

E. Fritsch¹ · J. Duchow¹ · R. Seil¹ · I. Grunwald² · W. Reith²

¹ Orthopädische Universitätsklinik Homburg/Saar

² Institut für Neuroradiologie Universitätskliniken des Saarlandes, Homburg

Genauigkeit der fluoroskopischen Navigation von Pedikelschrauben

CT-basierte Evaluierung der Schraubenlage

Zusammenfassung

Obwohl die Vorteile bildwandlergestützter Navigationssysteme offensichtlich sind, ist die Genauigkeit der Pedikelschraubenplatzierung mit „virtual fluoroscopy“ im klinischen Alltag noch unzureichend evaluiert.

In einer prospektiven Studie wurden 160 Pedikelschrauben mit dem bildwandlergestützten ION-Navigationssystem (Medtronic Surgical Navigation Technology) bei den ersten 30 konsekutiven Patienten seit Einführung des Systems an der Klinik eingebracht. Postoperativ erfolgte die Evaluierung der Schraubenlage mittels Dünnschicht-Spiral-CT-Untersuchung und Rekonstruktionen axial und 90° zum Pedikel für jede Schraube in Anlehnung an Laine et al. durch 2 unabhängige Neuroradiologen.

Der Vergleich der ermittelten Rate ideal platzierter Pedikelschrauben an der thorakalen und lumbalen Wirbelsäule unter fluoroskopischer Navigation mit publizierten Ergebnissen für die CT-gestützte Navigation zeigt fast identisch hervorragende Ergebnisse für „virtual fluoroscopy“ und eine erhebliche Verbesserung gegenüber Berichten über Fehlplatzierungsraten mit konventionellen Insertionstechniken.

Aufgrund der einfachen Handhabung eignet sich die bildwandlergestützte Navigation hervorragend für den Routineeinsatz an der lumbalen und fast der gesamten thorakalen Wirbelsäule.

Schlüsselwörter

Bildwandlergestützte Navigationssysteme · Pedikelschraubenplatzierung · „Virtual fluoroscopy“

Seit der Einführung der Wirbelsäulenfixation durch transpedikuläre Schrauben in die klinische Praxis durch Roy-Camille [22] werden Pedikelschrauben in Verbindung mit Platten oder Stäben (Fixateur interne) mehr und mehr bei verschiedenen Indikationen zur spinalen Fusion verwendet.

Durch die Verwendung von Pedikelschrauben respektive Fixateur interne – Instrumentierungen sind höhere Fusionsraten nachgewiesen [3, 28] was v. a. auf die im Vergleich zu anderen Stabilisierungsverfahren verbesserten biomechanischen Eigenschaften zurückzuführen ist [15, 27].

Das Hauptproblem bei der transpedikulären Schraubenfixation liegt wohl darin, dass bei einer Fehlplatzierung aufgrund der engen anatomischen Beziehung zum Rückenmark im thorakalen Bereich [26] und zur Nervenwurzel im lumbalen Bereich [4] die Gefahr einer neurologischen Komplikation besteht. Die Inzidenz einer neurologischen Komplikation durch eine Pedikelschraubenfehlplatzierung wird in der Literatur mit bis zu 7% angegeben [5].

Diese Gefahr besteht v. a. bei einer medialen Fehlplatzierung. Das Ausmaß der Fehlplatzierung, ab dem eine eindeutige Gefahr der Kompromittierung neurologischer Strukturen besteht, wird zwischen >2 mm [10, 26] und >6 mm [11, 24] medial Fehlplatzierung angegeben.

Vor diesem Hintergrund und bei publizierten Fehlplatzierungsraten von bis zu 39,9% insgesamt nicht ideal platzierter Pedikelschrauben und 28,5% medial fehlplatzierter Pedikelschrauben

[11] ist es nachvollziehbar, dass eines der ersten Einsatzgebiete der sog. computerassistierten Chirurgie, nämlich der Einsatz der CT-basierten Navigationstechnik, die Verbesserung der Positionierung von Pedikelschrauben zum Ziel hatte [16, 22].

Die Verbesserung der Rate ideal platzierter Pedikelschrauben an der lumbalen und der thorakalen Wirbelsäule durch CT-gestützte Navigation ist zwischenzeitlich durch prospektive randomisierte vergleichende Studien belegt [2, 14].

Die CT-gestützte Navigation hat jedoch v. a. im routinemäßigen täglichen Einsatz Limitationen. Gebhard et al. [9] führen hierzu folgende Punkte auf:

- Die nach wie vor begrenzte Rechnerkapazität begrenzt die zur Verfügung stehenden Bildausschnitte und die maximal verfügbaren CT-Schnitte; die präoperative Planung wird durch Scanprotokolle und Artefakte beeinflusst; das zugrunde liegende CT bildet die präoperative Anatomie ab, sodass nur unversehrte Wirbelkörper navigiert werden können.
- Fehlnavigationen sind trotz korrektem intraoperativen Matchingergebnis durch mathematische Verkipfung der Wirbelkörper möglich und nur durch Durchleuchtung zu erkennen.

