

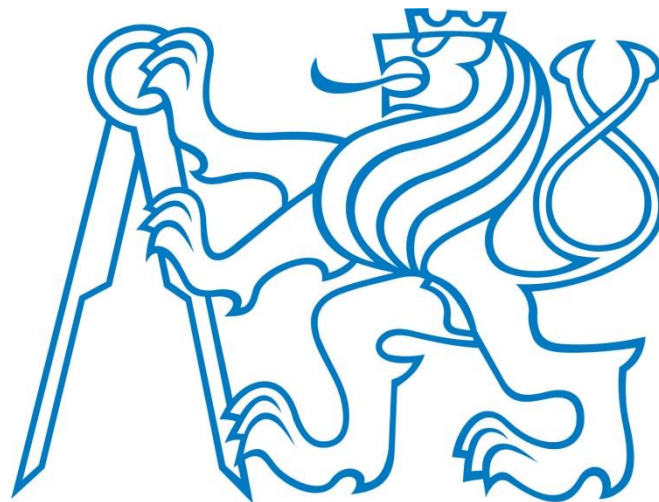
**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie Ú12134

## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Využití počítačové tomografie v rámci kontroly kvality  
ve strojírenském průmyslu**



Vypracoval: Ladislav Krejzek

Vedoucí práce: Ing. Libor Beránek, Ph.D.  
Praha 2016



Vysoká škola: ČVUT v Praze

Fakulta: strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Akademický rok: 2015/2016

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

pro **Ladislava Krejzka**

obor **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

Název: **Využití počítačové tomografie v rámci kontroly kvality ve strojírenském průmyslu**

Název anglicky: **Computed tomography for quality control in industrial productions**

### Zásady pro vypracování:

1. Princip počítačové tomografie, základní konstrukční uspořádání.
2. Vhodné oblasti aplikace, technologická omezení.
3. Možnosti vnitřní a vnější inspekce s využitím sw. pro analýzu mraku bodů.



Vedoucí bakalářské práce: Ing. Libor Beránek, Ph.D.


Datum zadání bakalářské práce: 25. 4. 2016

Termín odevzdání bakalářské práce: 1. 7. 2016

Neodevzdá-li student bakalářskou nebo diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské nebo diplomové práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat bakalářskou nebo diplomovou práci podruhé.

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

Zadání bakalářské práce převzal dne: 28. 4. 2016

  
Diplomant

  
Vedoucí ústavu



  
Děkan

V Praze

dne 25. 4. 2016



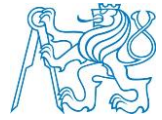
## Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci vypracoval samostatně. Dále prohlašuji, že jsem použil pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne .....

.....

podpis



## Poděkování:

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Liboru Beránkovi Ph.D za velmi ochotný přístup, cenné rady ohledně psaní této práce a za čas, který mi věnoval v rámci konzultací, ale také mimo nich. Dále bych rád poděkoval své rodině za podporu při mém studiu.



## Anotace

Jméno autora:	Ladislav Krejzek
Název bakalářské práce:	Využití počítačové tomografie v rámci kontroly kvality ve strojírenském průmyslu
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Libor Beránek, Ph.D.
Ústav:	Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Akademický rok:	2015/2016

Bakalářská práce je zaměřena k seznámení čtenáře s principy, využitím průmyslové počítačové tomografie a použitím softwaru k demonstraci jednotlivých analýz. V první části jsou uvedeny nedestructivní metody testování a princip použití rentgenového záření k funkci počítačové tomografie. Další část se zabývá konstrukčním provedením a oblastí využití počítačové tomografie. Poslední část práce věnuje pozornost možnostem softwaru a představuje čtenářům často používané analýzy.

**Klíčová slova:** Počítačová tomografie, metrotomografie, nedestructivní testování, inline CT



## Annotation

Author: Ladislav Krejzek  
Title of bachelor thesis: Computed tomography for quality control in industrial productions  
Supervisor: Ing. Libor Beránek, Ph.D.  
Department: Department of Machining, Process Planning and Metrology  
Academic year: 2015/2016

This bachelor thesis focuses on principles and application of computed tomography in industrial production and demonstration of software usage for individual analysis. The first part describes methods of non-destructive testing and principles of the usage X-ray for computed tomography. The next section presents construction adjustment and field of application. Last part is concerned with the possibilities of software and presents frequently used analysis to the reader.

**Key Words:** Computed tomography, metrotomography, non-destructive testing, inline CT



## Obsah

1	ÚVOD.....	1
2	NEDESTRUKTIVNÍ TESTOVÁNÍ MATERIÁLU .....	2
2.1	CO JE NEDESTRUKTIVNÍ TESTOVÁNÍ? .....	2
2.2	VADY MATERIÁLU.....	2
2.3	METODY NDT .....	2
2.3.1	PROZAŘOVÁNÍ RENTGENOVÝM ZÁŘENÍM.....	3
2.3.2	PROZAŘOVÁNÍ GAMA ZÁŘENÍM .....	3
2.3.3	PROZAŘOVÁNÍ ELEKTRONY .....	3
2.3.4	ULTRAZVUK .....	4
2.3.5	KAPILÁRNÍ METODA.....	4
3	RENTGENOVÉ ZÁŘENÍ.....	6
3.1	HISTORIE.....	6
3.2	VLASTNOSTI RENTGENOVÉHO ZÁŘENÍ.....	6
3.3	PRINCIP RENTGENOVÉHO ZÁŘENÍ .....	7
3.4	RENTGENKA .....	8
3.5	FYZIOLOGICKÉ ÚČINKY .....	10
4	POČÍTAČOVÁ TOMOGRAFIE .....	12
4.1	HISTORIE.....	12
4.2	PRINCIP POČÍTAČOVÉ TOMOGRAFIE.....	13
4.3	VYTVOŘENÍ TŘETÍHO ROZMĚRU .....	14
4.4	REKONSTRUKCE SNÍMKU .....	15
4.5	KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ .....	18
4.6	OBLASTI VYUŽITÍ.....	19
4.6.1	VÝBĚR RENTGENKY .....	20
4.6.2	INTEGRACE STROJŮ DO VÝROBY .....	21
4.7	DODAVATELÉ TOMOGRAFŮ .....	23
4.8	SOFTWARE PRO ANALÝZU MRAKU BODŮ .....	25
4.8.1	VOLUME GRAPHICS.....	26
4.8.2	CALYPSO .....	27
5	MOŽNÉ ANALÝZY S VYUŽITÍM POČÍTAČOVÉ TOMOGRAFIE .....	28
5.1	POROVNÁNÍ ODCHYLEK S CAD MODELEM .....	28
5.2	ANALÝZA TLOUŠŤKY STĚN .....	32
5.3	ANALÝZA POROZITY .....	34
5.4	ANALÝZA STRUKTURY MATERIÁLU .....	34
5.5	ANALÝZA VLÁKEN KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ .....	35





---

5.6	ANALÝZA VÍCESLOŽKOVÝCH MATERIÁLŮ .....	36
5.7	KONTROLA GEOMETRICKÝCH SPECIFIKACÍ PRODUKTU .....	37
6	ZÁVĚR.....	40
7	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	42
8	SEZNAM TABULEK A OBRÁZKŮ .....	44
8.1	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	44
8.2	SEZNAM TABULEK.....	45



# 1 ÚVOD

Počítačová tomografie (Computed tomography) patří mezi nedestruktivní metody testování. Měření dané součásti není závislé na její úplnosti a složitosti. Pomocí rentgenového záření je možné zachytit s požadovanou přesností jeho vnější, ale také vnitřní strukturu měřeného objektu. Díky krátkému času měření vede použití těchto strojů ke značnému zrychlení procesu a ke zvýšení hospodárnosti. V porovnání s klasickými metodami, jako je dotyková a optická měřicí technika, není počítačová tomografie tak dobře propracovaná a je považována za novou techniku.

Cílem této práce je především seznámit čtenáře s principem a možnostmi využití počítačové tomografie v průmyslu.

V první části práce se zabývám nedestruktivním testováním a popisem jednotlivých metod. Dále je popsán vznik rentgenového záření a princip, z kterého vychází funkčnost počítačové tomografie.

Ve druhé části bakalářské práce se soustředím na samotnou počítačovou tomografii, kde popisuji možnosti konstrukce a jejich vliv na měření. Oblasti možného použití a v neposlední řadě seznamuji čtenáře s prostředím počítačové tomografie, jako jsou dodavatelé strojů a softwarové prostředí.

V poslední části bakalářské práce ukazují čtenářům možnosti softwarů a věnuji se nejčastěji používaným analýzám při zpracování naměřených hodnot.



## 2 NEDESTRUKTIVNÍ TESTOVÁNÍ MATERIÁLU

### 2.1 CO JE NEDESTRUKTIVNÍ TESTOVÁNÍ?

Některé metody a postupy, které budu zmiňovat, se používají podobně také v lékařském odvětví. Pokud v této práci bude použit pojem nedestruktivní zkoušení, výhradně se jedná o průmyslové využití. Tento termín se v lékařství nepoužívá. V oboru lékařství se používá spojení neinvazivní medicína.

S jdoucí dobou se zvyšují nároky na spolehlivost používaných součástí. Zejména pokud se tyto součásti používají na místech, kde by jejich vada mohla mít za následek ohrožení bezpečnosti. Nedestruktivní testování nám umožňuje kontrolovat, testovat nebo vyhodnocovat zkoumané součásti či sestavy **bez poškození** či porušení celistvosti. Neexistuje zatím žádná metoda, která by dokázala zjistit všechny druhy vad. Nedestruktivními metodami se zabývá obor **defektoskopie**. [1,2]

### 2.2 VADY MATERIÁLU

Materiálové vady se rozdělují na vnější a vnitřní. Při používání nedestruktivních metod se zajímáme hlavně o vady, které nemůžeme zkoumat normálním konvenčním způsobem. V našem případě se jedná o vnitřní vady součástí, mezi které patří například porozita, dutiny, trhliny, segregace, bubliny a jiné.

### 2.3 METODY NDT

S rychlým vývojem techniky, technologií a požadovanými nároky roste také množství používaných metod. Je třeba také podotknout, že různé metody mají různé vlastnosti a zvyklosti. Každá z metod má svoji oblast využití a volí se metrologem dle uvážení a efektivnosti. V tabulce 1 je možné vidět použitelnost některých metod při identifikování vady. Používaných metod nedestruktivního testování je velké množství. V následujících kapitolách seznamuji čtenáře pouze s metodami, které jsem si sám zvolil k objasnění.



### 2.3.1 PROZAŘOVÁNÍ RENTGENOVÝM ZÁŘENÍM

Je třeba říci, že tato metoda patří, spolu s gamagrafií, neutronografií a betatronografií, mezi metody prozařovací. Metoda prozařování rentgenovým zářením patří mezi nejpoužívanější objemové metody, které zkoumají celý průřez součásti. Tuto metodu nazýváme rentgenografie. Zkoumaná součást je prozařována rentgenovými paprsky vycházejícími z tzv. rentgenových lamp neboli rentgenek. Po průchodu objektem se na detektoru vytvoří obraz zachycující vnitřní vady materiálu. Tato zkouška je využívána především pro kontrolu svarů a odlitků. Právě rentgenové záření využíváme při počítačové tomografii. O principu a využití rentgenového záření se podrobněji zmiňuji v dalších kapitolách.

### 2.3.2 PROZAŘOVÁNÍ GAMA ZÁŘENÍM

Prozařování pomocí paprsků gama je obdobné předchozí metodě. Zdrojem záření jsou však různé zářiče, které mohou mít různou aktivitu. Při této zkoušce používáme přirozených radioaktivních zdrojů (např. radon) nebo zdrojů umělých (např. radioaktivní kobalt). Výhodou použití gama záření je snadná manipulace. Tyto gama zářiče jsou přenosné. Gama záření se využívá především pro prozařování materiálu větší tloušťky. Při měření do tloušťky cca 50 mm je vhodnější využití rentgenového záření. Vady jsou na snímku rozeznatelnější. Se zvětšující se tloušťkou se však zvyšuje také napětí rentgenky, které je potřebné pro prozáření. Proto u prozařování větších tlouštěk používáme záření gama. Vzhledem k tomu, že gama metoda využívá radioaktivních zdrojů záření, je třeba dbát na vysokou bezpečnost při práci a zajistit pracoviště dle norem, které určuje zákon. [3]

### 2.3.3 PROZAŘOVÁNÍ ELEKTRONY

Tuto objemovou metodu odborně nazýváme neutronografie. Jak lze vydedukovat z názvu, tato metoda využívá k prozařování objektů neutrony. Prozářením získáme obraz vnitřní struktury objektu. Neutronografie pracuje s rentgenovým a gama zářením. Neutrony se při působení na hmotu chovají odlišným způsobem než elektromagnetické vlny a v podstatě jde o rozptyl neutronů na molekulách. Neutronové částice mají větší hmotnost než elektrony. Reagují především s jádrem prvků. Také proto se tato metoda liší od gamagrafie a rentgenografie při zkoumání stejných prvků.



Útlum záření při neutronografii není v tak velké míře závislý na atomovém čísle, jak je tomu například u rentgenografie. Díky neutronografii můžeme zkoumat, co je uvnitř kovových sestav, což většinou rentgenografií či gamagrafií nejsme schopni na detektoru zobrazit. Prvky, které silně absorbují záření, jsou například vodík, bor, kadmium a několik dalších prvků. To znamená, že například malé množství vodíkových materiálů (oleje apod.) mohou být detekovány uvnitř kovu. Jako zdroje neutronů používáme atomové reaktory, urychlovače částic a radioizotopy (zejména  $^{252}\text{Californium}$ ). Neutronová radiografie se používá k detekci koroze a zkoumání složitých odlitků, jako jsou například turbínové lopatky. Dále také k detekci výbušných náplní, lepených spojů a při kontrole jakosti kritických komponentů, které jsou používány u kosmických aplikací.

#### 2.3.4 ULTRAZVUK

Ultrazvuková metoda používá paprsky mechanického akustického vlnění (tzn. vibrace) krátkých vlnových délek s frekvencí nad hranicí slyšitelnosti. Používané frekvence jsou v rozsahu 0,1 až 20 MHz, vlnové délky pak v rozmezí 1 až 10 mm. Rychlost závisí na materiálu a může dosahovat až 6000 m/s. Ultrazvukové vlnění můžeme použít pouze u materiálů, ve kterých se šíří zvuk a není v nich nadměrně pohlcován. Metoda detekuje vnitřní skryté nespojitosti. Zkoušení ultrazvukem se nejčastěji používá při detekci plošných vad, jako jsou zdvojeniny, trhliny, studené spoje nebo zjišťování tloušťky stěn. Lze testovat jak kovové, tak i nekovové součásti. Jako zdroj vlnění se používají destičky z piezoelektrických krystalů, na které je přivedeno střídavé napětí. Používají se dvě metody měření. Při metodě průchodové, používáme na ose před objektem vysílač a na stejné ose za objektem přijímač. Tato metoda se používá pro zkoušení menších tlouštěk materiálu. Při metodě odrazové se vlny odrážejí od vnitřní vady a vrací se zpět. Vysílač má tedy stejnou polohu vůči vadě, jako přijímač.

#### 2.3.5 KAPILÁRNÍ METODA

Kapilární metoda se používá k detekci povrchových vad, bez ohledu na velikost a tvar. Provádí se aplikací penetračního prášku či rychleschnoucího roztoku na předem vyčištěný a upravený povrch. Detekční látka je vtažena do povrchového defektu a poté vytažena zpět na povrch, kde se rozkládá a vytváří indikaci. Indikace je poté mnohem



lépe vidět než vada. Kapilární metoda se používá k vyhledávání trhlin a pórovitosti. Výhodou této metody je, že je možné kontrolovat velké plochy s velmi nízkými náklady. Je důležité velmi dobře připravit povrch, neboť při neodstranění nečistot se může stát, že nečistota zabrání viditelnosti vady.

