



**NEWSLETTER**  
JARO 2018

 **ÚVODNÍ SLOVO**

**Vážení čtenáři našeho newsletteru,**

nové číslo je tady a s ním novinky z naší laboratoře počítačové tomografie na CEITEC VUT v Brně. Nejvýznamnější novinkou za poslední půlrok je nepochybně upgrade zařízení GE phoenix v|tome|x L240. Modernizace spočívala v instalaci nové nanofokusní rentgenové trubice a nového detektoru s menší velikostí pixelu a také vyšší citlivostí. V tomto čísle bychom vás rádi seznámili s možnostmi využití microCT ve forenzní antropologii či při simulaci optických systémů, sekce Edukace se věnuje nejistotám měření a v neposlední řadě je zde i stručný popis našich nových publikací.

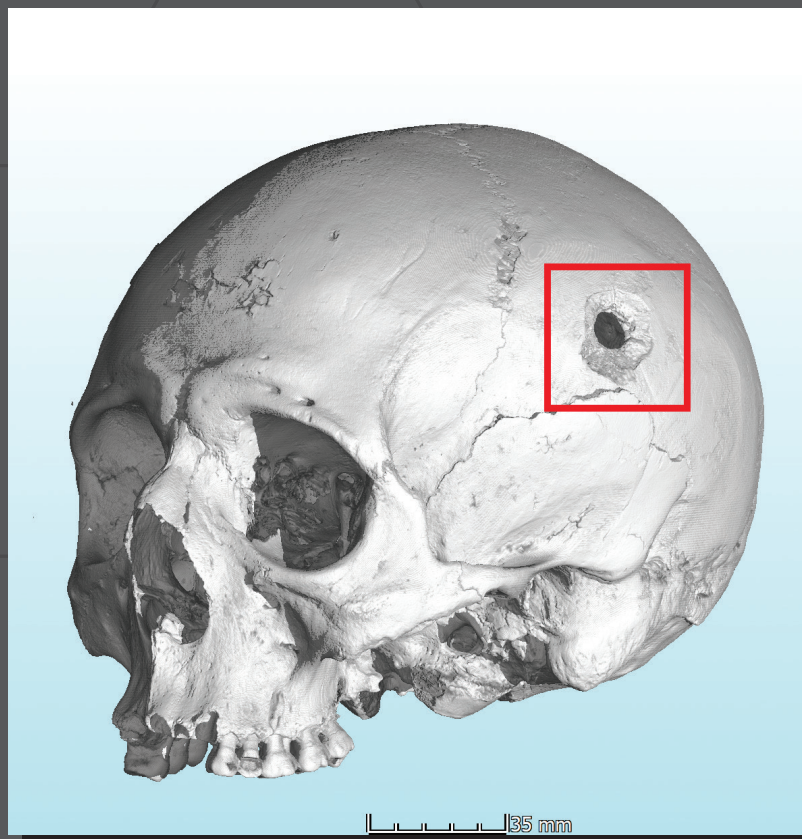
Přejeme vám příjemné čtení a krásné dny!

**Tomáš Zikmund**  
Vedoucí tomografické laboratoře

### ■ Využití CT ve forenzní antropologii: microCT vyšetření střelných zranění na lebce

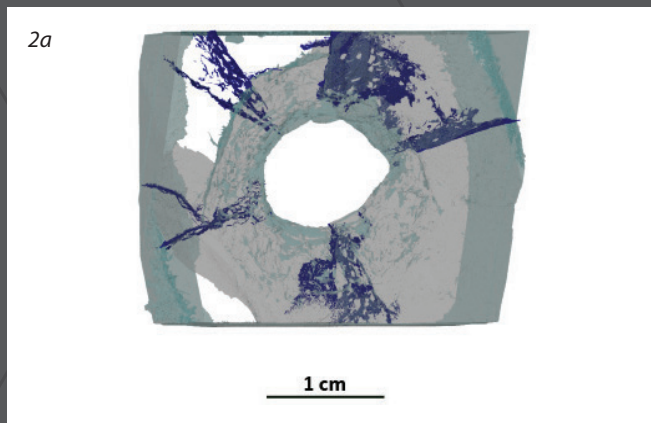
Ve spolupráci s Laboratoří morfologie a forenzní antropologie (LaMorFA) Masarykovy univerzity byla microCT analýza kostních vzorků aplikována v oblasti výzkumu střelných poranění na lebce (Obr. 1). Náš aktuální projekt byl zaměřen na zmapování možností využití microCT dat pro vizualizaci a hodnocení poškození kostní tkáně na úrovni mikrostruktury. Poškození na mikroskopické úrovni je charakteristické přítomností malých trhlinek, které lze využít při určování typu zranění, což má uplatnění ve forenzní antropologii, soudním lékařství a kriminalistické balistice.

