

„Vergleich zweier operativer Versorgungsstrategien bei instabilen Frakturen der thorakolumbalen Wirbelsäule“

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Dr. med.

an der Medizinischen Fakultät

der Universität Leipzig

eingereicht von: Dr.med.univ. Christoph Johannes Erichsen

Geburtsdatum / Geburtsort: 21.01.1983 / Friedrichshafen

angefertigt an / in:

Klinik und Poliklinik für Orthopädie, Unfallchirurgie und Plastische Chirurgie
Universitätsklinikum Leipzig und
BG Unfallklinik Murnau, Abteilung für Wirbelsäulenchirurgie

Betreuer: Prof. Dr. med. Ulrich Spiegl

Ko-Betreuer: Prof. Dr. med. Christoph Heyde

Beschluss über die Verleihung des Doktorgrades vom:

27.04.2021

Inhaltsverzeichnis

Einführung.....	4
Einleitung.....	4
Klassifikation von Wirbelkörperverletzungen.....	4
Diagnostik.....	7
Therapiekonzepte.....	10
Dorsale Stabilisierung.....	10
Additive Ventrale Stabilisierung.....	12
Nachbehandlung.....	14
Vergleich verschiedener operativer Therapiekonzepte.....	15
Studienziel.....	15
Publikation.....	17
Zusammenfassung der Arbeit.....	28
Literaturverzeichnis.....	31
Darstellung des eigenen Beitrags.....	33
Erklärung über die eigenständige Abfassung der Arbeit.....	34
Publikationsverzeichnis.....	35
Danksagung.....	37

EINFÜHRUNG

EINLEITUNG

Im unfallchirurgischen Klinikalltag nimmt die Zahl an Wirbelsäulenverletzungen im Vergleich zur Gesamtzahl traumatologischer Fälle einen nur kleinen Teil ein. Auf Grund zunehmender Freizeitaktivitäten mit höheren Geschwindigkeiten und gestiegenen Ansprüchen an die Mobilität generell, werden wir jedoch mit einer steigenden Zahl dieser Verletzungen konfrontiert (1). Die häufigsten Unfallmechanismen, die zu einer Verletzung der Wirbelsäule führen, sind Stürze aus größerer Höhe, gefolgt von Verkehrsunfällen und Sportunfällen (1). Penetrierende Verletzungen sind im Gegensatz zum US-amerikanischen oder südafrikanischen Raum in Europa eher selten.

Der thorakolumbale Übergang (TLÜ), namentlich die Brustwirbelkörper (BWK) 11 und 12 sowie die Lendenwirbelkörper (LWK) 1 und 2, ist mit 67% aller Wirbelsäulenverletzungen die am häufigsten verletzte Region der Wirbelsäule (2). Dies ist begründet durch den Übergang der Kyphose der Brustwirbelsäule (BWS) zur Lordose der Lendenwirbelsäule (LWS) und dem Ende des Rippenkäfigs auf Höhe von BWK 12. Auf Grund der Weite des Spinalkanals führen Frakturen auf dieser Höhe im Gegensatz zu Verletzungen in der mittleren Brustwirbelsäule (BWS) auch bei 40-50% Einengung des Spinalkanals häufig nicht zu neurologischen Ausfällen.

KLASSIFIKATION VON WIRBELKÖRPERVERLETZUNGEN

Wirbelkörperfrakturen des TLÜ werden nach dem „AOSpine Thoracolumbar Spine Injury Classification System“ in Typ A, B und C Verletzungen eingeteilt (3) (Abb.1). Eine genaue Klassifikation ist notwendig um reproduzierbar die Verletzungsschwere zu bestimmen und eine Therapieentscheidung treffen zu können.

Typ A Verletzungen beinhalten die Kompressionsfrakturen wobei die A0 Klassifikation auch Quer- und Dornfortsatzbrüche berücksichtigt. A1 Frakturen sind Impaktionsbrüche, gekennzeichnet durch eine meist geringe Kyphosierung und eine intakte Wirbelkörperhinterkante. Typ A2 Frakturen zeigen eine Spaltbildung von

Deck- zur Grundplatte mit Beteiligung der angrenzenden Bandscheiben ohne Beteiligung der Hinterkante.

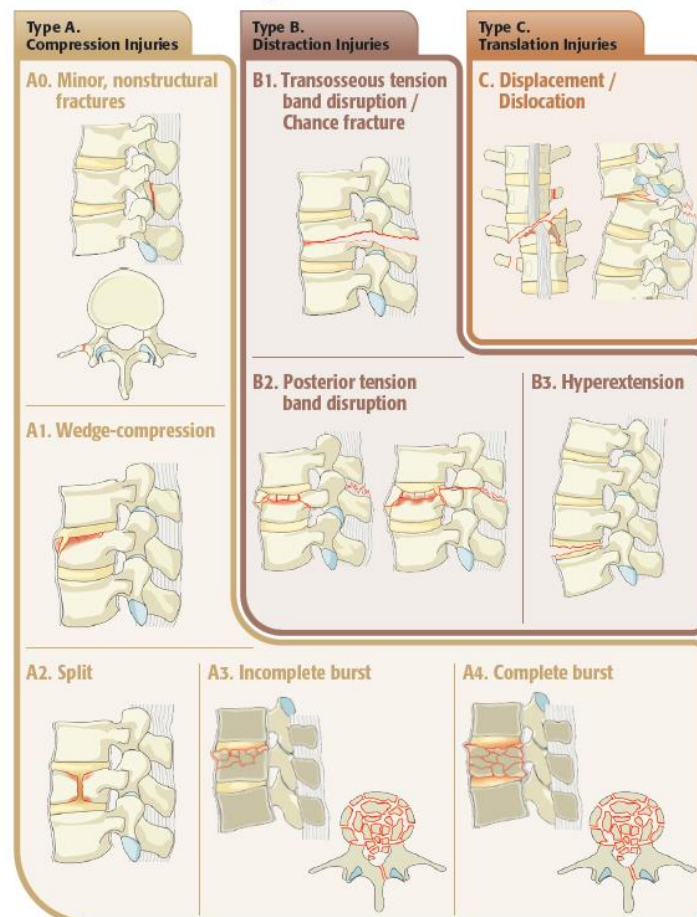
Die A3 Fraktur, auch inkompletter Berstungsbruch, ist gekennzeichnet durch eine Fraktur einer Endplatte, mehrheitlich der Deckplatte, mit Hinterkantenbeteiligung. Die A4 Fraktur unterscheidet sich dadurch, dass bei dieser ein Berstungsspalt- bzw. ein kompletter Berstungsbruch vorliegt, also beide Endplatten und häufig beide angrenzenden Bandscheiben betroffen sind.

Die Typ B Verletzungen betreffen entweder das vordere oder hintere Längsband. In der Regel liegt hier ein Flexions- oder Extensionsmechanismus zu Grunde. Die Typ B1 Verletzung wird auch als „Chance-Fraktur“ bezeichnet. Hier ist die hintere Säule knöchern verletzt. Typ B2 Verletzungen zeigen eine Unterbrechung des hinteren Längsbandes mit oder ohne knöcherne Beteiligung. Zusätzliche Kompressionsfrakturen des Wirbelkörpers werden hier nach dem korrespondierenden Typ A klassifiziert. Durch einen Hyperextensionsmechanismus kommt es zur Typ B3 Verletzung gekennzeichnet durch Ruptur des vorderen Längsbandes mit Fortsetzung der Verletzung durch den Wirbelkörper oder die Bandscheibe nach dorsal. Diese Verletzung ist häufig bei ankylosierenden Erkrankungen der Wirbelsäule wie Morbus Bechterew oder der Diffusen idiopathische Skeletthyperostose (DISH) zu finden. Von den Typ B Verletzungen abgegrenzt werden die Typ C Verletzungen. Diese schwerste Form der Wirbelsäulenverletzung ist definiert durch eine Translations- bzw. Dislokationsstellung der Wirbelsäule. Häufig liegen hier neurologische Ausfälle vor. Der neurologische Status wird anhand einer Skala von N0 - N4 eingeteilt, wobei N0 bedeutet, dass kein neurologisches Defizit vorliegt. N4 ist definiert durch eine komplette Querschnittslähmung. NX bedeutet, dass der neurologische Status beispielsweise auf Grund einer Bewusstlosigkeit des Patienten nicht erhoben werden kann.

Zur weiteren Klassifizierung existieren verschiedene Modifier, die die Entwicklung einer dezidierten Therapiestrategie vereinfachen (4). Die im Klinikalltag häufig angewandte McCormack Load Sharing Classification (5) betrachtet drei verschiedene Parameter. Einen hohen Einfluss auf die Therapieform hat das Ausmaß der Zerstörung des Wirbelkörpers welcher in drei Schweregrade eingeteilt wird. Desweiteren wird die Dislokation der Fragmente sowie der Grad der

posttraumatischen Kyphose beurteilt und ebenfalls jeweils in drei Grade eingeteilt. Die Punkte werden addiert, so dass minimal 3 und maximal 9 Punkte erreicht werden. Diese zusätzliche Klassifikation von Wirbelkörperfrakturen ist besonders bei A3 Frakturen sinnvoll, da hier der Grad der Instabilität differenzierter betrachtet und daraus eine Therapieentscheidung abgeleitet werden kann. Je höher der Grad der Verletzung desto wahrscheinlicher ist zudem auch die Notwendigkeit einer Rekonstruktion der vorderen Säule. Bei der Entscheidung ob eine additive ventrale Stabilisierung notwendig ist kann auch die MRT Diagnostik zur Detektion und Klassifikation eines eventuellen Bandscheibenschadens helfen. Sander et al. hat vier verschiedene Grade von unverletzt (Grad 0) bis disloziert (Grad 3) definiert (6) (Abb. MRT).

AOSpine Thoracolumbar Classification System



Contact: research@aospine.org
 Further information: www.aospine.org/classification

© 2018 AOSpine International
 This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License.
 To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Abb.1. Das AOSpine Klassifikationssystem der thorakolumbalen Wirbelsäule

DIAGNOSTIK

Die Diagnosestellung einer Wirbelsäulenverletzung beinhaltet neben der Anamnese, die eingehende körperliche und neurologische Untersuchung sowie eine differenzierte bildgebende Diagnostik. Ziel der Diagnostik ist vor allem die Beurteilung der Stabilität der Wirbelsäulenverletzung. Neben der konventionellen Röntgendiagnostik in 2 Ebenen (Abb.2) kommt vor allem die Computertomografie (CT) als Standardverfahren zur näheren Abklärung und genauen Frakturklassifizierung sowie Indikationsstellung und Operationsplanung zum Einsatz (4) (Abb.3a+b). Bei Patienten mit Hochenergietraumata erfolgt entsprechend der S3-Polytraumaleitlinie ein Polytrauma-Spiral-CT, bei welchem das komplette Achsenskelett zur Darstellung kommt (7). Die Magnetresonanztomografie (MRT) dient der weiteren Abklärung insbesondere zur Detektion von ligamentären Instabilitäten und Verletzungen der Bandscheibe (Abb.5).

