



národní
úložiště
šedé
literatury

Analýza vnitřní stavby materiálů a průmyslová rentgenová počítačová mikrotomografie

Souček, Kamil
2014

Dostupný z <http://www.nusl.cz/ntk/nusl-175007>

Dílo je chráněno podle autorského zákona č. 121/2000 Sb.

Tento dokument byl stažen z Národního úložiště šedé literatury (NUŠL).

Datum stažení: 07.05.2024

Další dokumenty můžete najít prostřednictvím vyhledávacího rozhraní nusl.cz .



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

„Vytváření nových sítí a posílení vzájemné spolupráce v oblasti inovativního strojírenství“
reg. č. CZ.1.07/2.4.00/31.0170

Analýza vnitřní stavby materiálů a průmyslová rentgenová počítačová mikrotomografie

The Analysis of Material Inner Structure and Industry X-ray Computed Microtomography

Ing. Kamil SOUČEK, Ph.D.¹

Abstrakt: V současné době jsou stále častěji využívány nedestruktivní metody analýzy různých typů materiálů. Jednu z takovýchto metod představuje především průmyslová rentgenová počítačová mikrotomografie (CT). Tento příspěvek je zpracován na základě zkušeností používání rentgenové průmyslové počítačové mikrotomografie v rámci výzkumných aktivit Ústavu geoniky AV ČR a pojednává o možnostech výzkumu různých typů materiálů pomocí této metody, včetně příkladů jejího použití. Rentgenové CT systémy firmy Nikom Metrology X TH 225 ST a XT H 450 na Ústavu geoniky pokrývají širokou oblast tomografických a radiografických aplikací, například v oblasti analýzy materiálů a geomateriálů (např. analýza pórového prostoru, vnitřní stavby a jejich defektů), stejně tak jako v oblasti kontroly malých odlitků a plastových dílů, v oblasti paleontologie (např. kontrola kosti, lebek, fosílií apod.), měření velikosti vnitřních rozměrů součástí, defektoskopie strojů a částí zařízení a rovněž v oblasti analýzy biologických struktur.

Klíčová slova: rentgenová počítačová mikrotomografie; vnitřní stavba materiálů; porositá; defektoskopie.

Abstract: In recent decades, non-destructive methods of materials analysis have been used increasingly for the study of different kinds of materials. Especially, it concerns the method of the X-ray industry computed microtomography (CT). This paper is elaborated on the basis of the experiences of X-ray CT use within the frame of research activities of the Institute of Geonics ASCR. Particularly, the possibilities and examples of the different kind material research by X-ray CT are presented. The X-ray CT systems fy. Nikom Metrology X TH 225 ST and XT H 450 at Institute of Geonics cover a wide range of the X-ray CT and radiography applications in the fields of analysis of materials and geomaterials (e.g. analysis of the pore space, inner structure and their defects), the inspection of small castings and plastic parts, as well as in the fields of palaeontology (e.g. inspection of bones, skulls, fossils etc.), size measurement of internal dimensions of the components, defectoscopy of machines and equipment parts and also in the field of biological structures analysis.

Keywords: X-ray computed microtomography; inner structure of materials; porosity; defectoscopy.

¹ Ústav geoniky AVČR, v.v.i., Studentská 1768, 708 00, Ostrava, tel.: +420 604 833 391, email: soucek@ugn.cas.cz

1. ÚVOD

V současné době jsou stále častěji využívány progresivní metody pro analýzu různých typů materiálů. Jednou z takovýchto metod je rentgenová počítačová tomografie, která se nejdříve začala využívat pro lékařské diagnostické účely. Počítačová tomografie, často označována zkratkou CT, reprezentuje zobrazování v řezech, její název je sestaven z řeckých slov "tomos" (řez, plátek) a "graphō" (popis, zápis) [1]. Rentgenová počítačová tomografie využívá penetrační schopnosti rentgenového záření procházející analyzovanými objekty.

Autorem teorie snímkování jednotlivých vrstev lidského těla a následné rekonstrukce obrazu pomocí výpočetní techniky je často neprávem opomíjený Allan MacLeod Cormack, který položil základy výpočetní tomografie již v roce 1963. Na základech Cormackovy teorie zkonstruoval v roce 1972 fyzik Godfrey Newbold Hounsfield první klinicky použitelný výpočetní tomograf - hlavový EMI MARK I (Hounsfield 1972). Zdánlivě příliš dlouhá doba mezi teoretickým popisem metody a jejím opravdovým uvedením do praxe je pochopitelná, když si uvědomíme, jaké nároky má na rychlost a zpracování obrovského množství dat. Proto teprve vysoká úroveň výpočetní techniky umožnila zrod nové zobrazovací vyšetřovací metody. Pro velký přínos této metody získali Hounsfield společně s Cormackem v roce 1979 Nobelovu cenu za medicínu [2].

Na základě úspěšného a rychlého rozvoje této diagnostické metody motivované výzkumem a vývojem RTG-CT systémů se v osmdesátých letech minulého století začíná rentgenová počítačová tomografie využívat také pro průmyslové použití v oblasti materiálového inženýrství a rovněž i v oblasti výzkumu chování různých typů geomateriálů [3]. V oblasti výzkumu materiálů je zvláště výhodné využití 2D/3D rentgenových výpočetních mikrotomografů (tzv. RTG micro-CT) s vysokým stupněm rozlišení. Tyto tomografy umožňují dosáhnout rozlišení základních stavebních jednotek tomografického řezu, popř. objemu (tzv. voxely), na úrovni jednotek nebo desítek mikrometrů [4]. Toto vysoké rozlišení tomografických řezů je možné dosáhnout použitím mikrofokálních zdrojů rentgenového záření a vhodných lineárních nebo plochých (2D) detektorů rentgenového záření s dostatečným množstvím a velikostí jednotlivých pixelů detektoru.

Přestože není stanoven přesný rozdíl mezi RTG-CT a RTG mikro-CT, lze tuto hranici definovat na základě prostorového rozlišení voxelu na úrovni cca 200 um, které obvykle nelze dosáhnout lékařskými RTG-CT skenery. Velikost vzorku, pro potřeby RTG mikro-CT, se pohybuje na úrovni od cca 40 cm (u velkých vzorků) až po malé vzorky o velikosti několika mikrometrů. Typická velikost vzorků pro mikro-CT v oblasti geovědních oborů se pohybuje v rozmezí od jednoho milimetru do cca pěti centimetrů [5]. V oblasti strojírenství a hutnictví bude použití mikro-CT navíc významněji limitováno velikostí vyšetřovaných objektů a především jejich vlastní hustotou, tvrdostí použitého rentgenového záření a potřebného výkonu rentgenového zdroje. Hodnota výkonu zdroje rentgenového záření přímo ovlivňuje velikost mikrofokálního ohniska, ze kterého je emitováno rentgenové záření a tím i ostrost obrazu radiografických projekcí.