Tabulka 1 Použitelnost daných metod [4]

Druh vady	Defektoskopické zkoušky				
	prozařování		ultrazvuk	elektro- magnetické	kapilární
	rentgen	gama			
bubliny, póry, řediny, staženiny, neprovařený kořen svaru	A A A	A A A	A A A-B	C C C	C C C
trhliny povrchové	B-C	B - C	B-C	A	A
trhliny vnitřní	B-C	B-C	A A	C	C
studený spoj	B-C	B-C		B <sup>1)</sup>	B <sup>1)</sup>
nekovové vměstky	A	A	A	C	C
kovové vměstky	A	A	C	C	C
struskovitost	A	A	A	C	C
Odmíšení	C	C	C	B <sup>2)</sup>	C
místní hrubé zrno	C	C	B	C	C

Pozn.: A - spolehlivá indikace vady, B – indikace vady, méně výrazná nebo nejistá, C – vadu nelze identifikovat, <sup>1)</sup> jen vady povrchové, jinak C, <sup>2)</sup> jen vířivé proudy



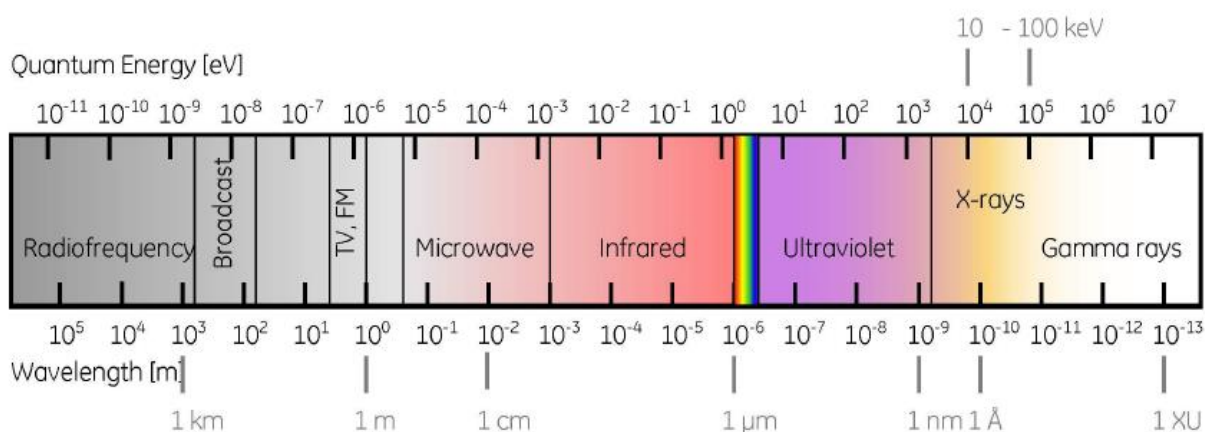
## 3 RENTGENOVÉ ZÁŘENÍ

### 3.1 HISTORIE

Rentgenové záření bylo objeveno v roce 1895 německým fyzikem Wilhelmem Conradem Roentgenem. V té době pracoval jako profesor na univerzitě v německém Wuerzburgu. Rentgenové záření objevil údajně náhodou, a to při ověřování funkčnosti katodového záření, které dříve před ním zjistili jiní vědci. Při experimentování použil Hittorfovu trubici. Zjistil, že některé paprsky pronikají i mimo tuto trubici. Po tomto zjištění ve své laboratoři Roentgen testoval tyto paprsky s použitím fotografické desky. Když tato deska zčernala, věděl, že objevil nový druh záření. Toto záření nazval „paprsky X“.

### 3.2 VLASTNOSTI RENTGENOVÉHO ZÁŘENÍ

Tzn. paprsky X (anglicky X-rays) jsou složeny z rentgenových paprsků a jsou formou elektromagnetického záření, jako jsou rádiové vlny, infračervené záření, viditelné světlo, ultrafialové záření a mikrovlny. Vlnové délky těchto paprsků se pohybují mezi 10nm až 0,01 nm. Tyto paprsky patří do skupiny krátké vlnové délky a v elektromagnetickém spektru se řadí do vysokofrekvenčního pásma mezi gama a ultrafialové záření. [5]



Obrázek 1 Typy záření seřazeny podle vlnové délky [11]



### 3.3 PRINCIP RENTGENOVÉHO ZÁŘENÍ

Rentgenové záření vzniká pomocí rentgenky neboli Coolidgovi trubice, která generuje záření. Rentgenka je skleněná vakuová trubice, ve které je anoda z wolframu a žhavená katoda. Na tyto elektrody je přiváděno napětí. Rentgenky v principu pracují jako trubkové zářiče vyzařující elektrony. Ve vakuu vznikají působením termoemise volné elektrony a působením elektrického napětí mezi dvěma elektrodami z kovu jsou urychlovány, takže vzniká elektronový svazek. V rentgence naráží tento elektronový svazek na terč z kovu, kde je prudce zbrzděn a ztrácí svoji kinetickou energii. Tato energie se přemění z méně než 1% na emitované fotony rentgenového záření a zbylých 99% se mění na teplo. Inicativou k uvolnění záření mohou být dva procesy:

- a) Ionizace atomů
  - Pokud jsou uvolněny elektrony z vnitřních energetických hladin, tak jejich místo obsadí elektrony z vyšších hladin.
  
- b) Zabrzdění elektronů v elektrickém poli atomového jádra
  - Elektron odevzdá část nebo celou svou energii ve formě frekvence.

U prvního případu vzniku se jedná o spektrum čárové neboli charakteristické. U druhého případu vzniku se při brzdění mohou vyzařit všechny možné frekvence. Toto spektrum nazýváme spojitě. [6]





### 3.4 RENTGENKA

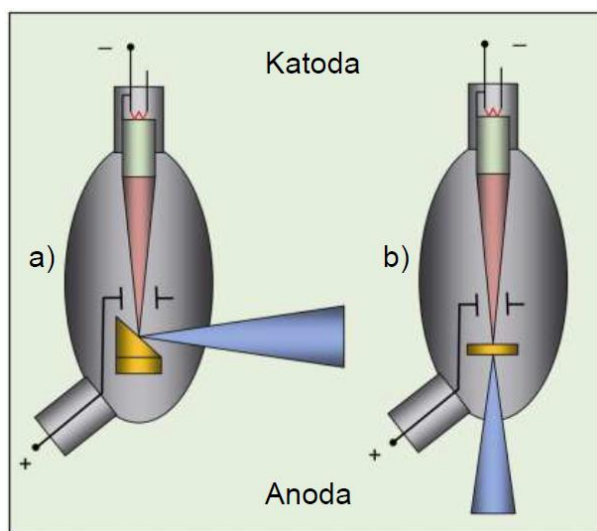
Zvolení konstrukce rentgenky závisí na účelu, pro který budeme rentgenku používat. Dále je pro nás důležitá geometrie svazku záření. Podle těchto faktorů odvozujeme, jak bude vypadat konstrukce rentgenky a také jaké použijeme konstrukční prvky. Z konstrukčního hlediska je pro nás velmi důležitá správná volba terčiku. U rentgenek se používají dva druhy terčiků:

- a) Odrazový terčik
- b) Transmisní terčik



Obrázek 2 Rentgenka [11]

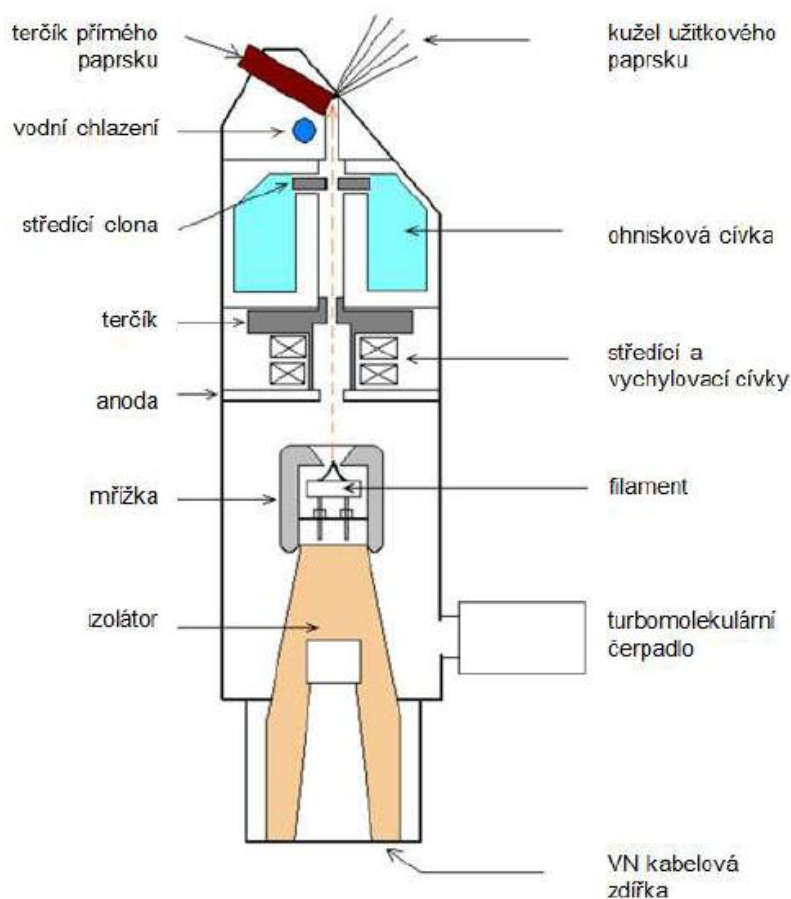
Při použití odrazového terčiku se dá odvádět větší množství tepla a tím lze použít větší výkon a zkrátit dobu měření. Při běžném měření je naprosto dostačující ohnisko o velikosti několika mikronů. Zřídka je nárokována velikost pod 5 mikronů.



Obrázek 3 Provedení odrazového a transmisního terčiku [12]



U transmisních terčů se velikost ohniska zvětšuje s nastaveným výkonem. Pokud chceme dosáhnout malého ohniska, musíme nastavit nízký výkon, což může velmi omezit naše měření. Rentgenky s transmisním terčem ale mají jednu velkou výhodu. Při nízkých výkonech se zmenší průměr svazku a tím se zvětší rozlišení. Použití transmisního typu je výhodné pouze při měření mikroskopicky malých objektů, kde je velmi vysoká náročnost na rozlišení. Při dopadu svazku paprsků se v ohnisku vytváří vysoká teplota. Pokud se tedy zvyšuje výkon a s ním i teplota, je třeba zabránit zničení terče. Proto se provádí tzv. defokusování. To znamená, že se účelně svazek paprsků rozostří a tím se omezí hustota energie na terči.



Obrázek 4 Schéma konstrukce rentgenky [12]



Faktory ovlivňující strukturální rozlišení:

- Rotační osa
- Zvětšení
- Rozlišení detektoru
- Velikost ohniskového bodu

Dále se rentgenky dají rozdělit dle konstrukce. Existují rentgenky s otevřenou konstrukcí a také s uzavřenou konstrukcí. Při napětích menších než 150 kV se používají uzavřené konstrukce. Při této konstrukci je vakuum vytvořeno již při výrobě a zůstává zachováno dlouhou dobu ve vakuové baňce. Rentgenka je tedy v provozu do skončení její životnosti. Po té je rentgenka potřeba vyměnit. U otevřené konstrukce je nutná pravidelná údržba, protože s vyšším napětím se vytváří vyšší opotřebení na elektrodách. Pro otevřenou konstrukci se obvykle používají napětí vyšší než 150 kV. Součástí otevřené rentgenky je také samostatné vakuové čerpadlo, které vytváří vakuum trvalým provozem.

### 3.5 FYZIOLOGICKÉ ÚČINKY

Při práci s rentgenovým zářením může docházet k poškození živé tkáně. Z hlediska rozlohy poškození se jedná o celkové či místní poškození. S ohledem na délku trvání může dojít k akutnímu nebo chronickému poškození. V našem případě je nejpravděpodobnější spálení kůže, což je akutní místní poškození. Ke spálení kůže dochází nejčastěji nedostatečnou opatrností při manipulaci v dosahu primárního svazku záření. Člověk by měl brát také na vědomí, že nadměrné vystavování se rentgenovým paprskům je pro tělo škodlivé. I přes to, že se jedná pouze o malé množství v průběhu dlouhé doby. Dopad na člověka se může projevit teprve po několika letech. Poté může docházet k trvalým změnám imunitního systému nebo změnám orgánů, jejichž funkčnost je závislá na tvoření krve apod. Při práci s rentgenovým zářením je třeba také brát v úvahu genetické vlastnosti jedince. Při ozařování malými dávkami nemusí být ohrožen jedinec, ale ozáření se může přenést do dalších generací. U počítačové tomografie je však nebezpečí vyloučeno, pokud se dodržují správné postupy a zásady. Dodavatelé tomografů musejí zajistit bezpečí obsluhy a při měření se dvířka tomografu



zavírají. Ovládací jednotka by měla být nastavena tak, aby nebylo možné měřit s otevřenými dvířky. Nemělo by tedy být možné přijít do kontaktu se zářením.

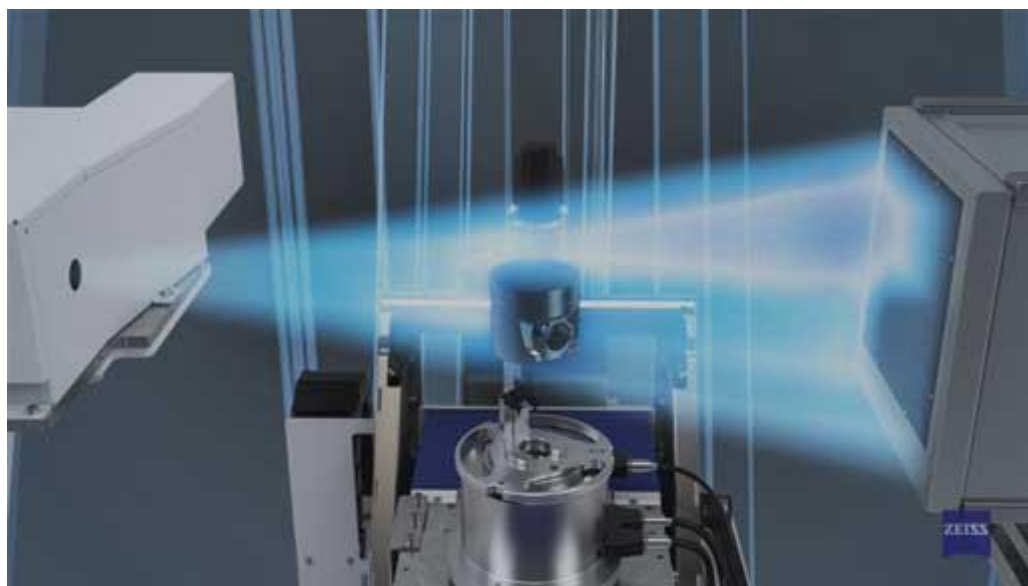


## 4 POČÍTAČOVÁ TOMOGRAFIE

### 4.1 HISTORIE

Rentgenová technika se v lékařství používá už dlouhou dobu. Jako první se rentgenovým zářením, ve spojitosti s počítačovou tomografií, zabýval Johan Radon. Na začátku 20. století doložil svoje snažení svými matematickými postupy a výpočty. Jeho teorie se používá při rekonstrukci snímků vytvořených pomocí počítačového tomografu. Svoji teorii nazval Radonova transformace. V oboru lékařství vypracoval v roce 1963 americký fyzik Allan Cormack teorii tomografického řezu. Snažil se vynaleznout přístroj, který dokáže analyzovat části těla a určit, kde mají hranice jednotlivé orgány, a to vše za pomoci rentgenových paprsků. Nezávisle na Cormackovi byl první tomograf sestaven Angličanem Godfrey Newbold Hounsfieldem v roce 1972. V roce 1979 dostali Cormack a Hounsfield Nobelovu cenu za objev výpočetní tomografie. V roce 1980 začala být tomografie populární pro analýzu materiálu a nedestruktivní testování (NDT). Používala se pro pozorování struktury materiálu (např. vlákny vyztužené plasty) a detekci vady materiálů. Přístroje na testování materiálů jsou často malé a zaměřují se na vzorky uříznuté z větších objektů.

