

M. Schultheiss · H.-J. Wilke · L. Claes · L. Kinzl · E. Hartwig

MACS-TL[®]-Polyaxialscrew XL

**Ein neues Konzept zur Stabilitätserhöhung ventraler
Spondylodesen in Anwesenheit dorsaler Verletzungen**

M. Schultheiss¹ · H.-J. Wilke² · L. Claes² · L. Kinzl¹ · E. Hartwig¹

¹Abteilung für Unfall-, Hand- und Wiederherstellungschirurgie, Universität Ulm

²Institut für Unfallchirurgische Forschung und Biomechanik, Universität Ulm

MACS-TL[®]-Polyaxialscrew XL

Ein neues Konzept zur Stabilitätserhöhung ventraler Spondylodesen in Anwesenheit dorsaler Verletzungen

Zusammenfassung

Der Einfluss von zusätzlichen Verletzungen dorsaler Wirbelsäulenstrukturen im Rahmen einer Fraktur auf die Stabilität ventraler Stabilisierungen ist weitgehend unbekannt. Die Zementierung der ventralen Schrauben ist eine Möglichkeit die Stabilität von ventralen Systemen besonders bei schlechter Knochenqualität zu erhöhen. Mit Hilfe eines neu entwickelten Schraubdübels lässt sich bei schlechter Haltefestigkeit eine genau definierte Menge Knochenzement über Längsschlitz durch den hohlen Schraubdübel applizieren.

In dieser In-vitro-Studie wird biomechanisch untersucht, ob der dadurch erzielte Stabilitätzuwachs bei rein ventraler Instrumentierung (z. B. bei endoskopischem Vorgehen) ausreichend ist, um eine zusätzliche, durch dorsale Verletzungen hervorgerufene Instabilität zu kompensieren.

In einem Korporektomiemodell mit abstützendem Knochenspan und überbrückendem Implantat wird mit einer Laminektomie eine dorsale Defektsituation simuliert und der Einfluss der zusätzlichen Zementierung auf die Primärstabilität eruiert.

Durch die zusätzliche nachträgliche Zementierung lässt sich in diesem Modell die dorsale Instabilität hinsichtlich der Primärstabilitätsparameter kompensieren.

Schlüsselwörter

Wirbelsäule · Frakturbehandlung · Instabilität · Biomechanik

Der Einfluss von zusätzlichen Verletzungen dorsaler Wirbelsäulenstrukturen im Rahmen einer Fraktur auf die biomechanischen Eigenschaften ventraler Instrumentierungen ist weitgehend unbekannt. Klinisch ist ein kombiniertes Vorgehen etabliert. Vorliegende biomechanische Studien befassen sich letztlich nur mit dem „Worst-case-Szenario“ der Korporektomie und bilateralen Facettektomie, nicht aber mit klinisch relevanten Defektsituationen, wie Band- oder knöchernen Bogenverletzungen [5, 6, 7, 10].

Im Rahmen der sich klinisch mehr und mehr etablierenden ventralen minimal-invasiven Techniken zur Frakturbehandlung an der Wirbelsäule, wird die Diskussion bezüglich einem reinen ventralen, ohne initiales dorsales oder kombiniertes Vorgehen erneut geführt [16].

Durch die Entwicklung geeigneter Implantate und Verbesserung endoskopischer Techniken lassen sich Frakturen im thorakalen Bereich vollständig endoskopisch, im thorakolumbalen Übergang mit endoskopischen Zwerchfellsplittings operativ von ventral stabilisieren [2, 3, 4, 9, 16]. Zusätzliche dorsale Verletzungen, wie Bogenbrüche etc. bedingen jedoch nach wie vor ein kombiniertes Vorgehen. Durch den dorsalen Zugang werden muskuläre Strukturen stark geschädigt, die postoperative Mobilisation erschwert, die Innervation dieser Strukturen oftmals für immer geschädigt und so eine Muskelatrophie mit diesem Vorgehen akzeptiert. Ziel des minimal-invasiven, endoskopischen Vorge-

hens wäre die rein ventrale Dekompression und Frakturstabilisation (auch für den Fall geschädigter dorsaler Strukturen ohne Rotationsfehlstellung der Wirbelsäule).

