

O-arm versus C-arm: porovnání učební křivky a přesnosti při transpedikulární fixaci bederních spondylolistéz

O-arm Versus C-arm: Comparison of the Learning Curves and Accuracy in Transpedicular Screw Fixation of Lumbar Spondylolisthesis

J. JABLONSKÝ¹, Š. TRNKA^{1,2}, P. STEJSKAL^{1,2}, L. HRABÁLEK^{1,2}, T. WANEK^{1,2}, M. VAVERKA^{1,2}

¹ Neurochirurgická klinika Fakultní nemocnice Olomouc

² Lékařská fakulta Univerzity Palackého Olomouc

ABSTRACT

PURPOSE OF THE STUDY

The annual number of spinal fusion procedures has been increasing and is well documented worldwide. The O-arm is slowly becoming the standard for transpedicular screw insertion. The accuracy and safety of this method have been confirmed by many studies. Therefore, the learning curve of this method and its use by younger surgeons is the focus of our investigation. Longer operative time and radiation exposure to the patient are its only disadvantages. Our aim was to evaluate the learning curve of neurosurgical residents receiving specialist training and to demonstrate the safety and accuracy compared to the conventional C-arm-guided screw insertion used in the surgical management of spondylolisthesis.

MATERIAL AND METHODS

Two groups of patients were evaluated - a retrospective cohort composed of patients with degenerative lumbar spinal instability indicated for C-arm-guided posterior transpedicular screw fixation and a prospective group of patients with the same diagnosis and surgical indication for O-arm-navigated screw insertion. In the retrospective group, the surgeons were largely experienced certified spine surgeons and neurosurgeons, whereas in the prospective group there were mainly neurosurgical residents receiving specialist training under the supervision of a certified physician. Both groups underwent a postoperative CT scan to evaluate the pedicle screw malposition using the Grade system and the anatomical plane of malposition. The operative times for both groups were recorded and for the O-arm navigated group a learning curve from the introduction of the method was generated. The values obtained were statistically analysed.

RESULTS

A relatively favourable learning curve of the O-arm-navigation was obtained, with operative times approximating the C-arm-guided group at two years after the introduction of the method. Safety of the O-arm navigation applied by less experienced surgeons was confirmed through statistically significantly higher accuracy achieved in the O-arm group at the expense of longer operative times. Also, a significantly lower number of significant Grade 2 and 3 malposition was reported in the O-arm group.

DISCUSSION

The higher accuracy of transpedicular screw insertion in the navigation method has been confirmed multiple times. In our study, even in the group of less experienced surgeons. The favourable learning curve of neurosurgical residents receiving specialist training is less documented. Time efficiency of the method and its safety when applied by younger surgeons could help make O-arm navigation the new gold standard in spine surgery. The longer operative time, the purchase price of the device, and a relatively higher radiation exposure to the patient continue to be its disadvantages.

CONCLUSIONS

Based on the data obtained, a conclusion can be drawn that the O-arm navigation in spine surgery represents a safer and more accurate method for transpedicular fixation compared to the conventional C-arm technique, even when used by less experienced surgeons. In future, we should focus on increasing its time-efficiency. We are convinced that the navigation-assisted spinal instrumentation will soon become a necessity for spine surgery centres.

Key words: O-arm, transpedicular fixation, spondylolisthesis, fusion, navigation, learning curve.

ÚVOD

Spinální instrumentace jsou základním kamenem v okamžitém operačním zajištění stability patologického segmentu páteře (12). S přibývajícím dobou vlivem prodlužování délky života nebo zlepšením diagnostiky dochází k lineárnímu nárůstu spondylochirurgických operací s čímž jde ruku v ruce i větší počet instrumentovaných výkonů na páteři.

Transpedikulární fixace (TPF) na bederní páteři je nejčastěji prováděnou spinální instrumentací (27). Samotný operační výkon na páteři má vždy těsný vztah k přilehlým anatomickým strukturám, jako jsou durální vak, nervové a cévní struktury a při spondylochirurgických výkonech hrozí jejich poranění (2, 5).

Mimo to je diskutovaným problémem u těchto operací riziko malpozice šroubu a dlouhý operační čas samotného výkonu. (16). Proto se v posledních letech zaměřovala pozornost k vyvinutí metod pro efektivní, přesné a bezpečné zavedení transpedikulární fixace se zkrácením operačního času a času potřebného k zavedení fixace (13, 44, 46). To byl jeden z důvodů proč se uchytila navigační technika zavedení instrumentace (17, 21, 31, 41).

Zavádění počítačově asistované navigace výrazně snížilo riziko špatné pozice při transpedikulární fixaci (11, 21, 22, 39, 40, 43).

C-ramenem fluoroskopicky asistovaná inserce transpedikulární fixace byla zlatým standardem po mnoho let a umožnila přesné zavádění šroubu. I přes tento pokrok konvenční C-rameno umožňuje pouze navigaci ve dvou rovinách, které ne vždy ideálně korelují, hlavně při netypické poloze pacienta či patologické degenerativní anatomii. (2, 23, 26). O-arm zobrazovací technika nabízí 3D obraz aktuálního perioperačního nálezu. Během inserce pedikulárního šroubu máme k dispozici obraz v několika rovinách simultánně, čímž se eliminuje nutnost úpravy pacientovi pozice či C-ramena ke korekci anatomických odchylek. (1, 9, 30, 38). Teoreticky O-arm disponuje více výhodami než C-rameno pro přesnější chirurgickou perioperační navigaci. Díky bezpečnější inserci navigačních technologií se pozornost upnula i na samotnou učební křivku 3D navigační metody pro operátory (28).

Vždy se jednalo o značně heterogenní soubory se širokým spektrem diagnóz a bez hodnocení zkušenosti operátorů. V přehledu studií se objevují paradoxně některé, které naznačují, že navigační metoda spojená s O-armem může vést k vyšší míře malpozice ve srovnání s konvenční fluoroskopií C-ramenem. Hlavním cílem tohoto článku je posoudit účinnost počítačově asistované navigace ve srovnání s tradiční metodou pomocí C-ramena při transpedikulární fixaci s přihlédnutím ke zkušenosti operátorů a vyhodnocení učební křivky. Dalším zkoumaným faktorem je efektivita zavedení transpedikulární fixace, zahrnující čas zavedení šroubů a celkový operační čas. V naší studii porovnáváme skupinu pacientů s O-armem navigovanou transpedikulární fixací s retrospektivní kohortou pacientů s TPF za po-

moci konvenčního C-ramena. Pomocí těchto výsledků nabízíme srovnání v rámci operátorů a jejich zkušeností a učební křivku u mladších, méně zkušených operátorů se systémem O-arm.

