

Klinik und Poliklinik für Neurochirurgie
(Direktor: Prof. Dr. med. Henry W. S. Schroeder)
der Universitätsmedizin der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald

**Eine radiologische und anatomische Untersuchung von intralaminären Schrauben
in der Brustwirbelsäule - eine theoretische Machbarkeitsstudie**

INAUGURAL - DISSERTATION
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Medizin
(Dr. med.)
der Universitätsmedizin
der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald
2019

vorgelegt von:
Jonas Müller
geboren am 27.01.1990
in Stralsund

Dekan: Prof. Dr. rer. nat. Max P. Baur

1. Gutachter: PD. Dr. med. Jörg Baldauf

2. Gutachter: Prof. Dr. med. Michael Synowitz

Ort: Universitätsklinikum Greifswald

Tag der Disputation: 24.07.2019

Inhaltsverzeichnis

1	Abkürzungsverzeichnis	4
2	Einleitung	5
	Zielsetzung der Arbeit	6
3	Material und Methodik	7
	3.1.1 Stichprobenumfangsbestimmung der Studie.....	7
	3.1.2 Einschluss- und Ausschluss-Kriterien.....	7
	3.1.3 Dreidimensionale Rekonstruktion	7
	Messungen	7
	3.1.4 Laminalänge.....	7
	3.1.5 Laminadurchmesser	8
	3.1.6 Winkelung in der Transversalebene	8
	3.1.7 Winkelung in der Sagittalebene	8
	3.1.8 Pedikeldurchmesser	8
	3.1.9 Intraobserver-Variabilität	8
	Evaluation der CT-Messwerte mit den anatomischen Daten	8
	Statistische Analyse	9
4	Ergebnisse	10
	Anatomische Daten aus dem CT-Datensatz	10
	4.1.1 Demografische Daten	10
	4.1.2 Laminalänge.....	10
	4.1.3 Laminadurchmesser	10
	4.1.4 Pedikeldurchmesser	10
	4.1.5 Korrelation zwischen Lamina- und Pedikeldurchmesser.....	11
	4.1.6 Winkelung der Lamina.....	11
	4.1.7 Die Intraobserver-Variabilität.....	11
	Evaluation der CT-Messwerte mit den anatomischen Daten	11
5	Diskussion	12
	Kritik	14
6	Zusammenfassung	16
7	Literaturverzeichnis	17
8	Danksagung	20

1 Abkürzungsverzeichnis

CT	Computertomographie
Fig.	Figur
C	Zervikal
T	thorakaler Wirbelkörper
mm	Millimeter
cm	Zentimeter
max.	maximal
z.B.	zum Beispiel
N	Grundgesamtheit
P	Signifikanzniveau
d.h.	das heißt
SD	Standardabweichung
o.g.	oben genannt
et al.	und andere

2 Einleitung

Die üblicherweise zur Stabilisierung von Frakturen oder Fehlstellungen im Bereich der thorakalen Wirbelsäule verwendeten Pedikelschrauben können in einigen Fällen nicht verwendet werden. Ursächlich hierfür können anatomische Variationen, Lockerungen zuvor verwendeten Osteosynthesematerials, hypoplastische Pedikel, vorherige transpedikuläre Zementanwendungen oder Tumoren in den zu stabilisierenden Wirbelkörpern sein. Aufgrund dessen sind alternative Fixierungsmethoden für Pedikelschrauben in der Brustwirbelsäule vonnöten. Klinische Erfahrungen aus dem Bereich der Halswirbelsäulen Chirurgie und einige eigene Fallserien haben gezeigt, dass eine zuverlässige Stabilisierung durch Laminaschrauben erzielt werden kann. Charakteristisch für diese Problematik ist eine 75-jährige Patientin aus unserer Notaufnahme: Diese stellte sich nach einem Sturz von der Treppe mit einer instabilen T4-Fraktur vor. Nach dem Trauma bestanden keine neurologischen Defizite. In der CT-Bilddiagnostik wiesen die Segmente um den frakturierten Wirbelkörper jedoch nur eine Pedikelbreite von max. 3,1 mm auf (Fig. 3 im Originalartikel). Eine Verwendung von Pedikelschrauben hätte zwangsläufig zu einer Sprengung der hypoplastischen Pedikel geführt. Aufgrund dessen entschieden wir uns gegen eine Stabilisierung mittels Pedikelschrauben. Alternativ wurde diese mittels Laminaschrauben von T2 bis T6 ohne Komplikationen durchgeführt. Die Patientin konnte am ersten postoperativen Tag mobilisiert und am 7. postoperativen Tag ohne neurologische Defizite aus der Klinik entlassen werden. In der klinischen Verlaufsuntersuchung nach 3 beziehungsweise 12 Monaten war die Patientin weiterhin symptomfrei. Zwei Jahre später wurde in der CT-Bilddiagnostik eine knöcherne Fusion der Facettengelenke und der ventralen Achse nachgewiesen, sodass anschließend die Laminaschrauben wieder entfernt werden konnten.

Dieses Beispiel verdeutlicht, dass Laminaschrauben zur Erweiterung der Behandlungsmöglichkeiten einzelner Patienten beitragen können.

Biomechanisch weisen Laminaschrauben als einzige alternative Stabilisierungsmöglichkeit eine analoge Stabilität zu den standardmäßig verwendeten Pedikelschrauben auf [8, 12]. Andere Alternativen wie z.B. Massa-Lateralis-Schrauben würden der Belastung nicht standhalten und kommen daher für eine Instrumentierung im Bereich der Brustwirbelsäule nicht infrage.

Da die Platzierung von Laminaschrauben unter direkter Sicht auf den Eintrittspunkt der Schraube und den Verlauf der Lamina vollzogen werden kann [10], vereinfacht dieses die Anwendung. Allerdings wurden die Laminaschrauben bisher nur im Bereich der Halswirbelsäule und der oberen Brustwirbelsäule eingesetzt [1, 2, 7, 15, 16, 19]. Die bisher durchgeführten Studien sind jedoch durch zahlreiche Faktoren limitiert. Die Messungen wurden anhand zweidimensionaler CT-Bilder durchgeführt [3, 10, 14, 16]. Dadurch ist eine genaue Abmessung der Länge der Lamina aufgrund deren schrägen Verlaufes nicht möglich. Darüber hinaus wurden die Parameter der Lamina selten gemeinsam mit denen der Pedikel analysiert (Tabelle 1 im Originalartikel).

Zielsetzung der Arbeit

Die Studie soll die systematische Durchführbarkeit von Laminaschrauben in der gesamten Brustwirbelsäule anhand dreidimensional rekonstruierter Bilddiagnostiken prüfen und diese mit den etablierten Pedikelschrauben vergleichen.

3 Material und Methodik

3.1.1 Stichprobenumfangbestimmung der Studie

Der Umfang wurde anhand der Hauptzielgröße „Durchmesser der Kortikalis“ bestimmt. Die Bestimmung des Stichprobenumfanges erfolgte nach einem n von 12 Wirbeln.

Der Stichprobenumfang N ergibt sich aus der halben Breite des 95%-Konfidenzintervalls, welches 20% der Standardabweichung beträgt. Bei einer Standardabweichung von 0,011645 nach 12 Wirbeln, ergibt sich ein N von 99 (20% von $0,011645 = 0,002329$, d.h. $N=99$) (20). Der Stichprobenumfang wurde somit auf $N = 100$ festgelegt.

3.1.2 Einschluss- und Ausschluss-Kriterien

Die Studie wurde retrospektiv durchgeführt. Als Grundlage der Datengewinnung dienten Polytrauma-CT's des Institutes für Radiologie und Neuroradiologie des Universitätsklinikums Greifswald im Zeitraum von 2010 bis 2013.

Es wurden anonymisierte DICOM-Daten (Polytrauma-CT's) von 100 Patienten (welche sich aus 50 Männern und 50 Frauen zusammensetzen) ausgewählt. Die Patienten haben einen mitteleuropäischen Ursprung und befinden sich im Alter zwischen 20-50 Jahren. Die Auswahl der Patienten erfolgte zufällig über ein Losverfahren.

Es wurden Patienten mit Verletzungen im Bereich der Brustwirbelsäule, stattgefundenen Operationen sowie Fehlstellungen in diesem Bereich von der Rekrutierung ausgeschlossen.

3.1.3 Dreidimensionale Rekonstruktion

Die dreidimensionale Rekonstruktion der Brustwirbelsäule erfolgte mittels OsiriX (Version 5.6., Pixmea SARL, Bernex, Schweiz) anhand des vorliegenden Datensatzes der Polytrauma-CT's (Siemens Healthcare GmbH, Erlangen Deutschland, Sensation 16, Spiral CT, 0,2 cm Schichtdicke).

Messungen

3.1.4 Laminalänge

Die Messungen der Lamina wurden unter Berücksichtigung der Trajektorien für die Laminaschrauben durchgeführt. Der sagittale Mittelpunkt am spinolaminären Übergang wurde als Eintrittspunkt für die Laminaschrauben gewählt. Die Länge der Laminaschrauben

wurde zwischen dem Eintrittspunkt und der Kortikalis am Schnittpunkt zwischen Processus transversus und dem Pedikel der kontralateralen Seite bestimmt (Fig. 1 im Originalartikel).