Spezielle Aufnahmetechniken wie Funktionsaufnahmen oder Wirbelsäulengesamtaufnahmen spielen in der Diagnostik akuter Verletzungen eine untergeordnete Rolle. Die Wirbelsäulengesamtaufnahme wird vor allem bei posttraumatischen oder degenerativen Veränderungen eingesetzt, spielt jedoch auch für den weiteren Verlauf traumatischer Wirbelkörperfrakturen eine zunehmend wichtige Rolle. Die sagittale Balance hat in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen und wird anhand der Wirbelsäulengesamtaufnahme seitlich im Stehen durch verschiedene Schlüsselparameter bemessen. Hierzu gehört die Lumbale Lordose (LL), die Thorakale Kyphose (TK) die Pelvic Incidence (PI), der Pelvic Tilt (PT), der Sacral Slope (SS) sowie das C7-Lot. Anhand dieser Parameter lassen sich Rückschlüsse auf die Statik der Wirbelsäule ziehen (8, 9) (Abb.6)



Abb.2: BWK 12 Fraktur im seitlichen Strahlengang, V.a. Typ AOSpine A3

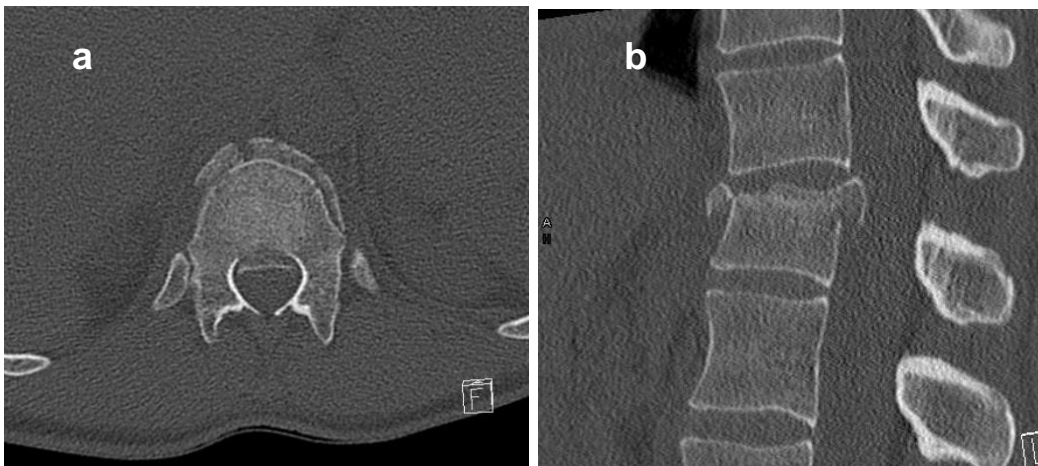


Abb.3 a+b: BWK 12 Typ A3 Fraktur im CT axial (a) und sagittale Rekonstruktion (b); bei nicht sicher auszuschließender Beteiligung der dorsalen Strukturen (B-Komponente) MRT Diagnostik indiziert



Abb.5: Darstellung einer LWK 2 Typ A3 Fraktur mit Ruptur der kranialen Bandscheibe (Bandscheibenschaden Grad 2 nach Sander et al.) im MRT

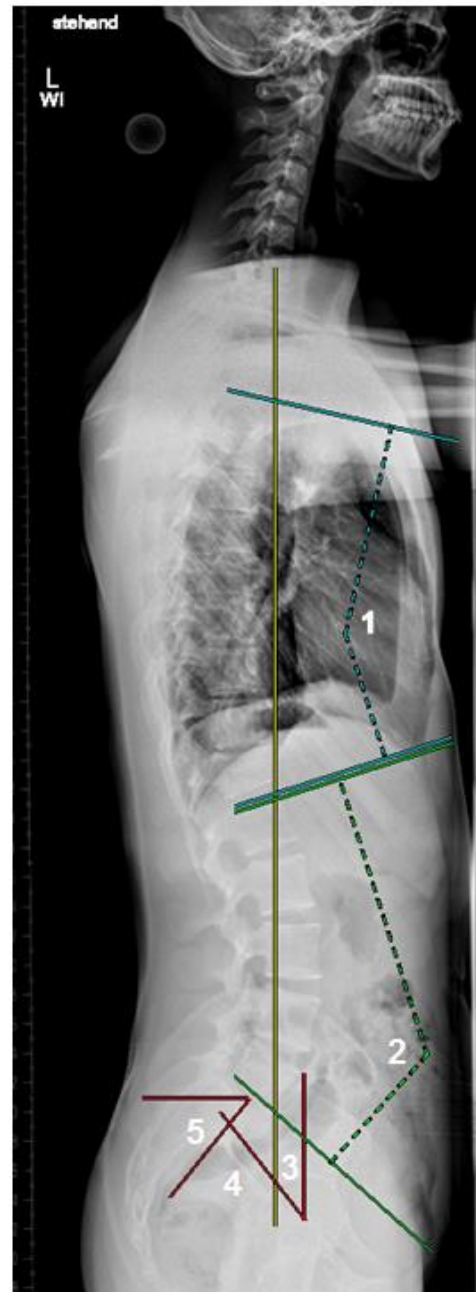


Abb.6: Wirbelsäulengesamtaufnahme im Stehen in seitlicher Ebene. Gelb=C7-Lot, 1=Thorakale Kyphose, 2=Lumbale Lordose, 3=Pelvic Tilt, 4=Pelvic Incidence, 5=Sacral Slope

THERAPIEKONZEPTE

Ziel jeder Therapie von Wirbelsäulenverletzungen sollte die Wiederherstellung der anatomischen Struktur der Wirbelsäule sein, um deren Funktion zu erhalten. Insbesondere bei instabilen Verletzungen gilt es neurologische Läsionen zu verhindern oder durch entsprechende Maßnahmen zu mindern.

Grundsätzlich können Frakturen des TLÜ abhängig vom Frakturtyp konservativ oder operativ behandelt werden. Entsprechend der Therapieempfehlung der Sektion Wirbelsäule der Deutschen Gesellschaft für Orthopädie und Unfallchirurgie (10) werden Frakturen vom Typ A1 in der Regel konservativ mittels frühfunktioneller Behandlung unter bedarfsgerechter analgetischer Therapie und physiotherapeutischer Anleitung behandelt. Engmaschige Röntgenkontrollen des TLÜ im Stehen in zwei Ebenen sind notwendig um eine mögliche sekundäre Fehlstellung frühzeitig zu detektieren. Typ A2 Frakturen vom Kneifzangentyp, A4, B und C Frakturen werden in der Regel operativ behandelt.

Die Behandlungsstrategie bei inkompletten Berstungsbrüchen vom Typ A3 wird anhaltend kontrovers diskutiert. Während vor allem im angloamerikanischen Raum die Indikation zur Operation nur bei neurologischen Defiziten gesehen wird (11) sehen andere die Indikation bei einer posttraumatischen Kyphosierung von 10-15°, skoliotischer Fehlstellung von < 5-10°, begleitenden Bandscheibenschäden und/oder bei einem McCormack Score von 6 oder mehr (4, 5) (12).

DORSALE STABILISIERUNG

In der Regel werden Typ A3 Frakturen mit Indikation zur operativen Stabilisierung primär von dorsal stabilisiert. In der akuten Phase gelingt die Reposition insbesondere des Hinterkantenfragmentes am besten. Durch eine bisegmentale dorsale Instrumentierung kann die Reposition der Fehlstellung und eine Dekompression des Spinalkanals meist durch Ligamentotaxis erreicht werden. Dies wird insbesondere über monoaxiale Pedikelschrauben erreicht. Zudem haben Untersuchungen gezeigt, dass im Vergleich zu polyaxialen Pedikelschrauben monoaxiale Schraubenstabsysteme eine höhere Stabilität aufweisen (13). Zusätzlich können sogenannte Indexschrauben in den frakturierten Wirbelkörper eingebracht werden oder bei schlechter Knochenqualität eine Zementaugmentation der

Schrauben oder Kyphoplastie des frakturierten Wirbelkörpers im Sinne einer Hybridstabilisierung durchgeführt werden. Neben der dorsalen Stabilisierung in offener Technik hat in den letzten Jahren die minderinvasive perkutane Instrumentierung zunehmend an Bedeutung gewonnen. Diese weist gegenüber der offenen Technik einige Vorteile wie geringeren Blutverlust, weniger Muskelschädigung, kürzere OP-Dauer, kürzere Krankenhausaufenthalte sowie geringeres postoperatives Schmerzlevel auf (14-17). Kritiker dieser Methode führen jedoch die mangelnde Möglichkeit der adäquaten Reposition und möglicherweise die Gefahr höherer Repositionsverluste als Nachteile auf. Eine Reposition kann primär schon durch korrekte Lagerung des Patienten im Durchhang auf dem Operationstisch erfolgen. Für eine suffiziente Retention sollten monoaxiale Schraubensysteme zur Anwendung kommen. Die verwendeten Längsträger der perkutanen Systeme weisen mit 5,5 mm einen geringeren Durchmesser als die der offenen Technik mit 6 mm auf. Dies kann dazu führen, dass sich der dünnere Längsträger der Fehlstellung anpasst und nicht der kyphosierte Wirbelkörper an den Stab (18). Chrom-Kobalt Längsträger, die in etwa der Steifigkeit eines 6 mm Titanstabes entsprechen können hier eine höhere Stabilität bewirken.

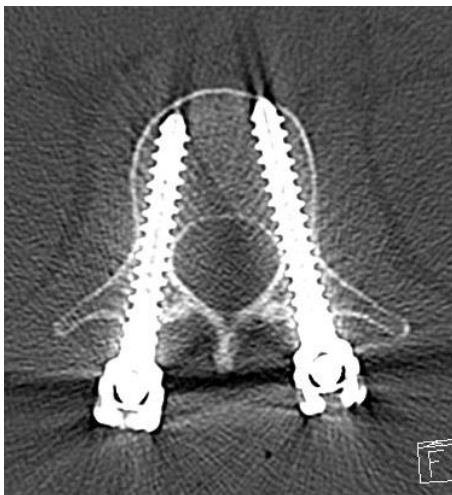


Abb.7: Axiale postoperative CT-Aufnahme mit korrekt verlaufenden Pedikelschrauben nach perkutaner Stabilisierung

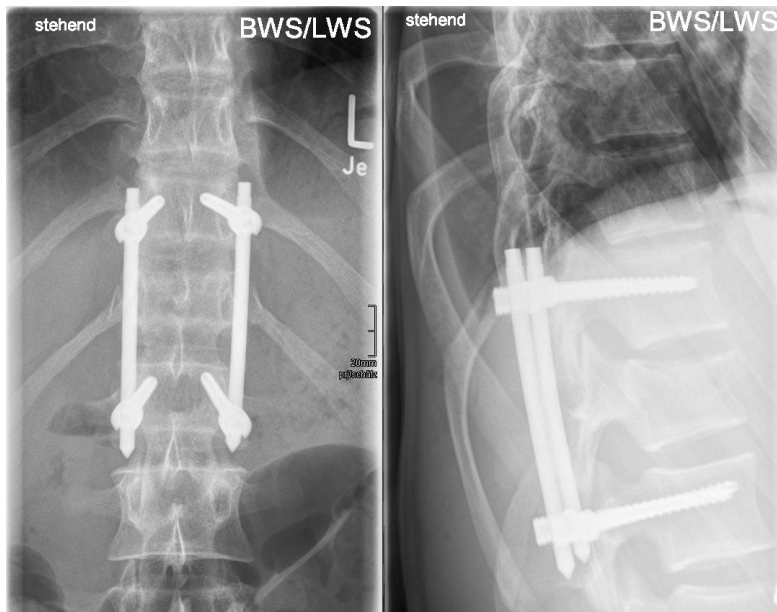


Abb.8: Postoperative Röntgenaufnahme (anterior-posterior und seitlich im Stehen) nach perkutaner dorsaler Stabilisierung mittels monoaxialem Schraubensystem

ADDITIVE VENTRALE STABILISIERUNG

Eine additive ventrale Stabilisierung zur Unterstützung der dorsal erreichten Reposition wird bei Patienten durchgeführt, die auf Grund der Frakturmorphologie ein höheres Risiko eines Repositionsverlustes haben oder einen posttraumatischen Bandscheibenschaden aufweisen. Moderne Verfahren wie die ventrale thoroskopische Spondylodese (VTS) bieten gegenüber offenen Verfahren den Vorteil einer reduzierten Zugangsmorbidität (19). Die ventrale Stabilisierung kann bei singulärer Fraktur monosegmental oder bisegmental erfolgen. Bei Typ A3 Frakturen ist die monosegmentale Spondylodese in der Regel ausreichend. In der heutigen Zeit werden immer weniger Knochentransplantate wie Beckenkammspäne sondern in der Regel Implantate aus verschiedenen Materialien wie beispielsweise PEEK, Titan oder Tantalum benutzt. Häufig wird additiv ein Platten-/Schrauben Konstrukt verwendet um die Stabilität zu erhöhen (19) (Abb.9+10).

