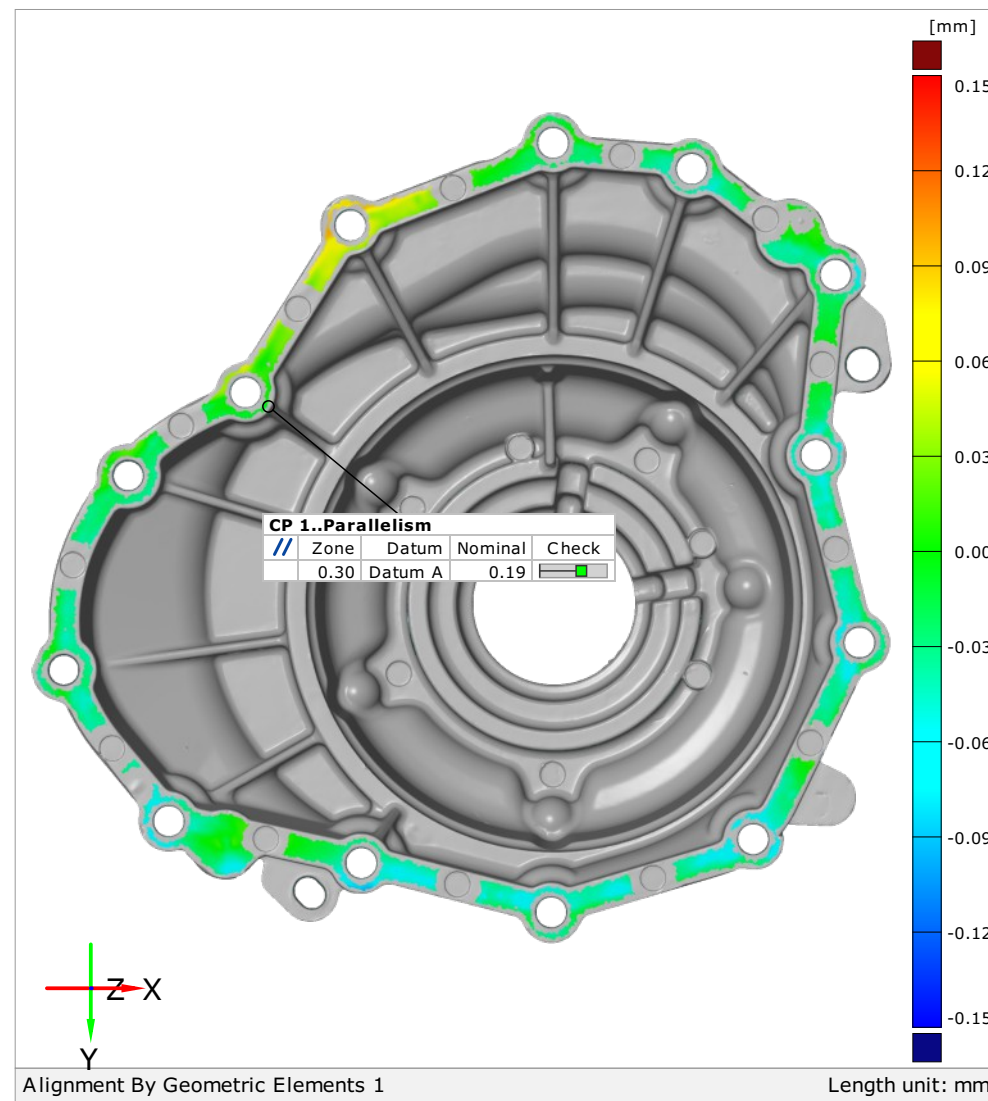
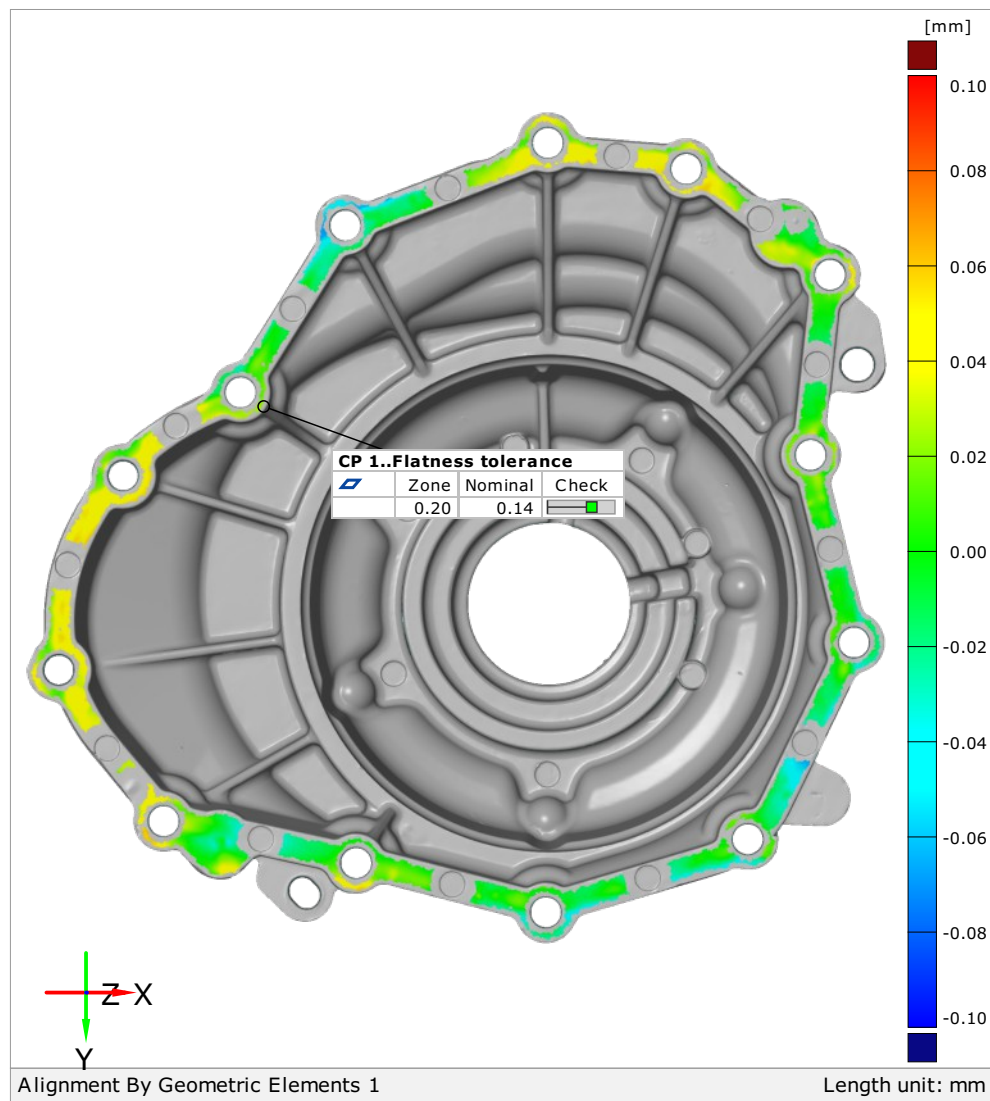
## Ravnost baze A

4/33

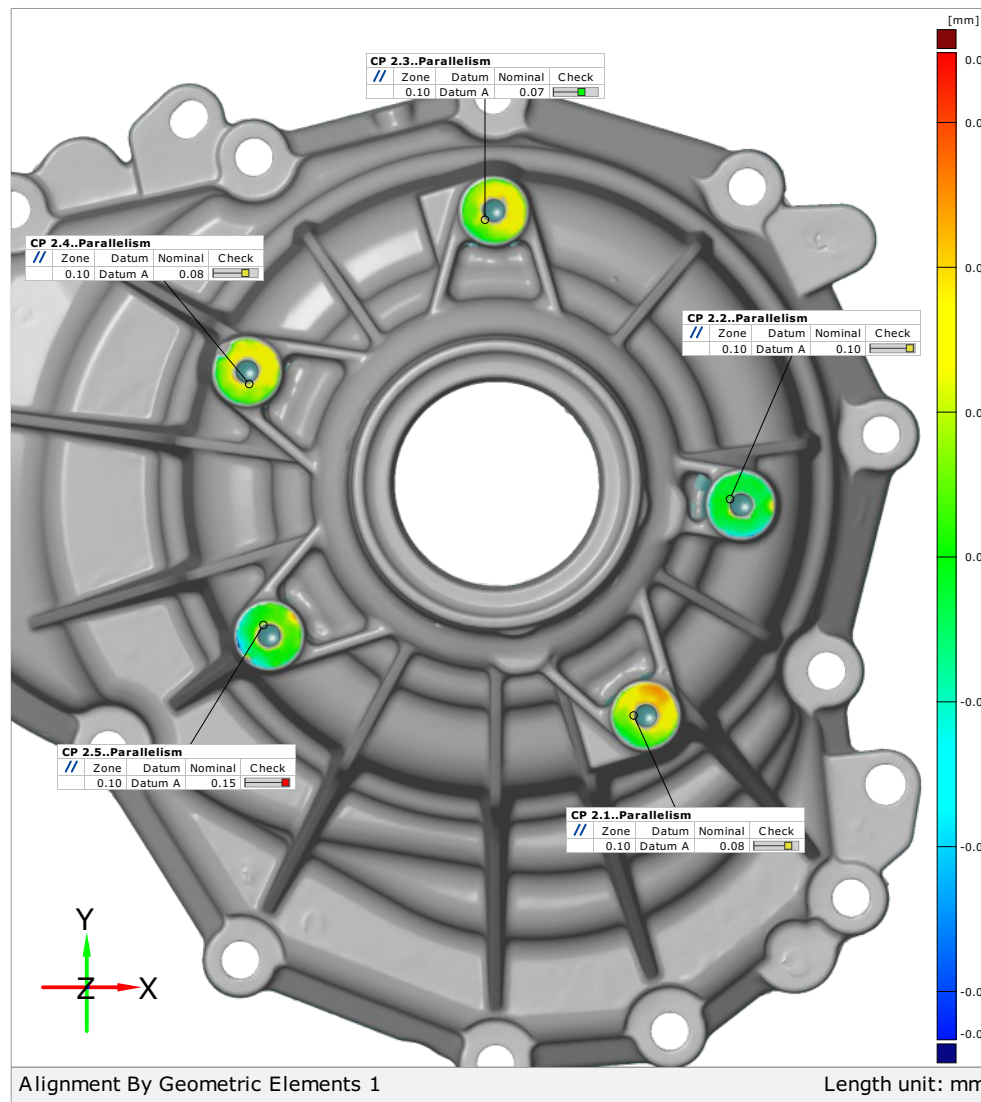
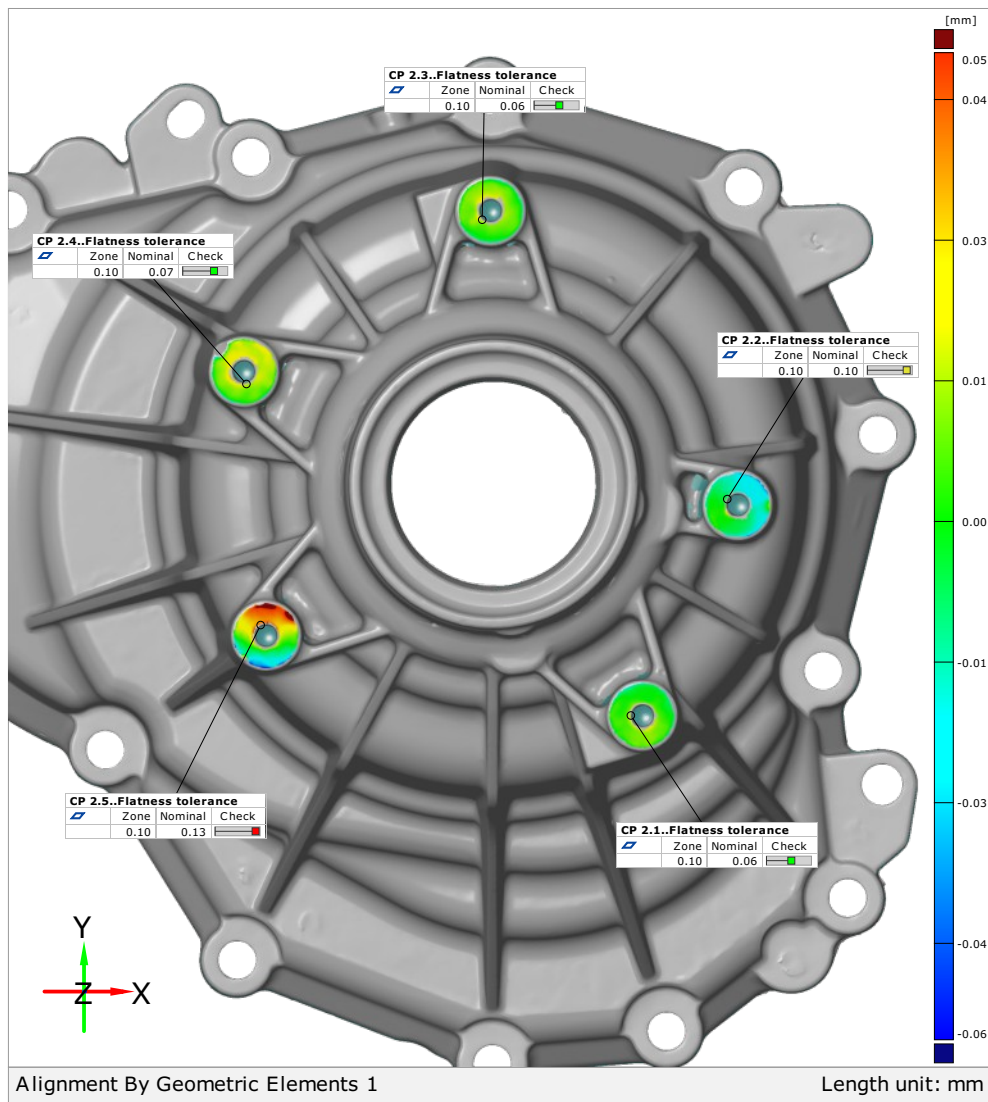