3.1.5 Laminadurchmesser

Der minimale Durchmesser der Lamina wurde im rechten Winkel zur optimalen Trajektorie der Laminaschraube zwischen den äußeren Kortikalen der Lamina bestimmt.

3.1.6 Winkelung in der Transversalebene

Der Winkel in der Transversalebene ist definiert als der Winkel zwischen der Trajektorie der Laminaschraube und der Mittellinie des entsprechenden Wirbelkörpers (Fig. 2 im Originalartikel).

3.1.7 Winkelung in der Sagittalebene

Der Winkel in der Sagittalebene ist definiert als der Winkel zwischen einer Linie, die vom Eintrittspunkt der Laminaschraube und dem Endpunkt dieser verläuft sowie einer Linie, die parallel zur Hinterkante des Wirbelkörpers verläuft (Fig.2 im Originalartikel).

3.1.8 Pedikeldurchmesser

Der Durchmesser des Pedikels wurde in der Koronarebene an der minimalen Ausdehnung zwischen den äußeren Kortikalen gemessen.

3.1.9 Intraobserver-Variabilität

Zur Bestimmung der Intraobserver-Variabilität wurden die Erhebungen der Messwerte eines Wirbelkörpers von zehn Patienten jeweils dreimal, im zeitlichen Abstand von mindestens einem Tag, wiederholt.

Evaluation der CT-Messwerte mit den anatomischen Daten

Um die aus den dreidimensional rekonstruierten Bildern gewonnenen Messwerte auf Genauigkeit zu kontrollieren, wurden zehn Kadaver im Polytrauma-CT gescannt und anschließend jeweils drei ausgewählte Wirbelkörper (T2, T5 und T8) analog vermessen. Aus den Kadavern wurden der zweite, der fünfte und der achte Brustwirbel herauspräpariert und zur schonenden Präparation in Kalilauge mazeriert. Mittels eines digitalen Messschiebers (Mitutoyo, Serie 500, Genauigkeit der Messung 0,01 mm) wurde die Länge einer möglichen

Laminaschraube, die Breite bzw. die Höhe an der schmalsten Stelle der Lamina sowie die Höhe und Breite der korrespondierenden Pedikel manuell (Messfehler $<0,01\text{mm}$) erhoben. Anschließend wurden die erhobenen Messwerte mit den dreidimensional rekonstruierten Werten verglichen.

Statistische Analyse

Die Messwerte von Länge, Durchmesser und Winkelung wurden mittels der Standardabweichung analysiert. Die Überprüfung der Normalverteilung wurde anhand des Shapiro-Wilk-Tests durchgeführt.

Für die Analyse der Korrelation der Messwerte wurde der Pearson-Test verwendet, wobei das Level für die Signifikanz auf $p < 0.05$ festgelegt wurde. Die statistische Analyse wurde mittels der SAS Software, Version 9.4 (SAS, Cary, USA) vorgenommen.

4 Ergebnisse

Anatomische Daten aus dem CT-Datensatz

4.1.1 Demografische Daten

Das Durchschnittsalter der untersuchten Personen betrug 39,04 Jahre (Standardabweichung (SD) 12,55) (Frauen 42 Jahre, SD 12,6; Männer 36,06 Jahre, SD 11,85).

4.1.2 Laminalänge

Die maximale Länge der Lamina befindet sich bei T1. Bei T4 erreicht sie ihren minimalen Wert. Bei den Männern betrug die durchschnittliche Länge 3,69cm bei Th1 (SD= 0,59), 3,62 cm bei T12 (SD= 0,61) und fiel auf 2,98cm (SD= 0,49) bei T4. Bei den Frauen lag die durchschnittliche Länge bei 3,44cm (SD= 0,55), in der Höhe T1 bei 3,45cm (SD= 0,58) in der Höhe T12, und verringerte sich auf 2,68cm (SD= 0,42) in der Höhe T4 (Fig.4 im Originalartikel). Die Längenunterschiede von T1 bis T4 ($p < 0,05$) und von T8-T12 ($p < 0,001$) sind signifikant. Die Laminalänge bei Frauen ist durchschnittlich um 6,6% kürzer als bei Männern. Die geschlechtsspezifische Differenz ist für alle Wirbelkörper, außer T12 (T1 bis T10, $p < 0,001$; T11 $p < 0,05$), signifikant.

4.1.3 Laminadurchmesser

Der minimale Durchmesser der Lamina verringert sich in kraniokaudaler Richtung zunächst bis zum Bereich T5 bis T8 und nimmt danach wieder zu, erreicht jedoch nicht die Werte der oberen BWS. Bei Männern findet sich ein Durchmesser von 0,66cm bei T1 (SD=0,13) und 0,60cm bei T12 (SD= 0,09). Bei den Frauen 0,62cm (SD= 0,12) bei T1 und 0,56cm (SD=0,12) bei T12. Im Bereich von T5 bis T8 trat jedoch bereits eine Verringerung des Durchmessers auf (Fig. 5 im Originalartikel). Die Änderungen der Breite im Bereich von T4 bis T6 ($p < 0,05$) und T8 bis T11 ($p < 0,05$) sind signifikant. Es ergab sich für die Breite der Lamina nur ein geringer geschlechtsspezifischer Unterschied von 5,2%, welcher bei T1 *, T4 *, T6 **, T7 * und T9 * signifikant war (* $p < 0,05$, ** $p < 0,01$).

4.1.4 Pedikeldurchmesser

Die Pedikel hatten bei Männern in der Höhe T1 eine Breite von 1cm (SD= 0,24) und verringerten sich bis T4 auf 0,58cm (SD= 0,17). Anschließend stieg der Wert dann bis 0,86cm (SD= 0,23) bei T12 an. Diese Tendenz findet sich auch bei Frauen. Bei T1 beträgt die Pedikelbreite 0,83cm (SD= 0,17), nimmt dann bis auf 0,48cm (SD= 0,1) bei T4 ab, um

wiederum bis T12 auf 0,77cm (SD= 0,2) anzuwachsen. Die Änderung der Pedikelbreite fällt im Bereich von T5 bis T8 nicht signifikant aus (T1-4 p <0,01; T9-12 p <0,05). Die Messwerte der weiblichen Patienten sind signifikant um 14,7% schmaler als die der männlichen (T1-10 p <0,001, T11 p <0,01, T12 p <0,05).

4.1.5 Korrelation zwischen Lamina- und Pedikeldurchmesser

In der Korrelationsanalyse nach Pearson zeigen die Lamina- und Pedikeldurchmesser der männlichen Wirbelkörper eine positive Korrelation von T1 ***, T2 *, T3 *, T7 *, T8 * und T10 bis T12 ** (* p <0,05, ** p <0,01, *** p <0,0001). Bei den weiblichen Wirbelkörpern gibt es eine positive Korrelation in der Höhe von T1 **, T2 **, T4 *, T5 *, T8 ** und T12 * (* p <0,05, ** p <0,01). Geschlechterübergreifend korreliert der Laminadurchmesser mit der Laminalänge, bis auf T6 und T7 (T1-12; p <0,05), in der gesamten thorakalen Wirbelsäule.

4.1.6 Winkelung der Lamina

Die Winkelung der Lamina, in Bezug auf die sagittale Mittellinie des Wirbelkörpers, beträgt in der transversalen Ebene bei den männlichen Probanden 50,34° (SD=7,65) und bei den weiblichen 50,41° (SD 7,72) in der Höhe von T1. Sie nimmt dann auf 55,61° (SD= 9,14) bei den Männern und 55,96° (SD= 8,7) bei den Frauen in der Höhe von T8 zu, um dann bis T12 auf 48,45° (SD= 7,68) bei den Männern und 46,06° (SD=7,59) bei den Frauen zu fallen (Fig. 6 im Originalartikel). Bei den männlichen und weiblichen Probanden ändert sich die Winkelung in der sagittalen Ebene, tendenziell in kraniokaudaler Richtung: Bei Männern von 56,4° (SD= 9,16) bei T1 auf 45,69° (SD=7,61) bei T12 und bei den Frauen von 58,06° (SD=9,16) bei T1 auf 46,15° (SD=8,04) bei T12.

4.1.7 Die Intraobserver-Variabilität

Diese ergab eine Abweichung von 0,04cm (5,06%) bei der Längenmessung und 1,46° (3,13%) bei der Winkelmessung. Die Abweichungen sind für alle Messwerte nicht signifikant.

Evaluation der CT-Messwerte mit den anatomischen Daten

Bei dem Vergleich der manuell erhobenen Messergebnisse am anatomischen Präparat mit den dreidimensional rekonstruierten CT-Messergebnissen ergab sich für die 30 Wirbelkörper aus zehn Kadavern eine Messabweichung von 0,08cm bzw. 5,35%. Diese fällt für alle erhobenen Messwerte nicht signifikant aus.

