

Navigační techniky v chirurgii kranio-cervikálního přechodu a horní krční páteře

Navigation Techniques in Surgery of Cranio-Cervical Junction and Upper Cervical Spine

P. SUCHOMEL, J. HRADIL, R. FRÖLICH, P. BARSA, R. LUKÁŠ

Neurocentrum, Krajská nemocnice Liberec, a.s.

SUMMARY

Spinal navigation has substantially advanced during the past ten years. Surgeons have gained sufficient skills and confidence, and have introduced this technology to the anatomically challenging region of the upper cervical spine and craniocervical junction. The detailed evaluation of individual anatomy, rational pre-operative planning and final intraoperative control improve the safety and precision of classical surgical procedures.

As methods technologically evolve, indication criteria change accordingly, but the basic principles of a relevant choice remain; these are to reduce morbidity due to its three main causes, i.e., mechanical, neurological and vascular. We present an overview of current techniques and discuss their applicability in the region of the upper cervical spine and craniocervical junction. The systems allowing us to obtain "live" images intra-operatively, such as fluoroscopy or intraoperative CT, seem to be most versatile and accurate, especially when combined with "traditional" virtual navigation systems.

Based on case histories, the authors suggest trends in the development of this field, with a focus on minimally invasive techniques.

Key words: navigation, upper cervical spine, craniocervical junction.

ÚVOD

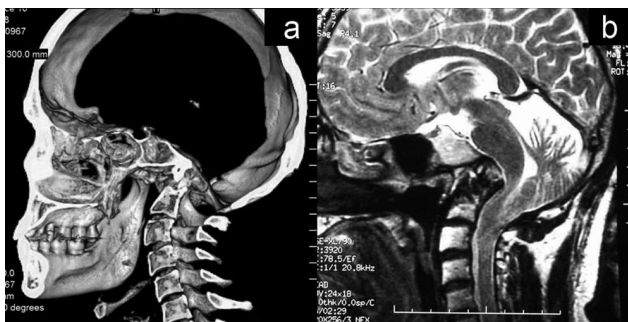
V posledních 10 letech došlo k výraznému rozvoji navigačních technologií pro spinální chirurgii. Způsobilé spíše experimentální metody se navigace stala prakticky použitelnou, a tím i skutečně využívanou. Kromě zlepšení kvality samotných přístrojů, jako je např. zrychlení a zjednodušení přípravy instrumentária k operačnímu výkonu, došlo k zásadní změně také v přístupu lékařů. S častějším používáním zejména virtuální navigace se dostavila dobrá znalost výhod i limitů této techniky a zanikla tak prvotní nedůvěra k pokročilé moderní metodice (tak charakteristická pro většinu operačních oborů). Lékaři získali jistotu jak při běžném použití navigačních přístrojů, tak v řešení problémových situací.

V delikátní oblasti horní krční páteře (HKP) a kranio-cervikálního přechodu (KCP) se navigační systémy prosadily se zřetelným odstupem za ostatními oblastmi páteře. Operační techniky jsou zde náročné na orientaci a přesnost. Přítomnost vitálně důležitých center spolu s unikátní anatomií vyžadují od operátora zkušenost a preciznost. Ačkoliv si operativa HKP a KCP přímo žádá o využití všech dostupných technických a technologických možností současné medicíny, prakticky je chirurg použije pouze pokud cítí, že jsou pro něj bezpečnou rutinní alternativou. Bez maximální jistoty při použití navigačních přístrojů se (právě pro velkou nebezpečí v případě chyby) raději spolehne výhradně na své vlastní smysly a zkušenost. To je pravděpodobně hlav-

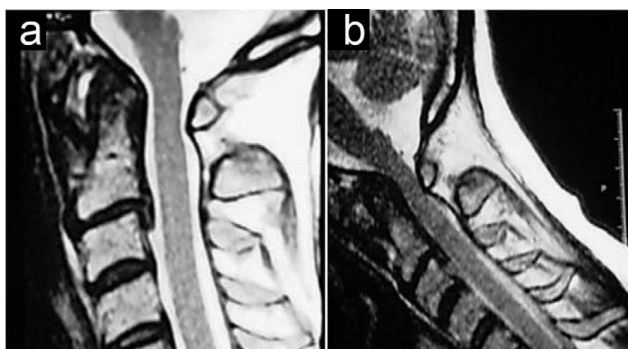
ní důvod poměrně opatrného vstupu navigace do z hlediska anatomie nejtěžší oblasti spinální chirurgie.

V literatuře bylo popsáno mnoho operačních technik pro oblast HKP a KCP (11, 18, 23, 28, 29, 30, 32). Současné postupy jsou dobře zavedené, s jasnými klady a zápory (31). Primárním přínosem navigace v oblasti HKP tak rozhodně není produkce revolučních operačních přístupů. Lze však očekávat zvýšení přesnosti a bezpečnosti stávajících procedur, a to nejen peroperační kontrolou provedení výkonu, ale především plánováním a úpravou přesného postupu dle individuální anatomie každého pacienta. Největší přínos je patrný u případů s komplexnější patologií, kde nemusí platit normální anatomické poměry a kde klasické fluoroskopické zobrazení ve dvou rovinách nezaručí potřebnou peroperační orientaci a jistotu.

Kromě výhod může rutinní využití navigace přinést i určitá negativa. Pokud má sloužit méně zkušeným lékařům k tomu, aby dosáhli na komplexnější operativu, pak se bezpečnostní benefit zcela ztrácí a naopak vznikají nová rizika. Největší hrozbou je vypuštění „klasické“ kontroly výkonu, což může vést k závažným poškozením pacienta. Jako i pro jiné technologie v medicíně, také zde platí často citované vyjádření Scotta D. Bode-na (34): „*The challenge and obligation of any new technology must be to solve an unsolved problem, enable the physician to perform an otherwise undoable task, or significantly facilitate the performance of a common task. We must all ensure that we do not encourage the triumph of technology over reason.*“



Obr. 1. Anomálie KCP na CT a MRI: platybázie, asimilace atlasu, komprese mozkového kmene, Chiariho malformace, a) 3D rekonstrukce na CT; b) T2-vážené MRI



Obr. 2. Dynamické sagitální MRI oblasti C1/2 odhalující kompresi míchy ve flexi krku; a) extenze, b) flexe

Většina expertů se shoduje na tom, že navigace představuje přidanou hodnotou ke schopnostem konkrétního lékaře, nikdy však nemá být náhradou jeho úsudku a zkušenosti.

V tomto duchu také navigace začínala v rámci svého mateřského oboru, kterým je neurochirurgie. Snaha dosáhnout hlubokých struktur mozku s minimálním tkáňovým poškozením a výborné předpoklady pro přesnou registraci vedly ke vzniku a dlouholetému rozvoji rámové stereotaxe. Nástup výkonné výpočetní techniky umožnil zcela zásadní kvalitativní změnu ve formě bezrámových systémů a teprve jejich pokročilé formy mohly být aplikovány na flexibilní a obtížně registrovatelnou oblast páteře (8). Zpočátku bylo spinální použití navigace přijímáno poněkud rozpačitě, avšak současné možnosti propojení s moderními zobrazovacími metodami (CT, MRI, izofluoroskopie) vedly k jejímu velkému rozšíření a přinášejí zcela nové obzory (12, 33). Správným výběrem metod a jejich kombinací je dnes ve spinální chirurgii možno zásadně redukovat všechny tři hlavní oblasti morbidit: neurologickou, vaskulární a mechanickou.

S rychlými technickými pokroky se mění i stanovení preferencí při výběru jednotlivých možností navigačních technik, výchozí body jsou však stále stejné: obecná povaha onemocnění, forma prováděného zákroku a přidružené faktory, jako jsou například dávka ionizujícího záření nebo délka a ergonomie provedení výko-

nu. Například excizi fixovaného tumoru je možné kontrolovat s pomocí rtg vyšetření provedeného před operací, ovšem ošetření dislokované zlomeniny či deformity může vyžadovat i opakovanou peroperační aktualizaci morfologických dat. Volba skutečně přínosné a efektivní metody navigace přitom nemusí být jednoznačná ani v jednom případě.

Cílem předkládaného sdělení je sumarizovat současné pohledy na možnosti využití navigačních technik pro oblast horní krční páteře.

ANATOMIE

Základem pro bezproblémový průběh operace je detailní znalost individuální anatomie. Klasické rtg snímky mohou odhalit jen hrubé anomálie a variety. Základním vyšetřením je proto výpočetní tomografie (CT) formou tenkých řezů s následnou 3D rekonstrukcí (obr. 1a). Použití vhodných protokolů CT vyšetření umožní transfer dat do navigační stanice a pohodlné předoperační plánování s vyhodnocením možností a bezpečnosti umístění šroubů či jiných implantátů. Magnetická rezonance (MRI) má nezastupitelnou roli ve vyhodnocení měkkých tkání (obr. 1b). V oblasti KCP je dosti komplexní diskoligamentózní aparát a jedním ze zásadních přínosů MRI je například možnost přímého zobrazení léze lig. transversi. Prostřednictvím MRI lze také zobrazit stav nervových struktur a doplněním dynamického či kinegrafického MRI vyšetření (obr. 2) je možné ukázat jejich vztah k okolí i v předklonu, záklonu či při jiných pohybech.