Na microCT bylo naměřeno několik vzorků kostní tkáně při různých rozlišeních (120  $\mu\text{m}$ , 20  $\mu\text{m}$ , 12  $\mu\text{m}$ , 6  $\mu\text{m}$ ) a jako nejvhodnější se pro výše zmíněné účely ukázala úroveň 12  $\mu\text{m}$ , při které byly mikrotrhliny dobře detekovatelné a byl zachycen téměř celý jejich průběh. Z CT dat byly mikrotrhliny vysegmentovány kombinací globálního prahování a manuální segmentace v softwaru Amira. Vytvořené trojrozměrné modely nám umožnily zobrazení velikosti, tvaru, akumulace a prostorového rozložení mikrotrhlin. Sledované charakteristiky byly výrazně odlišné u dvou různých typů

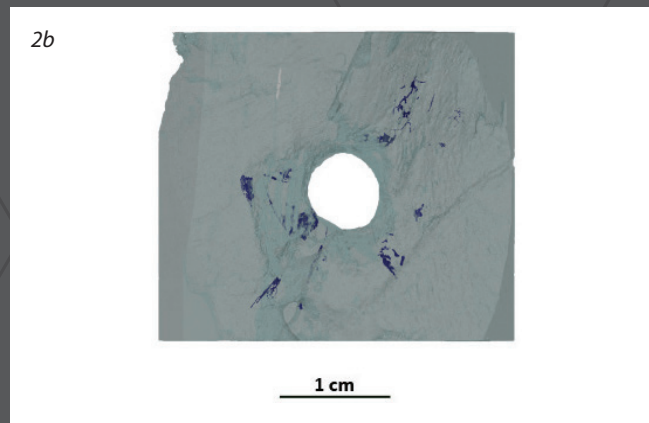


Obr. 1: 3D model lidské lebky se zvýrazněným průstřelem (měřeno na microCT GE phoenix v|tome|x L240).

zkoumaných vzorků. U prvního typu: postmortem (posmrtného) zranění je přítomen malý počet rozsáhlých mikrotrhlin, radiálně se šířících směrem od otvoru vstřelu (Obr. 2a). Naopak u druhého typu: perimortem (zranění v čase smrti) je počet mikrotrhlin mnohem větší, ale jejich velikost (délka i šířka) výrazně menší, přičemž jsou náhodně roztroušeny napříč kostní tkání (ve všech jejích různých vrstvách) (Obr. 2b). Výsledky této pilotní studie byly v srpnu 2017 prezentovány na mezinárodní konferenci IAFS 2017 (Toronto, Ontario, Canada), <http://iafstoronto2017.com/>.



Obr. 2a: 3D model vzorku s prvním typem poranění (postmortem) znázorňující průběh mikrotrhlin (modře) v kostní tkáni.



Obr. 2b: 3D model vzorku s druhým typem poranění (perimortem) znázorňující průběh mikrotrhlin (modře) v kostní tkáni.

