

původní práce

Poranění kloubů – zobrazení s ultravysokým rozlišením pomocí photon-counting CT

Imaging of injured joints with ultra-high resolution using photon-counting CT

Jiří Ferda¹, Pavel Nedbal¹, Tomáš Vendiš^{1, 2}, Jan Baxa¹, Bernhard Schmidt²

¹Klinika zobrazovacích metod LF UK a FN, Plzeň

²Computertomographie Forschung Abteilung, Siemens Healthineers, Forchheim, Deutschland

Hlavní stanovisko práce

Photon-counting technologie výpočetní tomografie zásadním způsobem rozšiřuje kvalitu diagnostiky v indikacích akutních zobrazení kloubů díky ultravysokému rozlišení a možnosti spektrální analýzy obrazů.

SOUHRN

Ferda J, Nedbal P, Vendiš T, Baxa J, Schmidt B. Poranění kloubů – zobrazení s ultravysokým rozlišením pomocí photon-counting CT

Cíl: Zhodnotit možnosti zobrazení poranění kloubů pomocí photon-counting CT (PCCT) s ultravysokým rozlišením.

Metodika: Byla provedena analýza akutních vyšetření lokte, zápěstí a ruky, dále kolene, hlezna a nohy provedených z důvodu poranění v průběhu 8 týdnů, kdy tato byla provedena pomocí PCCT (Naeotom Alpha.Peak, Siemens Healthineers, s akvizicí datové stopy 0,2 mm a dále s využitím klastru 2 × 2 detektorové elementy ke spektrálnímu zobrazení tkání. Hodnocení bylo zaměřené na spektrum zobrazených kloubů a nejčastějších nálezů.

Výsledky: V období 8 týdnů jsme provedli celkem 98 vyšetření kloubů apendikulárního skeletu, jednalo se o vyšetření akutní indikace poranění, kdy indikacemi byly nitrokloubní zlomenina (73 vyšetření), nejasný nález na prostém snímku (17 vyšetření), poranění v terénu již dříve operovaného kloubu s implantací osteosyntetického materiálu (7 vyšetření). Soubor zahrnoval 56 mužů a 42 žen, v průměrném věku 41,81 let v rozpětí 11–92 let.

Závěr: Photon-counting technologie výpočetní tomografie zásadním způsobem rozšiřuje kvalitu diagnostiky v indikacích akutních zobrazení kloubů. Hlavními výhodami je mimořádně vysoké prostorové rozlišení současně s možností rozšířit způsoby hodnocení i o posuzování měkkých tkání s vyšší přesností a rozlišením.

Klíčová slova: poranění kloubů, photon-counting CT, vysoké rozlišení.

Major statement

Photon-counting computed tomography technology significantly improves the quality of diagnostics in acute joint imaging thanks to its ultra-high resolution and the possibility of spectral image analysis.

SUMMARY

Ferda J, Nedbal P, Vendiš T, Baxa J, Schmidt B. Imaging of injured joints with ultra-high resolution using photon-counting CT

Aim: To evaluate the possibilities of imaging joint injuries using ultra-high-resolution photon-counting CT (PCCT).

Methods: An analysis was performed of acute examinations of the elbow, wrist, and hand, as well as the knee, ankle, and foot, performed due to injury over an eight-week period using PCCT (Naeotom Alpha.Peak, Siemens Healthineers, with 0.2 mm data acquisition and using a 2 × 2 detector element cluster for spectral tissue imaging. The evaluation focused on the spectrum of joints imaged and the most common findings.

Results: Over an eight-week period, we performed a total of 98 examinations of the joints of the appendicular skeleton. These were examinations of acute injuries, where the indications were intra-articular fractures (73 examinations), unclear findings on plain images (17 examinations), injuries in the field of a previously operated joint with implantation of osteosynthetic material (7 examinations). The sample included 56 men and 42 women, with an average age of 41.81 years, ranging from 11 to 92 years.

Conclusion: Photon-counting computed tomography technology significantly improves the quality of diagnostics in acute joint imaging indications. The main advantages are extremely high spatial resolution and the possibility of expanding the methods of evaluation to include the assessment of soft tissues with higher accuracy and resolution.

Key words: joint injuries, photon-counting CT, high resolution.

Přijato: 1. 10. 2025

Korespondenční adresa:

prof. MUDr. Jiří Ferda, Ph.D.
Klinika zobrazovacích metod LF UK a FN
aleš Svobody 80, 323 00 Plzeň
e-mail: ferda@fnplzen.cz

Konflikt zájmů: žádný.

Podpořeno projektem MZ ČR Konceptní rozvoj výzkumné instituce 00669806 – FN Plzeň a projektem COOPERATIO, basic sciences Univerzity Karlovy.