Týlní kost

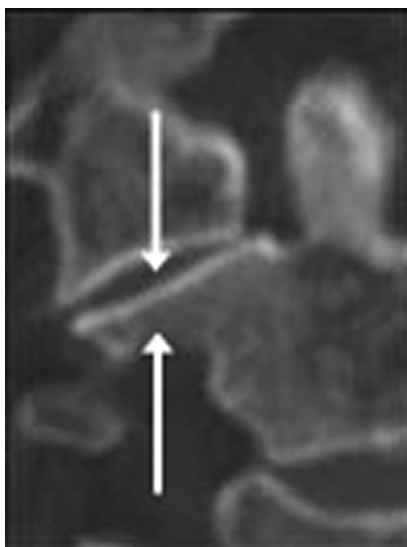
Znalost individuální kostěné anatomie týlní kosti je důležitá při každé occipito-cervikální fúzi. Současné systémy využívají k fixaci jak laterální (skvamózní), tak mediální oblasti occipitální kosti. Při zavádění šroubů, drátů nebo háčků je třeba respektovat tloušťku kosti a pozici confluens sinuum. Mediálně zavedené šrouby (14) vzhledem k silnější kosti v této oblasti drží lépe, jejich zavedení je však spojeno s větším rizikem poranění splavů. Pro zavedení implantátů zde lze navigační metody použít, protože je možná jednoduchá a přesná navigace lebky. V praxi se však obvykle nepoužívá a chirurgovi postačí pečlivé předoperační zhodnocení individuální anatomie týlní kosti.

Clivus

Navigace clivu je rutinně používána pro lokalizaci tumorů baze lebky a pro peroperační vyhodnocení rozsahu jejich resekce. Při zavádění šroubů do clivu je třeba sledovat kromě pozice také úhel a sílu kosti. Také tuto strukturu lze nejlépe navigovat s využitím kraniální registrace. Ve spinální chirurgii je dolní okraj clivu významným orientačním bodem u komplexních transorálních zákroků.

Atlas

Kvůli absenci těla u prvního krčního obratle se je-
dinými strukturami vhodnými k pevnému zavedení



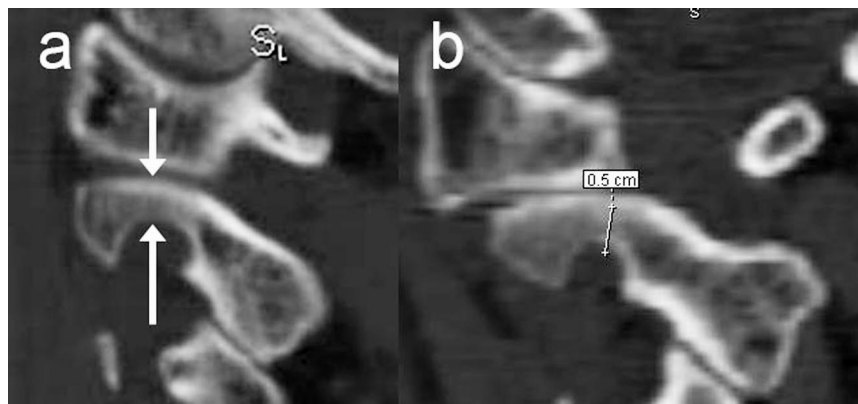
Obr. 3. Vnitřní výška laterálních mas C2 v koronární C rekonstrukci

implantátů stávají laterální masy. Šrouby mohou být zavedeny předním (20) či zadním přístupem (23), případně mohou sloužit jako izolované zakotvení u nejrozličnějších fixačních konstrukcí (11, 14). Arteriae vertebrales mohou být poškozeny i při předním přístupu, poranění při samotném zavedení šroubů lze však pozorovat spíše u zadního přístupu (6, 21, 36). Riziko se obecně zvyšuje u anomálních průběhů vertebrálních tepen (9, 21, 35). Krvácení z cév kolem kořenů C2 se lze vyhnout subperiosteální preparací (14) a správným polohováním pacienta (23). Současné publikace poukazují i na další „skrytá“ rizika dorzálního zavedení šroubů do laterálních mas (6, 7), zejména pokud chceme zvýšit pevnost konstrukce jejich bikortikálním zavedením (6). Rizikové struktury jsou zejména n. hypoglossus a karotická tepna. Nervus hypoglossus leží 2 až 3 mm laterálně od střední čáry přední plochy massa lateralis (7). Přesná anatomie karotické tepny je dosti individuální, může však ležet pouhý 1 mm od výstupu bikortikálně zavedeného šroubu (6). Proto se doporučuje zavedení šroubu do postero-laterální sublaminaární oblasti s trajektorií mírně mediálně. Obecně byly určeny „bezpečné zóny“ průběhu šroubu jak pro přední, tak pro zadní přístup (5, 19, 20, 27). Konkrétní anatomická situace by pak měla být zhodnocena po provedení CT/MRI tenkými řezy a ve vybraných případech vaskulární anomálie také angiografií.

Axis

Zcela unikátní je anatomie a uložení druhého krčního obratle. Variabilita průběhu vertebrálních arterií za „normálních“ podmínek a změny v případě přítomnosti patologických lézí jsou v literatuře často předmětem rozborů (22, 25). Tzv. „high riding“ vertebrální arterie je popisována až ve 23 % případů (21, 22, 25).

Obecně se má za to, že axis má v porovnání se subaxiálními obratli nejmasivnější pedikly, ale nejméně



Obr. 4. Vnitřní výška isthmus pars interarticularis měřená na sagitálních rekonstrukcích 4 mm laterálně od vnitřního okraje páteřního kanálu; a) nedostatečný b) dostatečný prostor pro zavedení 3,5 mm šroubu

vyvinuté laterální masy, zejména v oblasti tzv. istmu. Proto jsou pedikly nejčastějším místem zavedení šroubů (26). Výše uvedený předpoklad však nepodporují anatomické studie Resnicka (27) a Yoshidy (37). Změřením vzdáleností potenciálního průchodu šroubu vzhledem k trajektorii vertebrální arterie vyšlo najevo, že transistmické umístění šroubu představuje stejná rizika jako zavedení transpedikulární. Autoři doporučují předoperační 3D CT vyšetření ke stanovení vhodnější varianty. Bylo navrženo několik anatomických kritérií kontraindikujících transistmické zavedení šroubů (užívané při transartikulární fixaci C 2/1). Madawi (21, 22) dochází k závěru, že 3,5 mm silný šroub nelze zavést, jestliže je vnitřní výška laterální masy C2 menší než 2 mm. Měření provedl na CT rekonstrukcích mezi nejvyšším bodem sulku vertebrální arterie a povrchem horní facety (obr. 3). Tento závěr je diskutabilní, jelikož trajektorie nemusí nutně procházet měřeným úsekem a uložení šroubu je možno adekvátně korigovat.

Spolehlivější je měření výšky istmu pars interarticularis s ohledem na reálnou trajektorii šroubů za pomoci 3D modelu (25). Mandel et al. (24) analyzovali 205 kadaverózních obratlů C2 a u 10 % z nich našli istmus s šířkou a výškou menší než 5 mm. To je výrazně méně, než bylo předpokládáno s ohledem na výsledky klinických studií. Bloch et al. (2) za účelem zvýšení bezpečnosti studovali 17 kadaverózních páteří a tento svůj výzkum uzavírají názorem, že použití navigace s 3D plánováním trajektorie v souladu s individuální anatomí pacienta může být riziko poranění vertebrální arterie redukováno na 5,9 %. Za splnění výše uvedených podmínek je možno bezpečně zavést šroub o průměru 3,5 mm do istmu o mohutnosti 4 mm. Zřetelné rozdíly lze vyzkoušet mezi ženami a muži, mezi rasami a zcela pravidelně i mezi oběma stranami u jednotlivce (2, 24).

V souhrnu lze konstatovat, že vnitřní výška istmu musí být více než 5 mm při standardním měření na sagitálních CT rekonstrukcích 4 mm od vnitřní hranice kanálu páteřního (obr. 4). Za těchto okolností je zřejmé, že skutečná šířka istmu je více než 4 mm. Pokud má být

zaveden transpedikulární šroub do obratle C2, jeho velikost a úhel zavedení by měly být změřeny a naplánovány na CT rekonstrukcích (24, 27), u komplikovaných případů je vhodné optimalizovat vstupní body a trajektorie šroubů na počítačovém 3D modelu. Hraniční a nejisté situace si zaslouží CT angiografii k přesnému určení průběhu vertebrální arterie. Poměr obsahu struktur (vertebrální arterie/kostěný sulkus) je dle Caccioly et al. (3) průměrně 79 %, a díky CT-AG lze také vyloučit další anomálie vertebrální arterie (9). Bezpečné zóny C2 pro přední přístupovou cestu byly definovány Kandziour et al. (19) a Kollerem et al. (20).