V posledních letech se technologie počítačové tomografie začala prosazovat také v odvětví metrologie. Je to alternativní metoda k souřadnicovým optickým 3D měřicím přístrojům. První pokusy provádět měření rozměrů za stávajících CT skenerů se provedly v roce 1991. Přesnost byla ale pouze v řádech 0,1 mm. V roce 2005 byl představen na veletrhu Control Fair v Německu první jednoúčelový dimenzovací CT přístroj. Větší a silnější zařízení umožňovalo měřit celé objekty a prosvítit větší tloušťky. CT technologie je jediná technologie, která dokáže měřit vnitřní i vnější geometrii součásti. Tudiž může rozpoznávat vnitřní i vnější vady bez nutnosti poškození sledovaného objektu. Také je to jediná technologie kontroly kvality, která nepotřebuje vnitřní přístup. Nástup této výrobní metody podporuje trend a zvyšuje poptávku po trojrozměrném CT. Např. při výrobě komponentů z více materiálů (např. plastové díly s kovovými vložkami) je důležitá kontrola vnitřních vad. Průmysl už nemůže akceptovat, že měření často unikají geometrické a toleranční kontrole kvality. [7]



*Obrázek 5 Vizualní model prozařování měřeného dílce [13]*

## 4.2 PRINCIP POČÍTAČOVÉ TOMOGRAFIE

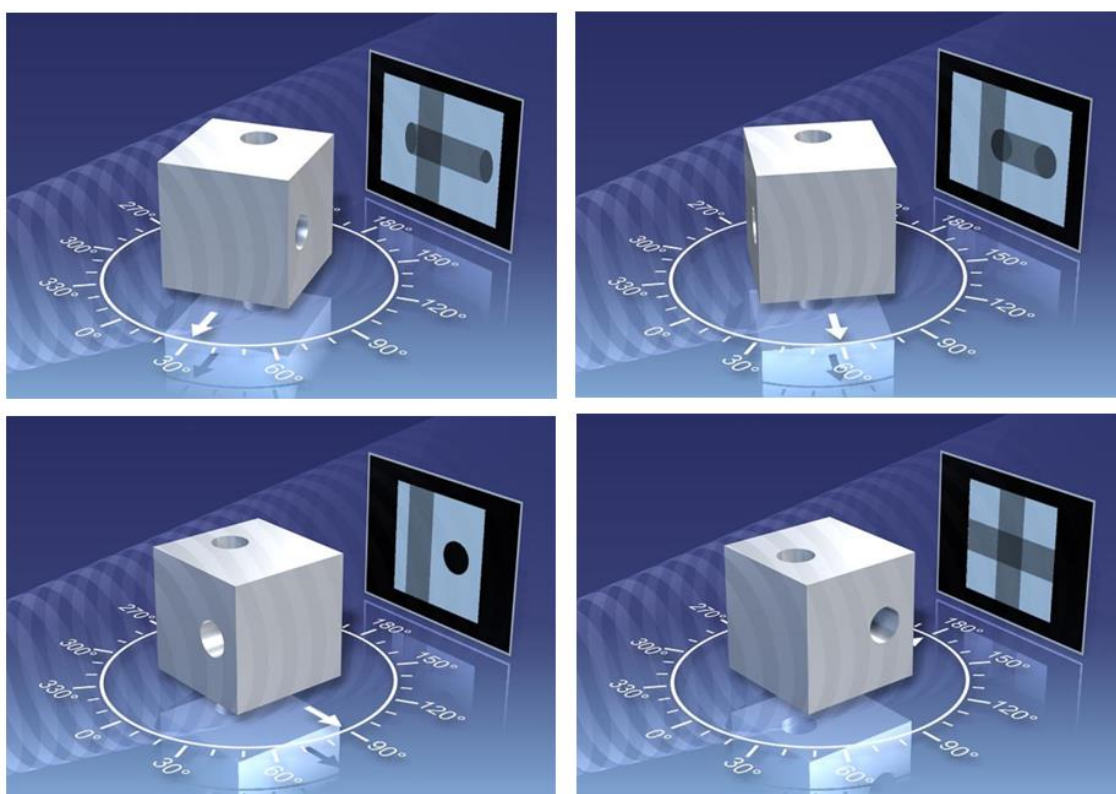
Počítačová tomografie patří mezi nedestruktivní moderní metody testování. Čím dál více se využívá k měření rozměrů a průmyslové inspekci. Rentgenka dokáže vytvořit téměř bodový zdroj záření, které prochází měřeným dílem. Podle absorpce materiálu a složitosti dílu, se část záření dostane na rentgenový detektor a pomocí výpočetní techniky je obraz zpracován. Čím delší je dráha paprsku procházející objektem, tím méně záření dopadá na detektor. Absorpce záření je úměrná zvětšování se **atomového čísla** daného prvku. To je důvod, proč při prozařování plastu je potřeba menší výkon rentgenky, než při měření dílů ze železa.



*Obrázek 6 Měření dílce s použitím doplňkového dotykového senzoru [14]*

### 4.3 VYTVOŘENÍ TŘETÍHO ROZMĚRU

Po dopadu záření na detektor, se pomocí výpočetní techniky vytvoří 2D snímek v digitálním tvaru a je možno jej vyhodnocovat. Tento princip odpovídá klasickému vytvoření rentgenového snímku. Počítačová tomografie využívá vytvoření třetího rozměru postupným otáčením měřeného dílu. Díl je upevněn na rotačním stole mezi zdrojem záření a detektorem. Zdroj záření, v kombinaci s detektorem, vytváří několik set až tisíc 2D snímků, které díky otáčení dílce zachytí objekt ve 360 stupních. Získáme tedy mnoho informací, které vhodnou matematickou metodou software vyhodnotí a výpočtem dokáže vytvořit objemový model.



Obrázek 7 Zachycení měřeného dílce ve 360° [15]

#### 4.4 REKONSTRUKCE SNÍMKU

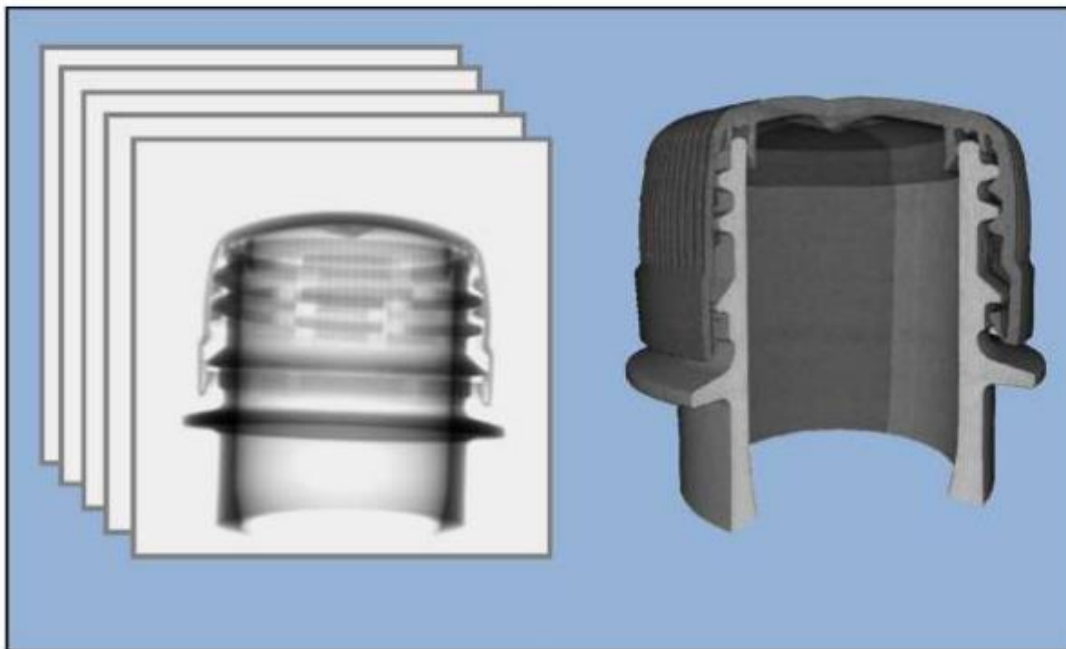
Při vytváření objemového modelu se většinou používá tzv. metoda filtrovaného zpětného promítání, kdy se z 2D snímků, které nazýváme projekční data, vypočítávají voxelová data. Procházející záření se při pronikání materiálem s každým dalším voxelu zeslabuje. Proto dvojice voxelů, která je ze stejného materiálu, ale má jinou polohu vůči zdroji záření, by na snímku měla rozdílný odstín. Hodnoty na snímcích by tedy neodpovídaly naměřeným intenzitám, ale sumě zeslabení. Z toho důvodu je třeba provést logaritmování a linearizaci charakteristiky. Tento proces nazýváme **příprava před zpracováním dat**.

K tomu, abychom mohli správně a přesně vypočítat objemový model, je třeba udělat tzv. **filtrování**, což je proces, při kterém je naším cílem zvýšit intenzitu hran a tím je lépe zaostřit. Toto zaostřování se provádí za pomoci filtrační funkce a je založeno na téměř stejném principu, jako úprava obyčejných digitálních fotografií. Tento proces je však kvůli matematickému zpracování nezbytný. Posledním krokem je **zpětná projekce**. Po procesu filtrování se snímky promítají nazpět. Postup promítání snímků,





je v opačném pořadí k jejich původnímu naměření. Obraz se tvoří až do doby, kdy jsou všechny snímky promítnuty nazpět.



Obrázek 8 Rekonstrukce snímku uzávěru plastové lahve [12]

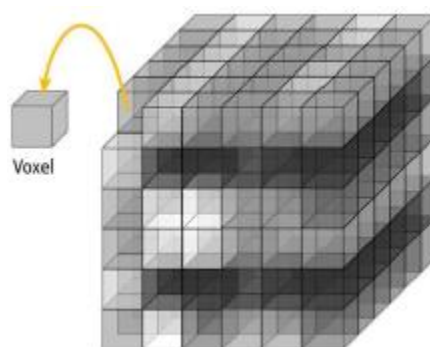
### JEDNOTKA PIXEL

Slovo pixel je zkrácené z anglických slov „picture element“, což v překladu znamená obrazový element. Pixel je základní jednotkou počítačového grafického obrazu. Obraz je rozdělen rastrovou mřížkou, dle které se určují souřadnice daného pixelu. Můžeme si ho představit jako určitý bod na obrázku, který svítí. Pixel má jasně definované souřadnice a barvu. Každá barva je se skládá ze tří složek barevného spektra (červená – zelená - modrá). Abychom měli na displeji fyzicky odpovídající velikost reálného měřeného pixelu, je třeba nastavit odpovídající rozlišení obrazovky. Při práci s daty v počítačové tomografii se používá tzv. voxel.

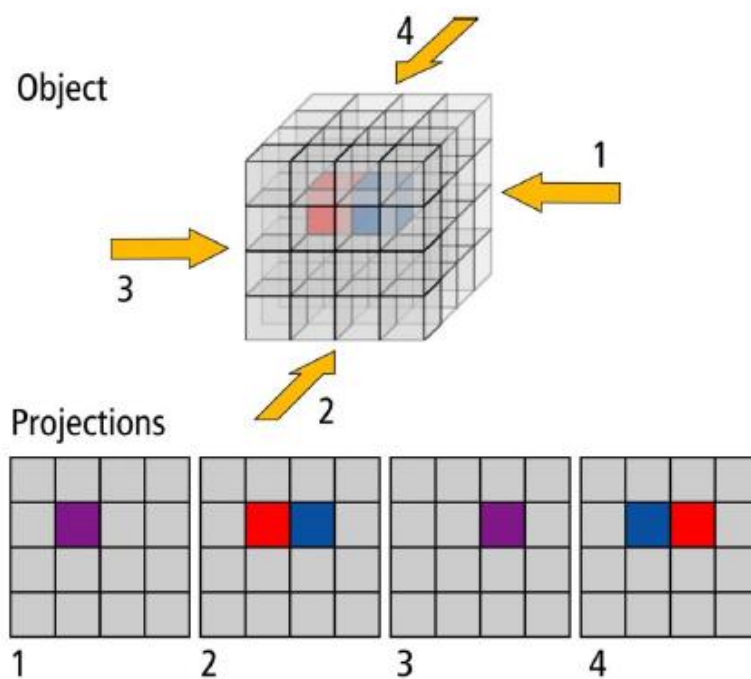


## JEDNOTKA VOXEL

Rentgenová tomografie používá k lokalizaci jednotlivých bodů jednotku voxel. Název jednotky vychází ze zkrácení anglických slov „volumetric pixel“, což v češtině znamená objemový pixel. Voxel je tedy obdobný pixelu, s tím rozdílem, že každý voxel má také svoji výšku. Je tedy možné jednotlivé voxely přiřadit k mřížce trojrozměrného prostoru.



Obrázek 9 Voxel [11]



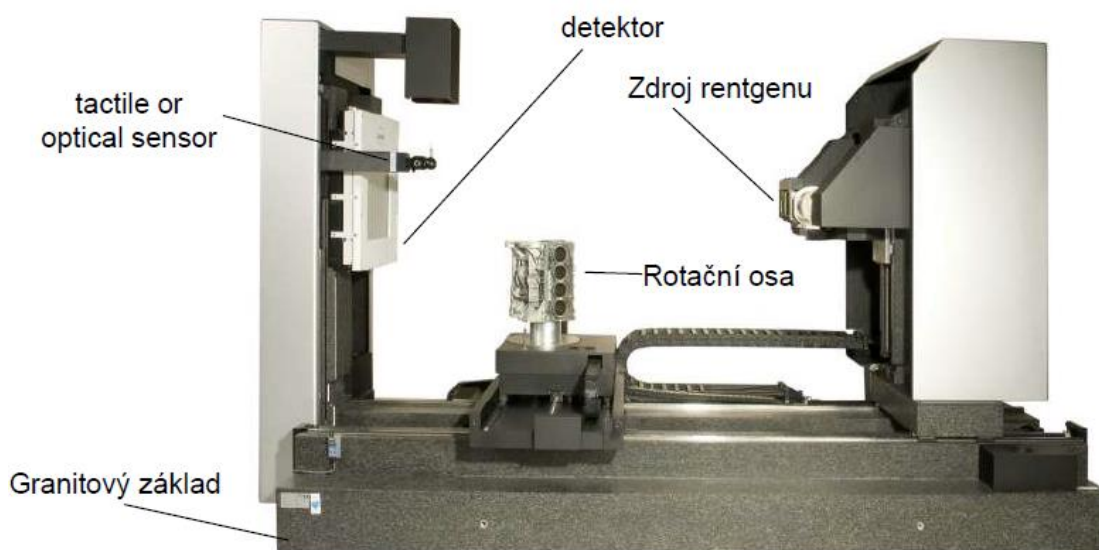
Obrázek 10 Projekce jednotlivých bodů, dle jejich polohy v prostoru [11]



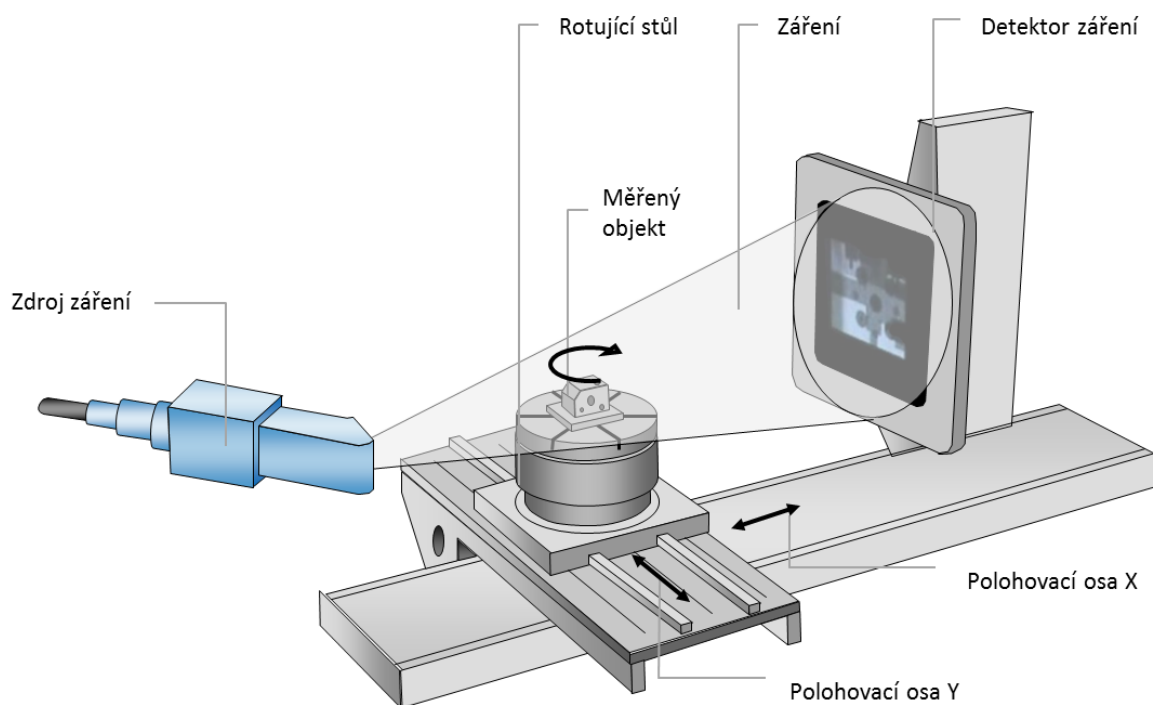
## 4.5 KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ

Každá konstrukce tomografických strojů je obdobná a má tři základní součástky: **zdroj záření** – rentgenka, **rotační stůl** a **detektor**. Často se k těmto součástkám také přidávají různé druhy senzorů pro přesnější a rychlejší měření. Je třeba neopomínat škodlivost záření a každý tomograf by měl odpovídat předpisům pro přístroje s úplnou ochranou podle nařízení o rentgenovém záření. Měřicí přístroje bývají vybaveny olověnou clonou v plášti přístroje.