5 Diskussion

Die Verwendung von Pedikelschrauben ist die am häufigsten eingesetzte Methode zur sicheren Fixierung von Wirbelkörpern. Durch hypoplastische Pedikel, Tumoren im Bereich des Pedikels, nach transpedikulärer Zementapplikation oder in Revisionsfällen ist diese Technik jedoch nicht immer möglich und eine alternative Fixierungsmöglichkeit erforderlich. Der Einsatz von Laminaschrauben hat sich als sicheres alternatives Verfahren in der Höhe C2 gezeigt und das Risiko von Komplikationen vermindert [2, 16, 19]. In den Segmenten C3 bis C6 ist dies aufgrund der anatomischen Verhältnisse nur selten möglich [1]. Jedoch können Laminaschrauben zuverlässig in der Höhe C7 [7] und der oberen thorakalen Wirbelsäule verwendet werden [10, 15]. Für die Nutzung in der unteren thorakalen Wirbelsäule liegen jedoch nur Daten von pädiatrischen Patienten vor. [14] Einzelne eigene Fallserien zeigen, dass eine Verwendung auch in diesem Bereich möglich ist.

Die hier vorgelegten Daten zeigen, dass eine Limitierung im Einsatz von Laminaschrauben nur in der Breite, nicht jedoch in der Höhe der Lamina liegt. In der Literatur wird eine minimale Breite von 0,5cm beschrieben, welche eine Verwendung von Schrauben mit einem Durchmesser von 4mm und 1mm Freiheit ermöglicht [5, 11, 13, 14]. Dieses Kriterium erfüllen in der cervicalen Wirbelsäule nur 72% der Laminae des C2-Wirbels mit dem oben genannten Schraubendurchmesser [6]. In der thorakalen Wirbelsäule sind insgesamt 90,5% der Laminae in dieser Untersuchung für eine Instrumentierung geeignet. Für T1 ergab sich eine durchschnittliche Laminabreite von 0,63cm und für T2 von 0,64cm. Dieses deckt sich exakt mit Ergebnissen, welche Cardoso et al. [3] in ihrer Studie mittels digitalen Messschiebers an 14 Kadavern ermittelt haben. Die Laminabreite nimmt jedoch in kraniokaudaler Richtung ab und beträgt bei T12 noch 0,57cm. Bei einem Grenzwert des äußeren Laminadurchmessers von 0,5cm sind 8,9% der Wirbelbögen bei Männern und 10,1% bei Frauen für eine Instrumentierung nicht geeignet.

Die Breite der Pedikel hat ihr Maximum bei T1 von 0,92cm und nimmt dann kontinuierlich bis T4 auf 0,53cm ab, um bis T12 auf 0,81cm wieder anzusteigen. Dadurch ergibt sich von T4 bis T6 ein kritischer Bereich für die Verwendung von Pedikelschrauben [15]. Eine Hypoplasie von weniger als 0,5cm Durchmesser wiesen 13% der Pedikel bei Männern und 27% bei Frauen auf. Die Pedikelbreite hat bei beiden Geschlechtern ihr Minimum in der mittleren Brustwirbelsäule. Die Laminabreite hat ihr Minimum in der unteren Brustwirbelsäule. Durch deren unterschiedliche Minima sind bei einer Kombination beider Verfahren lediglich 1,7%

der Wirbel bei Männern respektive 3,8% bei Frauen weder für Pedikelschrauben noch für Laminaschrauben mit o.g. Durchmesser geeignet.

Die Länge der Lamina bewegt sich im Bereich von maximal 3,61cm bei T1 bis minimal 2,85cm bei T4. Bei 3,7% der Lamina wird eine Länge von 2,5cm unterschritten. Damit können bei den meisten Wirbeln Laminaschrauben mit einer Länge zwischen 25mm und 35mm sicher verwendet werden, ohne das Facettengelenk zu verletzen.

Die durchschnittliche Höhe der Lamina am Kreuzungspunkt der bilateralen Laminaschrauben beträgt 1,82cm (SD 0,24). Die Platzierung bilateraler Laminaschrauben war in allen analysierten Segmenten möglich. Allerdings konkurrieren beide Schrauben, vor allem an der Basis der Dornfortsätze, um die optimale Trajektorie. Die erstplatzierte Laminaschraube ist Teil der optimalen Trajektorie für die zweitplatzierte Laminaschraube und kann zu einer Abweichung von der optimalen Trajektorie dieser führen.

Für diese Studie wurden CT- Aufnahmen mit einer Schichtdicke von 2mm verwendet. Die auf Basis der mittels OsiriX rekonstruierten Schichtbilder erhobenen Messwerte wiesen gegenüber den anatomisch ermittelten Werten eine Abweichung von 5,35% auf. Diese fällt jedoch für alle Messwerte nicht signifikant aus. Im Vergleich mit der Intraobserver-Variabilität (Messabweichung: 5,06%) fällt die Messabweichung mit 5,35% nur geringfügig höher aus. Die Abweichung ist durch die verwendete Schichtdicke des CT's und die damit verbundene Verwendung rekonstruierter Daten zu erklären.

Da Laminaschrauben im Gegensatz zu Pedikelschrauben nicht die Voraussetzungen der 3-Säulenfixierung erfüllen, muss man bei der Stabilität zwischen Zwei- und Drei-Säulenverletzungen unterscheiden [12]. Kretzer et al. [12] stellten bei Zwei-Säulenverletzungen im Bereich von C7 bis T2 keine signifikanten Unterschiede in der biomechanischen Stabilität zwischen Laminaschrauben und Pedikelschrauben fest. Bei Drei-Säulenverletzungen ergab sich in der axialen Rotation kein Unterschied zwischen beiden Techniken. Jedoch bieten Pedikelschrauben eine signifikant erhöhte Stabilität in der Flexion und Extension gegenüber den Laminaschrauben. Bei zusätzlicher anteriorer Stabilisierung resultiert kein Unterschied in der Stabilität zwischen den beiden Techniken [12]. Ein Bruch des Pedikels macht die Laminaschraube biomechanisch jedoch ineffektiv und muss vor der Implantation ausgeschlossen werden.

Laminaschrauben bieten eine vergleichbare Belastbarkeit wie Pedikelschrauben. Ryan M. et al. [8] testeten diese mittels eines Ausreißversuchs im C7-Wirbel bei 13 Kadavern. Hierbei erreichten Laminaschrauben und Pedikelschrauben ähnliche Werte und sind somit als adäquat in der Stabilität anzusehen. Beim Ausriss der Laminaschrauben kommt es zu keiner Verletzung des Spinalkanals, da die Lamina und der Prozessus spinosus nach dorsal wegbrechen und somit das Rückenmark nicht beschädigen können [4].

Laminaschrauben und Pedikelschrauben weisen unterschiedliche Winkelungen der Trajektorien auf. Dadurch kommt es bei der Kombination beider Verschraubungsvarianten in benachbarten Segmenten zu Überschneidungen der herausstehenden Schraubenköpfe. Daher ist in direkt benachbarten Segmenten eine Kombination von Pedikel- und Laminaschrauben nicht möglich. Für die Kombination beider Verfahren muss ein Segment zwischen diesen unversorgt gelassen werden oder ein seitlicher Adapter Verwendung finden.

Ein Vorteil von Laminaschrauben ist, dass durch die direkte Sicht auf die Platzierungsstelle am Übergang des Dornfortsatzes in die Lamina und die umliegenden Strukturen die Nutzung eines Navigationssystems nicht zwingend erforderlich ist [18].

Es gibt jedoch nur wenige Follow-Up-Untersuchungen und Erfahrungen zum Ergebnis von Laminaschrauben in der thorakalen Wirbelsäule. In einer Kurzzeitstudie stellten Kretzer RM et al. [10] bei 19 Schrauben im ersten und zweiten thorakalen Wirbel nach 14 Monaten keine Schraubenbrüche, Schraubenausrisse oder Wirbelsäulendeformationen fest. In einer anderen Studie beobachteten Kamil et al. [9] bei 20 Patienten mit 57 Schrauben in einem Zeitabstand von 17,4 Monaten eine Laminafraktur und einen Schraubenausriss. Bei der Implantation wurde in drei Fällen die Lamina nach anterior perforiert. Dieses wurde jedoch unmittelbar intraoperativ korrigiert.

Aufgrund fehlender Langzeitdaten sollte die Möglichkeit der Verwendung etablierter Instrumentierungen vor der Verwendung von Laminaschrauben geprüft werden.

Kritik

Die vorliegende Studie wird durch verschiedene Faktoren limitiert. Es sind nur Patienten ohne Deformationen oder Frakturen der Wirbelsäule in einem begrenzten Alter von 20 bis 50 Jahren und mit zentraleuropäischer Herkunft untersucht worden. Bedingt dadurch können die Daten nicht ohne Validierungen auf ältere Patienten oder Menschen aus anderen Regionen übertragen werden. Durch die Verwendung von CT-Aufnahmen mit einer Schichtdicke von

0,2cm können geringe Messungenauigkeiten von bis zu 5% auftreten.

