

3D tisk v ortopedii a traumatologii pohybového aparátu

Tomáš Novotný

Metody 3D tisku přinesly do ortopedie čtyři zcela inovativní technologické směry, které začíná tento obor testovat, používat, následně evaluovat a také kriticky hodnotit. Těmito směry jsou a) pro pacienta specifické instrumentace, b) pro pacienta specifické implantáty, c) úprava povrchových a strukturálních vlastností konvenčních implantátů, d) biomedicínské modely. Každý z výše uvedených směrů by se mohl uplatnit, a v jistém ohledu se i uplatní, bez 3D tisku. Tento technologický postup umožňuje zjednodušit po desetiletí aplikované postupy povrchové úpravy materiálů jejich frézováním či jiným zevním modelováním.

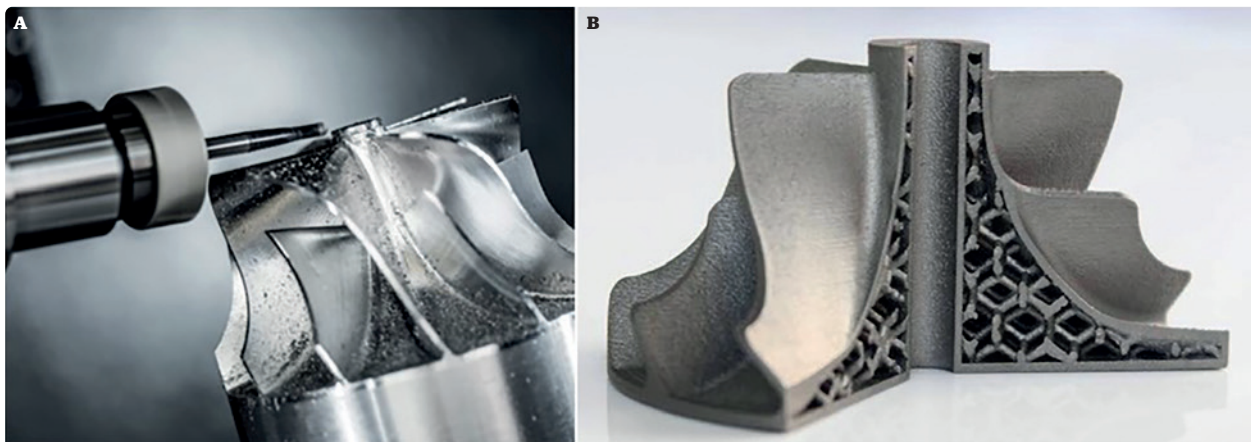
Jako příklad této změny v úvaze o využitelnosti 3D tisku lze použít rozdíl v konstrukci kovové turbíny metodou specializovaného obrábění kovů a výrobu podobného zařízení 3D tiskem z kovového prachu (**obr. 1 A, B**). Každá konstrukční metoda dodává výslednému produktu určité spektrum vlastností, z nichž některé mohou najít uplatnění nejen v implantologii náhrad velkých kloubů, ale i v předoperačním plánování či zpřesnění operačních technik. Tento článek rozebírá možnosti a benefity technologie 3D tisku pro obor ortopedie a traumatologie pohybového aparátu a evaluuje jejich přidanou hodnotu pro běžnou praxi tak, jak se nám je daří na našich pracovištích implementovat.

Historie

Již příklad vnitřního uspořádání turbíny vyrobené 3D tiskem z úvodní části

článku v nás může do určité míry evokovat kostní trámčinu. Právě možnost konstrukce homogenní trabekulární struktury, která by mohla imitovat ultrastrukturu kosti, byla v centru zájmu výzkumných skupin zabývajících se 3D tiskem v ortopedii od samotného počátku. První publikace na toto téma, vznikající kolem roku 2000, představují konstrukci biokompatibilních a biodegradabilních 3D tištěných struktur s potenciálem pro prorůstání sousední tkáně.¹ Ve stejné době je publikována aplikace těchto 3D formovaných vrstev na povrchy kloubních implantátů ke zjednodušení jejich osteointegrace s kostní tkání příjemce.² Je zde tedy diskutována možnost dalšího typu biologické fixace implantátu oproti jinak již běžně používaným necementovaným kloubním implantátům s minerálními nástrčky či s jinou formou fyzikální úpravy svého povrchu. Tvorba definované prostorové sítě