Priv.-Doz. Dr. Ekkehard Fritsch
Orthopädische Universitätsklinik,
66421 Homburg/Saar,
E-Mail: ekkehard.fritsch@uniklinik-saarland.de

Accuracy of fluoroscopic navigation of pedicle screws. Assessment of screw placement by computed tomography

Abstract

While the advantages of C-arm navigation in computer-assisted spine surgery are obvious, the accuracy of pedicle screw placement with virtual fluoroscopy still needs to be verified.

The C-arm-based ION system (Medtronic Sofamor Danek) was used to navigate pedicle screw insertion in patients undergoing spinal surgery for various conditions. In a prospective study, a total of 160 screws were inserted in the first 30 consecutive patients since introduction of the system at our institution: 54 at the thoracic spine (highest level: TH4) and 106 at the lumbar spine.

Computed tomography (CT) scans were performed postoperatively by two independent radiologists to control the accuracy of screw placement at the level of the pedicles after reconstruction of axial images according to Laine et al.

The comparison of the calculated accuracy rate of pedicle screw placement using virtual fluoroscopy with reported results achieved with CT-based navigation shows similar results for virtual fluoroscopy and a remarkable increase of accuracy in comparison to reports on conventional pedicle screw placement.

Keywords

Spine · Pedicle screws ·
Computer-assisted surgery ·
Fluoroscopic navigation · Accuracy

Zum Thema: Instrumentierungen



Abb.1 ◀ Intraoperativer Situs: am Processus spinosus angebrachte Referenzklemme



Abb.2 ◀ Intraoperativer Situs: Bestimmung des Schraubeneintrittspunktes mit dem Pointer

nen; eine intraoperative Erfassung von repositionsbedingten Änderungen des präoperativen Datensatzes ist nicht möglich; eine große technische und klinische Erfahrung muss vorhanden sein um gegen eine Fehlinformation des Systems gewappnet zu sein.

- ▶ Weiterhin ist die Strahlenbelastung durch das Planungs-CT höher als bei konventioneller intraoperativ fluoroskopisch kontrollierter Pedikelschraubeninsertionstechnik [25].

Aufgrund der Limitierungen der CT-gestützten Navigation und um die erhebliche Strahlenbelastung für den Patienten und auch intraoperativ für den Operateur [18] bei fluoroskopischer Kontrolle eines jeden Schrittes der Pedikelschraubenpositionierung herabzusetzen, wurde das Verfahren der bildwandlergestützten Navigation [17] oder auch „virtual fluoroscopy“ [7, 8] entwickelt.

Die Vorteile dieses Verfahrens sind in der universellen Verfügbarkeit eines Bildwandlers in einem zur Wirbelsäulenchirurgie ausgestatteten Operationsaal; der einfachen automatischen Registrierung des Patienten ohne aufwendiges Matching, der Darstellung der aktuellen und nicht der präoperativen Anatomie und der Möglichkeit eines jederzeitigen Updates zur Erfassung von

intraoperativen Änderungen zu sehen [7, 8, 17].

Wiewohl die Genauigkeit und Zuverlässigkeit des von den Autoren eingesetzten Navigationssystem untersucht und publiziert ist [8], existiert keine prospektive Studie, die an einer größeren Anzahl von im Bereich der Brust und Lendenwirbelsäule mit fluoroskopischer Navigation eingebrachter Pedikelschrauben die Genauigkeit der In-vivo-Schraubenplatzierung mit einer geeigneten Untersuchungsmethode ausreichend untersuchte, wobei sich aufgrund der Schwierigkeiten in der Bestimmung der Schraubenposition im konventionellen Röntgenbild [6] als geeignete Untersuchungsmethode v. a. die CT-Evaluation der Schraubenlage bewährt hat [6, 13].

Material und Methode

Nachdem ein Navigationsgerät (ION, Medtronic Surgical Navigation Technology, Louisville, Colo.) zur fluoroskopischen Navigation mit der Software FluoroNAV Vers. 3.0 (Medtronic Surgical Navigation Technology, Louisville, Colo.) zur Verfügung stand wurde die Platzierung von Pedikelschrauben an der thorakalen und lumbalen Wirbelsäule mit Hilfe der fluoroskopischen Navigation vorgenommen.



Abb. 3 ▲ a „Virtual fluoroscopy“: Simulation der Schraubenslänge: rot: aktuelle Position des Pointers; grün: simulierte Schraubenslänge. b Simulation des Schraubendurchmessers (hier 6,5 mm); die so simulierte Schraube kommt in beiden Ebenen innerhalb des Pedikels zu liegen

Operationstechnisch wurde dabei wie folgt vorgegangen: Für Eingriffe an der Lendenwirbelsäule und an der unteren Brustwirbelsäule wurden die Patienten auf einer Wilson-Bank gelagert. Bei Eingriffen die sich bis in den Bereich der mittleren und oberen Brustwirbelsäule erstreckten wurden die Patienten mit je einem rechteckigen Schaumstoffkissen

unter dem Sternum und unter dem Becken gelagert um die Verschlechterung des Bildwandlerbildes durch die Aluminiumrahmenkonstruktion der Wilson-Bank zu vermeiden.