Bei der Erhebung der Messwerte wurden keine echten Schrauben verwendet, sondern die Maße am Computer erhoben. Dadurch werden nicht die elastischen Veränderungen des Knochens erfasst, welche bei 85% der Patienten auftreten, wenn der Schraubendurchmesser mehr als 65% des Knochendurchmessers beträgt [17].

6 Zusammenfassung

Laminaschrauben stellen eine alternative Fixierungsmöglichkeit im Bereich der Brustwirbelsäule dar. Sie sind die einzige Fixierungsmöglichkeit, welche in der Literatur eine adäquate Stabilität wie die Pedikelschrauben aufweist und damit für eine suffiziente Stabilisierung infrage kommt.

Es konnten Laminaschrauben mit einem Durchmesser von 0,4cm bei mehr als 90% der untersuchten Wirbelkörper verwendet werden. Bei den Pedikelschrauben waren jedoch nur 80% der Wirbelkörper für den o.g. Durchmesser zugänglich. Insbesondere die Pedikel der weiblichen Probanden zeigten in 27% der Fälle eine Hypoplasie von unter 0,4cm.

Da die Laminabreite ihr Minimum in der unteren Brustwirbelsäule und die Pedikelbreite ihr Minimum im Bereich der mittleren Brustwirbelsäule hat, können durch die Kombination beider Verfahren weniger als 3% der untersuchten Wirbel nicht instrumentiert werden.

Es konnte zudem gezeigt werden, dass in den dreidimensional rekonstruierten CT-Bildern eine ausreichende Messgenauigkeit vorliegt, um anhand dieser eine Entscheidung bezüglich der Verwendung der einen oder der anderen Stabilisierungstechnik zu treffen.

Laminaschrauben können jedoch nicht in allen Fällen verwendet werden, daher sollte vor der Verwendung dieser in jedem Fall eine CT-Bilddiagnostik durchgeführt werden. Aufgrund fehlender Langzeitergebnisse sollte vor dem Einsatz von Laminaschrauben die Anwendbarkeit der etablierten Methoden der Instrumentierung kritisch geprüft werden.

7 Literaturverzeichnis

(1) Alvin MD, Abdullah KG, Steinmetz MP, Lubelski D, Nowacki AS, Benzel EC, Mroz TE (2012) Translaminar screw fixation in the subaxial cervical spine: quantitative laminar analysis and feasibility of unilateral and bilateral translaminar virtual screw placement. *Spine (Phila Pa 1976)* 37:E745-751. doi: 10.1097/BRS.0b013e31824c70ef

(2) Bhatnagar R, Yu WD, Bergin PF, Matteini LE, O'Brien JR (2010) The anatomic suitability of the C2 vertebra for intralaminar and pedicular fixation: a computed tomography study. *Spine J* 10:896-899. doi: 10.1016/j.spinee.2010.06.010

(3) Cardoso MJ, Dmitriev AE, Helgeson MD, Paik H, Mendelsohn AK, Lehman RA, Jr., Rosner MK (2010) Does catastrophic midline failure of upper thoracic lamina screws violate the spinal canal? A cadaveric biomechanical analysis using two lamina screw techniques. *Spine J* 10:1007-1013. doi: 10.1016/j.spinee.2010.07.393

(4) Cardoso MJ, Dmitriev AE, Lehman RA, Helgeson M, Cooper P, Rosner MK (2008) Computed tomography and biomechanical evaluation of screw fixation options at the cervicothoracic junction: intralamina versus intrapedicular techniques. *Spine (Phila Pa 1976)* 33:2612-2617. doi: 10.1097/BRS.0b013e31818ce3ac

(5) Chern JJ, Chamoun RB, Whitehead WE, Curry DJ, Luerssen TG, Jea A (2009) Computed tomography morphometric analysis for axial and subaxial translaminar screw placement in the pediatric cervical spine. *J Neurosurg Pediatr* 3:121-128. doi: 10.3171/2008.11.PEDS08277

(6) Dean CL, Lee MJ, Robbin M, Cassinelli EH (2009) Correlation between computed tomography measurements and direct anatomic measurements of the axis for consideration of C2 laminar screw placement. *Spine J* 9:258-262. doi: 10.1016/j.spinee.2008.06.454

(7) Hong JT, Sung JH, Son BC, Lee SW, Park CK (2008) Significance of laminar screw fixation in the subaxial cervical spine. *Spine (Phila Pa 1976)* 33:1739-1743. doi: 10.1097/BRS.0b013e31817d2aa2

- (8) Ilgenfritz RM, Gandhi AA, Fredericks DC, Grosland NM, Smucker JD (2013) Considerations for the use of C7 crossing laminar screws in subaxial and cervicothoracic instrumentation. *Spine (Phila Pa 1976)* 38:E199-204. doi: 10.1097/BRS.0b013e31827de094
- (9) Kretzer RM, Chaput C, Sciubba DM, Garonzik IM, Jallo GI, McAfee PC, Cunningham BW, Tortolani PJ (2010) A computed tomography-based feasibility study of translaminar screw fixation in the upper thoracic spine. *J Neurosurg Spine* 12:286-292. doi: 10.3171/2009.10.SPINE09546
- (10) Kretzer RM, Hu N, Kikkawa J, Garonzik IM, Jallo GI, Tortolani PJ, McAfee PC, Cunningham BW (2010) Surgical management of two- versus three-column injuries of the cervicothoracic junction: biomechanical comparison of translaminar screw and pedicle screw fixation using a cadaveric model. *Spine (Phila Pa 1976)* 35:E948-954. doi: 10.1097/BRS.0b013e3181c9f56c
- (11) Kose KC, Inanmaz ME, Atmaca H, Basar H, Isik C, Bal E (2013) The use of intralaminar screws in patients with spinal deformity. *J Spinal Disord Tech* 26:E299-305. doi: 10.1097/BSD.0b013e31828804a7
- (12) Kretzer RM, Sciubba DM, Bagley CA, Wolinsky JP, Gokaslan ZL, Garonzik IM (2006) Translaminar screw fixation in the upper thoracic spine. *J Neurosurg Spine* 5:527-533. doi: 10.3171/spi.2006.5.6.527
- (13) Mandel IM, Kambach BJ, Petersilge CA, Johnstone B, Yoo JU (2000) Morphologic considerations of C2 isthmus dimensions for the placement of transarticular screws. *Spine (Phila Pa 1976)* 25:1542-1547
- (14) Molina C, Sciubba DM, Chaput C, Tortolani PJ, Jallo GI, Kretzer RM (2012) A computed tomography-based feasibility study of translaminar screw placement in the pediatric thoracic spine. *J Neurosurg Pediatr* 9:27-34. doi: 10.3171/2011.10.PEDS11121
- (15) Padua MR, Yeom JS, Em HT, Kim HJ, Chang BS, Lee CK, Riew KD (2013) Feasibility of laminar screw placement in the upper thoracic spine: analysis using 3-dimensional computed tomographic simulation. *Spine (Phila Pa 1976)* 38:1146-1153. doi:

10.1097/BRS.0b013e31828aadf5

(16) Sciubba DM, Noggle JC, Vellimana AK, Conway JE, Kretzer RM, Long DM, Garonzik IM (2008) Laminar screw fixation of the axis. *J Neurosurg Spine* 8:327-334. doi: 10.3171/SPI/2008/8/4/327

(17) Sjostrom L, Jacobsson O, Karlstrom G, Pech P, Rauschnig W (1993) CT analysis of pedicles and screw tracts after implant removal in thoracolumbar fractures. *J Spinal Disord* 6:225-231

(18) Wang MY (2007) Cervical crossing laminar screws: early clinical results and complications. *Neurosurgery* 61:311-315; discussion 315-316. doi: 10.1227/01.neu.0000303987.49870.7b

(19) Wright NM (2004) Posterior C2 fixation using bilateral, crossing C2 laminar screws: case series and technical note. *J Spinal Disord Tech* 17:158-162

(20) Dieter Rasch, L.Rob Verdooren, Jim I. Gowers (2007), Planung und Auswertung von Versuchen und Erhebungen. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, s. 47-54.

8 Danksagung

An erster Stelle gilt mein Dank meinem Doktorvater Herrn PD Dr. J. Baldauf, für seine sowohl wissenschaftliche Unterstützung, als auch stetige Motivation durch zahlreiche nichtwissenschaftliche Gespräche während der gesamten Schaffungsphase meiner Dissertation.

Außerdem gilt mein Dank meinem Vater, welcher diese Arbeit erst möglich machte und mich bei der Verwirklichung durch anhaltende Hilfestellung begleitet und unterstützt hat.

Herrn Prof. Dr. H.-W.-S, Schroeder, Prof. Dr. T. Koppe, Herrn PD. Dr. M. Kirsch, Marc Matthes und Jana Templin danke ich für die zahlreichen und fachlichen Gespräche, Ratschläge und Anmerkungen, die mich auf dem Weg zur fertigen Arbeit immer wieder neue Aspekte und Ansätze entdecken ließen.