byla, kromě snahy o docílení podobnosti v konstrukci 3D tištěných kostních modelů, využita také ke konstrukci scaffoldů – pomyslných podpůrných lešení pro buňky při regeneraci kloubních chrupavčitých povrchů.³ Významným vývojovým krokem technologického výzkumu se stala povrchová úprava ortopedických implantátů tiskem trabekulární sítě z titanového prachu.⁴ Právě tato metoda přetrvává a je pro svou příznivou kombinaci biologických a fyzikálních vlastností dále zkoumána a rozšiřována dodnes. Stálou optimalizací prochází i mikrostruktura trabekulární sítě, její rozměry, nebo koncová úprava ultrastruktury jejího kovového povrchu. Rozvoj 3D tisku kovových implantátů byl od počátku technologicky velmi náročný a jeho praktická využitelnost vycházela z nutnosti rozvoje nových, ekonomických a technicky dostupnějších 3D tiskových metod. Teprve v roce 1996



Obr. 1 (A) Konstrukce turbíny obráběním kovu. (B) Konstrukce turbíny metodou 3D tisku, kde je kromě shodného zevního tvaru patrná i komplexní vnitřní struktura

Zdroj: A - www.mettechnik.cz; B - www.mkmuses.com

byla nejprve představena metoda Selective laser melting (SLM) a následně v roce 2002 Electron beam melting (EBM). Tyto technologie se po svém rozšíření staly standardem v možnosti konstrukce kovových implantátů a používají se dodnes. Technologicky a ekonomicky jednodušší tisk plastových modelů vedl k rozvoji možností jejich použití při konstrukci šablon pro osteotomie či cílení při zavádění šroubů a drátů v průběhu ortopedických operací na podkladě výpočtů a konstrukcí z předoperačního plánování a zobrazování.⁵ Větší rozšíření, lepší dostupnost, nižší cena a také sdílení technologií a softwaru napříč komunitou 3D tisku dále vedly k nárůstu popularity 3D tištěných biologických modelů pro předoperační plánování. V některých oborech medicíny se tato verze předoperační přípravy stává již zlatým standardem a také v české ortopedii je tento postup aplikován, zejména před rekonstrukčními operacemi skeletu, v tumorózní ortopedii či při složitých a atypických anatomických dispozicích pacienta.⁶

Využití metody 3D tisku v ortopedii

Na experimentální úrovni má 3D tisk nepřeberné množství možných aplikací. V aktuální praxi jak v České republice, tak i ve světě se v ortopedii setkáváme se čtyřmi hlavními způsoby jeho využívání.

1. Pro pacienty specifické instrumentace;
2. 3D tisk biomedicínských modelů pro předoperační plánování či výuku;
3. 3D tisk povrchů konvenčních ortopedických implantátů;
4. Pro pacienty specifické implantáty.

Pro pacienty specifické instrumentace (Patient Specific Instrumentation – PSI)

Pro pacienta specifické instrumentace byly jednou z prvních použitých aplikací 3D tisku v ortopedii, při kterých byla podle předem provedené zobrazovací metody (nejčastěji výpočetní tomografie) 3D tiskem vyrobena forma pro výrobu implantátu. Tuto kategorii z aktuálně používaných reprezentují zejména šablony pro osteotomie, šablony pro resekce kloubních povrchů při implantaci endoprotéz a šablony pro cílení osteosyntetického materiálu vzniklé na podkladě předchozího plánování zobrazovacích metod. Všechny tyto metody nemají aktuálně jasné nastaveny úhradové mechanismy z veřejného zdravotního pojištění. Šablony pro korekční osteotomie (obr. 2) jsou stále více využívány v rekonstrukční chirurgii. Po předchozím zobrazení, nejčastěji CT či MRI, je vytvořen model kosti, na které bude provedena osteotomie, a poté je buď samotným chirurgem, bioinženýrem, popřípadě