POPIS NAVIGAČNÍCH TECHNIK

I. Navigace s využitím virtuální reality (Virtual Image Guided Surgery – vIGS)

Po velmi pozitivní zkušenosti s kraniální aplikací byla metodika vIGS přenesena na páteř Foleyem a Smithem v roce 1994 (8). Hlavním problémem byla korelace mezi povrchovými registračními body a kostěnými strukturami páteře, neboť v této oblasti je kůže volně posunlivá a také páteř je pohyblivá v segmentech. Problém byl vyřešen použitím dynamického referenčního rámu (dynamic reference array – DRA) připnutého na cílový obratel a registrací zadních kostěných povrchů obratlů po skeletizaci (8, 15). V počátcích bylo hlavním použitím vIGS zavádění lumbálních transpedikulárních šroubů (8). Poté co bylo zjištěno, že v porovnání s tradičními metodami (9) lze navigací v bederní a hrudní oblasti výrazně zpřesnit zavedení šroubů, byla technika adaptována také na delikátnější struktury horní krční páteře (12).

V principu jsou anatomická data získaná pomocí specifického CT/ MRI protokolu s tenkými řezy (1 až 1,5 mm) přenesena do počítače a rekonstruována do 3D podoby. Referenční rám (DRA) je pevně ukotven do cílové struktury tak, aby nebyl při operaci překážkou. Elektrooptická kamera připojená k počítači poté registruje pozici operovaného obratle a použitých instrumentů, které jsou označeny buď pasivními elementy (reflexní kuličky), nebo aktivním rámem s diodami emitujícími světlo. Vzájemná poloha operovaného obratle a použitého nástroje je peroperačně v reálném čase zobrazována na virtuálním modelu počítače.

Všechny současné systémy pracují s daty získanými buď při vyšetření před operací, nebo po expozici cílových kostěných struktur. To mimo jiné znamená, že data jsou získána před vlastní intervencí a před zaváděním implantátu. Intersegmentální pohyby při polohování či zavádění implantátů umožňují bezpečně navigovat pouze jeden obratel (obratel, na kterém je připnut referenční rám). Změnu polohy či pozice rámu musí provázet nová manuální či automatická registrace.

Získaná anatomická data umožňují detailní naplánování složitějších intervencí. V oblasti horní krční páteře je 3D analýza zaměřena zejména na možnosti zavedení šroubů, průběh vertebrální arterie, polohu míchy a mozkoměchy, pozici a tloušťku clivu, případně plán přístupu a strategii resekce tumoru. Taková příprava umožňuje bezpečné provedení velmi komplexních zákroků.

Předoperační analýza je doporučována i u nekomplikovaných případů, kdy již vlastní peroperační navigace není třeba (22).

a. vIGS na bázi předoperačního CT

Je to přesná metoda pro navigaci kostěných struktur páteře, zejména v anatomicky komplexních oblastech. Pokud je registrace provedena dostatečně přesně (přesnost do 1,5 mm), lze navigaci použít u všech známých výkonů se zavedením šroubů v oblasti horní krční páteře a kraniocervikální junkce. Nejvíce je používána při transartikulární fixaci C1/2 (4, 12) a publikované výsledky ukazují na vyšší přesnost zavedení šroubů v porovnání s konvenčními postupy (9).

Hlavní nevýhody: Je třeba CT vyšetření se specifickým protokolem. Většinou je k dispozici pouze klasické CT vyšetření, které však pro navigaci nelze použít. Narůstají tak náklady a dávka ozáření pacienta. Precizní registrace vyžaduje hodně času, je patrna „learning curve“ a bezpečně lze navigovat pouze jeden obratel. U multietážových výkonů se tak není možné vyhnout několikanásobné registraci.

b. vIGS na bázi intraoperativního CT

Jde o nejpřesnější metodu virtuální navigace. Přístroj pro CT vyšetření je umístěn na operačním sále a proces registrace je automatizován. Data pro navigaci jsou získána ve finální operační poloze pacienta a nepřesnosti při intersegmentálních pohybech jsou minimalizovány. Vyšetření lze kdykoliv aktualizovat i po zavedení části instrumentace a je možno okamžitě verifikovat přesnost zavedení šroubů.

Hlavní nevýhody: Cena sálového CT přístroje, ergonomické problémy (rouškování, manipulace s pacientem atd.), nutnost použití speciálního transparentního operačního stolu. Otvor „gantry“ přístroje je obvykle příliš malý. Pohyblivé části páteře (fragmenty) není možno validně vizualizovat bez opakované registrace.

c. vIGS na bázi 2D fluoroskopie: „Virtuální Fluoroskopie“

Tato metoda je kombinací klasické skiaskopie (kterou dobře znají všichni spinální chirurgové) s navigačními technologiemi. Přesnost instrumentace a navigace je zvýšena vždy jen v jedné rovině zobrazení. Využití v oblasti horní krční páteře a C-V junkce nebylo popsáno. Radiální expozice je výrazně nižší než u klasické fluoroskopie.

Hlavní nevýhody: Navigace je závislá na kvalitě snímků získaných skiaskopem, což je problematické zejména v oblasti horní hrudní páteře a obecně u obézních pacientů. Kostní struktury jsou hůře zobrazitelné u pacientů s osteopenií či deformitami. Z hlediska chirurgie horní krční páteře je kvalitní zobrazení kostních struktur vždy obtížné.

d. vIGS na bázi izocentrické fluoroskopie: „Virtuální 3D fluoroskopie“

Izocentrické C-rameno automaticky rotuje kolem pacienta, čímž vytvoří sérii fluoroskopických obrazů

s relevantní oblastí páteře v centru (16). Následně jsou data rekonstruována do koronálních, sagitálních a axiálních projekcí. Finální kvalita obrazu není tak dokonalá jako při použití CT, nicméně je výrazně vyšší než u klasické fluoroskopie. Pokud je izofluoroskop propojen s navigačním přístrojem, lze provést registraci ve finální pozici pacienta po napolohování. Pro registraci není třeba expozice kostěných elementů páteře a registrace prováděná chirurgem zcela odpadá. Vzniká tak prostor pro minimálně invazivní či dokonce perkutánní výkony (9). Přesnost a kvalita zobrazení obvykle dostačují pro výkony v oblasti horní krční páteře a KCP (16, 26).

Axiální projekce jsou rekonstruovány do 3D obrazu. Při součinnosti s navigačním přístrojem je jen krok k opakované verifikaci aktuálního postavení (automatická registrace v reálném čase – viz níže) kostěných struktur a implantátů. S každým dalším snímkováním se navigační data aktualizují a udržuje se přesnost. Zajišťuje se též redukce radiační dávky na 57 až 77 % (16) v porovnání se standardním CT protokolem.

Hlavní nevýhody: Kvalita zobrazení je v porovnání s CT nižší, zejména u obézních pacientů. Skenovaný objem je limitován rozsahem cca 12 cm, což představuje přibližně 4 krční a 3 bederní obratle.

e. *vIGS na bázi intraoperačního MRI*

Obdobně je možné použít intraoperativního MRI vyšetření. Metoda je užívána zejména v neurochirurgii při resekci gliomů, kde jsou uplatňována nejen volumetrická data a definice hranic, ale také funkční data a MR-angiografie. Tyto funkce lze ve spinální oblasti aplikovat např. při resekci intramedulárních nádorů, jejich aplikace na kostěné struktury je však omezená.

Hlavní nevýhody: Cena MRI skeneru, jeho velikost, nutnost nemagnetického vybavení (sál, instrumenty, anesteziologické vybavení atd.). Ergonomické problémy jsou ještě výraznější než u peroperačního CT. MRI je vynikající pro měkké struktury, zobrazení kosti však není dobré (17).

II. Navigace v reálném čase: „Real Time“ Image Guided Surgery (rIGS)

Navigace v reálném čase by v ideálním případě umožňovala kontinuální kontrolu dění v operační ráně po celou dobu chirurgické intervence. Ačkoli současné technologie nedokáží zajistit skutečně plynulou kontrolu v reálném čase, umožňují okamžitou kontrolu každého postupného kroku operace. V porovnání s virtuálními metodami navigace poskytují významné zvýšení bezpečnosti. Operátor může korigovat průběh výkonu v návaznosti na změny vzniklé v jeho průběhu a zejména na změny v poloze cílových struktur. Například změny postavení kostí po resekci tumoru, rozsah dekomprese, redukce deformity či repozice fragmentů – to vše jsou průběžně aktualizovaná obrazová data. V iniciačních fázích zavádění šroubů lze takto modifikovat úhel a délku zaváděných vrtáků a šroubů. Postupnými opakovanými aktualizacemi se minimalizuje riziko poranění vaskulárních či neurálních struktur, a to

v závislosti na rozsahu změn (resekce, redukce apod.) mezi jednotlivými zobrazeními. Navigace v reálném čase zásadně otevřela možnosti bezpečné minimálně invazivní a perkutánně prováděné spinální chirurgie. Cenou za zvýšenou bezpečnost a přesnost je nutnost opakovaných zobrazování (skenů), nutná přítomnost radiologa, vyšší radiační dávka pro pacienta, nutné přístrojové propojení s CT/MRI a v neposlední řadě diskomfort chirurga při zhoršených ergonomických podmínkách.