Besonders möchte ich an dieser Stelle auch meiner Freundin und meiner Familie für die unermüdliche Stärkung und Motivierung danken, sowie für das stets offene Ohr für meine Gedanken.



A radiological and anatomic examination of intralaminar screws in the thoracic spine—a theoretical feasibility study

Jonas Müller¹ & Jan-Uwe Müller¹ & Thomas Koppe² & Stephan Nowak¹ & Henry W. S. Schroeder¹ & Jörg Baldauf¹

Received: 15 June 2018 / Accepted: 12 September 2018
Springer-Verlag GmbH Austria, part of Springer Nature 2018

Abstract

Background Failure of pedicle screws and anatomical variations which prevent pedicle screw implantation make the search for an alternative to pedicle screws in thoracic spine surgery necessary. To date, published data have shown that intralaminar screws could be a possible way of fixation. Object of this study is a systematic examination of the feasibility of lamina screws in the whole thoracic spine.

Methods Fifty females and 50 males (age 20 to 60 years) who underwent a polytrauma CT from 2010 to 2012 were randomly selected. Patients with injury of the thoracic spine, trauma-independent deformity, or dysplasia of the thoracic spine were excluded. A three-dimensional reconstruction of the thoracic spine was performed from the data set. The anatomical data of the lamina were measured under consideration of the potential trajectory of a laminar screw. The caliber of the corresponding pedicle was measured as well.

Results The diameters of the lamina show a decline in superior-inferior direction (0.66 cm in T1 to 0.60 cm in T12 in males, 0.62 to 0.56 cm in females). Diameters of pedicle and lamina show no correlation. Twenty percent of the pedicles have a hypoplasia with a diameter of less than 0.5 cm. However, in these vertebrae, 62.3% of the laminae would be suitable for 0.4-cm lamina screws. Only in 2.75% of the vertebral bodies, there was no possibility for intralaminar or pedicle screws.

Conclusions This study shows that it is possible to use intralaminar screws in the thoracic spine in most of patients.

Keywords Lamina screws · Cadaver · Imaging · Three-dimensional · Spinal fusion/instrumentation/* methods · Thoracic vertebrae

Introduction

Pedicle screws (PS), a standard method for stabilization of the thoracic spine, are not effective in some cases. Anatomical variations, loosening of osteosynthesis implants, hypoplastic

pedicles, previous transpedicular cement application, and tumors in the vertebral bodies and pedicles call for alternative fixation methods for PS in the thoracic spine.

Clinical experience in the cervical spine and a few case series have shown that reliable fixation can be achieved with

This article is part of the Topical Collection on Spine-Other

* Jonas Müller
jonas.mueller@uni-greifswald.de

Jan-Uwe Müller
muellju@uni-greifswald.de

Thomas Koppe
thokoppe@uni-greifswald.de

Stephan Nowak
stephan.nowak@uni-greifswald.de

Henry W. S. Schroeder
Henry.Schroeder@uni-greifswald.de

Jörg Baldauf
baldauf@uni-greifswald.de

¹ Department of Neurosurgery, E.-M.-Arndt University, Greifswald, Germany

² Institute of Anatomy and Cell Biology, E.-M.-Arndt University, Greifswald, Germany

laminar screws (LS); these may also extend the treatment options for the individual patient. LS provide the same degree of stability as the standard PS [8, 12]. The placement of LS is simplified by direct viewing of the entry point for screw placement and the trajectories of the lamina [10]. However, the use of LS has only been investigated in the cervical spine and the upper thoracic spine [1, 2, 7, 15, 16, 19]. The studies conducted so far have also highlighted the limitations of this approach. One of these is that measurements have only been performed

on two-dimensional CT images [3, 10, 14, 16]. Thus, it is difficult to measure the exact length of the lamina. Moreover, measurements of the lamina are rarely compared with measurements at the pedicles in anatomical specimens (Table 1).

The aims of the present study are to systematically evaluate the feasibility of LS in the entire thoracic spine using three-dimensional reconstructed measurements and compare these with the established pedicle screws (PS).

Table 1 Measurement results of the thoracic spine (the values given are the mean \pm standard deviation)

Vertebra	Gender	Length of the lamina in cm	Diameter of the lamina in cm	Height of the lamina in cm	Diameter of the pedicle in cm	Height of the pedicle in cm	Angle of the LS in the coronal plane in $^{\circ}$	Angle of the LS in the sagittal plane in $^{\circ}$
T1	Male	3.69 \pm 0.59	0.66 \pm 0.13	1.71 \pm 0.32	1.00 \pm 0.24	1.08 \pm 0.22	50.34 \pm 7.65	56.40 \pm 9.16
	Female	3.44 \pm 0.55	0.62 \pm 0.12	1.64 \pm 0.28	0.83 \pm 0.17	0.95 \pm 0.18	50.41 \pm 7.72	58.06 \pm 9.16
	All	3.56 \pm 0.57	0.64 \pm 0.13	1.67 \pm 0.30	0.92 \pm 0.21	1.01 \pm 0.20	50.38 \pm 7.69	57.23 \pm 9.16
T2	Male	3.26 \pm 0.53	0.66 \pm 0.13	1.77 \pm 0.32	0.78 \pm 0.19	1.24 \pm 0.22	51.62 \pm 8.10	50.60 \pm 8.43
	Female	3.03 \pm 0.48	0.63 \pm 0.13	1.72 \pm 0.31	0.68 \pm 0.14	1.10 \pm 0.20	51.13 \pm 7.99	50.62 \pm 8.56
	All	3.15 \pm 0.51	0.64 \pm 0.13	1.74 \pm 0.32	0.73 \pm 0.17	1.17 \pm 0.21	51.38 \pm 8.05	50.61 \pm 8.50
T3	Male	3.02 \pm 0.48	0.66 \pm 0.14	1.80 \pm 0.30	0.63 \pm 0.15	1.33 \pm 0.26	51.94 \pm 8.30	49.54 \pm 8.75
	Female	2.77 \pm 0.44	0.63 \pm 0.13	1.77 \pm 0.31	0.52 \pm 0.10	1.20 \pm 0.23	51.95 \pm 8.07	49.70 \pm 8.38
	All	2.90 \pm 0.46	0.65 \pm 0.14	1.79 \pm 0.31	0.58 \pm 0.13	1.26 \pm 0.25	51.95 \pm 8.19	49.62 \pm 8.57
T4	Male	2.98 \pm 0.49	0.68 \pm 0.14	1.87 \pm 0.34	0.58 \pm 0.17	1.34 \pm 0.27	52.12 \pm 8.31	48.34 \pm 9.17
	Female	2.68 \pm 0.42	0.65 \pm 0.14	1.82 \pm 0.31	0.48 \pm 0.10	1.17 \pm 0.21	52.72 \pm 8.28	48.70 \pm 8.25
	All	2.83 \pm 0.46	0.66 \pm 0.14	1.84 \pm 0.32	0.53 \pm 0.14	1.26 \pm 0.24	52.42 \pm 8.30	48.52 \pm 8.71
T5	Male	2.99 \pm 0.49	0.65 \pm 0.13	1.93 \pm 0.33	0.58 \pm 0.15	1.35 \pm 0.28	54.41 \pm 8.43	45.64 \pm 8.81
	Female	2.73 \pm 0.43	0.61 \pm 0.13	1.90 \pm 0.32	0.48 \pm 0.11	1.17 \pm 0.21	54.16 \pm 8.32	45.59 \pm 8.39
	All	2.86 \pm 0.46	0.63 \pm 0.13	1.92 \pm 0.33	0.53 \pm 0.13	1.26 \pm 0.25	54.29 \pm 8.38	45.61 \pm 8.60
T6	Male	3.02 \pm 0.48	0.62 \pm 0.13	1.98 \pm 0.35	0.59 \pm 0.14	1.35 \pm 0.25	54.62 \pm 10.20	44.56 \pm 8.37
	Female	2.77 \pm 0.43	0.57 \pm 0.11	1.96 \pm 0.31	0.50 \pm 0.11	1.23 \pm 0.23	54.98 \pm 8.51	43.66 \pm 8.57
	All	2.90 \pm 0.46	0.59 \pm 0.12	1.97 \pm 0.33	0.55 \pm 0.13	1.29 \pm 0.24	54.80 \pm 9.36	44.11 \pm 8.47
T7	Male	3.02 \pm 0.48	0.61 \pm 0.14	1.99 \pm 0.35	0.60 \pm 0.15	1.40 \pm 0.26	55.17 \pm 8.67	43.33 \pm 7.98
	Female	2.76 \pm 0.44	0.56 \pm 0.12	2.00 \pm 0.33	0.51 \pm 0.11	1.28 \pm 0.25	55.08 \pm 8.22	43.77 \pm 8.04
	All	2.89 \pm 0.46	0.59 \pm 0.13	2.00 \pm 0.34	0.56 \pm 0.13	1.34 \pm 0.26	55.13 \pm 8.45	43.55 \pm 8.01
T8	Male	2.99 \pm 0.48	0.62 \pm 0.14	1.98 \pm 0.38	0.63 \pm 0.15	1.44 \pm 0.26	55.61 \pm 9.14	43.97 \pm 8.57
	Female	2.77 \pm 0.43	0.58 \pm 0.12	1.99 \pm 0.33	0.54 \pm 0.13	1.30 \pm 0.23	55.96 \pm 8.70	43.48 \pm 7.79
	All	2.88 \pm 0.46	0.60 \pm 0.13	1.98 \pm 0.36	0.58 \pm 0.14	1.37 \pm 0.25	55.78 \pm 8.92	43.73 \pm 8.18
T9	Male	2.98 \pm 0.48	0.65 \pm 0.14	1.99 \pm 0.36	0.68 \pm 0.21	1.50 \pm 0.26	54.71 \pm 8.72	45.07 \pm 8.07
	Female	2.82 \pm 0.45	0.61 \pm 0.13	1.98 \pm 0.35	0.56 \pm 0.14	1.40 \pm 0.26	54.08 \pm 8.21	44.73 \pm 7.77
	All	2.90 \pm 0.47	0.63 \pm 0.14	1.99 \pm 0.36	0.62 \pm 0.18	1.45 \pm 0.26	54.39 \pm 8.47	44.90 \pm 7.92
T10	Male	3.03 \pm 0.50	0.60 \pm 0.13	2.04 \pm 0.37	0.75 \pm 0.23	1.69 \pm 0.31	50.51 \pm 8.04	45.99 \pm 7.75
	Female	2.94 \pm 0.46	0.60 \pm 0.12	2.01 \pm 0.35	0.63 \pm 0.16	1.64 \pm 0.30	51.90 \pm 8.00	46.15 \pm 8.50
	All	2.98 \pm 0.48	0.60 \pm 0.13	2.02 \pm 0.36	0.69 \pm 0.20	1.67 \pm 0.31	51.20 \pm 8.02	46.07 \pm 8.13
T11	Male	3.30 \pm 0.56	0.56 \pm 0.12	1.64 \pm 0.39	0.86 \pm 0.23	1.89 \pm 0.33	48.44 \pm 8.17	45.84 \pm 7.85
	Female	3.24 \pm 0.54	0.58 \pm 0.12	1.60 \pm 0.35	0.78 \pm 0.19	1.80 \pm 0.33	47.56 \pm 7.78	47.81 \pm 8.00
	All	3.27 \pm 0.55	0.57 \pm 0.12	1.62 \pm 0.37	0.82 \pm 0.21	1.84 \pm 0.33	48.00 \pm 7.98	46.82 \pm 7.93
T12	Male	3.62 \pm 0.61	0.60 \pm 0.09	1.29 \pm 0.27	0.86 \pm 0.23	1.76 \pm 0.32	48.45 \pm 7.68	45.69 \pm 7.61
	Female	3.45 \pm 0.58	0.56 \pm 0.12	1.31 \pm 0.29	0.77 \pm 0.20	1.65 \pm 0.31	46.06 \pm 7.59	46.15 \pm 8.04
	All	3.54 \pm 0.60	0.58 \pm 0.11	1.30 \pm 0.28	0.81 \pm 0.22	1.70 \pm 0.32	47.25 \pm 7.64	45.92 \pm 7.83