Nach Darstellung der Processi spinosi, der Wirbelbögen und der Intervertebralgelenke in dem zu instrumentierenden Bereich wurde die Referenzklem-

me zur automatischen Registrierung der Patientenposition an einem stabilen Processus spinosus angebracht (Referenzierung), (Abb. 1). Danach wurden die fluoroskopischen Bilder zum navigierten Einbringen der Pedikelschrauben akquiriert. Bei langstreckigen Instrumentationen wurde eine Referenzierung für bis zu 3 instrumentierte Wirbel vorgenommen. Bei längerstreckigen Instrumentierungen wurde 2-mal referenziert.

Im thorakalen Bereich wurden exakt seitliche und exakte a.-p.-Bilder entsprechend der von Ebraheim et al. [4] gefundenen idealen Abbildung der thorakalen Pedikel verwendet. Bei Rotationsfehlstellung oder skoliotischer Deformität jeweils für jeden zu instrumentierenden Wirbel falls erforderlich.

Im lumbalen Bereich wurde zusätzlich hierzu ein sog. „Owl's eye“ Bildwandlerbild akquiriert, da die Untersuchungen von Robertson et al. [21] zeigten, dass nur diese axiale Projektion im Lumbalbereich zuverlässig das anatomische Pedikelzentrum abbildet.

Der Eintrittspunkt der Pedikelschraube wurde nun mit dem Pointer bestimmt (Abb. 2) die Schraubenslänge und der Schraubendurchmesser wurden durch die entsprechenden Simulationen bestimmt (Abb. 3).

Mit einer navigierten Ahle wurde anschließend manuell der Pedikel eröffnet und mit der navigierten Pedikelschraube ausgetastet. Nach Gewindeschneiden mit einem navigierten Gewindeschneider wurde die Pedikelschraube mit einem navigierten Schraubeneindreher eingebracht (Abb. 4). Zur Anwendung kamen Pedikelschrauben des Systems TENOR (Medtronic Sofamor Danek, Memphis, TN) und M8 (Medtronic Sofamor Danek, Memphis, TN) je nach virtueller Schraubendurchmessersimulation mit 5,5, 6,5 oder 7,5 mm Durchmesser. Nach Besetzen aller geplanter Pedikel erfolgte die fluoroskopische Kontrolle der Schrauben im seitlichen und a.-p.-Bildwandlerstrahlengang.

Bei den ersten 30 konsekutiven Patienten seit Einführung des Navigationssystems erfolgte prospektiv die Evaluation der Schraubenlage mit Hilfe eines Spiral-CT mit 1,3 mm Schichtdicke und Rekonstruktionen entlang der Schraube sowie 90° zum Pedikel in Anlehnung an die von Laine et al. [13] publizierte Methode durch 2 unabhängige Neuroradiologen (Abb. 5).

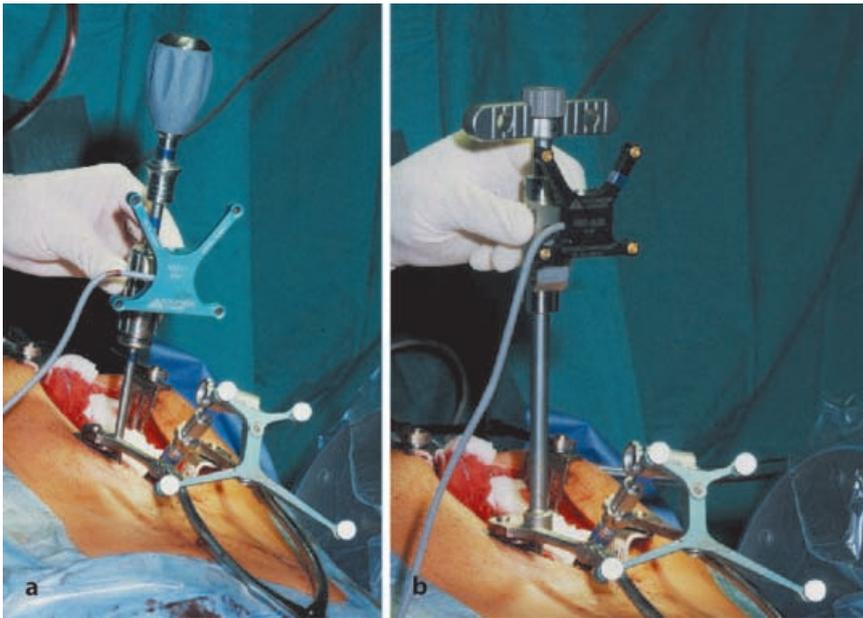


Abb. 4 ▲ a Intraoperativer Situs: Präparation des Pedikels mit einem navigierten Kombiinstrument (Ahle, Tastsonde, Gewindeschneider). b Intraoperativer Situs: navigiertes Eindrehen der Pedikelschraube

