

Aus der Radiologischen Universitätsklinik (Departement) Tübingen

Abteilung für Diagnostische und Interventionelle Radiologie

Ärztlicher Direktor: Professor Dr. C. D. Claussen

**Komplikationen
der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse**

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin

der Medizinischen Fakultät
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen

vorgelegt von

Helena Ines Christine Heisenberg

aus

Heidelberg

2009

Dekan:

Professor Dr. I. B. Autenrieth

1. Berichterstatter:

Professor Dr. P. L. Pereira

2. Berichterstatter:

Professor Dr. A. Beck

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Allgemeines zu Vertebro- und Kyphoplastie	3
1.2	Osteoporose und Wirbelkörperfrakturen	5
1.2.1	Osteoporose	5
1.2.2	(Osteoporotische) Wirbelkörperfrakturen	11
1.3	Operative Vorgehensweise bei der Vertebro- und Kyphoplastie.....	14
1.4	Indikationen/Kontraindikationen für Vertebro-/Kyphoplastie.....	17
1.5	Komplikationen und Fehlerquellen.....	20
1.6	Verschiedene Zementarten	23
1.7	Alternative Behandlungsverfahren für Wirbelkörperfrakturen	25
1.8	Fragestellung	26
2	Material und Methoden	27
2.1	Präparate	27
2.2	Material	29
2.3	Versuche.....	30
2.4	Zugangsweg	32
2.5	Arbeitsablauf.....	34
3	Ergebnisse	37
3.1	Zementaustritt in Zahlen	37
3.2	Zementaustrittsort.....	38
3.3	Bildergalerie	39
3.3.1	Makroskopische Resultate.....	39
3.3.2	Konventionell radiologische Resultate	41
3.3.3	Computertomografische Resultate	44
4	Diskussion.....	54
4.1	Einleitung	54
4.2	Eigene Resultate.....	54

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse

4.3	Literaturvergleich	54
4.4	Schlussfolgerungen	58
4.5	Limitationen.....	59
4.6	Ausblick.....	59
5	Zusammenfassung.....	62
6	Literaturverzeichnis	64

1 Einleitung

1.1 Allgemeines zu Vertebro- und Kyphoplastie

Die Vertebro- und die Kyphoplastie sind zwei rekonstruktive minimalinvasive Verfahren, welche zur (Schmerz-)Behandlung von osteoporotischen, metastatischen und traumatischen Wirbelkörperfrakturen, sowie bei Wirbelkörpermyelomen und Hämangiomen eingesetzt werden können.

Eine perkutane transpedikuläre Injektion von Knochenzement in den betroffenen Wirbelkörper führt bei beiden Verfahren zu einer Stabilisierung und Stärkung des Wirbelkörpers. Der eingespritzte Zement übt vor der Polymerisation zudem eine toxische Wirkung auf die terminalen Nervenendigungen aus und hat einen Effekt auf Krebszellen. Zusammen führt dies zu einer deutlichen Schmerzreduktion beim Patienten mit einer verbesserten Lebensqualität.

Die Methode der Vertebroplastie wurde erstmals 1984 von Galibert und Deramond¹ in Frankreich bei einem Patienten mit einem zervikalen vertebrale Hämangiom durchgeführt und 1987 veröffentlicht. Seither wird sie weltweit von Radiologen, Orthopäden, Unfall- und Neurochirurgen angewendet.

Die Vertebroplastie führt bei bis zu 96% der Patienten mit osteoporotischen Wirbelkörperfrakturen zu einer starken (oder vollständigen) Schmerzlinderung innerhalb weniger Tage².

Die Weiterentwicklung der Vertebroplastie wurde in den frühen 90er-Jahren durch den Orthopäden Mark Reiley in den USA vorangetrieben. Er stellte mittels eines aufblasbaren Ballonkatheters die ursprüngliche Wirbelkörperhöhe

¹Galibert P, Deramond H, Rosat P, et al. Note préliminaire sur le traitement des angiomes vertébraux par vertébroplastie acrylique percutanée. Neurochirurgie 1987;33:166-8.

²Zoarski GH, Stakkneyer MJB, Obuchowski A. Percutaneous Vertebroplasty: A to Z. Techniques in Vascular and Interventional Radiology 2002;5:223-38.

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse

wieder her, bevor er den Knochenzement eingespritzt hat. Die Technik wurde fortan Kyphoplastie genannt³.

Neben den technischen Unterschieden der beiden Verfahren, ist die Kostendifferenz mitzubeachten. Es liegen Zahlen aus der Schweiz (Kantonsspital Münsterlingen, Thurgau) vor: die reinen Kosten (mit Operationssaal und Anästhesie aber ohne vorhergehenden oder nachfolgenden Krankenhausaufenthalt) betragen für die Kyphoplastie zwischen 7500-8000 Schweizer Franken (4500-5000 Euro), währenddessen eine Vertebroplastie zwischen 500 (vom Radiologen nicht im Operationssaal durchgeführt) und 3625 Schweizer Franken kostet (300-2200 Euro).

Eine offene Stabilisierung kostet zwischen 5250-6250 Schweizer Franken (3300-4300 Euro).

³ Mathis JM, Ortiz OA, Zoarski GH. Vertebroplasty versus Kyphoplasty: a comparison and contrast. AJNR 2004;25:840-45.

1.2 Osteoporose und Wirbelkörperfrakturen

1.2.1 Osteoporose

Die Osteoporose ist eine metabolische Systemerkrankung, bei der es durch eine Knochen-Demineralisation und durch zunehmenden Verlust der Knochenmatrix zu einem erhöhten Risiko für pathologische Frakturen, also Frakturen ohne adäquates Trauma, kommt.

Tabelle 1: Wichtigste Osteoporose-Ursachen

primär (95%)	senil, postmenopausal, idiopathisch
sekundär (5%)	Steroiddauertherapie, langandauernde Immobilisation, Hyperparathyreoidismus, Mangelernährung, Malabsorptionssyndrom, Hyperthyreose

Die Diagnose der Osteoporose wird über die Messung der Knochendichte gestellt. Dies erfolgt entweder mittels der DXA-Methode (DXA = dual-energy x-ray-absorptiometry) oder mittels einer CT-Osteodensitometrie. Bei der DXA-Methode wird die Knochendichte konventionell radiologisch am distalen Radius, am Oberschenkelhals und an einem Wirbelkörper der Lumbalwirbelsäule gemessen. Bei der CT-Osteodensitometrie wird die Knochendichte computertomografisch an einem Lendenwirbelkörper bestimmt. Die Dichtewerte werden mit der Knochendichte eines jungen gesunden Normkollektivs verglichen (T-Score).