ÚVOD

Skelet je optimální tkání pro zobrazování paprsky X díky obsahu kalcia, jde o nejstarší aplikaci zobrazení v radiologii vůbec. Výpočetní tomografie překonává prosté snímky možností zobrazit vnitřní strukturu kosti, kdy v současnosti je možné dosáhnout submilimetrového rozlišení v jakékoliv rovině. I když je vyšetření skeletu častou indikací, dosud je často širší uplatnění dáno některými limitacemi – prostupnost pracovišť a také jistá omezení v zobrazování měkkých tkání, které jsou součástí kosti jako orgánu anebo skeletu jako orgánové soustavy. Technická omezení CT jsou známa především pro dostatečné rozlišení kloubní chrupavky a změn v kostní dřeni. Rozdíly v absorpci tkání

chrupavky a osifikovaného skeletu jsou příliš vysoké. Limitace jsou i v detekci periostálních změn pro nedostatečné rozlišení kontaktní linie kost-měkké tkáně nebo změn narušené architektury spongiózní kosti, kde je potíží nedostatečné prostorové rozlišení příliš velkého detektorového elementu.

Při akvizici dat je zásadní rozhodnutí, jestli je žádoucí docílit nejvyššího možného rozlišení v ose Z. Pokud jde o zobrazení velmi malých kostních struktur, jakými jsou kost spánková, ukotvení zubů v čelisti nebo struktura spongiózní kosti, je využíváno velmi vysoké rozlišení, které dosahuje v běžných aplikacích v minimu jen 0,5 mm. Photon-counting technologie umožňuje zvýšení prostorového rozlišení akvizicí datových stop detektorovým elementem od 0,2 mm,

kdy využitím jejich klastu v konfiguraci 2×2 je možné navíc získat informace i o rozdílech absorpce v jednotlivých energetických hladinách a využít pak možnosti spektrální analýzy nebo specifických monoenergetických zobrazení (1–3). Vysoké prostorové rozlišení lze využít v trojrozměrném zobrazení kostních struktur, spektrální při zobrazení chrupavky a kostní dřeni a optimalizaci zobrazení kovových implantátů.

Cílem práce je zhodnotit možnosti zobrazení s ultravysokým rozlišením u akutních indikací zobrazení kloubů, především u poranění.

METODIKA

Soubor vyšetření a hodnocení

Hodnotili jsme vyšetření provedená technikou vysokého rozlišení u zobrazení kloubů – loketní kloub, zápěstí a ruka, kolenní kloub a hlezno a noha, za běžného provozu pracoviště v urgentním režimu v nepřetržitém provozu, a to i ve vztahu k počtu ostatních vyšetření. Do hodnocení jsme nezahrnuli vyšetření ramenního kloubu, kyčelního kloubu, a to jak samostatně, tak i vyšetření, která byla součástí vyšetření většího úseku těla, a to včetně vyšetření u polytraumat. Vyhodnotili jsme soubor po sobě následujících vyšetření dle provozního deníku v období 8 týdnů a dále podle indikací k vyšetření a nálezů zobrazení. Hodnotili jsme i kvalitu zobrazení s přítomností step-artefaktů nebo přítomností Hounsfieldových artefaktů přítomných buď z důvodu přítomnosti denzní kortikální kosti, nebo kovového implantátu. Hodnocení jsme prováděli Likertovou škálou, kdy hodnocení kvality bylo ve stupních jako ve školní klasifikaci: 1 – výborná kvalita,

1a



1b



1c



1d



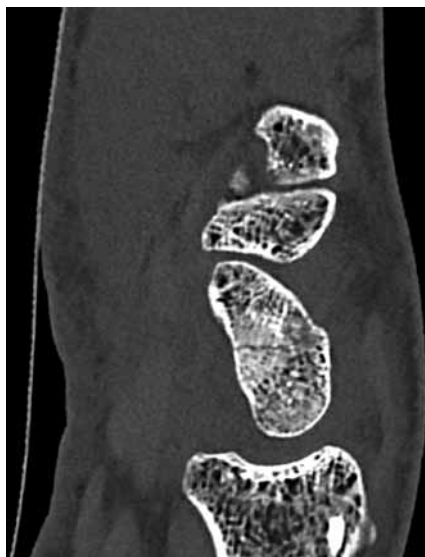
1 Intraartikulární fr. capituli radii: (a, b, c) cinematic volume rendering technique; (d) multiplanar rekonstrukce

Intra-articular fracture of the capitulum of the radius: (a, b, c) cinematic volume rendering technique; (d) multiplanar reconstruction

2a



2b



2

Fraktura ossis scaphoidei: (a, b) multiplanární rekonstrukce v na sebe kolmých rovinách; (c, d) cinematic volume rendering technique

Fracture of the scaphoid bone: (a, b) multiplanar reconstruction in perpendicular planes; (c, d) cinematic volume rendering technique

2c



2d



možné rekonstrukce datové stopy se zabezpečením prostorového rozlišení v ose Z 0,1 mm.