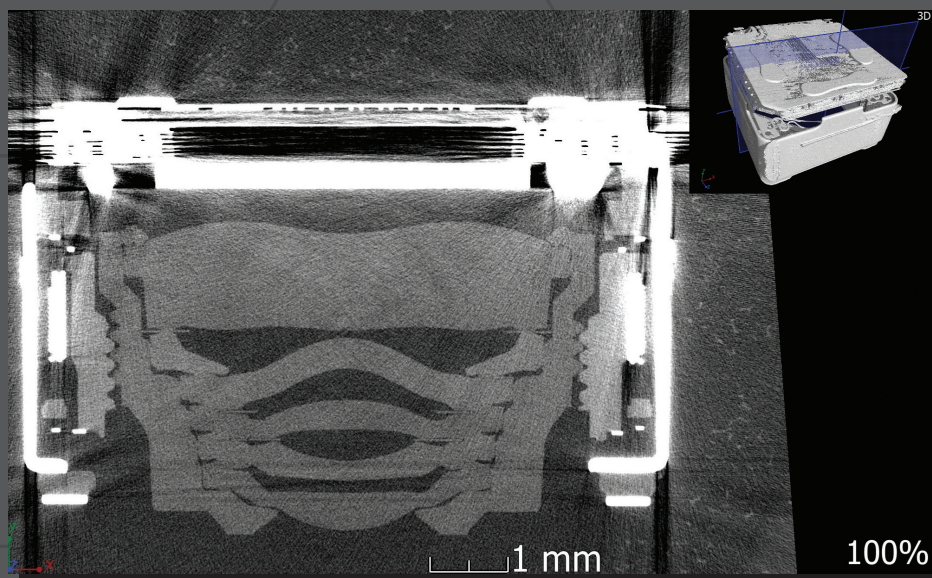
## ■ Využití CT pro simulace optických systémů

Mezi zajímavé využití CT metody patří i detailní analýza zobrazovacích modulů kamer v digitálních fotoaparátech soudobých chytrých telefonů (smartphones). Touto problematikou se zabývali kolegové z Ústavu fyzikálního inženýrství (odboru fyziky pevných látek a povrchů) spolu s Jakubem Dokulilem z brněnského gymnázia v rámci jeho středoškolské odborné činnosti. Fotografické moduly několika telefonů (Sony, iPhone a Motorola) byly nasnímány za účelem identifikace jejich vnitřní stavby, tedy křivosti jednotlivých optických ploch, jejich vzájemné vzdálenosti a rozměrů snímacího čipu. Získaná data sloužila jako přesný vstup pro následnou simulaci optických systémů.

Kamerové moduly se skládaly ze tří až pěti plastových čoček tvořících optickou soustavu s ohniskovou vzdáleností přibližně 4 mm. Většina opticky aktivních povrchů byla asférická, jeden měl tvar podobný Schmidtově korekční desce, pro korekci optických vad. Z tomografických dat byly odečteny souřadnice bodů tvořící jednotlivé lámavé plochy, ty byly proloženy polyno-

mickou regresní křivkou. Jejich koeficienty byly vloženy do programu Zemax Optic Studio a soustava byla simulována pro různé zobrazovací módy.

Pro úspěšnou simulaci bylo důležité zadat vzdálenosti jednotlivých optických členů a jejich šířku. Díky CT analýze (Obr. 3) bylo možné podrobně analyzovat tyto