MATERIÁL A METODIKA

Soubor pacientů

V naší studii jsme porovnávali dvě skupiny pacientů – retrospektivní s pomocí C-ramena a prospektivní s užitím O-arm navigace. Obě skupiny měly vstupní diagnózu degenerativní spinální bederní instability indikované k transpedikulární fixaci. Jednalo se o spondylolistézy degenerativního či isthmické typu v oblasti bederní páteře. Tito pacienti byli indikováni k provedení laminektomie s následnou transpedikulární fixací a intraartikulární fúzí nebo k výkonu PLIF (Posterior Lumbar Interbody Fusion) za pomoci buď C-ramena či O-arm navigace. U obou skupin jsme zavedení zkontrolovali pooperačním CT skenem ke zhodnocení přesnosti pozice instrumentace.

Do studie nebyli zařazeni pacienti s dysplastickým typem spondylolistézy či traumaty.

První skupinu tvořila retrospektivní kohorta pacientů, kteří byli sledováni v období let 2013-2014. Tato kohorta pacientů trpěla pouze diagnózou degenerativní spinální nestability (spondylolistézy) v oblasti bederní páteře. Všichni tito pacienti podstoupili dekompresivní laminektomii s transpedikulární fixací a intraartikulární fúzí. Operátoři byli atestovaní neuro a spondylochirurgové. Retrospektivní kohortu tvořilo 67 pacientů složenou z 22 mužů (32,8 %) a 45 žen (67,2 %). Věkové rozložení bylo s mediánem 63,0 let (20-90). Zavedeno bylo 282 šroubů (tab. 1).

V této době nebyla oficiálně vytvořena spondylochirurgická atestace, proto v textu označujeme jako spon-

Tab. 1. Srovnání demografických a základních technických parametrů sledovaných skupin

Table 1. Comparison of demographic and basic technical parameters of the studied groups

	C-Arm	O-Arm	p
Počet pacientů	67	62	–
Věk medián (min–max)	63,0 (20–90)	66 (42–79)	0,899
Pohlaví Muži/Ženy	22/45 (32,8% / 67,2%)	25/37 (40,3% / 59,7%)	0,377
Délka operace (minuty) medián (min–max)	119 (53–250)	180 (95–325)	< 0,0001
Počet šroubů vztaženo na pacienta medián (min–max)	4 (2–6)	4 (2–6)	0,671
Operátor Resident Spondylochirurg s atestací atest. NCH	0 60 7	43 19 0	–



Obr. 1. Zachycena navigační růžice fixovaná na processus spinosus bederní páteře po dekompresivní fázi operace.
Fig. 1. Picture of the reference frame attached to the spinous process of the lumbar spine after the decompression phase of surgery.

dylochirurgie atestované neurochirurgie s většinovým počtem operací ve spinální chirurgii.

Prospektivní vzorek jsme hodnotili v letech 2020–2022 s limitací počtu operačních výkonů pro celosvětovou pandemii virem SARS-CoV-2 (Covid-19). Skupina se skládá ze 62 pacientů, kteří splňovali kritéria zařazení do studie. Celkově jsme v této skupině implantovali 266 šroubů transpedikulárně. Rozložení souboru činilo 25 mužů (40,3 %) a 37 žen (59,7 %) s věkovým mediánem 66 let (42–79). Pacienti byli převážně operováni neurochirurgickými rezidenty (lékaři v předatestačním věku) s dohledem zkušených atestovaných neuro či spondylochirurgů. 3D scan byl zhotoven pomocí mobilního systému O-arm od firmy Medtronic. Výsledný obraz byl poté párován s navigačním systémem Stealth 7 rovněž od firmy Medtronic.

Jednotážová stabilizace byla nejfrekventovanějším výkonem s počtem čtyři šrouby na pacienta, a to v etáži L4 a L5, kdy tyto obratle vykazovaly nejvyšší počet zavedení, v obou skupinách.

Pacienti zařazení do C Arm a O Arm se nelišili signifikantně ve věku a pohlaví. Nebyl prokázán signifikantní rozdíl v počtu použitých šroubů u pacientů.

Operační výkon u retrospektivní skupiny začínal uložením pacienta do pronační polohy, po klasickém zadním přístupu k páteři byla provedena dekomprese dané etáže laminectomií. Poté jsme pod kontrolou C-ramena v boční a předozadní projekci zavedli standardně transpedikulárně šrouby do nestabilních segmentů technikou Roy-Camille a doplnili intraartikulární (facetární) fúzi daného segmentu.

U prospektivní skupiny byl pacient uložen do pronační polohy na operační stůl s radiolucentní karbonovou deskou. Opět jsme výkon zahájili laminectomií etáže a posléze umístili na sousedící processus spinosus navigační držák, na nějž byla připevněna navigační růžice (obr. 1). Operační pole bylo sterilně překryto. Na operační sál byl dovezen O-arm scan s otevíratelnou gantry,

ry, která byla nastavena nad oblast zájmu, a poté uzavřena. Následně byl proveden 3D scan podobný CT tomogramu a výsledné snímky přeneseny do navigačního systému (obr. 2).

V druhé fázi operace jsme zaregistrovali nástroje a pomocí „real-time“ navigační technologie provedli transpedikulární inzerci šroubů systému Usmart (Bonicare) standardního průměru 6,5 mm a dle anatomických možností s délkami v rozmezí 40–55 mm (obr. 3). Pooperačně jsme u obou skupin provedli 3D zobrazení pomocí CT a hodnotili míru malpozice dle systému Grade, který je zjednodušenou modifikací Gertzbein a Robbins klasifikace z roku 1990. Grade 0 se jedná o přísně intrapedikulární zavedení šroubu. Grade 1 označuje proniknutí implantátu mimo pedikl o < 2 mm, Grade 2 v rozmezí 2–4 mm a Grade 3 > 4 mm. Pozice Grade 0 a 1 jsou považovány za insignifikantní a Grade 2 a 3 jako signifikantní. U retrospektivní skupiny jsme měli k dispozici k hodnocení pooperační CT sken a u prospektivní O-arm sken. Ten byl proveden po zavedení instrumentace na sále s možností následné reinzercce v jedné operační době. Rovněž jsme hodnotili i anatomický směr malpozice daného šroubu – mediální, laterální, kaudální a kraniální.