Navigace v reálném čase může být (a dnes i většinou bývá) kombinována s virtuální navigací. Například zavádění šroubu při kompresivní osteosyntéze fraktury dentu C2 může být místo klasické biplanární fluoroskopie kontrolováno kombinací laterální fluoroskopie a virtuální izofluoroskopické navigace (16). Zásadní výhodou zobrazení v reálném čase je možnost sledovat pohyb kostěných fragmentů či bloků v průběhu redukce dislokovaného postavení zlomeniny nebo korekce deformity a přímo vizualizovat finální postavení.

a. *Izofluoroskopie v reálném čase: „3D fluoroskopie“*

S narůstající kvalitou izofluoroskopie se rozšiřuje počet prací popisujících přímou intraoperativní kontrolu zavádění implantátů a resekce kostěných struktur (16). Přístroj pro izofluoroskopii není tak velký jako mobilní CT skenery a umožňuje značnou flexibilitu s ohledem na pozici pacienta a použití dalšího přístrojového vybavení (standardní operační stoly včetně Mayfieldova fixátoru pro kraniální chirurgii). Čas nutný k aktualizaci dat je v porovnání s CT a MRI výrazně nižší. Charakter výkonu popisovaný jako „step-by-step“ umožňuje monitoraci úhlu a hloubky předvrtání a následně i zavádění šroubů do finální pozice. Systém poskytuje dobrou vizualizaci kostěných struktur a umožňuje kontrolu delikátnějších procedur, jako je transartikulární/transpedikulární fixace C1/2, kompresivní osteosyntéza dentu C2 či fixace C1-C0 (16).

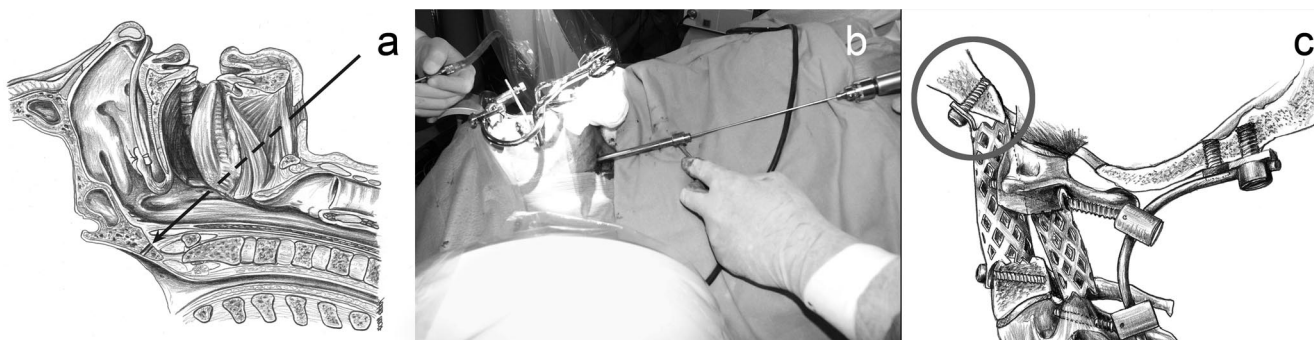
Hlavní nevýhody: Kvalita skenů je zcela závislá na kvalitě získaných fluoroskopických snímků, která může být zhoršená u pacientů s obezitou, osteopenií či závažnějšími deformitami. Výrazným negativním faktorem je také zvýšená expozice radiaci.

b. *CT navigace v reálném čase*

Použití přímé CT kontroly je dobře známou technikou, zejména v oblasti perkutánních intervencí (1), praktické použití je však limitováno nutností adaptace stacionárních skenerů na radiologických odděleních pro operační použití se zajištěním celkové anestézie (33), nebo finančně náročné výstavby sálů s instalací CT. Mezistupeň představují mobilní CT zařízení sprážená s radiolucenčním stolem, která umožňují provádět větší, otevřené výkony přímo na operačním sále i bez nutnosti instalace sálového CT. Rozsah potenciálních aplikací peroperační CT kontroly je stejný jako u izofluoroskopie, CT však stále poskytuje výrazně kvalitnější zobrazení. Na 3D rekonstrukcích jsou zachyceny i velmi jemné detaily kostěné anatomie. Lepší přesnost a aktu-



Obr. 5. Chordom clivu a jeho resekce transmaxilárním přístupem: operace byla navigována vIGS na podkladě dat z MRI; a) předoperační T2 sagitální MRI; b) časný pooperační T1 MRI snímek dokumentující rozsah excize (patrna tamponáda nosní dutiny a epifaryngu); c) aktivní rám (DRA) v pevném spojení s Mayfieldovým trojbodým fixátorem umožňující registraci pro transorální i transmaxilární výkony v oblasti clivu



Obr. 6. Virtuální navigace s využitím CT pro vrtání clivu: a) schematický náčrt submandibulárního přístupu, který byl zvolen k dosažení správného úhlu zavedení šroubů; b) navigovaná vrtačka s ochranným nástavcem; c) schematický náčrt konstrukce s místem ukotvení šroubu do clivu

lizace dat umožnila aplikaci perkutánních technik i pro oblast horní krční páteře.

Hlavní nevýhody: První typy skenerů měly menší průměr otvoru („gantry“), a tím měly výrazně omezené použití. Čas nutný k aktualizaci obrazu je obecně vyšší než u izofluoroskopie, většinou je nutný speciální operační stůl a použití CT představuje ergonomický problém. Je vysoká expozice radiaci.

c. MRI navigace v reálném čase

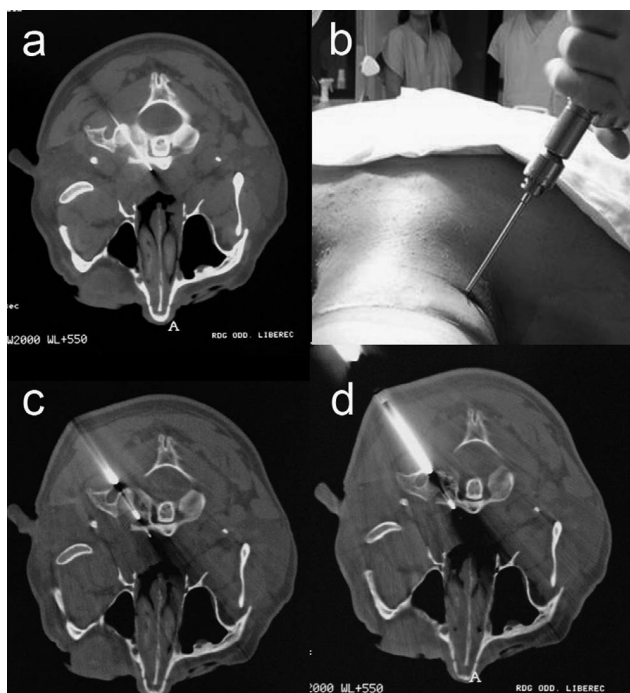
Použití MRI pro účely operativy je v literatuře poměrně široce popsáno, referuje se o tzv. iMRI („intraoperative magnetic resonance imaging“) systémech (17, 34). Pokud je zobrazení měkkých tkání důležitější než zobrazení kostěné anatomie, je iMRI technologií volby. Hlavní aplikace systémů je v oblasti intrakraniální patologie, v oblasti spinální může být iMRI užito pro lokalizaci patologií měkkých tkání. Velmi dobře zobrazitelné jsou komplexní extra/intradurální tumory, intramedulární tumory či anomálie KCP s kompresí neurálních struktur. V průběhu zákroku je možné zobrazit rozsah resekce tumoru. V oblasti KCP

je dobře verifikovatelný dostatečný rozsah dekomprese nervové tkáně. Metoda nevystavuje pacienta radiacímu záření.

Hlavní nevýhody: Pracovní prostor operátora je velmi limitován, operační čas je signifikantně delší než jakákoliv jiná navigační alternativa, operační sál pro iMRI vyžaduje nemagnetické vybavení včetně anesteziologických přístrojů. Kovové implantáty produkují obrazové artefakty, zobrazení tkání může být horší v porovnání s konvenčními MRI skenery a kvalita zobrazení kostí je velmi omezena. Základní cena systému je limitem jeho výraznějšího rozšíření.