Material and method

Inclusion and exclusion criteria

Anonymized DICOM data of 100 patients (50 males and 50 females) of Central European origin, age 20–50 years, selected randomly from CTs performed at the radiology department (University Hospital of Greifswald) in patients who had received a CT scan for a polytrauma were used for the analysis. Patients with injuries in the thoracic spine, malformations, or those who had undergone surgery in the thoracic spine and had a malalignment in this region were excluded.

Three-dimensional reconstruction

Data for the thoracic spine were reproduced three-dimensionally from the CT dataset (Siemens Healthcare GmbH, Erlangen Deutschland, Sensation 16, Spiral CT, 2 mm slice thickness; OsiriX, Version 5.6., Pixmea SARL, Bernex, Switzerland).

Measurement

Anatomical measurements of the lamina were performed while taking the trajectories for the LS into account. The sagittal midpoint at the spinolaminar junction was established as the point of entry for the LS. The LS terminates at cortical bone, in the junction between the transverse process and the pedicle of the contralateral side. The maximal length of the lamina, defined as the distance between the point of entry and the endpoint of the LS, was registered (Fig. 1). The minimal diameter of the lamina was determined at right angles to the optimal trajectory of the LS, between the outer cortical

margins of the lamina. The angle in the transverse plane is defined as the angle between a line of the entry and endpoint of the LS and the midline of the corresponding vertebral body (Fig. 2). Figures 1 and 3 demonstrate an own case as a clinical example for this theoretical study.

The angle in the sagittal plane is defined as the angle between a line of the entry and endpoint of the LS, and a line running parallel to the posterior margin of the vertebral body. Additionally, the diameters of the corresponding pedicles at the narrowest point between the outer margins of cortical bone were determined.

Evaluation of CT and anatomical data

In order to test the data obtained from the three-dimensional reconstructed image in regard of method-related deviations from the actual anatomical data, ten cadavers were scanned in a CT device. The values were determined by the above-mentioned method and were compared to anatomical data obtained from the third, fifth, and eighth vertebral body. The vertebral bodies were prepared and macerated in potash solution. Using a digital caliper (Mitutoyo, Series 500, accuracy of measurement 0.01 mm), the length of the lamina, width and height at the narrowest point of the lamina, and the height and width of the corresponding pedicles were determined manually (measurement error < 0.01 mm) and compared to the values obtained on CT.

Statistical analysis

Means and standard deviations were determined for all parameters such as length, diameter, and angulation. Normal distribution was tested with the Shapiro-Wilk test. A correlation

Fig. 1 Left: 3D reconstructed CT scan showing the optimal LS length and lamina diameter. Right: 3D reconstructed CT scan showing the optimal trajectory of the LS

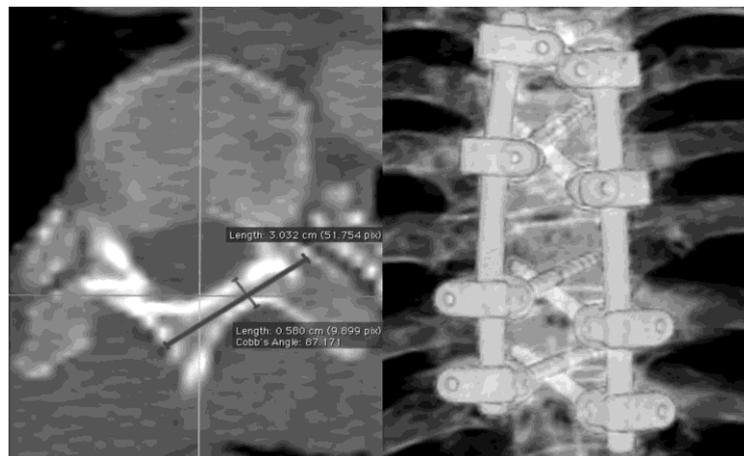
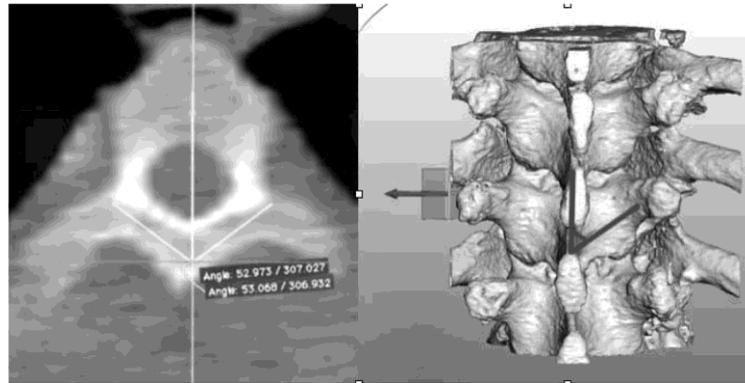


Fig. 2 Left: 3D reconstructed CT scan showing the angle measurement in the coronal plane. Right: 3D reconstructed CT scan showing the angle measurement in the sagittal plane



analysis of the parameters was performed. Pearson's test was used to test the correlation of values; the level of significance

was set to $p < 0.05$. The SAS software, version 9.4 (SAS, Cary, USA), was used for statistical analysis.

Fig. 3 **6a** A 75-year-old female patient with an unstable T4 fracture. CT scan demonstrated a pedicle width of max. 3.1 mm only. Therefore, stabilization via LS from T2 to T6 was performed. **6c** The pedicle in the height of T5 can be seen in the transversal plane. **6b** The correct screw position in the sagittal plane. **6d** The intralaminar screw position can be seen in the transversal plane



Results

Anatomical data from the CT dataset

Demographic data The mean age of the investigated subjects was 39.04 years (standard deviation (SD) 12.55) (females 42 years, SD 12.6; males 36.06 years, SD 11.85).