Dále byly sledovány proměnné jako operační čas a zkušenosti operátora, jež reprezentovala dosažená specializace v oboru a afinita k dané větvi v neurochirurgii – kraniální či spondylochirurgie.

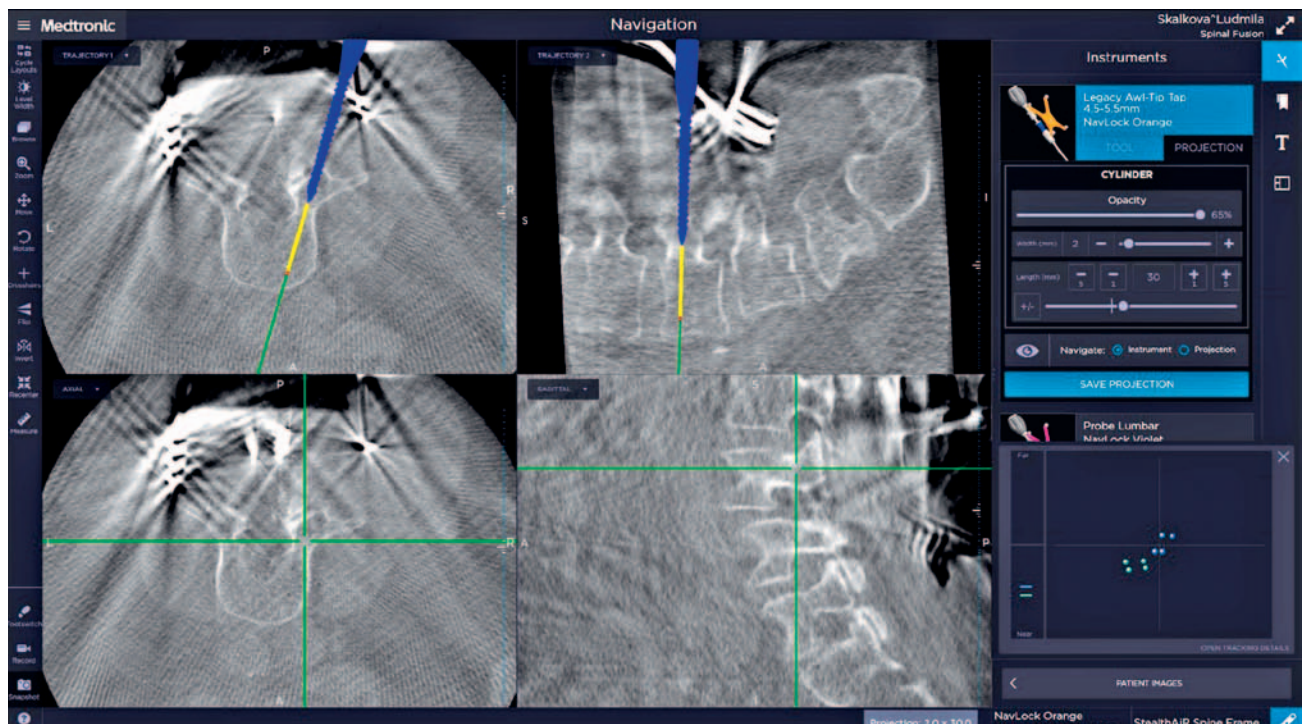
V O-arm skupině jsme navíc hodnotili učební křivku (learning curve) rozdělením celého souboru do tří skupin, které na sebe chronologicky navazovaly. V nich jsme porovnali vztahy mezi operačními časy, časy scanu, časy instrumentace a časy inzercí jednotlivých šroubů od prvního po poslední pacienta od ledna roku 2020 až po prosinec 2022. Tato data jsme rozdělili do tří chronologicky po sobě jdoucích skupin a statisticky porovnali vztahy mezi nimi.

Celkem 9 operátorů se podílelo na výkonech v O-arm skupině. Z nich se jednalo o 7 neurochirurgických rezidentů – lékařů v atestační přípravě pod dohle-



Obr. 2. Sterilně překryté operační pole s již uzavřenou gantry systémem O-arm.

Fig. 2. Covered sterile operating field with already closed gantry of the O-arm system.



Obr. 3. Snímek navigační obrazovky systému Stealth 8 (Medtronic) při předvrtání a následné inzerci šroubu transpedikulárně.
Fig. 3. Screenshot of the StealthStation S8 (Medtronic) navigation system during pre-drilling and subsequent transpedicular insertion of the screw.

Tab. 2. Porovnání časů jednotlivých fází výkonů v průběhu nabývání zkušeností s O-arm metodou.

Table 2. Comparison of times of each phase of procedure when acquiring experience with the O-arm method

			t_0	t_s	t_i	t_{sroub}	N_{sroub}	t_{inst}
Interval	1	Medián	235,00	24,00	24,00	6,00	4,00	25,00
		Min	196,00	21,00	18,00	4,50	3,00	18,00
		Max	325,00	42,00	38,00	8,33	6,00	37,00
		Průměr	248,00	26,58	26,84	5,98	4,37	25,89
		SD	40,81	5,53	5,84	0,94	0,90	5,55
	2	Medián	185,00	18,00	17,00	3,75	4,00	15,00
		Min	135,00	15,00	10,00	2,25	2,00	7,00
		Max	232,00	25,00	26,00	4,25	6,00	23,00
		Průměr	181,55	18,85	17,35	3,40	4,15	14,10
		SD	23,91	2,80	4,32	0,62	0,93	4,18
	3	Medián	120,00	10,00	11,00	2,00	4,00	8,00
		Min	95,00	5,00	6,00	1,25	2,00	3,00
		Max	163,00	18,00	16,00	2,75	6,00	13,00
		Průměr	119,61	10,22	10,96	1,94	4,35	8,39
		SD	17,46	3,19	2,01	0,37	0,98	2,15
p			< 0,0001 ^a	< 0,0001 ^a	< 0,0001 ^b	< 0,0001 ^b	0,696	< 0,0001 ^b
post hoc testy s Bonferroniho korekcí (porovnání intervalů po dvojicích)		1 vs 2	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	---	< 0,0001
		1 vs 3	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	---	< 0,0001
		2 vs 3	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	---	< 0,0001