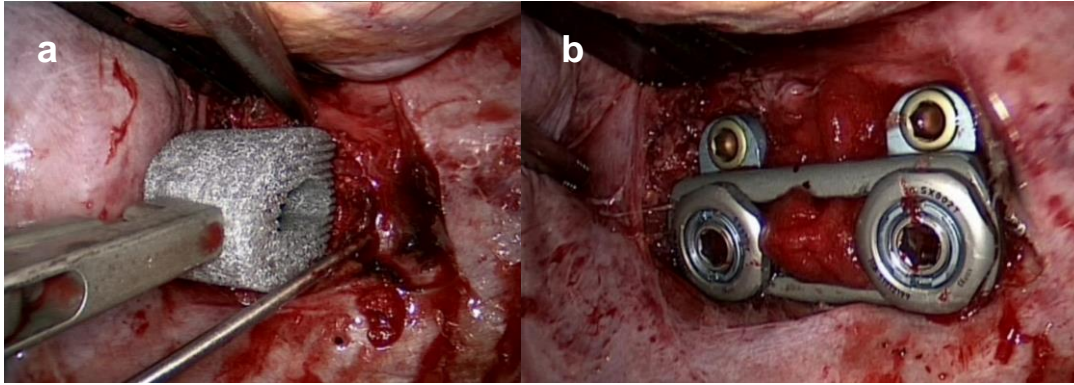


Abb.9: Intraoperative thorakoskopische Darstellung der Positionierung eines Tantalumcages (a) und einer additiven Plattenosteosynthese (b) bei 10 Tage alter LWK 1 Fraktur Typ A3, McCormack 7. Zugang von links thorakal.

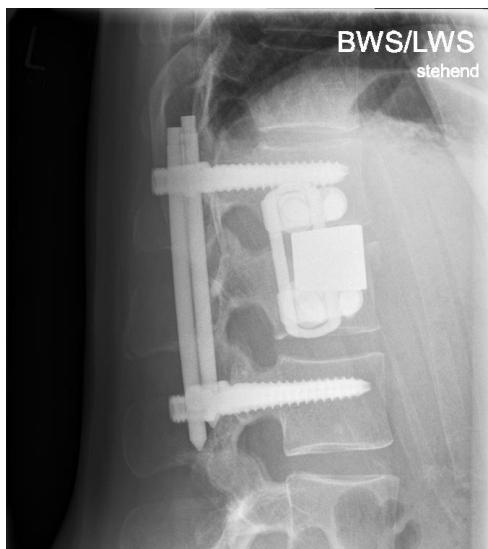


Abb.10: Postoperatives Ergebnis nach dorsoventral stabilisierter A3-Fraktur

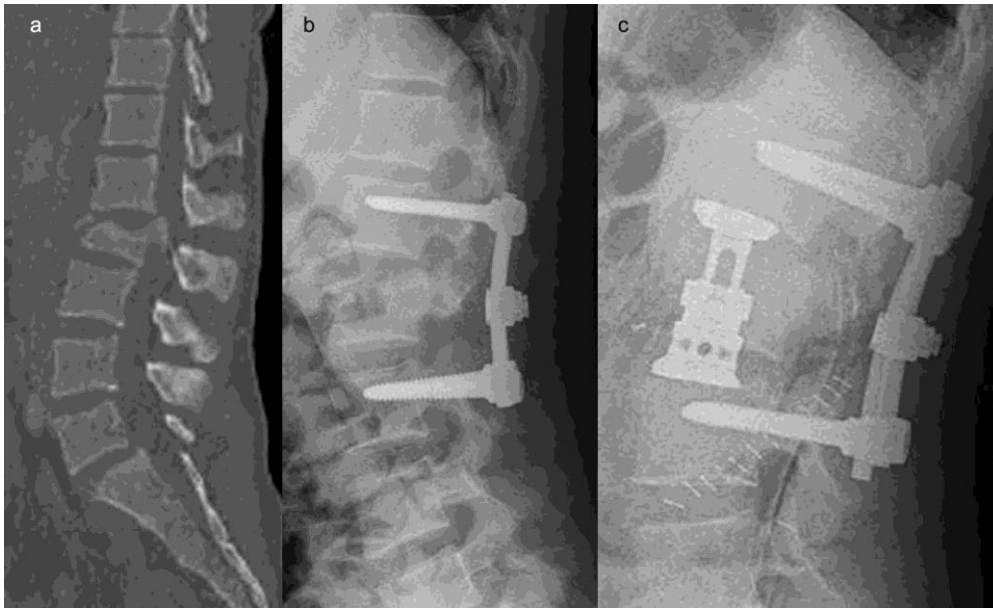


Abb.11 a-c: Offene dorsale Stabilisierung (b) und additive bisgmentale ventrale Stabilisierung (c) einer LWK 2 Fraktur Typ AOSpine A3, McCormack 8 (a)

NACHBEHANDLUNG

Grundsätzlich erfolgt eine frühfunktionelle Nachbehandlung unter Vermeiden von Heben und Tragen schwerer Lasten für eine Dauer von 3 Monaten. Nach gesicherter Wundheilung steht die krankengymnastische Rückenschule mit isometrischen Kräftigungsübungen der Rumpf- und Rückenmuskulatur im Vordergrund.

Nach ventraler Stabilisierung verbringen die Patienten bei liegender Thoraxdrainage zur Überwachung eine Nacht auf Intensivstation. Bei unauffälligem Verlauf kann die Drainage am Folgetag nach radiologischer Kontrolle entfernt werden und der Patient auf Normalstation verlegt werden.

Das ventral implantierte Material wird in der Regel nicht entfernt. Zur Freigabe des Bewegungssegmentes wird bei rein dorsaler Instrumentierung oder bei additiv monosegmentaler ventraler Stabilisierung die dorsale Instrumentierung in der Regel nach frühestens 6 Monaten postoperativ bei gesicherter knöcherner Konsolidierung wieder entfernt.

VERGLEICH VERSCHIEDENER OPERATIVER THERAPIEKONZEPTE

Es wird anhaltend über die optimale operative Therapiestrategie der Typ A3 Fraktur diskutiert. Während einige Kliniken alle Typ A3 Frakturen ohne Neurologie mit dorsaler Stabilisierung in offener Technik behandeln tun andere dies mit der perkutanen minderinvasiven Technik. In den letzten Jahren wird die minderinvasive oder perkutane Technik zunehmend häufiger angewendet. Es wird jedoch nach wie vor darüber diskutiert, ob die minderinvasive Technik der offenen Technik überlegen ist. Unklar ist ob mit der minderinvasiven Methode eine adäquate Reposition zu erreichen ist und ob die Reposition dauerhaft zu halten ist. Auch die Versorgungskonzepte bezüglich einer additiven ventralen Stabilisierung unterscheiden sich vor allem hinsichtlich des Zeitpunktes. Einige Zentren bevorzugen eine zeitverzögerte ventrale Stabilisierung nach ca. 6 Wochen (13). Mögliche Bandscheibenschäden stellen sich häufig erst zeitverzögert dar. Somit ist bei Frakturen vom Typ McCormack 5 und 6, die häufig nur aufgrund des Bandscheibenschadens operiert werden, eine zeitverzögerte MRT-Diagnostik möglicherweise sinnvoll, um eine Überversorgung zu reduzieren. Das Versorgungskonzept anderer Kliniken beinhaltet eine frühzeitige additive ventrale Stabilisierung während des ersten Klinikaufenthaltes um einen Verlust des initialen Repositionsergebnisses zu vermeiden.

Bisherige Studien, die diese Fragestellung bearbeitet haben, haben sich nicht selektiv auf Frakturen einer einheitlichen Klassifikation (A3) und Höhe beschränkt (20, 21).

STUDIENZIEL

Ziel unserer Arbeit ist es ausschließlich Frakturen des thorakolumbalen Überganges, also Frakturen der Brustwirbelkörper 11 und 12 sowie der Lendenwirbelkörper 1 und 2 der AO Spine Klassifikation Typ A3 unter Ausschluss osteoporotischer Frakturen zu untersuchen. Hierzu werden die Versorgungskonzepte zweier überregionaler Traumazentren bei A3 Frakturen des thorakolumbalen Überganges hinsichtlich des klinischen und radiologischen Outcomes verglichen. Diese unterscheiden sich zum einen durch die Art der dorsalen Versorgungstechnik, offen versus minderinvasiv und

zum anderen durch den Zeitpunkt der additiv ventralen Stabilisierung, früh oder zeitverzögert.

Dadurch können Angaben über die Effektivität der jeweiligen Technik, deren Komplikationsraten und über den zu erwartenden Repositionsverlust gemacht werden.

PUBLIKATION

RESEARCH ARTICLE

Open Access



Percutaneous versus open posterior stabilization in AOSpine type A3 thoracolumbar fractures

Christoph J. Erichsen^{1*} , Christoph-Eckhard Heyde², Christoph Josten², Oliver Gonschorek¹, Stephanie Panzer^{3,4}, Christian von Rueden^{1,4} and Ulrich J. Spiegel²

Abstract

Background: The purpose of this retrospective cohort study was to compare treatment strategies of two level-one trauma centers regarding clinical and radiological outcomes focusing on non-osteoporotic AOSpine type A3 fractures of the thoracolumbar spine at levels T11 to L2.

Methods: Eighty-seven patients between 18 and 65 years of age that were treated operatively in either of two trauma centers were included. One treatment strategy includes open posterior stabilization whereas the other uses percutaneous posterior stabilization. Both included additional anterior fusion if necessary. Demographic data, McCormack classification, duration of surgery, hospital stay and further parameters were assessed. Oswestry Disability Index (ODI), Visual Analog Scale (VAS) and SF-36 were measured for functional outcome. Bisegmental kyphosis angle, reduction loss and sagittal alignment parameters were assessed for radiological outcome. Follow up was at least 24 months.

Results: There was no significant difference regarding our primary functional outcome parameter (ODI) between both groups. Regarding radiological outcome kyphosis angle at time of follow up did not show a significant difference. Reduction loss at time of follow up was moderate in both groups with a significantly lower rate in the percutaneously stabilized group. Surgery time was significantly shorter for posterior stabilization and anterior fusion in the percutaneous group. Time of hospital stay was equal for posterior stabilization but shorter for anterior fusion in the open stabilized group.

Conclusion: Both treatment strategies are safe and effective showing only minor loss of reduction. Clinical relevant differences in functional and radiographic outcome between the two surgical groups could not be demonstrated.

Trial registration: It was conducted according to ICMJE guidelines and has been retrospectively registered with the German Clinical Trials Registry (identification number: [DRKS00015693](https://www.clinicaltrials.gov/ct2/show/study?term=DRKS00015693&rank=1), 07.11.2018).

Keywords: Thoracolumbar fracture, Posterior open instrumentation, Additional anterior fusion, Percutaneous fixation, Sagittal balance

* Correspondence: christoph.erichsen@bgu-murnau.de

¹Department of Trauma Surgery, BG Trauma Center Murnau, Professor-Küntschers Str. 8, 82418 Murnau, Murnau am Staffelsee, Germany
Full list of author information is available at the end of the article



Introduction

Fractures of the thoracolumbar spine account for two-thirds of all spinal injuries [1]. These fractures are usually classified according to the AOSpine Classification [2]. Incomplete burst fractures (AOSpine type A3) represent the majority of thoracolumbar fractures [3]. When treated operatively management includes isolated anterior fusion, posterior stabilization using an internal fixation device in open or minimal invasive technique or combined posterior stabilization and anterior fusion [4–7]. During recent years, percutaneous minimally invasive internal stabilization of thoracolumbar spinal fractures without neurological disabilities has been established [8–13]. Nevertheless, there is still a controversy whether minimally invasive stabilization is superior to open posterior instrumentation. It remains unclear whether the minimal invasive technique is able to achieve sufficient fracture reduction and whether retention can be maintained.