ZKUŠENOSTI AUTORŮ A RÁMCOVÉ INDIKACE

Počítačem řízená navigace je indikována u všech výkonů v oblasti horní krční páteře a KCP, u kterých přináší signifikantní zvýšení přesnosti a/nebo bezpečnosti. V první řadě jde o anatomické regiony, které jsou za normálních okolností mimo zřetelovou kontrolu operátora.



Obr. 7. Zavedení kanylovaného šroubu: a) Kirschnerův drát (K-drát) tloušťky 1,1 mm postupně proniká skrze laterální masu C1 dle preoperačně naplánované trajektorie; b) kanylovaný vrták se zevním průměrem 2 mm vedený perkutánně po K-drátu; c) a d) postupné zavedení kanylovaného tahového šroubu s kompresí

a. Komprese nervových struktur KCP

Nervové struktury mohou být komprimovány vývojovými a získanými anomáliemi, traumatem, tumorem (obr. 5) či zánětlivým onemocněním. Lokalizace a rozsah chirurgické dekomprese mohou být monitorovány virtuálně či v reálném čase pomocí CT či MRI, pro případy čistě kostěné dekomprese je dostatečné použití izofluoroskopie.

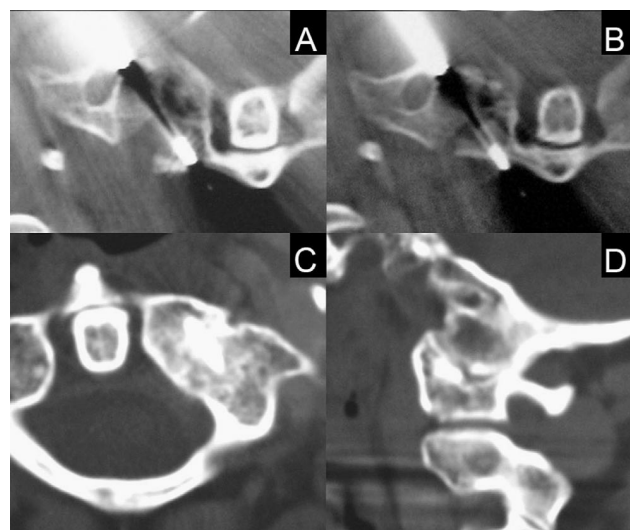
b. Navigace clivu a foramen magnum

Zobrazení těchto struktur velmi elegantně umožňuje kraniální navigační systémy. Okraj clivu je významným orientačním bodem u transorálních výkonů. Navigace je velmi užitečná v případech, kdy je plánováno zavedení šroubů do clivu – umožní přesné změření síly kosti a přesné zavedení šroubů dle připraveného plánu (obr. 6).

K navigování jsou také indikovány některé výkony na lební bazi a occipitálních kondylech a výjimečně je navigace používána při atlanto-occipitálních fúzích ke kontrole polohy canalis nervi hypoglossi.

c. Navigace atlasu

Dobře dostupný a anatomicky poměrně jednoduchý první krční obratel obvykle nevyžaduje navigaci ani v případě komplexnějších instrumentací. Nové technologie zde otevírají možnosti perkutánních postupů, například pro ošetření fraktur. Následující případ je pří-



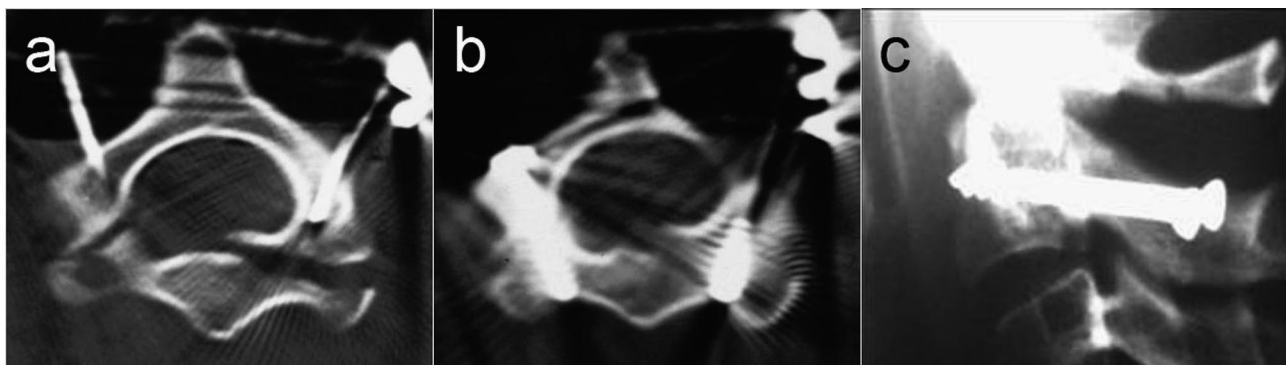
Obr. 8. Obraz 18 měsíců po operaci ukazuje na zcela uspokojivé postavení a zhojení intraartikulární fraktury: a) postavení před utažením; b) po utažení s kompresí fragmentů; c) axiální CT sken zhojené fraktury; d) sagitální rekonstrukce kongruence kloubní plochy C1/2 bylo dosaženo díky redukci pomocí tahového šroubu

kladem CT navigace v reálném čase provedené za účelem minimalizace invazivity výkonu.

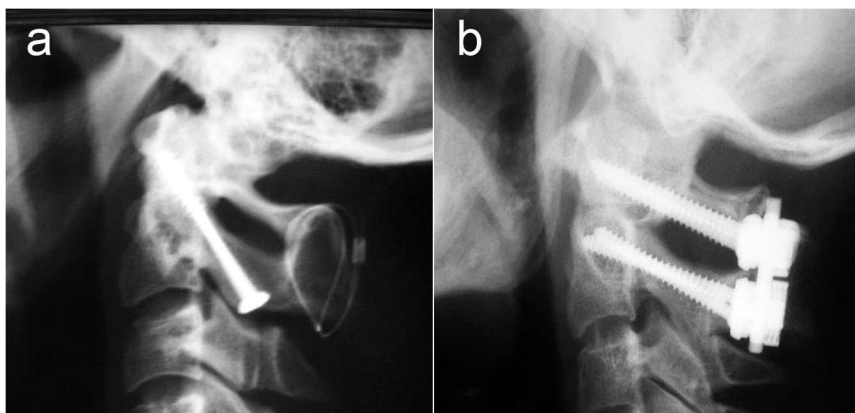
Muž ve středních letech byl přijat po pádu ze žebříku s bolestmi krku, byl bez neurologického deficitu. Diagnostikována byla fraktura kruhu atlasu ve dvou místech s dislokací části laterální masy přes okraj kloubní plochy C2. Ligamentum transversum atlantis bylo intaktní (dle MRI vyšetření). Vzhledem k dislokaci a intraartikulární povaze zlomeniny byla zvolena perkutánní přímá osteosyntéza s repozicí fragmentů za kontroly CT v reálném čase. Výkon byl proveden v celkové anestezii na radiologickém oddělení (CT-přístroj GE Sytec). Naplánovali jsme trajektorii šroubu a dosáhli redukce fraktury pomocí přímé osteosyntézy s využitím K-drátu a kanylovaného tahového šroubu (obr. 7). Během relativně krátkého výkonu (90 minut) bylo dosaženo anatomického postavení kloubní plochy C1/2 (obr. 8a, 8b) bez komorbidit či peroperačních komplikací. Kontrola po 18 měsících ukazuje uspokojivou repozici a dobré zhojení intraartikulární fraktury (obr. 8c, 8d). Pacient netrpí bolestmi a kromě mírné restrikce předklonu a záklonu nepocituje žádné omezení v pohybech krku. Tento případ názorně ukazuje, že s využitím intraoperativní navigace v reálném čase je možno ošetřit i problematickou zlomeninu horní krční páteře minimálně invazivně, velmi bezpečně a se zanedbatelnou mechanickou morbiditou. Bez navigační technologie by popsáná intervence nebyla možná.

d. Navigace v oblasti epistropheu

vIGS může být využita pro zavedení kteréhokoliv typu ze standardně v C2 užívaných šroubů. Přední pří-



Obr. 9. Axiální CT sken a rtg snímek se zobrazením úspěšné osteosyntézy „katovské zlomeniny“ C2 s využitím CT-navigace v reálném čase; a) jeden z iniciálních snímků s částečně zavedenými K-dráty; b) finální komprese fraktury s použitím tahových šroubů; c) pooperační boční rtg snímek



Obr. 10. Rtg snímky nejčastěji používaných metod atlantoaxiální fixace – boční projekce; a) Magerlova transartikulární fúze s použitím kostního graftu; b) Goelova technika s užitím Harmsova instrumentária – šrouby jsou zavedeny do laterálních mas C1 a transpedikulárně do C2

stup však může být komplikován problémy s registrací a nestabilním ukotvením DRA. V případě zadního přístupu a využití vIGS může být problém u korekci deformit nebo dislokovaných fraktur. Mobilní fragmenty nemohou být správně registrovány. Pokud se provádí opakovaná peroperační aktualizace, vždy vidíme pouze aktuální postavení, které se v několika vteřinách může zásadně změnit. To je zejména patrné u fraktur oběšenčova typu („hanged man“) či atypických zlomenin C2. CT navigace v reálném čase tuto překážku dokáže překonat (33). Řešení transpedikulární kompresivní osteosyntézou dle Judeta (18, 26) je možné u fraktur kruhu C2 typu Effendi I., kde je vzdálenost fragmentů větší než 3 mm na CT a u některých zlomenin typu Efendi II. (33). Finální dotažení šroubů s redukcí fraktury je tak přímo dokumentováno posledním při operaci provedeným CT skenem (obr. 9). Pokračující vývoj mobilních skenerů, izofluoroskopů a počítačového softwaru v budoucnu pravděpodobně umožní provádět tyto výkony perkutánně bez ztráty bezpečnosti.