t_0 – délka operace; t_s – čas scanu; t_i – čas instrumentace; $t_{\text{šroub}}$ – průměrný čas inzerci šroubu; $N_{\text{šroub}}$ – počet šroubů; t_{inst} – t instrumentace; a – Kruskalův-Wallisův test; b – ANOVA

t_0 – operative time; t_s – time of the scan; t_i – time of instrumentation; $t_{\text{šroub}}$ – average time of screw insertion; $N_{\text{šroub}}$ – number of screws; t_{inst} – t instrumentation; a – Kruskal-Wallis test; b – ANOVA

dem atestovaného kolegy – a 2 atestované neurochirurgy s afinitou ke spondylochirurgii. Ve skupině s C-ramenem bylo v operační skupině 7 atestovaných neurochirurgů, z nichž dva se zaměřením na spondylochirurgii (tab. 1).

V časové posloupnosti mezi lety 2020–2022 jsme pacienty chronologicky rozdělili do po sobě jdoucích tří skupin v časovém odstupu od zavedení metody. První skupina od zavedení metody čítala 19 pacientů s implantací 83 šroubů. Druhá skupina se skládala z 20 pacientů rovněž s 83 šrouby a třetí skupina obsahovala 23 pacientů a implantovali jsme 100 šroubů (tab. 4).

Ke statistickému zpracování byl použit statistický software IBM SPSS Statistics for Windows, Version 23.0. Armonk, NY: IBM Corp.

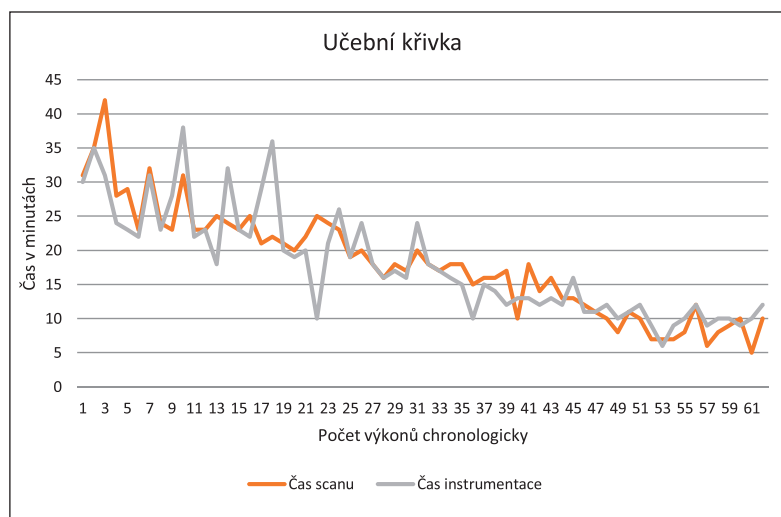
Kvantitativní proměnné byly prezentovány pomocí mediánů, minimálních a maximálních hodnot, průměrů a směrodatných odchylek (SD). Shapirovým-Wilkovým testem byla ověřena normalita. V případě normálního rozložení byly skupiny porovnány pomocí analýzy rozptylu (ANOVA) s Bonferroniho post hoc testy. V případě nenormální distribuce byla použita neparametrická obdoba Kruskalův-Wallisův test s post hoc testy s Bonferroniho korekcí.

Těmito testy byly prokázány statisticky významné rozdíly u všech proměnných kromě proměnné počet šroubů – zde signifikantní rozdíl nebyl. Následně provedené post hoc testy prokázaly statisticky významné rozdíly mezi 1. a 2. intervalem, 1. a 3. intervalem i mezi 2. a 3. intervalem.

Všechny testy byly provedeny na hladině signifikance 0,05. Pokud byla p-hodnota nižší než 0,05, byly považovány rozdíly za statisticky významné, jsou označeny červeně.

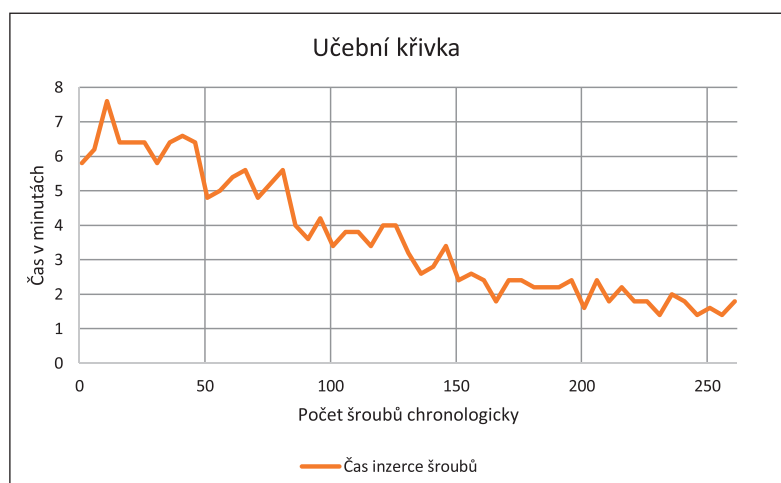
Při hodnocení zkušeností operátora jsme u retrospektivní skupiny zaznamenali 67 operací provedených atestovanými neurochirurgy, z nichž v 60 případech byly provedeny atestovanými spondylochirurgy, což je kompletní zastoupení daného souboru. Zatímco u prospektivní skupiny bylo v roli hlavního operátora v 13 případech atestovaný neurochirurg a u 49 výkonů neurochirurg v předatestační přípravě (rezident) (tab. 1).