Průmyslová rentgenová výpočetní mikrotomografie umožňuje nedestruktivní jak kvantitativní, tak kvalitativní komplexní analýzy a hodnocení vnitřní sestavy důležitých součástí moderních strojů a elektroniky, stejně tak jako hodnocení kvality a struktury samotného materiálu. Výsledkem a zároveň cílem vyšetřování pomocí CT je zobrazení jednotlivých řezů s identifikací a kvantitativním stanovením defektů např.:

- geometrické úchylky,
- změna rozložení hustoty materiálů,
- výskyt pórů, trhlin, vměstků apod.

Vypočtené tomogramy jsou účinné nástroje při zpracovávání (návrhů) technologie, v diagnostice a při certifikaci výrobků, například v leteckém a automobilovém průmyslu (trysky, pojiva, klouby, turbínové lopatky, písty, válce motorů keramické a kompozitní materiály apod.) [6]. Kvalitativní a kvantitativní analýzy chování různých typů geomateriálů a příbuzných materiálů, jako jsou například horniny, zeminy, stavební materiály (beton), keramické materiály a geokompozity [8] představují významnou oblast současného využití rentgenové počítačové mikrotomografie v souvislosti se

studium jejich vnitřní stavby (pórový prostor, trhliny, zrnitost, pojivo atp.). V dnešní době je metoda RTG CT v geovědních oborech používána zejména v následujících oblastech [3], [7]:

- studium mechanických stavů geomateriálů a jejich deformačního chování při mechanickém zatěžování a způsobů jejich porušování,
- výzkum vnitřní stavby a složení hornin, geomateriálu nebo geokompozitů (obecně heterogenních geomateriálů),
- studium hydraulických vlastností, proudění a difúze kapalin v geomateriálech,
- geo - environmentální aplikace,
- změny v materiálech během fyzikálních experimentů souvisejících s geotechnikou - inženýrské aplikace,
- studium pórového prostoru zemin a hornin.

Oblast využití rentgenové počítačové tomografie v geovědních oborech představuje hlavní náplň práce s instalovanými tomografickými systémy na Ústavu geoniky AVČR v oblasti výzkumu a analýzy geomateriálů jejichž některé příklady a možnosti využití jsou dále uvedeny v textu tohoto příspěvku. Hlavní výhodou rentgenové počítačové mikrotomografie je především její nedestruktivnost v oblasti 3D vizualizace a prováděných analýz u studovaných geomateriálů [9]. Tato nedestruktivní metoda studia chování geomateriálů umožňuje rovněž i "4D" vizualizace a analýzy změn ve studovaných objektech při působení vnějších faktorů (např. silové působení, degradační změny materiálu, sledování transportu kapalin apod.).

2. PRŮMYSLOVÁ 3D RENTGENOVÁ POČÍTAČOVÁ MIKROTOMOGRAFIE- ZÁKLADNÍ PRINCIPY

Průmyslová rentgenová počítačová mikrotomografie představuje jednu z metod využívajících různé vlastnosti rentgenového záření při interakci s vlastní hmotou studovaných materiálu. Pro potřebu rentgenové počítačové tomografie je to jejich schopnost pronikat různými druhy materiálu při různém stupni jejich utlumování v závislosti na vlastnostech analyzovaných objektů, především jejich hustoty a energii použitého záření. U nižších energiích RTG záření do útlumových charakteristik vstupuje i závislost na vlastním chemickém složení jednotlivých fází vyšetřovaných objektů. Utlumování rentgenového záření probíhá v souladu s tzv. Lambert-Beer zákonem, který udává intenzitu monochromatického rentgenového záření prošlého homogenním analyzovaným objektem (viz Obr. 1) [5]:

$$I = I_0 \cdot \exp(-dx \cdot \mu) \quad 1)$$

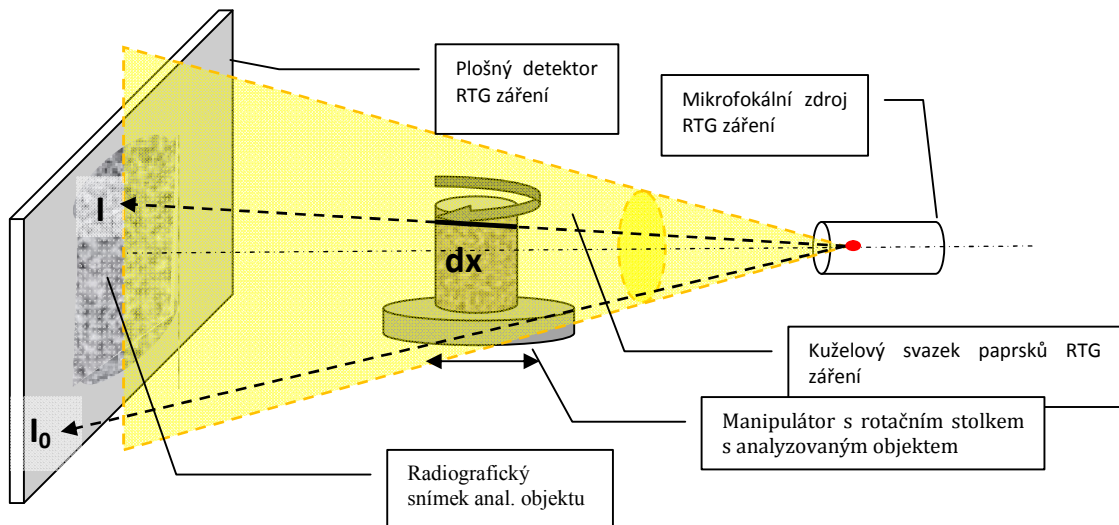
kde:	I_0	intenzita neutlumeného paprsku rentgenového záření (--)
	I	intenzita utlumeného paprsku rentgenového záření (--)
	μ	lineární koeficient útlumu (m^{-1})
	dx	tloušťka vzorku (m).

Tento zákon je pak při výpočtu aplikován na každý jednotlivý voxel o velikosti dx .