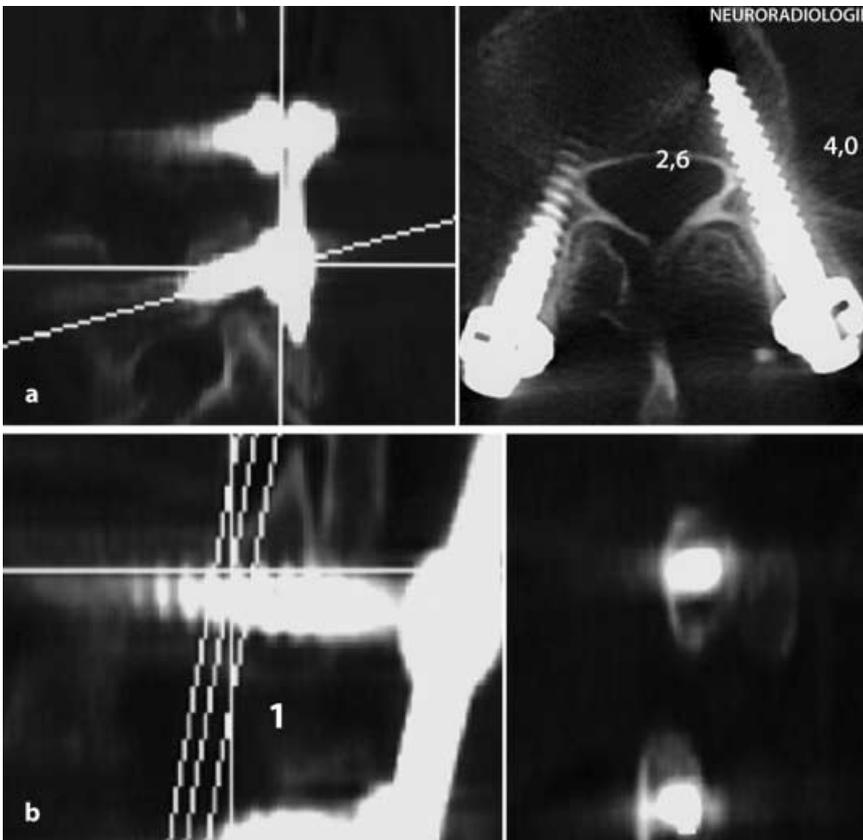


Abb. 5a,b ▲ Schema der Evaluation der Schraubenlage mit dem Spiral-CT. a Definition der Rekonstruktion entlang der Schraubenachse (links), resultierendes CT-Bild (rechts), b Definition der Rekonstruktion 90° zum Pedikel (links), resultierendes CT-Bild (rechts)

Als ideal platziert wurde eine Schraube bezeichnet, die vollständig innerhalb der kortikalen Grenzen des Pedikels zu liegen kam. Bei Fehlplatzierungen wurde der Abstand des Schraubengewindes zur jeweiligen (medial, lateral, inferior, superior) kortikalen Pedikelbegrenzung gemessen und in 4 Grade eingeteilt: 0–2; 3–4; 5–6; >6 mm.

Anhand der Ergebnisse der postoperativ durchgeführten klinisch-neurologischen Untersuchung der Patienten konnte je nach Evaluation der Pedikelschraubenposition eine Analyse hinsichtlich der klinischen Auswirkung einer Fehlplatzierung durchgeführt werden.

Bei der Studienpopulation lag 7-mal ein „Failed-back-surgery-Syndrom“ vor. Bei 8 Patienten bestand eine Spinalkanalstenose die teilweise langstreckig operiert wurde. Eine degenerative Skoliose wiesen 2 Patienten auf und eine Spondylolisthesis wurde bei 4 Patienten operativ behandelt. Eine Fraktur war bei 3 Patienten der Grund zur Stabilisierung und Wirbelmetastasen in 6 Fällen.

Es wurden insgesamt 160 Pedikelschrauben bei den 30 Patienten implantiert; 54 Schrauben bei 20 Patienten im thorakalen Bereich mit dem höchsten Niveau bei TH4 und 106 Schrauben bei 27 Patienten an der Lendenwirbelsäule (Tabelle 1).

Die Schrauben wurden insgesamt von 4 verschiedenen Operateuren eingebracht.

Ergebnisse

Alle Pedikelschrauben konnten unter Führung durch das Navigationssystem eingedreht werden. Ein Verfahrenswechsel auf die konventionelle Technik aufgrund technischer Probleme mit dem Navigationsgerät war in keinem Fall notwendig. Da im Abschlussbildwandlerbild in 2 Ebenen keine Schraubenfehlpositionierung zu erkennen war, wurde keine Schraube neu platziert.