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse

Tabelle 2: Osteoporose-Schweregrade

Stadien	Standardabweichungen vom T-Score
Osteopenie	-1.0 bis -2.5
Osteoporose ohne Frakturen	< -2.5
Osteoporose mit Frakturen	> -2.5 mit 1-3 Wirbelkörperfrakturen
Fortgeschrittene Osteoporose	> -2.5 mit multiplen Wirbelkörperfrakturen

Die Therapie der Osteoporose erfolgt bei bekannter Ursache (siehe Tabelle 1) primär kausal, bei unbekannter Ursache primär symptomatisch. In den meisten Fällen besteht die Basis-Behandlung aus einer adäquaten Analgesie bei Frakturen (meist NSAR- und Morphin-Präparate mit entsprechenden Nebenwirkungen) und Bisphosphonaten, sowie Calcitonin.

Bisphosphonate sind chemische Analoga des Pyrophosphats. Anorganisches Pyrophosphat kann im Laborversuch sowohl die Auflösung als auch die Bildung von Kalziumphosphat verursachen. Da Pyrophosphat sehr schnell durch hydrolytische Enzyme wie Phosphatasen inaktiviert wird, ist der therapeutische Einsatz begrenzt. Bisphosphonate weisen zwar die gleichen pharmakologischen Eigenschaften auf, verhalten sich aber gegenüber enzymatischen und hydrolytischen Einflüssen stabil. Bisphosphonate verringern einerseits die Zahl der Osteoklasten, indem sie deren Fusion aus den Vorläuferzellen stören, andererseits wird die Ausscheidung eines Hemmers der Osteoklastenrekrutierung durch die Osteoblasten stimuliert. Somit überwiegt die osteoblastische Knochenneubildung und es kommt bei gehemmter Resorption zu einem Zuwachs an Knochenmasse. Die Bisphosphonate können im Knochen allerdings nur in der kurzen Phase während seines aktiven Umbaus eingebunden werden. Zudem können Bisphosphonate nur dann agieren, solange sie an der Oberfläche des Knochens liegen und nicht durch den Knochenstoffwechsel in den Knochen hinein verlagert wurden. Daher sollte eine kontinuierliche Dauertherapie erfolgen.

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse

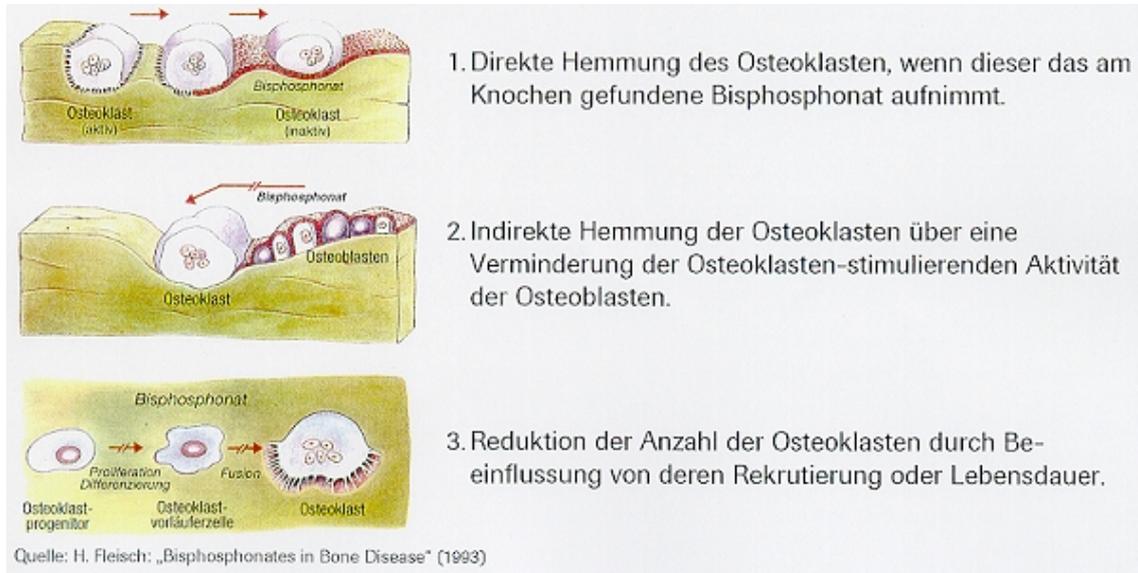


Abbildung 1: Wirkmechanismus von Bisphosphonaten (aus www.roche.com)

Da der Wiederaufbau eines durch Osteoporose geschädigten Knochens nur bedingt möglich ist, kommt der Prävention schon im Kindesalter eine enorme Bedeutung zu^{4 5}. Die höchste Knochenmasse bzw. Knochenmineraldichte wird im jungen Erwachsenenalter erreicht. Sie hängt von diversen Faktoren ab, wobei sportliche Aktivitäten in der Kindheit und im Jugendalter eine wesentliche Rolle spielen. Ab dem 30. Lebensjahr nimmt die Knochenmasse dann kontinuierlich ab. Dieser Prozess kann durch körperliche Aktivität zumindest verlangsamt werden. Obwohl körperliche Betätigung lebenslang notwendig ist,

⁴ Bailey DA, McKay HA, Mirwald RL, Crocker PR, Faulkner RA: A six-year longitudinal study of the relationship of physical activity to bone mineral accrual in growing children: the university of Saskatchewan bone mineral accrual study. J Bone Miner Res 1999;14:1672-1679.

⁵ Petit MA, McKay HA, MacKelvie KJ, Heinonen A, Khan KM, Beck TJ: A randomized school-based jumping intervention confers site and maturity-specific benefits on bone structural properties in girls: a hip structural analysis study. J Bone Miner Res 2002;17:363-372.

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse

hat sich gezeigt, dass je früher mit einer „Sportkarriere“ begonnen wird, desto größer später die Knochenmasse ist⁶.