Für den Fall der schlechten Knochenqualität, wie osteoporotisch veränderte Wirbelkörper wurde ein spezieller, hohler Verankerungsdübel entwickelt, der aufgrund seiner geometrischen Optimierung eine verbesserte Haltefestigkeit im Knochen erzielt [15]. Über 3 Längsschlitz im Dübel lässt sich eine genau definierte Menge Knochenzement durch den hohlen, bereits eingedrehten Schraubdübel nachträglich applizieren und so die Verankerungsfestigkeit nachhaltig verbessern. Dieser Verankerungsdübel kann im Rahmen der endoskopischen Frakturversorgung initial bei schlechter Knochenqualität oder sekundär als „rescue screw“ z. B. Concept beim Durchdrehen der normalen Schrauben zur Anwendung kommen. Er ist als „Polyaxialscrew XL“ neben dem „Twin Screw Concept“ des neu entwickelten, vollständig endoskopisch implantierbaren MACS-TL[®]-Systems eine Systemerweiterung für die genannten Indikationen.

Dr. M. Schultheiss

Abteilung für Unfall-, Hand- und Wiederherstellungschirurgie,
Universitätsklinikum, Steinhövelstraße 9,
89075 Ulm
E-Mail: Markus.Schultheiss@medizin.uni-ulm.de

M. Schultheiss · H.-J. Wilke · L. Claes
L. Kinzl · E. Hartwig

MACS TL™ polyaxialscrew XL.
A new concept to increase the stability
of ventral spondylodesis in the presence
of dorsal structure injuries

Abstract

The influence of additional dorsal structure damage on anterior stabilization of thoracolumbar fracture is still unknown. Screw cement enhancement is a possibility to reinforce the stability of anterior instrumentation. A new anchorage system has been developed for fixation of anterior stabilization devices, adapted through geometric optimization and the possibility of optional additional cementation after screw insertion in cases of poor bone quality.

Is this enhancement strong enough to support a single anterior procedure such as the thoracoscopic technique and still compensate for dorsal instability?

A biomechanical in vitro study simulating an anterior corpectomy, strut grafting, and overbridging stabilization with a dorsal laminectomy as dorsal structure damage was performed, and the primary stability parameters were evaluated with and without screw cement enhancement.

The additional cementation enhanced the primary stability of the anterior instrumentation and compensated for dorsal instability.

Keywords

Spine · Thoracolumbar fracture treatment · Stabilization · Biomechanics

Zum Thema: Instrumentierungen

In dieser Studie soll eine weitere denkbare Option für den klinischen Einsatz dieses Schraubdübels biomechanisch eruiert werden. Ziel ist es, in einer biomechanischen In-vitro-Studie zu demonstrieren, dass sich durch die ventrale Stabilitätssteigerung aufgrund der Anwendung dieses nachträglich zementierbaren Verankerungsdübel, eine dorsale zusätzliche Instabilität bei rein ventraler Instrumentierung hinsichtlich der Primärstabilität kompensieren lässt.

Material und Methoden

MACS-TL®-Polyaxialscrew XL

Als Systemerweiterung des vollständig endoskopisch implantierbaren MACS-TL®-Twin-Screw-Concept (MACS-TL, modular anterior construct system thoracic lumbar, Fa. Aesculap, Tuttlingen) für die Frakturversorgung an der Wirbelsäule, wurde die MACS-TL®-Polyaxialscrew XL, als Verankerungsvariante bei schlechter Knochenqualität entwickelt (Abb. 1). [15].