Insgesamt wurden von den 160 untersuchten Pedikelschrauben 151 (94,4%) ideal platziert vorgefunden. Im BWS-Bereich lagen 49 von 54 Schrauben ideal (91%) und im LWS-Bereich 102 von 106 Schrauben (96,2%), (Abb. 6).

Superiore oder inferiore Fehlplatzierungen kamen nicht vor, jedoch wurde eine mediale Fehlplatzierung (0,6%) und 8 laterale Fehlplatzierungen (5%) festgestellt.

Tabelle 1

Segmentale Verteilung der fluoroskopisch navigiert eingebrachten Pedikelschrauben

	Anzahl der Schrauben
TH4	6
TH5	6
TH6	4
TH7	10
TH8	6
TH9	4
TH10	4
TH11	6
TH12	8
L1	8
L2	12
L3	14
L4	28
L5	32
S1	12

Die einzige mediale Fehlplatzierung wurde im thorakalen Bereich bei TH5 festgestellt (1/54~1,8%); 4 der insgesamt 8 lateralen Fehlplatzierungen fanden sich an der thorakalen Wirbelsäule (4/54~7,4%) und 4 (4/106~3,8%) an der LWS (Tabelle 2).

Vorübergehende oder dauernde neurologische Ausfälle wurden bei keinem Patienten gefunden.

Diskussion

Daten über die Genauigkeit der Platzierung von Pedikelschrauben welche mit

fluoroskopischer Navigation an der Brust- und Lendenwirbelsäule eingebracht wurden sind bisher kaum publiziert. Nolte et al. [17] berichtet über 30 In-vitro-Platzierungen von Aluminiumzylindern mit fluoroskopischer Navigation, über eine klinische Serie von 11 Patienten und über eine 2. klinische Serie von 25 Pedikelschrauben.

Eine Studie, die die Lage von fluoroskopisch navigiert implantierten Pedikelschrauben an einer größeren Zahl von Patienten prospektiv untersucht, liegt bislang nicht vor.

Lediglich Ramparsaud et al. [20] berichteten kürzlich über 40 Pedikelschrauben welche von TH3 bis L1 mit fluoroskopischer Navigation unter Verwendung der gleichen Software wie der hier benutzten eingebracht wurden. In Übereinstimmung mit den eigenen Resultaten finden auch Ramparsaud et al. [20] eine Rate ideal platzierter Schrauben an der BWS von 89% und nur eine mediale Schraubenfehlplatzierung.

Daher können die eigenen Daten im Wesentlichen nur Ergebnissen mit CT-navigierter Schraubenpositionierung gegenübergestellt werden.

Kalfas et al. [12] publizierten 91,3% ideal platzierter Schrauben ($n=150$) an der Lendenwirbelsäule mit CT-gestützter Navigation; Amiot et al. [1] analysierten 292 Pedikelschrauben zwischen TH2 und S1 und fanden eine Rate ideal platzierter Schrauben von 95%. Schlenzka et al. [23] fanden 95,7% von 139 navigierter Schrauben an der Lendenwirbelsäule ideal eingebracht, stellten jedoch fest, dass in einem Prozentsatz von 20,1% der

geplanten Schrauben die CT-gestützte Navigation aus technischen Gründen nicht durchführbar war.

In 2 neueren prospektiven randomisierten Studien zur CT-navigierten Schraubenlage im Vergleich zu konventioneller Schraubenpositionierung fanden Amiot et al. [2] an der BWS (T2 bis T12: CT-navigiert; TH5 bis TH12: konventionell) einen Unterschied von 87,1% vs. 98,3% zugunsten der Navigation. Laine et al. [14] fanden bei Ihren Patienten eine Rate ideal platzierter Schrauben zwischen TH8 bis TH12 von 73,5% in konventioneller Technik und von 91% CT-navigiert. An der Lendenwirbelsäule betrug der Unterschied in der Studie von Amiot et al. [2] 84,4% für die konventionelle Schraubenplatzierung gegenüber 93,2% in der CT-navigierten Gruppe. Laine et al. [14] fanden 88,6%

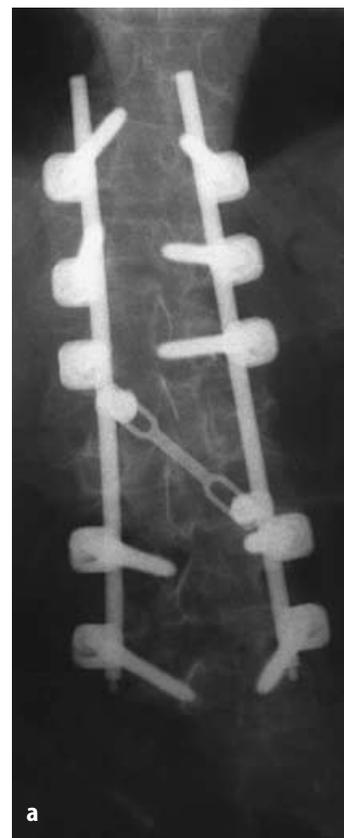


Abb. 6 ▲ a Standard-a.-p.-Röntgenbild nach mehrsegmentaler Korrektur einer schweren degenerativen Skoliose. b Rekonstruktion aller 10 Pedikelschrauben entlang der Schraubenchse: alle Schrauben sind ideal platziert. c Rekonstruktion aller 10 Pedikelschrauben 90° zum Pedikel: alle Schrauben befinden sich innerhalb des Pedikels