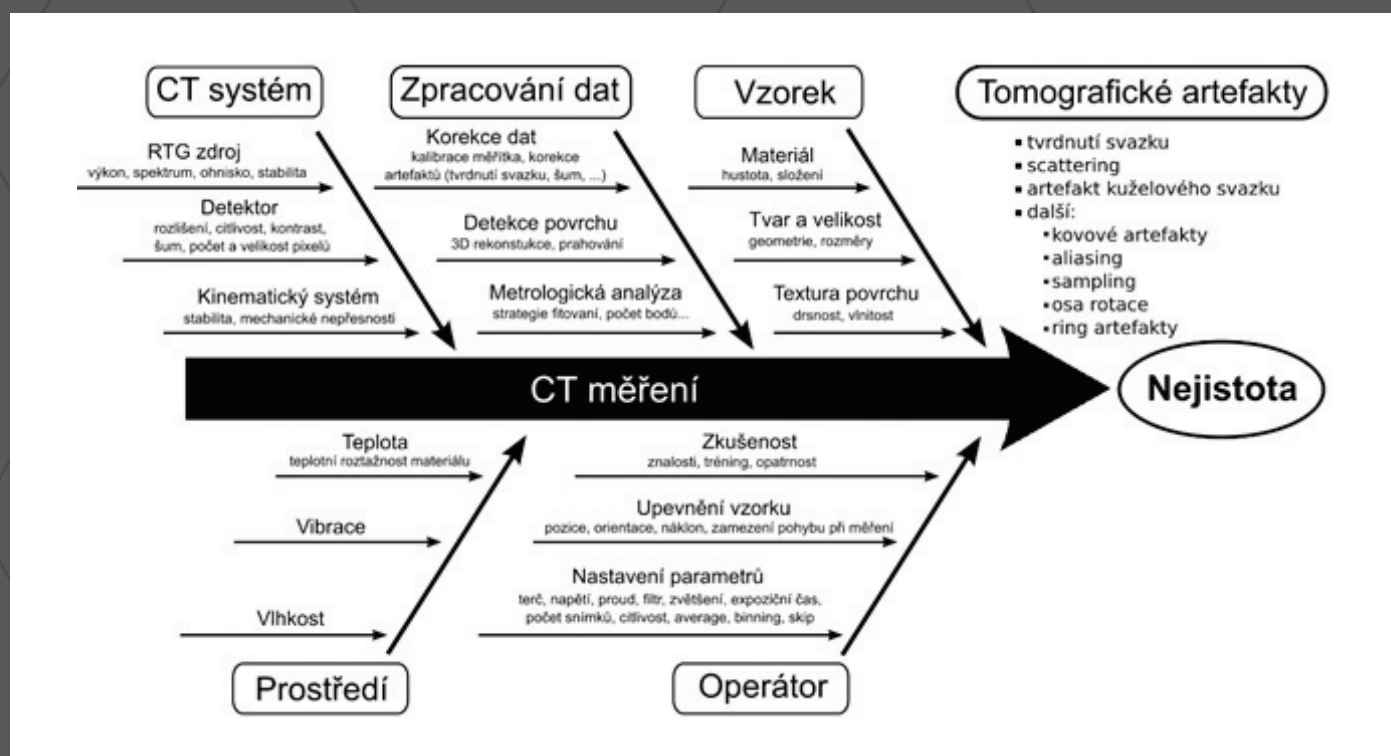
Obr. 3: Tomografický řez uprostřed fotografického modulu z vybraného telefonu.

malé systémy a jejich vnitřní stavbu před demontáží na jednotlivé optické elementy, kdy již nelze s dostatečnou přesností určit jejich vzájemnou polohu.

## Metody zjišťování nejistot měření v počítačové tomografii

Rozvoj rentgenové počítačové tomografie v současnosti umožňuje její využití i v přesném měření rozměrů. Její výhodou je především schopnost testování a měření vnitřních struktur, které by byly optickými nebo dotykovými 3D souřadnicovými měřicími přístroji nedosažitelné bez demontáže nebo destrukce vzorku. Postupně se vyvíjejí mezinárodní standardy, popisující využití CT v metrologii, např. řada norem VDI/VDE 2630 [1].

Zjišťování nejistot měření v počítačové tomografii je poměrně komplikované. Mezinárodní standardy se stále ještě vyvíjí. Měření na CT je ovlivněno mnoha různými faktory (Obr. 4). V CT datech vznikají obrazové artefakty (tvrdnutí svazku, šum, kovové artefakty, ...), které mohou zásadně zhoršovat možnosti analýzy [2]. To vše zásadně ztěžuje vyjádření nejistoty.



Obr. 4: Schéma ukazující faktory ovlivňující tomografické měření [4].