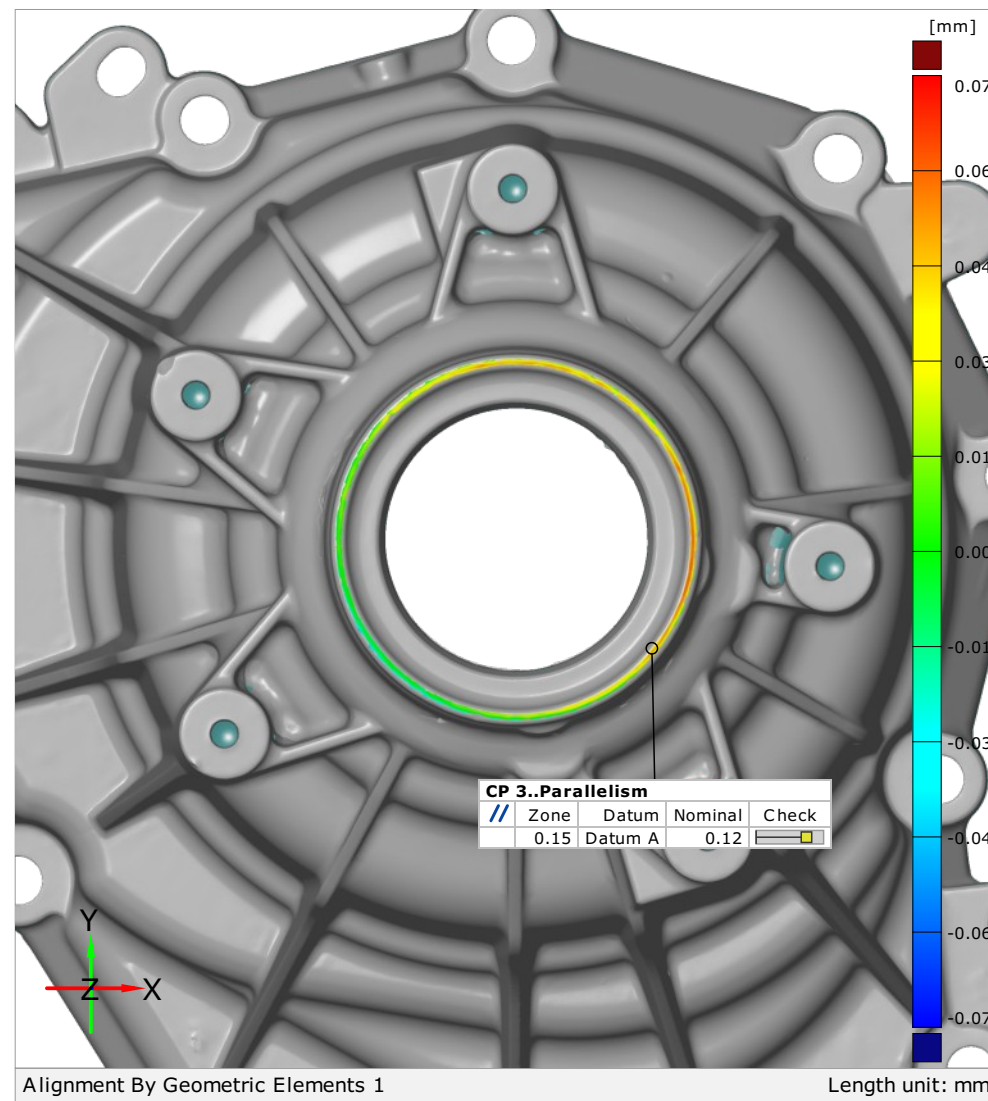
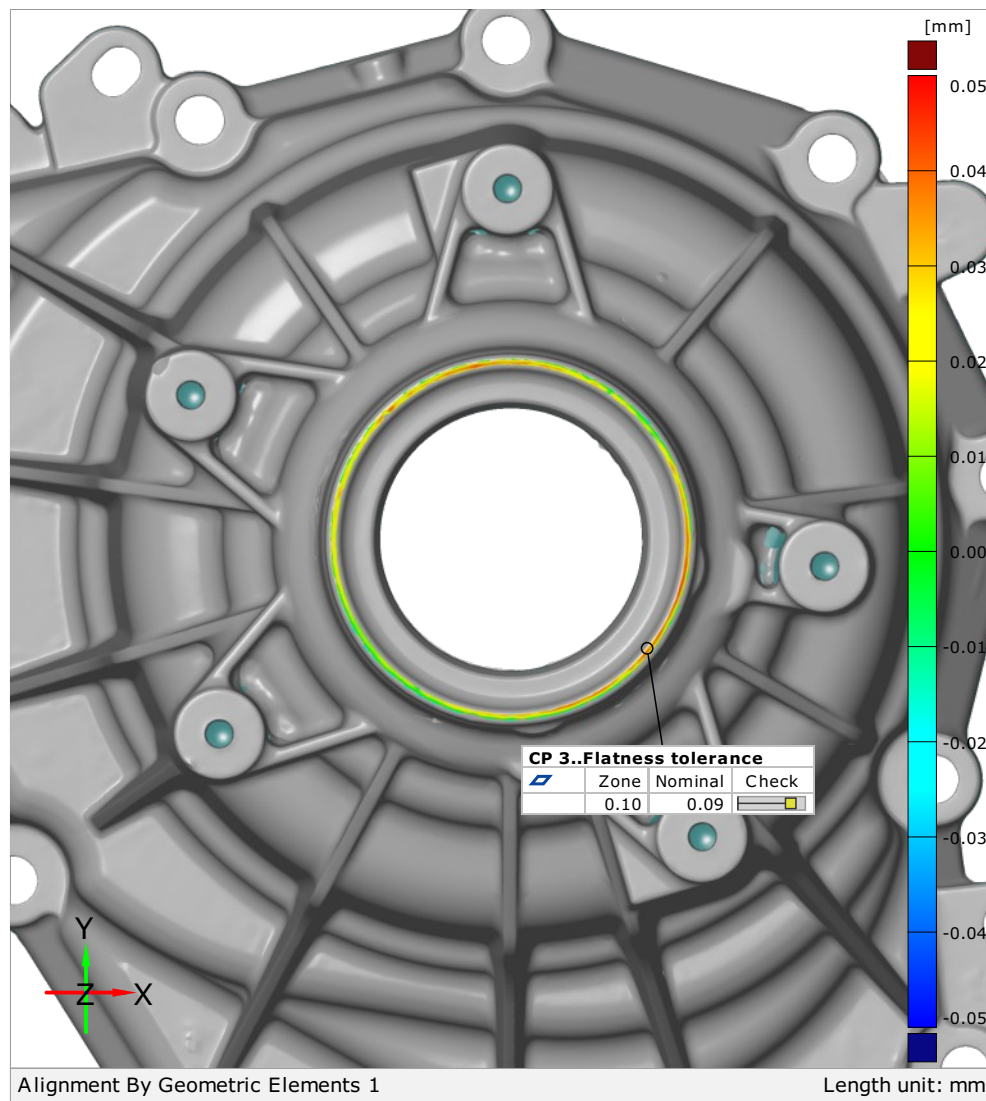
CP 1 Ravnost - Paralelnost

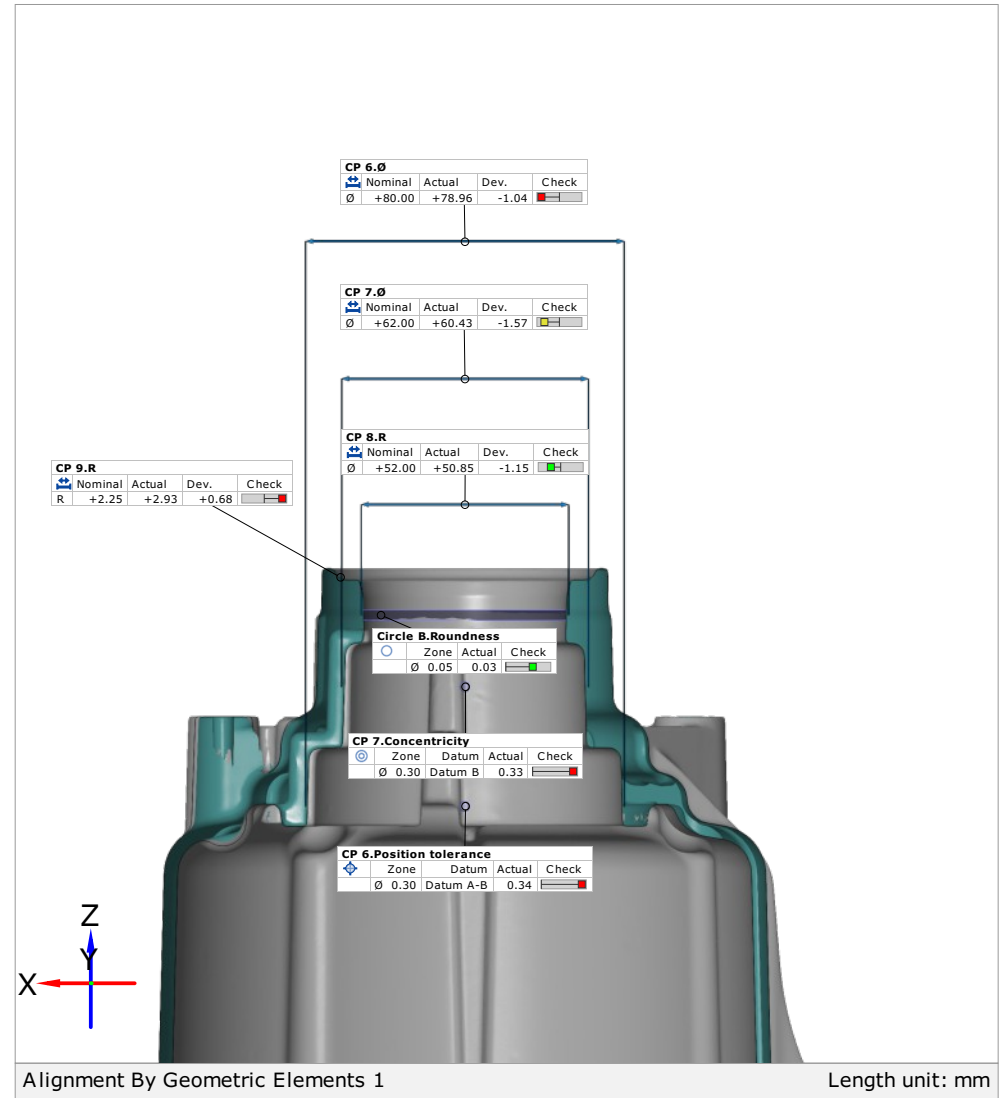
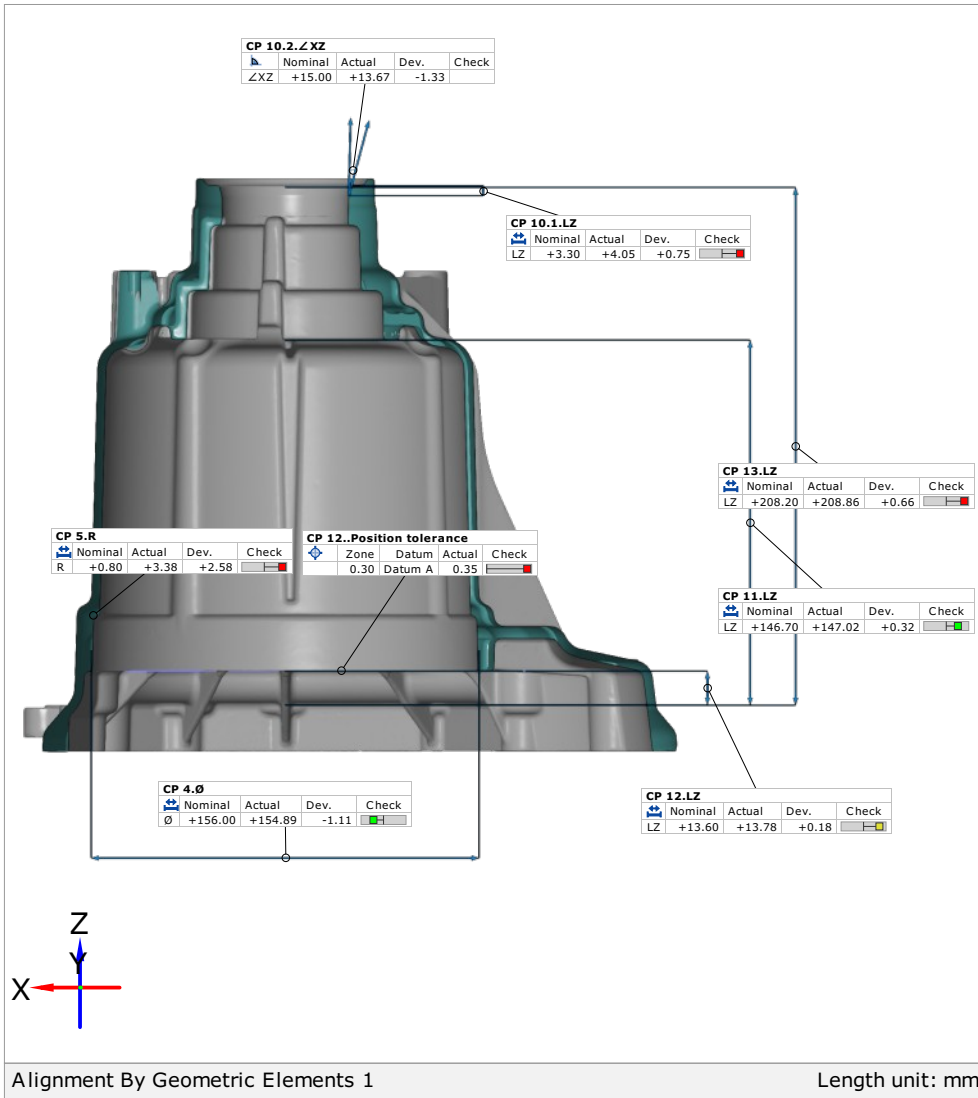


CP 2 Ravnost - Paralelnost

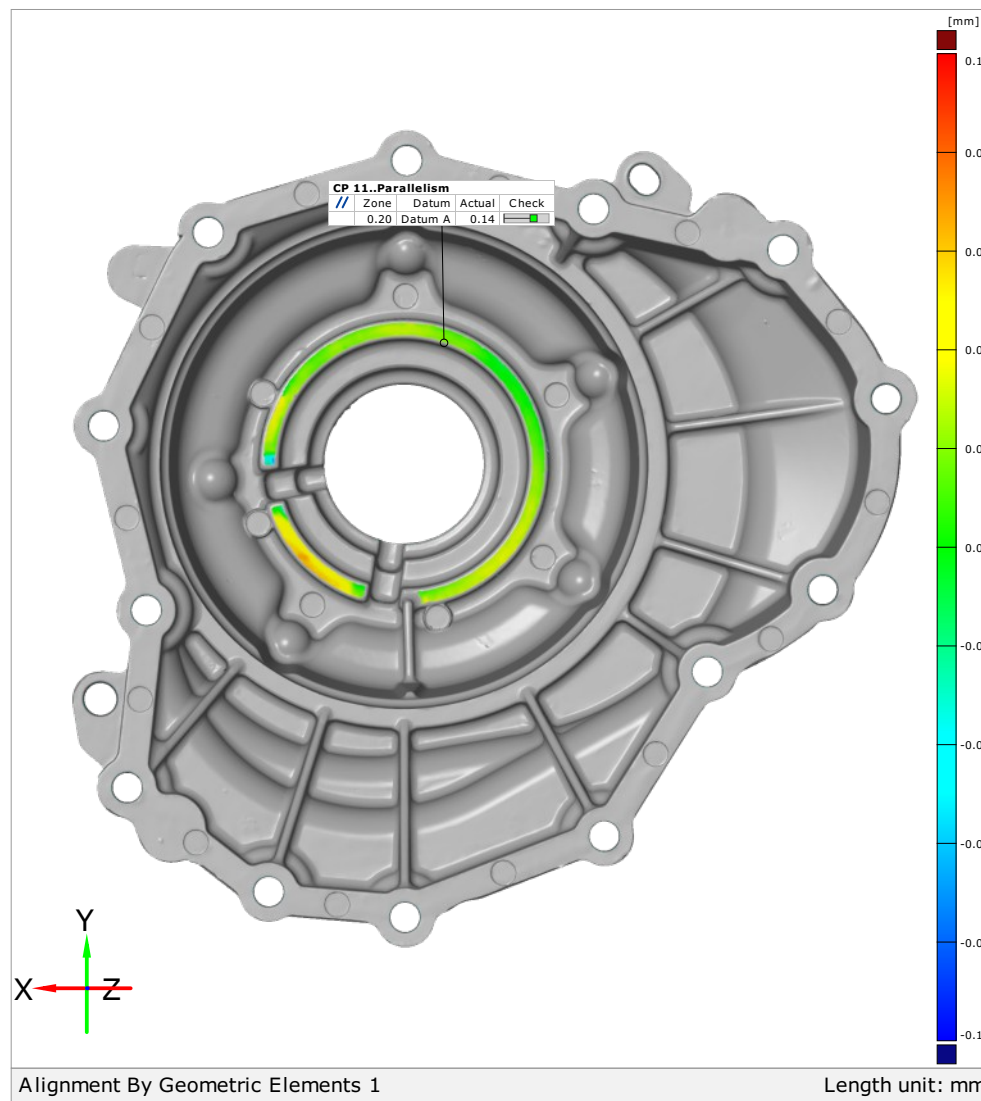
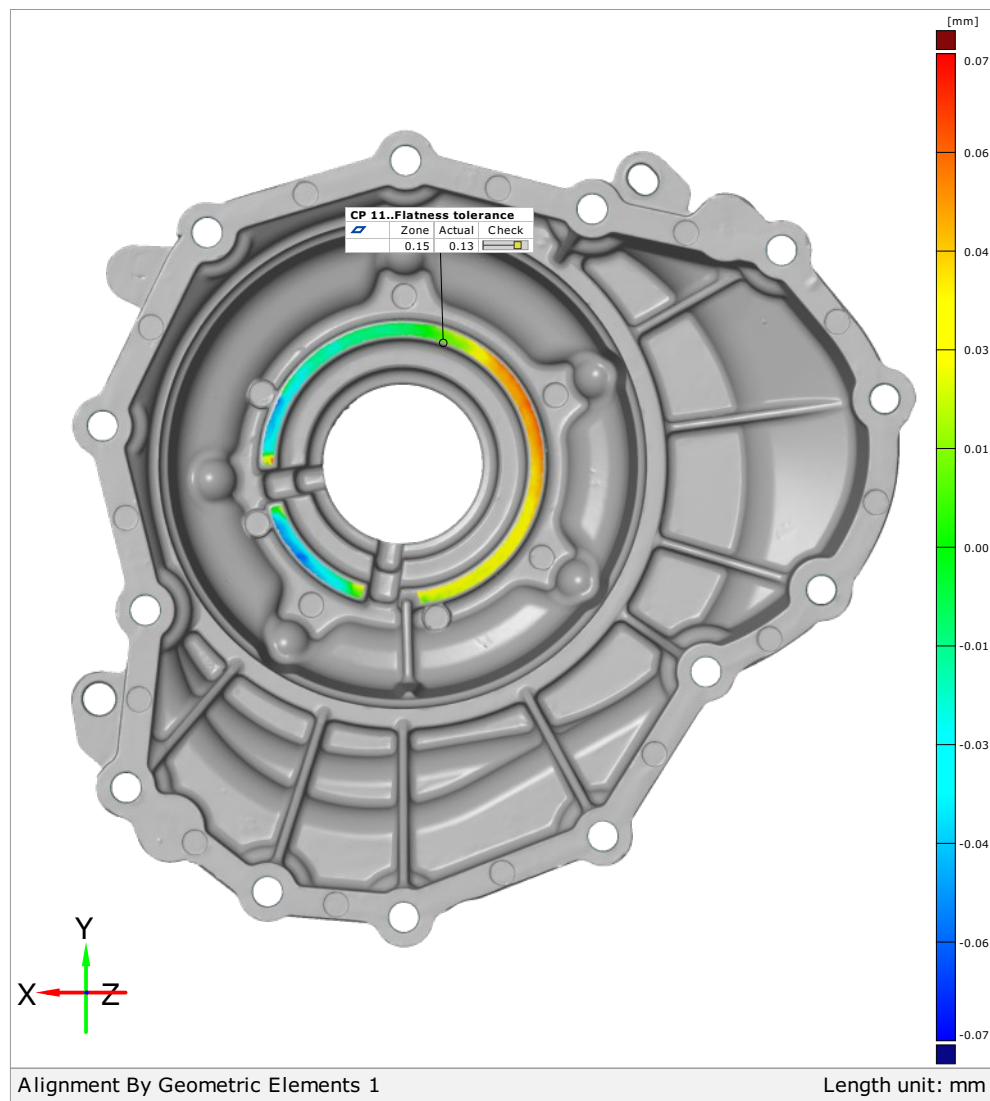