Dieser selbstschneidende, hohle Schraubdübel (ISOTAN® F Titanlegierung, TiAl₆V₄ nach ISO 5832-3) hat eine Länge von 30 oder 40 mm, einen Kerndurchmesser von 6 mm und eine Gewindesteigung von 4 mm. Durch 3 Längsschlitze entlang der longitudinalen Achse ist eine nachträgliche Zementapplikation nach Implantation der Schraube möglich. Zum Ausschluss einer Fissur oder Fraktur in den zur Verankerung vorgesehenen Wirbelkörpern werden diese zuvor im präoperativen Fein-

schicht-CT beurteilt. Eine genau durch den Zementapplikator definierte Menge (2 ml) an Osteopal®-Knochenzement (Fa. Merk Biomaterial, Darmstadt) wird für die zusätzliche Zementierung verwendet. Diese geringe Menge reicht aus um die gewünschte Erhöhung der Verankerungsfestigkeit zu erzielen, zudem ist damit die Gefahr eines unerwünschten Zementflusses bzw. einer Hitzeentwicklung beim Aushärten minimiert (Abb. 2). Die Viskosität von Osteopal-Knochenzement erlaubt ein einfaches Aufziehen und Applizieren des Zements durch den Dübel hindurch. Dieses Manöver kann offen, wie auch endoskopisch vorgenommen werden. Die Härtezeit des Zements beträgt in situ ca. 5 min.

Biomechanische In-vitro-Testung

An 6 humanen Wirbelsäulenpräparaten Th10 bis L2 wurden die biomechanischen In-vitro-Untersuchungen durchgeführt (Präparatealter 77±18 Jahre). Dreifachverpackt in Gefrierfolie waren die Präparate vor der Testung bei -28°C tiefgefroren. Die Knochendichte wurde mittels quantitativer Computertomographie (XCT-9600A pQCT®, Fa. Stratec, Birkenfeld) in einer horizontalen Linie an jedem Wirbelkörper gemessen und betrug durchschnittlich 145±40 mg/cm³. Der Computertomograph wurde zuvor jeweils mittels einem Phantom aus Hydroxylapatit kalibriert.

Vor der Testung wurden die Präparate bei Raumtemperatur aufgetaut. Weichteilgewebe und Muskeln wurden sorgfältig unter Erhalt aller discolig-