Při hodnocení učební křivky jsme v prvním intervalu operantů zaznamenali průměrný čas operace 248 minut, prů-



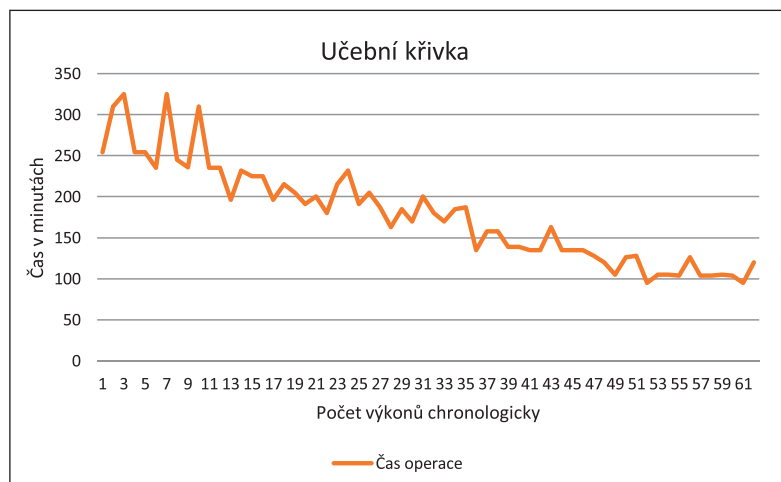
Graf 1. Klesající tendence potřebného času na akviziční čas skenu a času nutného pro instrumentaci.

Graph 1. Declining trend of the CT acquisition time and the instrumentation time.



Graf 2. Čas inserce jednotlivých šroubů v časovém odstupu od zavedení metody.

Graph 2. Time of insertion of individual screws since the introduction of the method.



Graf 3. Klesající tendence celkového operačního času.

Graph 3. Declining trend in the total operative time.

měrný čas scanu 26,58 minut, průměrný čas instrumentace 26,84 minut a průměrný čas inserce jednoho šroubu 5,98 minut.

U druhého intervalu byl průměrný čas operace 181 minut, průměrný čas scanu 18,85 minut, průměrný čas instrumentace 17,35 minut a průměrný čas inserce jednoho šroubu 3,40 minut.

A v třetím, posledním, sledovacím období jsme zaznamenali průměrný čas operace 119 minut, průměrný čas scanu 10,22 minut, průměrný čas instrumentace 10,96 minut a průměrný čas inserce jednoho šroubu 1,94 minuty (tab. 2).

Učební křivka je graficky zobrazena v grafech 1 až 3.

Délka operace byla signifikantně kratší v souboru C-Arm ($p < 0,0001$) s průměrem 119 minut na operaci (53;250), zatímco v O-arm skupině 180 minut (95;325) (tab. 1).

Tabulka 3 zobrazuje výsledky míry celkové malpozice a zastoupení insignifikantních (Grade 0 a Grade 1) a signifikantních (Grade 2 a Grade 3) malpozic. Dále rovněž hodnotí korelaci malpozic s operovanou etáží. V souboru O-arm byl prokázán statisticky nižší výskyt malpozice (3,0 % versus 8,2 %) ($p = 0,010$) a signifikantně nižší výskyt signifikantní malpozice tedy Grade 2 a 3 (0,8 % vs. 3,9 %) ($p = 0,022$).

V skupině C-ramena byla nejčastější anatomická rovina úniku mimo pedikl mediální v 11 případech, v O-arm skupině naopak laterální ve 3 případech (tab. 4).

Celkově 43 výkonů v prospektivní skupině provedli lékaři v predatestační přípravě s mírou malpozice 4,2 % a signifikantní malpozice 0,6 %.

DISKUSE

Dosud v žádné studii nebyl referován vliv zkušenosti operátorů na přesnost zavedení šroubů dané metody. Dle dostupné literatury je toto první studie, která porovnává dvě skupiny operátorů – atestovaných neurochirurgů vůči neurochirurgům v atestační přípravě. I přes nižší dosaženou erudici prospektivní skupiny bylo dosaženo vyšší přesnosti zavedení šroubů ve skupině. Vztáhneme-li data z prospektivní skupiny pouze na výkony prováděné rezidenty, nadále dosahuje O-arm větší přesnosti zavedení.

Naše studie potvrzuje postupné zlepšení v jednotlivých operačních časech a segmentech operace, jak jsme zaznamenali v učební křivce. Urychlení jednotlivých fází výkonů lze pozorovat na grafech. Během dvou let jsme byli schopni se přiblížit k operačním časům degenerativních spondylolýz s klasickým C-ramenem. Podobnou křivku učení rovněž pozorovali Ryang et al., jenž rovněž měřili časy jednotlivých segmentů operace ve čtyřech chronologicky oddělených skupinách (28). Mnoho publikací již prokazuje rostoucí trend spinálních fúzí, hlavně z dat v USA, kdy mezi lety 1996 až 2001 došlo k navýšení o 77 % (8). Rajae et al. analyzovali počty výkonů z let 1998 až 2008 s výsledným vzestupem 2,4krát (137 %) pro spinální fúzní operace

Tab. 3. Zastoupení jednotlivých šroubů na operovaný segment s vyhodnocením míry malpozice u jednotlivých skupin

Table 3. Representation of individual screws per operated segment with evaluation of malposition rate by group

	C-Arm	O-Arm	P
Počet šroubů celkem	282	266	–
Počet šroubů na etáž			
L1	2	–	
L2	6	8	
L3	45	48	
L4	122	73	
L5	102	83	
L6	4	4	
S1	4	44	
P	–	6	
Přesnost šroubů			
Grade 0	259	258	
Grade 1	12	6	
Grade 2	8	1	
Grade 3	3	1	
Malpozice celkem	23 (8,2 %)	8 (3,0 %)	0,010
Malpozice signifikantní	11 (3,9 %)	2 (0,8 %)	0,022
Malpozice dle etáže			
L3	3	1	1,000
L4	6	2	
L5	11	4	
L6	1	0	
S1	2	1	

Tab. 4. Směr malpozice při deviaci mimo pedikl

Table 4. Direction of malposition in deviations outside the pedicle

Anatomická rovina malpozice	O-arm	C-arm
Mediální	0	11
Laterální	3	8
Kraniální	1	1
Kaudální	0	2

(25). Na našem pracovišti došlo za posledních 10 let k navýšení spinální operativy o 32 % a z toho zvětšení poměru instrumentací pro degenerativní postižení bederní páteře proti samotné dekompresi z 29 % v roce 2012 na 57 % v roce 2022 (graf 4). Celosvětový trend rovněž naznačuje ústup od samostatných dekompresivních výkonů a zvětšení procentuálního zastoupení spinálních instrumentací (27, 32).