CP 3 Ravnost - Paralelnost





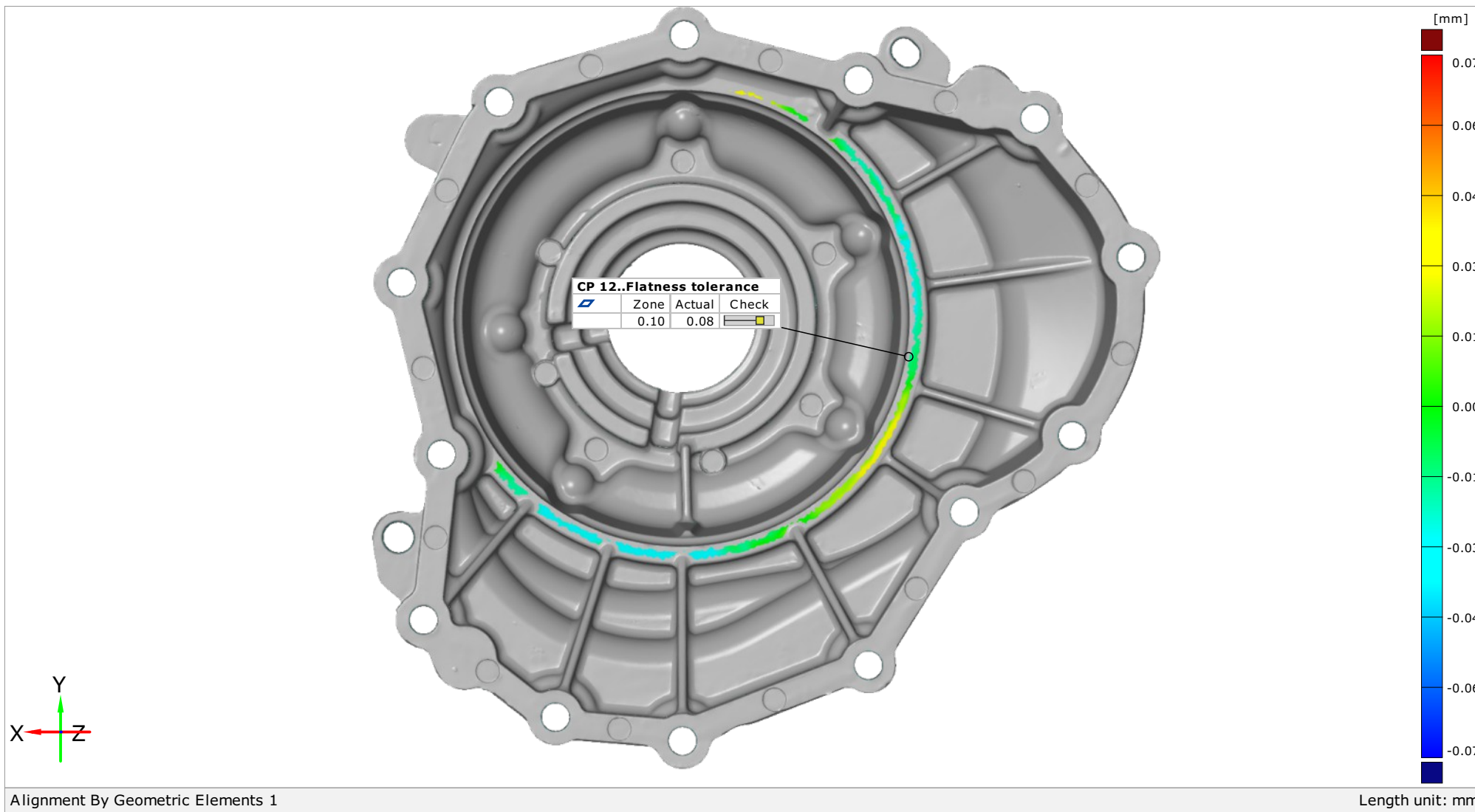
CP 11 Ravnost - Paralelnost

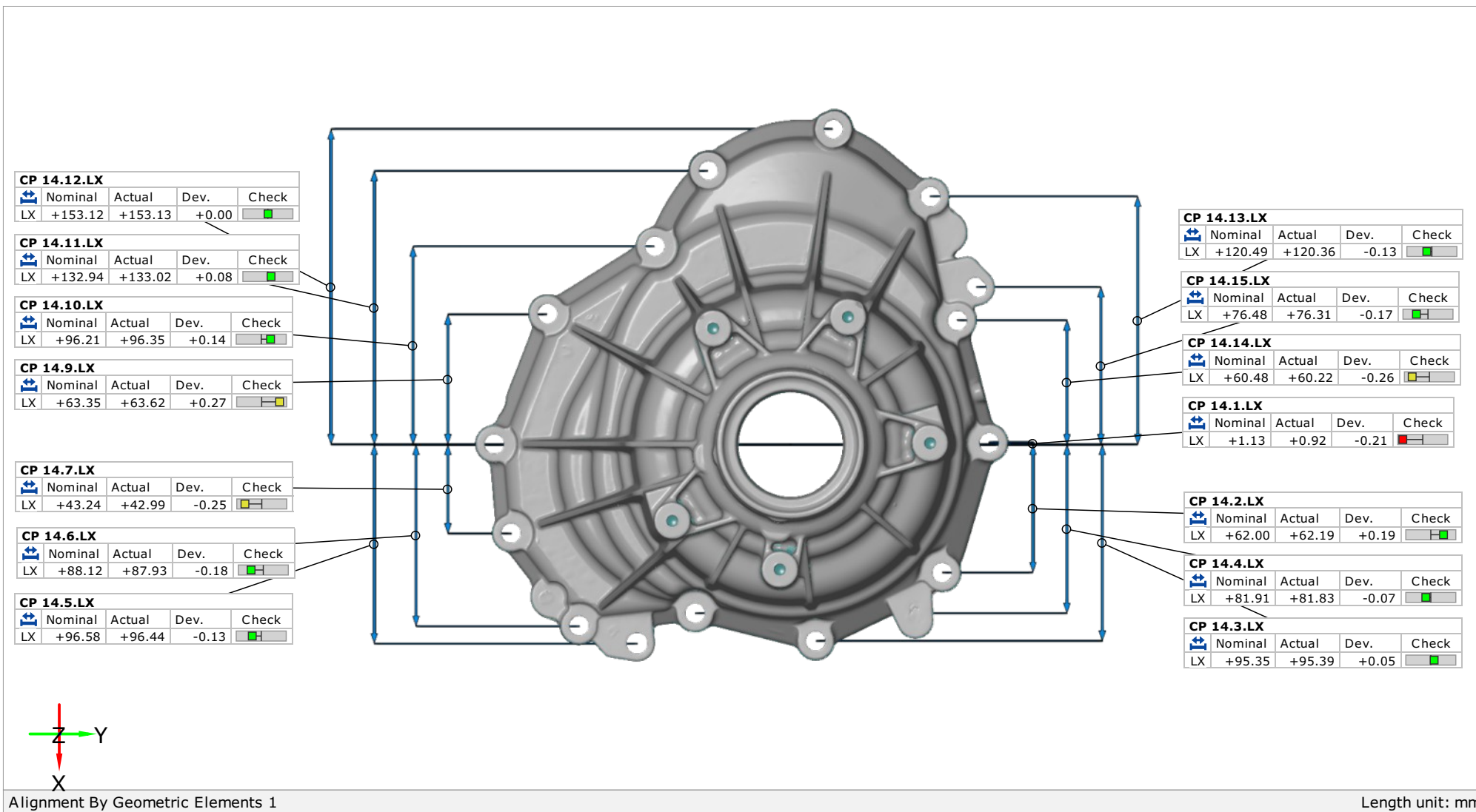


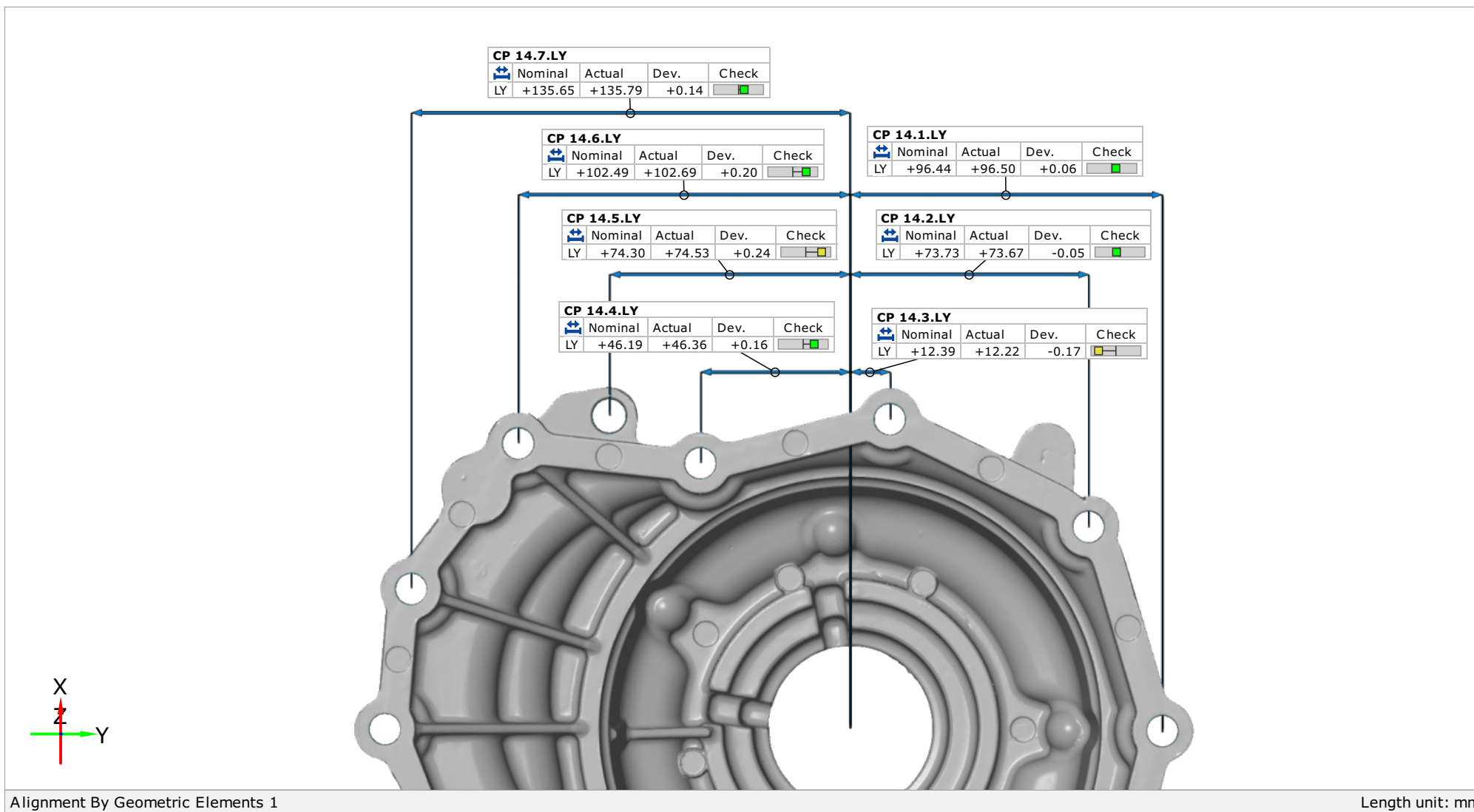


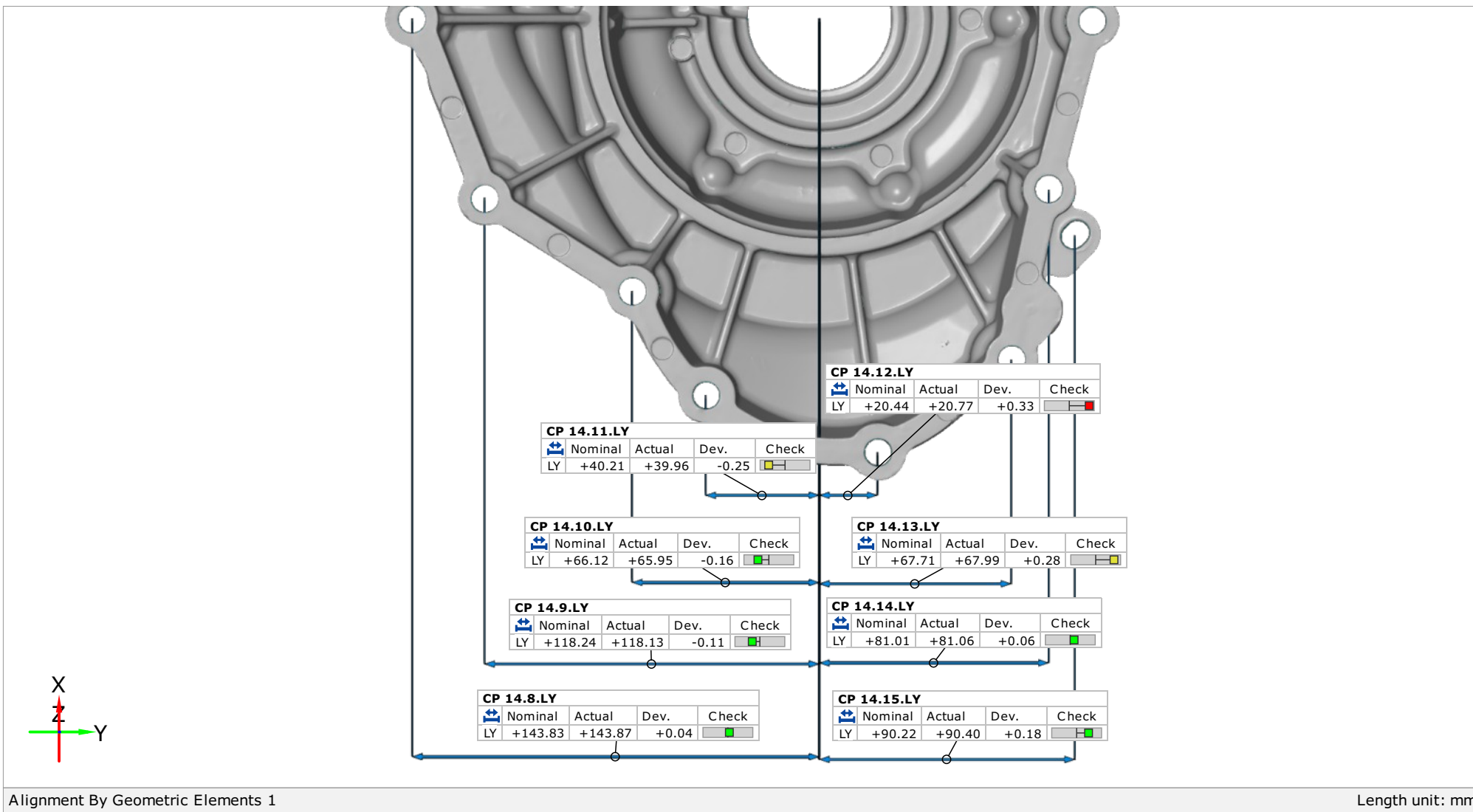