Tabelle 2

Richtung und Ausmaß der Schraubenfehlplatzierungen (n)

	Gesamt	BWS	LWS
Ideal platziert (gesamt)	150/160	49/54	101/106
Mediale Fehlplatzierung (gesamt)	1	1	0
0–2 mm	0	0	0
3–4 mm	1	1	0
5–6 mm	0	0	0
>6 mm	0	0	0
Laterale Fehlplatzierung (gesamt)	8	4	4
0–2 mm	0	0	0
3–4 mm	3	1	2
5–6 mm	3	1	2
>6 mm	2	2	0

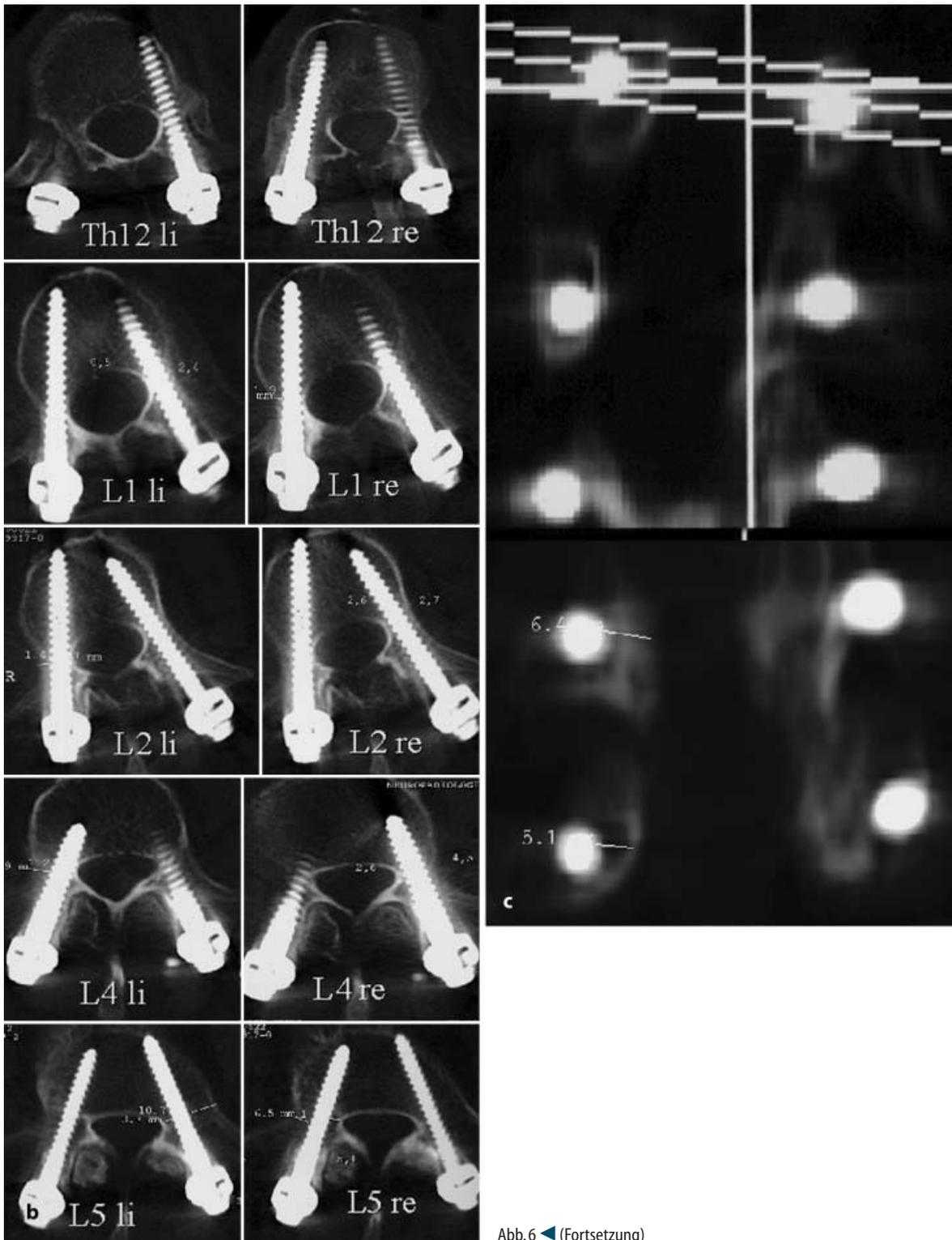


Abb.6 ◀ (Fortsetzung)

ideal platzierter Schrauben in der konventionellen Gruppe gegenüber 95,3% mit CT-Navigation.