Z hlediska konstrukce je důležitá rotační osa, dle které se tomografy dělí na dva druhy. Prvním je případ, kdy se otáčí měřená součást, a zdroj záření s detektorem jsou statické. U druhého případu se otáčí zdroj záření s detektorem okolo měřeného dílce. Ten je umístěn na vodorovném stole. První případ konstrukčního uspořádání je typický pro průmyslové využití a dává se mu přednost především z ekonomických důvodů. Takovýto stroj je možné vyrobit s nižšími náklady a to i při velmi vysoké přesnosti. Další výhodou této konstrukce je, že lze při měření využít souřadnicové měřicí techniky. V lékařství je užití této konstrukce nemyslitelné, a proto se používá druhá varianta s pohyblivou rentgenovou jednotkou. V tomto případě jsou velmi důležité vlastnosti rotační osy. Do výsledku měření vstupuje mnoho zdrojů chyb: radiální odchylka, axiální odchylka, házení otočné osy a vlivy ostatních částí stroje. Proto jsou požadavky na vlastnosti rotační osy velmi vysoké, obzvláště pokud se jedná o velké průměry. U menších průměrů jsou požadavky na rotační osu nižší.



Obrázek 11 Reálný model počítačového tomografu [12]



Obrázek 12 Vizuální návrh konstrukce počítačového tomografu [15]

## 4.6 OBLASTI VYUŽITÍ

Počítačová tomografie je nejčastější metodou nedestruktivního testování. Tato metoda má velkou škálu využití a je používána v různých oborech. Nejčastěji se používá v oboru strojírenství, lékařství a stavebnictví. Používá se však také například v elektronice při kontrole pájených spojů, či v oblasti umění. Počítačová tomografie má však také nevýhody. Jednou z nich je maximální rozměr měřeného dílce. Možná velikost měřeného dílce se odvíjí od velikosti a možností tomografu. Další nevýhodou je potřebný výkon rentgenky. Při pronikání záření materiálem se záření zeslabuje.

Při měření větších dílů či málo propustných materiálů je tedy třeba většího výkonu rentgenky. Vhodné využití počítačové tomografie je při měření dílců z materiálů, jako jsou například plast, hliník či lehké slitiny. Jednou z velkých nevýhod počítačové tomografie je dosažitelná přesnost měření. I při vysokém výkonu rentgenky je chyba měření stále větší, než při měření dotykovými senzory. Chyba měření se odvíjí především na volbě stroje. Dodavatelé udávají maximální chybu měření pod zkratkou



MPE (Maximum Permissible Error) a liší se od měření dotykovými senzory téměř o jeden řád. Na obrázku 13 lze vidět souvislost mezi napětím, velikostí dílce a materiálem dílce. Jsou to však pouze orientační hodnoty a při měření je také podstatná geometrie měřeného dílce.

	130 kV	150 kV	190 kV	225 kV	450 kV
<b>Ocel / keramika</b>	až do 5 mm	až do 8 mm	až do 25 mm	až do 40 mm	až do 70 mm
<b>Hliník</b>	až do 30 mm	až do 50 mm	až do 90 mm	až do 150 mm	až do 250 mm
<b>Plast</b>	až do 90 mm	až do 130 mm	až do 200 mm	až do 250 mm	až do 450 mm

Obrázek 13 Souvislost mezi napětím, velikostí dílce a materiálem dílce [12]

#### 4.6.1 VÝBĚR RENTGENKY

Rentgenové záření si lze představit jako proud fotonů různých kmitočtů. Při výběru rentgenky je pro nás hlavním faktorem materiál měřeného dílu. Aby byly prozářeny některé materiály, je potřeba použít záření s vysokou energií. Opačným případem jsou materiály, na které je potřeba poměrně nízká energie záření. Jelikož je energie fotonů úměrná jejich frekvenci, zvolené elektrické napětí a frekvence ovlivňují rychlost fotonů.

V praxi se používají rentgenky s napětím od 90 kV do 450 kV. Při měření kovových dílů je dobré zvolit vyšší napětí. Při měření plastových dílů volíme napětí od 90 kV do 130 kV. Z hlediska konstrukce rentgenky je možné vybrat možnosti otevřené nebo uzavřené rentgenky. Otevřená konstrukce rentgenky má neomezenou životnost, ale je nutná pravidelná údržba. Při použití otevřené konstrukce lze také dosáhnout



vyššího rozlišení. Při volbě uzavřené konstrukce rentgenky je možné použít vyšší výkon, než u konstrukce otevřené a je bezúdržbová.

#### 4.6.2 INTEGRACE STROJŮ DO VÝROBY

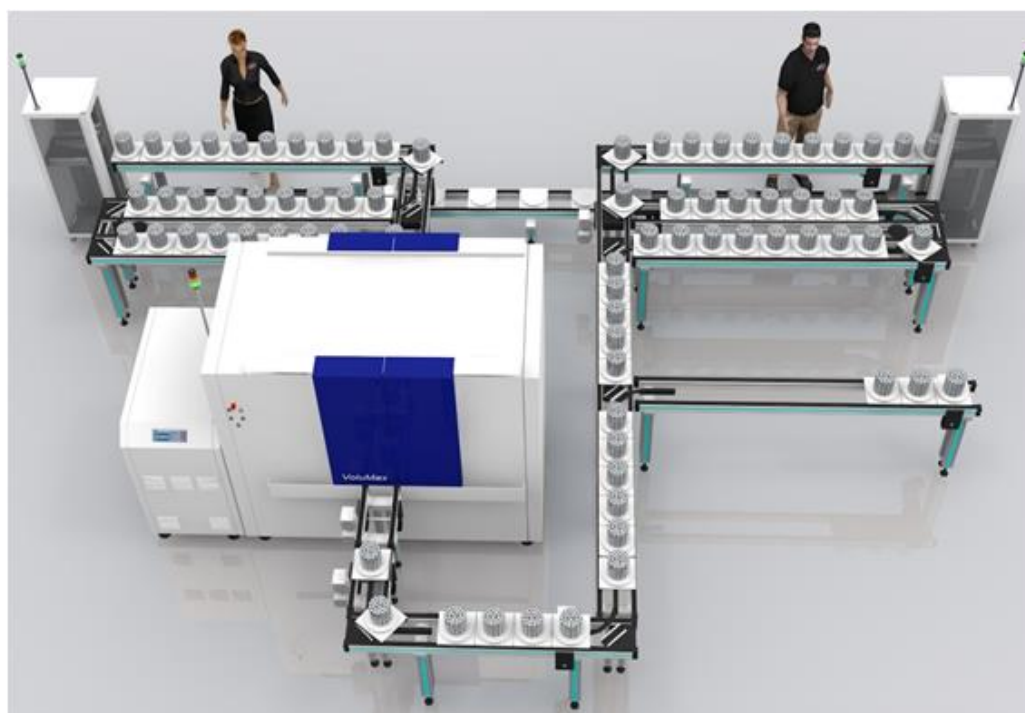
S vysokými nároky na kvalitu každého dílu bylo potřeba začít uvažovat o integraci počítačové tomografie do linkové výroby. Tato integrace je často nazývána jako **INLINE CT**. Donedávna se kontrolovaly především díly, které byly velmi složité, za účelem porozumět problematice nebo při namátkové kontrole součástí. Měření bylo časově náročné a poměrně drahé. Dnes je ale třeba kontrolovat mnoho komponentů a to co nejrychleji.

Klasická metoda nezaručuje, že všechny díly, které jsou dodávány zákazníkům, jsou bezproblémové. Jde o pouhou namátkovou kontrolu a statisticky mohou být všechny díly v pořádku. Pokud však nezměříme všechny díly, nemůžeme zaručit stoprocentní správnost. Inline CT však kontroluje celou produkci a tím je zaručeno zákazníkům, že se k nim dostanou pouze bezzávadné výrobky.

Podstatou Inline CT je zkrátit především časy upnutí, kdy je lidská ruka nahrazena např. pásovým dopravníkem (GE) nebo robotem (ZEISS). U prvního případu projíždí díl skrze tomograf. U druhého případu (viz. obrázek 9) je použit pásový dopravník k transportování dílu na místo, kde díl robot uchopí a následně po změření zase vrátí nazpět. Rozdílné řešení podávání komponentu závisí především na konstrukci tomografu. Vývojáři Inline tomografie se také zaměřili na lepší řešení ukládání dat, díky čemuž může linka spolehlivě a plynule měřit mnoho komponentů jdoucích za sebou. Měření a kompletní vyhodnocení jednoho objektu je možné provést za méně než 30 sekund. [15]



*Obrázek 14 Integrace robota do výrobní linky [15]*



*Obrázek 15 Výrobní linka s tomografem VoluMax [20]*

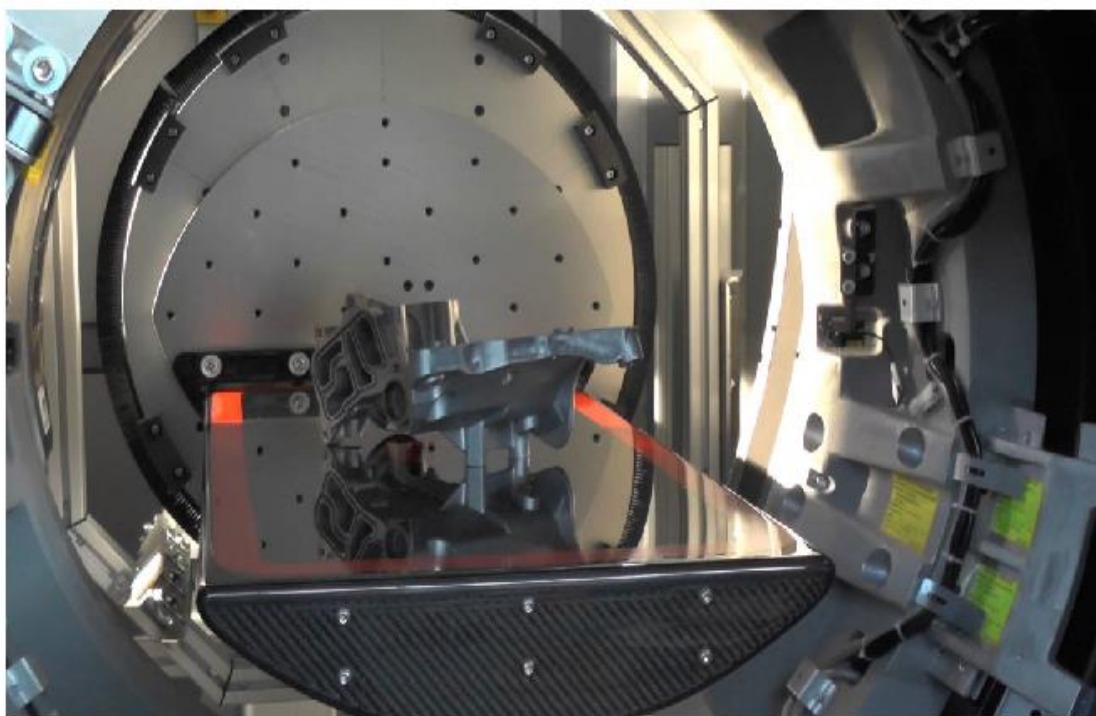


## 4.7 DODAVATELÉ TOMOGRAFŮ

Společností, které se zabývají výrobou a vývojem počítačových tomografů, je velké množství. Ve svojí práci zmiňuji pouze některé z nich. Zvolil jsem nejvýznamnější společnosti současnosti, které dle mého uvážení mají největší přínos pro strojírenskou metrologii a její vývoj. Někteří dodavatelé rovněž vyrábějí lékařské tomografy. V této práci se však jimi nebudu zabývat.

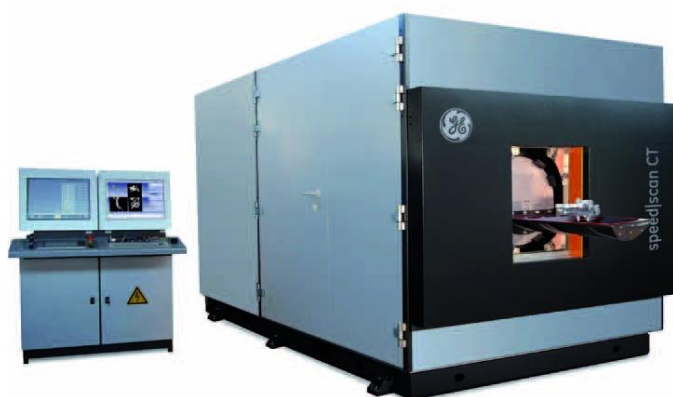
### **General Electric Company**

Společnost General Electric (zkráceně GE) je americká akciová společnost, která vznikla v roce 1892. Mezi zakladateli byl také známý vynálezce Thomas Alva Edison. Z velké části se soustředí na obor dopravní technologie. GE vyrábí tomografy s možností dvou konstrukcí. Tomografy s rotujícím stolem, na kterém je upevněn dílec, a statickým zdrojem záření a detektorem. Druhá varianta provedení je s rotujícím zdrojem záření a detektorem, přičemž měřená součást je položena na nepohyblivý stůl. Tomografy GE mají otevřenou konstrukci rentgenek s volbou transmisního nebo odrazového terčiku.



*Obrázek 16 Rotující zdroj záření a detektor u tomografu Speed|scan CT 64 [16]*





*Obrázek 17 Speed/scan CT 64 od firmy GE [16]*

### **Carl Zeiss**

Carl Zeiss je německá společnost založena v Jeně roku 1846. Společnost se zabývá především obory: moderní optika, mikroskopie, medicínská technika a průmyslová měřicí technika. Konstrukce tomografů Carl Zeiss mají statický zdroj záření s detektorem a rotující stůl, rentgenka bývá jak otevřená konstrukce, tak uzavřená. V rámci spolupráce s Fakultou strojní ČVUT v Praze bylo vybudováno metrologické centrum vybavené souřadnicovou měřicí technikou od této společnosti.



*Obrázek 18 Tomograf METRONOM od firmy Carl Zeiss [17]*



*Obrázek 19 Tomograf VoluMax od firmy Carl Zeiss [17]*

Je mnoho společností, zabývajících se počítačovou tomografií a výrobou tomografů. Kromě ukázky tomografů Carl Zeiss a General Electric je vhodné zmínit také společnosti, jako jsou například Werth Masstechnik, Siemens, Nikon Metrology, NanoFocus Ray a mnoho dalších. Rád bych také zmínil, že tomograf slouží především k nasnímání bodů analyzované součásti a k vyhodnocení a analýze se používá software.