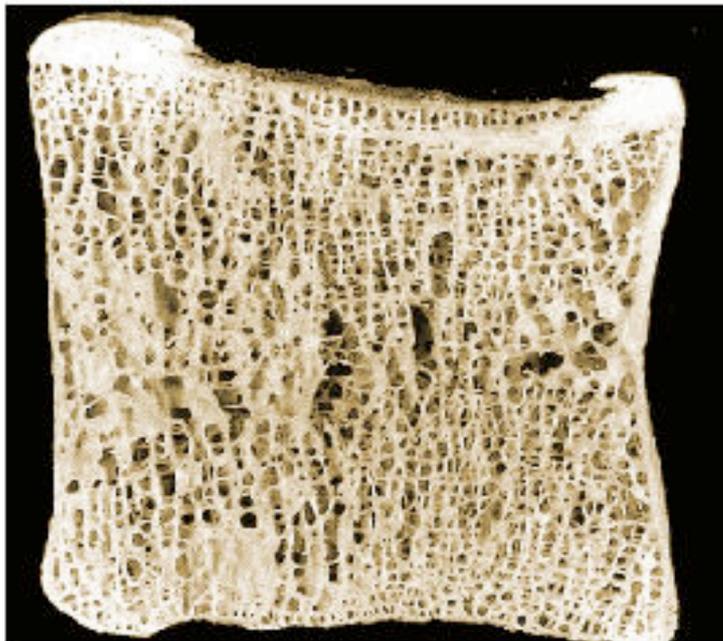
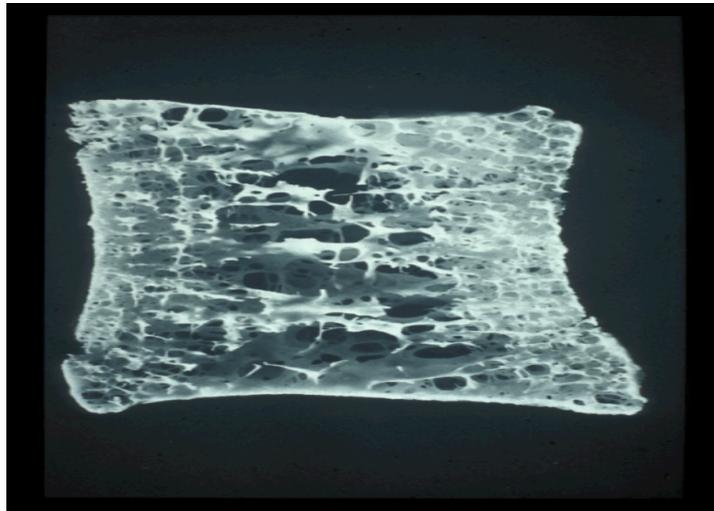


Abbildung 2: : Mikroarchitektur eines gesunden Wirbelkörpers (aus www.bfo-aktuell.de)

⁶ Nordstrom A, Olsson T, Nordstrom P. Sustained benefits from previous physical activity on bone mineral density in males. J Clin Endocrinol Metab 2006;91:2600-4.

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse



**Abbildung 3: Mikroarchitektur eines osteoporotischen Wirbelkörpers
(Foto Beck/Heisenberg, 2007)**

Abbildung 2 zeigt ein Präparat eines aufgesägten normalen Wirbelkörpers mit regelrechter Ausbildung der Spongiosa. Demgegenüber erkennt man in Abbildung 3 beim osteoporotischen Wirbelkörper eine deutliche Rarefizierung der Spongiosa.

1.2.2 (Osteoporotische) Wirbelkörperfrakturen

Osteoporose-bedingte Frakturen treten ausser am distalen Radius oder am Oberschenkelhals am häufigsten an der Wirbelsäule auf⁷. Die Wirbelkörper am thorako-lumbalen Übergang sind dabei aufgrund anatomischer Gegebenheiten besonders frakturgefährdet⁸. Bei osteoporotischem Knochen reicht bereits häufig ein inadäquates Trauma für eine Fraktur aus.

Die Häufigkeit von osteoporotischen Wirbelkörperfrakturen nimmt mit steigendem Lebensalter zu. In den USA erleiden bis zu 25% der über 50-jährigen Frauen eine osteoporotische Knochenfraktur⁹. Bei den über 80-jährigen sind es sogar bis zu 50%¹⁰. Aufgrund der hormonellen Umstellung sind Frauen früher und häufiger von Osteoporose und deren Folgen betroffen; es erleiden jedoch bis zu 40% der über 80-jährigen Männer eine (hauptsächlich) durch Osteoporose bedingte Wirbelkörperkompressionsfraktur im Verlauf ihres weiteren Lebens¹¹.

Nicht nur Osteoporose kann zu Wirbelkörperfrakturen führen. Bei Patienten mit ossären Tumormetastasen zum Beispiel eines Prostata-, Mamma-, Nieren-,

⁷ Johnell, O, Kanis, JA. An estimate of the worldwide prevalence and disability associated with osteoporotic fractures. *Osteoporos Int* 2006;17:1726.

^{9,10} Lyles KW. Management of patients with vertebral compression fractures. *Pharmacotherapy* 1999;19 (1 Pt 2):21S-4S.

⁸ Cooper C, Atkinson EJ, O'Fallon WM, et al. Incidence of clinically diagnosed vertebral fractures: a population-based study in Rochester, Minnesota, 1985-1989. *J Bone Miner Res* 1992;7(2):221-7.

¹¹ Olszynski WP, Shawn Davison K, et al. Osteoporosis in men: epidemiology, diagnosis, prevention, and treatment. *Clin Ther* 2004;26(1):15-28.

Schilddrüsen- oder Lungenkarzinom können ebenfalls unter schmerzhaften Wirbelkörpereinbrüchen leiden.

Wirbelkörperfrakturen manifestieren sich entweder als Mikro- (das heisst ohne konventionell radiologisch nachweisbare Knochenstrukturveränderungen) oder als Makrofrakturen. Im konventionellen Röntgenbild erscheinen diese Veränderungen dann als sogenannte Keil- oder Fischwirbel. Osteoporotische Wirbelkörperfrakturen sind häufig radiologische Zufallsbefunde, weil sie keine neurologischen Ausfälle verursachen und nur in etwa einem Drittel der Fälle mit teilweise massiven Schmerzen verbunden sind¹². Eine Wirbelkörperfraktur führt in der Regel zu einer vermehrten Kyphosebildung und somit zur Abnahme der Körpergrösse (siehe Abbildung 6).