Der Vergleich der eigenen Ergebnisse v. a. mit den differenzierten Ergebnissen von Amiot et al. [2] und Laine et al. [14] zeigt keinen wesentlichen Unter-

schied zwischen der Rate ideal platzierter Schrauben mit fluoroskopischer und CT-gestützter Navigation.

Eine deutliche Verbesserung der Raten ideal platzierter Schrauben im Vergleich mit den in der Literatur mitgeteilten Raten konventioneller Pedikel-

schraubenplatzierungen lässt sich ebenfalls feststellen.

Auch der von Schlenzka et al. [23] für die CT-gestützte Navigation beschriebene qualitative Unterschied hin zur klinisch ungefährlicheren lateralen Fehlplatzierung im Vergleich zur kon-

ventionellen Technik findet sich auch für die fluoroskopische Navigation.

Eine Rate ideal positionierter Pedikelschrauben von 100% lässt sich unter Berücksichtigung der Ergebnismittelungen in der Literatur und auch der eigenen Ergebnisse anscheinend weder mit der CT-gestützten Navigation noch mit der fluoroskopischen Navigation erreichen. Als einer der Gründe hierfür können die Ergebnisse von Rampersaud et al. [19] angeführt werden, wonach insbesondere für die Pedikel Th4, Th7, Th6, Th3, Th12, L1 und TH11 (absteigende Reihenfolge) extreme Anforderungen an die Genauigkeit eines Navigationssystems gestellt werden müssen, die derzeit weder von den CT-navigierten Systemen noch von den fluoroskopischen Systemen erreicht werden.

In Anbetracht der eingangs zitierten Limitationen der CT-gestützten Navigation und der Nachteile einer hohen Strahlenbelastung [25] durch das Planungs-CT erscheint die fluoroskopische Navigation im klinischen Routineeinsatz daher der technisch nach wie vor aufwendigen CT-gestützten Navigation überlegen.

Die Reduktion der Strahlenbelastung für Patient und Operateur durch den Einsatz der fluoroskopischen Navigation ist derzeit noch nicht vergleichend untersucht und Gegenstand einer laufenden prospektiven Studie.

Auch bei der fluoroskopischen Navigation sind fundierte Erfahrung in der Wirbelsäulenchirurgie Grundlage guter Ergebnisse. Die Kenntnis der Röntgenanatomie [4, 21] und die strikte Beachtung derselben beim Anfertigen der für die Navigation bestimmten Bilder ist unbedingte Voraussetzung für einen erfolgreichen Einsatz.

Problematisch kann die Bildqualität v. a. bei adipösen Patienten und Osteoporose sein. Die eigenen Erfahrungen zeigen, dass durch ein sog. „Postprocessing“ die Bildwandlerbilder auch bei ungünstigem Ausgangszustand so verändert werden können, dass die kortikalen Grenzen der Pedikel erkennbar werden und somit eine Navigation möglich ist.

Fazit für die Praxis

Mit der fluoroskopischen Navigation lässt sich eine wesentliche Verbesserung der Rate ideal platzierter Pedikelschrauben an der Brust- und Lendenwirbelsäule errei-

chen. Vor allem die klinisch gefährlichere mediale Fehlplatzierung wird zuverlässig vermieden.

Die einfache Handhabung des Systems, die automatische Registrierung des Patienten mit der Möglichkeit des jederzeitigen Updates, sowie die Unabhängigkeit des Systems von technisch aufwendigen Voruntersuchungen machen es für den täglichen Routineeinsatz bei nahezu allen Indikationsstellungen zu einem Wirbelsäulen-Fixateur interne geeignet. Auf eine exakte Darstellung der radiologischen Anatomie muss jedoch unbedingt geachtet werden. Der Einsatz des Systems setzt eine profunde Erfahrung in der Wirbelsäulenchirurgie voraus (eine Lernkurve muss durchschritten werden).