za použití speciálních plánovacích softwarů pro osteotomie, naplánována konstrukce speciální šablony pro vhodné vedení linie osteotomie. V našich podmínkách je aplikace této metody běžná například v maxilofaciální chirurgii, v české ortopedii jsou průkopníky této metody někteří specialisté v chirurgii ruky a nohy, kteří referují pro tuto metodu vynikající výsledky. Pro některé aplikace nepřináší světová evidence převratné výsledky, jako je tomu například u korekčních osteotomií kolem kolenního kloubu, kde studie nedokumentují rozdíl v krátkodobých a dlouhodobých výsledcích mezi PSI a zkušeným operatorem.⁷

Dalším příkladem použití pro pacienty specifické instrumentace jsou resekční šablony pro resekci kloubních ploch u endoprotéz velkých kloubů (obr. 3). Tyto individualizované resekční šablony jsou ve velké míře připraveny dodavatelem implantátu na základě provedené zobrazovací metody. Také pro tuto metodu má evidence zatím rozporuplné výsledky, jak uvádí studie z roku 2022, která neshledává žádný rozdíl v krátkodobých a dlouhodobých výsledcích v registru 2277 pacientů.⁸ Do budoucna se dá předpokládat nahrazení této metody sofistikovanou počítačovou navigací či virtuální realitou, které dokážou lépe zhodnotit dynamické parametry lidského těla, jež jsou právě u implantací endoprotéz kolenního kloubu rozhodujícím faktorem vedoucím k pooperační spokojenosti pacientů.



Obr. 2 Příklad pro pacienty specifické instrumentace

Zdroj: IPS Implants®, KLS Martin Group

3D tisk biomedicínských modelů pro předoperační plánování či výkonu

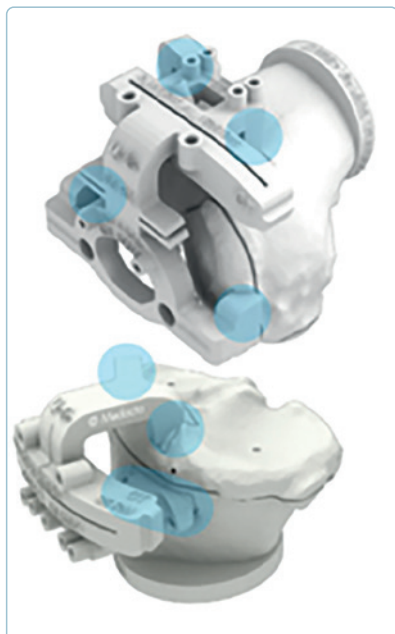
Tento směr 3D tisku nyní zažívá v našich podmínkách velký rozmach. S použitím některé z vícerozměrových zobrazovacích metod za pomoci speciálních softwarů je možné vytvořit model intervenovaného skeletu

a ten následně vytisknout. Na rozdíl od ostatních aplikací uvedených v tomto článku je technologie pro tisk modelů relativně dostupná, a tedy i častěji prováděná v prostředí jednotlivých pracovišť. Aktuálně pouze několik nemocnic v České republice disponuje vlastní laboratoří pro 3D tisk, která by tento proces pro lékaře zprístupnila a modely za ně připravila. Tento systém je běžný v zahraničí, kde panuje logický algoritmus, při kterém lékař léčí a inženýr zajišťuje technickou podporu. V našich podmínkách se často jedná o „volnočasovou aktivitu“ technicky zdatných operatérů. Stejně jako jiné metody 3D tisku nemá ani použití modelů pro předoperační plánování v našich podmínkách nastaveny úhradové mechanismy, a dokonce ani legislativní rámec. Do budoucna

bude bezpodmínečně nutné zabývat se otázkou GDPR při tisku částí těl, otázkou jejich skladování, likvidace či jen formou souhlasu pacienta s tímto „externím zhmotněním“ jeho části. Přes všechny tyto nejasnosti je však patrné, že použití 3D tisku pro modely předoperačního plánování bude mít do rozvoje plnohodnotného virtuálního prostředí své místo v manuální (myšleno nepřístrojové) chirurgii. Aplikace, pro které může být použit 3D tisk modelů skeletu v ortopedii, jsou například situace s rozsáhlou periprotetickou (obr. 4) či tumorózní destrukcí skeletu (obr. 5), nebo cysty či zlomeniny. Na rozdíl od PSI, které byly popsány v předchozím odstavci, je pro používání biomedicínských modelů evidence podstatně příznivější – studie z roku 2021 uvádí při jeho použití následnou optimalizaci operačního času a snížení krevních ztrát.⁹