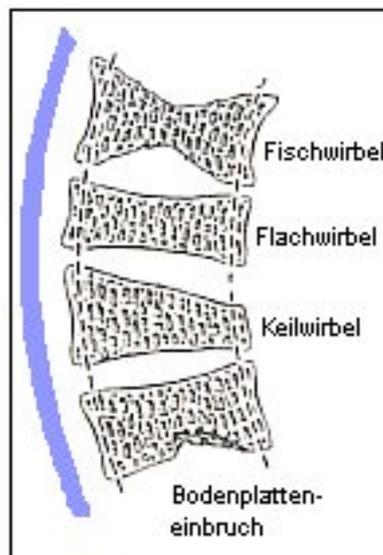
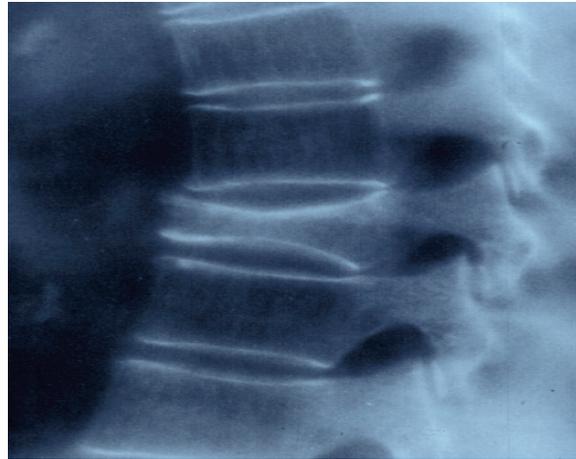


Abbildung 4: Osteoporotische Frakturformen (aus www.medizininfo.de)

¹² Lindsay R, Silverman SR, Cooper C, et al. Risk of new vertebral fracture in the year following a fracture. JAMA 2001;285:320-3.

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse



**Abbildung 5: Röntgenbild einer Wirbelkörperfraktur mit Fischwirbelbildung
(Heisenberg 2007)**

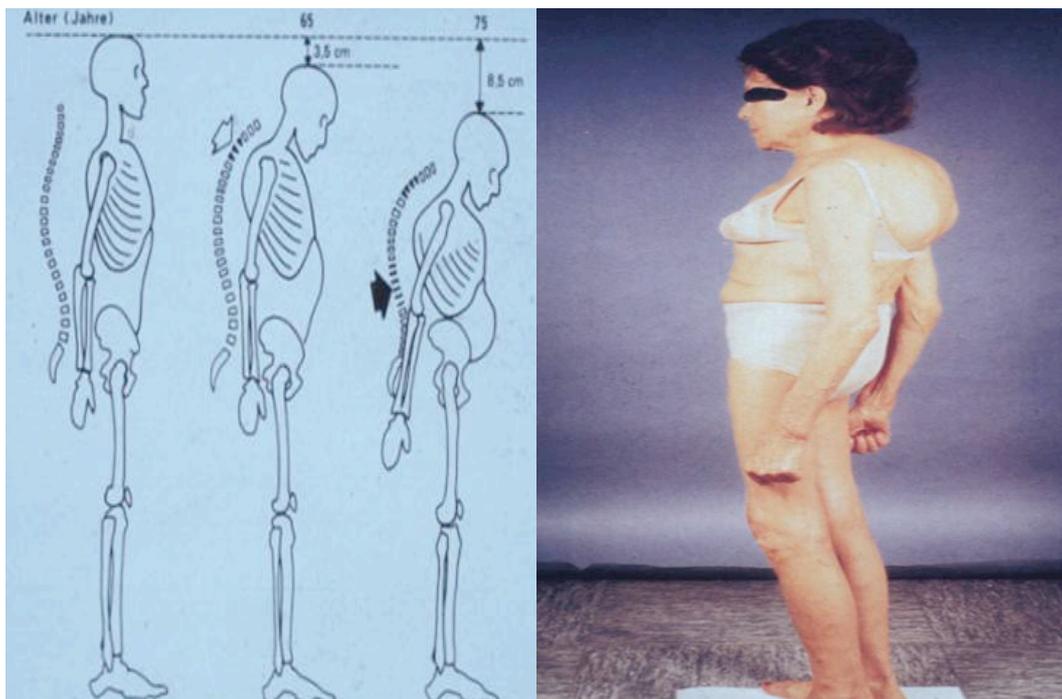


Abbildung 6: Abnahme der Körpergröße mit zunehmendem Alter durch Wirbelsäulen-Kyphosierung (rechts). Massiv kyphotische Brustwirbelsäule bei Osteoporose (links)

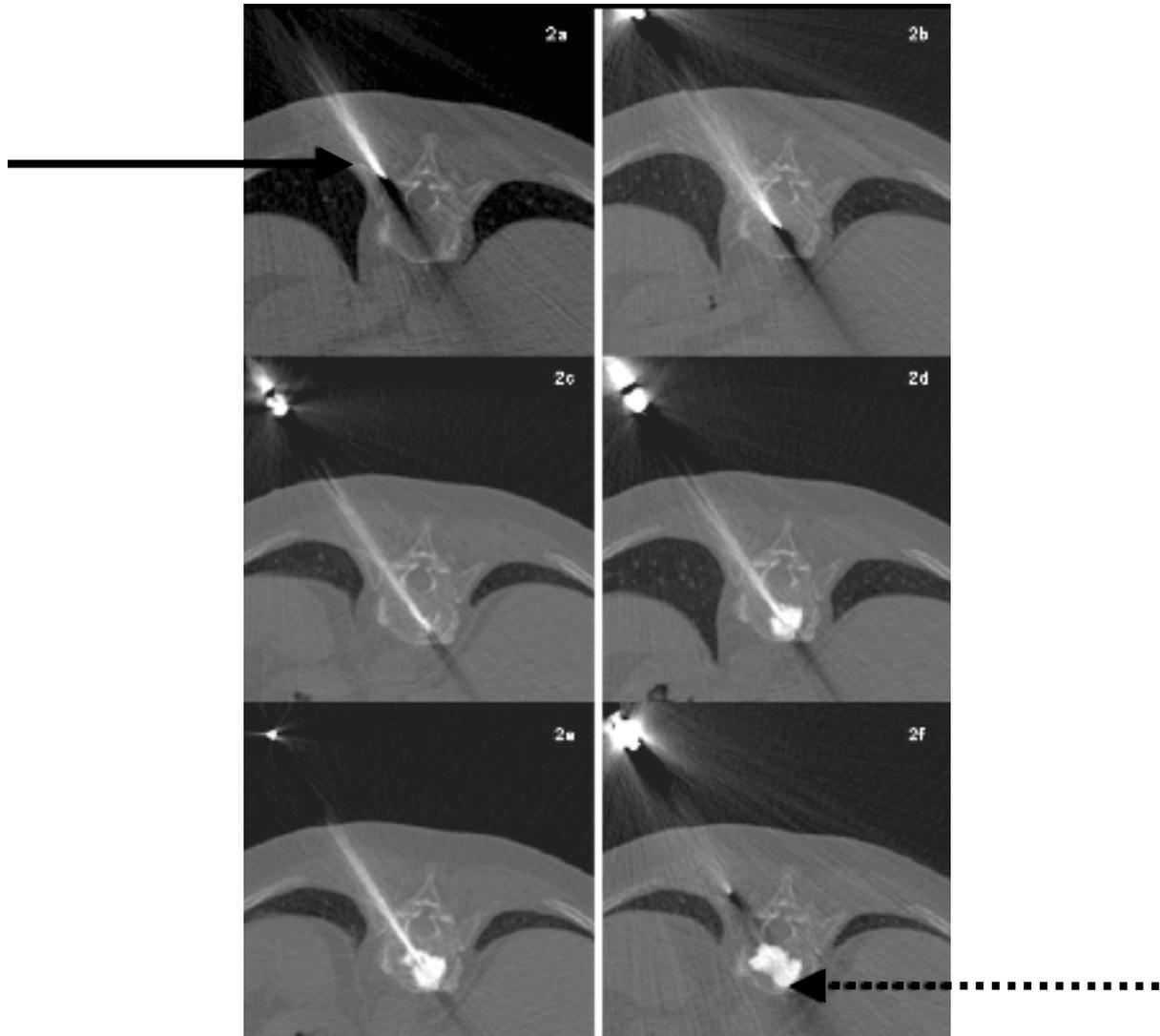
1.3 Operative Vorgehensweise bei der Vertebro- und Kyphoplastie