Multiple earlier studies have evaluated radiological and clinical outcomes comparing both techniques [14–21] but none of them have focused on one specific fracture configuration and spinal localization.

Therefore, the aim of this study was to compare surgical treatment strategies of two level-one trauma centers regarding clinical and radiological outcomes focusing on isolated non-osteoporotic AOSpine type A3 fractures of the thoracolumbar spine at levels T11 to L2. We hypothesized that minimally invasive posterior stabilization achieves similar reduction rates as the open technique with lower complication rates.

Patients and methods

Study design

This study was designed as a retrospective cohort study. Patients between 18 and 65 years with traumatic incomplete burst fractures of the thoracolumbar junction (vertebral bodies T11 to L2) treated with either of the two treatment strategies at one of two level I trauma-centers from 2013 to 2015 were included. Treatment strategy in trauma center A included open posterior stabilization and additive anterior fusion if necessary. In trauma center B, minimally invasive posterior stabilization and additive anterior fusion if necessary was performed. Details of the two treatment strategies are described below.

Patients with other than AOSpine type A3 fractures, fractures older than four weeks, osteoporotic or pathologic fractures, neurological deficits, polytraumatized patients with an Injury Severity Score (ISS) ≥ 16 , additional kyphoplasty or vertebroplasty, dorsal stabilization of more than two moving segments, pregnant patients, and those who were not able to give informed consent were excluded from the study.

Demographic data

Gender, age, Body Mass Index (BMI), and mechanism of injury were documented in all cases. Fractures were classified according to the AOSpine classification [2] and additionally to the McCormack load sharing classification [22]. Localization of the fracture was assessed. Type of 360°-stabilization (posterior open versus minimally invasive fixation), additive video-assisted anterior thoracoscopic surgery (ATS), range of time between trauma and index surgery as well as between posterior to anterior stabilization, surgery time (posterior, anterior and implant removal), length of hospital stay for each surgical intervention, and complications were documented.

Treatment strategies and surgical techniques

Treatment strategy in trauma center A was open dorsal fixation using the Universal Spine System (USS™; DePuy Synthes Companies, Oberdorf, Switzerland) and delayed (after 6 weeks) additive ATS (Obelisk™, Ulrich Medical, Ulm, Germany) in patients with McCormack Scores < 7 and without major disc herniation into the fracture zone. In patients aged 60 years or older (32%) additional cement augmentation of pedicle screws was used (PALACOS®, Heraeus Medical GmbH, Wehrheim, Germany). None of the patients in both trauma centers received additive kyphoplasty, vertebroplasty of the index level, or long segment instrumentation.

Treatment strategy in trauma center B included minimally invasive posterior fixation using the monoaxial ($n = 40$) or polyaxial ($n = 4$) Longitude System (CD Horizon Longitude™ Multi-Level Percutaneous Fixation System, Medtronic Spinal and Biologics Business, Memphis, TN, USA). In patients with McCormack Scores ≥ 6 and in patients with signs of fracture associated disc pathology (vacuum sign in CT or MRI-pathology) received early (during first 2 weeks) additional ATS using the Tantalum cage (TM-S Cervical Fusion Device Trabecular Metal™ Technology, Zimmer Biomet, Warsaw, IN, USA) with or without additive MACS plate fixation (MACS TL® Modular Anterior Construct System for the Thoracic and Lumbar Spine, Aesculap, Tuttlingen, Germany). Percutaneous stabilizations have been controlled intraoperatively by 3D-scan (O-arm™ Surgical Imaging System, Medtronic Minimally Invasive Therapy Group, Minneapolis, MN, USA).

Clinical outcomes

The Oswestry Disability Index (ODI) [23], patients' pain level (VAS Score ranging from 0 to 10; 0: no pain; 10: worst pain) and SF-36 were assessed by questionnaires after written informed consent was given. ODI was determined as primary functional outcome parameter. It is a specific instrument for back pain including ten questions on limitations of daily living. A total calculated

score of 0% represents the best health status, while 100% represents the worst [23]. The SF-36 questionnaire was used to assess the general health status. Results are given as a Physical Component Summary (PCS) and a mental dimension, represented by the Mental Component Summary (MCS) [24].

Radiological outcomes

Bisegmental kyphosis angle was defined as primary radiological outcome parameter. It was measured from the upper end plate of the upper-instrumented vertebra to the bottom end plate of the lower-instrumented vertebra [25]. Anterior-posterior and lateral view radiographs of the thoracolumbar spine were performed preoperatively and postoperatively in standing position. Follow-up was performed at least two years after trauma including anterior-posterior and complete lateral spine views. Achieved reduction of kyphosis angle by operation and potential loss of reduction at time of follow-up was calculated.

As a secondary outcome parameter sagittal spine alignment was determined at time of follow-up [26, 27]. Thoracic kyphosis (TK), lumbar lordosis (LL), pelvic incidence (PI), pelvic tilt (PT), sacral slope (SS) and C7-lot were measured independently by two senior orthopedic surgeons and by one senior radiologist. Radiological images were evaluated using approved diagnostic monitors and Agfa IMPAX software (IMPAX EE, Agfa HealthCare, Bonn, Germany).

Ethics approval

The study was approved by the institutional ethics committee of the Medical School of the University of Leipzig (approval number: 276/16-ek); it was conducted according to ICMJE guidelines, and has been retrospectively registered with the German Clinical Trials Registry (identification number: DRKS00015693). Written informed consent was obtained from all patients.

Source of funding

This study was not funded.

Statistical analysis

Statistical analysis was performed using statistical software R (RStudio Inc., Boston, MA, USA). Results in this study are presented as mean values with standard deviation (SD). Inductive analyses using the Wilcoxon rank-sum test and the Wilcoxon signed-rank test were performed to detect differences between the groups. A result was considered to be statistically significant with p -value < 0.05 .

Results

In total, 87 patients met the inclusion criteria between January 2013 and December 2015. Forty-three patients underwent posterior open stabilization (OS; trauma center A) whereas the remaining 44 patients were treated using dorsal minimally invasive stabilization (MIS; trauma center B). Thirty-nine out of 44 patients treated with minimal invasive technique received monoaxial screws, four patients obtained polyaxial screws, and one patient a combination of both. Twenty-four patients in the OS group and 25 in the MIS group received additional anterior fusion. In trauma center A 23% of anterior fusions were performed bisegmentally, whereas in trauma center B all patients were fused monosegmentally.

In trauma center A, timepoint of anterior fusion was 79 days (median) after posterior stabilization whereas in trauma center B it was seven days (median).

Regarding the McCormack load sharing classification, patients in the MIS group scored mostly 5 or 6 points (30 and 39%) while patients in the OS group scored 6 to 7 points (42 and 35%), without a significant difference. All patients in both groups scored at least 5 points. Both groups were comparable regarding gender, age and other demographic and clinical data with a significant difference regarding BMI ($p = 0.0053$; Table 1).

Functional outcomes

In total, 62 out of 87 patients (71%) answered the questionnaires. There was no significant difference regarding ODI Score (MIS 12.3%, OS 18.3%) (Fig. 1) or the PCS Component of SF-36 Score. The MCS Component of the SF-36 score showed a significant difference ($p < 0.0001$) with a lower score in the MIS group (41.9 points) than in the OS group (51.4 points). Furthermore, the MIS group showed a significantly lower VAS Score than the OS group ($p < 0.0001$; Table 2).

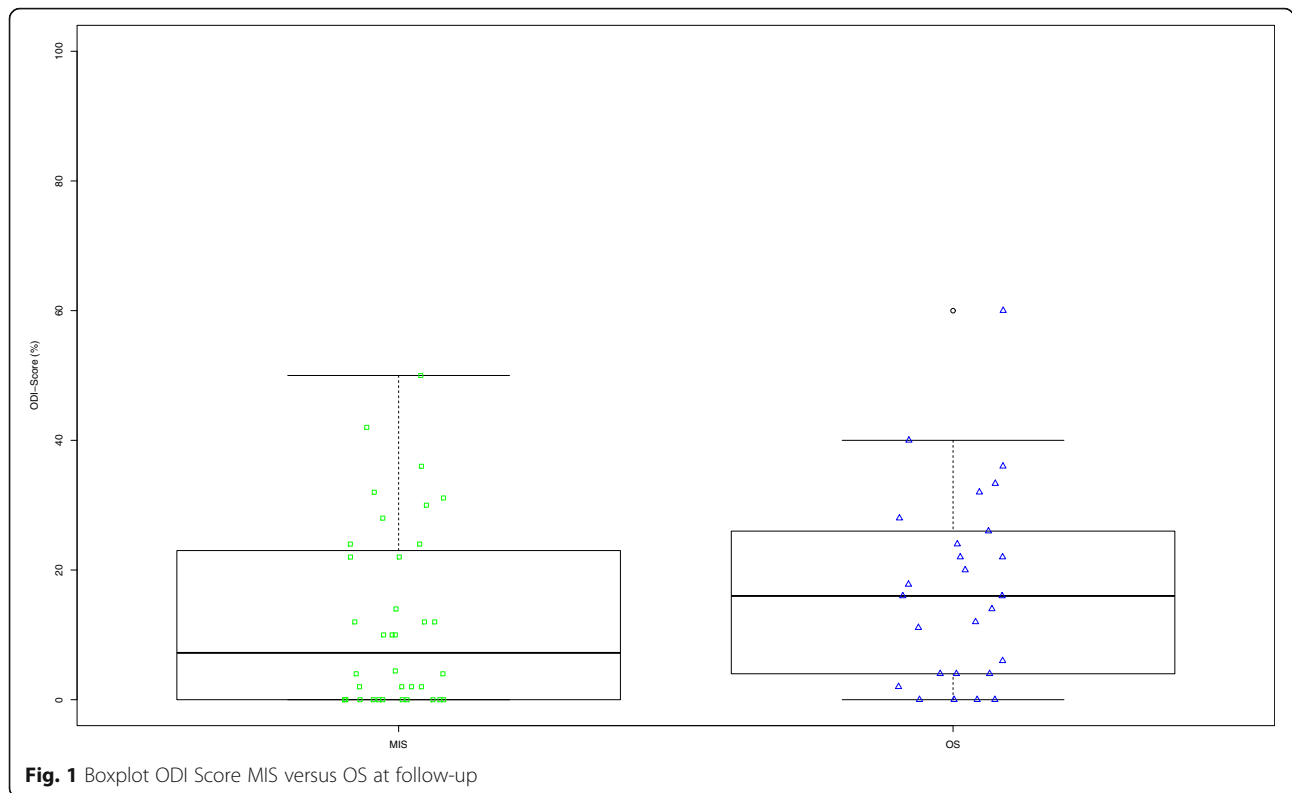
Radiological outcomes

In total 46 out of 87 patients (53%) participated on radiological follow-up at least 24 months after final surgery. Both techniques, MIS and OS achieved significant reduction of kyphosis angle preoperatively versus postoperatively ($p < 0.001$). The kyphosis angle at time of follow-up defined as primary radiological outcome parameter did not show a significant difference between the groups ($p = 0.588$; Fig. 2). In both groups there was loss of reduction comparing imaging postoperatively and during follow-up. In the MIS group loss of reduction was 3.2° , in the OS group 5.6° showing a significant difference ($p = 0.035$; Fig. 3).