Druhá série využívá spektrální rekonstrukci dat a zahrnuje obrazy šíře 0,4 mm s inkrementem 0,2 mm, rekonstrukční algoritmus volíme (kernel) Br40, tedy obvyklý pro měkké tkáně, s monoenergetickými rekonstrukcemi od 40 do 190 keV. Data jsou rekonstruována pomocí sběru informací čtyřmi sousedními detektorovými elementy, jde tedy o nejmenší možnou konfiguraci pro rekonstrukci datové stopy s rozlišením spektrální informace. Spektrální data jsou uložena ve formátu SPP (spectral post processing), kdy dovolují postprocessing.

Postprocessing

Základní postprocessing jsou multiplanární rekonstrukce v libovolné rovině pro hodnocení patologického nálezu. Pro uložení v archivačním systému využíváme automatické generování rekonstrukcí ve třech základních rovinách v kostní a měkkotkáňové rekonstrukci v šíři 3 mm. Automatická rekonstrukce probíhá v prostředí postprocessingového portálu SyngoVia. Pro demonstraci nálezu využíváme 3D rekonstrukce pomocí volume rendering techniky, pro detailní zobrazení linií lomu a fragmentů je vhodnější rekonstruovat data s vysokým rozlišením, ale tato data produkují někdy šumové artefakty.

Spektrální postprocessing využíváme pro hodnocení měkkých tkání, a to včetně nitrodřeňové kontuze a dále zobrazení chrupavky, ligament a šlach. A rovněž také pro hodnocení hematomů

2 – velmi dobrá kvalita, 3 – dobrá kvalita, 4 – hodnotitelné vyšetření s artefakty, 5 – nehodnotitelné vyšetření.

Akvizice dat

Vyšetření provádíme na přístrojích photon-counting CT Naeotom Alpha.Peak (Siemens Healthineers, Forchheim, Německo).

Expoziční hodnoty 120 kV, 75 mAs_{eff} v daném nastavení hodnot dosahuje CTDI_{vol} 5,87 mGy. Obvyklá délka skenu je 150 mm, tedy DLP (dose length product) dosahuje 106. Akvizice dat probíhá v režimu použití konfigurace detektoru pro vysoké rozlišení s nastavením detektorů 120 × 0,2 mm.

Rekonstrukce dat

Data rekonstruujeme ve dvou sériích se zaměřením na kostní strukturu a na změny měkkých tkání a kostní dřeně, a to s rekonstrukční maticí 512 × 512 bodů v zobrazovacím poli maximálně 15 cm, s adaptací na velikost kloubu.

První série je zaměřena na co možná nejvyšší rozlišení kostních struktur a zahrnuje obrazy šíře 0,2 mm s inkrementem 0,1 mm, rekonstrukční algoritmus volíme (kernel) Br72, tedy obvyklý pro vysoké rozlišení. Tato rekonstrukce umožňuje hodnotit vyšetření s maximálním prostorovým rozlišením. Daná sada obrazů je rekonstruována s energetickou kvalitou 70 keV. Iterativní rekonstrukce je nastavena na úroveň kvality 3, tedy střední stupeň. Výše uvedená metoda tedy využívá nejmenší

3a



3

Komplexní intraartikulární fraktura zápěstí s rozlomením os scapho-ideum, os lunatum, perilunární luxací a intraartikulární frakturou distálního konce radia: (a) sagitální multiplanární rekonstrukce; (b, c, d) cinematic volume rendering technique

Complex intra-articular fracture of the wrist with fracture of the scaphoid bone, lunate bone, perilunate dislocation, and intra-articular fracture of the distal end of the radius: (a) sagittal multiplanar reconstruction; (b, c, d) cinematic volume rendering technique