Lamina length The maximum length of the laminar screw was registered at T1 and the minimum length at T4. In males, the mean length was 3.69 cm at T1 (SD 0.59) and 3.62 cm at T12 (SD 0.61); the minimum length of 2.98 cm (SD 0.49) was registered at T4. In females, the mean length was 3.44 cm (SD 0.55) at T1 and 3.45 cm (SD 0.58) at T12. It decreased to the minimum value of 2.68 cm (SD 0.42) at T4 (Fig. 4). The change in the length of the lamina from T1 to T4 ($p < 0.05$) and T8 to T12 ($p < 0.001$) was significant.

The LS in females was on average 6.6% shorter than that in males. The gender-specific difference was significant for all vertebral bodies except T12 (T1 to T10, $p < 0.001$; T11 $p < 0.05$).

Diameter of the lamina The minimal diameter of the lamina decreased in superior-inferior direction, initially until the T5 to T8 and then increased, but did not reach the values of the upper thoracic spine. In males, the diameter was 0.66 cm at T1 (SD 0.13) and 0.60 cm at T12 (SD 0.09). In females, it was 0.62 cm (SD 0.12) at T1 and 0.56 cm (SD 0.12) at T12. However, the diameter decreased from T5 to T8 (Fig. 5). The changes in diameter from T4 to T6 ($p < 0.05$) and T8 to T11 ($p < 0.05$) were significant. A minor gender-specific difference of 5.2% was noted in the diameter of the lamina, which was significant only at T1*, T4*, T6**, T7*, and T9* ($*p < 0.05$, $**p < 0.01$).

Pedicle diameter In males, the diameter of the pedicle at the level of T1 was 1 cm (SD 0.24) and decreased to 0.58 cm (SD

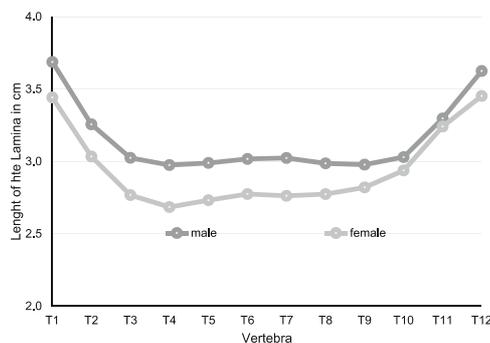


Fig. 4 Mean value of maximum allowable length of the lamina

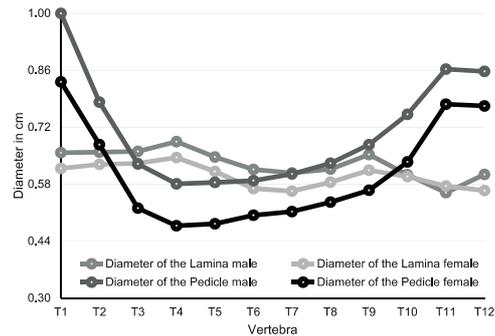


Fig. 5 Mean value of maximum allowable diameter of the lamina and width of the pedicle

0.17) at T4. At T12, the diameter increased to 0.86 cm (SD 0.23).

This tendency was also observed in females. Pedicle diameter was 0.83 cm (SD 0.17) at T1, decreased to 0.48 cm (SD 0.1) at T4, and rose to 0.77 cm (SD 0.2) at T12. The change in pedicle diameter was non-significant from T5 to T8 (T1–4 $p < 0.01$; T9–12 $p < 0.05$). The values in females were significantly (14.7%) less than those in males (T1–10 $p < 0.001$, T11 $p < 0.01$, T12 $p < 0.05$).

Correlation between lamina and pedicle diameter Pearson's correlation analysis revealed that the lamina and pedicle diameters of vertebral bodies in males were positively correlated for the vertebrae T1***, T2*, T3*, T7*, T8*, and T10 to T12** ($*p < 0.05$, $**p < 0.01$, $***p < 0.0001$). In females, a positive correlation was noted for the vertebral bodies T1**, T2**, T4*, T5*, T8**, and T12* ($*p < 0.05$, $**p < 0.01$). On a cross-gender basis, the diameter of the lamina was correlated with length over the entire thoracic spine except for T6 and T7 (T1–12; $p < 0.05$).

Angulation of the lamina The angulation of the lamina with reference to the sagittal midline of the vertebral body in the transverse plane, at the level of T1, was 50.34° (SD 7.65) in males and 50.41° (SD 7.72) in females. It increased to 55.61° (SD 9.14) in males and 55.96° (SD 8.7) in females at the T8, and then fell until T12 to 48.45° (SD 7.68) in males and 46.06° (SD 7.59) in females (Fig. 6). In males and females, the angulation changed in the sagittal plane in superior-inferior direction. In males, it changed from 56.4° (SD 9.16) at T1 to 45.69° (SD 7.61) at T12, and in females from 58.06° (SD 9.16) at T1 to 46.15° (SD 8.04) at T12.

Evaluation of CT data and anatomical data

Comparison of manually obtained data on the anatomical specimen with the reconstructed CT data revealed, for the 30

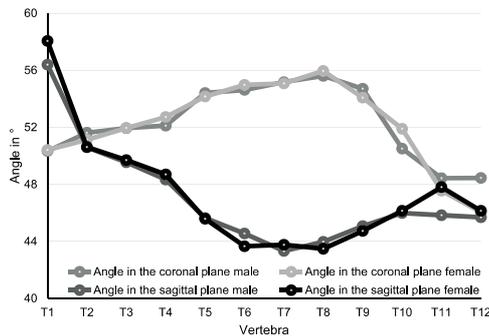


Fig. 6 Mean value of the angle in the coronal and sagittal plane

vertebral bodies from ten cadavers, a deviation of 0.08 cm or 5.35%; the deviation was non-significant for all registered data.

Discussion

The use of PS is the most frequently employed method for reliable fixation of vertebral bodies. However, the use of this technique is complicated or not feasible in cases of hypoplastic pedicles, tumors in the pedicle, after previous transpedicular cement application, or in patients undergoing revision surgery. Thus, alternative methods of fixation are needed. The use of LS proved to be a reliable alternative procedure at the level of C2 and also reduced the risk of complications [2, 16, 19]. However, the procedure is very rarely feasible for vertebral bodies from C3 to C6 because of the anatomical conditions in this region [1]. LS can be used safely and reliably at C7 [7] and in the upper thoracic spine [10, 15]. Data concerning its use in the lower thoracic spine are currently available only for pediatric patients [14].

The data presented in the current report show that the use of LS is limited in terms of diameter, but not the height of the lamina. The published literature mentions a minimal lamina diameter of 0.5 cm, which permits the use of screws with a diameter of 0.4 cm with 0.1 cm latitude [5, 11, 13, 14]. In the cervical spine, this criterion is only fulfilled by 72% of lamina at the vertebral body of C2 when using the above-mentioned screw diameter [6]. In the present investigation, a total of 90.5% of laminae in the thoracic spine were accessible by instruments. A mean laminar diameter of 0.63 cm was noted for T1 and 0.64 for T2. These data are in conformity with those reported by Cardoso et al. [3] as determined on 14 cadavers. However, laminar diameter reduces in superio-inferior direction; it is only 0.57 cm at T12. Given a threshold value of 0.5 cm for the diameter of the outer lamina, 8.9% of vertebral arches in males and 10.1% of those in females cannot be

accessed with instruments. Pedicle diameter is greatest (0.92 cm) at T1, decreases steadily to 0.53 cm at T4, and then increases to 0.81 cm at T12. Thus, T4 to T6 is a critical range for the use of PS [15]. A pedicle diameter less than 0.5 cm was noted in 13% of pedicles in males and 27% of those in females.

The minimum pedicle diameter in both genders was observed in the mid-thoracic spine. Given their different minimum values, when using a combination of both procedures, only 1.7% of vertebrae in males and 3.8% of those in females are unsuitable for PS as well as LS with the above-mentioned diameters.

The length of the lamina ranges between 3.61 cm at T1 and 2.85 cm at T4; 3.7% of laminae are less than 2.5 cm long. Thus, LS with a length of 2.5 to 3.5 cm can be safely used in the majority of vertebrae without injuring the facet joint.

The average height of the lamina at the crossing point of the bilateral LS is 1.82 cm (SD 0.24). The placement of bilateral LS was in all analyzed segments possible. However, the competing course, especially at the base of the spinous processes, influences the optimal trajectory of the bilateral LS. The first-placed LS takes part of the optimal trajectory for the second-placed LS and can lead to a deviation from the optimal trajectory of these.

For the present study, we used CT images with a slice thickness of 0.2 cm. The values obtained from sectional images reconstructed with OsiriX deviated from the anatomical values by 5.35%; the difference was non-significant for all values. The deviation of 5.35% is just marginally higher than the intra-observer variability of 5.06%. The difference may be explained by the slice thickness of CT images and the use of reconstructed data.