The subgroup analysis of the patients in the MIS group that received additional anterior fusion ($n = 14$) revealed significantly less loss of reduction compared to

Table 1 Overview on patients' demographic data

	MIS				OS				p-value
	n	%	Mean	Standard Deviation	n	%	Mean	Standard Deviation	
Number of Patients	44				43				
Sex									0.1676
Male	19	43.2			26	60.5			
Female	25	56.8			17	39.5			
Age (years)	44		43.5	14.3	43		48.4	12.2	0.131
BMI	44		24.7	4.0	43		27.4	4.7	0.0053
Fracture localisation									0.1728
T11	2	4.5			1	2.3			
T12	14	31.8			15	34.9			
L1	24	54.5			22	51.2			
L2	4	9.1			5	11.6			
McCormack									0.267
3	0	0.0			0	0.0			
4	0	0.0			0	0.0			
5	13	29.5			6	14.0			
6	17	38.6			18	41.9			
7	8	18.2			15	34.9			
8	6	13.6			3	7.0			
9	0	0.0			0	0.0			
Mechanism of injury									
Fall < 3 m	15	34.1			20	46.5			
Fall > 3 m	6	13.6			10	23.3			
Car	7	15.9			5	11.6			
Motorcycle	2	4.5			1	2.3			
Bicycle					4	9.3			
Pedestrian vs. car					1	2.3			
Horse riding	4	9.1			1	2.3			
Paragliding	4	9.1							
Skiing	6	13.6							
Other					1	2.3			
Stabilization									
Monoaxial	39	88.6							
Polyaxial	4	9.1							
Combination	1	2.3							
Screw augmentation (yes)	0	0.0			14	32.6			
Implant removal (yes)	37	84.1			13	30.2			
ATS (yes)	25	56.8			24	55.8			
ATS bisegmental	0	0.0			10	23.3			



those with posterior stabilization only ($n = 13$) ($p = 0.025$).

On the contrary, in the OS group ($n = 13$ versus $n = 6$) a statistical significant difference could not be detected ($p = 0.059$).

Regarding sagittal alignment parameters (SS, PI, PT, LL, TK and C7 Lot) no statistically significant difference between the two techniques could be revealed (Table 3).

Operation time and hospital stay

The average range of time between trauma and surgery was 2.5 days in the MIS group and 3.6 days in the OS group, demonstrating a significant difference ($p = 0.0023$).

The duration of surgery was significantly shorter for posterior stabilization, anterior fusion, and implant removal in the MIS group compared to the OS group.

Hospital stay for patients who received posterior stabilization only showed no significant differences. Hospital stay for second surgery was significantly shorter in the OS group ($p < 0.0001$), but there was no significant difference for implant removal (Table 4).

Complications

In the MIS group there was one suboptimal pedicle screw positioning where placement was closer to the endplate than desired without endplate affection.

Table 2 Functional outcome

	MIS		OS		<i>p</i> -value
	Mean	Standard Deviation	Mean	Standard Deviation	
<i>ODI</i>					
ODI (%)	12.3	14.1	17.3	15.0	0.0619
VAS	1.7	1.9	3.1	1.7	0.0006
<i>SF-36</i>					
PCS	47.0	8.3	40.0	11.9	0.9863
MCS	41.9	7.1	51.4	12.6	< 0.0001

ODI Oswestry Disability Index, *VAS* visual analog scale, *PCS* Physical component score, *MCS* mental component score

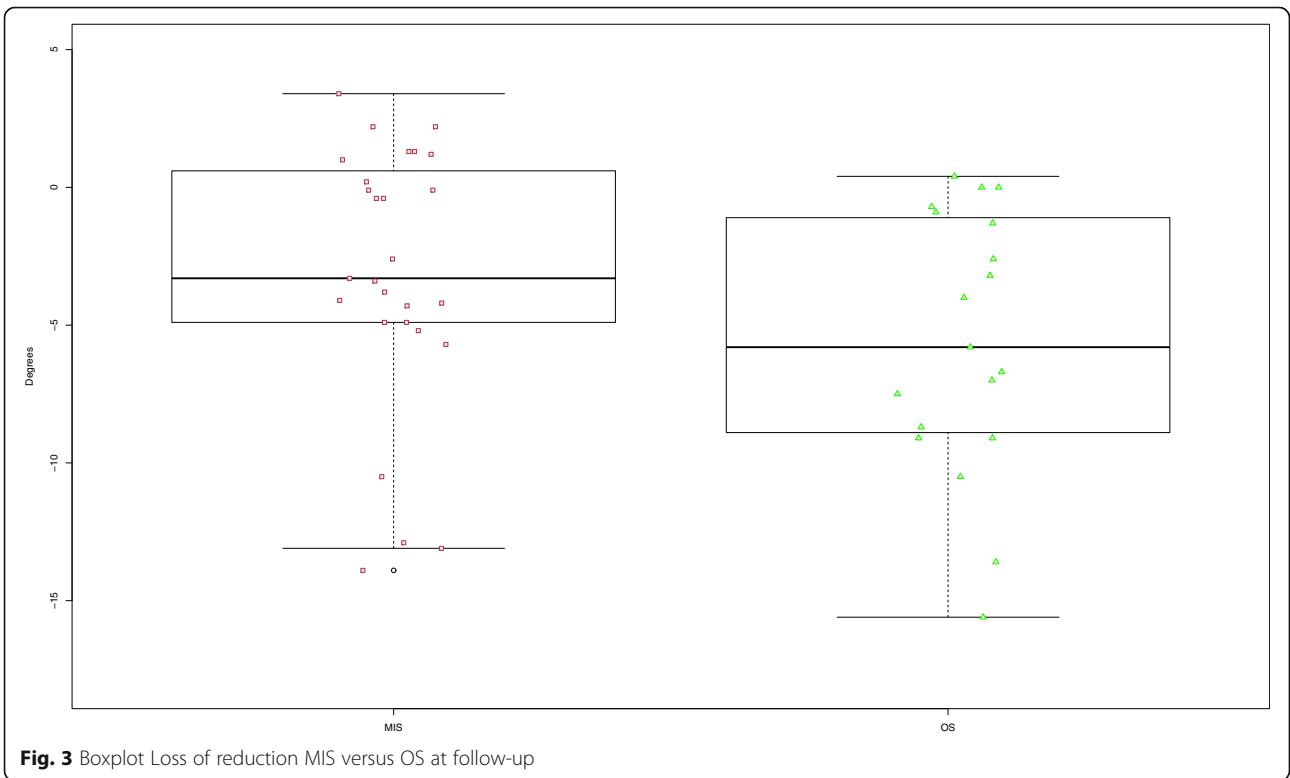
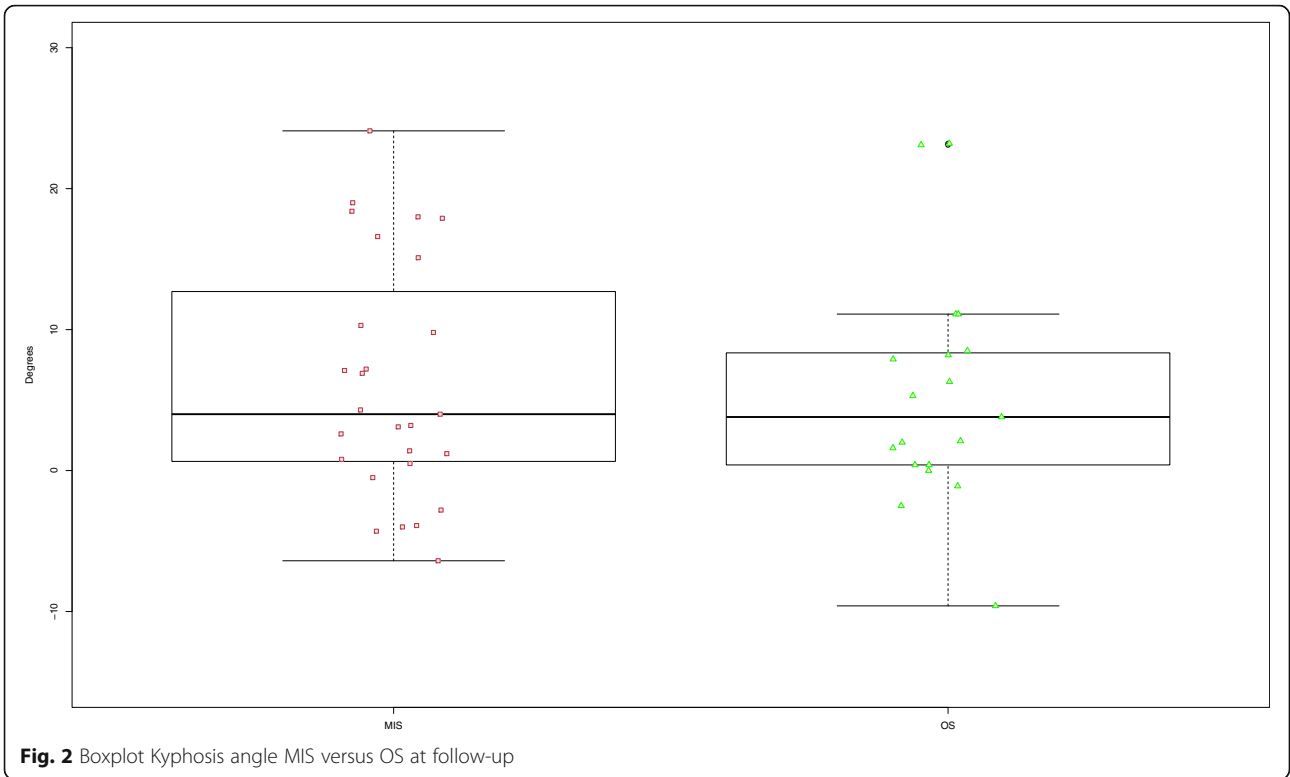


Table 3 Radiological outcome

	MIS		OS		<i>p</i> -value
	Mean	Standard Deviation	Mean	Standard Deviation	
Kyphosis angle (°)	6.3	8.5	5.4	8.1	0.5883
Loss of reduction (°)	-3.2	4.8	-5.6	4.8	0.0353
PI	56.0	11.5	59.3	14.6	0.4515
PT	17.1	5.5	17.1	6.0	0.9446
SS	38.9	9.8	42.2	11.5	0.4870
LL	-51.5	10.6	-47.2	13.1	0.5546
TK	42.9	8.6	39.4	7.5	0.1788
C7 Lot	3.9	2.9	15.5	29.5	0.1186

PI Pelvic Incidence, PT Pelvic Tilt, SS Sacral Slope, LL Lumbar Lordosis, TK Thoracic Kyphosis

Therefore, no revision surgery was indicated. In one case drainage of pleural effusion after ATS was necessary.

In the OS group one case with pedicle screw loosening occurred. During scheduled ATS surgery these screws were replaced by screws with thicker diameter. One patient suffered from early postoperative wound infection and needed revision surgery. Implant removal was not necessary.

Discussion

The focus of this study was to compare clinical and radiological results following posterior open or minimally invasive percutaneous thoracolumbar spinal fracture fixation. In contrast to earlier studies our work focuses on one specific fracture type (AOSpine type A3) limited to the thoracolumbar junction (T11 to L2) [14, 16–18].

Both treatment groups in this study were comparable in terms of age, gender and other demographic data, fracture level as well as surgical technique and fixation materials. Regarding fracture pattern the OS group included more fractures of a higher McCormack score than the MIS group without any significant difference.

Regarding functional outcome, the ODI Score which was defined as our primary functional outcome

parameter did not demonstrate significant differences between both groups. Our results only demonstrated a significant difference in the MCS Score of the SF-36 and in the VAS Score with lower scores in the MIS group.

Bisegmental kyphosis angle was defined as our primary radiological outcome parameter. In terms of achieved reduction analyzing kyphosis angle pre- and postoperatively both techniques revealed good reduction without any significant difference.

Loss of reduction at time of follow-up at least 24 months after initial surgery demonstrated a significant difference between open and percutaneous techniques.

In the subgroup that received additional anterior fusion the MIS group demonstrated significantly less loss of reduction compared to the OS group. These results have to be interpreted carefully due to low patient numbers and minimal differences in terms of *p*-values.

The sagittal alignment parameters (PI, PT, SS, LL, TK and C7-Lot) were comparable in both groups demonstrating no significant difference.

The duration of surgery was significantly lower for posterior stabilization, anterior fusion, and implant removal in the MIS group compared to the OS group.