Literatur

1. Amiot LP, Labelle H, DeGuise JA, Sati M, Brodeur P, Rivard CH (1995) Computer assisted pedicle screw fixation. *Spine* 20: 1208–1212
2. Amiot LP, Lang K, Putzier M, Zippel H, Labelle H (2000) Comparative results between conventional and computer-assisted pedicle screw installation in the thoracic, lumbar and sacral spine. *Spine* 25: 606–614
3. Dickman CA, Yahiro MA, Lu HTC, Melkerson MN (1994) Surgical treatment alternatives for fixation of unstable fractures of the thoracic and lumbar spine. *Spine* 19 [Suppl]: 2266–2273
4. Ebraheim NA, Xu R, Ahmad M, Yeasting RA (1997) Projection of the thoracic pedicle and its morphometric analysis. *Spine* 22: 233–238
5. Esses SJ, Sachs BL, Dreyzin V (1993) Complications associated with the technique of pedicle screw fixation. *Spine* 18: 2231–2239
6. Farber GL, Place HM, Mazur RA, Jones CDE, Damiano TR (1995) Accuracy of pedicle screw placement in lumbar fusions by plain radiographs and computed tomography. *Spine* 20: 1494–1499
7. Foley KT, Rampersaud YR, Simon DA (2000) Virtual fluoroscopy. *Operat Techn Orthop* 10: 77–81
8. Foley KT, Rampersaud YR, Simon DA (2001) Virtual fluoroscopy: computerassisted fluoroscopic navigation. *Spine* 26: 341–351
9. Gebhard F, Kinzl L, Arand M (2000) Grenzen der CT-basierten Computernavigation an der Wirbelsäule. *Unfallchirurg* 103: 696–701
10. Gertzbein SD, Robins SE (1990) Accuracy of pedicle screw placement in vivo. *Spine* 15: 11–14
11. Jerosch J, Malms J, Castro WH, Wagner R, Wiesner L (1992) Lagekontrolle von Pedikelschrauben nach instrumentierter dorsaler Fusion der Lendenwirbelsäule. *Z Orthop* 130: 479–483
12. Kalfas ICH, Kormos DW, Murphy MA et al. (1995) Application of the frameless stereotaxy to pedicle fixation of the spine. *J Neurosurg* 83: 641–647
13. Laine T, Mäkilato K, Schlenzka D, Tallroth K, Poussa M, Alho A (1997) Accuracy of pedicle screw insertion: a prospective CT-study in 30 low back patients. *Eur Spine* 6: 402–405
14. Laine T, Lund T, Ylikoski M, Lohikoski J, Schlenzka D (2000) Accuracy of pedicle screw insertion with and without computer assistance. A randomised controlled clinical study in 100 consecutive patients. *Eur Spine* 9: 235–240
15. Nolte L-P, Steffen R, Kramer J, Jergas M (1993) Fixateur interne; Eine vergleichende biomechanische Studie mit verschiedenen Systemen. *Aktuel Traumatol* 23: 20–26
16. Nolte LP, Zamorano I, Jiang Z, Wang Q, Langlotz F, Berlemann U (1995) Image-guided insertion of transpedicular screws: A laboratory setup. *Spine* 20: 497–500
17. Nolte LP, Slomoczykowski MA, Berlemann U et al. (2000) A new approach to computer-aided spine surgery: fluoroscopic based surgical navigation. *Eur Spine* 9 [Suppl 1]: 78–88
18. Rampersaud YR, Foley KT, Shen AC, Williams S, Solomito M (2000) Radiation exposure to the spine surgeon during fluoroscopically assisted pedicle screw insertion. *Spine* 25: 2537–2645
19. Rampersaud YR, Simon DA, Foley KT (2001) Accuracy requirements for image-guided spinal pedicle screw placement. *Spine* 26: 352–359
20. Rampersaud YR, Montanera W, Salonen D (2001) Computer assisted cervicothoracic (3D) and thoracic (2D) pedicle screw placement: a prospective clinical study. *CAOS – USA Pittsburgh, 06.–08. July; Conference Syllabus*, pp 213–215
21. Robertson PA, Stewart NR (2000) The radiologic anatomy of the lumbar and lumbosacral pedicles. *Spine* 25: 709–715
22. Roy-Camille R (1970) Oseosynthese du rachis dorsal, lombaire et lombo-sacre par plaques métalliques vissées dans les pédicules vertébraux et les apophyses articulaires. *Presse Med* 78: 1448
23. Schlenzka D, Laine T, Lund T (2000) Computer-assisted spine surgery. *Eur Spine* 9 [Suppl 1]: 57–64
24. Schulze CJ, Munzinger E, Weber U (1998) Clinical relevance of accuracy of pedicle screw placement. A computertomographic-supported analysis. *Spine* 23: 2215–2220
25. Slomoczykowski M, Roberto M, Schneeberger P, Ozdoba C, Vock P (1999) Radiation dose for pedicle screw insertion. Fluoroscopic method vs computer – assisted surgery. *Spine* 24: 975–982
26. Vaccaro AR, Rizzolo SJ, Allardyce TJ (1995) Placement of pedicle screws in the thoracic spine: Part 2. An anatomical and radiographic assessment. *J Bone Joint Surg Am* 8: 1200–1206
27. Vahldiek MJ, Panjabi MM (1998) Stability potential of spinal instrumentations in tumor vertebral body replacement surgery. *Spine* 23: 543–250
28. Yuan HA, Garfin SR, Dickman CA, Mardjetko SM (1994) A historical cohort study of pedicle screw fixation in thoracic, lumbar, and sacral spinal fusions. *Spine* 19 [Suppl]: 2279–2296