3D tisk povrchů konvenčních ortopedických implantátů

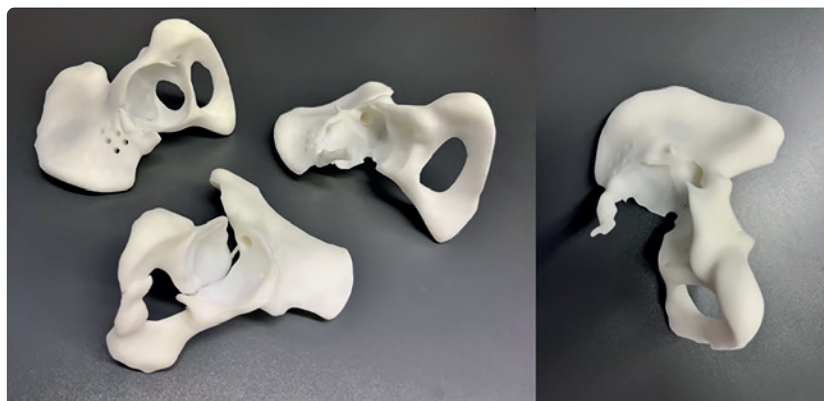
Řada firem endoprotetické kloubní industrie ve svém portfoliu nabízí konfekční implantáty různých velikostí a tvarů, které mají na svém povrchu, nebo i v celém rozsahu struktury vyrobené metodou 3D tisku. Většinou tomu tak je z důvodu dosažení co nejlepší osteointegrace implantátů, a to zejména u implantátů revizní endoprotetiky, kde již předem počítáme s určitou mírou ztráty objemu či vitality



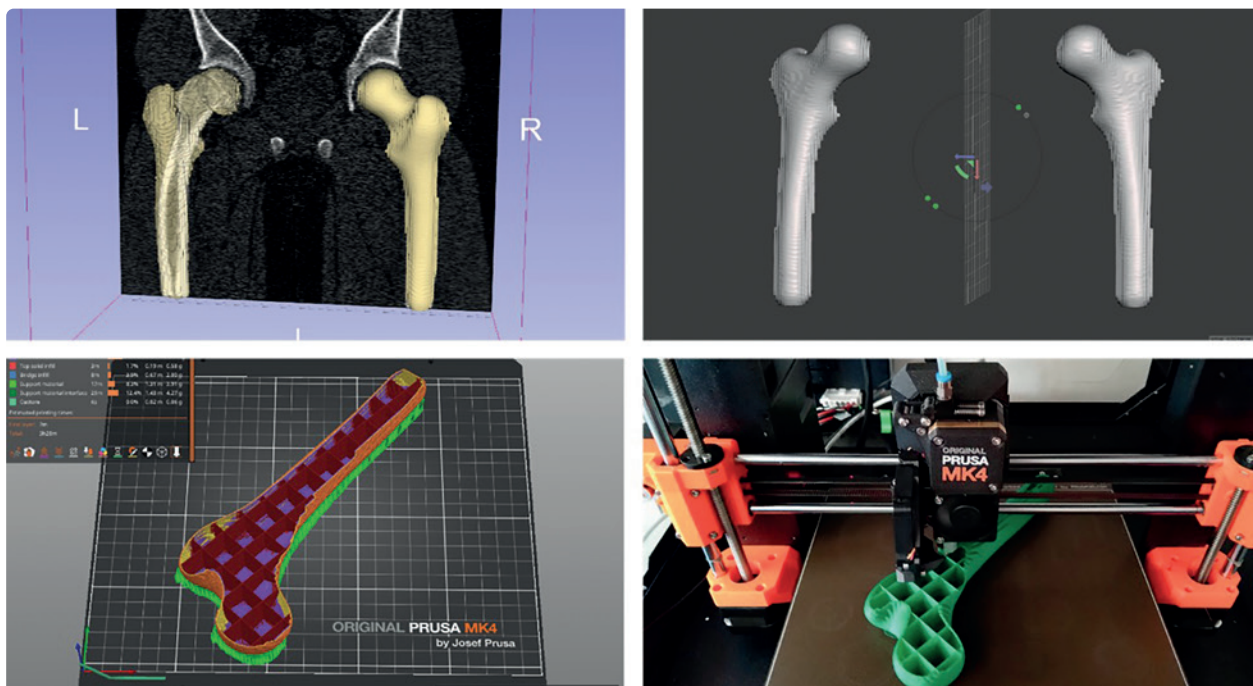
Obr. 3 Příklad pro pacienty specifické instrumentace pro TEP kolenního kloubu