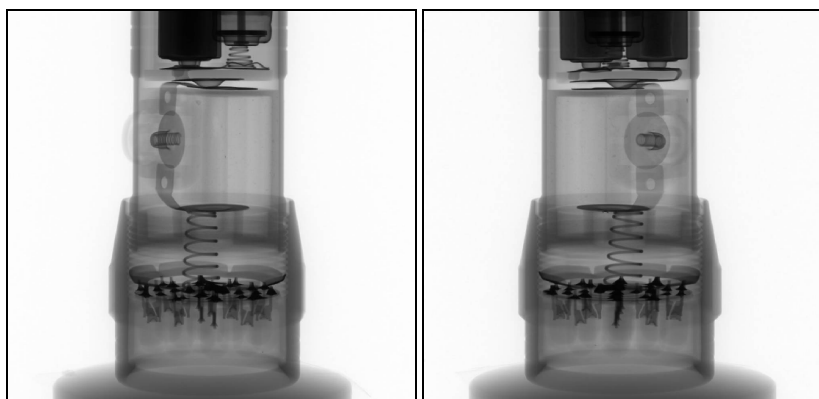
Pro rekonstrukci CT objemu, sestávajícího z jednotlivých voxelů, je nutné pořídit v průběhu skenovacího procesu analyzovaného objektu sadu 2D radiografických projekcí při známém úhlu pootočení během rotace objektu o 360°. Dvourozměrné radiografické projekce jsou pořizovány pomocí plošného detektoru rentgenového záření o známém počtu pixelů (viz Obr. 1). Radiografický snímek, resp. projekce nám zobrazuje 2D mapu pixelů (viz Obr. 2) udávající v různých odstínech šedi (rozsah škály šedi je dán typem detektoru a jeho bitové hloubky 8 bit, 16 bit apod.), intenzitu jak neutlumených, tak utlumených rentgenových paprsků procházejících studovaným objektem. Z dostatečného počtu radiografických projekcí je pak pomocí výpočetních algoritmů (např. Radonova transformace, zpětná Radonova transformace nebo tzv. "Filtered Back-Projection Method" [10]) rekonstruován (vypočítán) CT objem objektu. Za účelem zabránění interpolací mezi hranami jednotlivých voxelů musí být nastaven dostatečně velký počet radiografických projekcí tak, aby každý úhlový přírůstek postoupil ne více než o jeden voxel. To znamená, že pokud máme horizontální tomografický řez o rozměrech $N \times N$ pixelů, potom počet tomografických projekcí by se měl

pohybovat v rozmezí 1,57 - 3,14N. To znamená, že pro detektor o rozměrech 2000 x 2000 pixelů s 16-ti bitovou datovou hloubkou, při jeho maximálním využití, to představuje minimálně 3140 radiografických projekcí. Tato sada radiografických projekcí reprezentuje poměrně velký objem dat (cca 25 GB) jak pro jejich tomografické počítačové zpracování na dostatečně výkonném PC, tak zároveň jsou kladeny značné požadavky na vlastní kapacitu diskového úložiště pro tomografická data.

Výsledný rekonstruovaný CT objem je sestaven z jednotlivých voxelů, které nesou informaci o prostorovém rozložení koeficientu útlumu rentgenového záření v daném objektu. Tyto koeficienty útlumu pak odrážejí hustotu studovaného objektu v příslušném místě ortogonální prostorové sítě sestavené z jednotlivých voxelů. Z rekonstruovaného CT objemu jsou k pomoci vizualizačního a analyzačního softwaru připravovány 2D tomografické řezy. Pro zpracování tomografických řezů jsou používány různé metody určené pro zpracování digitálního obrazu (např. segmentace, extrakce, filtrace šumu, apod.).



Obr. 1 Schéma typické sestavy mikro-CT skeneru s konickým svazkem rentgenového záření a plošným detektorem s možností geometrického zvětšení objektu a rotačním systémem skenování [4]



Obr. 2 Obrázek dvou radiografických projekcí části "Led svítilny" získaných v průběhu procesu skenování při různém úhlu pootočení

3. RENTGENOVÉ TOMOGRAFICKÉ SYSTÉMY NA ÚSTAVU GEONIKY AV ČR

Laboratoř rentgenové výpočetní tomografie na Ústavu geoniky Akademie věd ČR byla založena v roce 2012 v rámci projektu "Institut čistých technologií těžby a využití surovin pro energetické využití" (CZ.1.05/2.1.00/03.0082) podporovaného z evropských strukturálních fondů. Založení laboratoře a pořízení vlastních tomografických zařízení předcházelo poměrně dlouhé přípravné období, které započalo před cca 10 lety, kdy jsme získali první zkušenosti s aplikacemi

použití této nedestruktivní metody v oblasti výzkumu vlastností geomateriálů na Universitě Kumamoto v Japonsku. Jednalo se o studium porušování kompozitních materiálu na bázi uhelné hmoty a polyuretanové pryskyřice (materiály vznikající při chemických tlakových injektážích uhelných slojí in situ) v průběhu jejich tlakové zatěžování.

Současná laboratoř rentgenové výpočetní tomografie je vybavena dvěma novými tomografickými systémy XT H 225 ST a X TH 450 2D/3D (viz Obr. 3 a 4.) od firmy Nikon Metrology. Pracoviště je rovněž vybaveno příslušnými rekonstrukčními a vizualizačními softwary (CT pro 2D a 3D CT Pro, Octopus a VGStudio MAX 2.2 s přídatnými moduly pro obrazovou analýzu tomografických řezů).



Obr. 3 RTG. CT tomograf XT H 450 2D/3D a reflexní mikrofokální zdroj RTG záření 450 kV



Obr. 4 RTG. CT tomograf XT H 225 ST a reflexní mikrofokální zdroj RTG záření 225 kV

3.1. Technická specifikace

Rentgenové tomografy XT H 225 ST a X TH 450 2D/3D jsou plně automatizované systémy s rotačním systémem skenování vybavené mikrofokálními zdroji rentgenového záření vyzařující kónický svazek paprsků. Tyto systémy umožňují manuální nastavování systémů pro účely optimalizace kvality radiografických projekcí. Základní technické údaje obou tomografických systémů jsou uvedeny v následujících dvou tabulkách (viz Tab. 1 a 2).

Tab. 1. Základní technické parametry systému XT H 450 2D/3D (viz Obr. 1)

XTH 450 2D/3D	
Maximální urychlovací napětí a výkon RTG zdroje	450kV/450W
Velikost RTG ohniska při 200W/600W	80 μm
Maximální hmotnost, průměr a výška skenovaných objektů	100 kg / cca 0.6 m / cca 0.8 m
Maximální teoretická, prozařitelná tloušťka analyzovaných materiálů	395 kg / m^2
Snímače RTG záření (16 bitová hloubka rozlišení)	Plošný Detektor (3D tomografie) (200 $\mu\text{m}/\text{pixel}$, 4 mil. pixelů, rozměr 400 mm x 400 mm))
	Zakřivený liniový diodový (400 $\mu\text{m}/\text{pixel}$, počet pixelů: 2000)

Tab. 2. Základní technické parametry systému XT H 225 ST (viz Obr. 2)