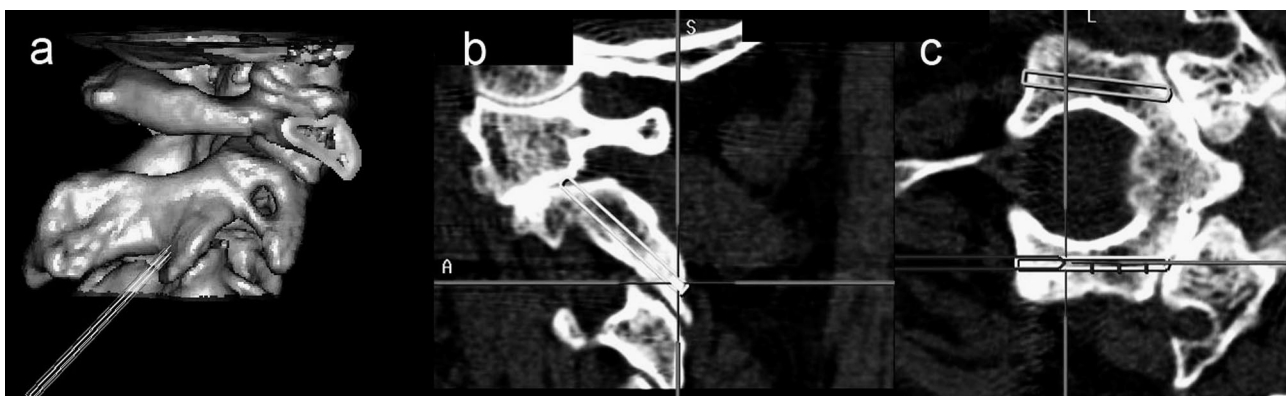
e. Navigace C1/2 artrodézy

V současnosti jsou nejčastěji používány dvě metody fixace C1/2, které vedou k okamžité stabilitě, vykazují vysoké procento fúze a nepotřebují následnou externí fixaci. Jedná se o transartikulární C2/1 fixaci podle Magerla, vyvinutou v roce 1987 (23) a fixaci dle Goela

(11) modifikovanou Harmsem (14) s použitím pevného spojení šroubů v laterálních masách C1 a transpedikulárních šroubů v oblasti C2 (obr. 10). Obě metody zahrnují zapuštění šroubu do C2 jako potenciální zdroj morbidity. Anatomické studie (27, 37) neprokázaly zásadní rozdíl v bezpečnosti obou metod pokud jde o možné poranění vertebrální arterie, logika věci však říká, že by transpedikulární šrouby měly být bezpečnější s ohledem na možnost přímé vizualizace vnitřního okraje istmu a příznivější úhel zavedení. Studie dokumentující Goelovu metodu fixace C1/2 jsou ojedinělé a neuvádějí jediné poranění vertebrální tepny (11, 14). Na druhé straně stojí retrospektivní studie American Association of Neurological Surgeons/ Congress of Neurological Surgeons, kde Wright a Lauryssen (36) udávají incidenci rozpoznávaných poranění VA 4,1 % při použití Magerlovy metody. Opravdová incidence by mohla být ještě vyšší vzhledem k nízké výtěžnosti (26,6 %) a přítomnosti nerozpoznaných poranění VA. Jelikož téměř vždy existuje dostatečný kolaterální tok z druhostranné vertebrální arterie, je uváděná incidence neurologických deficitů velmi nízká, kolem 0,2 %. Ve stejné studii je však popisováno chybné umístění šroubů v 15 %. Ve druhé největší studii Gluf et al. (10) popisují incidenci poranění VA 2,6 % se zahrnutím jednoho úmrtí. Švýcarská retrospektivní studie (13) popisující 161 operací a vykazující 15 % malpozice šroubů nereferuje žádné poraně-



Obr. 11. Chybné zavedení druhého šroubu u pacienta s revmatoidní artritidou a sesednutím atlasu; poranění vertebrální arterie při předvrtání závitu bylo úspěšně (pacient bez neurologického deficitu) vyřešeno krátkým šroubem ve funkci zátky; a) kauzální dislokace (settling) atlasu (sagitální MRI snímek), s vyznačením chybné (dolní linie) a správné (horní linie) trajektorie; b) závitorež v pozici vzniku poranění vertebrální arterie; c) stav po zavedení krátkého šroubu ve funkci zátky k zastavení arteriálního krvácení



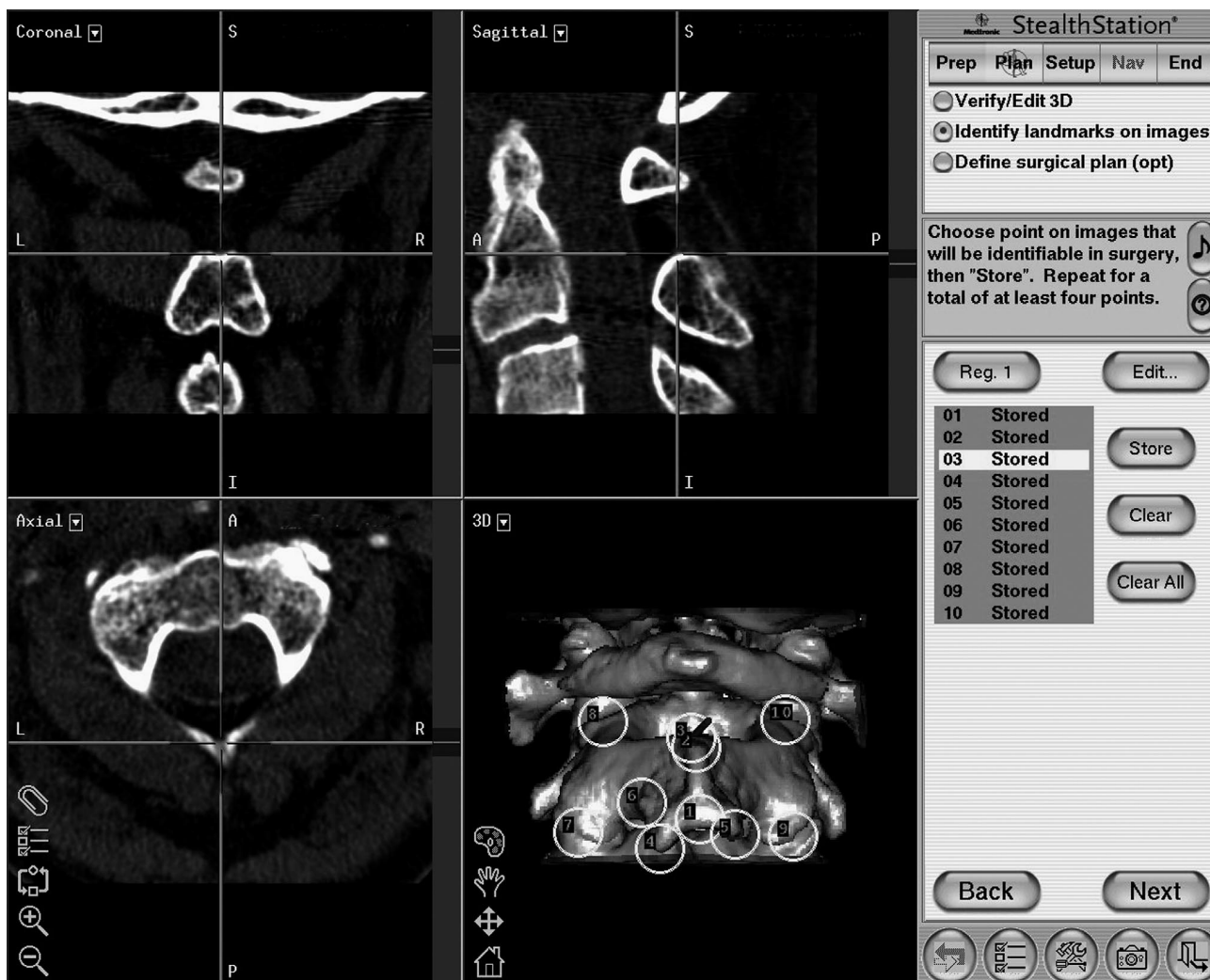
Obr. 12. Plán zavedení transartikulárního šroubu s využitím 3D modelu počítačové tomografie a navigačního softwaru: a) 3D model se simulací vstupního bodu a úhlu zavedení šroubu; b) sagitální rekonstrukce možné transisthmické trajektorie (poznámka: pacient s revmatoidní artritidou, subluxace C1/2 není redukována); c) šikmá axiální projekce teoreticky možné trajektorie šroubu

ní vertebrální arterie, ovšem šrouby byly zaváděny bez předvrtání závitu, a tudíž případná poranění nemusela být peroperačně rozpoznána.