TEP – totální endoprotéza

Zdroj: Medacta International SA



Obr. 4 Příklad biomedicínských modelů pánve s periprotetickou destrukcí skeletu (Ortopedická klinika FZS UJEP a MNUL)



Obr. 5 Ukázka zpracování biomedicínských modelů femurů u pacienta s chronickou epifyzeolýzou proximálně vlevo před provedením osteotomie (Ortopedická klinika FZS UJEP a MNUL)

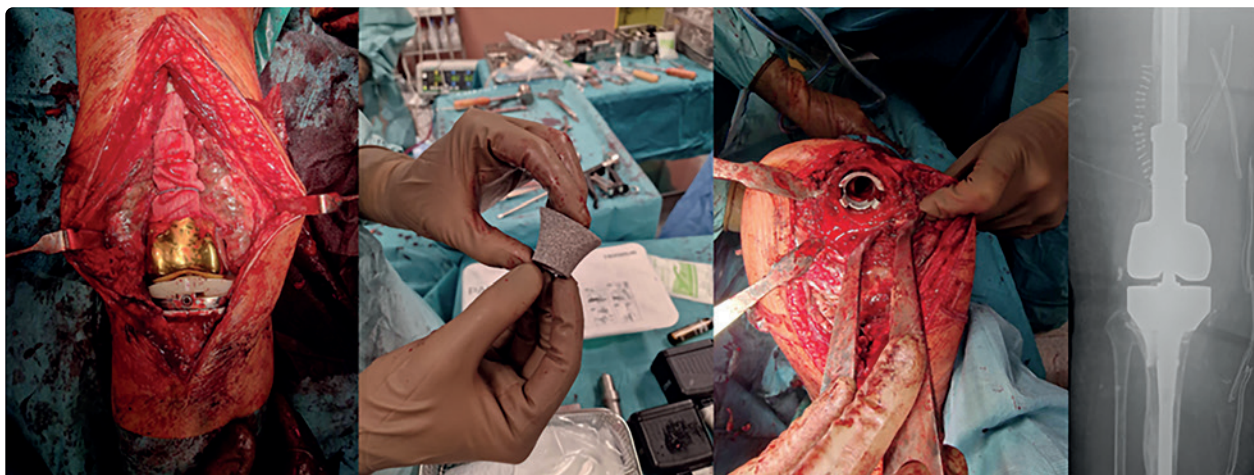
skeletu. Z trabekulárních komponent se jedná zejména o různé augmen-
tační systémy, popřípadě přídatné
fixační systémy revizních komponent
(obr. 6). K dispozici jsou již i konven-
ční implantáty, které mají osteointegra-
ční plochu standardně připravenou
do trabekulárního uspořádání 3D tis-
kem (obr. 7). Právě inovace místa kon-
taktu lidského těla s implantátem bude
v následujících letech velmi důležitým

krokem pro dosažení rovnováhy mezi
osteokondukční a antibakteriální vlast-
ností jejich povrchů. 3D tisk implant-
átů dovede být ve svých detailech již
natolik precizní, že svými hranami či
velikostí otvorů trabekulární struktury
dovede působit například nepříjemně
na vznikající bakteriální biofilm, nebo
naopak atraktivně pro osteoblasty
kostního lůžka pro implantát hostite-
le. Do budoucna bude povrch daleko

více ovlivňován speciálními biologickými a fyzikálně aktivními povrchy, což
by mohlo znamenat revoluci a přinést
řadu řešení v kloubní implantologii.