Table 4 Duration of surgery and hospital stay

<i>Duration of</i>	MIS			OS			<i>p</i> -value
	<i>n</i>	Mean	Standard Deviation	<i>n</i>	Mean	Standard Deviation	
trauma to surgery (days)	44	2.5	4.0	43	3.6	3.0	0.0023
posterior stabilization (min)	44	63.5	22.3	43	106.7	31.1	< 0.0001
first hospital stay (days)	19	11.3	8.4	19	11.0	4.7	0.7039
first to second surgery (days)	25	23.6	49.3	24	120.2	125.8	< 0.0001
ATS (min)	25	99.5	18.7	24	136.5	39.0	0.0002
second hospital stay (days)	25	17.5	4.1	24	8.6	3.3	< 0.0001
implant removal (min)	37	33.5	8.0	13	49.2	11.5	< 0.0001
third hospital stay (days)	37	3.7	1.8	13	3.7	1.3	0.4056
until implant removal (days)	37	270.9	135.1	13	424.4	143.9	0.0004

Multiple other studies also reported significantly shorter surgery times for the percutaneous technique [8, 17, 18]. The comparably less extensive surgical approach in the minimally invasive technique may reduce operation time for primary stabilization and for implant removal.

Summarizing our main findings, a major difference comparing the open versus the percutaneous approach could not be demonstrated in the current study.

Data comparing functional outcomes of both techniques is rare due to different patient populations and operative approaches. Pishnamaz et al. included 43 patients with open and 29 with percutaneous posterior stabilization of fractures of the thoracolumbar spine. The majority were AOSpine type A3 ($n = 29$) fractures, but also type A2, A4, and B1 fractures were found. They did not detect significant differences in radiological or functional outcome comparing the open to the percutaneous approach [18]. Fitschen-Oestern et al. compared 104 patients between the age of 15 and 86 including vertebral bodies T9-L3 as well as fracture classifications of all types. In the subgroup with A3 fractures ($n = 35$) they could not find significant differences in postoperative kyphosis angle between minimally invasive and open posterior stabilization. Functional outcome was not evaluated [17].

In contrast to open procedures, surgical tools for secure reconstruction of the physiological alignment of the thoracolumbar spine are limited using percutaneous techniques. In this study, both techniques obtained significant reduction of kyphosis angle preoperatively versus postoperatively. In the MIS group, this could be achieved mainly by optimized positioning of the patient including ventral sagging and lifting of the upper body. Using the percutaneous technique, reconstruction of the physiological spinal kyphosis in our patient group was sufficient in contrast to comparable earlier trials e. g. provided by Grass et al. 2006 who reported a relatively high amount of cases with incomplete vertebral body reduction [8]. The difference might be related to improved surgical instruments and methods during recent decades. Especially the use of monoaxial screw systems and stiffer chrome-cobalt rods have led to more stable constructs as biomechanical studies have demonstrated [28, 29]. The consistent use of monoaxial screws and tools is therefore recommended as mandatory precondition for precise percutaneous reduction of posttraumatic kyphosis after thoracolumbar burst fractures [12].

Our data demonstrated a moderate loss of reduction level in both groups with a significant difference (-3.2° vs. -5.6°). Within the subgroups the patients that received open posterior stabilization and additional anterior fusion did not show a difference to those who received open posterior stabilization only. However, patients who received the percutaneous technique and

additional anterior fusion had significantly less loss of reduction than those with dorsal percutaneous stabilization only (1.0° vs. 5.6°). These findings suggest that in indicated cases additional anterior fusion should be performed to support the posteriorly achieved reduction. There is a controversial debate about the best timepoint to perform additional anterior fusion. Spiegl et al. reported that in patients that received posterior monoaxial stabilization and additional delayed anterior fusion after 6 weeks did not lead to more reduction loss [30]. On the other hand, Sander et al. reported a comparably high rate of traumatic vertebral disc lesions 1 year after trauma without any disc pathology in the initial MRI following trauma [31]. Thus, delayed MRI might be more sensitive in terms of identifying traumatic vertebral disc lesions. Thereby, delayed anterior fusion aims to reduce the number of anterior fusions. This concept was performed in trauma center A in patients without indirect signs of vertebral disc lesions and McCormack scores lower than 7 [30]. Therefore, the period between posterior stabilization and additional anterior fusion was significantly longer in trauma center A.

An advantage of early additional anterior fusion might be the lower surgical effort due to less sclerosis and therefore easier surgical preparation when performed at an earlier timepoint. This is supported by the significantly lower surgery time in our data (99.5 vs. 136.5 min). Especially for patients that are working early anterior fusion might have economic advantages because return to professional life is sooner than in delayed anterior fusion. Disadvantages include that some patients who might have been stable enough with posterior stabilization only possibly received an unnecessary additional anterior fusion when operated at an earlier point of time.

Reported disadvantages of percutaneous posterior stabilization include higher rates of radiation exposure and difficulty to control fracture reduction and to maintain lordosis [8, 32, 33]. Advantages of the percutaneous technique such as protection of autochthonous back muscles, less blood loss, shorter operation time, lower risk of infection, shorter duration of hospital treatment, less postoperative pain levels, earlier pain relief and improved clinical outcomes have been reported in literature [14, 34–36]. Our data supports many of these findings. As mentioned above we also found a significantly shorter surgery time for the MIS group (63.5 min versus 106.7 min). Surprisingly, the current study revealed equal duration of hospital stay for patients who received posterior stabilization only. Pishnamaz et al. [18] also reported almost equal lengths of hospital stay while Fitschen-Oestern et al. [17] reported shorter times for the percutaneous technique. Other reported advantages such as less blood loss have not been evaluated in

this study. Suction devices are rarely used for the percutaneous technique making it difficult to assess intraoperative blood loss.

Malpositioning of pedicle screws in thoracolumbar spinal fracture fixation is not avoidable completely but considered to be safe also in percutaneous techniques [37]. In this study, one pedicle screw was placed too close to the vertebral disc in the MIS group, but no surgical revision was necessary due to malpositioning of pedicle screws in both groups. The majority of percutaneous stabilizations have been controlled intraoperatively by 3D-scan. This as well as surgical experience may explain the good positioning of pedicle screws in the percutaneous technique in our data set.

Study limitations

We acknowledge some limitations of the present study. First of all, this was a retrospective study design with all its limitations. Furthermore, duration of intraoperative radiological imaging and blood loss have not been assessed. Previous studies have shown that radiological imaging in minimally invasive stabilization may be more extensive and blood loss significantly less [8, 33, 34, 36]. Focusing on one specific fracture configuration limited to vertebral bodies T11 to L2 lead to smaller patient groups even though the study was performed at two high-volume level I trauma centers, but higher numbers of included patients would have been desirable.

Conclusion

Both treatment strategies are equally safe and effective in terms of achieved reduction, loss of reduction, functional outcome and complication rates. Loss of reduction was relatively low in both treatment groups. Relevant differences in clinical and radiographic outcome between the two surgical groups could not be demonstrated.

Abbreviations

ATS: Video-assisted anterior thoracoscopic surgery; BMI: Body mass index; CT: Computed tomography; ISS: Injury severity score; LL: Lumbar lordosis; MCS: Mental component summary; MIS: Minimally invasive stabilization; MRI: Magnetic resonance imaging; ODI: Oswestry disability index; OS: Open stabilization; PCS: Physical component summary; PI: Pelvic incidence; PT: Pelvic tilt; SS: Sacral slope; TK: Thoracal kyphosis; USA: United States of America; USS: Universal spine system; VAS Score: Visual analog scale

Acknowledgements

Not applicable.

Authors' contributions

CE and US: Concept and design of the study, collection of data, data analysis, and manuscript writing. CR: Concept and study design, manuscript writing. CH, OG and CJ: Concept and study design, administrative support. SP: Concept and study design, data analysis. All authors interpreted data, drafted or revised the article critically for important intellectual content, and approved the final version of the manuscript.

Funding

The study was not funded.

Availability of data and materials

The datasets used and/or analysed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Ethics approval and consent to participate

The study was approved by the institutional ethics committee of the Medical School of the University of Leipzig (approval number: 276/16-ek); it was conducted according to ICMJE guidelines, and has been retrospectively registered with the German Clinical Trials Registry (identification number: DRKS00015693). This study also adheres to the STROBE guidelines. Written informed consent was obtained from all patients.

Consent for publication

Not applicable.

Competing interests

- CR is a member of the editorial board of this journal
- CJ received royalties from Zimmer, Warsaw, USA; DepuySynthes, West Chester, USA; Medtronic, Minneapolis, USA; Zimmer, Nürnberg, Germany
- CH is an independent consultant for Medtronic, Castel San Pietro, Switzerland
- OG has received payments for lectures for Medtronic GmbH, Meerbusch, Germany und Aesculap AG, Tuttlingen, Germany
- All other authors declare that they have no conflict of interest

Author details

- ¹Department of Trauma Surgery, BG Trauma Center Murnau, Professor-Küntschler Str. 8, 82418 Murnau, Murnau am Staffelsee, Germany.
- ²Department of Orthopaedics, Trauma Surgery and Reconstructive Surgery, University of Leipzig, Leipzig, Germany.
- ³Department of Radiology, BG Trauma Center Murnau, Murnau am Staffelsee, Germany.
- ⁴Institute for Biomechanics, Paracelsus Medical University, Salzburg, Austria.

Received: 2 August 2019 Accepted: 29 January 2020

Published online: 05 February 2020

References

1. Spiegl UJ, Josten C, Devitt BM, Heyde CE. Incomplete burst fractures of the thoracolumbar spine: a review of literature. *Eur Spine J.* 2017;26(12):3187–98.
2. Vaccaro AR, Oner C, Kepler CK, Dvorak M, Schnake K, Bellabarba C, et al. AOSpine thoracolumbar spine injury classification system: fracture description, neurological status, and key modifiers. *Spine (Phila Pa 1976).* 2013;38(23):2028–37.
3. Leucht P, Fischer K, Muhr G, Mueller EJ. Epidemiology of traumatic spine fractures. *Inj.* 2009;40(2):166–72.
4. Wood K, Buttermann G, Mehbod A, Garvey T, Jhanjee R, Sechriest V. Operative compared with nonoperative treatment of a thoracolumbar burst fracture without neurological deficit. A prospective, randomized study. *J Bone Joint Surg Am.* 2003;85-A(5):773–81.
5. Siebenga J, Leferink VJ, Segers MJ, Elzinga MJ, Bakker FC, Haarman HJ, et al. Treatment of traumatic thoracolumbar spine fractures: a multicenter prospective randomized study of operative versus nonsurgical treatment. *Spine (Phila Pa 1976).* 2006;31(25):2881–90.
6. Reinhold M, Knop C, Beisse R, Audige L, Kandziora F, Pizanis A, et al. Operative treatment of traumatic fractures of the thorax and lumbar spine. Part II: surgical treatment and radiological findings. *Unfallchirurg.* 2009; 112(2):149–67.
7. Gonschorek O, Spiegl U, Weiss T, Patzold R, Hauck S, Buhren V. Reconstruction after spinal fractures in the thoracolumbar region. *Unfallchirurg.* 2011;114(1):26–34.
8. Grass R, Biewener A, Dickopf A, Rammelt S, Heineck J, Zwipp H. Percutaneous dorsal versus open instrumentation for fractures of the thoracolumbar border. A comparative, prospective study. *Unfallchirurg.* 2006;109(4):297–305.
9. Guhring T, Raible C, Matschke S. Percutaneous stabilization of thoracolumbar fractures. Techniques of fracture reduction and spinal cord decompression. *Unfallchirurg.* 2013;116(8):749–54.