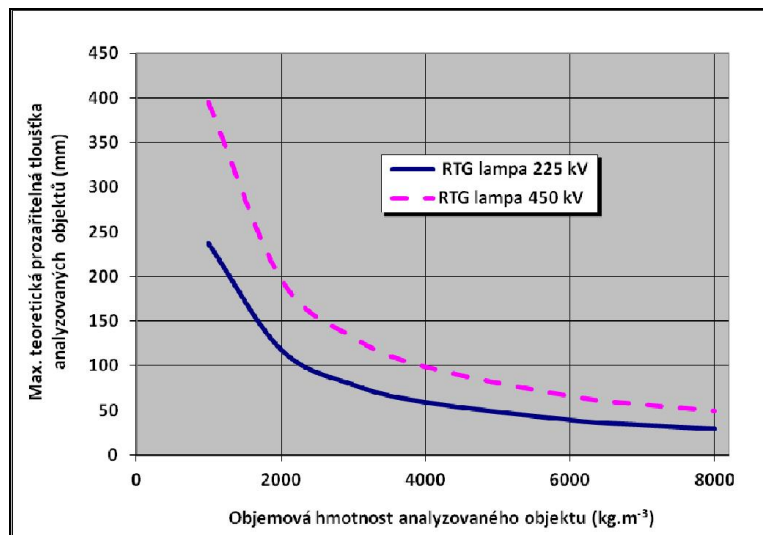
XT H 225 ST		
Max. urychlovací napětí a výkon RTG zdroje	Reflexní mód	225kV/225W
	Reflexní rotační mód	225kV/225W
	Transmisní mód	180kV/20W
Velikost RTG ohniska (reflexní mód / transmisní mód)	<3 μm / <1 μm	
Maximální hmotnost, průměr a výška skenovaných objektů	50 kg / cca 0.30 m / 0.30 m	
Maximální teoretická prozařitelná tloušťka analyzovaných materiálů	237 kg / m^2	
Snímač RTG záření (16 bitová hloubka rozlišení)	Plošný Detektor (3D tomografie) (200 $\mu\text{m}/\text{pixel}$, 4 mil. pixelů, rozměr 400 mm x 400 mm))	

Pro získání co nejlepší kvality tomografických řezů je nutné stanovit optimální nastavení obou tomografických systémů. Generelně se jedná o tyto parametry:

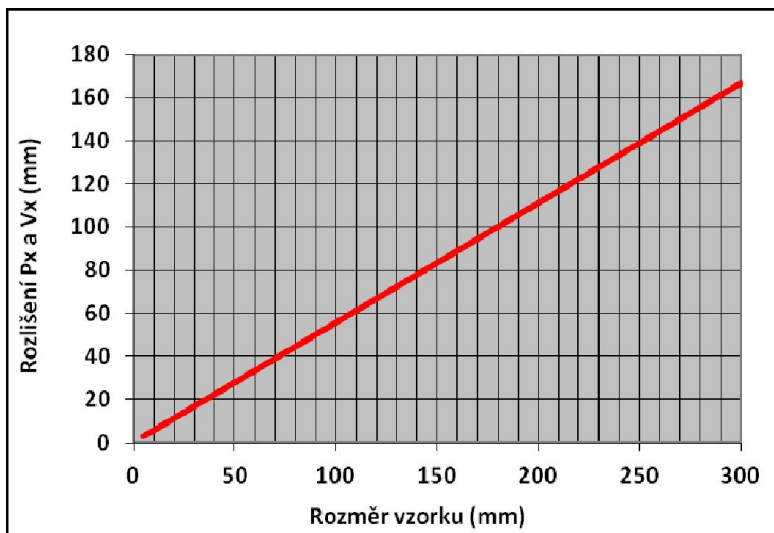
- tvrdost rentgenového záření, která je přímo úměrná urychlovacímu napětí mezi katodou a anodou RTG zdroje a prozařitelnosti (penetrační schopnost záření) analyzovaných objektů, graf na obrázku č. 5 znázorňuje teoretickou prozařitelnou tloušťku analyzovaného materiálu při maximální tvrdosti RTG záření u jednotlivých zdrojů RTG záření,
- úroveň toku RTG záření, která je přímo úměrná nastavení proudu elektronů mezi katodou a anodou RTG zdroje,
- stanovení minimálního počtu radiografických projekcí pro eliminování doby jednotlivých tomografických skenů a zároveň pro dosažení dostatečné kvality tomografických řezů (např. je voleno cca 3000 radiografických projekcí při využití cca 80-90% šířky plošného detektoru),
- nastavení citlivosti plošného detektoru RTG záření (6 - 24dB), citlivost detektoru významně eliminuje úroveň šumu v radiografickém snímku, která má nepřímo úměrný vliv na kvalitu výsledných tomografických řezů,
- dobu expozice a počet radiografických snímků na jednu radiografickou projekci (doba expozice nastavitelná v rozsahu cca 200 - 4000 ms), minimální počet radiografických snímků pro jednu radiografickou projekci 1-256, nastavení správné expozice a počtu snímků na projekci rovněž eliminuje úroveň šumu v tomografickém řezu (počet

radiografických projekcí, doba expozice a počet radiografických snímků na projekci a jejich počet určuje celkovou dobu jednoho tomografického skenu, která u jednoduchých aplikací může představovat desítky minut až několik hodin (cca 1 - 3 hodiny), u kvalitních tomografických projekcí může tato doba skenu narůst až na desítky hodin, (cca 10 - 20 hodin),

- míru projekce analyzovaného objektu na detektor rentgenového záření, která je úměrná geometrickému zvětšení a určuje velikost jednotlivého voxelu ve výsledném rekonstruovaném tomografickém objemu, respektive velikosti pixelu v tomografickém řezu pixelu (viz Obr. 6)



Obr. 5 Max. prozařitelná tloušťka vyšetřovaného objektu v závislosti na jeho obj. hmotnosti



Obr. 6 Závislost rozlišení voxelu, resp. pixelu v tomografickém řezu v závislosti na velikosti analyzovaného objektu při využití cca 90% šířky detektoru