In contrast to PS, LS do not fulfill the prerequisites of three-column fixation. Therefore, in terms of stability, a distinction must be made between two- and three-column injuries [12]. In two-column injuries between C7 and T2, Kretzer et al. [12] found no significant difference between LS and PS in terms of biomechanical stability. In three-column injuries, in axial rotation, no difference was observed between the two techniques. However, PS provides significantly greater stability in flexion and extension compared to LS. Additional anterior stabilization resulted in no difference in stability between the two techniques [12]. A fracture of the pedicle makes the LS biomechanically ineffective and must be excluded prior to use.

The load-bearing capacity of LS is similar to that of PS. Ilgenfritz et al. [8] tested this by performing a pull-out test at the C7 vertebra on 17 cadavers. LS and PS achieved similar values and may therefore be regarded as equivalent in terms of stability. The pull-out attempt with LS caused no injury to the spinal canal because the lamina and the spinous process could break off dorsally and thus avoid injury to bone marrow [4]. As the angulations of the trajectories differ in LS and PS, the

combination of both types of screw fixation in adjoining segments causes an overlap of projecting screw heads. Therefore, a combination of pedicle and laminar screws cannot be used in directly adjacent segments.

To combine both procedures, one intervening segment must remain untreated with screws, or a lateral adapter should be used. One advantage of LS is that owing to the direct view of the site of placement at the junction of the spinous process into the lamina and the adjoining structures, the use of a navigation system is not obligatory [18].

Follow-up data and experience concerning the use of LS in the thoracic spine are rare. In a short-term study, after a period of 14 months, Kretzer RM et al. [10] observed no screw breakage, screw pull-out, or spinal deformation in 19 LS used in the first and second thoracic vertebrae. In another report, Kose et al. [9] investigated 20 patients treated with 57 LS after a period of 17.4 months and registered one fracture of the lamina and one screw pull-out. During the implantation, in three cases, the lamina was perforated anteriorly and was corrected intraoperatively. Due to the absence of long-term data, the possibility of using established instruments should be checked before using LS.

The present study is limited by several factors. We only studied Central European patients without deformities or fractures in the spine, aged 20 to 60 years; the data cannot be applied to older patients or persons from other regions without further validation.

The use of CT images with a slice thickness of 0.2 cm is subject to an inaccuracy of about 5%. No actual screws were used to perform the measurements; the data were obtained on a computer. Thus, elastic changes in bone were not registered. These occur on 85% of patients when the screw diameter is more than 65% of the bone diameter [17].

Conclusions

- Intralaminar screws with a diameter of 0.4 cm could be used in the thoracic spine in more than 90% of the investigated spines.
- When using a combination of laminar and pedicle screws, less than 3% of vertebrae cannot be accessed with instruments.
- The above-mentioned parameters must be determined in CT before using LS.
- Owing to the absence of long-term data, the applicability of the established method of instrumentation should be considered first before using LS.

Compliance with ethical standards

Ethical approval For this retrospective studies, formal consent is not required.

Conflict of interest All authors certify that they have no affiliations with or involvement in any organization or entity with any financial interest (such as honoraria; educational grants; participation in speakers' bureaus; membership, employment, consultancies, stock ownership, or other equity interest; and expert testimony or patent/licensing arrangements), or non-financial interest (such as personal or professional relationships, affiliations, knowledge, or beliefs) in the subject matter or materials discussed in this manuscript.

References

1. Alvin MD, Abdullah KG, Steinmetz MP, Lubelski D, Nowacki AS, Benzel EC, Mroz TE (2012) Translaminar screw fixation in the subaxial cervical spine: quantitative laminar analysis and feasibility of unilateral and bilateral translaminar virtual screw placement. *Spine (Phila Pa 1976)* 37:E745–E751. <https://doi.org/10.1097/BRS.0b013e31824e70ef>
2. Bhatnagar R, Yu WD, Bergin PF, Matteini LE, O'Brien JR (2010) The anatomic suitability of the C2 vertebra for intralaminar and pedicular fixation: a computed tomography study. *Spine J* 10: 896–899. <https://doi.org/10.1016/j.spinee.2010.06.010>
3. Cardoso MJ, Dmitriev AE, Lehman RA, Helgeson M, Cooper P, Rosner MK (2008) Computed tomography and biomechanical evaluation of screw fixation options at the cervicothoracic junction: intralamina versus intrapedicular techniques. *Spine (Phila Pa 1976)* 33:2612–2617. <https://doi.org/10.1097/BRS.0b013e31818ce3ac>
4. Cardoso MJ, Dmitriev AE, Helgeson MD, Paik H, Mendelsohn AK, Lehman RA Jr, Rosner MK (2010) Does catastrophic midline failure of upper thoracic lamina screws violate the spinal canal? A cadaveric biomechanical analysis using two lamina screw techniques. *Spine J* 10:1007–1013. <https://doi.org/10.1016/j.spinee.2010.07.393>
5. Chern JJ, Chamoun RB, Whitehead WE, Curry DJ, Luerssen TG, Jea A (2009) Computed tomography morphometric analysis for axial and subaxial translaminar screw placement in the pediatric cervical spine. *J Neurosurg Pediatr* 3:121–128. <https://doi.org/10.3171/2008.11.PEDS08277>
6. Dean CL, Lee MJ, Robbin M, Cassinelli EH (2009) Correlation between computed tomography measurements and direct anatomic measurements of the axis for consideration of C2 laminar screw placement. *Spine J* 9:258–262. <https://doi.org/10.1016/j.spinee.2008.06.454>
7. Hong JT, Sung JH, Son BC, Lee SW, Park CK (2008) Significance of laminar screw fixation in the subaxial cervical spine. *Spine (Phila Pa 1976)* 33:1739–1743. <https://doi.org/10.1097/BRS.0b013e31817d2aa2>
8. Ilgenfritz RM, Gandhi AA, Fredericks DC, Grosland NM, Smucker JD (2013) Considerations for the use of C7 crossing laminar screws in subaxial and cervicothoracic instrumentation. *Spine (Phila Pa 1976)* 38:E199–E204. <https://doi.org/10.1097/BRS.0b013e31827de094>
9. Kose KC, Inanmaz ME, Atmaca H, Basar H, Isik C, Bal E (2013) The use of intralaminar screws in patients with spinal deformity. *J Spinal Disord Tech* 26:E299–E305. <https://doi.org/10.1097/BSD.0b013e31828804a7>
10. Kretzer RM, Sciubba DM, Bagley CA, Wolinsky JP, Gokaslan ZL, Garonzik IM (2006) Translaminar screw fixation in the upper thoracic spine. *J Neurosurg Spine* 5:527–533. <https://doi.org/10.3171/spi.2006.5.6.527>
11. Kretzer RM, Chaput C, Sciubba DM, Garonzik IM, Jallo GI, McAfee PC, Cunningham BW, Tortolani PJ (2010) A computed tomography-based feasibility study of translaminar screw fixation in the upper thoracic spine. *J Neurosurg Spine* 12:286–292. <https://doi.org/10.3171/2009.10.SPINE09546>

12. Kretzer RM, Hu N, Kikkawa J, Garonzik IM, Jallo GI, Tortolani PJ, McAfee PC, Cunningham BW (2010) Surgical management of two- versus three-column injuries of the cervicothoracic junction: biomechanical comparison of translaminar screw and pedicle screw fixation using a cadaveric model. *Spine (Phila Pa 1976)* 35:E948–E954. <https://doi.org/10.1097/BRS.0b013e3181c9f56c>
13. Mandel IM, Kambach BJ, Petersilge CA, Johnstone B, Yoo JU (2000) Morphologic considerations of C2 isthmus dimensions for the placement of transarticular screws. *Spine (Phila Pa 1976)* 25: 1542–1547
14. Molina C, Sciubba DM, Chaput C, Tortolani PJ, Jallo GI, Kretzer RM (2012) A computed tomography-based feasibility study of translaminar screw placement in the pediatric thoracic spine. *J Neurosurg Pediatr* 9:27–34. <https://doi.org/10.3171/2011.10.PEDS11121>
15. Padua MR, Yeom JS, Em HT, Kim HJ, Chang BS, Lee CK, Riew KD (2013) Feasibility of laminar screw placement in the upper thoracic spine: analysis using 3-dimensional computed tomographic simulation. *Spine (Phila Pa 1976)* 38:1146–1153. <https://doi.org/10.1097/BRS.0b013e31828aadf5>
16. Sciubba DM, Noggle JC, Vellimana AK, Conway JE, Kretzer RM, Long DM, Garonzik IM (2008) Laminar screw fixation of the axis. *J Neurosurg Spine* 8:327–334. <https://doi.org/10.3171/SPI/2008/8/4/327>
17. Sjostrom L, Jacobsson O, Karlstrom G, Pech P, Rauschnig W (1993) CT analysis of pedicles and screw tracts after implant removal in thoracolumbar fractures. *J Spinal Disord* 6:225–231
18. Wang MY (2007) Cervical crossing laminar screws: early clinical results and complications. *Neurosurgery* 61:311–315; discussion 315–316. <https://doi.org/10.1227/01.neu.0000303987.49870.7b>
19. Wright NM (2004) Posterior C2 fixation using bilateral, crossing C2 laminar screws: case series and technical note. *J Spinal Disord Tech* 17:158–162