## **4.8 SOFTWARE PRO ANALÝZU MRAKU BODŮ**

Použití softwaru slouží k analýze a práci s naměřenými daty. Z pohledu vývoje a historického hlediska jsou dva typy softwaru. Prvním typem jsou softwary, které byly vyvinuty jako nástroj pro analýzu naměřených dat a už od svého počátku pracují s mrakem bodů. Mezi tyto softwary patří například VGStudio MAX od společnosti Volume Graphics. Druhým typem jsou softwary, které se od počátku své existence používají především při souřadnicovém měření. Na počátku se pracovalo s jen pár body a až postupným vývojem se software přizpůsobil, aby mohl pracovat s mrakem bodů. Tento software je zaměřen především na tzn. měření GPS (Geometrical Product Specifications) neboli měření geometrických specifikací. Mezi tyto specifikace patří

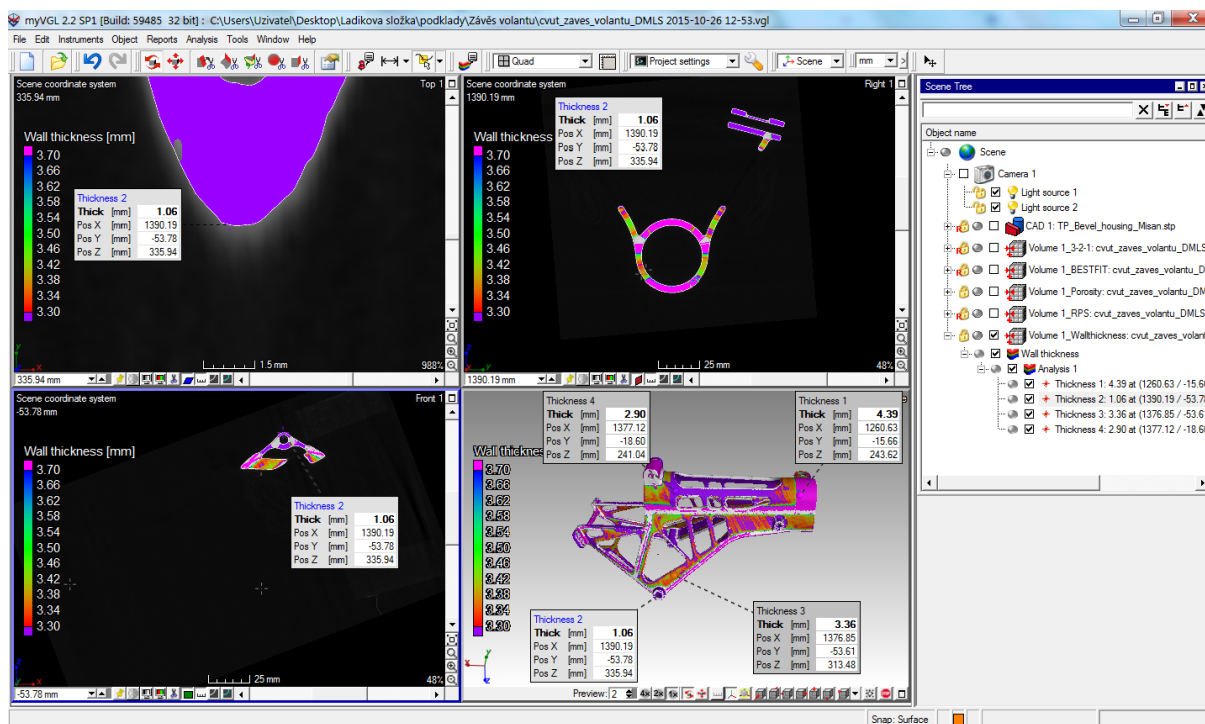


například kontrolování geometrických tolerancí a tolerancí rozměrů součástí. Příkladem je software Calypso od společnosti Carl Zeiss. V dnešní době se oba typy softwarů sobě začínají podobat a snaží se integrovat do softwaru možnosti, které v softwaru scházejí nebo se stále vyvíjejí.

#### 4.8.1 VOLUME GRAPHICS

Společnost Volume Graphics nabízí svým zákazníkům mnoho produktů a zákazník má možnost si vybrat software dle využití a potřeb. Je také možnost si software přizpůsobit pomocí mnoha přídavných modulů, které jsou určeny pro průmyslové využití. Mezi mnohé možnosti softwaru patří například zpracování dat, analýzy, vizualizace, ale také funkce automatizace, či simulace založené na tomografických datech.

Při analyzování a práci s mračnem bodů je nejvhodnější volbou od Volume Graphics software VG Studio Max. Tento produkt je placený a obsahuje také přídavné add-ons. Software, který jsem použil, pracuje s naměřenými daty pouze jako prohlížeč a není možné v něm vytvářet analýzy. Tento software je bezplatně ke stažení. V této práci nastíním některé analýzy závěsu volantu formule.



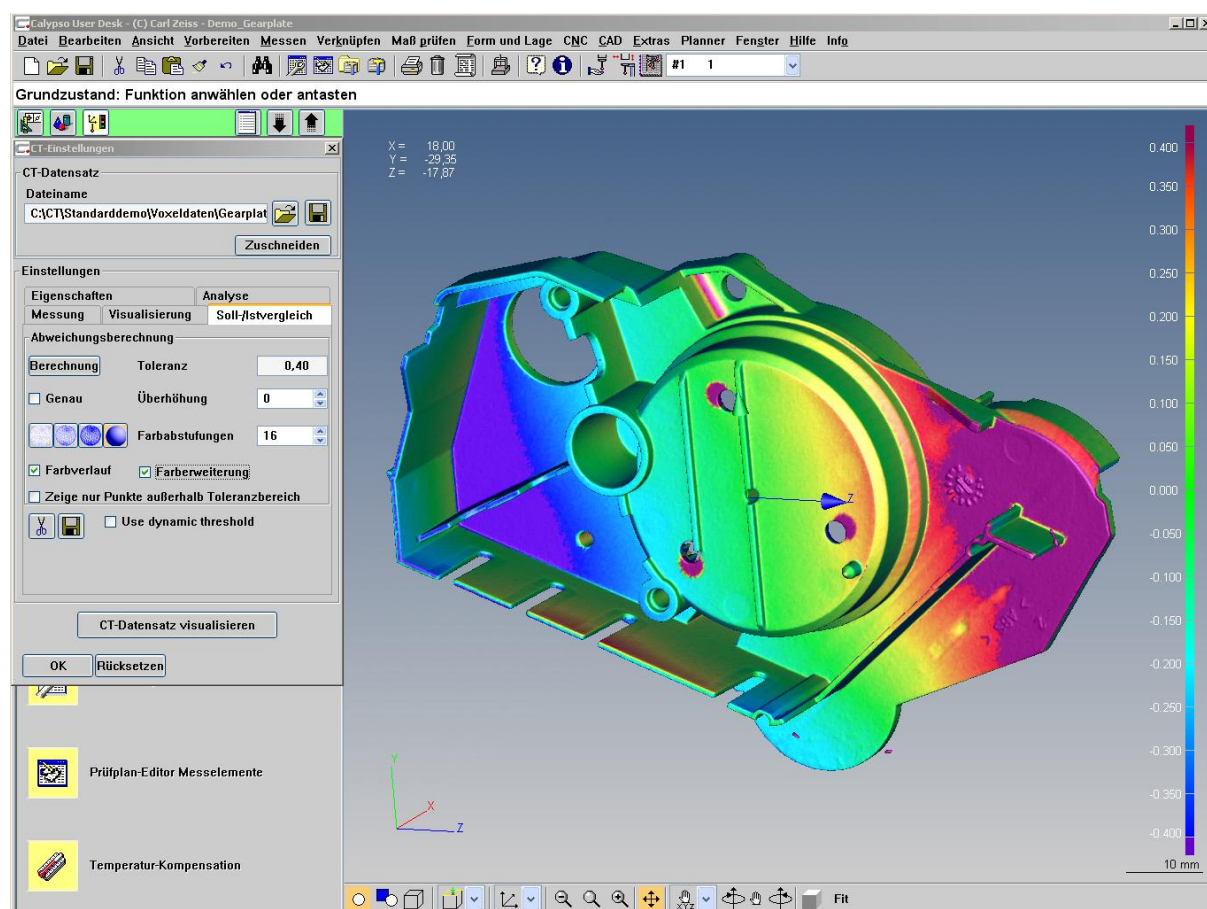
Obrázek 20 Náhled programu myVGL



## 4.8.2 CALYPSO

Program Calypso je výtvořem německé firmy Carl Zeiss. Software je určen jak pro manuální, tak CNC měření. Umožňuje multisenzorové snímání a podporuje všechny aktuální senzory firmy Carl Zeiss. [4]

Software může pracovat v offline i online modu programování. Velkou výhodou tohoto softwaru je, že jeho využití má široké pole působnosti. Je tedy jednoduše možná kombinace například 3D měřicího stroje a počítačového tomografu. Software obsahuje základní balíček funkcí. Je však možné ho rozšířit o nástroje pro speciální úlohy.



Obrázek 21 Náhled programu Calypso [20]

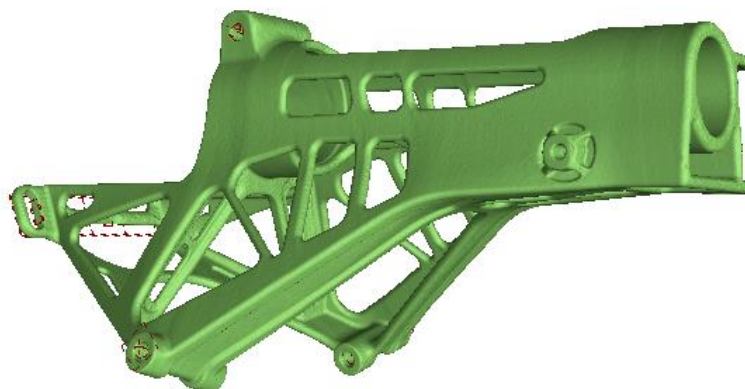


## 5 MOŽNÉ ANALÝZY S VYUŽITÍM POČÍTAČOVÉ TOMOGRAFIE

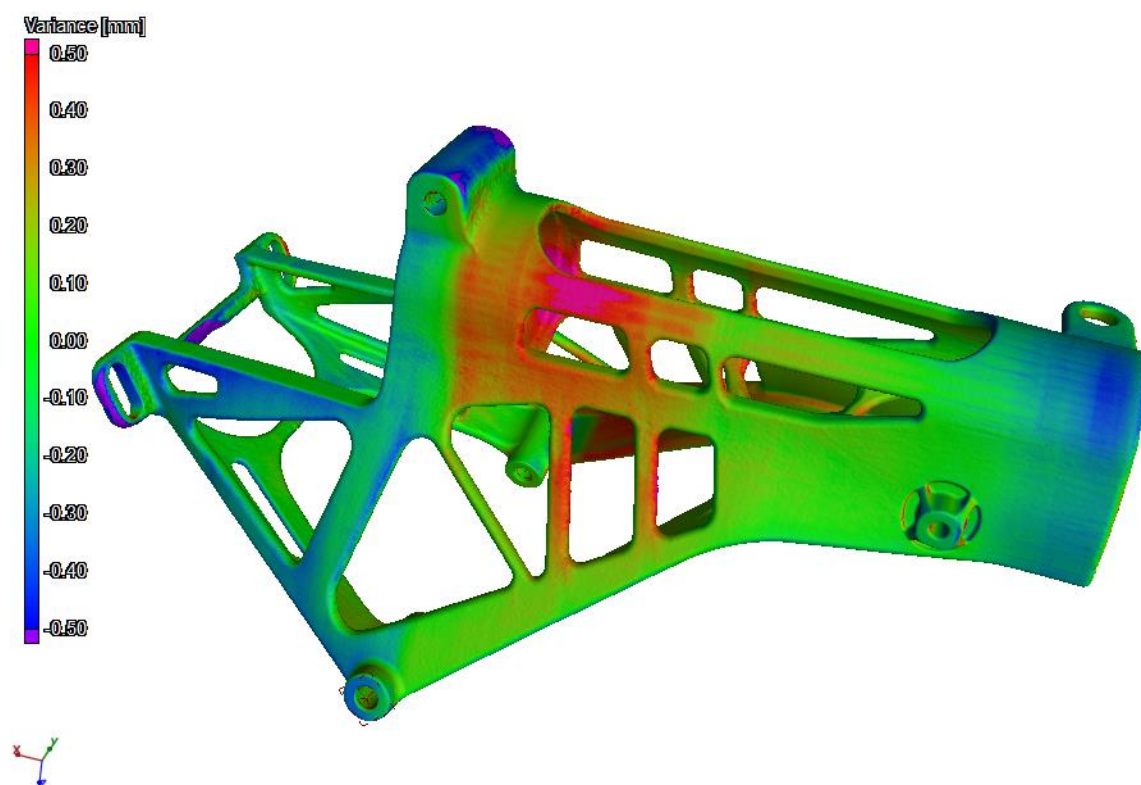
Mezi cíli této práce patří také seznámení čtenářů s možnostmi měření a možné analýzy mračna bodů. V současné době průmyslová tomografie překonává standardní metrologii a klasické inspekční metody na sedmi polích působení. Analýza defektů, separace, kontrolování sestav, analýza tloušťky stěn, komparace neboli porovnávání s CAD modelem, měření rozměrů a reverzní inženýrství.

### 5.1 POROVNÁNÍ ODCHYLEK S CAD MODELEM

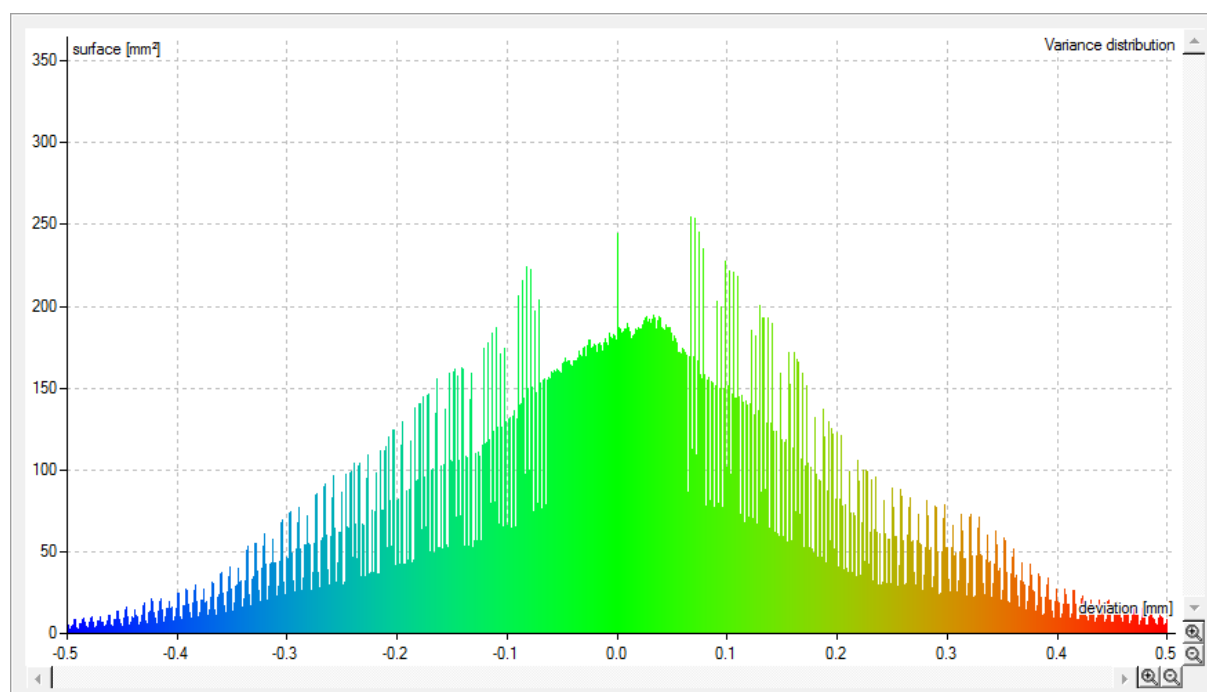
Tato metoda vypovídá o odchylce naměřených dat s daty CAD modelu. Možnost srovnávat nominální a skutečná data v rámci jednoho softwaru je velkou výhodou a je mnohem efektivnější, než srovnávání jakýmkoliv jiným způsobem. Při analyzování lze také použít možnost nastavení tolerancí. Po načtení CAD modelu dochází k porovnání s naměřenými daty. Poté software určí, které plochy mají větší, nebo naopak menší rozměr a barevně odliší plochy dle jejich odchylky k nominálním hodnotám. Jako vyhodnocení je možné vygenerovat zprávu, která obsahuje rozbor konkrétních oblastí. Na obrázku 22 je CAD model závěsu volantu formule, na kterém jsou provedeny některé z analýz v softwaru myVGL od Volume Graphics.