Přesnost zavedení šroubů u spinálních instrumentovaných výkonů za pomoci intraoperační navigace je již v současnosti zkoumána v mnoha studiích (14, 19, 33, 43, 47). Přesto některé studie udávají míru malpozice 1,5 %–4 % pro konvenční fluoroskopii C-ramenem, zatímco 9 % pro navigační metodu spojenou s O-armem (15, 42, 45).

Naše studie vykazuje přesnost zavedení šroubů u flouroskopie 96,1 % s malpozicí 3,9 %, což je lepší než v literatuře uváděné rozmezí malpozice od 10 % (18) do 40 % (6). Zaznamenali jsme 1 % Grade 3 malpozic v porovnání s Castrem et al. (6), kteří prezentovali 5,7 % malpozic u 123 šroubů zavedených v bederní páteři. Jiné výsledky publikovali Sildermann et al., kteří ve svém souboru sice nereférovali jedinou Grade 3 malpozici, ovšem použili jiné proměnné k zařazení do Grade 3, a to perforace >6 mm (33).

Dle metaanalýzy zpracované Aoude et al. většina autorů hodnotí Grade 1 jako insignifikantní a Grade 2 a 3 jako signifikantní malpozici (4). U O-arm skupiny jsme zaznamenali přesnost 99,1 %. Pouze dva šrouby z 266 vykazovaly signifikantní malpozici. Podobná přesnost u CT navigací je referována i jinými autory (16, 33). Je zřejmé, že naše zkušenosti instrumentací s C-ramenem nám umožnily referovat relativně nízké procento malpozic. Přesto navigační systém O-arm vykazoval vyšší přesnost i přes nízké zkušenosti některých operátorů.

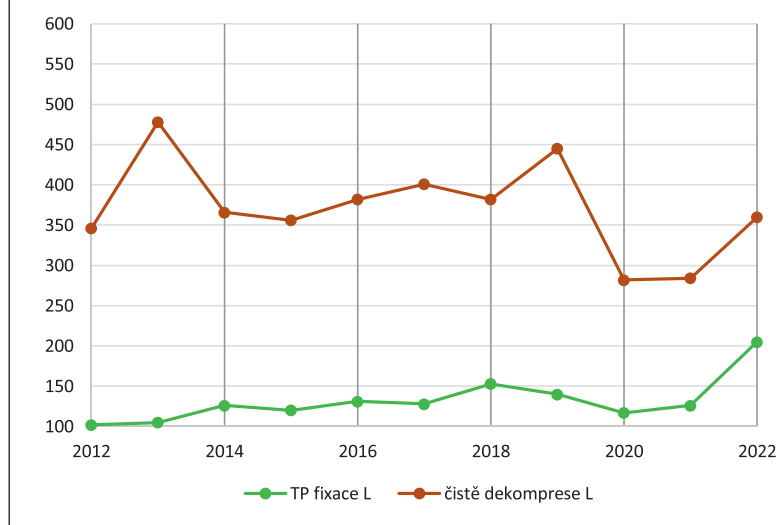
Meta analýzy porovnávající přesnost zavedení transpedikulární fixace mezi flouroskopií a CT navigačními metodami jasně svědčí ve prospěch navigačního systému (10, 36). Celkem 8 studií z těchto metaanalýz rovněž porovnávalo operační čas (17, 20–23, 30, 34). Z výsledků vyplývá, že použití intraoperačního CT navigačního systému může prodloužit operační čas. Feng et al. ve své metaanalýze prokázali kratší operační čas za použití flouroskopie C-ramenem (20, 37).

Tato observace je ve shodě s našimi výsledky, kdy jsme referovali statisticky signifikantně delší operační čas u O-arm skupiny (medián 180 minut) proti C-arm skupině (medián 119 minut). Relativně dlouhý operační čas přisuzujeme nízkým iniciálním zkušenostem s přístrojem, které se nepříznivě podepsaly na parametrech, a hlavně nepříznivé logistické situaci na našem sále, při níž O-arm není přítomen na operačním sále, ale je vždy v průběhu operace přivezen na operační sál koridorem. Rozdílné výsledky prezentují Knafo et al., kteří nepozoroval rozdíly v operačních časech mezi O-armem a flouroskopií (16). Vyrovnání časů může být dosaženo systémem poziční paměti O-armu. Při dostatečné rozloze sálu je O-arm sám schopen najet opět do skenující pozice a zpátky s minimálním ovlivněním „work-flow“ na sále.

Celkově čtyři autoři reprezentativně sledovali čas samotné inzerce šroubů s mírnou výhodou pro O-arm (20, 29, 34, 35). V našem souboru jsme dosáhli obdobných výsledků.

Jasnou nevýhodou O-arm techniky pro pacienta je zvýšená radiační zátěž. Standardní O-arm sken dosahuje 60% intenzity běžného CT skenu dle oficiálních fi-

Poměr dekompresivních výkonů a spinálních TP fixací na bederní páteři 2012-2022



Graf 4. Trend ročního počtu výkonů.

Graph 4. Trend in the annual number of procedures.

remních měření radiačních emisí. (Medtronic, USA). Chang et al. detailněji porovnávali radiační zátěž pacienta mezi O-arm a C-arm minimálně invazivní instrumentací (TLIF) a z těchto výsledků je patrné, že radiační expozice u mono-segmentální instrumentace (MIS-TLIF, 4 šrouby) je zatížena dvojnásobnou dávkou radiace O-arm skupiny. Při více než jednom operovaném segmentu (>6 šroubů) a u pacientů s vysokým BMI je dávka radiace srovnatelná u navigační i flouroskopické skupiny (7). Na druhou stranu u použití O-arm systému odpadá radiační riziko pro operační personál a rovněž se zlepšuje komfort během operace, neboť chirurg není zatížen olověnou vestou.

Výhodou naší studie je relativní homogenost sledované skupiny a porovnání mezi operátory v rámci zkušeností. Možnou nevýhodou je retrospektivní vzorek pacientů flouroskopické skupiny, kdy současná přesnost zavedení šroubů a operační časy mohou být u zkušených operátorů vyšší. Rovněž v retrospektivním vzorku nebyly přítomny výkony PLIF u spondylolistéz istmického typu. Přesto jsme prokázali, že O-arm navigace vykazují vyšší přesnost.