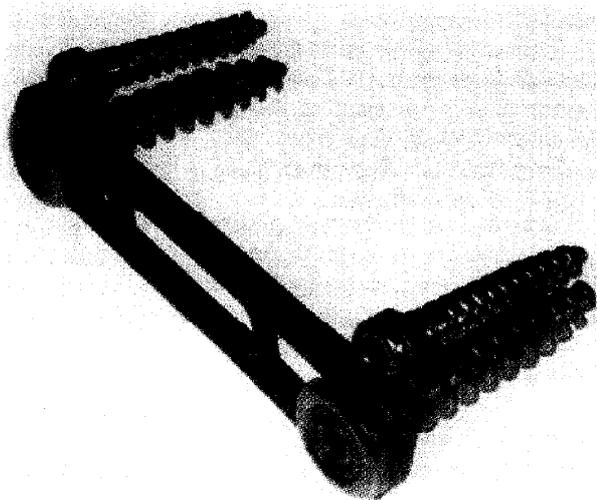


Abb. 1 ► MACS-TL
mit Polyaxialscrew XL

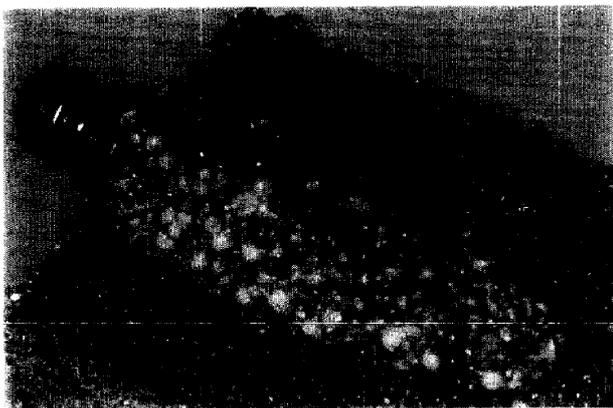


Abb. 2 ◀ Polyaxialscrew-XL-Zementenhancement mit 2 ml Osteopal-Knochenzement

amentären Strukturen entfernt. Während der ganzen Versuchsvorbereitung und der Testung wurden die Präparate mit 0,9% NaCl-Lösung feucht gehalten. Anschließend wurde Th10 und L2 in Technovitblöcke (Technovit® 3040, Fa. Heraeus Kulzer, Wehrheim/Ts) zur Fixierung im Wirbelsäulenbelastungssimulator eingegossen [18]. Der untere Kunststoffblock wurde dabei fest und der obere in einem Kardangelenken fixiert (Abb. 3). In dieses Kardangelenken sind Schrittmotoren intergriert, über die auf die Präparate reine Momente von $\pm 3,75$ Nm für Flexion/Extension, Links- und Rechtsneigung und axiale Links- und Rechtsdrehung eingeleitet wurden. Zunächst wurden die Präparate im intakten Zustand getestet. Danach wurde eine Korporektomie von Th12 erzeugt und mit einem höhenadaptierten Holzblock, einen Knochenspan simulierend abgestützt und mit überbrückenden Implantaten stabilisiert. Die Instrumentation der Implantate erfolgte nach Gebrauchsanweisung des Hersteller bzw. wie oben beschrieben. Anschließend wurde durch a.-p.- und seitliche Röntgenaufnahmen die Implantatlage jeweils kontrolliert. Die verwendete Schraubenlänge der MACS-TL®-Polyaxialscrew XL betrug 40 mm, die der ventralen Schrauben 35 mm, die Plattenlänge variierte zwischen 80 und 100 mm.

Als zusätzliche dorsale Defektsituation wurde zur Simulation einer dorsalen Band- und Bogenverletzung eine Laminektomie durchgeführt, die Facettengelenke wurden intakt belassen.

Folgende Implantatkombinationen wurden verwendet:

- ▶ native Wirbelsäule,
- ▶ MACS-TL®-Polyaxialscrew XL unzementiert ohne dorsalen Defekt,

- ▶ MACS-TL®-Polyaxialscrew XL zementiert mit dorsalem Defekt (Laminektomie).

Der gesamte Versuchsablauf wurde gemäß den Empfehlungen zur standardisierten Implantattestung der Gesellschaft für Wirbelsäulenchirurgie durchgeführt [19]. Es wurden jeweils 3 Belastungszyklen mit reinen Momenten von $\pm 3,75$ Nm in Flexion/Extension, Links-/Rechtsneigung und Links-/Rechtsrotation appliziert und der 3. Belastungszyklus zur Auswertung herangezogen um die viskoelastischen Effekte der initialen 2 Belastungszyklen zu eliminieren. Die resultierenden dreidimensionalen (3D-) Bewegungen wurden zwischen Th11 und L1 für den überbrückten Bereich mit einem Ultraschallbewegungsanalysemesssystem (Cmstrao 1.0, Fa. Zebris, Isny) ermittelt. Der Gesamtbewegungsumfang ROM (range of motion) bei maximal aufgebrachtener Last und die Neutrale Zone (NZ), als Flexibilitätsmaß ohne Belastung wurden ausgewertet [14]. Zur statistischen Auswertung wurde orientierend ein Friedmantest und der Wilcoxon-signed-rank-Test herangezogen.

Ergebnisse

In Flexion/Extension wurde der native Gesamt-ROM nach Korporektomie, Spaninterposition und Stabilisation von $6,3^\circ$ ($NZ=1,2^\circ$) auf $2,5^\circ$ ($NZ=0,8^\circ$) reduziert, durch die Zementierung bei Laminektomie auf $2,2^\circ$ ($NZ=0,6^\circ$), (Abb. 4).

In Seitneigung konnte der native Gesamt-ROM durch die Stabilisierung von $7,3^\circ$ ($NZ=0,5^\circ$) auf $1,7^\circ$ ($NZ=0,3^\circ$) verkleinert werden, mittels der Zementierung bei zusätzlicher dorsaler Instabilität auf $1,8^\circ$ ($NZ=0,2^\circ$), (s. Abb. 4).