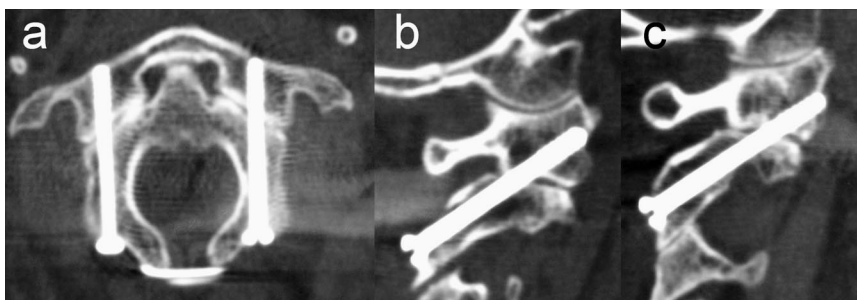
Poranění vertebrální arterie může být přítomno, pokud je trajektorie předvrtání šroubu příliš nízká (21, 22). To může být zapříčiněno snahou dosáhnout tuberculum anterius atlasu jako fluoroskopicky optimálního cíle. Hlavním prvkem určujícím trajektorii je však vždy axis, nikoliv pozice atlasu, která může být změněna a zavadějíci zejména u pacientů s revmatoidní artritidou a sesednutím („settling“) atlasu (obr. 11), po přední dekompresi, resekci zubu čepovce s odstraněním předního oblouku atlasu či v případech neredukovaných dislokací. V těchto situacích se nabízí možnost navigovaného zapuštění šroubů v souladu s individuální anatomí istmu C2.

Postup při použití vIGS na bázi CT pro fixaci C1/2 začíná provedením CT vyšetření s využitím specifického protokolu, poté jsou data přenesena do počítače stanice navigačního systému. Ačkoliv je kladen důraz na zobrazení všech důležitých struktur, musí být vyšetření cíleno primárně na obratel C2. Jen tak je možné vytvo-

řit dostatečně velký a precizní 3D model. Na získaném virtuálním modelu C2 je provedeno předoperační plánování a testuje se možnost bezpečného zavedení šroubů skrze pars interarticularis (obr. 12). Bezpečné uložení šroubu je obecně možné, je-li k dispozici alespoň 4 až 5 mm široký koridor skrze isthmus pars interarticularis. Následuje určení anatomicky dobře definovaných a spolehlivých bodů vhodných pro registraci obratle (obr. 13). Pacient je napolohován a jsou zapojeny veškeré potřebné přístroje (fluoroskop, navigační stanice s kamerami atd.). Pro vytvoření přístupu používáme klasickou středočárovou incizi a skeletizaci C1 a C2 až po úroveň kloubů C2/3. Kostěný povrch musí být dobře očištěn od měkkých tkání (ovšem bez zásahů do tkání kostěných), aby bylo možno provést relevantní registraci dle předdefinovaných bodů. DRA rám je připevněn ke trnovému výběžku C2 tak, aby v průběhu výkonu nepřekážel a byl zachytitelný optoelektronickými kamerami. Následuje registrace obratle C2 s jeho přesnou prostorovou lokalizací a registrace instrumentů. V této chvíli je možné přímo porovnat aktuální prostorovou situaci v operačním poli s virtuálním modelem a odhalit pří-



Obr. 13. Obrazovka navigační stanice (Treon PlusTM, MedtronicTM) dokumentující lokalizaci registračních bodů



Obr. 14. Pooperační CT vyšetření s rekonstrukcemi – optimální uložení transartikulárních šroubů; a) na šikmých příčných rekonstrukcích lze vyhodnotit pozici celého šroubu, na snímku je optimální jak postavení šroubů, tak jejich délka; b) bezpečná poloha šroubu v pravém istmu; c) sulcus arteriae vertebralis není v oblasti levé pars interarticularis poraněn (poznámka: redukovaná pozice atlasu u stejného pacienta jako na obr. 12)

padné nesrovnalosti vzniklé na podkladě pohybu obratlů (typicky po převrtání prvního otvoru do C2). Dislokace atlasu, které se nepodaří zredukovat polohováním pacienta v celkové anestezii, je možné ve většině případů udržet v redukci otevřenou C1/2 fixací drátem nebo trakcí za C2. Autoři preferují první krok zejména pro omezení možného pohybu atlasu při předvrtání a zavedení šroubů. Tyto pohyby mohou narušit kontinuitu připravené dráhy šroubu a přechod přes skloubení pak může být problematický. Vstupní body šroubu jsou označeny

vysokoobrátkovou frézou a vrták je navigován registrovanou vrtačkou skrze silnější z obou istmů. Průměr pars interarticularis není jediným limitujícím faktorem při postupu. V případě ostrého úhlu zavedení šroubu jsou nutné menší kožní incize kaudálně od operační rány a použití trokaru k dosažení správné trajektorie. Tato technika bývá nutná zejména u pacientů obézních či s kyfotickou deformitou hrudní páteře.

Předvrtaný otvor je připraven závitořezem a poté je zaveden šroub s délkou dle předoperačního plánování.

Většinou je výsledek kontrolován také fluoroskopicky. Kromě navigace je druhou linií ochrany před nežádoucím odklonem od plánované trajektorie přímá vizualizace interního okraje istmu. Správná pozice implantátů by měla být zkontrolována den po operaci s využitím tenkých CT řezů a nativních rtg snímků. Ozřejmí se tak anatomická pozice šroubů a jejich stabilita při axiálním zatížení (obr. 14) a tím jsou určeny také pooperační doporučení stran mobilizace pacienta a rehabilitace.

I přes poměrně velký důraz kladený na možnost poranění vertebrální arterie při instrumentovaných výkonech na horní krční páteři (22, 25), v největší z posledních studií C1/2 fixace dle Harmse/Goela (14) navigační technologie nebyly využívány. Navigace virtuální i v reálném čase je velmi přínosná při atlantoaxiálních fixacích, zejména pokud preoperačně identifikujeme tenké partes interarticulares či atypické pedikly C2. Důvodem k navigaci také může být atypie nebo asymetrie atlasu, stejně jako abnormální průběh vertebrální tepny. Autoři zastávají názor, že by všechny předchozí faktory měly být analyzovány před každou operací KCP a HKP.

ZÁVĚR

Ačkoliv navigační technologie nemohou nahradit individuální zkušenosti chirurga, dokáží výrazně přispět k přesnosti a bezpečnosti prováděných výkonů. Ve velmi krátké budoucnosti se další benefit projeví v posunu operativy směrem k minimálně invazivně a perkutánně (9) prováděným výkonům v oblasti HKP a KC přechodu.

Velmi perspektivním se v současné době jeví propojení moderního izofluoroskopu a navigační stanice. Automatická registrace páteře v operační poloze nejen výkon významně zpřesní, ale také dramaticky zkrátí operační čas a zvýší komfort chirurga. Zejména nutnost manuální registrace před virtuální navigací byla a je, dle našeho názoru, jednou z hlavních překážek rozvoje virtuálních navigačních technik. Neméně významná je i možnost okamžité reálné operační kontroly virtuálně zavedených implantátů.

Další vývojový krok v užití navigačních technologií jistě představuje propojení navigačních systémů s operačními roboty. Znalost problematiky, anatomie a zkušenost chirurga však nemůže být v blízké budoucnosti žádnou technologií nahrazena.