Pro pacienty specifické implantáty

Pro pacienta specifické implantáty aktuálně vstupují do běžného použití



Obr. 6 Použití trabekulární fixační tibiální komponenty při použití tumorózní/revizní náhrady kolenního kloubu (Ortopedická klinika FZS UJEP a MNUL)



Obr. 7 Ukázka trabekulárního uspořádání konfekční revizní acetabulární komponenty a ultrastrukturální obraz tohoto povrchu (AESCULAP® Plasmafit®)

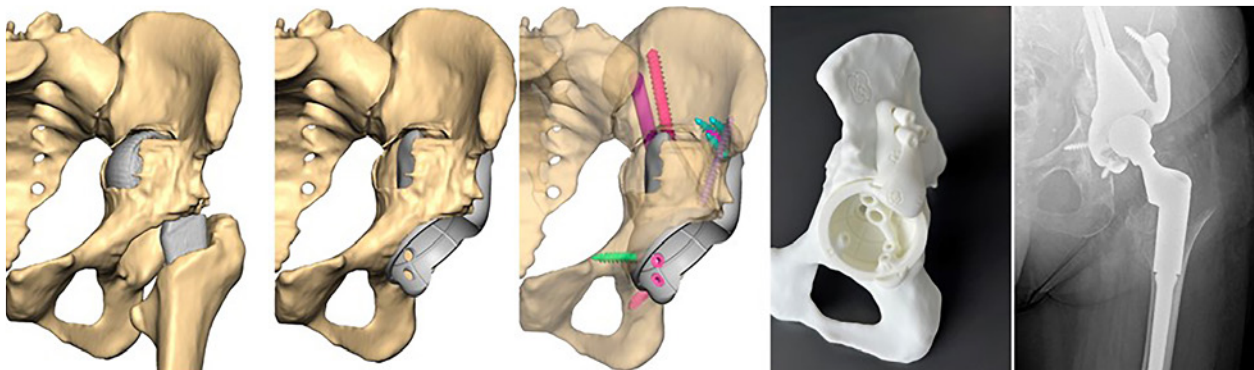
u složitých ortopedických případů se ztrátou skeletu. Vzhledem k předpokladu celosvětového nárůstu počtu primoinplantací v následujících desetiletích až o stovky procent a z toho matematicky vyplývajícího počtu nutných revizí v letech následujících se dá očekávat nárůst počtu případů s rozsáhlou destrukcí skeletu, a to i u mladších pacientů. S vyšším průměrným dožitím v populaci bude postupně upouštěno od paliativních avitálních postupů. Jako alternativa k metodám s použitím spongioplastik, které mají své limity a v některých zemích světa i limity legislativní, bude docházet k rozvoji implantátů konstruovaných specificky pro pacienta (obr. 8, 9). Tyto implantáty se sofistikovanými trabekulárními či antibakteriálními povrchy usnadní konsolidaci rozsáhlých defektů skeletu při zachování možnosti časnější mobilizace, vertikalizace a zatěžování postižených

končetin v konsenzu s evidencí o jejich nenahraditelnosti v pooperační adaptaci tkání i celého organismu. Na základě plánování zobrazovacích metod jsou vyráběny na míru pacientovi složité a často objemné implantáty s možností inovativních biologických a fyzikálních vlastností. Zásadním limitem zůstávají cena a míra komplikací přiměřené rozsáhlým skeletálním operacím. Použití těchto nákladných postupů musí být vždy pečlivě uváženo vzhledem k biologickému potenciálu pacienta. U nenádorového použití je vždy dotazována pojišťovna pacienta s žádostí o zvýšenou úhradu. Na našem pracovišti se na problematiku pokročilých pánevních defektů specializujeme a vzhledem k postupně narůstající centraci jsme za poslední dva roky již odoperovali 16 pacientů. U všech bylo docíleno vertikalizace (u některých i po několikaměsíční neschopnosti chůze) a u žádného nebyla