Durch Instrumentierung nahm der native Gesamt-ROM in Rotation von $4,2^\circ$ ($NZ=0,5^\circ$) auf $2,8^\circ$ ($NZ=0,3^\circ$) ab und blieb durch die Zementierung bei Laminektomie gleich ($NZ=0,3^\circ$), (s. Abb. 4).

Statistische signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen den beiden Stabilisierungen ergaben sich nicht.

Diskussion

In dieser biomechanischen Studie wurde im Rahmen der ventralen Frakturinstrumentierung die Stabilitätsbeeinflussung der nachträglichen Zementierung eines Verankerungsdübel auf eine zusätzlich vorhandene dorsale Instabilität untersucht. Durch diese biomechanische In-vitro-Studie ließ sich die initial gestellte Hypothese beweisen.

Die Anwendung eines nachträglich zementierbaren Verankerungsdübel führt zu einer ventralen Stabilitätssteigerung, die eine zusätzliche dorsale Instabilität (Laminektomie) bei rein ventraler Instrumentierung hinsichtlich der Primärstabilität biomechanisch kompensiert. Im Korporektomiemodell mit abstützendem Knochenspan und überbrückendem Implantat verringerten beide Stabilisationsvarianten für die jeweiligen Defektsituationen den Gesamt-ROM und die Gesamt-NZ erheblich gegenüber der nativen Wirbelsäule. Trotz des dorsalen Defekts wurden durch die zementierte Variante annähernd gleiche Werte für den ROM und die NZ im Ver-

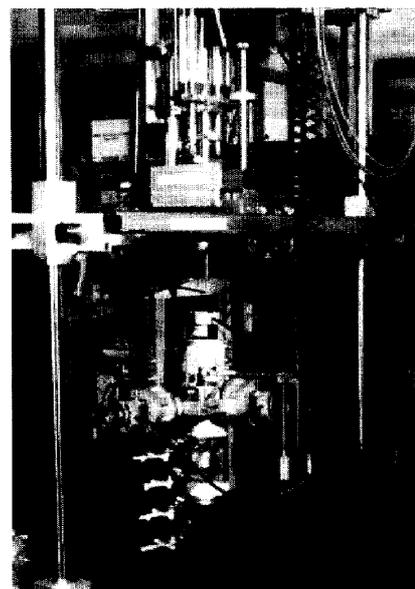


Abb. 3 ▲ Wirbelsäulenbelastungssimulator

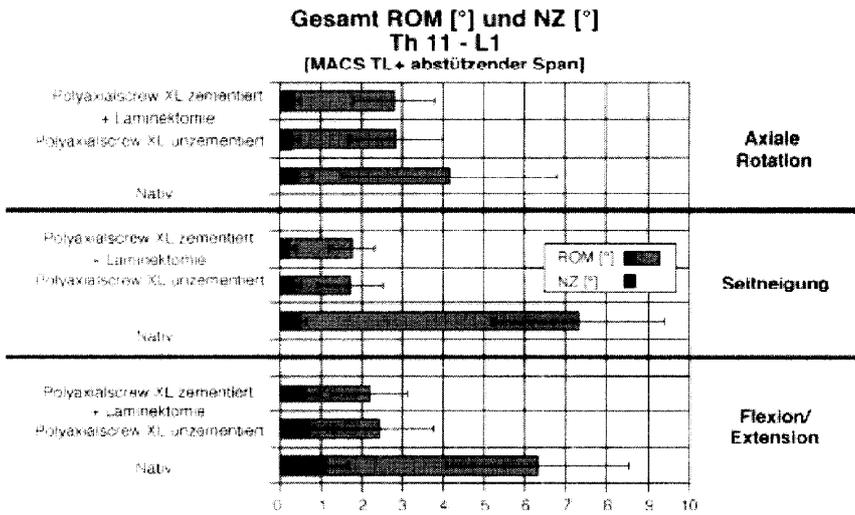


Abb. 4 ▲ Gesamt-ROM [°] und Gesamt-NZ [°] des instrumentierten Bereichs Th11 bis L1 bei maximaler Belastung mit 3,75 Nm in den 3 Bewegungsrichtungen

gleich zu der unzementierten dorsal intakten Variante erzielt. Signifikante Unterschiede zeigten sich nicht.