3b



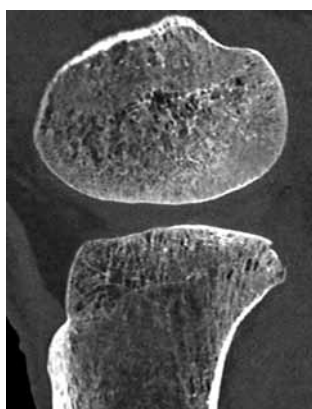
3c



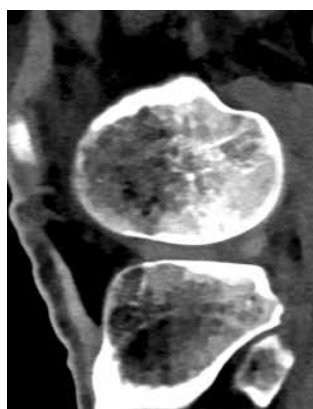
3d



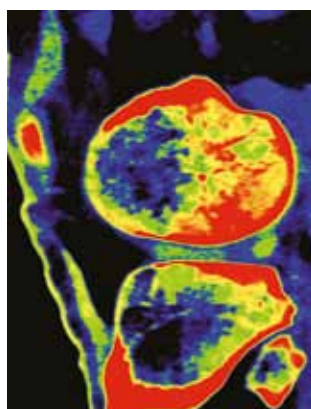
4a



4b



4c



4d



4 Mikrofraktura zadního okraje tibiálního kondylu a mikroimpresie femorálního kondylu v zátěžové zóně: (a) multiplanární rekonstrukce s rozlišením 0,1 mm v ose Z; (b) spektrální monoenergetické zobrazení o energii 190 keV; (c) ten samý obraz v barevné mapě. Oba obrazy ukazují kostní kontuzi dorzálně při hraně kondylu tibie a pod nenápadnou impresí; (d) magnetická rezonance v sagitální rekonstrukci sekvence DESS T2* WE zobrazuje podobně edém v obou lokalizacích

Microfracture of the posterior edge of the tibial condyle and microimpression of the femoral condyle in the stress zone: (a) multiplanar reconstruction with a resolution of 0.1 mm in the Z axis; (b) spectral monoenergetic imaging with an energy of 190 keV; (c) the same image in a color map. Both images show bone contusion dorsally at the edge of the tibial condyle and under an inconspicuous impression; (d) magnetic resonance imaging in sagittal reconstruction of the DESS T2* WE sequence shows similar edema in both locations

5a



5b



5c



5d



5 Reponovaná luxační fraktura hlezna s poraněním tibiofibulární syndesmózy interponovaným osteochondrálním defektem mezi talem a tibií, včetně mediální části kladkového kloubu, a dále s vpáčenou fr. na mediální části kladky od tibiálního maleolu: (a, b) multiplanární rekonstrukce v koronární rovině s rozlišením 0,1 mm v ose Z; (c, d) cinematic volume rendering technique, po subtrakci tibia a fibuly v pohledech na poranění talu

Repositioned dislocation fracture of the ankle with injury to the tibiofibular syndesmosis, interposed osteochondral defect between the talus and tibia, including the medial part of the trochlear joint, and further with an impacted fracture on the medial part of the trochlea from the tibial malleolus: (a, b) multiplanar reconstruction in the coronal plane with a resolution of 0.1 mm in the Z axis; (c, d) cinematic volume rendering technique, after subtraction of the tibia and fibula in views of the talus injury

loketního kloubu. Příčina je v obtížném polohování loketního kloubu pro zobrazení, kdy často musí být kloub uložen atypicky nad hlavou a pacient nedokáže udržet končetinu bez pohybu. (Pozn.: Do hodnocení nebyla zařazena vyšetření, která nebylo možné provést v elevaci končetiny; v tomto případě provádíme vyšetření protokolem bez ultravysokého rozlišení.)

DISKUSE

Současná traumatologická praxe repoziční a fixace zlomenin, které jsou komplikované z hlediska anatomického složení kloubu nebo komplikovaného poranění s vícečetně poraněnými kostmi nebo vícečetnými fragmenty, stále dodržuje praxi co možná nejvíce anatomické adaptace fragmentů, a to jak manuální repoziční, tak repoziční pomocí operačního zákroku s osteosyntézou. U kloubů komplexních a kloubů s menšími kostními strukturami je prosté zobrazení rentgenovým snímkem nedostačující pro zhodnocení prostorové konfigurace jednotlivých kostí a úlomků (4).

Pokud je k dispozici zobrazení, které dovolí dostat se k rozlišení v prostoru od 0,1 mm, tedy na úroveň třetiny běžné šíře lidského vlasu, je možné spolehlivě hodnotit strukturální změny

a ostatních měkkotkáňových patologických stavů.

VÝSLEDKY

V období 8 týdnů jsme provedli celkem 98 vyšetření kloubů apendikulárního skeletu. Jednalo se o vyšetření akutní indikace poranění, kdy indikacemi byly nitrokloubní zlomenina (73 vyšetření), nejasný nálezn na prostém snímku (17 vyšetření) a poranění v terénu již dříve operovaného kloubu s implantací osteosyntetického materiálu (7 vyšetření). Soubor zahrnoval 56 mužů a 42 žen, v průměrném věku 41,81 let v rozpětí 11–92 let.

Skladbu vyšetřených kloubů ukazuje graf 1. Jsou v něm shrnuty nejčastější

nálezy, které se vyskytly s četností vyšší než 5. Významnou skupinou byla poranění v oblasti hlezna, kdy z vyšetření v celkovém počtu 21 šlo v pěti případech o poranění typu epifyzeolýzy distální epifyzy tibia a dále komplexní fraktury v oblasti horního hlezenního kloubu v 16 případech, kdy ve 14 případech byly zřetelné nitrokloubní fragmenty uložené mezi kladkou talu a kloubní plochou vidlice fibula-tibia.