10. Charles YP, Walter A, Schuller S, Aldakheel D, Steib JP. Thoracolumbar fracture reduction by percutaneous in situ contouring. *Eur Spine J*. 2012; 21(11):2214–21.
11. Ni WF, Huang YX, Chi YL, Xu HZ, Lin Y, Wang XY, et al. Percutaneous pedicle screw fixation for neurologic intact thoracolumbar burst fractures. *J Spinal Disord Tech*. 2010;23(8):530–7.
12. Weiss T, Hauck S, Buhren V, Gonschorek O. Repositioning options with percutaneous dorsal stabilization. For burst fractures of the thoracolumbar junction. *Unfallchirurg*. 2014;117(5):428–36.
13. Rodriguez-Vela J, Lobo-Escolar A, Joven-Aliaga E, Herrera A, Vicente J, Sunen E, et al. Perioperative and short-term advantages of mini-open approach for lumbar spinal fusion. *Eur Spine J*. 2009;18(8):1194–201.
14. Lee JK, Jang JW, Kim TW, Kim TS, Kim SH, Moon SJ. Percutaneous short-segment pedicle screw placement without fusion in the treatment of thoracolumbar burst fractures: is it effective?: comparative study with open short-segment pedicle screw fixation with posterolateral fusion. *Acta Neurochir*. 2013;155(12):2305–12 discussion 12.
15. Loibl M, Korsun M, Reiss J, Gueorguiev B, Nerlich M, Neumann C, et al. Spinal fracture reduction with a minimal-invasive transpedicular Schanz screw system: clinical and radiological one-year follow-up. *Inj*. 2015;46(Suppl 4):S75–82.
16. Wang B, Fan Y, Dong J, Wang H, Wang F, Liu Z, et al. A retrospective study comparing percutaneous and open pedicle screw fixation for thoracolumbar fractures with spinal injuries. *Medicine (Baltimore)*. 2017; 96(38):e8104.
17. Fitschen-Oestern S, Scheuerlein F, Weuster M, Klueter T, Menzendorf L, Varoga D, et al. Reduction and retention of thoracolumbar fractures by minimally invasive stabilisation versus open posterior instrumentation. *Inj*. 2015; 46(Suppl 4):S63–70.
18. Pishnamaz M, Oikonomidis S, Knobe M, Horst K, Pape HC, Kobbe P. Open versus percutaneous stabilization of thoracolumbar spine fractures: a short-term functional and radiological follow-up. *Acta Chir Orthop Traumatol Cechoslov*. 2015;82(4):274–81.
19. Ntilikina Y, Bahlau D, Garnon J, Schuller S, Walter A, Schaeffer M, et al. Open versus percutaneous instrumentation in thoracolumbar fractures: magnetic resonance imaging comparison of paravertebral muscles after implant removal. *J Neurosurg Spine*. 2017;27(2):235–41.
20. Vanek P, Bradac O, Konopkova R, de Lacy P, Lacman J, Benes V. Treatment of thoracolumbar trauma by short-segment percutaneous transpedicular screw instrumentation: prospective comparative study with a minimum 2-year follow-up. *J Neurosurg Spine*. 2014;20(2):150–6.
21. Lyu J, Chen K, Tang Z, Chen Y, Li M, Zhang Q. A comparison of three different surgical procedures in the treatment of type a thoracolumbar fractures: a randomized controlled trial. *Int Orthop*. 2016;40(6):1233–8.
22. McCormack T, Karakovic E, Gaines RW. The load sharing classification of spine fractures. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1994;19(15):1741–4.
23. Fairbank JC, Pynsent PB. The Oswestry disability index. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2000;25(22):2940–52 discussion 52.
24. Bullinger M. KI. SF-36 Fragebogen zum Gesundheitszustand. Handanweisung. Göttingen: Hogrefe Verlag; 1998.
25. Verheyden AP, Spiegl UJ, Ekkerlein H, Gercek E, Hauck S, Josten C, et al. Treatment of fractures of the thoracolumbar spine: recommendations of the spine section of the German Society for Orthopaedics and Trauma (DGOU). *Global Spine J*. 2018;8(2 Suppl):345–455.
26. Lafage V, Schwab F, Patel A, Hawkinson N, Farcy JP. Pelvic tilt and truncal inclination: two key radiographic parameters in the setting of adults with spinal deformity. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2009;34(17):E599–606.
27. Roussouly P, Pinheiro-Franco JL. Biomechanical analysis of the spino-pelvic organization and adaptation in pathology. *Eur Spine J*. 2011;20(Suppl 5): 609–18.
28. Wang H, Li C, Liu T, Zhao WD, Zhou Y. Biomechanical efficacy of monoaxial or polyaxial pedicle screw and additional screw insertion at the level of fracture, in lumbar burst fracture: an experimental study. *Indian J Orthop*. 2012;46(4):395–401.
29. Kubosch D, Kubosch EJ, Gueorguiev B, Zderic I, Windolf M, Izadpanah K, et al. Biomechanical investigation of a minimally invasive posterior spine stabilization system in comparison to the universal spinal system (USS). *BMC Musculoskelet Disord*. 2016;17(1):134.
30. Spiegl UJ, Jarvers JS, Heyde CE, Glasmacher S, Von der Hoh N, Josten C. Delayed indications for additive ventral treatment of thoracolumbar burst fractures : What correction loss is to be expected. *Unfallchirurg*. 2015;119(8): 664–72.
31. Sander AL, Lehnert T, El Saman A, Eichler K, Marzi I, Laurer H. Outcome of traumatic intervertebral disk lesions after stabilization by internal fixator. *AJR Am J Roentgenol*. 2014;203(1):140–5.
32. Schmidt OI, Strasser S, Kaufmann V, Strasser E, Gahr RH. Role of early minimal-invasive spine fixation in acute thoracic and lumbar spine trauma. *Indian J Orthop*. 2007;41(4):374–80.
33. Kruger A, Rammner K, Ziring E, Zettl R, Ruchholtz S, Frangen TM. Percutaneous minimally invasive instrumentation for traumatic thoracic and lumbar fractures: a prospective analysis. *Acta Orthop Belg*. 2012;78(3):376–81.
34. Wild MH, Gleees M, Plieschnegger C, Wenda K. Five-year follow-up examination after purely minimally invasive posterior stabilization of thoracolumbar fractures: a comparison of minimally invasive percutaneously and conventionally open treated patients. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2007; 127(5):335–43.
35. Barbagallo GM, Yoder E, Dettori JR, Albanese V. Percutaneous minimally invasive versus open spine surgery in the treatment of fractures of the thoracolumbar junction: a comparative effectiveness review. *Evid Based Spine Care J*. 2012;3(3):43–9.
36. Kim DY, Lee SH, Chung SK, Lee HY. Comparison of multifidus muscle atrophy and trunk extension muscle strength: percutaneous versus open pedicle screw fixation. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2005;30(1):123–9.
37. Heintel TM, Berglehner A, Meffert R. Accuracy of percutaneous pedicle screws for thoracic and lumbar spine fractures: a prospective trial. *Eur Spine J*. 2013;22(3):495–502.

Publisher's Note

Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Ready to submit your research? Choose BMC and benefit from:

- fast, convenient online submission
- thorough peer review by experienced researchers in your field
- rapid publication on acceptance
- support for research data, including large and complex data types
- gold Open Access which fosters wider collaboration and increased citations
- maximum visibility for your research: over 100M website views per year

At BMC, research is always in progress.

Learn more biomedcentral.com/submissions



ZUSAMMENFASSUNG DER ARBEIT

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades

Dr. med.

Titel

„Vergleich zweier operativer Versorgungsstrategien bei instabilen Frakturen der thorakolumbalen Wirbelsäule“

eingereicht von

Dr. med. univ. Christoph Johannes Erichsen

angefertigt an / in

Klinik und Poliklinik für Orthopädie, Unfallchirurgie und Plastische Chirurgie
Universitätsklinikum Leipzig und
BG Unfallklinik Murnau, Abteilung für Wirbelsäulen Chirurgie

betreut von

Prof. Dr. med. Ulrich Spiegl

Ko-Betreuer: Prof. Dr. med. Christoph Heyde

April 2020

Ziel dieser Arbeit war es klinische und radiologische Ergebnisse nach offener oder minderinvasiver perkutaner sowie nach frühzeitiger oder zeitverzögerter additiv ventraler Stabilisierung von Typ AOSpine A3 Frakturen des thorakolumbalen Überganges miteinander zu vergleichen.

Im Gegensatz zu anderen Studien, die diese Fragestellung bereits bearbeitet haben, konzentriert sich diese Arbeit auf einen spezifischen Frakturtyp (AOSpine A3) sowie ausschließlich auf die Wirbelkörper BWK11 – LWK2.

Die Patienten beider Behandlungsstrategien die in dieser Arbeit analysiert wurden, waren hinsichtlich Alter, Geschlecht und anderen demographischen Daten, Frakturhöhe sowie chirurgischer Technik und Osteosynthesematerial vergleichbar. Bezüglich der Frakturklassifikation unterschieden sie sich dahingehend, dass es in der offen stabilisierten Gruppe (OS-Gruppe) mehr Frakturen eines höheren McCormack Scores gab als in der minder invasiven (MIS-Gruppe). Ein signifikanter Unterschied konnte jedoch nicht demonstriert werden.

Bezüglich des funktionellen Outcomes zeigte der als primärer Outcome Parameter definierte ODI Score keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Gruppen. Es konnte lediglich ein signifikanter niedrigerer MCS Score des SF-36 sowie VAS Score in der MIS Gruppe detektiert werden.

Als primärer radiologischer Outcome Parameter wurde der bisegmentale Kyphosewinkel definiert. Hier zeigten sich in der Analyse des prä- und postoperativen Kyphosewinkels bei beiden Techniken eine gute Frakturreposition ohne signifikanten Unterschied.

Zum Zeitpunkt der Nachuntersuchung (minimum 24 Monate nach initialer Operation) zeigte die Untergruppe der dorsal perkutan instrumentierten und additiv ventral stabilisierten signifikant weniger Repositionsverlust als die der offen dorsal instrumentierten und additiv ventral stabilisierten. Diese Ergebnisse müssen jedoch auf Grund der niedrigen Patientenzahl vorsichtig interpretiert werden.

Die Parameter des sagittalen Alignments (PI, PT, SS, LL, TK und C7-Lot) waren in beiden Gruppen vergleichbar und zeigten keinen signifikanten Unterschied.

Die Operationsdauer war in der MIS Gruppe bei dorsaler Stabilisierung, ventraler Stabilisierung und Implantatentfernung jeweils signifikant kürzer als in der OS Gruppe.

Zusammenfassend konnten wir in unserer Arbeit im Vergleich der offenen gegenüber der perkutanen Technik keinen relevanten Unterschied feststellen.

Bezüglich erreichter Reposition, Repositionsverlust, funktionellem Outcome und Komplikationsraten erweisen sich beide Behandlungsstrategien als gleichwertig sicher und effektiv. Der Repositionsverlust war in beiden Gruppen relativ niedrig bei einem leicht niedrigeren Wert in der Gruppe der perkutan stabilisierten. Unser wichtigster klinischer Outcomeparameter zeigte jedoch keinen signifikanten Unterschied weshalb die Frage nach der klinischen Relevanz dieses Ergebnisses offen bleiben muss und Gegenstand zukünftiger Studien sein sollte.