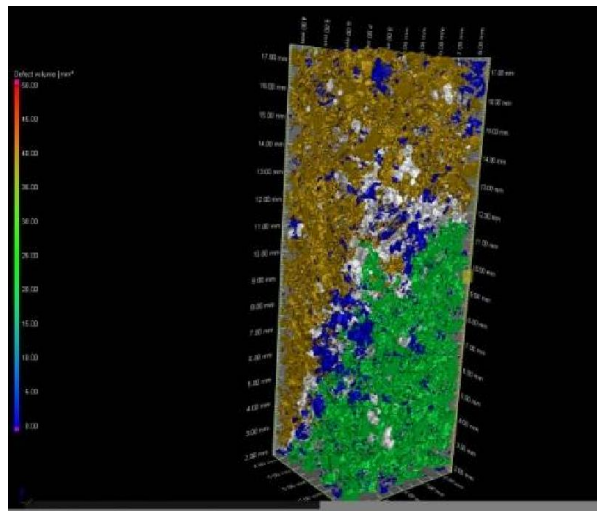
4. PŘÍKLADY POUŽITÍ RTG MIKRO-CT

4.1. Analýza pórového prostoru geomateriálů

Detailní poznání a analýza pórového prostoru v horninách a geomateriálech jak z kvalitativního, tak kvantitativního hlediska představuje jednu z hlavních a klíčových otázek v oblasti studia chování těchto materiálů a to nejen z pohledu proudění a státnosti kapalin, ale také

z hlediska odolnosti vůči externímu mechanickému namáhání. Vlastní póry představují oblasti mechanického oslabení, pórovitost tedy negativně ovlivňuje pevnostní a deformační vlastnosti těchto materiálů. Velikost pórů a rovněž celkový charakter pórového prostoru jsou také jedním z parametrů ovlivňující odolnost geomateriálů používaných jako stavební a sochařské materiály, zejména pokud jde o odolnost vůči mrazu a krystalizaci solí [11].

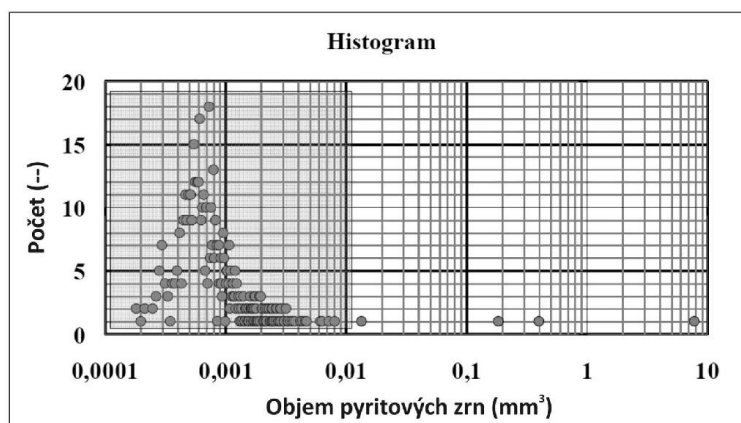
V současné době se používají různé metody pro studium pórovitosti. Tyto metodiky hodnotí pórový prostor především z kvantitativního hlediska (např. metoda stanovení pórovitosti měřením objemu absorpce vody analyzovanými geomateriály - tzv. efektivní pórovitost). Pouze pár metod hodnotí pórový prostor z kvalitativního hlediska. Jednou z takovýchto metod, běžně používaných, zohledňující kvalitativní hledisko představuje například vysokotlaká rtuťová porozimetrie. Na rozdíl od těchto tradičních metod, studium pórovitosti pomocí RTG mikro-CT umožňuje analýzu prostorového rozložení pórů, typ propojení jednotlivých pórů a změny pórového prostoru v souvislosti s působením vnějších faktorů na geomateriály. Digitální obraz vnitřní struktury materiálů může být dále vyšetřován pomocí 2D a 3D vizualizace za pomoci různých metod analýzy obrazu. Obr. 7 znázorňuje vizualizaci vnitřní struktury a základní analýzu pórovitosti vzorku Zámělského pískovce pomocí RTG CT systému XT H 225 ST. Rozměry vyšetřovaného vzorku u analyzovaného Zámělského pískovce byly 12x12x20 mm, velikost voxelu v rekonstruovaném CT objemu byla 0,012x0,012x0,012 mm. Celkový objem póru ve vzorku, stanovený na základě CT analýzy, byl stanoven na 12%, což odpovídá spodní hranici rozsahu pórovitosti udávaný pro tento horninový materiál, naměřeného klasickými metodami analýzy pórovitosti u hornin, tj. 13% - 24%.



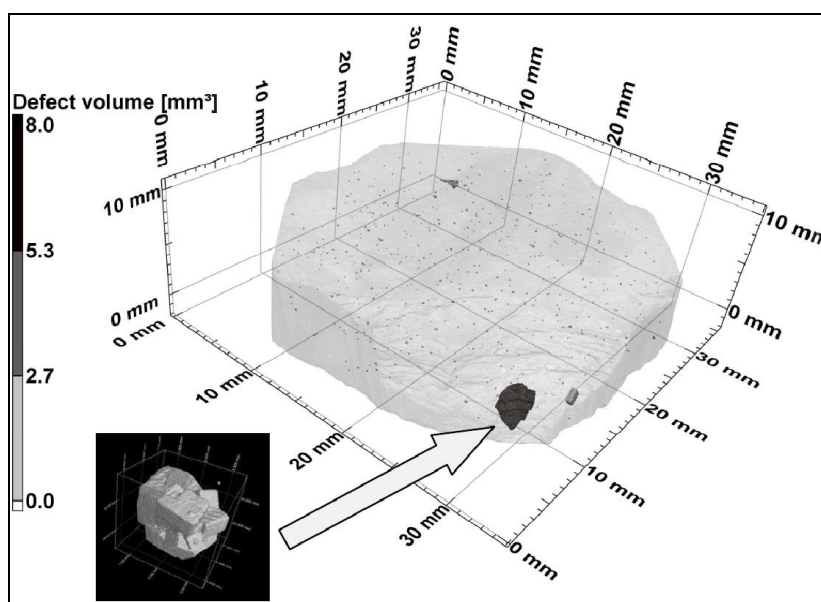
Obr. 7 Příklad vizualizace a analýzy pórového prostoru Zámělského pískovce dokumentující přítomnost pórů různé velikosti (větší systémy vzájemně propojených pórů odrážející litologickou stavbu pískovce - zelená a hnědá barva; menší poněkud izolované póry - modrá barva, oblasti pískovce kde jsou póry vyplněny oxidy železa - bílá barva)