CP 12 Ravnost

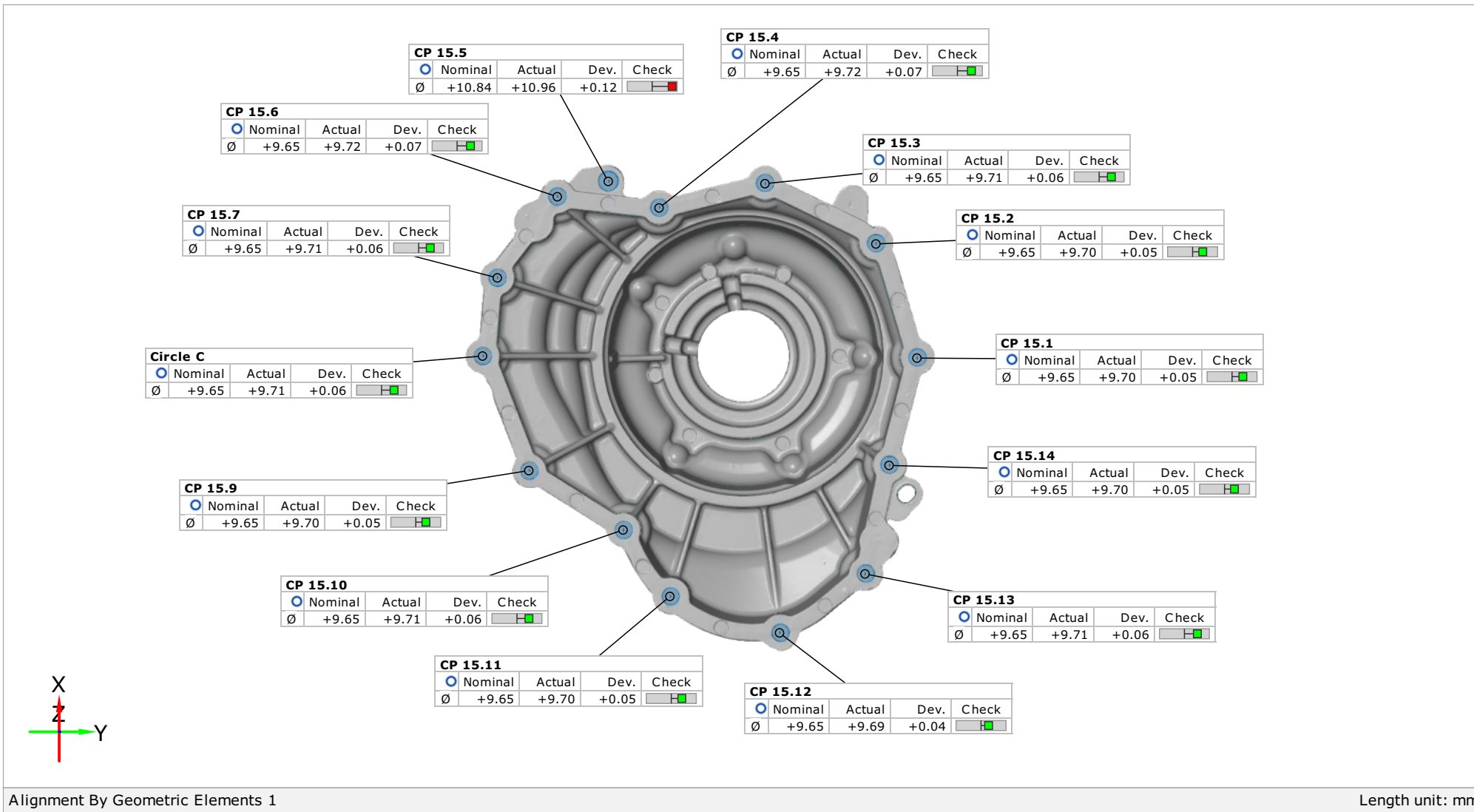
11/33



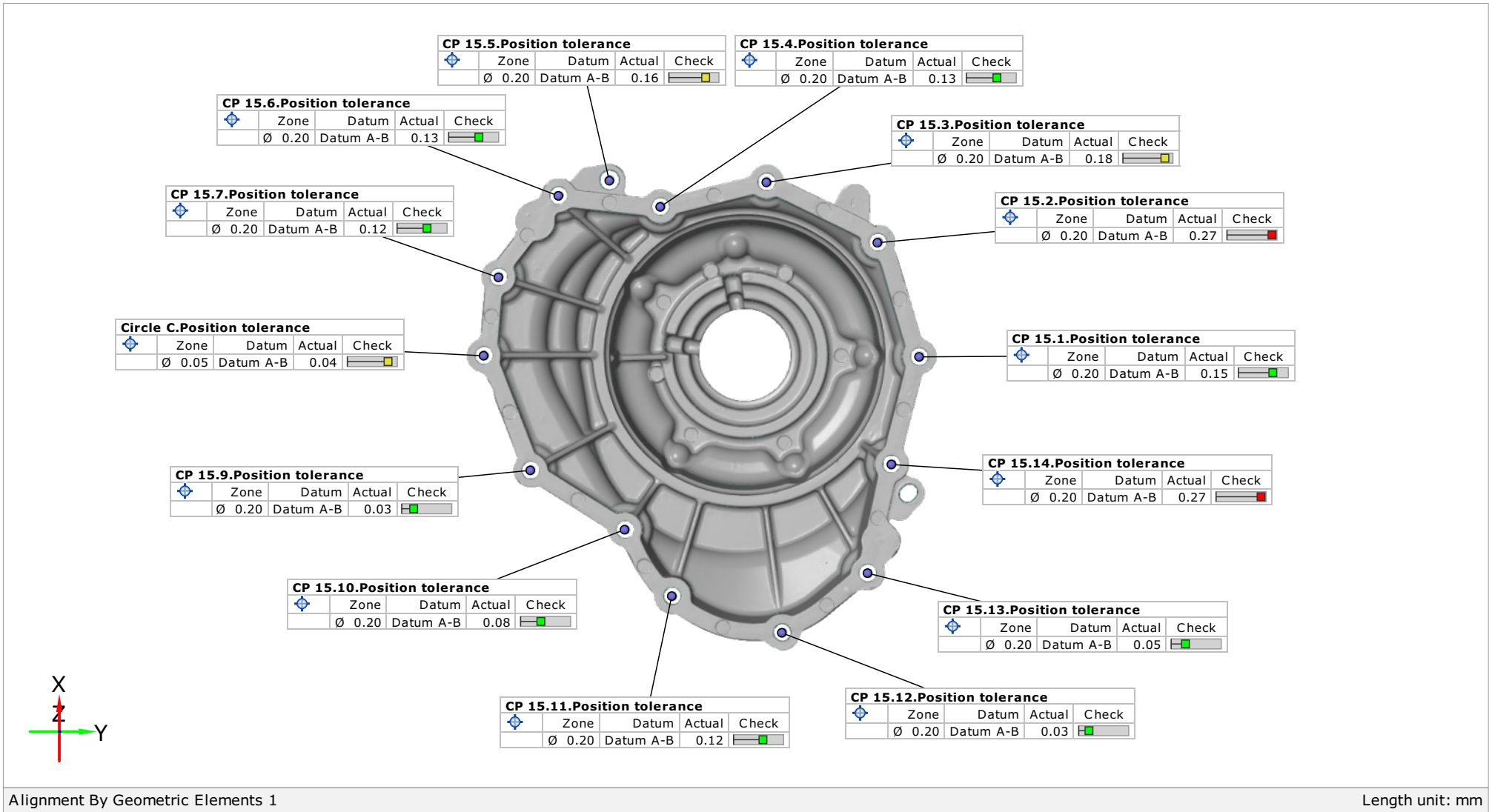






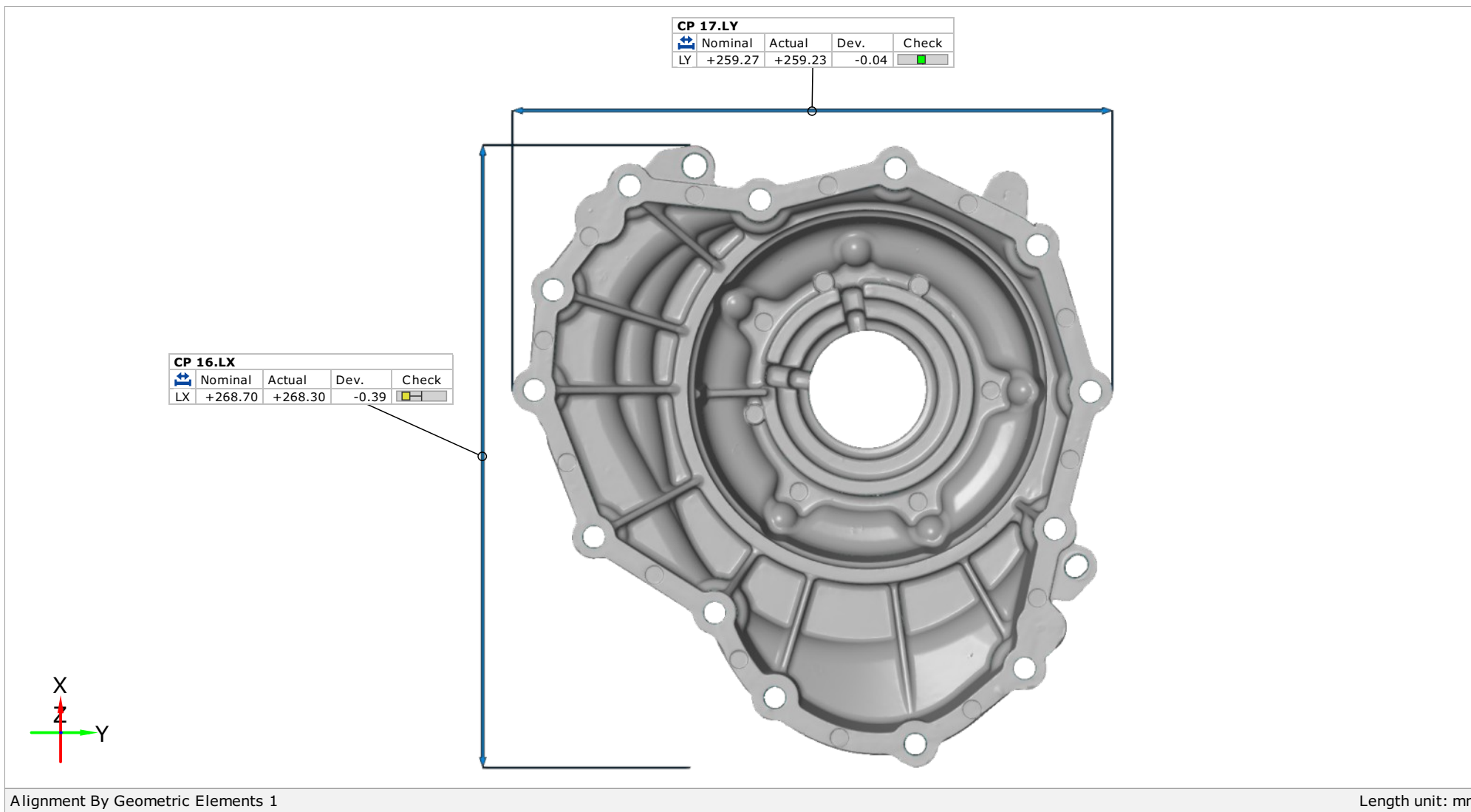


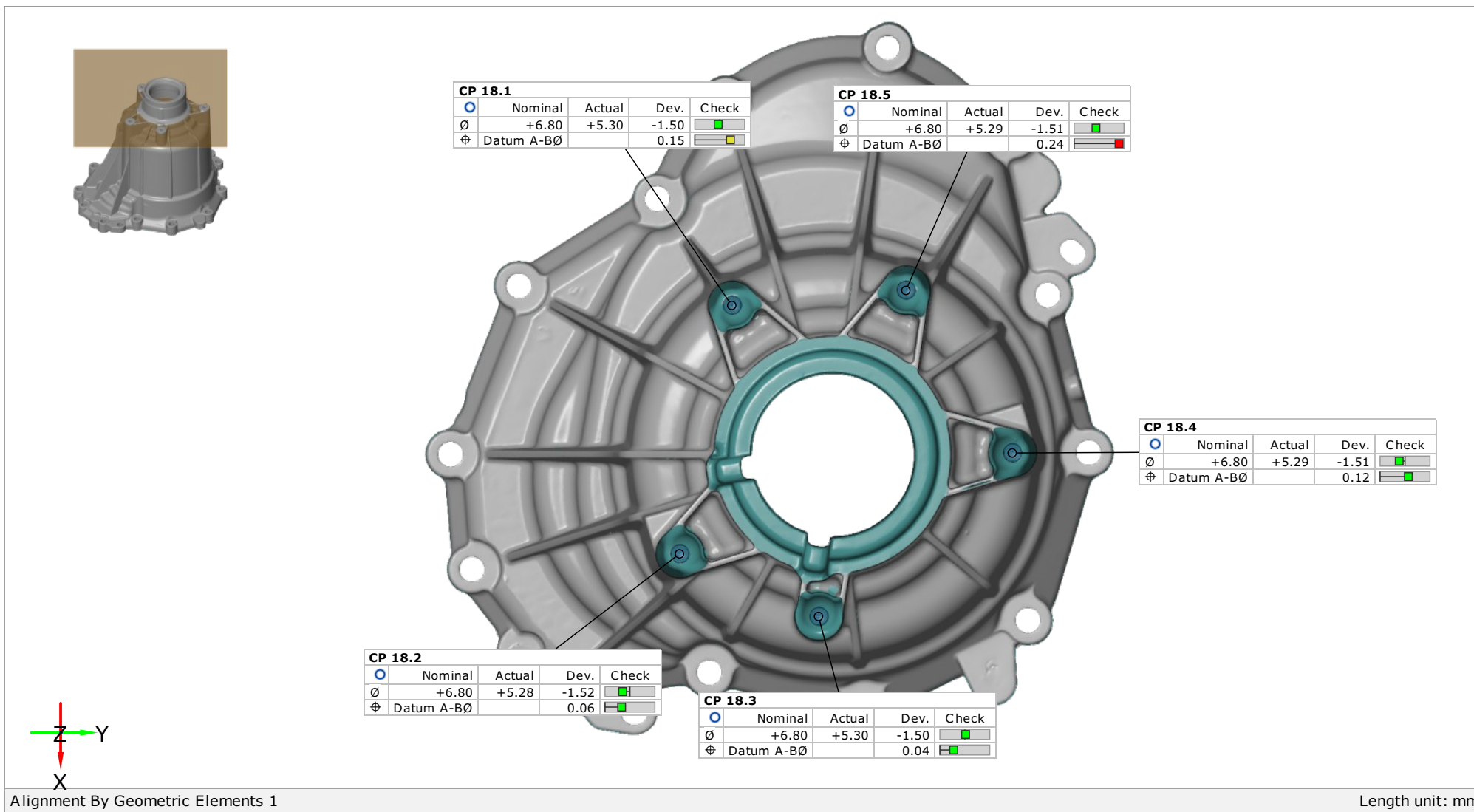
CP 15 Pozicija