Při hodnocení kvality zobrazení byla průměrná hodnota Likertovy škály 1,08, kdy ve dvou případech byly hodnoceny obrazy stupnicí 2 kvůli mírné neostrosti z důvodů pohybových artefaktů a v jednom případě hodnoceny stupnicí 4 z důvodu pohybu a artefaktu od okolních tkání. Ve všech případech sníženého hodnocení se jednalo o zobrazení

6a



6b



6c



6d

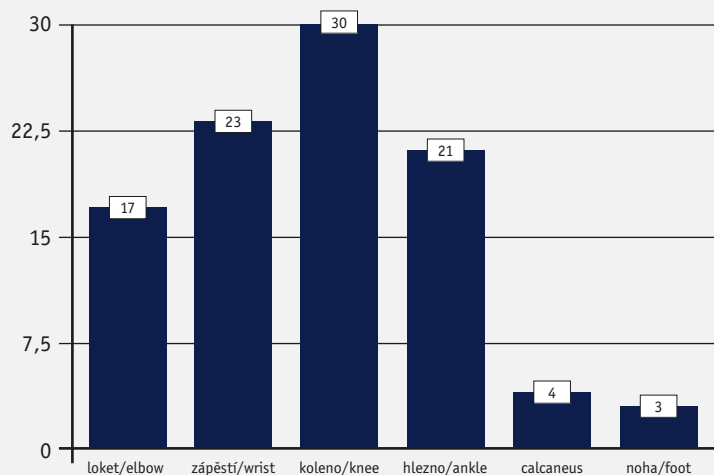


6 Epifyzeolýza distální tibie typu Salter-Harris 4: (a, b) multiplanární rekonstrukce v koronární rovině s rozlišením 0,1 mm v ose Z; (c, d) cinematic volume rendering technique

Salter-Harris type 4 distal tibial epiphysiolysis: (a, b) multiplanar reconstruction in the coronal plane with a resolution of 0.1 mm in the Z axis; (c, d) cinematic volume rendering technique

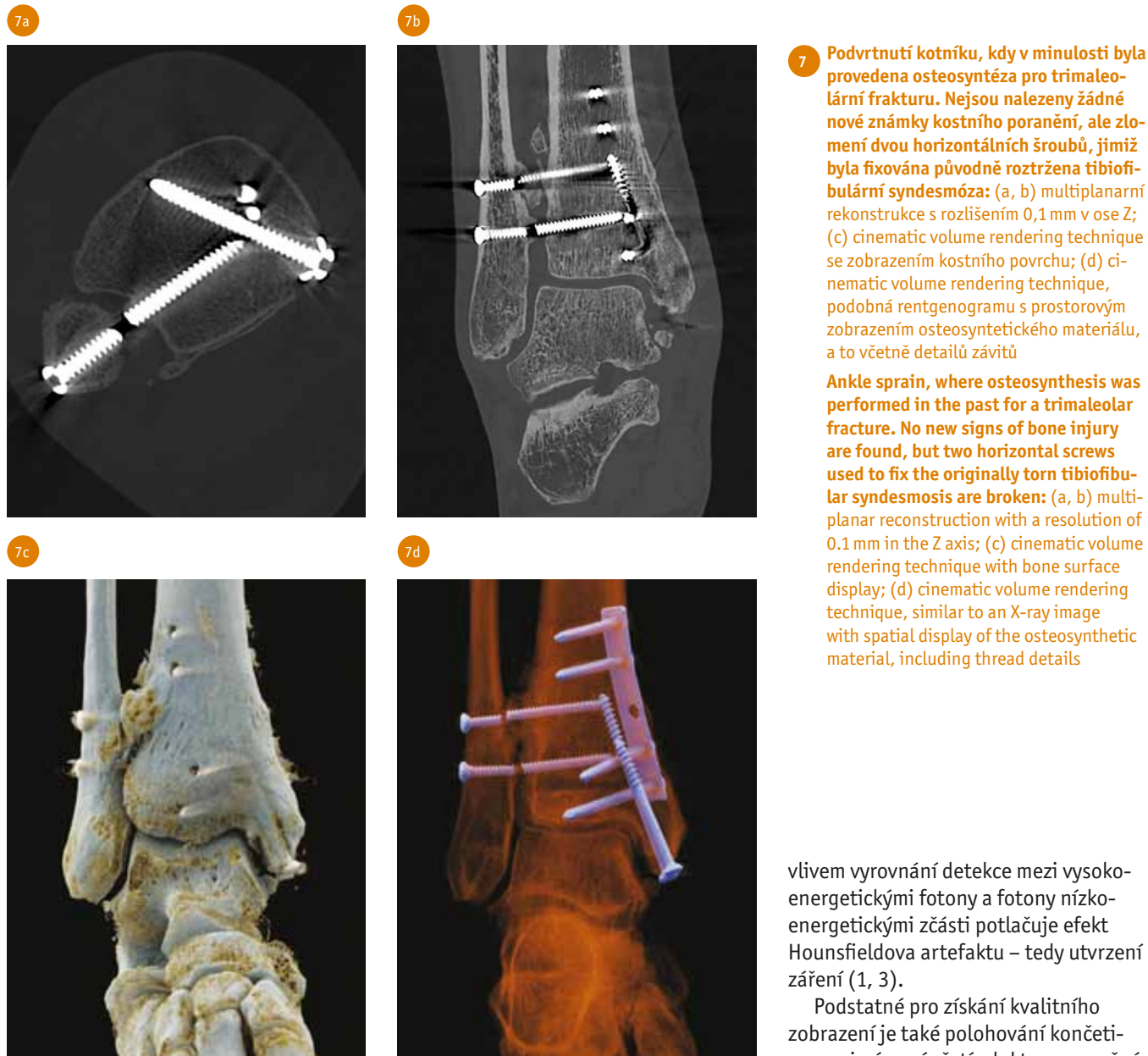
v architektuře spongiózní kosti a také zjistit jemné lomné linie. Vysoké prostorové rozlišení navíc přispívá kromě hodnocení architektury kostní trámčiny také k tomu, že je možné identifikovat i velmi drobné kostní úlomky a jejich přítomnost mezi vrstvami chrupavky v prostoru kloubní štěrbiny. Významné zlepšení diagnostiky prostorového uspořádání fragmentů a intraartikulárních kostních úlomků přispívá k lepší adaptaci zlomeniny při fixaci a tím dochází ke snížení možnosti sekundárního poškození kloubní chrupavky v dalším období. Znalost polohy jednotlivých fragmentů přispívá i ke zlepšení procesu plánování fixace zlomenin osteosyntézou a také následně k hodnocení perimetalické kostní tkáně (5).