4.2. Analýza pyritových inkluzí v břidlicích

Další příklad využití RTG mikro-CT reprezentuje analýzu struktury, distribuce a obsahu pyritových inkluzí v pokrývačských břidlicích. Mineralogicko-petrografická a strukturní analýza břidlic jsou klíčové metody pro zhodnocení kvality a vhodnosti pro použití ve stavebnictví. Přítomnost inkluzí, sulfidů železa (pyrit, markazit, pyrhotin), významně snižují odolnost břidlic vůči hypogenním procesům. Tyto sulfidy železa mají tendenci v běžných atmosférických podmínkách oxidovat, přičemž konečnými produkty tohoto procesu jsou limonit a kyselina sírová. Rezavě hnědý limonit může způsobovat nežádoucí barevné změny na břidlici. Daleko závažnější je ale fakt, že objemové změny, ke kterým při tomto procesu dochází, mohou způsobovat rozrušení břidlice, jehož výsledek je závislý na formě výskytu pyritu. Pyrit v samostatných izolovaných zrnech bude mít při zvětrávání tendenci vytvářet na plochách krátery různé hloubky i plošného rozsahu. V případě, že bude pyrit nepravidelně impregnovat strukturu břidlice, bude docházet k exfoliaci a odštěpování střípků nebo i celých velkých ploch. Další nežádoucí součástí jsou karbonáty, z nichž jednoznačně nejvíce destruktivní vliv na trvanlivost břidlic má kalcit. Tento uhličitán je v kyselém prostředí nestabilní a rozpouští se, přičemž mohou vznikat nové minerály s větším objemem. Typickým příkladem je reakce se slabou kyselinou sírovou, která se do břidlice dostane jednak s kyselými dešti a jednak může být produktem zvětrávání pyritu. Při tomto procesu dochází ke vzniku sádrovce, jehož rozpínání (při krystalizačních tlacích často přesahujících 100 MPa) snadno břidlici delaminuje na drobné střípky [12]. Objem a distribuce pyritových inkluzí v břidlicích byly stanoveny na základě CT analýzy vnitřní stavby jejich zkušebních těles. V první fázi studie byla určena úroveň šedi jednotlivých voxelů v tomografických řezech odpovídající analyzovaným inkluzím. Následně za použití softwaru VGStudio Max byly pomocí výpočetního algoritmu tzv. "threshold method", implementovaného do tohoto softwaru, stanoveny vyšetřované parametry. Nastavení filtru určující úroveň detekce nejmenších inkluzí v CT objemu, definovaný počtem voxelů, bylo nastaveno na hodnotu 8. U analyzovaného vzorku břidlice, prezentovaného v tomto příspěvku, byl nejmenší uvažovaný objem pyritových inkluzí $0,00018 \text{ mm}^3$, velikost voxelu $0,026 \times 0,026 \times 0,026 \text{ mm}$ a objem pyritových inkluzí ve vzorku byl stanoven pomocí CT analýzy na 0,15%. Pro zhodnocení výsledku analýzy objemu pyritových inkluzí ve vyšetřovaném vzorku byla rovněž provedena analýza jejich objemu pomocí mletí a plavení v těžkých kapalinách. Objem pyritových inkluzí touto úpravářskou metodu by stanoven na 0,12%. Nevelký rozdíl stanovení objemu pyritových inkluzí mezi CT analýzou a úpravářskými postupy mohl být na jedné straně způsoben nedostatečnou jemností mletí a neoddělení všech uzavřených pyritových inkluzí, například uzavřených v křemenných zrnech. Na straně druhé na přesnost CT analýzy má vliv nastavení úrovně šedi jednotlivých voxelů v tomografických řezech odpovídající analyzovaným inkluzím a nastavení detekčního filtru. V současné době je připravován pracovní postup na zpřesnění CT analýzy a stanovení tzv. reprezentativního elementárního objemu vyšetřovaného vzorku. Graf na obrázku 8 znázorňuje distribuci velikosti jednotlivých analyzovaných pyritových inkluzí v břidlici. Obrázek 9 znázorňuje 3D vizualizaci distribuce pyritových inkluzí v analyzovaném vzorku břidlice se zobrazením největšího analyzovaného pyritového zrna o objemu cca 8 mm^3 .



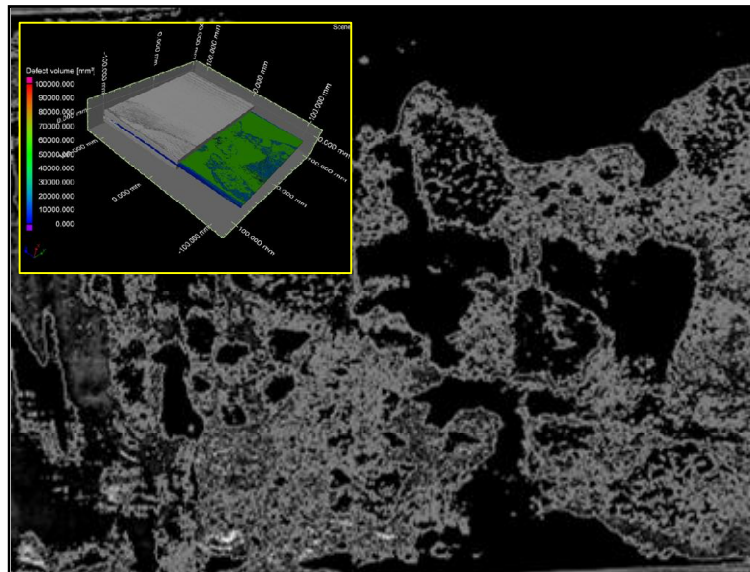
Obr. 8 Distribuce velikosti jednotlivých pyritových inkluzí [12]



Obr. 9 Distribuce velikosti jednotlivých pyritových inkluzí [12]