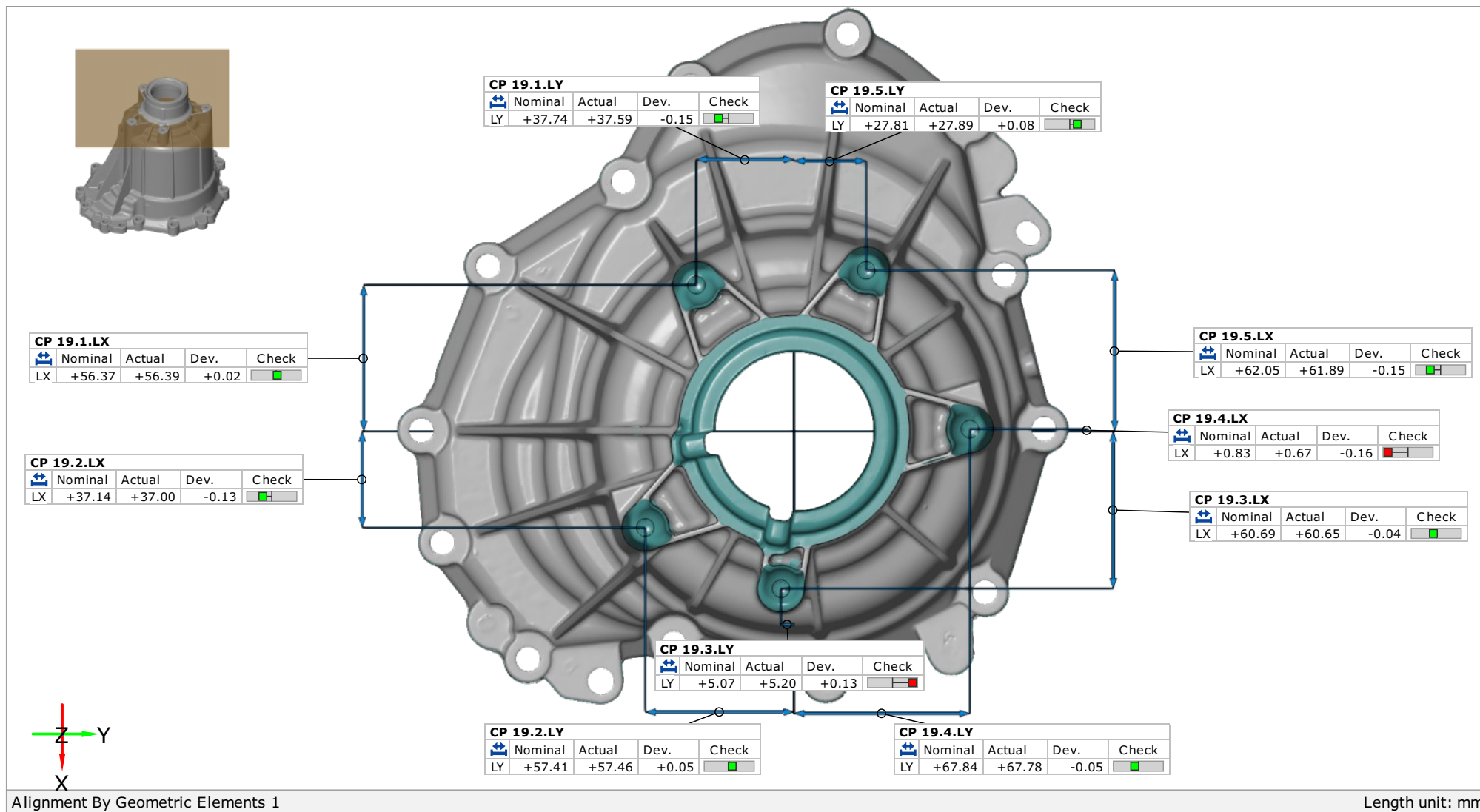
CP 16-17

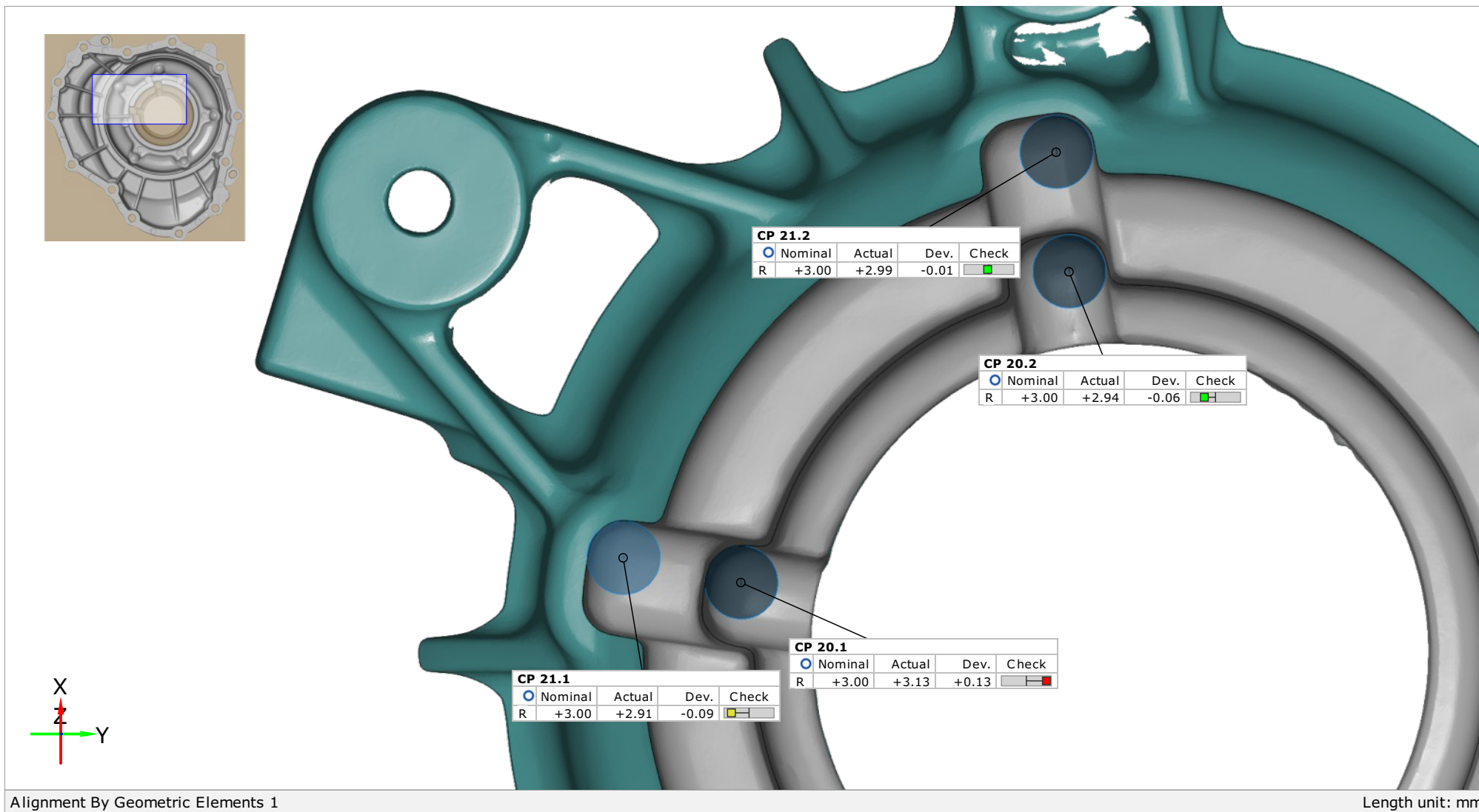
17/33





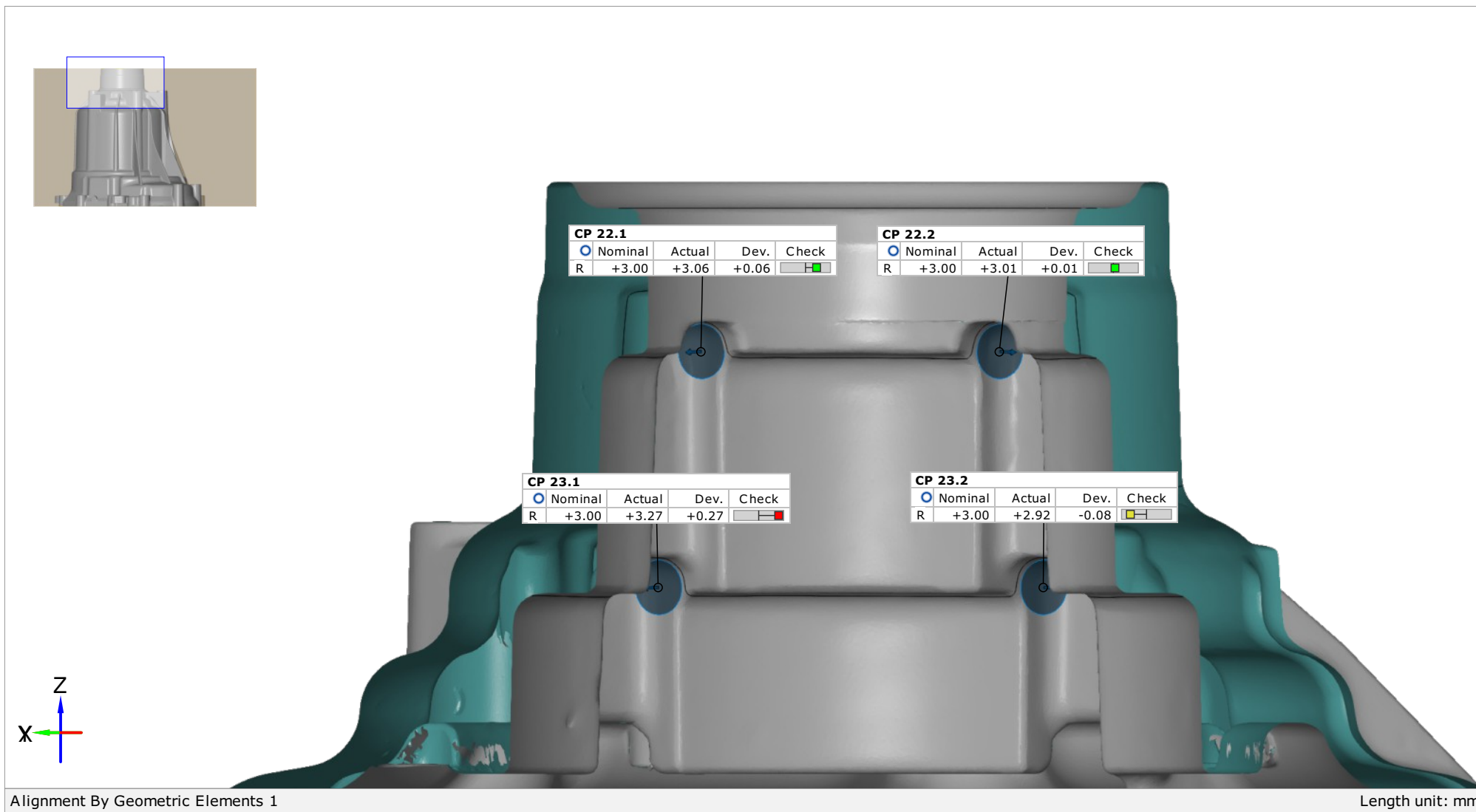


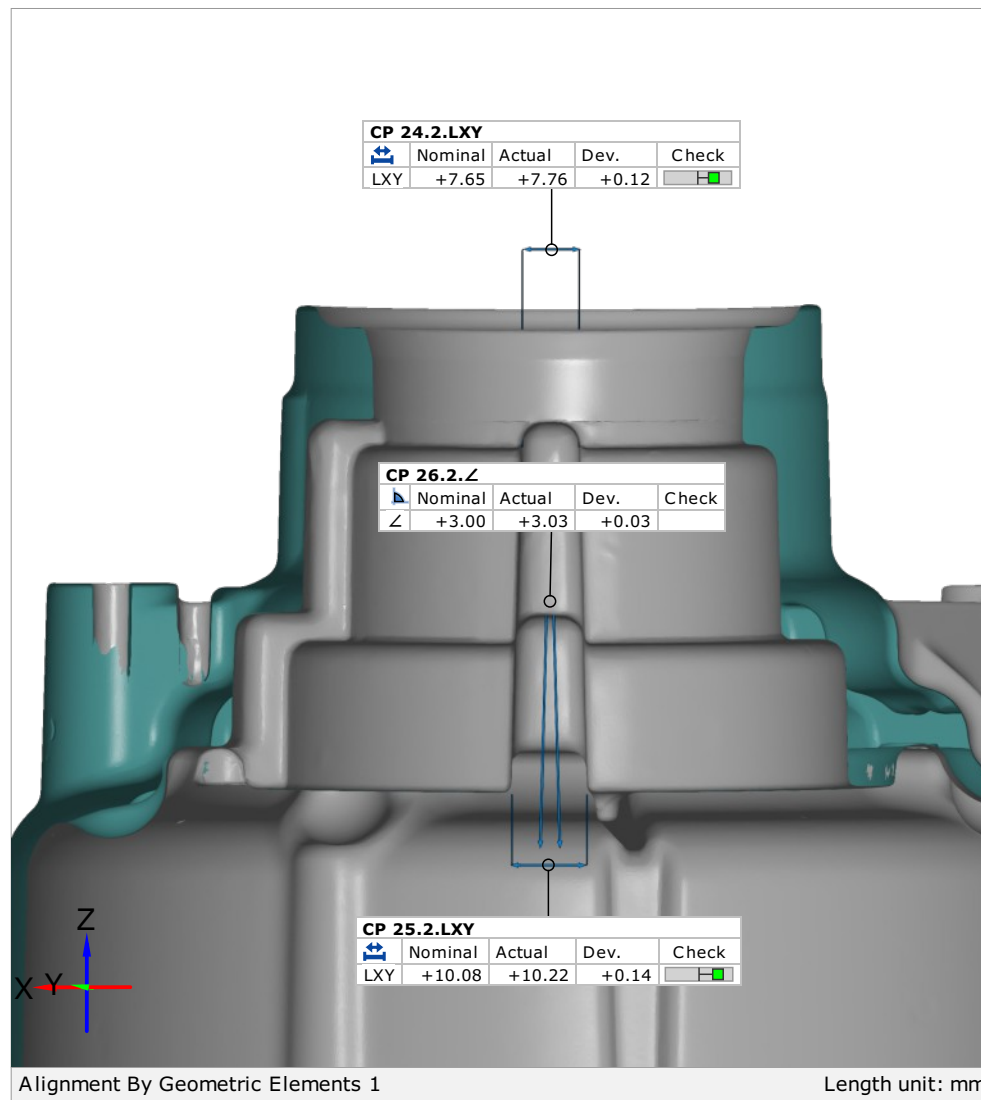
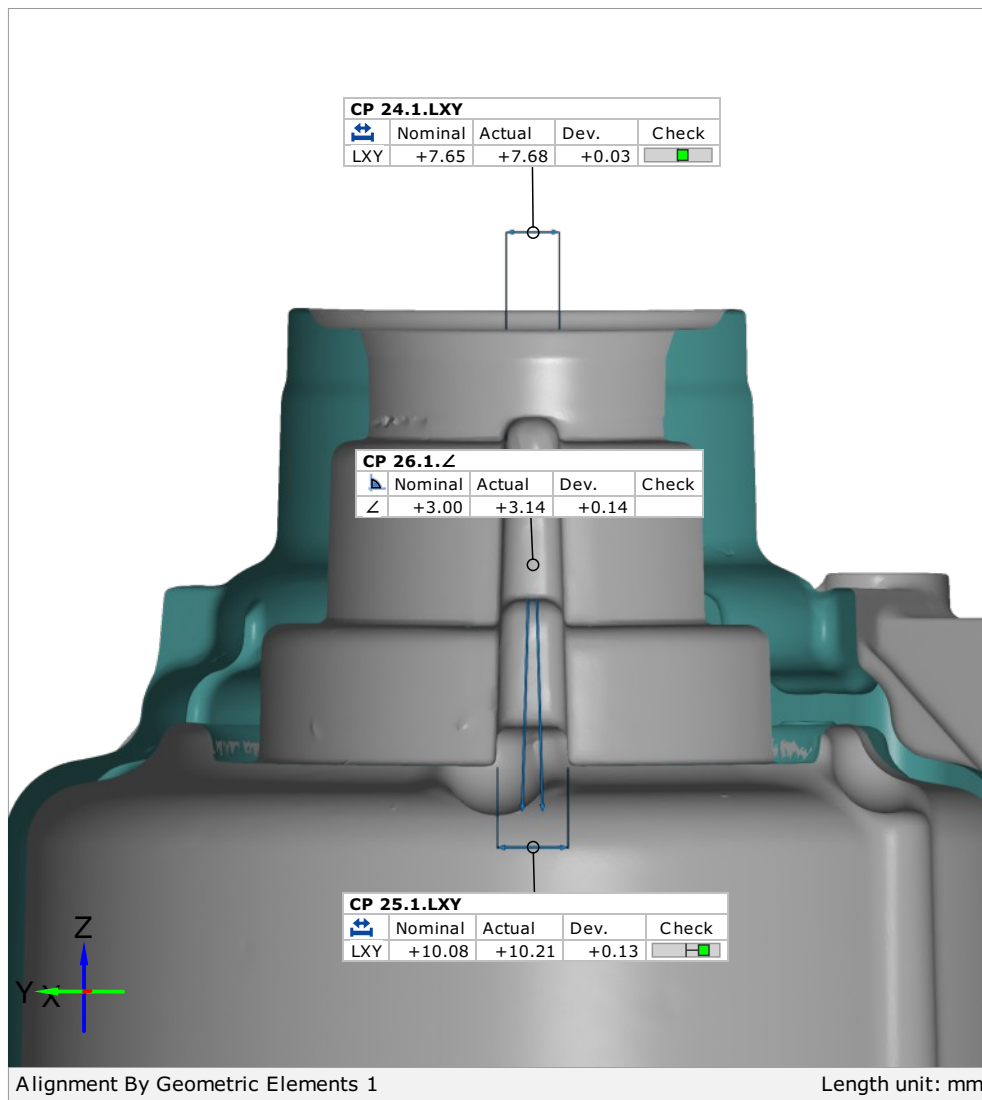