Die erhobenen Daten sind mit früheren Studien hinsichtlich ROM und NZ vergleichbar [1, 8, 17, 20]. Die Studie wurde in Anlehnung an die Empfehlungen zur Standardisierung von Implantatmessungen an der Wirbelsäule durchgeführt [19].

Der Gebrauch von reinen Momenten zur Präparatebelastung in dieser Studie entspricht derzeit dem anerkannten Belastungsmodus zur Implantatmessung [11, 12, 13, 14, 19]. Bei dieser Art der In-vitro-Tests muss jedoch weiterhin auf einige Einschränkungen hingewiesen werden. Es wurden Muskelkräfte, Körpergewicht etc. vernachlässigt, zudem wurden die Test an Präparaten aus einer hohen Altersgruppe mit schlechter Knochenichte durchgeführt.

Bisherige biomechanische Untersuchungen haben sich in erster Linie mit der ventralen Stabilisation nach Korporrektomie beschäftigt und die Rekonstruktion der vorderen Wirbelsäule mit abstützendem Knochenspan und überbrückendem Implantat als ausreichend primärstabil erachtet [1, 8, 17, 20]. Nur wenige In-vitro-Studien untersuchten den Einfluss einer zusätzlichen dorsalen Instabilität auf die Primärstabilität des instrumentierten Wirbelsäulenabschnitts [5, 6, 7, 10].

Im Rahmen der Rekonstruktion nach Tumorresektion wurde von Kanimaya [7] entsprechend der Klassifikation von Weinstein eine ansteigende In-

stabilität bis hin zur totalen Spondylektomie an humanen Präparaten (Th11 bis L3) simuliert und mit abstützendem Knochenspan ventral (Kaneda-SR-Stabilisation und Cotrel-Dubouset-Haken-/Stabsystem) unterschiedlich stabilisiert. Die ventrale Rekonstruktion wird in dieser Studie für die Rekonstruktion einer Korporrektomie und einseitigen Entfernung des Pedikels und oberen Gelenkfortsatzes für ausreichend stabil erachtet, zur Stabilisation der totalen Spondylektomie ist ein ventrodorsales Vorgehen notwendig.

In weitere Studien wird als zusätzlicher Defekt immer der „worst case“ einer beidseitigen Facettengelenkentfernung mit Laminektomie durchgeführt [5, 6, 10]. Hierbei wird auf den stabilitäts erhöhenden Faktor, der durch das Implantat induzierten axialen Kompression auf den abstützenden Knochenspan hingewiesen. Im Vergleich zur ATLP® (anterior thoracolumbar locking plate, Fa. Synthes) wird durch die axiale Kompressionsmöglichkeit des Kaneda-SR®-System (Fa. Acromed) auch für diese Defektsituation eine höhere Stabilität bei alleiniger ventraler Instrumentierung erzielt [5]. Eine axiale Kompression ist mit dem neuentwickelten System ebenso möglich.

Für den lumbalen Bereich ist gemäß den biomechanische Ergebnissen von Oda [10] die kurzstreckige ventrodorsale Rekonstruktion nach totaler Spondylektomie zu empfehlen, eine längerstreckige dorsale Instrumentation ist nicht notwendig.

Biomechanische Studien mit ansteigenden Defektsituationen nach ventraler Korporrektomie sind derzeit in der Literatur nicht auffindbar. Wie sich zusätzliche Frakturen (evtl. im Bereich der Lamina) oder dorsale Bandverletzungen auf die Stabilität einer alleinigen ventralen Instrumentierung auswirken ist biomechanisch unbekannt. Dies sind jedoch entscheidende Fragen, den Einsatz minimal-invasiver Techniken betreffend.