LITERATURVERZEICHNIS

1. Leucht P, Fischer K, Muhr G, Mueller EJ. Epidemiology of traumatic spine fractures. *Injury*. 2009;40(2):166-72.
2. Reinhold M, Knop C, Beisse R, Audige L, Kandziora F, Pizanis A, et al. [Operative treatment of traumatic fractures of the thoracic and lumbar spinal column. Part I: epidemiology]. *Unfallchirurg*. 2009;112(1):33-42, 4-5.
3. Vaccaro AR, Oner C, Kepler CK, Dvorak M, Schnake K, Bellabarba C, et al. AOSpine thoracolumbar spine injury classification system: fracture description, neurological status, and key modifiers. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2013;38(23):2028-37.
4. Verheyden AP, Spiegl UJ, Ekkerlein H, Gercek E, Hauck S, Josten C, et al. Treatment of Fractures of the Thoracolumbar Spine: Recommendations of the Spine Section of the German Society for Orthopaedics and Trauma (DGOU). *Global Spine J*. 2018;8(2 Suppl):34S-45S.
5. McCormack T, Karaikovic E, Gaines RW. The load sharing classification of spine fractures. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1994;19(15):1741-4.
6. Sander AL, Laurer H, Lehnert T, El Saman A, Eichler K, Vogl TJ, et al. A clinically useful classification of traumatic intervertebral disk lesions. *AJR Am J Roentgenol*. 2013;200(3):618-23.
7. [Available from: https://awmf.org/uploads/tx_szleitlinien/012-019I_S3_Polytrauma_Schwerverletzten-Behandlung_2017-08.pdf.
8. Duval-Beaupere G, Schmidt C, Cosson P. A Barycentremetric study of the sagittal shape of spine and pelvis: the conditions required for an economic standing position. *Ann Biomed Eng*. 1992;20(4):451-62.
9. Lafage V, Schwab F, Patel A, Hawkinson N, Farcy JP. Pelvic tilt and truncal inclination: two key radiographic parameters in the setting of adults with spinal deformity. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2009;34(17):E599-606.
10. 2019 [Available from: https://www.awmf.org/uploads/tx_szleitlinien/012-028I_S1_Verletzungen-der-thorakolumbalen-Wirbelsäule_2019-02.pdf.
11. Vaccaro AR, Zeiller SC, Hulbert RJ, Anderson PA, Harris M, Hedlund R, et al. The thoracolumbar injury severity score: a proposed treatment algorithm. *J Spinal Disord Tech*. 2005;18(3):209-15.
12. Spiegl UJ, Josten C, Devitt BM, Heyde CE. Incomplete burst fractures of the thoracolumbar spine: a review of literature. *Eur Spine J*. 2017;26(12):3187-98.
13. Spiegl UJ, Jarvers JS, Heyde CE, Glasmacher S, Von der Hoh N, Josten C. [Delayed indications for additive ventral treatment of thoracolumbar burst fractures : What correction loss is to be expected]. *Unfallchirurg*. 2015.
14. Lee JK, Jang JW, Kim TW, Kim TS, Kim SH, Moon SJ. Percutaneous short-segment pedicle screw placement without fusion in the treatment of thoracolumbar burst fractures: is it effective?: comparative study with open short-segment pedicle screw fixation with posterolateral fusion. *Acta Neurochir (Wien)*. 2013;155(12):2305-12; discussion 12.
15. Wild MH, Glees M, Plieschnegger C, Wenda K. Five-year follow-up examination after purely minimally invasive posterior stabilization of thoracolumbar fractures: a comparison of minimally invasive percutaneously and conventionally open treated patients. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2007;127(5):335-43.
16. Barbagallo GM, Yoder E, Dettori JR, Albanese V. Percutaneous minimally invasive versus open spine surgery in the treatment of fractures of the thoracolumbar junction: a comparative effectiveness review. *Evid Based Spine Care J*. 2012;3(3):43-9.
17. Kim DY, Lee SH, Chung SK, Lee HY. Comparison of multifidus muscle atrophy and trunk extension muscle strength: percutaneous versus open pedicle screw fixation. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2005;30(1):123-9.
18. Weiss T, Hauck S, Buhren V, Gonschorek O. [Repositioning options with percutaneous dorsal stabilization. For burst fractures of the thoracolumbar junction]. *Unfallchirurg*. 2014;117(5):428-36.

19. Gonschorek O, Spiegl U, Weiss T, Patzold R, Hauck S, Buhren V. [Reconstruction after spinal fractures in the thoracolumbar region]. *Unfallchirurg*. 2011;114(1):26-34.
20. Fitschen-Oestern S, Scheuerlein F, Weuster M, Klueter T, Menzdorf L, Varoga D, et al. Reduction and retention of thoracolumbar fractures by minimally invasive stabilisation versus open posterior instrumentation. *Injury*. 2015;46 Suppl 4:S63-70.
21. Pishnamaz M, Oikonomidis S, Knobe M, Horst K, Pape HC, Kobbe P. Open versus Percutaneous Stabilization of Thoracolumbar Spine Fractures: A Short-Term Functional and Radiological Follow-up. *Acta Chir Orthop Traumatol Cech*. 2015;82(4):274-81.

Erklärung über den wissenschaftlichen Beitrag des Promovierenden zur Publikation

Der eigene wissenschaftliche Beitrag zur Publikation „Percutaneous versus open posterior stabilization in AOSpine type A3 thoracolumbar fractures“ bestand in:

Idee und Entwurf der Studie, Studiendesign, Datenaquise, Nachuntersuchung der Patienten, Datenanalyse und Interpretation, Schreiben des Manuskripts.



Christoph Erichsen



Christian von Rüden



Ulrich J. Spiegl



Oliver Gonschorek



Stephanie Panzer

ERKLÄRUNG ÜBER DIE EIGENSTÄNDIGE ABFASSUNG DER ARBEIT

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne unzulässige Hilfe oder Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Ich versichere, dass Dritte von mir weder unmittelbar noch mittelbar eine Vergütung oder geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten haben, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen, und dass die vorgelegte Arbeit weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde zum Zweck einer Promotion oder eines anderen Prüfungsverfahrens vorgelegt wurde. Alles aus anderen Quellen und von anderen Personen übernommene Material, das in der Arbeit verwendet wurde oder auf das direkt Bezug genommen wird, wurde als solches kenntlich gemacht. Insbesondere wurden alle Personen genannt, die direkt an der Entstehung der vorliegenden Arbeit beteiligt waren. Die aktuellen gesetzlichen Vorgaben in Bezug auf die Zulassung der klinischen Studien, die Bestimmungen des Tierschutzgesetzes, die Bestimmungen des Gentechnikgesetzes und die allgemeinen Datenschutzbestimmungen wurden eingehalten. Ich versichere, dass ich die Regelungen der Satzung der Universität Leipzig zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis kenne und eingehalten habe.

01.04.2020

.....

Datum



.....

Unterschrift

PUBLIKATIONSVERZEICHNIS

Publikationen

- Bauer EC, Koch N, **Erichsen CJ**, Juettner T, Rein D, Janni W, Bender HG, Fleisch MC. "Survey of compartment syndrome of the lower extremity after gynecological operations". *Langenbecks Arch Surg.* 2014 Mar;399(3):343-8
- **Erichsen CJ**, von Rüden C, Hierholzer C, Bühren V, Woltmann A. „Auxiliäre Cerclage zur Reposition und Retention dislozierter Acetabulumfrakturen“ *Unfallchirurg* 2015 Jan;118(1):35-41
- M.Morgenstern, **C.Erichsen**, S.Hungerer, M.Militz, V.Bühren. „Implantat assoziierte Infektionen der unteren Extremität-Klinischer Verlauf und Langzeitergebnis“. *OUP* 2015;03:188-295
- Morgenstern M, **Erichsen C**, Hackl S, Mily J, Militz M, Friederichs J, Hungerer S, Bühren V, Moriarty TF, Post V, Richards RG, Kates SL. "Antibiotic resistance of commensal staphylococcus aureus and coagulase-negative staphylococci in an International Cohort of Surgeons: A prospective point-prevalence study", *Plos ONE*, 11/2, e0148437, 2016
- Morgenstern M, Post V, **Erichsen C**, Hungerer S, Bühren V, Militz M, Richards G, Moriarty F. "Biofilm formation increases treatment failure in Staphylococcus epidermidis device-related osteomyelitis of the lower extremity in human patients", *Journal of Orthopaedic Research*, 34/11, 1905-1913,2016
- **Erichsen CJ**, Perl M, Woltmann A. „ Klassifikation von Azetabulumfrakturen und prinzipielle Zugangswege“, *OUP - Orthopädische und Unfallchirurgische Praxis*, 11, 612-615, 2016
- Morgenstern M, **Erichsen C**, von Rüden C, Metsemakers WJ, Kates SL, Moriarty TF, Hungerer S., „Staphylococcal orthopaedic device-related infections in older patients“, *Injury*, 47/7, 1427 - 1434, 2016
- Simon Hackl, Markus T. Berninger, **Christoph Erichsen**, Michael Lang, Alexander Woltmann Sternumfrakturen – Rippenfrakturen *Orthopädie und Unfallchirurgie up2date* 2018; 13(06): 571-592 DOI: 10.1055/s-0044-102023
- von Rüden C, Kühl R, **Erichsen CJ**, Kates SL, Hungerer S, Morgenstern M. „Current Concepts for the Treatment of Skin and Soft Tissue Infections in Orthopaedic and Trauma Surgery“. *Z Orthop Unfall.* 2018 Aug;156(4):452-470. doi: 10.1055/s-0043-118136. Epub 2018 Aug 24. German
- Gieling F, Peters S, **Erichsen C**, Richards RG, Zeiter S, Moriarty TF. "Bacterial osteomyelitis in veterinary orthopaedics: Pathophysiology, clinical presentation and advances in treatment across multiple species". *Vet J.* 2019 Aug;250:44-54. doi: 10.1016/j.tvjl.2019.06.003. Epub 2019 Jun 25
- **Erichsen CJ**, Heyde CE, Josten C, Gonschorek O, Panzer S, von Rüden C, Spiegl UJ. „Percutaneous versus open posterior stabilization in AOSpine type A3 thoracolumbar fractures.“ *BMC Musculoskelet Disord.* 2020 Feb 5;21(1):74. doi: 10.1186/s12891-020-3099-6.PMID: 32024494

Vorträge:

- „Die operative Versorgung von Klavikulafrakturen beim Polytrauma“,
C. Erichsen, S. Hackl, C. Hierholzer, A. Woltmann, V. Bühren
Otto-Goetze Preisträgersitzung, 89. Jahrestagung Vereinigung Bayerischer Chirurgen,
Regensburg, 26.07.2012
- „How the AO has changed my expectations-involving the new generation“.
C. Erichsen. AO Trauma Masters Course-Complications and Complex Fractures , Davos,
Schweiz, 13.12.2013
- “Registries in Staphylococcal bone infections”
C. Erichsen, ECTES Resident Session, ECTES Frankfurt, 25.05.2014
- “Correlation between bacterial phenotype and clinical outcome in orthopedic device related
bone infections with Staphylococcus aureus”
Erichsen C, Morgenstern M, Post V, Hungerer S, Moriarty F, Militz M, Richards G, Bühren V.
European Bone and Joint Infection Society, Utrecht, 13.09.2014
- “Nasenkolonisation mit multiresistenten Erregern bei Unfallchirurgen“
Erichsen C, M Morgenstern, S Hackl, F Moriarty, S Hungerer, V Bühren, RG Richards, SL
Kates, DKOU, Berlin, 22.10.2015
- „Implantat-Infektionen mit Staphylokokken - Korrelation zwischen bakteriellen Eigenschaften
und klinischem Outcome“, VSOU, 2015
Erichsen C, Morgenstern M, Moriarty F, Hungerer S, Militz M, Bühren V, 30.04.-02.05.2015,
Baden-Baden
- „Nasenkolonisation mit multiresistenten Staphylokokken in einem großen internationalen
Kollektiv von Chirurgen und Analyse von MRSA Stämmen“,
Erichsen C, Post V, Morgenstern M, Hackl S, Moriarty F, Hungerer S, Bühren V, Richards G,
Kates S, 94. Jahrestagung Vereinigung der Bayerischen Chirurgen, 201721.07.2017,
Würzburg
- „Vergleich zwischen frühzeitiger und zeitverzögerter additiver ventraler Stabilisierung bei
instabilen Frakturen der thorakolumbalen Wirbelsäule“
C. Erichsen, C.Heyde, S.Panzer, O.Gonschorek, C. Josten, U.Spiegl, DKOU Berlin,
23.10.2018
- „Der Unfallchirurg – der Notarzt für die Berge?“
C. Erichsen, DKOU Berlin, 25.10.2019

DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen beteiligten Personen danken, die mich bei der Anfertigung meiner Dissertation unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. med. Ulrich Spiegl für die ausgezeichnete Betreuung und Unterstützung bei der Durchführung der gesamten Arbeit, sowie dem gesamten Team der Abteilung für Wirbelsäulenchirurgie der BG-Unfallklinik Murnau für die tatkräftige Unterstützung bei der Nachuntersuchung der Patienten.

Meiner Familie, insbesondere meiner Frau Sandra sowie meinen Eltern und Geschwistern möchte ich besonders für ihre Geduld und Zusprüche während der Arbeit an dieser Dissertation danken.