Rozlišovací schopnosti vyšetření jsou založené u photon-counting systémů na mimořádném rozlišení v prostoru současně s vysokou efektivitou zachycení fotonů, kdy i u nízkých energií je senzitivita detektoru velmi vysoká. Výsledná akvizice dat zahrnuje tedy datové stopy od 0,2 mm současně s minimální hladinou šumu. Šum je navíc dán pouze rozptylem koherentním nebo Comptonovým, nikoliv elektronickým šumem detektoru, protože registrace kvant fotonů záření X je až nad úrovní šumu detektoru. Tyto faktory přispívají k mimořádné kvalitě zobrazení nezávisle na přítomnosti sádrové fixace. Vysoké rozlišení navíc dovoluje zobrazit i kovové materiály, a to včetně jejich detailů. Proto jde o vyšetření, které dovoluje posoudit velmi dobře i selhání osteosyntézy a zobrazení okolní kostní tkáně. V tomto případě je významné, že



Graf 1. Spektrum vyšetření kloubů

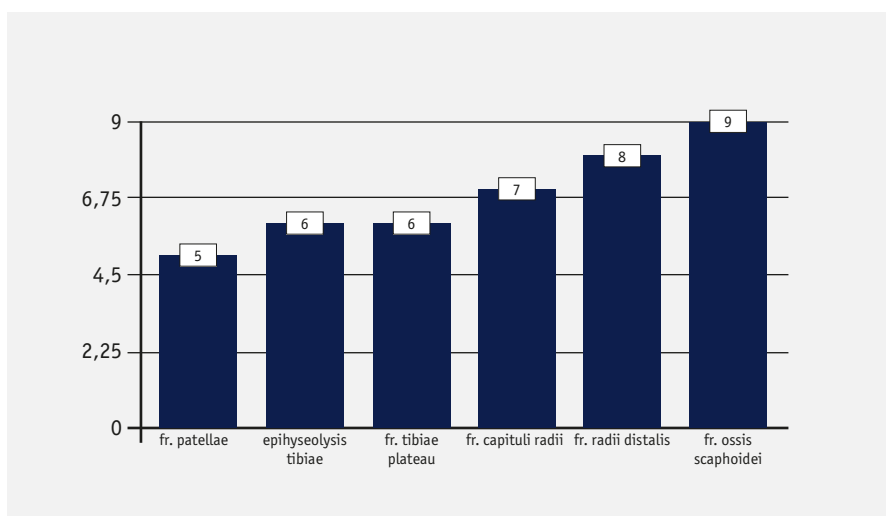
Graph 1. Spectrum of the joint examinations



vlivem vyrovnání detekce mezi vysokoenergetickými fotony a fotony nízkoenergetickými zčásti potlačuje efekt Hounsfieldova artefaktu – tedy utvrzení záření (1, 3).