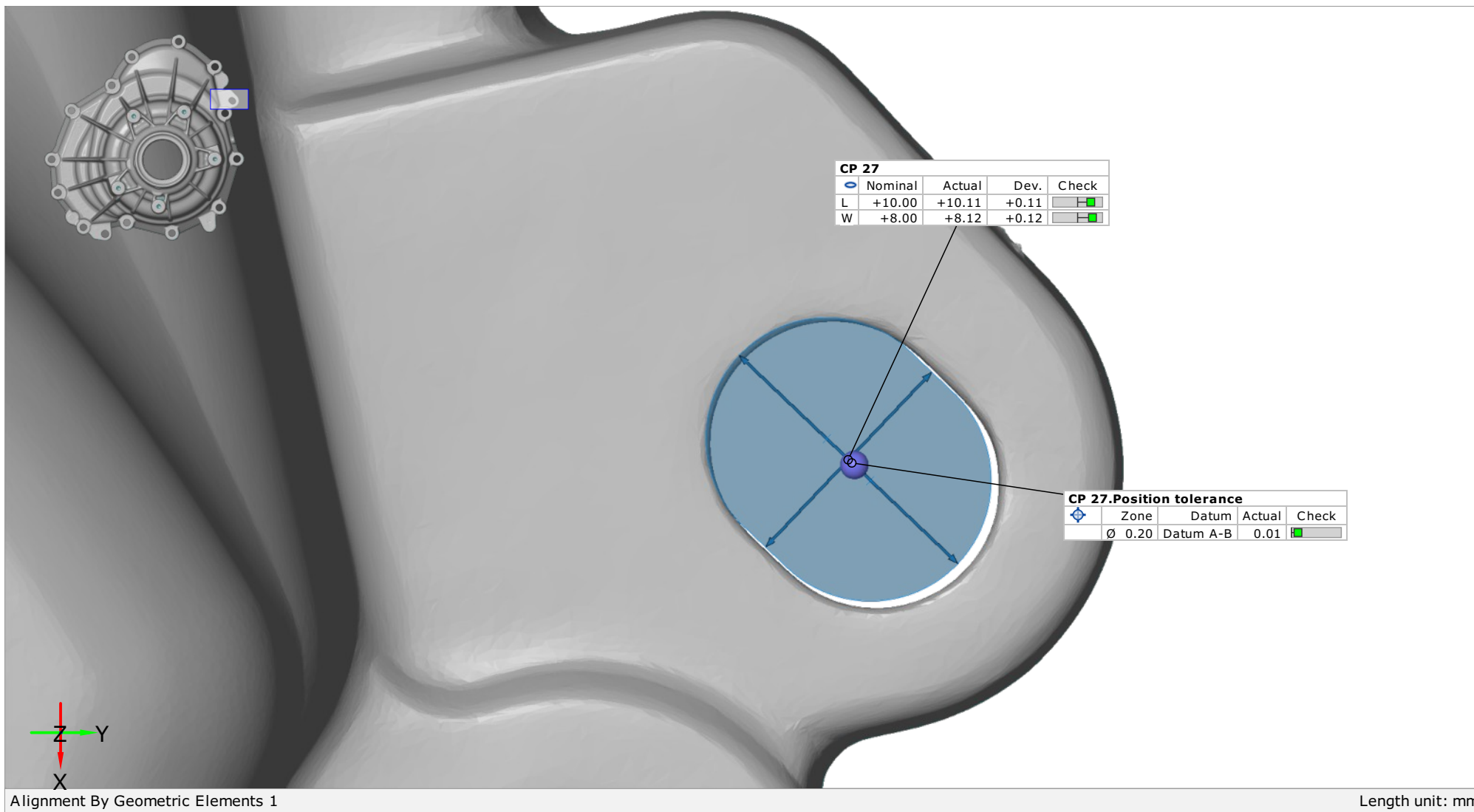


CP 22-23

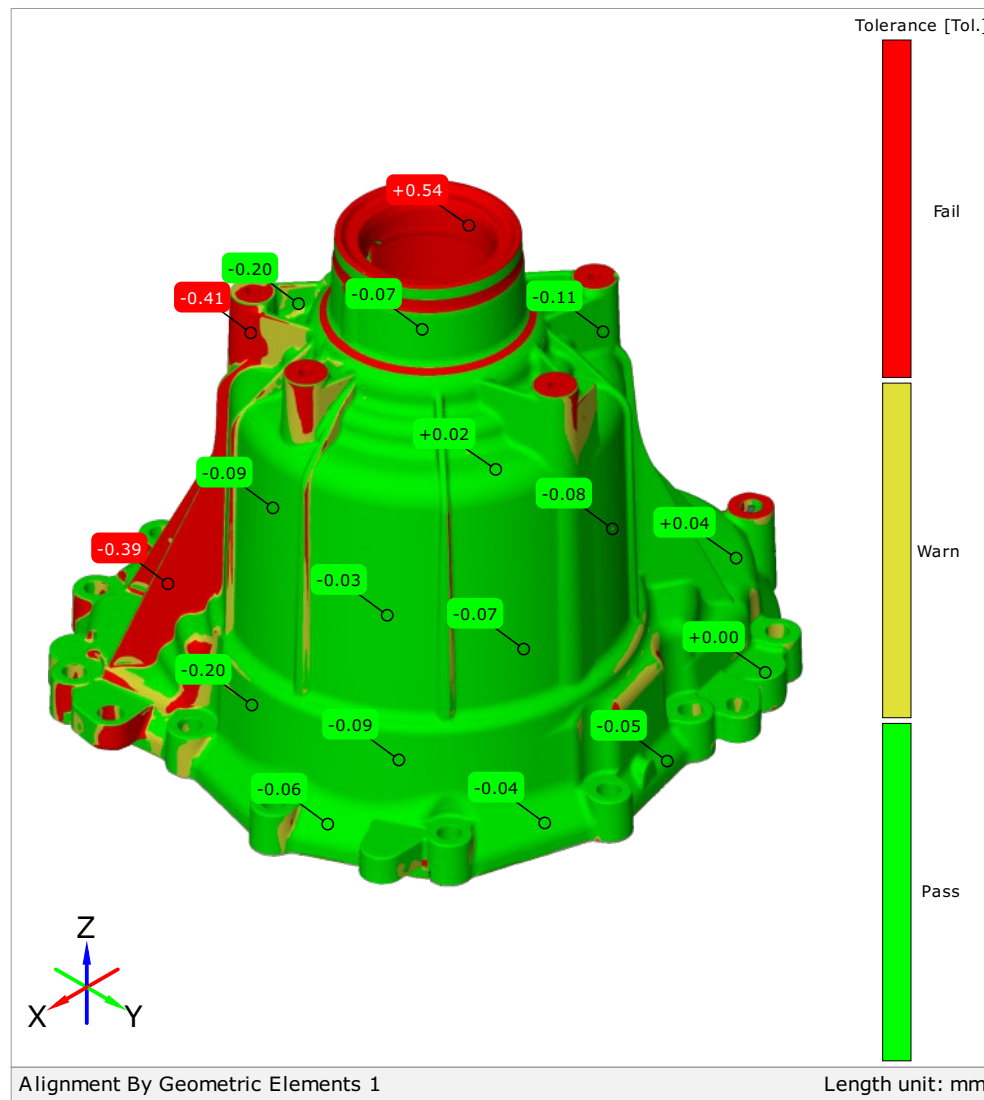
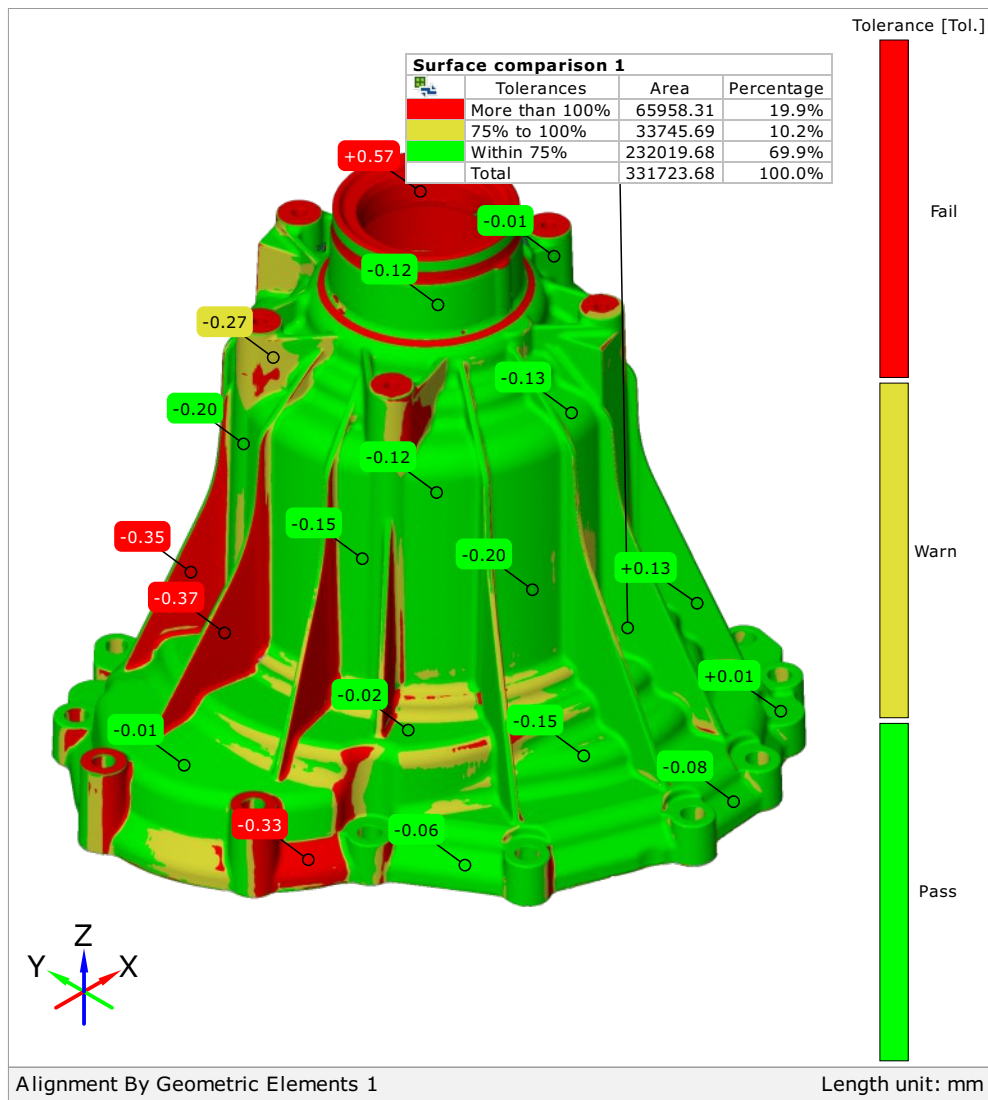
21/33



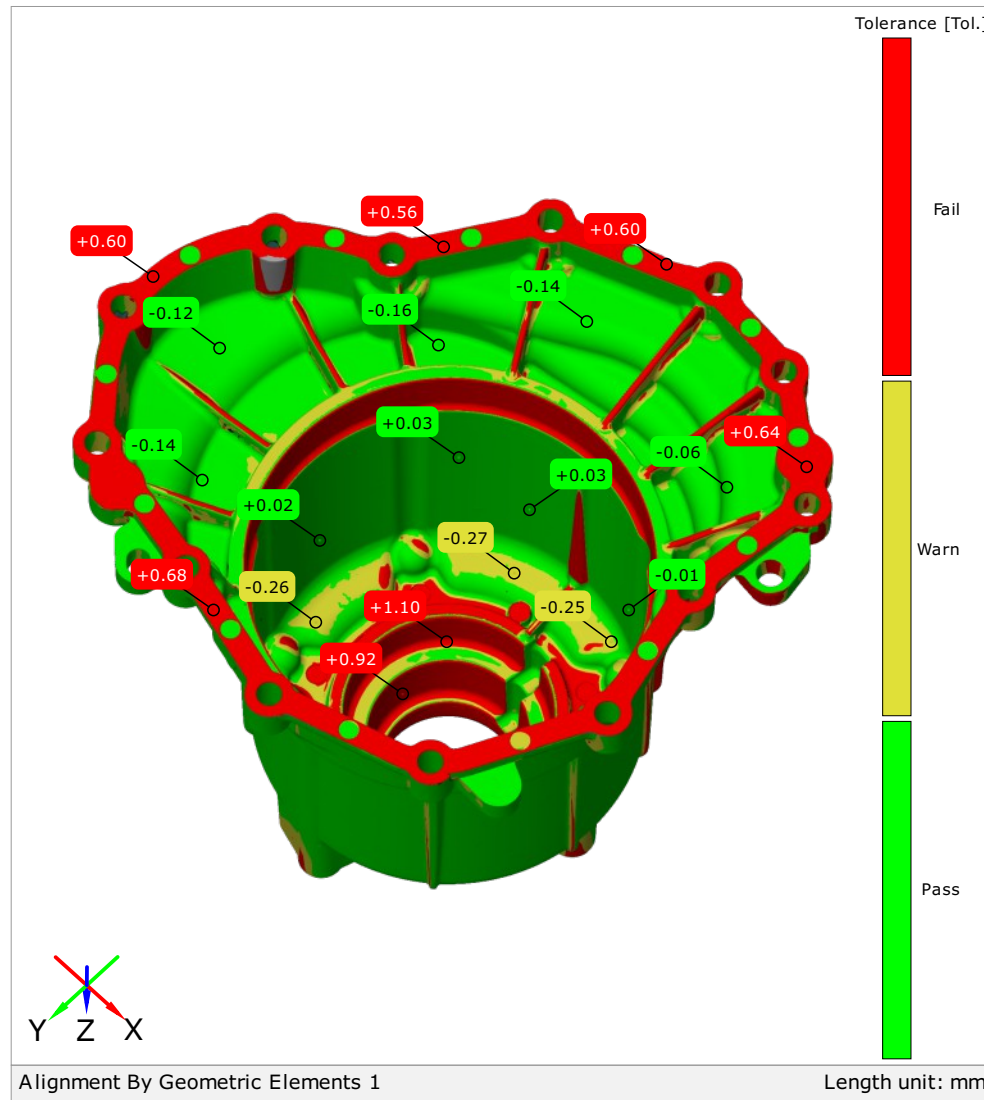
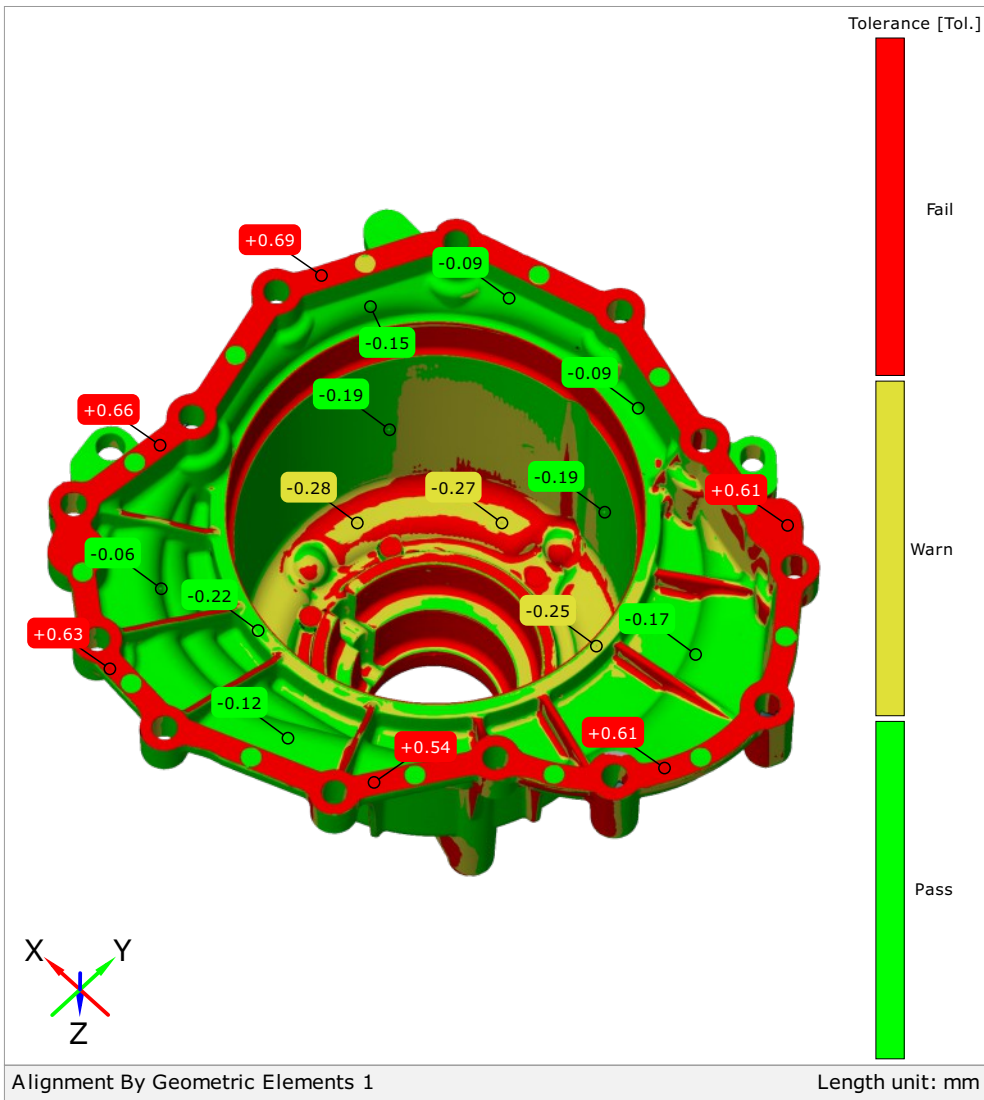