Die Etablierung minimal-invasiver Operationen in der Frakturbehandlung der Wirbelsäule wurde durch das Fehlen geeigneter Implantate und Instrumente erschwert [2, 3, 4, 9, 16]. Mit der Entwicklung des MACS-TL®-System wurde ein an die endoskopische Technik angepasstes System konzipiert, welches eine komplett endoskopische Stabilisation von Th5 bis L1, ggf. mit endoskopischem Zwerchfellsplitting von L1 bis L2 und von L2 bis L4 retroperitoneal mono- und mehrsegmental ermöglicht.

Durch die Systemerweiterung der nachträglich zementierbaren Polyaxialscrew XL wurde eine Möglichkeit geschaffen, die Verankerungsfestigkeit des MACS-TL®-Systems bei schlechter Knochenqualität zu erhöhen [15].

In dieser Studie konnte gezeigt werden, dass dieser Stabilitätszuwachs durchwegs auch ausreichend ist, zusätzliche dorsale Instabilitäten zu kompensieren. In der vorliegenden biomechanischen In-vitro-Studie wurde mittels einer Laminektomie eine ligamentäre und ossäre Instabilität im Bereich des Wirbelbogens simuliert. Auf eine Erweiterung des dorsalen Defekts bis hin zur beidseitigen Facettektomie wurde in dieser Untersuchung verzichtet, da mit dem genannten Implantat die Korrektur von Rotationsfehlstellungen von rein ventral nicht möglich ist, die resultierende Aussage klinische ohne Relevanz wäre. Für diesen Frakturtyp ist auch hier, wie die initial aufgeführten Studien zeigen ein ventrodorsales Vorgehen notwendig [5, 6, 7, 10].

Gefahren, die bei einer zusätzlichen Zementapplikation denkbar sind, wie unerwünschter Zementfluss bzw. Hitzeschädigung des Rückenmarks, konnten durch die Anwendung genau dosierbarer 2 ml Osteopal minimiert werden, welche mittels des Zementapplikators durch den bereits eingeschraubten Verankerungsdübel definiert appliziert werden. Zur Stabilitätssteigerung reicht diese geringe

Menge Zement aus, um das Schraubennbett zu verstärken; frühere Untersuchungen zeigten, dass mit größeren Mengen kein besserer Effekt am Knochen-Zement-Interface erzielbar ist [15]. Maßnahmen, wie die Erweiterung des präoperativen Feinschicht-CT auf die zur Verankerung vorgesehenen Wirbelkörper lassen hier im Wirbelkörper zusätzliche Fissuren oder Frakturen erkennen und schließen so ggf. die Indikation zur Zementierung a priori aus.

Frühere Erfahrungen zur Erhöhung der Verankerungsfestigkeit mit Knochenzement beziehen sich vornehmlich auf Pedikelschrauben oder Vertebroplastien. Der Knochenzement wird hierbei meist in ein vorgebohrtes Schraubenloch willkürlich eingespritzt, die Schraube anschließend eingedreht. Das ganze Manöver ist dadurch nicht kalkulierbar und oftmals mit den initial genannten Gefahren verbunden.

Fazit für die Praxis

Zusammenfassend ist mit der Polyaxial-screw XL eine Implantatkomponente des vollständig thorakoskopisch implantierbaren MACS-TL[®]-System entwickelt worden, welche durch die nachträgliche Zementapplikation sowohl die Haltefestigkeit des Implantats bei schlechter Knochenqualität erhöht als auch kleinere zusätzliche dorsale Instabilitäten hinsichtlich der Primärstabilität zu kompensieren vermag.