Podstatné pro získání kvalitního zobrazení je také polohování končetiny – zejména zápěstí a lokte v co možná nejvíce axiální poloze vzhledem k ose Z. Tím je možné potlačit nepříznivý vliv šikmé projekce, kdy v rovině průchodu záření X je nejvyšší absorpce, např. loketní nebo vřetenní kost uložená v rovině gantry. U takové polohy horní končetiny hrozí asymetrie absorpce záření s projevy vyšší atenuace v rovině, kde je zachycená kompaktní dlouhá kost v celé linii průchodu primárního svazku, tedy na spojnici LOR (line of response).

Dalším významným faktorem pro prostorové rozlišení je správná volba pole rekonstrukce hrubých dat, tedy field of view (FOV) rekonstrukce. Správná adaptace jen na rozsah nezbytně nutné rekonstrukce podstatným způsobem zvyšuje prostorové rozlišení v základní příčné rovině, u takto malého pole u kloubů nehraje zase tak podstatnou roli zvyšování matrice. Využíváme matrice 512 × 512 bodů, která je dostatečná. Vyšší matrice neposkytují



Graf 2. Nejčastější poranění

Graph 2. The most frequent injuries

u periferních kloubů až tak zásadní zlepšení zobrazení. Pokud by bylo třeba zobrazit velmi jemnou linii lomu, pak je možné tuto rekonstrukci použít *ex post*, ale většina linií lomů neprochází v základní orientaci v ploše základní roviny CT obrazu.

Hlavní faktor, který dovoluje zobrazení velmi jemných struktur, je však výše uvedený detektorový element poskytující datovou stopu o šíři 0,2 mm. V rekonstrukci dat je podstatným faktorem docílení co možná nejlepšího rozlišení v ose Z a plynulost linií bez schodovitých artefaktů (6, 7). Této plynulosti se docílí v překryvu rekonstruovaných obrazů o polovinu, kdy je možné získat rozlišení 0,1 mm v prostoru. Podobně významným faktorem při posuzování jemných detailů struktur, které se velmi zásadně liší svojí intenzitou (kostní dřev a kostní trabekul nebo kovový materiál a kost, kdy rozdíly denzit jsou 500 a více Hounsfieldových jednotek), je rekonstrukční algoritmus – kernel. Volba vysokofrekvenčního algoritmu s hodnotami nad 70 významně zvyšuje možnosti odlišení jemných linií lomu nebo strukturální změny spongiózy (7). Vysoké rozlišení strukturálních změn na povrchu kosti je pak velmi dobře využitelné i v trojrozměrném zobrazení jednotlivých kloubů, ale i po separaci jednotlivých kostí. Trojrozměrná rekonstrukce pomocí VRT (volume rendering technique) nebo v její podobě cinematic VRT přispívají

k lepší kvalitě dokumentace a také demonstují lépe prostorové vztahy a průběh linií nebo charakter poškození kloubních povrchů kostí.

Jednou z podstatných výhod photon-counting technologie je použití spektrální analýzy materiálového složení tkání. Pokud je použita akvizice ultra-vysokého rozlišení s využitím registrace dat jedním každým elementem velikosti 0,2 mm, pak jsou spektrální informace obsaženy v datech registrovaných v klastrech 2×2 elementy. Poté je každý z elementů využit k posouzení absorpce v jednom ze čtyř energetických intervalů. Spektrální analýzu je možné využít k několika možným způsobům hodnocení tkání. Pro zobrazení skeletu samotného přispívají monoenergetické obrazy s hodnotou energie 40–50 keV k lepší prostorové rekonstrukci povrchu kosti u nezralého skeletu dětí (8). U měkkých tkání je výhodné použít vysokých energií záření, a to včetně nejvyšší možné úrovně monoenergetického zobrazení v energii 190 keV, kdy se zvyšuje denzitní rozlišení tkání s vysokým podílem kolagenu – tedy šlach, ligament, nebo vazivová a zčásti i hyalinní chrupavky, dále krevních koagul s přítomností fibrinu a hemoglobinu – ve srovnání se svalovou tkání nebo tukem (9). Toho lze využít v zobrazení měkkých tkání kolem kloubů – šlachového úponu patelly (ligamentum patellae), Achillovy šlachy, ale i nitrokloubních struktur kolene,

tj. vazů zkřížených nebo menisků, eventuálně i vrstvy hyalinní chrupavky. Monoenergetická zobrazení ve vyšších energiích zobrazují rovněž lépe kontuze kostní dřevě v spongiózní kosti. Kromě jiného je pomocí spektrální analýzy možné zlepšit možnosti hodnocení okolních tkání kolem kovových materiálů, protože u vyšších energií monoenergetického zobrazení se snižuje vliv Hounsfieldova artefaktu.