Eine Vertebroplastie kann entweder in lokaler oder Vollnarkose durchgeführt werden. Nach konventionell radiologischer oder computertomografischer Festlegung des Zugangsweges wird der Patient bei Eingriffen an der Brust- oder Lendenwirbelsäule in Bauchlage positioniert. An der Halswirbelsäule wird ein anterolateralen Zugang in Rückenlage des Patienten gewählt. Nach der Festlegung des Zugangsweges wird unter Operationsbedingungen und unter Durchleuchtung oder computertomografischer Kontrolle eine Vertebroplastie-Hohlnadel transpedikulär, kostovertebral oder transartikulär, ein- oder beidseitig, in den frakturierten Wirbelkörper eingebracht. Über dieses Instrument wird mit Hilfe eines speziellen Applikations-Systems bis zu 15ml Knochenzement mit Druckwerten bis maximal 30bar unter kontinuierlicher Durchleuchtungskontrolle in die Frakturzone eingespritzt. Aufgrund der stetigen radiologischen Kontrolle kann die Gefahr eines Zementaustrittes minimiert werden. Der in der Hohlnadel verbliebene Zement wird ebenfalls in die Frakturzone vorgeschoben, damit es nicht zu einer Ausbreitung entlang des Zugangsweges kommt. Im Anschluss an die Intervention wird eine konventionell radiologische oder computertomografische Kontrolle des Ergebnisses durchgeführt.

Ein zufriedenstellendes Ergebnis ist erreicht, wenn die vorderen 2/3 des Wirbelkörpers und mindestens 2/3 seiner gesamten Höhe ausgefüllt sind. Dies ist unter anderem abhängig von der eingespritzten Zementmenge (durchschnittlich 8ml¹³).

¹³ aus www.radiologie-lmu.de

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse



**Abbildung 7: Computertomografische Kontrolle während einer Vertebroplastie
(schwarzer Pfeil: Hohlneedle, gestrichelter Pfeil Knochenzement im Wirbelkörper)
(Bild aus www.radiologie-lmu.de)**

Bei der Kyphoplastie wird unter denselben äusseren Bedingungen wie oben bereits erwähnt über einen perkutanen transpedikulären Zugang unter Durchleuchtung eine Kyphoplastie-Nadel in den Frakturbereich eingebracht. Über diesen Zugang wird ein spezieller Ballon- oder Expanderkatheter

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse

eingeführt und anschliessend im Wirbelkörper aufgeblasen bzw. aufgespreizt. Der aus röntgendichtem Material bestehende Expander kann unter Durchleuchtung problemlos positioniert werden. Die korrekte Lage des Ballonkatheters wird durch das im Ballon befindliche Kontrastmittel ermöglicht. Beim Aufspreizen des Expanders oder durch das Aufblasen des Ballons und durch eine entsprechende Patienten-Lagerung in Hyperlordosierung entsteht ein bleibender Hohlraum im Wirbelkörper. Nach Entfernung des Expanders oder Ballons wird der Knochenzement ebenfalls mit Hilfe eines Applikationssystems mit einem konstanten Druck von bis zu 6bar in die präformierte Höhle eingebracht. Im Anschluss an die Intervention erfolgt ebenfalls eine radiologische bildgebende Kontrolle.



Abbildung 8: Kyphoplastie-Ballonkatheter (Bild aus www.kyphon.com)

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse

Tabelle 3: Vertebro- und Kyphoplastie im Kurzvergleich

	Vertebroplastie	Kyphoplastie
Technik/Material	- Hohlneedle - Zementapplikationssystem	- Hohlneedle - Expander-/Ballonkatheter - Zementapplikationssystem
Komplikationen	häufig Zementleckagen	seltener Zementleckagen
Applikationsdruck	hoch, bis 30bar	niedrig, bis 6bar
Kosten	300-2200 Euro	4500-5000 Euro

1.4 Indikationen/Kontraindikationen für Vertebro-/Kyphoplastie

Bei beiden Verfahren sollte die Indikationsstellung interdisziplinär zwischen Orthopäden, Radiologen, Chirurgen und Onkologen erfolgen.

Tabelle 4: Indikationen für eine Vertebro- oder Kyphoplastie

<ul style="list-style-type: none"> • frische traumatische Wirbelkörperfraktur (< 3 Monate alt)* <p>* bei einem Kyphosewinkel > 20°; bei thorakolumbalen oder lumbalen Lokalisation - eher als im mittleren oder oberen Thorakalbereich</p>
<ul style="list-style-type: none"> • primäre Wirbelkörper-tumoren (Multiples Myelom, Hämangiom)
<ul style="list-style-type: none"> • pathologische Wirbelkörperfraktur bei Metastasen
<ul style="list-style-type: none"> • schmerzhafte Brustwirbelkörper- und Lendenwirbelkörper-Fraktur (mit Keil-/Fischwirbelbildung)
<ul style="list-style-type: none"> • chronische schmerzhafte Sinterungsfraktur bei Osteoporose

Frakturen, die älter als drei Monate alt sind, zeigen meistens schon eine Konsolidation und eignen sich deshalb nicht mehr für eine Vertebro- oder Kyphoplastik.