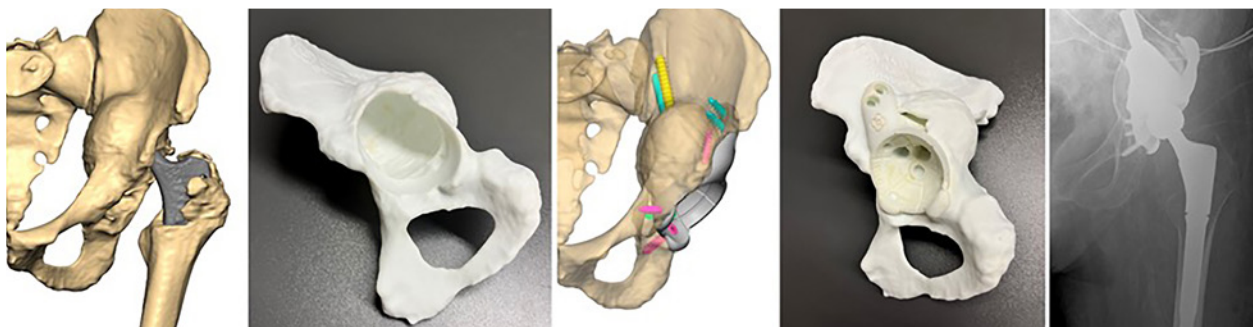
potřeba revizní operace. **Obrázek 10** prezentuje našeho posledního a zároveň doposud k reoperaci nejsložitějšího pacienta. Individuálně mohou být na míru vyráběny i drobné implantáty, jako jsou dlahy, šrouby či drobné kosti nohy a ruky.

Závěr

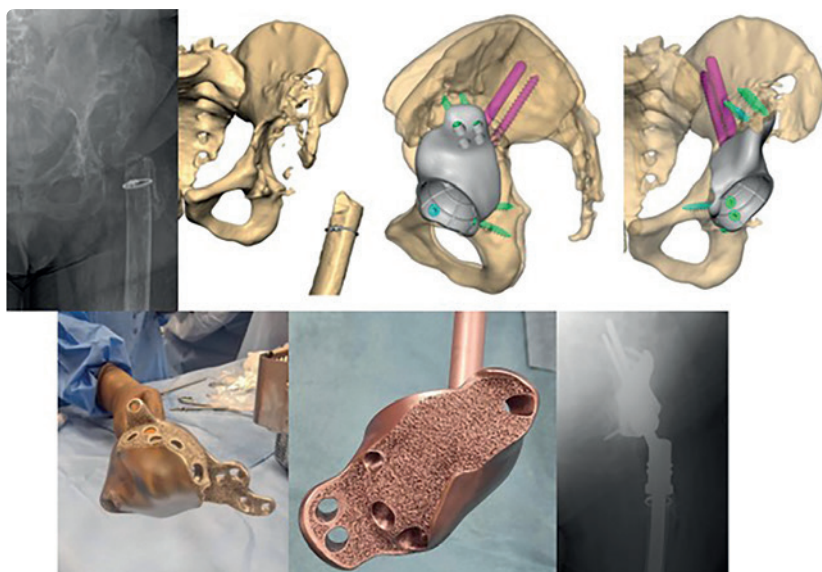
Rozvoj 3D tisku tak, jak ho sledujeme za poslední tři desetiletí, přinesl pro obor ortopedie a traumatologie pohybového aparátu řadu nových možností. Některé aplikace, jako jsou metody individualizovaných šablon pro rekonstrukční chirurgii, resekčních šablon pro endoprotetiku či biomedicinských modelů tištěných místo rentgenového snímku přímo na sál, zřejmě budou v budoucnu technologicky překonány metodami dynamickými, jako je virtuální realita a pokročilé navigační



Obr. 8 Předoperační plánování, návrh, konstrukce a implantace pro pacienta specifického implantátu k řešení rozsáhlé destrukce skeletu pánve s protruzí původního implantátu (Ortopedická klinika FZS UJEP a MNUL)