ZÁVĚR

Photon-counting technologie výpočetní tomografie zásadním způsobem rozšiřuje kvalitu diagnostiky v indikacích akutních zobrazení kloubů. Hlavními výhodami je mimořádně vysoké prostorové rozlišení současně s možností rozšířit způsoby hodnocení i o posuzování měkkých tkání s vyšší přesností a rozlišením. Současné indikace k CT vyšetření, které zahrnují nitrokloubní zasahující zlomeniny a složité zlomeniny z hlediska anatomie kloubu nebo polohy fragmentů anebo zobrazení jinak obtížně diferencovatelných fraktur, zvyšují prostřednictvím PCCT diagnostickou přesnost CT, ale současně kladou vyšší nároky na preciznost vyšetření z hlediska akvizice a rekonstrukce dat radiologickým asistentem a současně vyšší nároky na hodnocení a postprocessing radiologem (10). ●

LITERATURA

1. Flohr T, Petersilka M, Henning A, Ulzheimer S, Ferda J, Schmidt B. Photon-counting CT review. *Phys Med*. 2020; 79: 126–136.
2. Al-Haj Husain A, Mergen V, Sandhu S, Wagner MEH, Demmert TT, Alkadhi H, Burian E, Flohr T, Stadlinger B, Kessler P, Lie SAN, Essig H. Postoperative assessment of fracture reduction and osteosynthesis materials using photon-counting detector CT in maxillofacial trauma – a pilot study. *Oral Maxillofac Surg*. 2025; 29(1): 171. doi:10.1007/s10006-025-01470-z. PMID: 41073793; PMCID: PMC12513973.
3. Ruetters M, Mertens C, Gehrig H, Sen S, Kim TS, Schlemmer HP, Schoenberg S, Froelich M, Kachelrieß M, Sawall S. Dental photon-counting computed tomography for the assessment of Peri-Implant structures. *Int J Implant Dent*. 2025; 11(1): 51. doi:10.1186/s40729-025-00640-8. PMID: 40782315; PMCID: PMC12335417.
4. Ahmad MI, Liu L, Sheikh A, Nicolaou S. The role of musculoskeletal radiologists in emergency and trauma settings: current and emerging imaging modalities. *BJR Open* 2025; 7(1): tzaf025. doi:10.1093/bjro/tzaf025. PMID:41185647; PMCID: PMC12579983.
5. Ma Y, Su D, Yang S, Miao Q, Bai Z, Li Y, Du Y, Liu J, Li F, Yang X. Photon-counting detector CT for bone defect repair: Unveiling the impact of pore size on osseointegration and the advantage over traditional imaging. *Comput Biol Med*. 2025; 196(Pt B): 110881. doi:10.1016/j.combiomed.2025.110881 [Epub 2025 Aug 2]. PMID: 40753952.
6. Quintiens J, Morren T, Coudyzer W, van Lenthe GH. Anisotropic mechanical characterization of trabecular bone with linear and non-linear voxel-based finite elements from photon-counting CT. *Bone* 2025; 202: 117683. doi:10.1016/j.bone.2025.117683 [Epub ahead of print]. PMID: 41092994.
7. Toft Nielsen C, Boesen M, Henriksen M, Nybing JU, Bardenfleth SW, Rasmussen CK, Brejnbøl MW, Poulsen AS, Aljuboori SM, Bunyoz KI, Overgaard S, Troelsen A, Bliddal H, Gudbergesen H, Müller F. Agreement between in vivo and ex vivo photon-counting CT measurements of subchondral trabecular bone features in patients with knee osteoarthritis. *Eur Radiol*. 2025 Aug 27. doi:10.1007/s00330-025-11948-9 [Epub ahead of print]. PMID: 40864253.
8. Pasadyn FL, El-Ali AM. Photon-Counting CT in Children: A Literature Review. *J Comput Assist Tomogr*. 2025 Oct 2. doi:10.1097/RCT.0000000000001810 [Epub ahead of print]. PMID: 41052315.
9. Zijta FM, Truyens A, Weijers RE, Wildberger JE, Emans PJ, Flohr T. The emerging role of photon-counting detector CT: primary experience on the integrated assessment of acute knee injuries. *Eur Radiol Exp*. 2025; 9(1): 71. doi:10.1186/s41747-025-00616-8. PMID: 40783626; PMCID: PMC12335411.
10. El Sadaney AO, Ferrero A, Rajendran K, Booi R, Marcus R, Sutter R, Oei EHG, Baffour F. Photon-counting detector CT in musculoskeletal imaging: benefits and outlook. *Br J Radiol*. 2025; tqaf124. doi:10.1093/bjr/tqaf124 [Epub ahead of print]. PMID: 40478664.