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse

Im Zweifelsfall kann eine Magnetresonanztomografie (MRT) über das Frakturalter und den Frakturzustand Aufschluss geben. Das Vorliegen eines Knochenmarködems weist auf eine frische Fraktur hin. Die STIR-Sequenz (short tau recovery inversion) des MRTs ist die sensibelste Sequenz zur Feststellung akuter Frakturen (Knochenmarksödem zeigt sich als verstärkt helles Signal, Fett/Mark wird supprimiert).

Mit dem MRT lassen sich auch Frakturen nachweisen, welche konventionell radiologisch nicht identifiziert wurden (okkulte Frakturen).

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse

Tabelle 5: Voraussetzungen für eine Vertebro- oder Kyphoplastie

• Interdisziplinäre Indikationsstellung
• Operations- und Narkosefähigkeit
• normale Gerinnung (keine gerinnungshemmenden Substanzen)
• neurologischer Ausschluss einer radikulären Symptomatik (ohne Wirbelfraktur) bei Schmerzausstrahlung
• aktuelle Röntgenbilder der betroffenen Wirbelkörper
• Magnetresonanztomografie (MRT) oder Computertomografie (CT) der betroffenen Wirbelsäulenabschnitte

Tabelle 6: Kontraindikationen für eine Vertebro- und Kyphoplastie

• Fragmentverschiebungen in den Spinalkanal
• Internistische Faktoren zum Beispiel Infekte, Gerinnungshemmung oder -störung
• Keine Operations- und Narkosefähigkeit
• Symptome eines Bandscheibenvorfalles
• Vertebra plana

1.5 Komplikationen und Fehlerquellen

Die minimal-invasiven Verfahren Vertebro- und Kyphoplastie sind insgesamt sehr sicher. Komplikationen treten bei beiden Verfahren je nach Ursache der Fraktur mit einer Häufigkeit von < 2% bei osteoporotischen Frakturen und bis zu 10% bei Karzinom-bedingten Frakturen auf¹⁴. Die Review-Studie von Lee et al.¹⁵ zeigt sehr geringe Komplikationsraten von 0.9% (pro behandeltem Wirbelkörper) bei der Kyphoplastie und 0.3% (pro behandeltem Wirbelkörper) für die Vertebroplastie. Es kann zwischen allgemeinen Komplikationen und Komplikationen, die durch eine Zementleckage bedingt sind, unterschieden werden.

Mögliche allgemeine Komplikationen umfassen Blutungen, Infektionen, Rippenfrakturen und Pneumothoraces. Allergische Reaktionen auf den eingespritzten Zement sind sehr selten und aufgrund der geringen Zementmenge deutlich seltener, als bei anderen orthopädischen Eingriffen. Im postoperativen Verlauf kommt es nicht selten zu Frakturen der benachbarten Wirbelkörper. Uppin et al.¹⁶ sahen in ihrer Studie 12.4% Anschlussfrakturen in einem Zeitraum von zwei Jahren nach einer Vertebroplastie.

Die meisten Komplikationen sind jedoch direkt auf eine Zementleckage während des Injektionsvorganges zurückzuführen. Bei der Vertebroplastie kommt es wahrscheinlich aufgrund des höheren Zement-Einspritzdruckes und

¹⁴ Wade Wong, D.O., F.A.C.R. and John M. Mathis, M.D. Vertebroplasty and kyphoplasty: techniques for avoiding complications and pitfalls. Neurosurg Focus 18 (3): E2, 2005.

¹⁵ Lee M, Cahill P, Dumonski M, Stanley T, Park D, Singh K. A comparison of complications from Vertebroplasty and Kyphoplasty: a meta-analysis of 124 studies. The Spine Journal 2007;7 (5):19S.

¹⁶ Uppin AA, Hirsch JA, Centenera LV, Pfiefer BA, Pazianos AG, Choi IS. Occurrence of new vertebral body fracture after percutaneous vertebroplasty in patients with osteoporosis. Radiology 2003;226:119-24.

des meist weniger viskösen Zementes häufiger zur einer Leckage als bei der Kyphoplastie, wo Zement in eine präformierte Höhle eingespritzt wird. Die präformierte Höhle kann zudem mit wenig Zement an den Rändern verstärkt werden (sogenannte Egg-Shell-Technik), so dass beim anschließenden Injektionsvorgang noch weniger Leckagen auftreten können. Zement kann in die epiduralen und prävertebralen Venen austreten. Ein Austritt in den Epiduralraum kann zu einer konsekutiven Einengung des Spinalkanals mit neurologischen Ausfällen führen. Bei einer Leckage in die Neuroforamina kann eine radikuläre Symptomatik auftreten. In Einzelfällen führt der in die Venen ausgetretene Zement durch eine Verschleppung zu einer Lungenembolie; diese bleiben jedoch in den meisten Fällen klinisch unauffällig.

Eine Verschleppung des Zements entlang des Zugangsweges ist bei ungenügender Entleerung der Vertebro- oder Kyphoplastienadel vor ihrer Entfernung möglich.

Zementleckagen sind häufig, bleiben jedoch in den meisten Fällen asymptomatisch und müssen nicht zwangsläufig eine spätere Komplikation oder Beschwerden bedingen (siehe auch 4.3).