ZÁVĚR

Na základě získaných dat lze konstatovat, že O-arm navigace ve spondylochirurgii představuje bezpečnější a přesnější metodu pro transpedikulární fixaci ve srovnání s tradiční technikou C-ramenem a dokonce i v rukou méně zkušených operátorů. Křivka učení naznačuje, že i přes počáteční časovou náročnost může operační čas navigační metody postupně dosáhnout času metody tradiční. Tato studie je první, která porovnává přesnost a efektivitu navigačních technik v závislosti na zkušenostech operátorů.

Literatura

- Annoni E, Joedicke H, Barnett GS. The 3D O-arm surgical imaging system with navigation effectively and economically addresses the challenges of spinal stabilization procedures. *Value Health*. 2013;16:A556.
- Arand M, Hartwig E, Kinzl L, Gebhard F. Spinal navigation in tumor surgery of the thoracic spine: first clinical results. *Clin Orthop Relat Res*. 2002;399:211–218.
- Arand M, Schempf M, Kinzl L, Fleiter T, Pless D, Gebhard F. Precision in standardized Iso-C-arm based navigated boring of the proximal femur. *Unfallchirurg*. 2001;104:1150–1156.
- Aoude AA, Fortin M, Figueiredo R, Jarzem P, Ouellet J, Weber MH. Methods to determine pedicle screw placement accuracy in spine surgery: a systematic review. *Eur Spine J*. 2015;24:990–1004. doi: 10.1007/s00586-015-3853-x.
- Boriani S, Bandiera S, Donthineni R, Amendola L, Cappuccio M, De Iure F. Morbidity of en bloc resections in the spine. *Eur Spine J*. 2010;19:231–241.
- Castro WH, Halm H, Jerosch J, Malms J, Steinbeck J, Blasius S. Accuracy of pedicle screw placement in lumbar vertebrae. *Spine*. 1996;21:1320–1324.
- Chang CC, Chang HK, Wu JC, Tu TH, Cheng H, Huang WC. Comparison of radiation exposure between O-arm navigated and C-arm guided screw placement in minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion. *World Neurosurg*. 2020;139:e489–e495. doi: 10.1016/j.wneu.2020.04.052.
- Deyo RA, Mirza SK, Martin BI, Kreuter W, Goodman DC, Jarvik JG. Trends, major medical complications, and charges associated with surgery for lumbar spinal stenosis in older adults. *JAMA*. 2010;303:1259–1265.
- Epstein NE. Commentary: utility of the O-arm in spinal surgery. *Surg Neurol Int*. 2014;5:S517–S519, (Schils F. O-arm guided balloon kyphoplasty: preliminary experience of 16 consecutive patients. *Acta Neurochir Suppl*. 2011;109:175–178).
- Feng W, Wang W, Chen S, Wu K, Wang H. O-arm navigation versus C-arm guidance for pedicle screw placement in spine surgery: a systematic review and meta-analysis. *Int Orthop*. 2020;44:919–926. doi: 10.1007/s00264-019-04470-3.
- Gebhard F, Weidner A, Liener UC, Stockle U, Arand M. Navigation at the spine. *Injury* 35(Suppl 1):S-A35–S-A45. (Merloz P, Troccaz J, Vouaillat H, Vasile C, Tonetti J, Eid A. (2007) Fluoroscopy-based navigation system in spine surgery. *Proc Inst Mech Eng H*. 2007;221:813–820).
- Gertzbein SD, Robbins SE. Accuracy of pedicular screw placement in vivo. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1990;15:11–14.
- Grob D, Magerl F, McGowan DP. Spinal pedicle fixation: reliability and validity of roentgenogram-based assessment and surgical factors on successful screw placement. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1990;15:251.
- Jaiswal A, Shetty AP, Rajasekaran S. Role of intraoperative iso-c based navigation in challenging spine trauma. *Indian J Orthop*. 2007;41:312–317.
- Kim YJ, Lenke LG, Bridwell KH, Cho YS, Riew KD. Free hand pedicle screw placement in the thoracic spine: is it safe? *Spine (Phila Pa 1976)*. 2004;29:333–342, discussion 42.
- Knafo S, Mireau E, Bennis S, Baussart B, Aldea S, Gaillard S. Operative and perioperative durations in O-Arm vs C-Arm fluoroscopy for lumbar instrumentation. *Oper Neurosurg (Hagerstown)*. 2018;14:273–278. doi: 10.1093/ons/opx142. PMID: 28973631.
- Lavallee S, Sautot P, Troccaz J, Cinquin P, Merloz P. Computer-assisted spine surgery: a technique for accurate transpedicular screw fixation using CT data and a 3-D optical localizer. *J Image Guid Surg*. 1995;1:65–73.
- Learch TJ, Massie JB, Pathria MN, Ahlgren BA, Garfin SR. Assessment of pedicle screw placement utilizing conventional radiography and computed tomography: a proposed systematic approach to improve accuracy of interpretation. *Spine*. 2004;29:767–773.
- Lekovic GP, Potts EA, Karahalios DG, Hall G. A comparison of two techniques in image-guided thoracic pedicle screw placement: a retrospective study of 37 patients and 277 pedicle screws. *J Neurosurg Spine*. 2007;7:393–398.
- Liu H, Wang YM, Pi B, Qian ZL, Zhu XY, Yang HL. Comparison of intraoperative O-arm- and conventional fluoroscopy (C-arm)-assisted insertion of pedicle screws in the treatment of fracture of thoracic vertebrae. *J Orthop Surg*. 2017;25:1–6.
- Merloz P, Tonetti J, Eid A, Faure C, Lavallee S, Troccaz J. Computer assisted spine surgery. *Clin Orthop Relat Res*. 1997;337:86–96.
- Mirza SK, Wiggins GC, Kuntz C, York JE, Bellabarba C, Kwonodi MA. Accuracy of thoracic vertebral body screw placement using standard fluoroscopy, fluoroscopic image guidance, and computed tomographic image guidance: a cadaver study. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2003;28:402–413.
- Nakagawa H, Kamimura M, Uchiyama S, Takahara K, Itsubo T, Miyasaka T (2003) The accuracy and safety of image-guidance system using intraoperative fluoroscopic images: an in vitro feasibility study. *J Clin Neurosci*. 2003;10:226–230.
- Niessen WJ. Accuracy evaluation of direct navigation with an isocentric 3D rotational X-ray system. *Med Image Anal*. 2006;10:113–124.
- Rajae SS, Bae HW, Kanim LEA, Delamarter RB. Spinal fusion in the United States: analysis of trends from 1998 to 2008. *Spine* 2012;37:67–76.
- Rampersaud YR, Foley KT, Shen AC, Williams S, Solomito M. Radiation exposure to the spine surgeon during fluoroscopically assisted pedicle screw insertion. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2000;25:2637–2645.
- Reisner MJ, Pumberger M, Shue J, Girardi FP, Hughes AP. Trends in lumbar spinal fusion—a literature review. *J Spine Surg*. 2020;6:752–761. doi: 10.21037/jss-20-492.
- Ryang YM, Villard J, Obermüller T, Friedrich B, Wolf P, Gempt J, Ringel F, Meyer B. Learning curve of 3D fluoroscopy image-guided pedicle screw placement in the thoracolumbar spine. *Spine J*. 2015;15:467–476. doi: 10.1016/j.spinee.2014.10.003.
- Scalfani JA, Regev GJ, Webb J, Garfin SR, Kim CW. Use of a quantitative pedicle screw accuracy system to assess new technology: initial studies on O-arm navigation and its effect on the learning curve of percutaneous pedicle screw insertion. *SAS J*. 2011;5:57–62.
- Schils F. O-arm guided balloon kyphoplasty: preliminary experience of 16 consecutive patients. *Acta Neurochir Suppl*. 2011;109:175–178.
- Schlenzka D, Laine T, Lund T. Computer-assisted spine surgery. *Eur Spine J*. 2000;9(Suppl 1):S57–S64.
- Sheikh SR, Thompson NR, Benzel E, Steinmetz M, Mroz T, Tomic D, Machado A, Jehi L. Can we justify it? Trends in the utilization of spinal fusions and associated reimbursement. *Neurosurgery*. 2020;86:E193–E202.
- Silbermann J, Riese F, Allam Y, Reichert T, Koeppert H, Gutberlet M. Computer tomography assessment of pedicle screw placement in lumbar and sacral spine: comparison between free-hand and O-arm based navigation techniques. *Eur Spine J*. 2011;20:875–881. doi: 10.1007/s00586-010-1683-4.
- Shin MH, Ryu KS, Park CK. Accuracy and safety in pedicle screw placement in the thoracic and lumbar spines: comparison study between conventional C-arm fluoroscopy and navigation coupled with O-arm® guided methods. *J Korean Neurosurg Soc*. 2012;52:204–209.
- Shin MH, Hur JW, Ryu KS, Park CK. Prospective comparison study between the fluoroscopy-guided and navigation coupled with O-arm-guided pedicle screw placement in the thoracic and lumbosacral spines. *J Spinal Disord Tech*. 2015;28:E347–EE51.
- Sun J, Wu D, Wang Q, Wei Y, Yuan F. Pedicle Screw Insertion: Is O-Arm-based navigation superior to the conventional freehand technique? A systematic review and meta-analysis. *World Neurosurg*. 2020 Dec;144:e87–e99. doi: 10.1016/j.wneu.2020.07.205. Epub 2020 Aug 3. PMID: 32758654.