Obr. 9 Předoperační plánování, návrh, konstrukce a implantace pro pacienta specifického implantátu k řešení rozsáhlé destrukce skeletu pánve s protruzí původního implantátu (Ortopedická klinika FZS UJEP a MNUL)



Obr. 10 Předoperační plánování, návrh, konstrukce a implantace pro pacienta specifického implantátu k řešení rozsáhlé destrukce skeletu pánve s protruzí původního implantátu (Ortopedická klinika FZS UJEP a MNUL)

technologie umělé inteligence. Avšak dokud budou používány jako implantáty cizorodé materiály, bude 3D tisk přinášet možnost modifikovat nejen jejich vnitřní uspořádání, ale i povrch. Vývoj a inovace trabekulárních systémů se budou snažit přijít se strukturou, která bude dobře interagovat se skeletem pacienta a na druhou stranu umožní aktivně modifikovat složení biofilmu na povrchu implantátu, a tím redukovat riziko časných i pozdních infekcí a jejich komplikací.

MUDr. Tomáš Novotný, Ph.D., MBA

Ortopedická klinika
Fakulty zdravotnických studií
Univerzity J. E. Purkyně v Ústí nad Labem
a Krajské zdravotní, a.s. – Masarykovy
nemocnice v Ústí nad Labem, o.z.
E-mail: tomas.novotny@kzcr.eu

Literatura

1. Cooke MN, Fisher JP, Dean D, et al. Use of stereolithography to manufacture critical-sized 3D biodegradable scaffolds for bone ingrowth. J Biomed Mater Res B Appl Biomater 2003;64:65–69. doi: 10.1002/jbm.b.10485. PMID: 12516080.
2. Curodeau A, Sachs E, Caldarise S. Design and fabrication of cast orthopedic implants with freeform surface textures from 3-D printed ceramic shell. J Biomed Mater Res 2000;53:525–535. doi: 10.1002/1097-4636(200009)53:5<525::aid-jbm12>3.0.co;2-1. PMID: 10984701.
3. Bekkers JE, Tsuchida AI, Malda J, et al. Quality of scaffold fixation in a human cadaver knee model. Osteoarthritis Cartilage 2010;18:266–272. doi: 10.1016/j.joca.2009.09.001. Epub 2009 Sep 22. PMID: 19800999.
4. Basalah A, Shanjani Y, Esmaeili S, Toyserkani E. Characterizations of additive manufactured porous titanium implants. J Biomed Mater Res B Appl Biomater 2012;100:1970–1979. doi: 10.1002/jbm.b.32764. Epub 2012 Aug 2. PMID: 22865677.
5. Fu M, Lin L, Kong X, et al. Construction and accuracy assessment of patient-specific biocompatible drill template for cervical anterior transpedicular screw (ATPS) insertion: an in vitro study. PLoS One 2013;8:e53580. doi: 10.1371/journal.pone.0053580. Epub 2013 Jan 10. PMID: 23326461; PMCID: PMC3542371.
6. Starosolski ZA, Kan JH, Rosenfeld SD, et al. Application of 3-D printing (rapid prototyping) for creating physical models of pediatric orthopedic disorders. Pediatr Radiol 2014;44:216–221. doi: 10.1007/s00247-013-2788-9. Epub 2013 Nov 8. PMID: 24202430.
7. Abdelhameed MA, Yang CZ, AlMaeen BN, et al. No benefits of knee osteotomy patient's specific instrumentation in experienced surgeon hands. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc 2023;31:3133–3140. doi: 10.1007/s00167-022-07288-6. Epub 2022 Dec 20. PMID: 36538058.
8. Rudran B, Magill H, Ponugoti N, et al. Functional outcomes in patient specific instrumentation vs. conventional instrumentation for total knee arthroplasty: a systematic review and meta-analysis of prospective studies. BMC Musculoskelet Disord 2022;23:702. doi: 10.1186/s12891-022-05620-2. PMID: 35870913; PMCID: PMC9308296.
9. Segaran N, Saini G, Mayer JL, et al. Application of 3D Printing in Preoperative Planning. J Clin Med 2021;10:917. doi: 10.3390/jcm10050917. PMID: 33652844; PMCID: PMC7956651.