*Obrázek 22 CAD model závěsu volantu*



Obrázek 23 Porovnání naměřených dat s CAD modelem



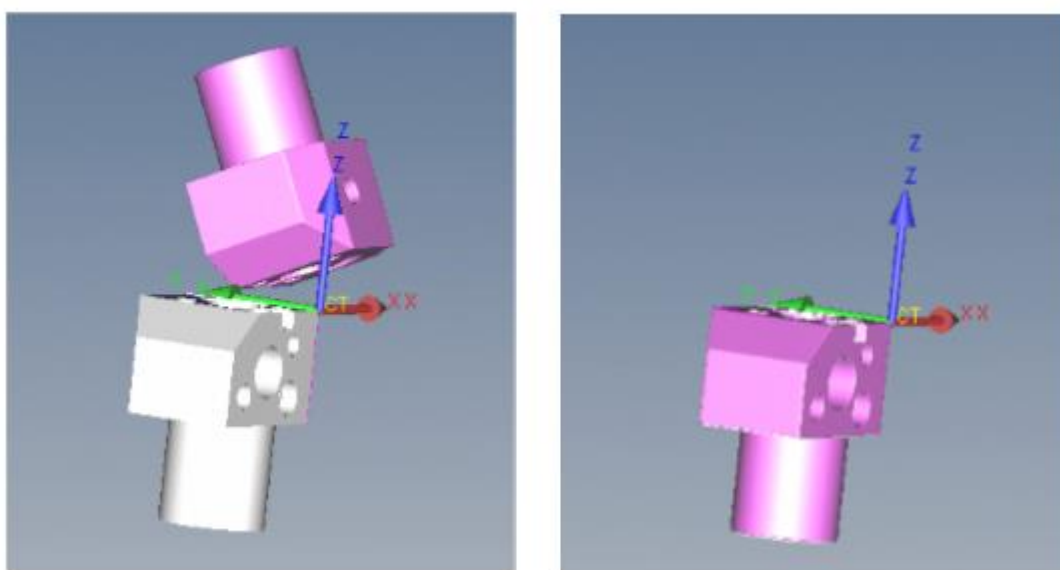
Obrázek 24 Histogram odchylek



Při porovnávání naměřených dat s nominálními je důležitým krokem **vyrovnání** součásti. Vyrovnání znamená napasování naměřených dat na data CAD modelu. Používají se tři způsoby vyrovnání: metoda 3-2-1, best-fit a RPS (Reference Point System)

### **METODA 3-2-1**

Při vyrovnání je třeba definovat referenci základního systému. Primární referenci (3 body na rovině), sekundární referenci (2 body na přímce) a počátek souřadnic. Metoda 3-2-1 je velmi přesná a preferuje se pro většinu případů. Při vyrovnání se do výpočtu nezahrnují chyby a odlehle hodnoty. Při metodě 3-2-1 nejsou nezbytná kompletní data. Podmínkou použití této metody je, že součást musí mít rovinu a přímku.

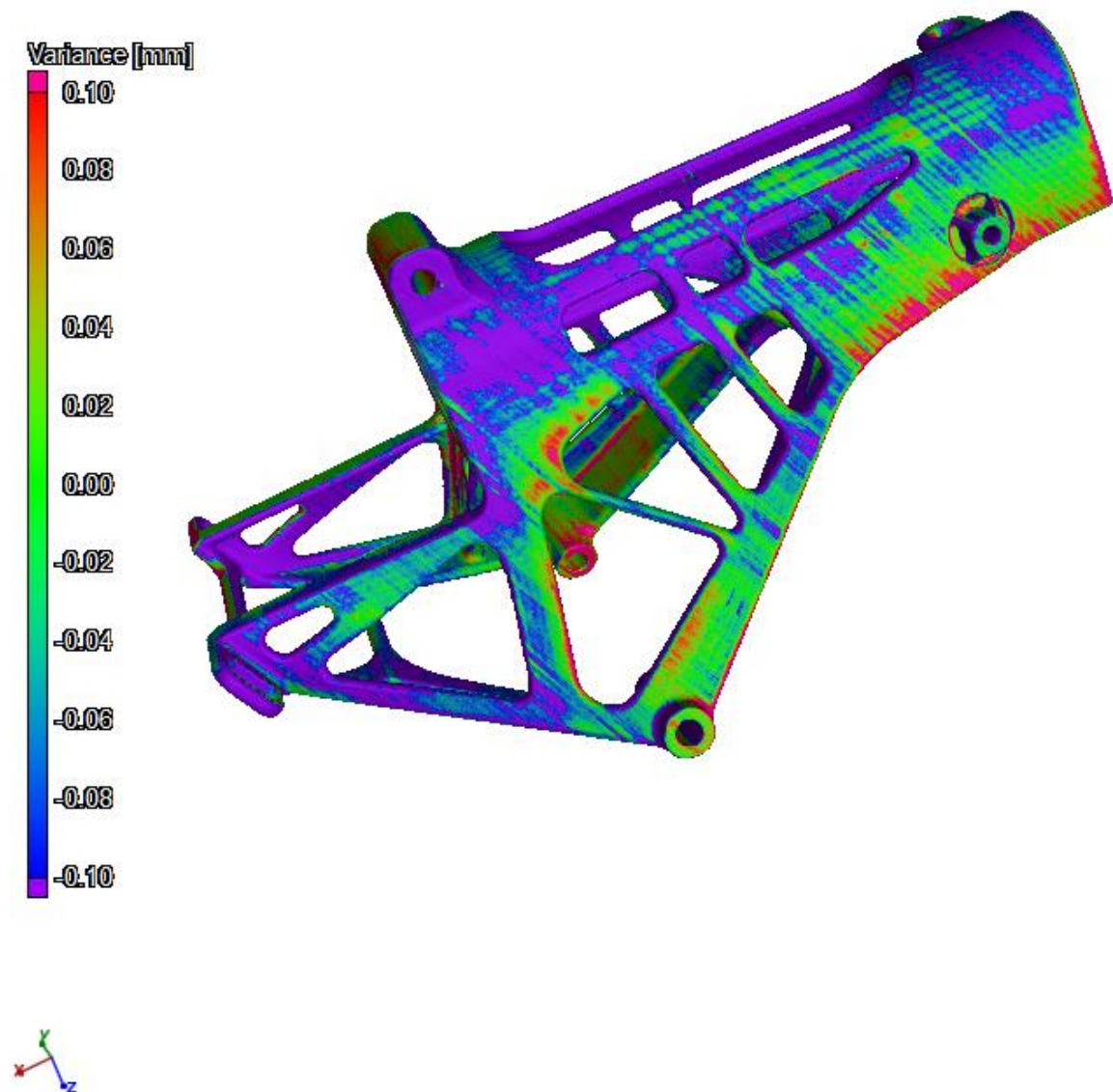


*Obrázek 25 Vyrovnání metodou 3-2-1 v softwaru Calypso [26]*



## **BEST-FIT**

Při použití způsobu best-fit chceme dosáhnout co nejmenší odchylky po celé součásti. Při vyrovnání software počítá metodou nejmenších čtverců všechny body a je nezbytné, aby zpracovávaná data byla kompletní. V konečném výsledku jsou zahrnuty také chyby a odlehlé hodnoty, které mohou výsledek zkreslovat.



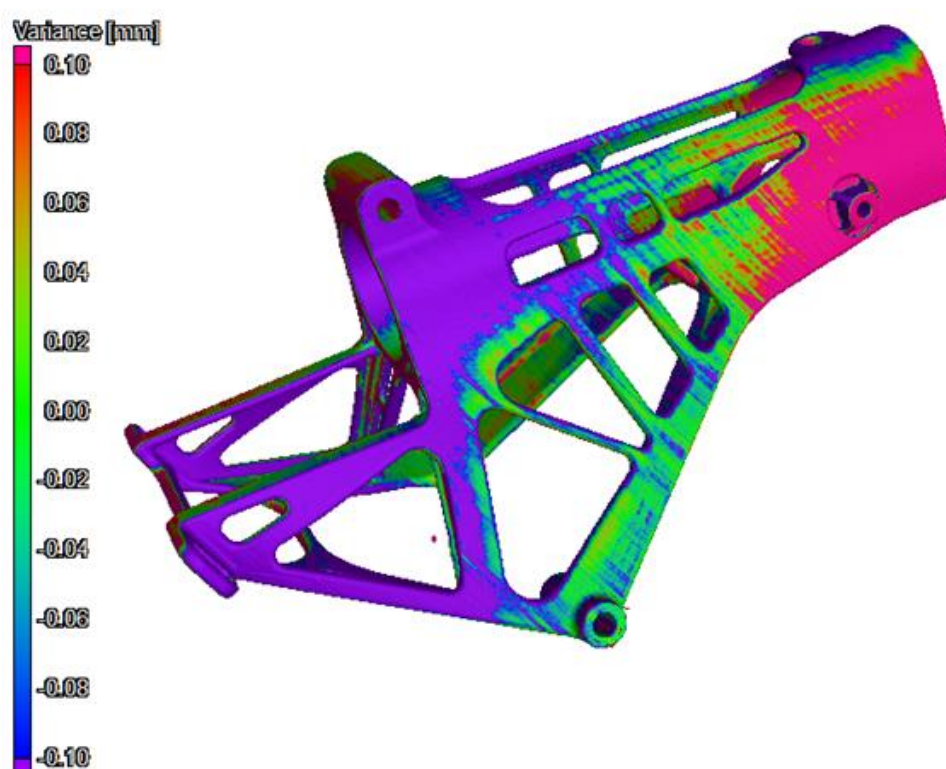
Obrázek 26 Porovnání pomocí funkce Best fit





## RPS

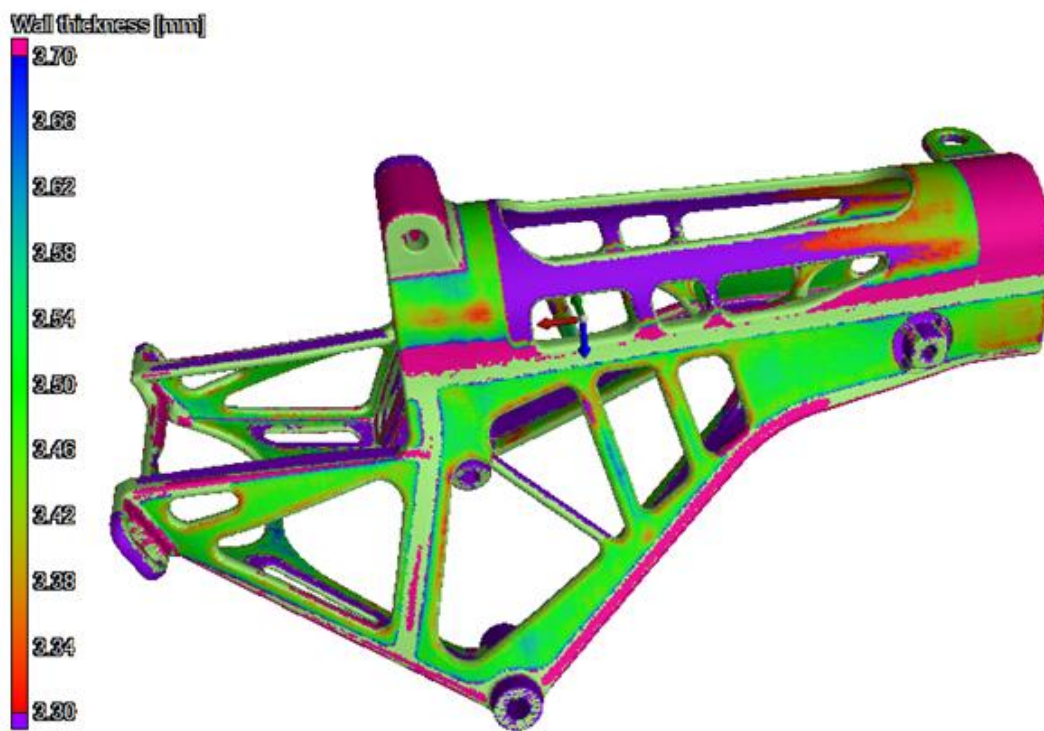
Metoda RPS (Reference Point System) je závislá na požadavcích konstruktéra a na požadavcích z výkresu. Někdy jsou na součásti místa, která jsou z hlediska tolerancí důležitější, a tak se dává přednost dodržení tolerancí na těchto místech na úkor ostatních. Každý bod v referenčním systému je definován třemi souřadnicemi. Tyto souřadnice udávají polohu od zvoleného počátku. Pokud máme sestavu, kde je více součástí, tak díky referenčnímu systému je určena vzájemná poloha součástí.



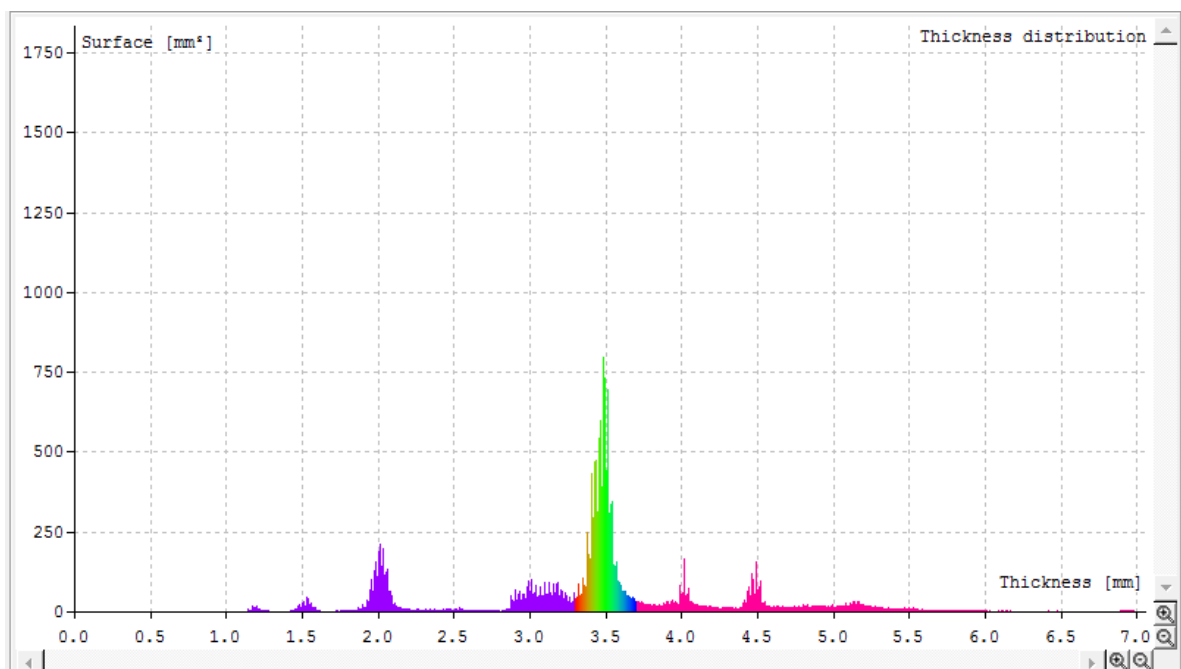
Obrázek 27 Porovnání pomocí funkce RPS

## 5.2 ANALÝZA TLOUŠŤKY STĚN

Tato analýza je využívána ke zjištění nadměrné či nedostatečné tloušťky stěny. Software také dokáže kontrolovat, zda mají mezery správnou velikost a lokaci. Analýza je účinná, pouze pokud je celá součást tvořena stejnou tloušťkou stěn a pro jednoduché konstrukce.



Obrázek 28 Analýza tloušťky stěn

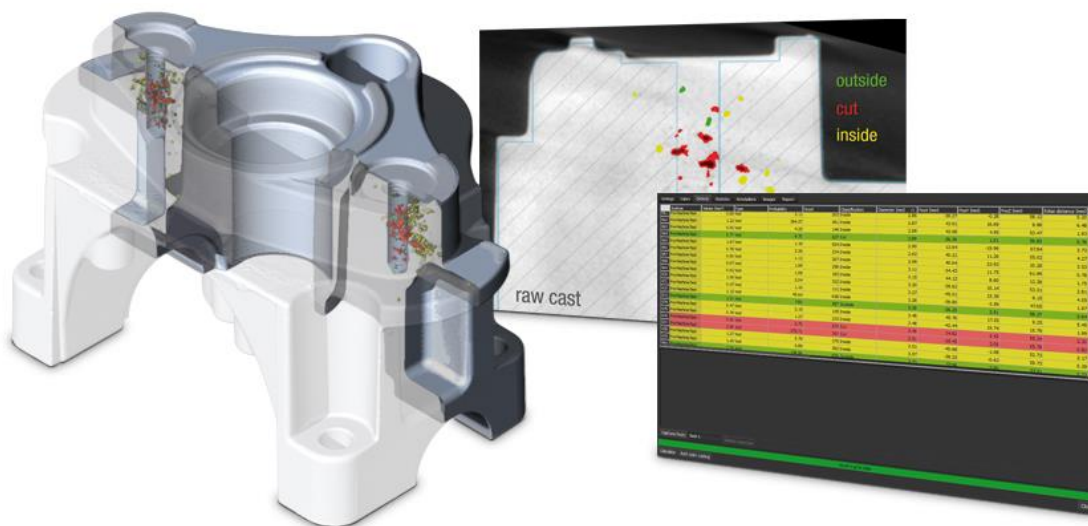


Obrázek 29 Histogram tloušťky stěn



### 5.3 ANALÝZA POROZITY

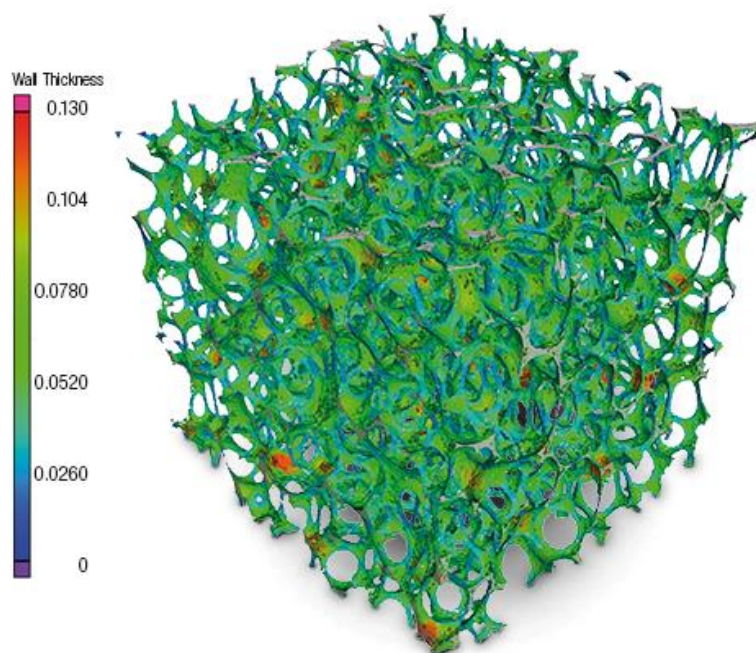
K analýze porozity je třeba modul, který dokáže najít a získat podrobné informace o vadách jako jsou póry, díry, vměstky a jiné. Modul využívá několika algoritmů a režimů, které umožňují nastavení parametrů pro jednodušší nalezení vady. Někdy je nastavení parametrů specifické a to z důvodu, že k nalezení některých vad je vyžadováno rozdílné nastavení. Například pro nalezení vzduchové kapsy je potřeba vysoký kontrast. Naopak pro sypký materiál je třeba kontrast nízký.