4.3. Kontrola kvality polyuretanového spoje

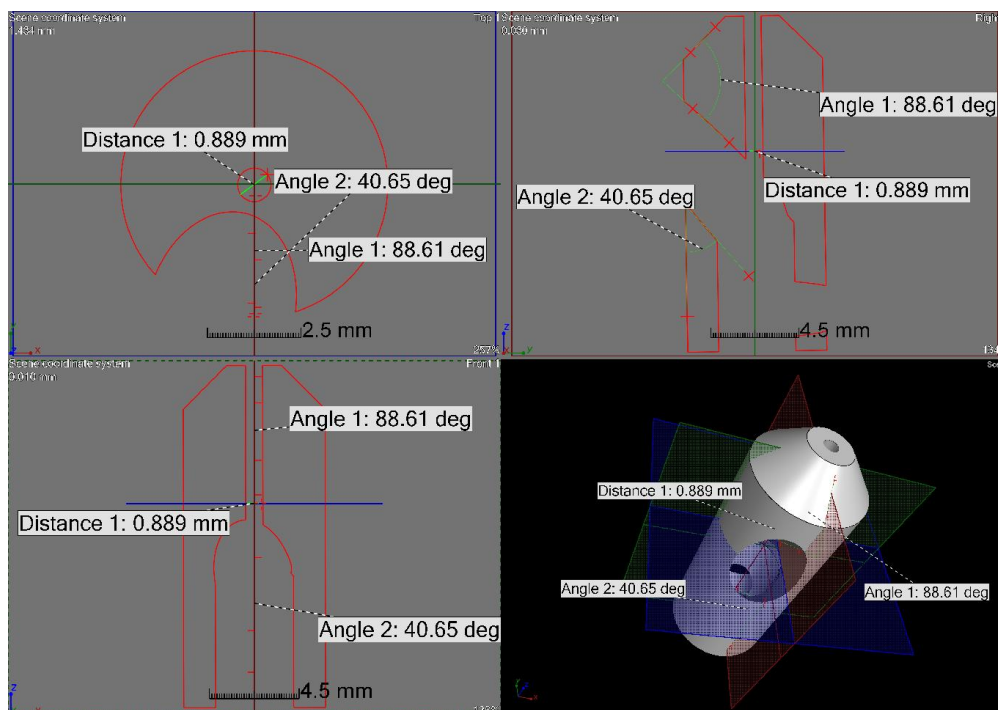
Další uváděný příklad využití RTG mikro-CT je z oblasti kontroly kvality plošného konstrukčního lepeného spoje dvou překližkových desek pomocí polyuretanové pryskyřice (PUR). Polyuretanová pryskyřice je napěňující materiál, který se v některých případech rovněž využívá pro lepení (spojování) různých druhů materiálů, popřípadě pro vyplňování prázdných prostor ve stavebnictví. V případě vytváření plošných spojů pomocí PUR, například u lepených překližkových desek, představuje ideální stav spojení, kdy PUR zcela vyplňuje konstrukční spáru mezi jednotlivými deskami. V případě PUR systémů je úplné vyplnění konstrukční spáry v běžných podmínkách lepení obtížné z důvodu uvolňování kyslíčnicku uhlíčitého v průběhu jejich vytvrzování (reakce), proto je vhodné kontrolovat a ověřovat míru vyplnění konstrukčního spoje PUR. Pro RTG CT analýzu vyplnění konstrukční spáry PUR pryskyřicí byl použit vzorek o rozměrech cca 230x200x17 mm. Velikost krychlového voxelu pro danou velikost vzorku byla 0,15 mm. Z objemové CT analýzy bylo stanoveno, že PUR materiál v konstrukční spáře vyplňuje pouze cca 50-60% jejího objemu. Obrázek 10 znázorňuje výslednou vizualizaci a distribuci PUR materiálu v konstrukčním spoji dvou lepených překližkových desek.



Obr. 10 Distribuce a stav PUR materiálu v konstrukčním spoji

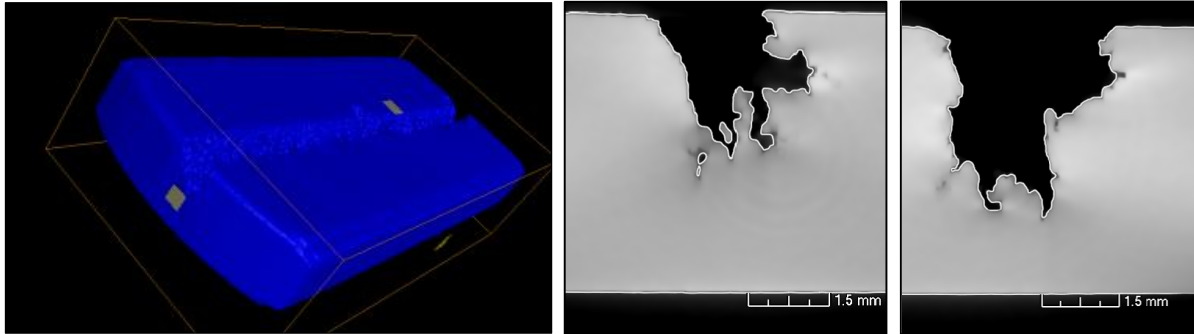
5. ZÁVĚR

Na základě současných znalostí a zkušeností získaných v průběhu ročního provozu laboratoře rentgenové výpočetní tomografie lze závěrem konstatovat, že rentgenové CT systémy X TH 225 ST a XT H 450 pokrývají širokou oblast tomografických a radiografických aplikací a prezentují zařízení s vysokým interdisciplinárním využitím nejen v oblasti analýzy geomateriálů. Obrázek 11 reprezentuje možnosti využití RTG CT v oblasti počítačového projektování (kreslení) v tzv. CAD softwarech (computer-aided drafting) a měření velikosti vnitřních rozměrů součástek. Na obrázku 11 je znázorněn CAD model směšovací komory trysky pro vysokotlaký abrazivní vodní paprsek vytvořený na základě RTG CT skenu skutečné komory. Na základě porovnávání CAD modelů (výkresů) součástek a reálných součástek, vyrobených podle CAD dokumentace, po jisté době provozu můžeme hodnotit a analyzovat například míru jejich opotřebení, popř. vzniklé defekty v zájmové součástce způsobené v průběhu jejího používání (provozu).



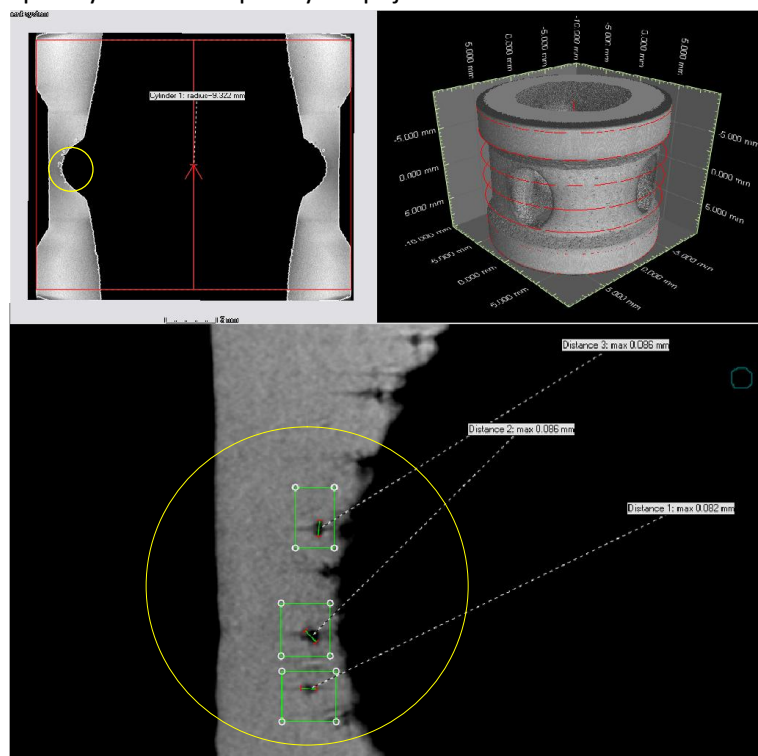
Obr. 11 CAD model trysky vytvořený na základě jejího RTG CT skenu

Dalším příkladem využití RTG CT ve výzkumné oblasti zabývající se řezáním vysokotlakým vodním paprskem může být například analýza zhodnocení efektivnosti vodního paprsku při různých parametrických nastaveních režimu řezání vodním paprskem a schopnosti řezat různé druhy materiálu. Následující obrázek zobrazuje 3D vizualizaci drážky vytvořené vodním paprskem. Analýzou objemu drážky (objemu dezintegrovaného materiálu) můžeme zhodnotit řezací účinnost vodního paprsku a můžeme hodnotit a porovnávat rovněž morfologii vzniklé drážky na příčných tomografických řezech (viz Obr. 12).