### Existují tři základní metody, které lze použít při vyjádření nejistot:

» Analytické metody – jedním ze základních dokumentů popisujících analytické vyhodnocování nejistot měření je směrnice GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) [3]. Principem je popsání měření matematickým modelem, měřená veličina je pak popsána jako funkce různých vstupů. Nejistota těchto vstupů pak má za výsledek nejistotu měřené veličiny, kterou lze spočítat ze zákona šíření nejistot. Pro měření na CT v současnosti neexistuje přesný analytický model, který lze využít pro výpočet nejistoty touto metodou.

- » Počítačová simulace – využívají počítačové simulace měření na CT přístroji pomocí Monte Carlo metod. Použití těchto metod popisují dokumenty Suppl. 1 to GUM (JCGM 101:2008), VDI/VDE 2617-7 a ISO/TS15530-4. V současnosti již existují softwary, které umožňují simulovat CT měření (např. aRTist). Nicméně neexistuje model, který by dostatečně přesně obsáhl všechny fyzikální aspekty konkrétního tomografického systému. Proto je použití těchto metod limitované.
- » Experimentální metody – Pro vyjádření nejistoty se porovnává výsledek většího počtu CT měření vzorku s kalibrovanou hodnotou měřeného rozměru. Tento přístup popisuje norma VDI/VDE 2630/2.1. [1], která vychází z normy ISO 15530-3 pro určování nejistot měření na souřadnicových měřících přístrojích pomocí kalibrovaných obrobků nebo etalonů.

Experimentální metody zjišťování nejistot nabízí v současnosti nejrelevantnější výsledky. Rozměry vzorku se nejprve naměří konvenčními metodami, většinou na přesných dotykových souřadnicových měřících přístrojích (coordinate measuring machine, CMM). Poté se provede několik měření na CT. Na základě statistického vyhodnocení zahrnujícího také rozdíl mezi CT a CMM měřeními se vypočítá výsledná nejistota měření. Problémem experimentálních metod je nutnost několikrát opakovat měření na přístroji. Norma VDI/VDE 2630/2.1 doporučuje k získání dostatečného statistického souboru alespoň 20 měření na CT, což je v běžné praxi neuskutečnitelné vzhledem k časové i finanční náročnosti.

[1] VDI/VDE 2630-2.1, *Computed tomography in dimensional measurement – Determination of the uncertainty of measurement and the test process suitability of coordinate measurement systems with CT sensors*, 2012

[2] KRUTH, J. P., M. BARTSCHER, S. CARMIGNATO, R. SCHMITT, L. DE CHIFFRE a A. WECKENMANN. *Computed tomography for dimensional metrology*. CIRP Annals, 2011. 60(2), 821–842, ISSN 0007-8506.

[3] BIPM IEC IFCC ILAC ISO IUPAC IUPAP OIML 2008 *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement JCGM 100:2008, GUM 1995 with minor corrections*, [http://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM\\_100\\_2008\\_E.pdf](http://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf)

[4] VILLARRAGA-GÓMEZ, Herminso, ChaBum LEE a Stuart T. SMITH. *Dimensional metrology with X-ray CT: A comparison with CMM measurements on internal features and compliant structures*. Precision Engineering, 2018. 51, 291–307. ISSN 0141-6359.

## ■ Konference iCT 2018

Ve dnech 6. – 9. 2. 2018 se v rakouském Welsu konala konference: 8th Conference on Industrial Computed Tomography. Tato konference je organizována výzkumnou skupinou počítačové tomografie ([www.3dct.at](http://www.3dct.at)) na University of Applied Sciences Upper Austria. Jedná se o největší mezinárodní konferenci týkající se průmyslové počítačové tomografie v Evropě. Během konference dochází k představení nejnovějších produktů výrobců tomografických zařízení i softwarů na zpracování tomografických dat. Vybrané příspěvky z konference lze najít zde: <http://www.3dct.at/cms2/index.php/en/conference-proceedings>. V příštím roce se tato konference bude konat v italské Padově.