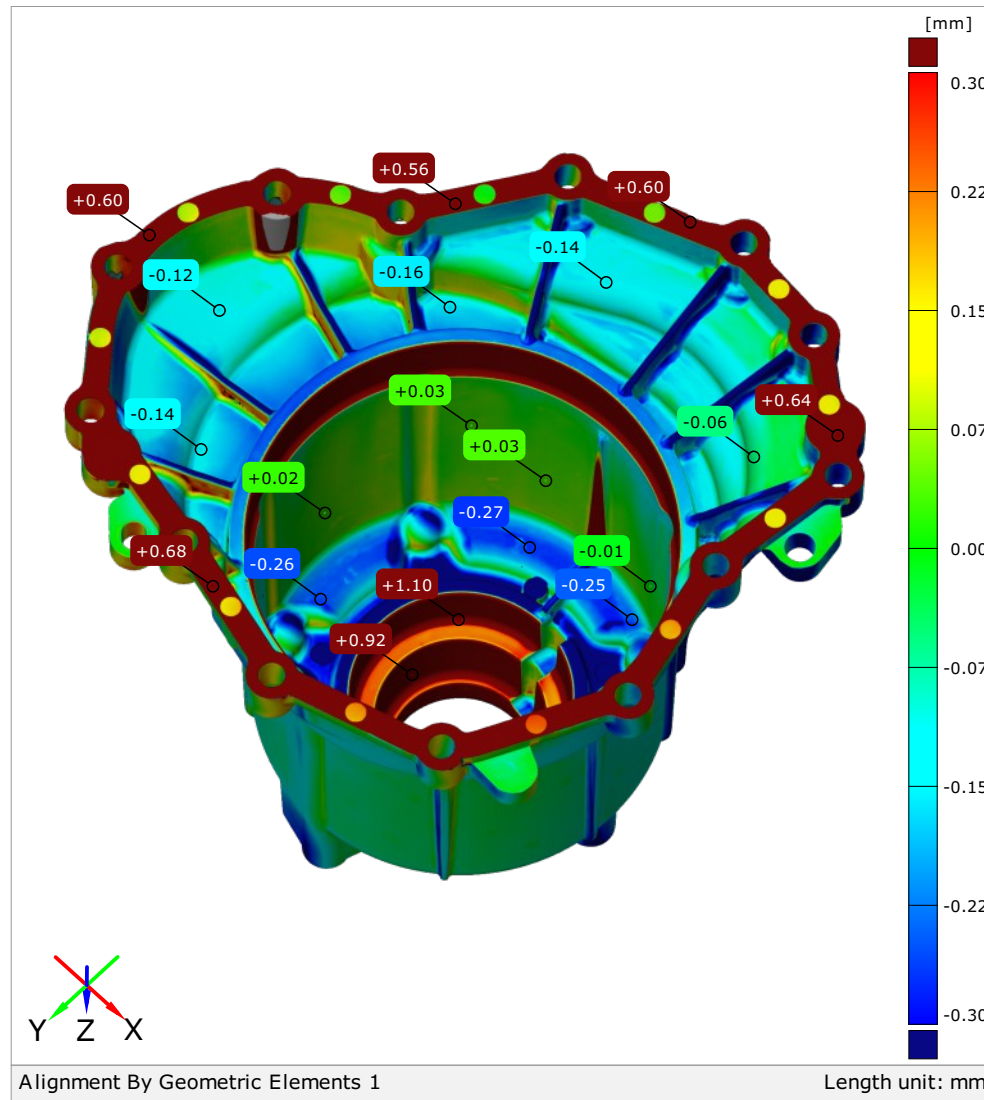
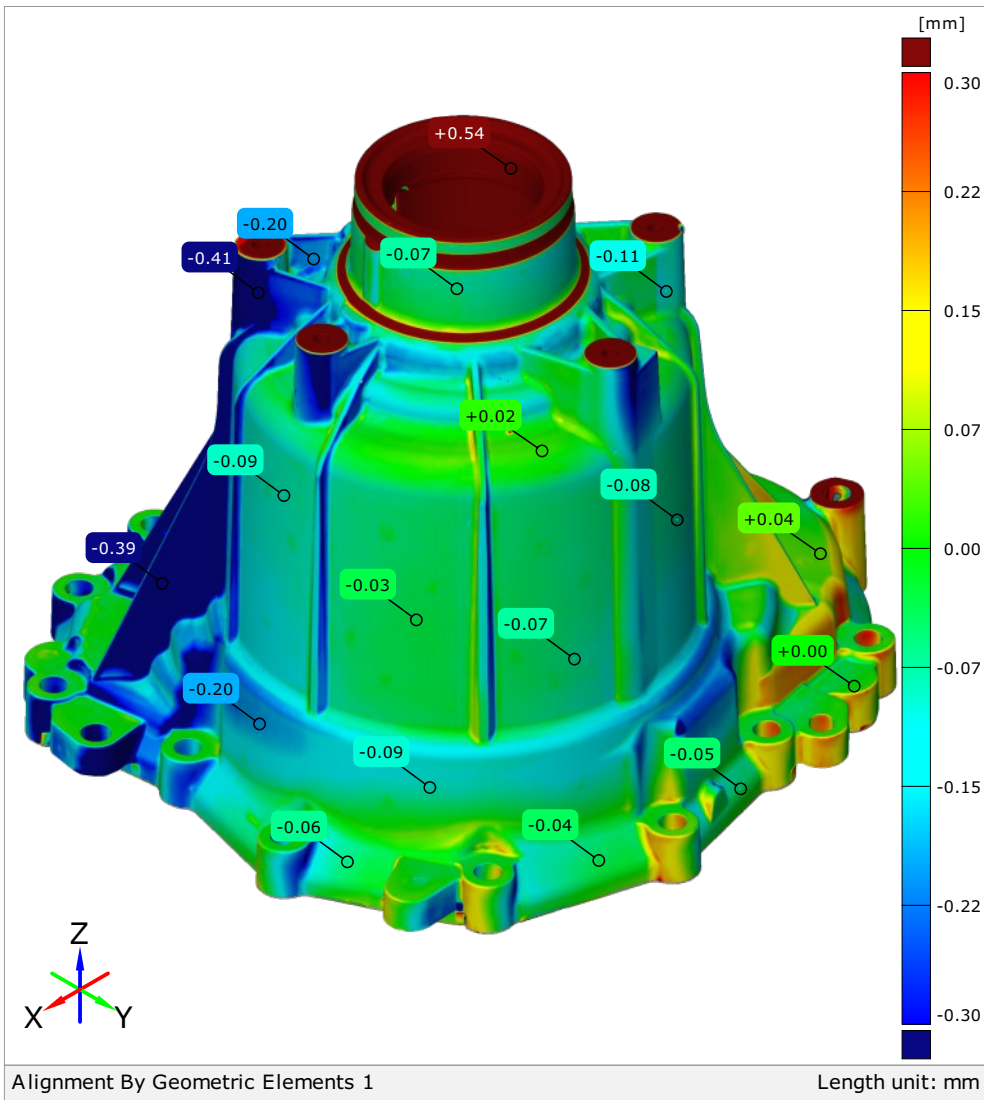
CP 28 - Usporedba površina GO - NO GO  $\pm 0,3$  mm



CP 28 - Usporedba površina GO - NO GO  $\pm 0,3$  mm

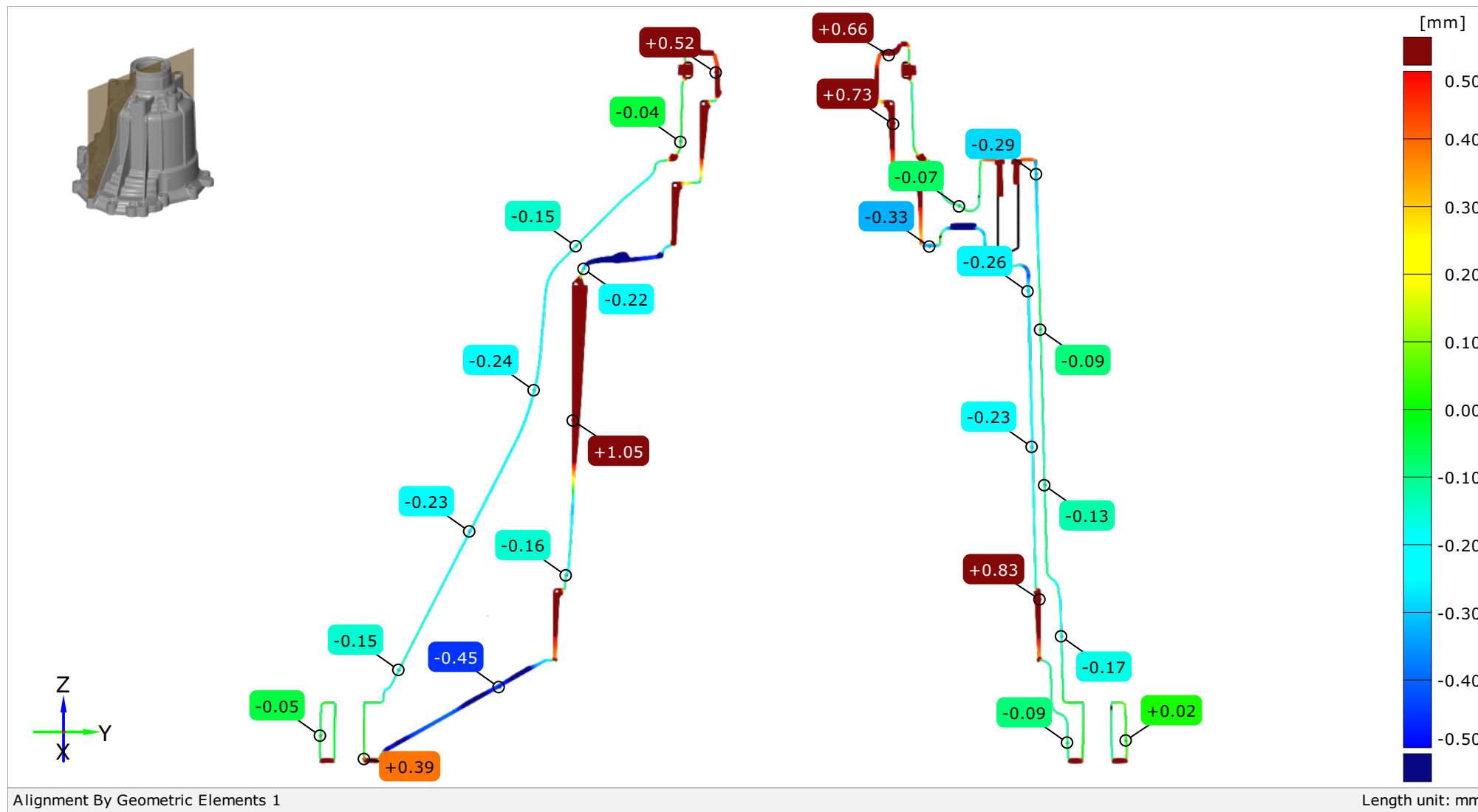


Usporedba površina

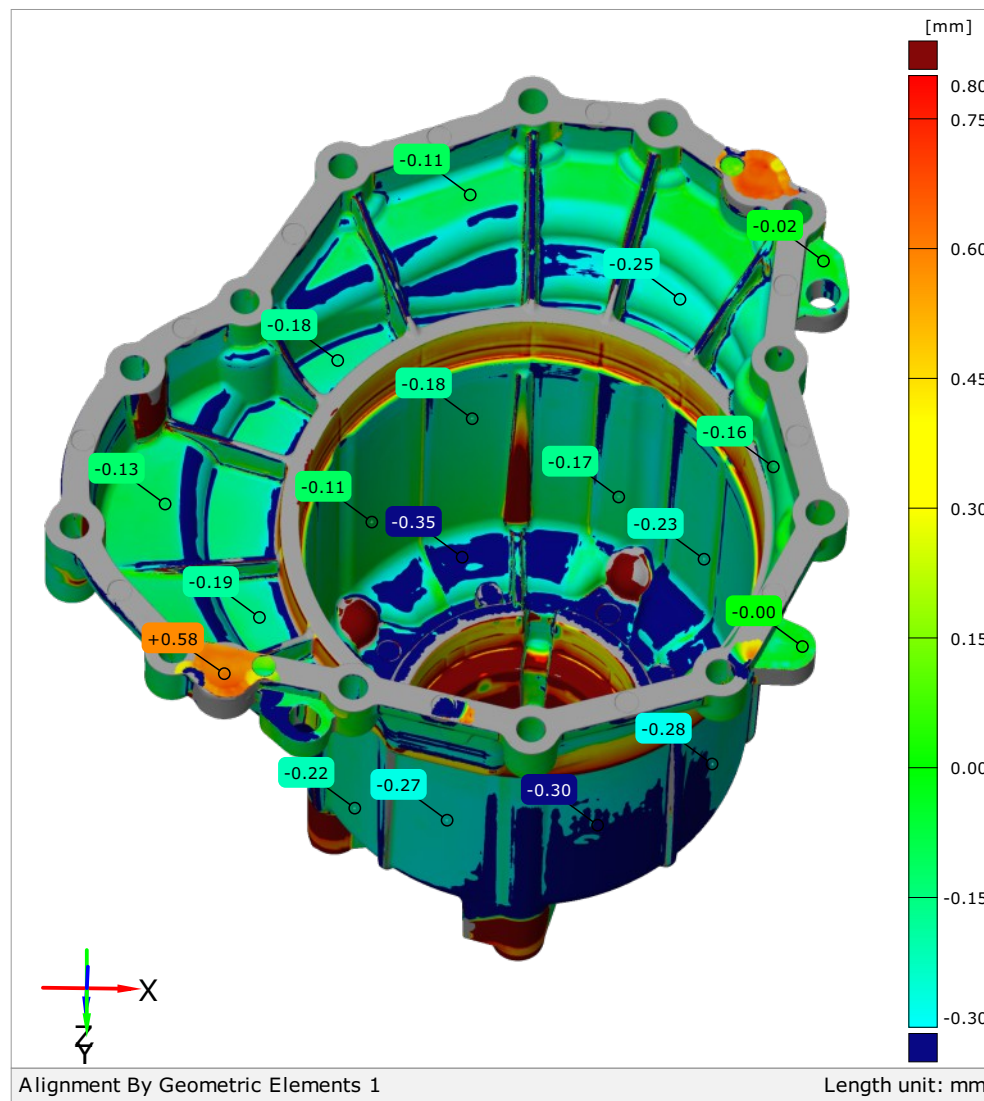
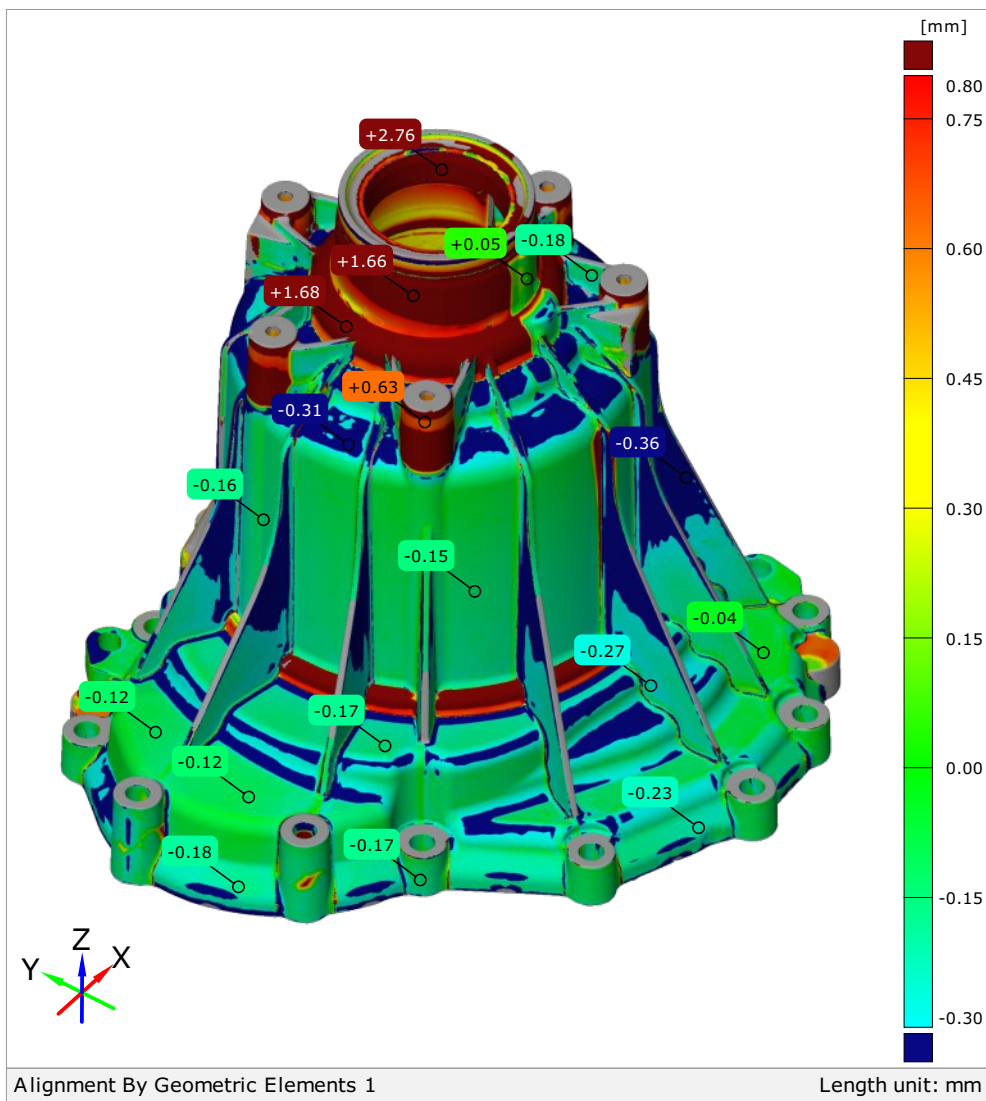




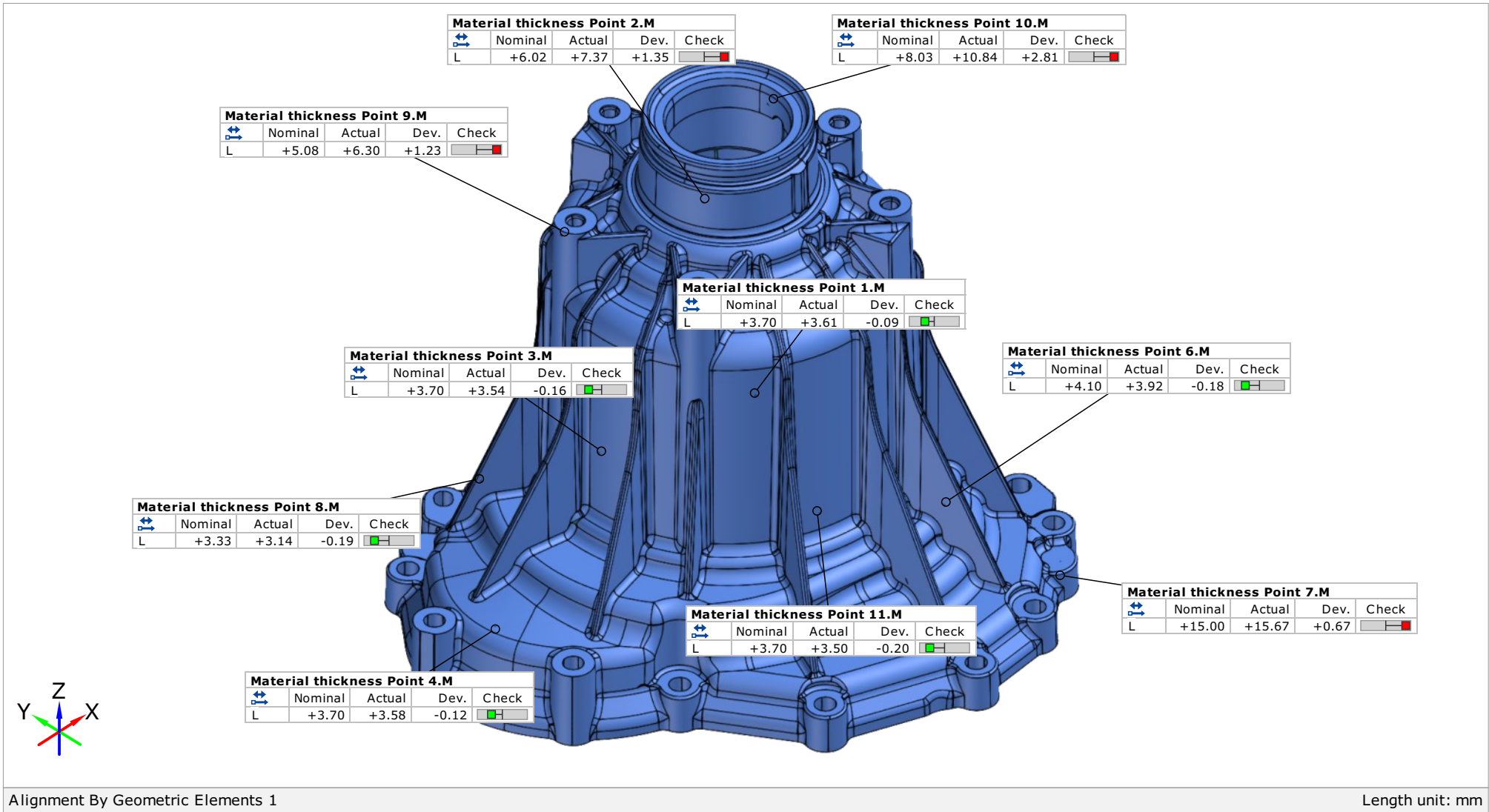
Kontrola odstupanja na presjeku X +0,000 mm