Obrázek 30 Analýza porézности [18]

### 5.4 ANALÝZA STRUKTURY MATERIÁLU

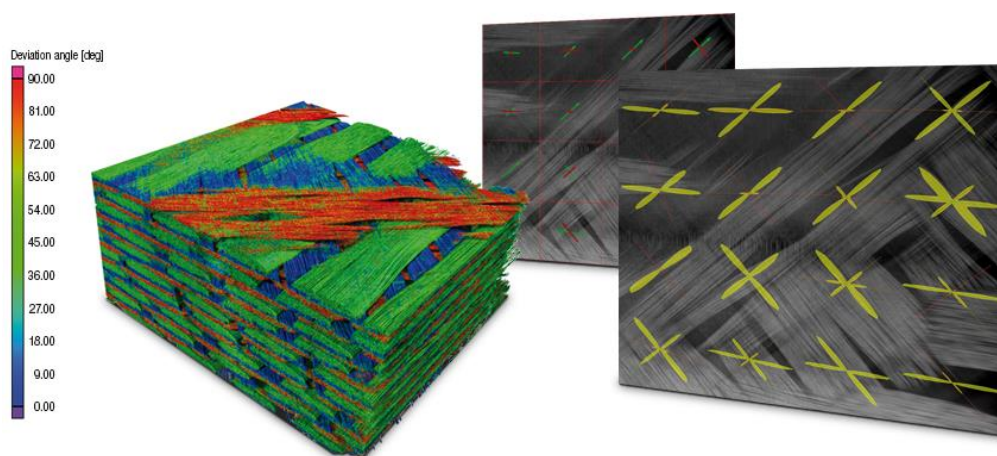
Pomocí přídatného modulu lze zkoumat strukturu materiálu. Tento modul lze použít také k segmentování tomografických dat do jednotlivých polí, hran či zkoumat kontaktní plochy. Poté udělat statistické vyhodnocení, které lze použít k dalším analýzám.



Obrázek 31 Analýza struktury materiálu [18]

## 5.5 ANALÝZA VLÁKEN KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Použití této funkce, zákazníkovi umožňuje hlubší pohled do vláken kompozitních materiálů. Mezi možnosti softwaru patří například určení orientace vláken, zjištění celkového objemu či jiných parametrů. Mezi kompozitní materiály můžeme zařadit například plast vyztužený uhlíkovými vlákny. Modul zároveň umožňuje použít výstupní data do jiného simulačního softwaru.

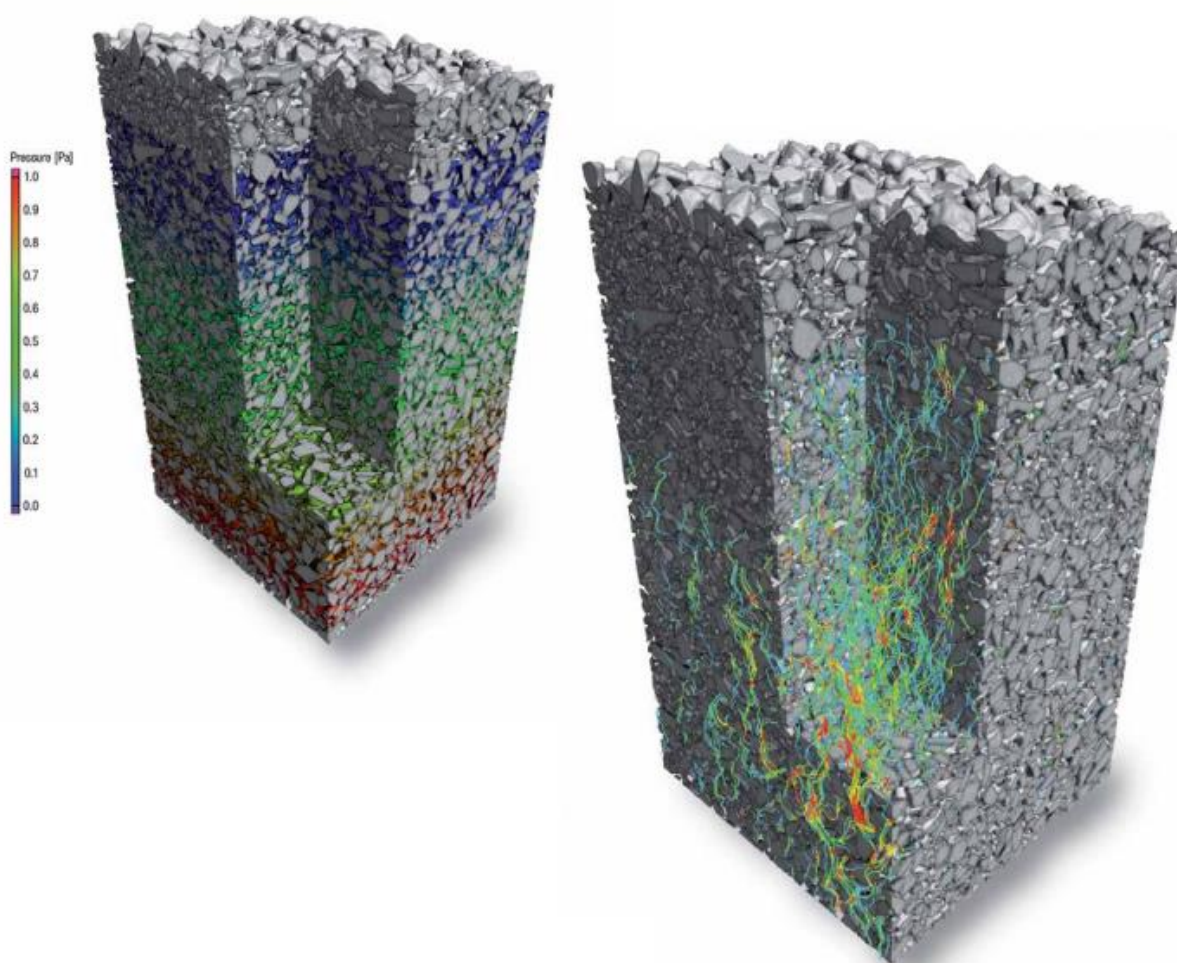


Obrázek 32 Analýza vláken kompozitních materiálů [18]



## 5.6 ANALÝZA VÍCESLOŽKOVÝCH MATERIÁLŮ

Tento nový modul vypočítá, pomocí virtuálních experimentů, vlastnosti vícesložkových materiálů. Například horniny a zeminu, či jiné porézní nebo kompozitní materiály. Analýza se provádí přímo na voxelových datech, z kterých je možné vypočítat vlastnosti, jako jsou například absolutní propustnost, elektrický odpor, tepelnou vodivost a další jevy.

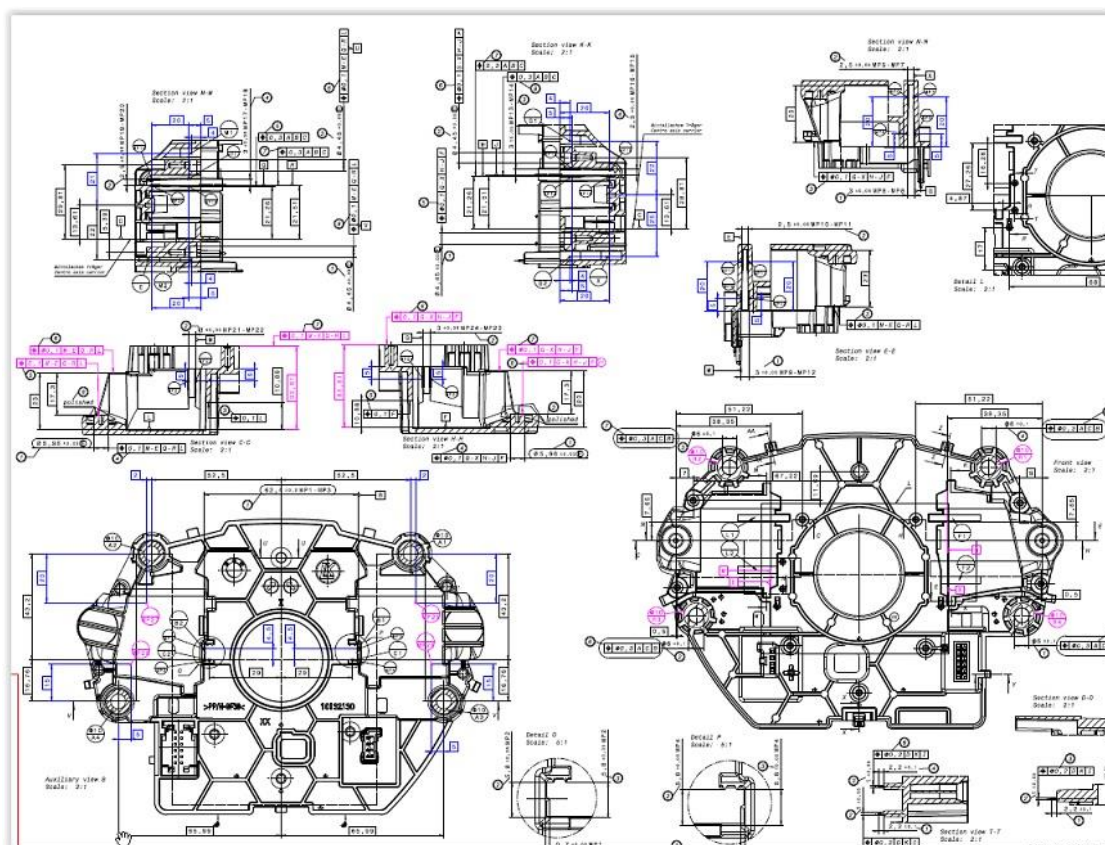


Obrázek 33 Obrázek vlevo znázorňuje působící tlak, obrázek vpravo proudění [19]

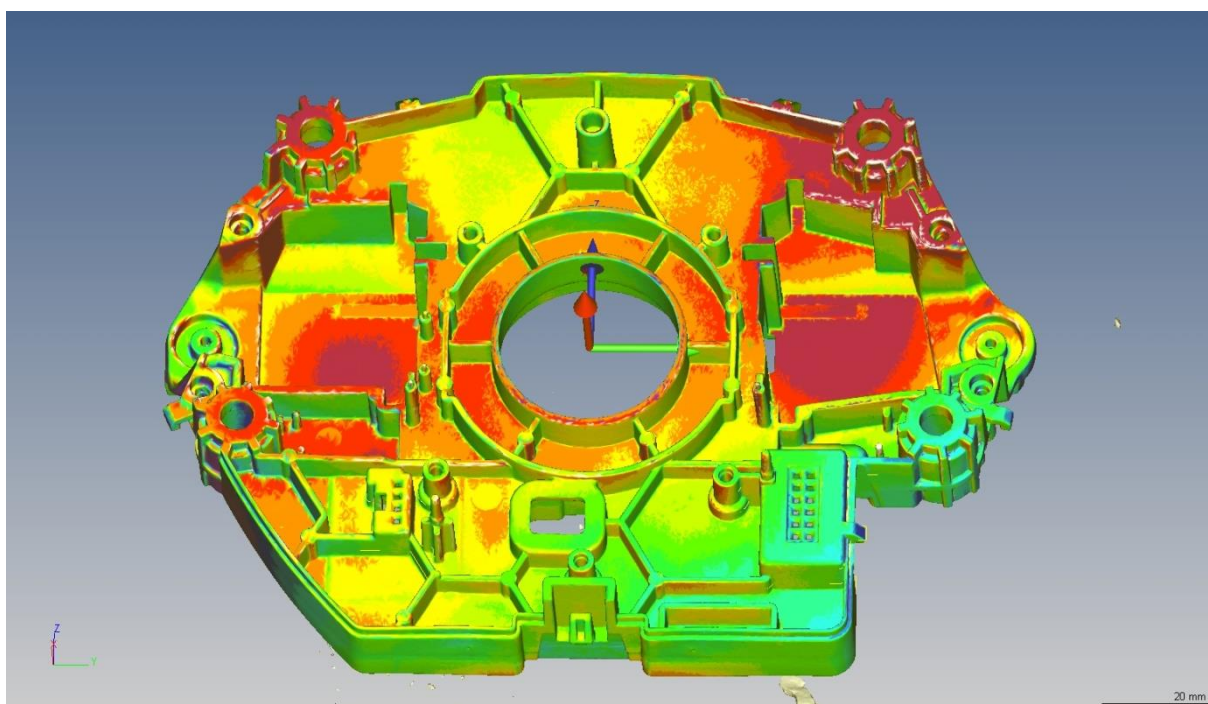


## 5.7 KONTROLA GEOMETRICKÝCH SPECIFIKACÍ PRODUKTU

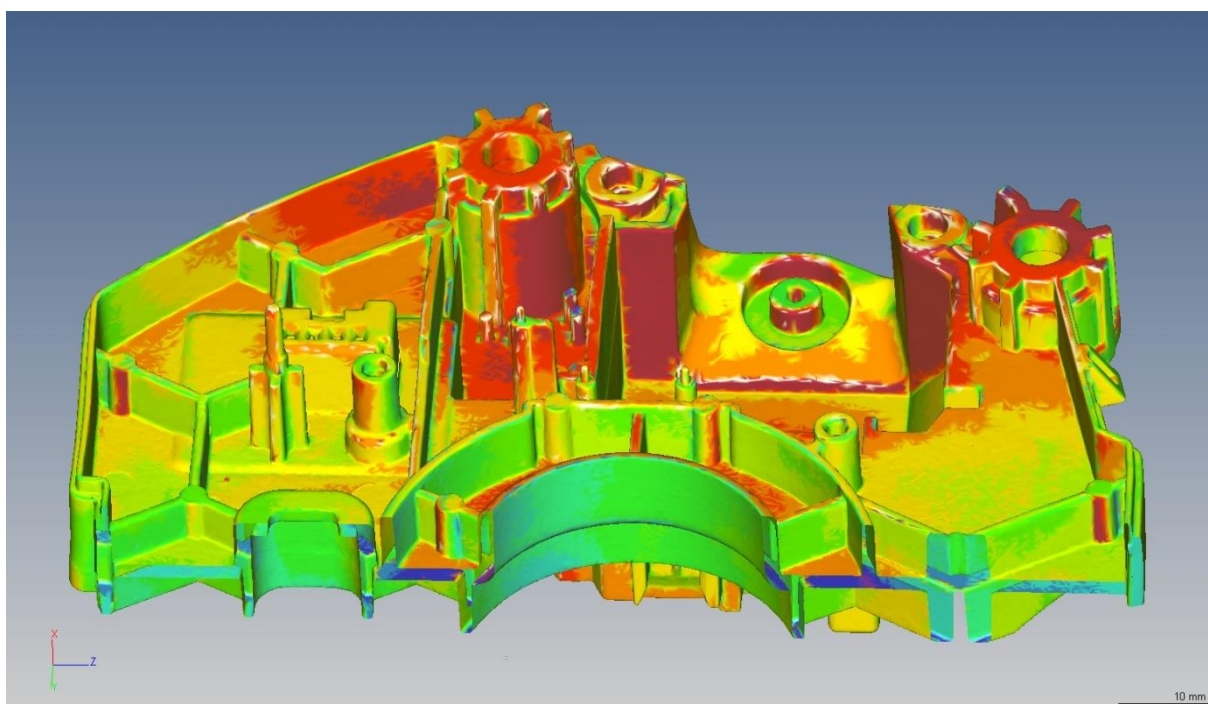
Požadavky na přesnost součástí se stále zvyšují. Prakticky je však nemožné vyrobit dokonale přesný výrobek a to z důvodu působících vlivů ve výrobě. Mezi geometrické specifikace produktu (GPS) patří například tolerance rozměrů či geometrické tolerance. Tyto požadované tolerance se udávají na výkresu měřené součásti. Na obrázku 34 je možné vidět část výkresové dokumentace s požadavkem na změření 173 charakteristik. Obrázek 37 zobrazuje výstupní protokol softwaru Calypso od firmy Carl Zeiss.