## ■ Nové publikace

Zobrazení myšního mozku metodou počítačové tomografie se věnuje naše publikace: [High-contrast differentiation resolution 3D imaging of rodent brain by X-ray computed microtomography](https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/02/C02039) (<https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/02/C02039>) v časopise Journal of Instrumentation. Je zde popsán celý proces přípravy a měření vzorku a následné zpracování tomografických dat. Důraz je zde kladen na samotnou přípravu vzorku pro CT měření, a sice použití různých kontrastovacích činidel a optimalizace procesu barvení. Co se týká zpracování dat, je zde podrobně rozebrán způsob segmentace a následná vizualizace vnitřních struktur mozku. Součástí článku je i srovnání CT dat s metodou magnetické rezonance.

Naše zařízení Rigaku nano3DX bylo použito k vizualizaci biodegradabilních kryogelů v publikaci: [Chondrogenic potential of macroporous biodegradable cryogels based on synthetic poly\( \$\alpha\$ -amino acids\)](https://doi.org/10.1039/c7sm02074k) (DOI: 10.1039/c7sm02074k) v časopise Soft Matter. Zde byla metodou nanoCT sledována morfologie dvou vzorků vysoce porézních hydrogelů založených na biologicky odbouratelných syntetických polyaminokarboxylových kyselinách. Z CT dat byla následně provedena i analýza objemu pórů kryogelů a následně byla určena jejich velikost a distribuce.

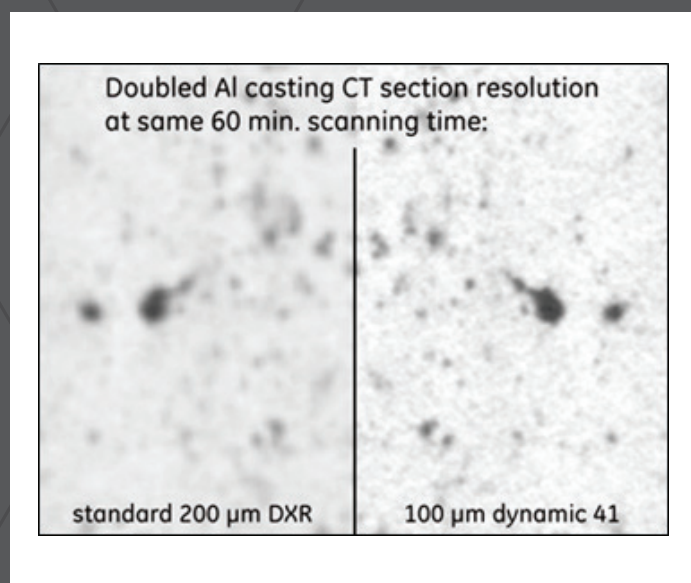
Společně s kolegy ze synchrotronu Elettra v Itálii se podílíme na publikaci: [Comparison of different experimental approaches in the tomographic analysis of ancient violins](https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.02.013) (DOI: 10.1016/j.culher.2017.02.013), jejímž cílem je srovnání různých experimentálních přístupů rentgenové počítačové tomografie k analýze starobylých houslí. Článek je součástí speciálního čísla časopisu Journal of Cultural Heritage, které je věnováno právě analýze dřevěných hudebních nástrojů. Jsou zde uvedeny a zhodnoceny výsledky měření houslí z lékařského CT, laboratorního CT a CT na synchrotronu. V článku jsou popsána různá experimentální uspořádání CT zařízení a jsou srovnány jejich parametry: doba měření, flexibilita, prostorové rozlišení nebo datová náročnost.

## ■ Modernizace microCT zařízení GE phoenix v|tome|x L240

Laboratoř se snažíme neustále držet na špičkové úrovni, abychom mohli i nadále poskytovat ta nejkvalitnější data. Pravidelně proto aktualizujeme softwary, pořizujeme výkonné výpočetní stanice nebo speciální upínací přípravky. Na jaře tohoto roku jsme absolvovali rozsáhlý upgrade našeho tomografu GE phoenix v|tome|x L240. Konkrétně jsme vyměnili detektor a také nanofokurní rentgenovou trubici. Uvedené novinky nám umožní naměřit data s vyšším rozlišením a kontrastem. Předpokládáme, že tyto přednosti naplno využijeme zejména u polymerních materiálů, hliníkových slitin a také biologických tkání.