Kontrola debljine stijenke po cijeloj površini


























































Kontrola debljine stijenke u točkama





















Tablica

30/33

Name	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
Circle B.Roundness		+0.00	+0.03	+0.00	+0.05	+0.03		
Circle C.Position tolerance	 ∅	+0.00	+0.04	+0.00	+0.05	+0.04		
Circle C.∅	∅	+9.65	+9.71	-0.10	+0.10	+0.06		
CP 1..Flatness tolerance		+0.00	+0.14	+0.00	+0.20	+0.14		
CP 1..Parallelism		+0.00	+0.19	+0.00	+0.30	+0.19		
CP 1.LZ	LZ	+18.00	+18.65	-0.20	+0.20	+0.65		+0.45
CP 2.1..Flatness tolerance		+0.00	+0.06	+0.00	+0.10	+0.06		
CP 2.1..Parallelism		+0.00	+0.08	+0.00	+0.10	+0.08		
CP 2.1.LZ	LZ	+174.20	+174.50	-0.50	+0.50	+0.30		
CP 2.2..Flatness tolerance		+0.00	+0.10	+0.00	+0.10	+0.10		
CP 2.2..Parallelism		+0.00	+0.10	+0.00	+0.10	+0.10		
CP 2.2.LZ	LZ	+174.20	+174.57	-0.50	+0.50	+0.37		
CP 2.3..Flatness tolerance		+0.00	+0.06	+0.00	+0.10	+0.06		
CP 2.3..Parallelism		+0.00	+0.07	+0.00	+0.10	+0.07		
CP 2.3.LZ	LZ	+174.20	+174.61	-0.50	+0.50	+0.41		
CP 2.4..Flatness tolerance		+0.00	+0.07	+0.00	+0.10	+0.07		
CP 2.4..Parallelism		+0.00	+0.08	+0.00	+0.10	+0.08		
CP 2.4.LZ	LZ	+174.20	+174.56	-0.50	+0.50	+0.36		
CP 2.5..Flatness tolerance		+0.00	+0.13	+0.00	+0.10	+0.13		+0.03
CP 2.5..Parallelism		+0.00	+0.15	+0.00	+0.10	+0.15		+0.05
CP 2.5.LZ	LZ	+174.20	+174.52	-0.50	+0.50	+0.32		
CP 3..Flatness tolerance		+0.00	+0.09	+0.00	+0.10	+0.09		
CP 3..Parallelism		+0.00	+0.12	+0.00	+0.15	+0.12		
CP 3.LZ	LZ	+229.20	+230.41	-0.50	+0.50	+1.21		+0.71
CP 4.∅	∅	+156.00	+154.89	-1.20	-0.80	-1.11		
CP 5.R	R	+0.80	+3.38	-0.10	+0.10	+2.58		+2.48
CP 6.Position tolerance	 ∅	+0.00	+0.34	+0.00	+0.30	+0.34		+0.04
CP 6.∅	∅	+80.00	+78.96	-1.00	-0.50	-1.04		-0.04
CP 7.Concentricity	 ∅	+0.00	+0.33	+0.00	+0.30	+0.33		+0.03
CP 7.∅	∅	+62.00	+60.43	-1.60	-1.20	-1.57		
CP 8.R	∅	+52.00	+50.85	-1.20	-1.00	-1.15		
CP 9.R	R	+2.25	+2.93	-0.10	+0.10	+0.68		+0.58
CP 10.1.LZ	LZ	+3.30	+4.05	-0.10	+0.10	+0.75		+0.65
CP 10.2.∠XZ	∠XZ	+15.00°	+13.67°			-1.33°		
CP 11..Flatness tolerance		+0.00	+0.13	+0.00	+0.15	+0.13		
CP 11..Parallelism		+0.00	+0.14	+0.00	+0.20	+0.14		
Alignment By Geometric Elements 1							Length unit: mm	

Tablica

31/33





















































Name	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
CP 11.LZ	LZ	+146.70	+147.02	-0.50	+0.50	+0.32		
CP 12..Flatness tolerance		+0.00	+0.08	+0.00	+0.10	+0.08		
CP 12..Position tolerance		+0.00	+0.35	+0.00	+0.30	+0.35		+0.05
CP 12.LZ	LZ	+13.60	+13.78	-0.20	+0.20	+0.18		
CP 13.LZ	LZ	+208.20	+208.86	-0.50	+0.50	+0.66		+0.16
CP 14.1.LX	LX	+1.13	+0.92	-0.10	+0.10	-0.21		-0.11
CP 14.1.LY	LY	+96.44	+96.50	-0.30	+0.30	+0.06		
CP 14.2.LX	LX	+62.00	+62.19	-0.30	+0.30	+0.19		
CP 14.2.LY	LY	+73.73	+73.67	-0.30	+0.30	-0.05		
CP 14.3.LX	LX	+95.35	+95.39	-0.30	+0.30	+0.05		
CP 14.3.LY	LY	+12.39	+12.22	-0.20	+0.20	-0.17		
CP 14.4.LX	LX	+81.91	+81.83	-0.30	+0.30	-0.07		
CP 14.4.LY	LY	+46.19	+46.36	-0.30	+0.30	+0.16		
CP 14.5.LX	LX	+96.58	+96.44	-0.30	+0.30	-0.13		
CP 14.5.LY	LY	+74.30	+74.53	-0.30	+0.30	+0.24		
CP 14.6.LX	LX	+88.12	+87.93	-0.30	+0.30	-0.18		
CP 14.6.LY	LY	+102.49	+102.69	-0.30	+0.30	+0.20		
CP 14.7.LX	LX	+43.24	+42.99	-0.30	+0.30	-0.25		
CP 14.7.LY	LY	+135.65	+135.79	-0.50	+0.50	+0.14		
CP 14.8.LY	LY	+143.83	+143.87	-0.50	+0.50	+0.04		
CP 14.9.LX	LX	+63.35	+63.62	-0.30	+0.30	+0.27		
CP 14.9.LY	LY	+118.24	+118.13	-0.30	+0.30	-0.11		
CP 14.10.LX	LX	+96.21	+96.35	-0.30	+0.30	+0.14		
CP 14.10.LY	LY	+66.12	+65.95	-0.30	+0.30	-0.16		
CP 14.11.LX	LX	+132.94	+133.02	-0.50	+0.50	+0.08		
CP 14.11.LY	LY	+40.21	+39.96	-0.30	+0.30	-0.25		
CP 14.12.LX	LX	+153.12	+153.13	-0.50	+0.50	+0.00		
CP 14.12.LY	LY	+20.44	+20.77	-0.20	+0.20	+0.33		+0.13
CP 14.13.LX	LX	+120.49	+120.36	-0.50	+0.50	-0.13		
CP 14.13.LY	LY	+67.71	+67.99	-0.30	+0.30	+0.28		
CP 14.14.LX	LX	+60.48	+60.22	-0.30	+0.30	-0.26		
CP 14.14.LY	LY	+81.01	+81.06	-0.30	+0.30	+0.06		
CP 14.15.LX	LX	+76.48	+76.31	-0.30	+0.30	-0.17		
CP 14.15.LY	LY	+90.22	+90.40	-0.30	+0.30	+0.18		
CP 15.1.Position tolerance	 $\emptyset$	+0.00	+0.15	+0.00	+0.20	+0.15		
CP 15.1. $\emptyset$	$\emptyset$	+9.65	+9.70	-0.10	+0.10	+0.05		
CP 15.2.Position tolerance	 $\emptyset$	+0.00	+0.27	+0.00	+0.20	+0.27		+0.07
CP 15.2. $\emptyset$	$\emptyset$	+9.65	+9.70	-0.10	+0.10	+0.05		

Alignment By Geometric Elements 1

Length unit: mm





































Tablica

32/33

Name	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
CP 15.3.Position tolerance	 $\emptyset$	+0.00	+0.18	+0.00	+0.20	+0.18		
CP 15.3. $\emptyset$	$\emptyset$	+9.65	+9.71	-0.10	+0.10	+0.06		
CP 15.4.Position tolerance	 $\emptyset$	+0.00	+0.13	+0.00	+0.20	+0.13		
CP 15.4. $\emptyset$	$\emptyset$	+9.65	+9.72	-0.10	+0.10	+0.07		
CP 15.5.Position tolerance	 $\emptyset$	+0.00	+0.16	+0.00	+0.20	+0.16		
CP 15.5. $\emptyset$	$\emptyset$	+10.84	+10.96	-0.10	+0.10	+0.12		+0.02
CP 15.6.Position tolerance	 $\emptyset$	+0.00	+0.13	+0.00	+0.20	+0.13		
CP 15.6. $\emptyset$	$\emptyset$	+9.65	+9.72	-0.10	+0.10	+0.07		
CP 15.7.Position tolerance	 $\emptyset$	+0.00	+0.12	+0.00	+0.20	+0.12		
CP 15.7. $\emptyset$	$\emptyset$	+9.65	+9.71	-0.10	+0.10	+0.06		
CP 15.9.Position tolerance	 $\emptyset$	+0.00	+0.03	+0.00	+0.20	+0.03		
CP 15.9. $\emptyset$	$\emptyset$	+9.65	+9.70	-0.10	+0.10	+0.05		
CP 15.10.Position tolerance	 $\emptyset$	+0.00	+0.08	+0.00	+0.20	+0.08		
CP 15.10. $\emptyset$	$\emptyset$	+9.65	+9.71	-0.10	+0.10	+0.06		
CP 15.11.Position tolerance	 $\emptyset$	+0.00	+0.12	+0.00	+0.20	+0.12		
CP 15.11. $\emptyset$	$\emptyset$	+9.65	+9.70	-0.10	+0.10	+0.05		
CP 15.12.Position tolerance	 $\emptyset$	+0.00	+0.03	+0.00	+0.20	+0.03		
CP 15.12. $\emptyset$	$\emptyset$	+9.65	+9.69	-0.10	+0.10	+0.04		
CP 15.13.Position tolerance	 $\emptyset$	+0.00	+0.05	+0.00	+0.20	+0.05		
CP 15.13. $\emptyset$	$\emptyset$	+9.65	+9.71	-0.10	+0.10	+0.06		
CP 15.14.Position tolerance	 $\emptyset$	+0.00	+0.27	+0.00	+0.20	+0.27		+0.07
CP 15.14. $\emptyset$	$\emptyset$	+9.65	+9.70	-0.10	+0.10	+0.05		
CP 16.LX	LX	+268.70	+268.30	-0.50	+0.50	-0.39		
CP 17.LY	LY	+259.27	+259.23	-0.50	+0.50	-0.04		
CP 18.1.Position tolerance	 $\emptyset$	+0.00	+0.15	+0.00	+0.20	+0.15		
CP 18.1. $\emptyset$	$\emptyset$	+6.80	+5.30	-1.55	-1.45	-1.50		
CP 18.2.Position tolerance	 $\emptyset$	+0.00	+0.06	+0.00	+0.20	+0.06		
CP 18.2. $\emptyset$	$\emptyset$	+6.80	+5.28	-1.55	-1.45	-1.52		
CP 18.3.Position tolerance	 $\emptyset$	+0.00	+0.04	+0.00	+0.20	+0.04		
CP 18.3. $\emptyset$	$\emptyset$	+6.80	+5.30	-1.55	-1.45	-1.50		
CP 18.4.Position tolerance	 $\emptyset$	+0.00	+0.12	+0.00	+0.20	+0.12		
CP 18.4. $\emptyset$	$\emptyset$	+6.80	+5.29	-1.55	-1.45	-1.51		
CP 18.5.Position tolerance	 $\emptyset$	+0.00	+0.24	+0.00	+0.20	+0.24		+0.04
CP 18.5. $\emptyset$	$\emptyset$	+6.80	+5.29	-1.55	-1.45	-1.51		
CP 19.1.LX	LX	+56.37	+56.39	-0.30	+0.30	+0.02		
CP 19.1.LY	LY	+37.74	+37.59	-0.30	+0.30	-0.15		
Alignment By Geometric Elements 1							Length unit: mm	

Tablica

33/33

Name	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
CP 19.2.LX	LX	+37.14	+37.00	-0.30	+0.30	-0.13		
CP 19.2.LY	LY	+57.41	+57.46	-0.30	+0.30	+0.05		
CP 19.3.LX	LX	+60.69	+60.65	-0.30	+0.30	-0.04		
CP 19.3.LY	LY	+5.07	+5.20	-0.10	+0.10	+0.13		+0.03
CP 19.4.LX	LX	+0.83	+0.67	-0.10	+0.10	-0.16		-0.06
CP 19.4.LY	LY	+67.84	+67.78	-0.30	+0.30	-0.05		
CP 19.5.LX	LX	+62.05	+61.89	-0.30	+0.30	-0.15		
CP 19.5.LY	LY	+27.81	+27.89	-0.20	+0.20	+0.08		
CP 20.1.R	R	+3.00	+3.13	-0.10	+0.10	+0.13		+0.03
CP 20.2.R	R	+3.00	+2.94	-0.10	+0.10	-0.06		
CP 21.1.R	R	+3.00	+2.91	-0.10	+0.10	-0.09		
CP 21.2.R	R	+3.00	+2.99	-0.10	+0.10	-0.01		
CP 22.1.R	R	+3.00	+3.06	-0.10	+0.10	+0.06		
CP 22.2.R	R	+3.00	+3.01	-0.10	+0.10	+0.01		
CP 23.1.R	R	+3.00	+3.27	-0.10	+0.10	+0.27		+0.17
CP 23.2.R	R	+3.00	+2.92	-0.10	+0.10	-0.08		
CP 24.1.LXY	LXY	+7.65	+7.68	-0.20	+0.20	+0.03		
CP 24.2.LXY	LXY	+7.65	+7.76	-0.20	+0.20	+0.12		
CP 25.1.LXY	LXY	+10.08	+10.21	-0.20	+0.20	+0.13		
CP 25.2.LXY	LXY	+10.08	+10.22	-0.20	+0.20	+0.14		
CP 26.1.∠	∠	+3.00°	+3.14°			+0.14°		
CP 26.2.∠	∠	+3.00°	+3.03°			+0.03°		
CP 27.L	L	+10.00	+10.11	-0.10	+0.15	+0.11		
CP 27.Position tolerance	 ∅	+0.00	+0.01	+0.00	+0.20	+0.01		
CP 27.W	W	+8.00	+8.12	-0.10	+0.15	+0.12		
Material thickness Point 1.M.L	L	+3.70	+3.61	-0.30	+0.50	-0.09		
Material thickness Point 2.M.L	L	+6.02	+7.37	-0.30	+0.50	+1.35		+0.85
Material thickness Point 3.M.L	L	+3.70	+3.54	-0.30	+0.50	-0.16		
Material thickness Point 4.M.L	L	+3.70	+3.58	-0.30	+0.50	-0.12		
Material thickness Point 6.M.L	L	+4.10	+3.92	-0.30	+0.50	-0.18		
Material thickness Point 7.M.L	L	+15.00	+15.67	-0.30	+0.50	+0.67		+0.17
Material thickness Point 8.M.L	L	+3.33	+3.14	-0.30	+0.50	-0.19		
Material thickness Point 9.M.L	L	+5.08	+6.30	-0.30	+0.50	+1.23		+0.73
Material thickness Point 10.M.L	L	+8.03	+10.84	-0.30	+0.50	+2.81		+2.31
Material thickness Point 11.M.L	L	+3.70	+3.50	-0.30	+0.50	-0.20		
Plane A.Flatness tolerance		+0.00	+0.13	+0.00	+0.15	+0.13		

Alignment By Geometric Elements 1

Length unit: mm