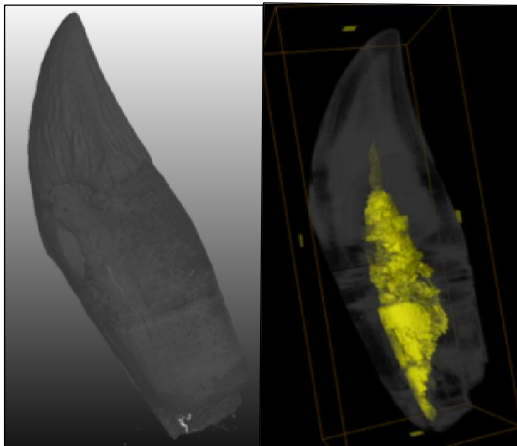
Obr. 12 3D vizualizaci drážky vytvořené vysokotlakým vodním paprskem a typický profil drážky

Další oblast, kde RTG CT může najít své uplatnění, představuje metalografie [6], a to oblasti analýzy makroskopických pórů, respektive defektů vznikající při výrobě kovových součástí a odlitků. Na následujícím obrázku je znázorněna vizualizace části duté hřídele vyrobené pomocí průmyslové 3D tiskárny s detailem zobrazující kvalitu povrchu vnitřních stěn a defekty uvnitř materiálu hřídele (viz Obr. 13). Výhodou CT analýzy je, že lze nedestruktivním způsobem analyzovat celý objem vyšetřovaného objektu na rozdíl od metalografie, kde jsme limitováni možnostmi přípravy omezeného počtu vyšetřovaných řezů v závislosti na nutnosti jejich mechanického zpracování (řezání, leštění apod.). Defektoskopii je možné provádět pouze i z radiografických snímků, například v elektrotechnickém průmyslu u desek plošných spojů.



Obr. 13 3D Vizualizace defektů v duté hřídeli vyrobené průmyslovou 3D tiskárnou

RTG CT je rovněž využitelná v oblasti paleontologie (např. kontrola kostí, lebek, zubů, fosílií apod.) a rovněž v oblasti analýzy biologických struktur. Následující obrázek znázorňuje 3D vizualizaci jednoho z prvního RTG CT skenu provedeného v laboratoři rentgenové výpočetní tomografie na Ústavu geoniky AV ČR. Jedná se o 3D vizualizaci stavby zubu prehistorické velryby *Dorudon Atrox*, jehož dentální kanálek je zcela mineralizován a lze s úspěchem studovat jeho morfologii (viz Obr. 14).



Obr. 14 3D vizualizace stavby prehistorické velryby *Dorudon Atrox*

6. PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek byl vytvořen v rámci projektu "Institut čistých technologií těžby a užití energetických surovin", reg. č. CZ.1.05/2.1.00/03.0082 podporovaného Operačním programem Výzkum a vývoj pro Inovace, financovaného ze strukturálních fondů EU a ze státního rozpočtu ČR a zároveň byl podpořen projektem RVO: 68145535. Autor děkuje za podporu.

7. LITERATURA

- [1] CIERNIAK R.: X-ray Computed Tomography in Biomedical Engineering, *Springer, London, 2011*, ISBN 978-0-85729-027-4, doi 10.1007/978-0-85729-027-4
- [2] ELIÁŠ, P.; MÁCA, P.; NEUWIRTH, J.; VÁLEK, V.: *Moderní diagnostické metody. II.díl Výpočetní tomografie*, 1. vyd. Brno : Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví, 1998. 84 s. ISBN 80-7013-294-9
- [3] OTANI, J.: State of the Art report on geotechnical X-ray CT Research at Kumamoto University *In: Otani J., Obara Y. eds., X-Ray CT for Geomaterials: Soils, Concrete, Rocks*. International Workshop on X-ray CT for Geomaterials, GEOX2003. AA Balkema, Lisse, p. 43 – 77
- [4] STAŠ, L.; SOUČEK, K.; GEORGIOVSKÁ, L.; VAVRO, M.; DUDKOVÁ, E.: X-ray computed tomography and geomaterials research at the Institute of Geonics of the ASCR. *In Nowoczesne metody eksploatacji węgla skal zwiezlych*. Krakow: Adademia Górniczo Hutnicza Jm. Stanislaw Staszica w Krakowie, 2013, p. 44-52. ISBN 978-83-930353-1-1.
- [5] CNUDDÉ, V., BOONE, M.N.: High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: A review of the current technology and applications. *Earth-Science Reviews*, 123, p. 1-17, 2013
- [6] PROKOP, J.: Porosity Measurement by X-ray Computed Tomography, Dissertation thesis, *Czech Technical University in Prague, Faculty of Nuclear Sciences and Physical Engineering*. Prague, 75 pp., 2014
- [7] MEES, F.; SWENNEN, R.; VAN GEET, M.; JACOBS, P. eds: Applications of X-Ray Computed Tomography in the Geosciences, Geological Society Special Publication no. 215, London, 237 pp., 2003
- [8] ŠČUČKA, J.; SOUČEK K.: Architecture and Properties of Geocomposite Materials with Polyurethane Binders. *Documenta Geonica, Institute of Geonics AS CR Ostrava*, 247 pp., 2007

- [9] DESRUES, J.; VIGGIANI, G.; BÉSUELLE, P. eds: *Geox Advances in X-ray Tomography for Geomaterials*, ISTE and John Wiley, London, 2006
- [10] KAK, A.C.; SLANEY, M.: *Principles of Computed Tomography Imaging*. IEE Press, p. 49-110, 1987
- [11] MARTINEC, P., VAVRO, M., SCUČKA, J., MASLAN, M.: (2010) Properties and durability assessment of glauconitic sandstone: A case study on Zamel sandstone from the Cretaceous Bohemian Basin (Czech Republic), *Engineering Geology*, 115, 3-4, p. 175 - 181.
- [12] VAVRO, M.; SOUČEK, K.; DANĚK, T. ; STAŠ, L.: Selected Non-Destructive Methods Suitable for Evaluation of Roofing Slate. In *Advanced Materials Research*. Uetikon-Zuerich: Trans Tech Publications, roč. 923, - (2014), s. 63-70. ISSN 1022-6680 2013,