37. Tajsic T, Patel K, Farmer R, Mannion RJ, Trivedi RA. Spinal navigation for minimally invasive thoracic and lumbosacral spine fixation: implications for radiation exposure, operative time, and accuracy of pedicle screw placement. *Eur Spine J*. 2018;27:1918–1924.
38. Talotta J. Key to the future: O-arm. *J Med Imaging Radiat Sci*. 2012;43:S63.
39. Tjardes T, Shafizadeh S, Rixen D, Paffrath T, Bouillon B, Steinhäusen ES. Image-guided spine surgery: state of the art and future directions. *Eur Spine J*. 2010;19:25–45, (Van de Kraats EB, Van Walsum T, Kendrick L, Noordhoek NJ,
40. Tian NF, Xu HZ. Image-guided pedicle screw insertion accuracy: a meta-analysis. *Int Orthop*. 2009;33:895–903.
41. Van Brussel K, Vander Sloten J, Van Audekercke R, Fabry G. Internal fixation of the spine in traumatic and scoliotic cases. The potential of pedicle screws. *Technol Health Care*. 1996;4:365–384.
42. Van de Kelft E, Costa F, Van der Planken D, Schils F. A prospective multicenter registry on the accuracy of pedicle screw placement in the thoracic, lumbar, and sacral levels with the use of the O-arm imaging system and StealthStation navigation. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2012;37:E1580–E1587.
43. van de Kraats EB, van Walsum T, Kendrick L, Noordhoek NJ, Niessen WJ. Accuracy evaluation of direct navigation with an isocentric 3D rotational X-ray system. *Med Image Anal*. 2006;10:113–124.
44. Weinstein JN, Spratt KF, Spengler D, Brick C, Reid S. Spinal pedicle fixation: reliability and validity of roentgenogram-based assessment and surgical factors on successful screw placement. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1988;13:1012–1018.
45. Wood M, Mannion R. A comparison of CT-based navigation techniques for minimally invasive lumbar pedicle screw placement. *J Spinal Disord Tech*. 2011;24:E1–E5.
46. Xu R, Ebraheim NA, Ou Y, Yeasting RA. Anatomic considerations of pedicle screw placement in the thoracic spine. Roy-Camille technique versus open-lamina technique. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1998;23:1065–1068.
47. Yang YL, Zhou DS, He JL. Comparison of isocentric C-arm 3-dimensional navigation and conventional fluoroscopy for C1 lateral mass and C2 pedicle screw placement for atlantoaxial instability. *J Spinal Disord Tech*. 2013;26:127–134.

Korespondující autor:

MUDr. Jakub Jablonský

Neurochirurgická klinika Fakultní nemocnice Olomouc
Zdravotníků 248/7

779 00 Olomouc

E-mail: jakub.jablonsky@fnol.cz