Obrázek 34 Část výkresu s předepsanými specifikacemi určených k měření





*Obrázek 35 Analyzovaná součást*



*Obrázek 36 Řez součástí*



Messprotokoll ZEISS Calypso		
Název souboru 10132130-1-0007A_5_8	Datum 20 Januar 2016	
Číslo výkresu "drawingno"	Čas 12:40:23	Zakázka 20.1.2016
Operátor Petr Mikes	Stroj CTCOM	Číslo inkrementálně sep 6

Name	ID	Aktual	Nominal	pos Tol	neg Tol	Diff	<- ->
 Celkový výsledek							
Všechny charakteristiky:		173					
...v toleranci:	24						
...Mimo toleranci:	148						
...Nad výstražnou mezí:	0						
...Nevypočteno:	0						
Souř. systémů celkem:	18						
...Nevypočteno:	0						
Text. elementů celkem:	0						

Bottom view							
1 Poloha 0,1 k A	PolK	0.0661	0.0000	0.1000		0.0661	--
2 Poloha 0,1 k RR	PolK	0.1910	0.0000	0.1000		0.1910	0.0910
3 Poloha 0,1 k A	PolK	0.1334	0.0000	0.1000		0.1334	0.0334
4 Poloha 0,1 k RR	PolK	0.4835	0.0000	0.1000		0.4835	0.3835
5 Poloha 0,1 k RR	PolK	1.1734	0.0000	0.1000		1.1734	1.0734
6 Poloha 0,1 k A	PolK	0.2002	0.0000	0.1000		0.2002	0.1002
7 Poloha 0,1 k RR	PolK	0.5955	0.0000	0.1000		0.5955	0.4955
8 Poloha 0,1 k A	PolK	0.6749	0.0000	0.1000		0.6749	0.5749
Section view U-U							
1_Pr 4 ±0,03	D	4.0221	4.0000	0.0300	-0.0300	0.0221	--
2_Poloha 0,2 k RRVW	Pol2d	4.6958	0.0000	0.2000		4.6958	4.4958
Detail Q							
1_13,37±0,05_Y	Dist	13.4390	13.3570	0.0500	-0.0500	0.0780	0.0280
2_8,7±0,05_Y	Dist	8.8446	8.7232	0.0500	-0.0500	0.1214	0.0714
3_0,9±0,05__Y_Y	Dist	1.0225	0.9000	0.0500	-0.0500	0.1225	0.0725
3_0,9±0,05__Z_Z	Dist	1.0004	0.9000	0.0500	-0.0500	0.1004	0.0504
4_0,9±0,05__Y_Y	Dist	1.0122	0.9000	0.0500	-0.0500	0.1122	0.0622
4_0,9±0,05__Z_Z	Dist	1.0251	0.9000	0.0500	-0.0500	0.1251	0.0751
5_0,9±0,05__Y_Y	Dist	0.9870	0.9000	0.0500	-0.0500	0.0870	0.0370
5_0,9±0,05__Z_Z	Dist	1.0162	0.9000	0.0500	-0.0500	0.1162	0.0662
6_0,9±0,05__Y_Y	Dist	0.9879	0.9000	0.0500	-0.0500	0.0879	0.0379
6_0,9±0,05__Z_Z	Dist	1.0209	0.9000	0.0500	-0.0500	0.1209	0.0709
7_0,9±0,05__Y_Y	Dist	1.0125	0.9000	0.0500	-0.0500	0.1125	0.0625
7_0,9±0,05__Z_Z	Dist	1.0184	0.9000	0.0500	-0.0500	0.1184	0.0684
8_0,9±0,05__Y_Y	Dist	0.9889	0.9000	0.0500	-0.0500	0.0889	0.0389
8_0,9±0,05__Z_Z	Dist	1.0259	0.9000	0.0500	-0.0500	0.1259	0.0759
9_0,9±0,05__Y_Y	Dist	0.9933	0.9000	0.0500	-0.0500	0.0933	0.0433
9_0,9±0,05__Z_Z	Dist	1.0141	0.9000	0.0500	-0.0500	0.1141	0.0641

Obrázek 37 Výstupní protokol měření GPS





## 6 ZÁVĚR

Bakalářská práce byla zaměřena na seznámení s principem a možnostmi průmyslového využití počítačové tomografie v rámci kontroly kvality.

V úvodní části jsem stručně popsal tuto metodu měření a vymezil postavení v rámci ostatních metod, které patří do skupiny nedestruktivního testování. Zpracoval jsem přehled těchto metod s ohledem na jejich výhody i nevýhody, ale také na podobnosti mezi nimi. V této části práce poukazuji také na porovnání účinnosti jednotlivých metod, při měření různých defektů.

Následující část se věnuje stručným vývojem a fyzikální podstatou rentgenového záření, na kterém je založena funkčnost počítačové tomografie. Vysvětlil jsem princip a možné varianty vzniku rentgenového záření a popsal jeho vlastnosti. Dále jsem se věnoval vlivu konstrukce na prozařování dílce a možné varianty zdroje záření. Na konci této části upozorňuji na nebezpečnost záření a možné dopady na lidský organismus při neopatrné manipulaci se zářením.

Další část je zaměřena na samotnou počítačovou tomografii, ve které se zabývám touto metodou od samého vzniku metody, až po nynější použití počítačové tomografie. V této části se podrobněji věnuji principu a možnostem měření počítačovou tomografií. Dále uvádím, jakým způsobem se vytváří třetí rozměr měření a vytvoření objemového modelu. Zde popisuji jednotlivé kroky při rekonstrukci snímků a rozdíl, mezi jednotkami používanými při 2D rentgenovém prozařování a jednotkou voxel. Protože počítačovou tomografií lidé často znají pouze jako lékařskou techniku, věnoval jsem zvýšenou pozornost konstrukčnímu uspořádání a oblasti využití. Ve většině případů je konstrukční uspořádání průmyslových tomografů provedeno způsobem, kdy je použit statický zdroj záření a statický detektor. Lékařské tomografy používají konstrukci, kde se zdroj záření a detektor otáčí kolem pacienta. Začínají se však prosazovat i dodavatelé, jejichž konstrukce průmyslového tomografu je používána stejným způsobem, jako v lékařství. Příkladem mohou být tomografy od společnosti GE.



V poslední části, se zabývám jedním z cílů této práce, kterým je poskytnout přehled o možnostech zpracování mraku bodů pomocí softwaru a následně analýzami. Pro ukázkou sedmi různých analýz jsem použil dva softwary. Analýza odchylek s CAD modelem zobrazuje barevné porovnání naměřených odchylných hodnot vůči nominálním hodnotám. Analýza tloušťky stěny, často používaná k měření tloušťky stěn odlitků, barevně odlišuje nadměrnou či nedostatečnou tloušťku stěny. Analýza porozity umožňuje grafické zobrazení a přiblížení vnitřních vad, jako jsou póry, díry, vměstky a jiné. Další analýza je zaměřena na zkoumání struktury materiálů, jejíž vyhodnocení je možno použít k dalším analýzám. Analýza vláken kompozitních materiálů dokáže určit parametry a orientaci vláken materiálů. Analýza vícesložkových materiálů se zabývá materiály, jako jsou například horniny, zemina a jiné. U těchto materiálů se zjišťují fyzikální vlastnosti materiálu, jako je absolutní propustnost, elektrický odpor, tepelná vodivost a další jevy. Při kontrole geometrických specifikací, se vyhodnocuje, zda jsou dodrženy tolerance, které jsou předepsány na výkrese. Mezi geometrické specifikace patří například geometrické tolerance či tolerance rozměrů. Analýzy jsem demonstroval v rámci dvou softwarů. K ukázce možných analýz jsem použil software myVGL a Calypso. Software myVGL je pouze pro prohlížení již analyzovaných dat. Některé analýzy jsou provedeny na dílci závěsu volantu studentské formule. Na konci této práce je možnost náhledu na výkresovou dokumentaci, postupy měření a výstupní protokol při měření geometrických specifikací v softwaru Calypso.



## 7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] RUUD, Clayton O., Jean F. BUSSIÉRE a Robert E. GREEN. *Nondestructive Characterization of Materials*. New York: Plenum Press, 1991.
- [2] BOOGAARD, J. a G .M. VAN DIJK. *Non-destructive testing: Proceedings*. Amsterdam: Elsevier, 1989.
- [3] HSIEH, Jiang. *Computed tomography: principles, design, artifacts, and recent advances*. 2nd ed. Hoboken: Wiley-Interscience, c2009. ISBN 978-0-8194-7533-6.
- [4] MACEK, Karel. *Struktura a vlastnosti materiálu a jejich zkoušení* [online]. In: . s. 4 [cit. 2016-08-15].
- [5] VĚCHET, Mojmir. *Defektoskopie v otázkách a odpovědích*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1989. ISBN 80-03-00100-5.
- [6] CHRISTOPH, Ralf a Hans Joachim NEUMANN. *Multisenzorová souřadnicová měřicí technika: měření rozměrů, tvarů, polohy a drsnosti – opticky, dotykově a rentgenovou tomografií*. 4. Přeprac. A rozš. Vyd. Uherské Hradiště: PRIMA Bilavčák, 2008.
- [7] CHRISTOPH, Ralf and NEUMANN, Hans Joachim. *Rentgenová tomografie v průmyslové měřicí technice: přesná, hospodárná a univerzální*. Uherský Brod: PRIMA Bilavčák, c2011.
- [8] KRAUS, Ivo. *Úvod do strukturní rentgenografie*. Praha: Academia, 1985.
- [9] *MM průmyslové spektrum* [online]. **2007**(9) [cit. 2016-08-15].
- [10] *Zeiss* [online]. In: . [cit. 2016-08-15]. Dostupné z: <http://www.zeiss.cz/industrial-metrology/>
- [11] *Fundamentals of X-ray Inspection: Principles and Instrumentation* [online]. In: . s. 53 [cit. 2016-08-16].
- [12] *Werth Messtechnik Präsentation* [online]. In: . s. 153 [cit. 2016-08-16].
- [13] *CT x-ray for production lines* [online]. , 2 [cit. 2016-08-16]. Dostupné z: [http://www.qmtmag.com/display\\_edc.cfm?edno=864425](http://www.qmtmag.com/display_edc.cfm?edno=864425)



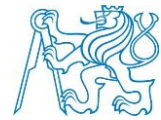
- [14] *Werth Coordinate Measuring Machines: with Computer Tomography* [online]. In: . s. 104 [cit. 2016-08-16].
- [15] KATUCH, Peter. *Industrial Computed Tomography: by Zeiss* [online]. In: . s. 43 [cit. 2016-08-16].
- [16] *GE products* [online]. [cit. 2016-08-16]. Dostupné z: <https://www.gemeasurement.com/node/82896>
- [17] *Zeiss products* [online]. [cit. 2016-08-16]. Dostupné z: [http://www.zeiss.com/industrial-metrology/en\\_de/products/systems/computed-tomography.html](http://www.zeiss.com/industrial-metrology/en_de/products/systems/computed-tomography.html)
- [18] *Volume Graphics products* [online]. [cit. 2016-08-16]. Dostupné z: <http://www.volumegraphics.com/en/products/vgstudio-max/basic-functionality/>
- [19] *Product Brochure 3.0* [online]. In: . s. 20 [cit. 2016-08-16]. Dostupné z: [http://www.volumegraphics.com/fileadmin/user\\_upload/flyer/VGStudioMAX\\_30\\_en.pdf](http://www.volumegraphics.com/fileadmin/user_upload/flyer/VGStudioMAX_30_en.pdf)
- [20] *Zeiss Metrotomography: Application Workshop CT* [online]. In: . s. 32 [cit. 2016-08-16].
- [21] ELFMARK, Miroslav. *Inovace metrologického postupu výroby z polymerního materiálu*. Zlín, 2012. Bakalářská práce.
- [22] *BINDT: British institute of non-destructive testing* [online]. [cit. 2016-08-16]. Dostupné z: <http://www.bindt.org/>
- [23] *Techmagazin: ndt* [online]. **2011**(8) [cit. 2016-08-16]. Dostupné z: [http://www.techmagazin.cz/ke\\_stazeni/ndt/ndt1.pdf](http://www.techmagazin.cz/ke_stazeni/ndt/ndt1.pdf)
- [24] HOMOLÁČ, Václav. *Komplexní kontrola kvality geometrických specifikací produktu s využitím CMM*. Praha, 2015. Diplomová práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Ing. Libor Beránek, Ph.D.
- [25] *ZEISS CT Solutions: Computer Tomography for Quality Assurance and Process Inspection* [online]. In: . s. 36 [cit. 2016-08-18].
- [26] *Calypso: Návod k obsluze* [online]. In: . s. 902 [cit. 2016-08-18].



## 8 SEZNAM TABULEK A OBRÁZKŮ

### 8.1 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Typy záření seřazeny podle vlnové délky [11] .....	6
Obrázek 2 Rentgenka [11] .....	8
Obrázek 3 Provedení odrazového a transmisního terčíku [12] .....	8
<i>Obrázek 4 Schéma konstrukce rentgenky [12] .....</i>	<i>9</i>
Obrázek 5 Vizualní model prozařování měřeného dílce [13] .....	13
Obrázek 6 Měření dílce s použitím doplňkového dotykového senzoru [14] .....	14
Obrázek 7 Zachycení měřeného dílce ve 360° [15] .....	15
Obrázek 8 Rekonstrukce snímku uzávěru plastové lahve [12] .....	16
Obrázek 9 Voxel [11] .....	17
Obrázek 10 Projekce jednotlivých bodů, dle jejich polohy v prostoru [11] .....	17
Obrázek 11 Reálný model počítačového tomografu [12] .....	18
Obrázek 12 Vizualní návrh konstrukce počítačového tomografu [15] .....	19
Obrázek 13 Souvislost mezi napětím, velikostí dílce a materiálem dílce [12] .....	20
Obrázek 14 Integrace robota do výrobní linky [15] .....	22
Obrázek 15 Výrobní linka s tomografem VoluMax [20] .....	22
Obrázek 16 Rotující zdroj záření a detektor u tomografu Speed scan CT 64 [16] .....	23
Obrázek 17 Speed scan CT 64 od firmy GE [16] .....	24
Obrázek 18 Tomograf METRONOM od firmy Carl Zeiss [17] .....	24
Obrázek 19 Tomograf VoluMax od firmy Carl Zeiss [17] .....	25
Obrázek 20 Náhled programu myVGL .....	26
Obrázek 21 Náhled programu Calypso [20] .....	27
Obrázek 22 CAD model závěsu volantu .....	28
Obrázek 23 Porovnání naměřených dat s CAD modelem .....	29
Obrázek 24 Histogram odchylek .....	29
Obrázek 25 Vyrovnání metodou 3-2-1 v softwaru Calypso [26] .....	30
Obrázek 26 Porovnání pomocí funkce Best fit .....	31
Obrázek 27 Porovnání pomocí funkce RPS .....	32
Obrázek 28 Analýza tloušťky stěn .....	33
Obrázek 29 Histogram tloušťky stěn .....	33
Obrázek 30 Analýza porézности [18] .....	34
Obrázek 31 Analýza struktury materiálu [18] .....	35
Obrázek 32 Analýza vláken kompozitních materiálů [18] .....	35
Obrázek 33 Obraz vlevo znázorňuje působící tlak, obraz vpravo proudění [19] .....	36
Obrázek 34 Část výkresu s předepsanými specifikacemi určených k měření .....	37
Obrázek 35 Analyzovaná součást .....	38
Obrázek 36 Řez součástí .....	38
Obrázek 37 Výstupní protokol měření GPS .....	39



---

## **8.2 SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1 Použitelnost daných metod .....	5
---	---