Literatura

1. BARSÁ, P., SUCHOMEL, P., LUKÁŠ, R., TALLER, S., END-
RYCH, L.: Perkutánní CT-navigovaná radiofrekvenční ablace
v terapii spinálních osteoidních osteomů. *Acta Chir. ortop., Traum.*
čech., 74: 401–405, 2007.
2. BLOCH, O., HOLLY, L. T., PARK, J., OBASI, C., KIM, K.,
JOHNSON, J.P.: Effect of frameless stereotaxy on the accuracy of
C1-2 transarticular screw placement. *J. Neurosurg.*, 95: 74–79,
2001.
3. CACCIOLA, F., UMESH, P., GOEL, A.: Vertebral artery in rela-
tionship to C1-C2 vertebra: an anatomical study. *Neurol. India*, 52:
178–184, 2004.
4. VAN CLEYNENBREUGEL, J., SCHUTYSE, F., GOFFIN, J.,
VAN BRUSSEL, K., SUETENS P.: Image-Based Planning and
Validation of C1-C2 Transarticular Screw Fixation Using Perso-
nalized Drill Guides. *Computed Aided Surgery*, 7: 41–48, 2002.
5. DOHERTY, B. J., HEGGENESS, M. H.: The Quantitative Ana-
tomy of the Atlas. *Spine*, 19: 2497–2500, 1994.
6. ECK, J. C., WALKER, M. P., CURRIER, B. L., CHEN, Q., YAS-
ZEMSKI, M. J., AN, K. N.: Biomechanical Comparison of Uni-
cortical Versus Bicortical C1 Lateral Mass Screw Fixation. *J. Spi-
nal Disord. Tech.*, 20: 505–508, 2007.
7. EBRAHEIM, N. A., MISSON, J. R., XU, R., YEASTING, R. A.:
The Optimal Transarticular c1-2 Screw Length and the Location
of the Hypoglossal Nerve. *Surg., Neurol.*, 53: 208–10, 2000.
8. FOLEY, K. T., SMITH, M. M.: Image-Guided Spine Surgery. *Neu-
rosurg. Clin. N. Amer.*, 7: 171–186, 1996.
9. GEBHARD, F., WEIDNER, A., LIENER, U. C., STÖCKLE, U.,
ARAND, M.: Navigation at the spine. *Int. J. Care Injured.*, 35:
S-A35 – S-A45, 2004.
10. GLUF, W. M., SCHMIDT, M. H., APPELBAUM, R. I.: Atlanto-
axial transarticular screw fixation: a review of surgical indicati-
ons, fusion rate, complications, and lessons learned in 191 adult
patients. *J. Neurosurg. Spine*, 2: 155–163, 2005.
11. GOEL, A., LAHERI, V.: Plate and screw fixation for atlanto-axi-
al subluxation. *Acta Neurochir.*, 129: 47–53, 1994.
12. GOFFIN, J., BRUSSEL, K. V., MARTENS, K., SLOTEN J. V.,
AUDEKERCKE, R. V., SMET, M. H.: Three-Dimensional Com-
puted Tomography-Based, Personalized Drill Guide for Posterior
Cervical Stabilization at C1-C2. *Spine*, 26: 1343–1347, 2001.
13. GROB, D., JEANNERET, B., AEBI, M.: Atlanto-axial fusion with
transarticular screw fixation. *J. Bone Jt Surg.*, 73: 972–976, 1991.
14. HARMS, J., MELCHER, R. P.: Posterior C1-C2 fusion with poly-
axial screw and rod fixation. *Spine*, 26: 2467–71, 2001.
15. HOLLY, L. T.: Image-guided spinal surgery. *Int. J. Med. Robotics
Comput. Assist. Surg.*, 2: 7–15, 2006.
16. HOLLY, L. T., FOLEY, K. T.: Percutaneous Placement of Poste-
rior Cervical Screws Using Three-Dimensional Fluoroscopy. *Spine*,
31: 536–540, 2006.
17. JOLLESZ, F. A.: Future perspectives for intraoperative MRI. *Neu-
rosurg. Clin. N. Amer.* 16: 201–213, 2005.
18. JUDET, R., ROY-CAMILLE, R., SAILLANT, G.: Fractures du
rachis cervical. *Actualités de chirurgie orthopédique de l'hospital
Raymond-Poincaré*, 8: 174–175, 1970.
19. KANDZIARA, F., SCHULZE-STAHN, N., KHODADADYAN-
KLOSTERMANN, C., SCHRÖDER, R., MITTLMEIER, T.:
Screw placement in transoral atlantoaxial plate systems: an ana-
tomical study. *J. Neurosurg. Spine*, 95: 80–87, 2001.
20. KOLLER, H., KAMMERMEIER, V., ULBRICHT, D., ASSUN-
CAO, A., KAROLUS, S., BERG, B., HOLZ, U.: Anterior retrop-
haryngeal fixation C1-2 for stabilization of atlantoaxial instabili-
ties: study of feasibility, technical description and preliminary
results. *Europ. Spine J.*, 15: 1326–1338, 2006.
21. MADAWI, A. A., CASEY, A. T., SOLANKI, G. A., TUIE, G.,
VERES, R., CROCKARD, H. A.: Radiological and anatomical
evaluation of the atlantoaxial transarticular screw fixation techni-
que. *J. Neurosurg.*, 86: 961–968, 1997.
22. MADAWI, A. A., SOLANKI, G., CASEY, A. T., CROCKARD,
H. A.: Variation of the groove in the axis vertebra for the verte-
bral artery. Implications for instrumentation. *J. Bone Jt Surg.*,
79-B: 820–3, 1997.

23. MAGERL, F., SEEMANN, P. S.: Stable posterior fusion of the atlas and axis by transarticular screw fixation. In: Kehr P., Weidner A., eds.: Cervical spine. Wien, Springer-Verlag 1986, 322–327.
24. MANDEL, I. M., KAMBACH, B. J., PETERSILGE, CH. A., JOHNSTONE, B., YOO, J. U.: Morphologic Considerations of C2 Isthmus Dimensions for the Placement of Transarticular Screws. Spine, 25: 1542–1547, 2000.
25. PARAMORE, C. G., DICKMAN, C. A., SONNTAG, V. K.: The anatomical suitability of the C1-2 complex for transarticular screw fixation. J. Neurosurg., 85: 221–224, 1996.
26. RAJASEKARAN, S., VIDYADHARA, S., SHETTY, A. P.: Iso-C 3D Fluoroscopy-based Navigation in Direct Pedicle Screw Fixation of Hangman Fracture. J. Spinal Disord. tech., 20: 616–619, 2007.
27. RESNICK, D. K., LAPSIWALA, S., TROST, G.: Anatomic Suitability of the C1-C2 Complex for Pedicle Screw Fixation. Spine, 27: 1494–1498, 2002.
28. SUCHOMEL, P., BUCHVALD, P., BARSA, P., FROEHLICH, R., CHOUTKA, O., KREJZAR, Z., SOURKOVÁ, P., ENDRYCH, L., DZAN, L.: Single-stage total C-2 intralesional spondylectomy for chordoma with three-column reconstruction. J. Neurosurg. Spine, 6: 611–618, 2007.
29. SUCHOMEL, P., BUCHVALD, P., BARSA, P., LUKAS, R., SOUTKUP, T.: Pyogenic Osteomyelitis of the Odontoid Process: Single Stage Decompression and Fusion. Spine, 28: 1–6, 2003.
30. ŠTULÍK, J., SUCHOMEL, P., LUKÁŠ, R., CHROBOK, J., KLÉZL, Z., TALLER, S., KRBEC, M.: Přímá osteosyntéza dentu – multicentrická studie. Acta Chir. ortop. Traum. čech., 69: 141–148, 2002.
31. ŠTULÍK, J., ŠEBESTA, P., VYSKOČIL, T., KRYL, J.: Zlomeniny dentu u pacientů nad 65 let: přímá osteosyntéza dentu vs. zadní fixace C1-C2. Acta Chir. ortop. Traum. čech., 75: 99–105, 2008.
32. ŠTULÍK, J., KOZÁK, J., ŠEBESTA, P., VYSKOČIL, T., KRYL, J., PELICHOVSKÁ, M.: Total Spondylectomy of C2: a New Surgical Technique. Acta Chir. ortop. Traum. čech., 74: 79–90, 2007.
33. TALLER, S., SUCHOMEL, P., LUKÁŠ, R., BERAN, J.: CT-guided internal fixation of a hangman's fracture. Europ. Spine J., 9: 393–397, 2000.
34. WOODARD, E. J., LEON, S. P., MORIARTY, T. M., QUINONES, A., ZAMANI, A. A., JOLESZ, F. A.: Initial Experience With Intraoperative Magnetic Resonance Imaging in Spine Surgery. Spine, 26: 410–417, 2001.
35. WRIGHT, N. M.: Translaminar rigid screw fixation of the axis. J. Neurosurg. Spine, 3: 409–414, 2005.
36. WRIGHT, N. M., LAURYSEN, C.: Vertebral artery injury in C1-2 transarticular screw fixation: results of a survey of the AANS/CNS section on disorders of the spine and peripheral nerves. J. Neurosurg., 88: 634–640, 1998.
37. YOSHIDA, M., NEO, M., FUJIBAYASHI, S., NAKAMURA, T.: Comparison of the Anatomical Risk for Vertebral Artery Injury Associated With the C2-Pedicle Screw and Atlantoaxial Transarticular Screw. Spine, 31: E513–E517, 2006.

Doc. MUDr. Petr Suchomel, Ph.D.,
Neurocentrum Krajské nemocnice Liberec, a.s.,
Husova 10,
460 63 Liberec 1
E-mail: petr.suchomel@nemlib.cz