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse

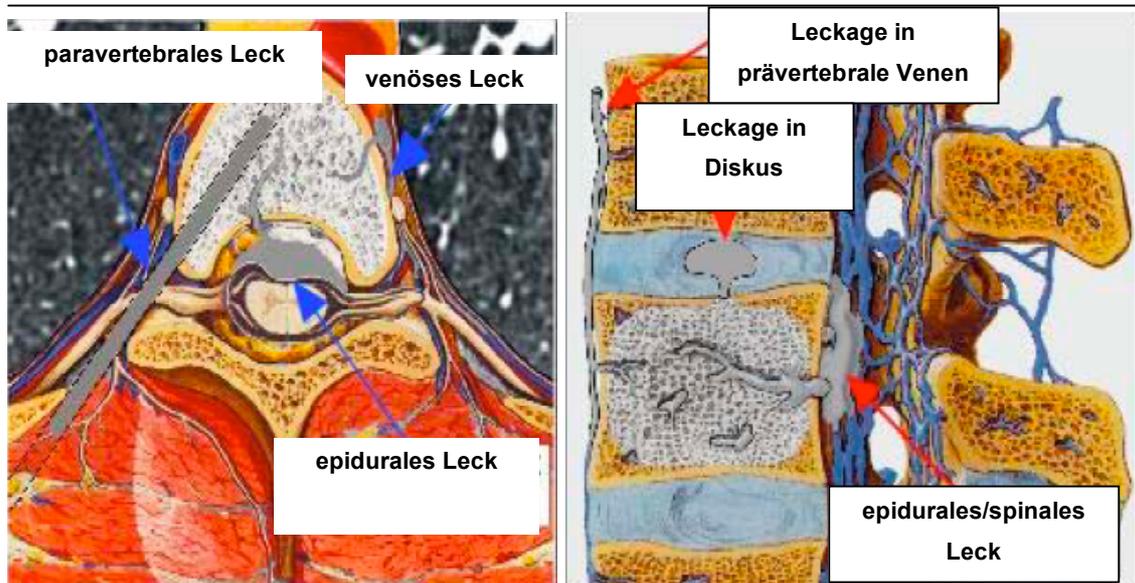


Abbildung 9: Mögliche Zementaustrittsorte (aus www.brustkrebstage-mannheim.de)

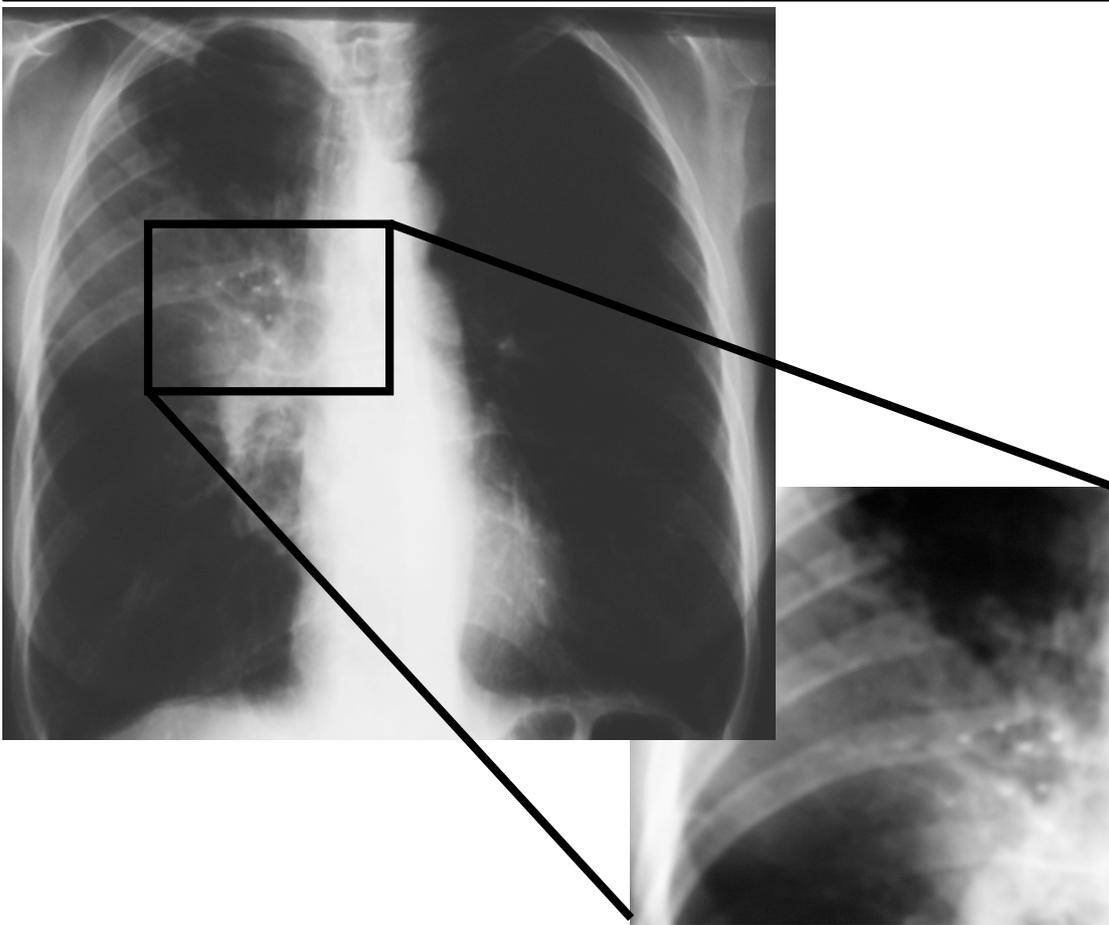


Abbildung 10: Radiologischer Nachweis von Zementembolien in der Lunge (Beck, 2007)

1.6 Verschiedene Zementarten^{17 18}

Bei der Vertebro- und Kyphoplastie wurden bisher hauptsächlich PMMA-Zemente (Polymethylmethacrylat) verwendet, wie sie in ähnlicher Weise bereits bei der Hüft- oder Knieendoprothetik zum Einsatz kommen.

¹⁷ Becker S., Ogon M. Ballonkyphoplastie, Kapitel 11 (Bohner M.). Springer Wien New York 2005.

¹⁸ Da Fonseca K. et al. Kyphoplastie mit "Biozement". J Miner Stoffwechs 2004;11 (Suppl 1): 16-19.

PMMA-Zement besteht aus mehreren Komponenten:

- Einem MMA-Monomer, welches in einer exothermen Reaktion zu PMMA polymerisiert.
- Einem Copolymer, welches als Füllmaterial dient. Dieses reduziert zusätzlich den bei der Polymerisation entstehenden Temperaturanstieg
- Einem Röntgenkontrastmittel
- Zusätze, welche die Polymerisation auslösen
- Weitere Zusatzstoffe (Stabilisatoren, Radikalfänger, Färbemittel)

PMMA-Zement hat den Nachteil, dass er in einer exothermen Reaktion unter grosser Hitzeentwicklung (bis 90°C.) aushärtet und dadurch das umliegende Gewebe, bei einem allfälligen Zementaustritt, schädigen kann. Weiter besteht der Nachteil der fehlenden Resorbierbarkeit des PMMA-Zementes; Operationen sind damit meist irreversibel, da sich einmal eingebrachter PMMA-Zement nur mit großen Substanzverlusten des Knochens wieder entfernen lässt. Der PMMA-Zement zeigt keine ossäre Integration, was die Möglichkeit der Zementlockerung begünstigt.