### Detektor dynamic 41|100

Nejzásadnější změnou je instalace nového detektoru dynamic 41|100 [1]. Oproti jeho předchůdci jde o detektor vyvinutý speciálně pro průmyslové aplikace, což je zohledněno např. při ochraně jeho elektroniky před rentgenovým zářením. Nový detektor má vyšší citlivost a také poloviční velikost pixelu (100×100 μm). Počet pixelů je čtyřnásobně vyšší v porovnání s předchozím detektorem, a sice 4048 px × 4048 px. Menší velikost pixelů nám umožní při stejné velikosti vzorku dosáhnout až dvakrát lepšího rozlišení (s ohledem na absorpční vlastnosti vzorku). Vyšší citlivost zase pomůže dosáhnout lepšího kontrastu, případně zkrátit dobu měření (Obr. 5).

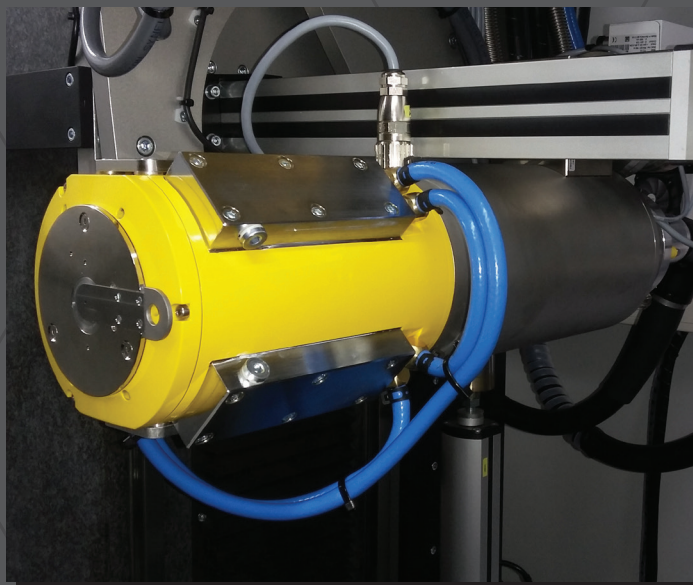


Obr. 5: CT řez hliníkového odlitku, ukazující rozdíl mezi starým a novým typem detektoru (převzato od GE).

[1] <https://www.gemeasurement.com/inspection-ndt/radiography-and-computed-tomography/dynamic-41100-superior-image-quality-x-ray-detector>

## Kapalinou chlazená 180kV – trubice

Druhou inovací je instalace nové nanofokusní rentgenové trubice (Obr. 6). Jedná se o nejnovější generaci, která je vybavena chladícím systémem. Chlazení pomocí kapalinového chladiva eliminuje pohyb ohniskové stopy, zajistí rovnoměrné ozáření vzorku a stabilnější pracovní podmínky trubice. Tyto vlastnosti se projeví především při delších expozičních časech. Trubice navíc umožňuje vyměnit materiál terče (standardně z wolframu a molybdenový) a tím změnit spektrum rentgenového záření. Toho lze využít pro zobrazení lehkých materiálů i v pokročilých metodách jako duálně energiové tomografii či fázovém kontrastu.



Obr. 6: Nová nanofokusní rentgenová trubice.

## KONTAKTY

web: [www.ctlab.cz](http://www.ctlab.cz)

Email: [ctlab@ceitec.vutbr.cz](mailto:ctlab@ceitec.vutbr.cz)

telefon: +420 541 149 867

### ■ Kontaktní osoba:

Ing. Tomáš Zikmund, Ph.D.

[tomas.zikmund@ceitec.vutbr.cz](mailto:tomas.zikmund@ceitec.vutbr.cz)

+420 541 142 846

### ■ Adresa:

**CEITEC**

Vysoké učení technické v Brně

Středoevropský technologický institut

Purkyňova 656/123

612 00 Brno