Literatur

1. An HS, Lim TH, You JW, Hong JH, Eck J, Mc Grady LM (1995) Biomechanical evaluation of anterior thoracolumbar spinal instrumentation. *Spine* 20: 1979–1983
2. Beisse R, Potulski M, Bühren V (2000) Thoracoscopic-assisted anterior approach to thoracolumbar fractures. In: Mayer HM (ed) *Minimally invasive spine surgery. A surgical manual*. Springer, Berlin Heidelberg New York Tokio
3. Beisse R, Potulski M, Temme C, Bühren V (1998) Endoscopically controlled division of the diaphragm. A minimally invasive approach to ventral management of thoracolumbar fractures of the spine. *Unfallchirurg* 101: 619–627
4. Bühren V, Beisse R, Potulski M. (1997) Minimally invasive ventral spondylodesis in injuries to the thoracic and lumbar spine. *Chirurg* 68: 1076–1084
5. Hitchon P GV, Rogge T, Grosland N, Torner J (1999) Biomechanical Studies on two anterior thoracolumbar implants in cadaveric spines. *Spine* 24: 213–218
6. Hitchon PW GV, Rogge TN, Torner JC et al. (2000) In vitro biomechanical analysis of three anterior thoracolumbar implants. *J Neurosurgery* 93: 252–258
7. Kanayama M, Ng JT, Cunningham BW, Abumi K, Kaneda K, Mc Afee PC (1999) Biomechanical analysis of anterior versus circumferential spinal reconstruction for various anatomic stages of tumor lesions. *Spine* 24: 445–450
8. Lim TH, An HS, Hong JH, Ahn JY, You JW, Eck J, McGrady LM (1997) Biomechanical evaluation of anterior and posterior fixations in an unstable calf spine model. *Spine* 22: 261–266
9. Mayer HM (2000) *Minimally invasive spine surgery. A surgical manual*. Springer, Berlin Heidelberg New York Tokio
10. Oda I, Cunningham BW, Abumi K, Kaneda K, Mc Afee P (1999) The Stability of reconstruction methods after thoracolumbar total spondylectomy – an in vitro investigation. *Spine* 24: 1634–1638
11. Panjabi MM (1988) Biomechanical evaluation of spinal fixation devices: I. A conceptual framework. *Spine* 13: 1129–1134
12. Panjabi MM (1991) Three-dimensional testing of the stability of spinal implants. *Orthopäde* 20: 106–111
13. Panjabi MM (1992) The stabilizing system of the spine, Part I: Function, dysfunction, adaptation, and enhancement. *J Spinal Disord* 5: 383–397
14. Panjabi MM (1992) The stabilizing system of the spine, Part II: Neutral zone and instability hypothesis. *J Spinal Disord* 5: 390–397
15. Schultheiss M, Claes L, Wilke H-J, Hartwig E, Kinzl L (1998) Enhanced fixation strength of a new anterior screw dowel – a biomechanical in vitro comparison to existing devices. Annual meeting of the international Society for the Study of the Lumbar Spine, Brüssel, 1998
16. Schultheiss M, Hartwig E, Wilke H-J, Neller S, Claes L, Kinzl L (2000) Biomechanical aspects of anterior instrumentation in thoracoscopic spine surgery. In: Mayer HM (ed) *Minimally invasive spine surgery. A surgical manual*. Springer, Berlin Heidelberg New York Tokio
17. Shono Y, McAfee PC, Cunningham BW (1994) Experimental study of thoracolumbar burst fractures. A radiographic and biomechanical analysis of anterior and posterior instrumentation systems. *Spine* 19: 1711–1722
18. Wilke HJ, Claes L, Schmitt H, Wolf S (1994) A universal spine tester for in vitro experiments with muscle force simulation. *Eur Spine* J 3: 91–97
19. Wilke HJ, Wenger K, Claes L (1998) Testing criteria for spinal implants: recommendations for the standardization of in vitro stability testing of spinal implants. *Eur Spine* J 7: 148–154
20. Zdeblick TA, Warden KE, Zou D, McAfee PC, Abitbol JJ (1993) Anterior spinal fixators. A biomechanical in vitro study. *Spine* 18: 513–517