Kalziumphosphatzemente stellen eine Alternative zu den PMMA-Zementen dar. Sie härten ohne Temperaturentwicklung aus und zeigen eine gute Biokompatibilität. Weiterhin können sie prinzipiell resorbiert werden. Als Nachteil dieses Materials ist zu nennen, dass es spröde ist und dadurch bestimmten mechanischen Belastungen (Scher- und Zugkräfte) schlechter als PMMA-Zement standhalten kann.

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse

Tabelle 7: Vergleich zwischen PMMA- und Kalziumphosphatzement

	PMMA-Zement	Kalziumphosphat-Zement
Temperaturwechsel	gross (exotherm)	klein
Knochen-Zement-Kontakt	begrenzt	gut
Hydrophilie	hydrophob	hydrophil
Porosität	beinahe 0%	40-60%
Resorption	nein	begrenzt

1.7 Alternative Behandlungsverfahren für Wirbelkörperfrakturen

Alternativ zur Vertebro- und Kyphoplastie existieren andere invasivere Methoden zur Behandlung von Wirbelkörperfrakturen, seien diese osteoporotischer, traumatischer oder metastatischer Genese.

Tabelle 8: Konservative und operative Verfahren zur Behandlung einer Wirbelkörperfraktur

Konservativ	Operativ
<ul style="list-style-type: none"> Analgesie bei Fraktur mit zum Beispiel Morphin-Präparaten 	<ul style="list-style-type: none"> Dorsale Aufrichtungsspondylodese mit Fixateur interne
<ul style="list-style-type: none"> Behandlung der Knochende-mineralisation mit Bisphosphonaten und Kalzium / Vitamin D3 	
<ul style="list-style-type: none"> Strahlentherapie bei metastatisch bedingten Frakturen 	
<ul style="list-style-type: none"> 3-Punkte-Korsett, Lendenmieder 	

1.8 Fragestellung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war, die Zementaustrittsrate in Abhängigkeit von der Zementtemperatur bei den beiden wirbelkörperstabilisierenden Verfahren Vertebro- und Kyphoplastie experimentell miteinander zu vergleichen. Die Resultate werden mit klinischen Resultaten, wie sie in der Literatur vorkommen, verglichen.

2 Material und Methoden

Die in dieser Arbeit beschriebenen Versuche wurden in der radiologischen Abteilung des Klinikums Konstanz durchgeführt.

2.1 Präparate

Für die Versuchsreihe wurden insgesamt 20 Rinder-Wirbelkörperpräparate (mit jeweils mehreren Wirbelkörpern pro Präparat) und 6 menschliche Mazerationspräparate (aus dem Institut für Osteologie des Landesdenkmalamtes Konstanz) verwendet.



Abbildung 11: Menschliches Mazerationspräparat (Foto Heisenberg/Beck, 2007)

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse



Abbildung 12: Rinder-Wirbelkörper (Foto Heisenberg/Beck, 2007)

2.2 Material

Material für Vertebroplastie:

- Polymethylmethacrylate-Zement (PMMA) (Vertebroplastic™ der Firma DePuy AcroMed)
- Vertebroplastienadel der Firma OptiMed
- PCD™ Zementapplikations-Systems der Firma Stryker
- Bariumsulfat-Suspension

Material für Kyphoplastie:

- Polymethylmethacrylate-Zement (PMMA) (Vertebroplastic™ der Firma DePuy AcroMed)
- Kyphoplastienadel der Firma Stryker
- Xvoid™ Expander der Firma Stryker
- PCD™ Zementapplikations-Systems der Firma Stryker
- Bariumsulfat-Suspension

Eigenschaften von PMMA (aus www.wikipedia.org):

- Brechzahl: 1,492 (zum Vergleich: 1,45–1,9 beim Mineralglas)
- elastisch und schlagfest
- Reißfestigkeit: 70 N/mm
- gute spanabhebende Bearbeitung möglich
- ab 100 °C leicht verformbar. Bei Abkühlung in Wasser bleibt diese Form erhalten
- Verbindungen durch Kleben oder Schweißen möglich
- lässt sich sehr gut mit CO₂-Lasern schneiden oder gravieren
- transmittiert Licht besser als normales Glas
- witterungs- und alterungsbeständig
- beständig gegen Säuren und Laugen mittlerer Konzentration.

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse

- beständig gegen Benzin und Öl
- Alkohol, Aceton und Benzol greifen PMMA an, es kommt zur Craquelée-Bildung
- lässt je nach Typ ultraviolettes Licht und Röntgenstrahlen durch, hält aber Infrarotstrahlung zurück. Wird deshalb auch für Gewächshäuser und in der Röntgenstrahlolithographie verwendet.



Abbildung 13: Knochenzement zum Anrühren der Firma DePuy AcroMed
(Heisenberg/Beck, 2007)

2.3 Versuche

An insgesamt 78 Wirbelkörpern (Rinder-Wirbelkörper und Mazerationpräparate) wurde eine Vertebroplastie durchgeführt; jeweils 26 Wirbelkörper mit Zementtemperaturen von 40°C, 55°C und > 60°C mit 8-10bar Zementinjektionsdruck.

Bei 12 Wirbelkörpern wurde eine Kyphoplastie durchgeführt; jeweils 4 Wirbelkörper mit Zementtemperaturen von 40°C, 55°C und > 60°C mit 6bar Zementinjektionsdruck.

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse

In der Kontrollgruppe mit einer Bariumsulfat-Suspension als Injektionslösung wurden jeweils 26 Wirbelkörper mit einer Vertebro- und Kyphoplastie behandelt. Alle Versuche wurden bei Raumtemperatur ($\approx 20^{\circ}\text{C}$) durchgeführt.

Die Zement-Injektion, jeweils ca. 10ml, erfolgte transpedikulär einseitig. Im Anschluss wurden die Präparate konventionell radiologisch und teilweise computertomografisch abgebildet.

2.4 Zugangsweg

Das Arbeitsinstrument wird transpedikulär einseitig (siehe folgende Bilder / Schemata) in den Wirbelkörper eingebracht.

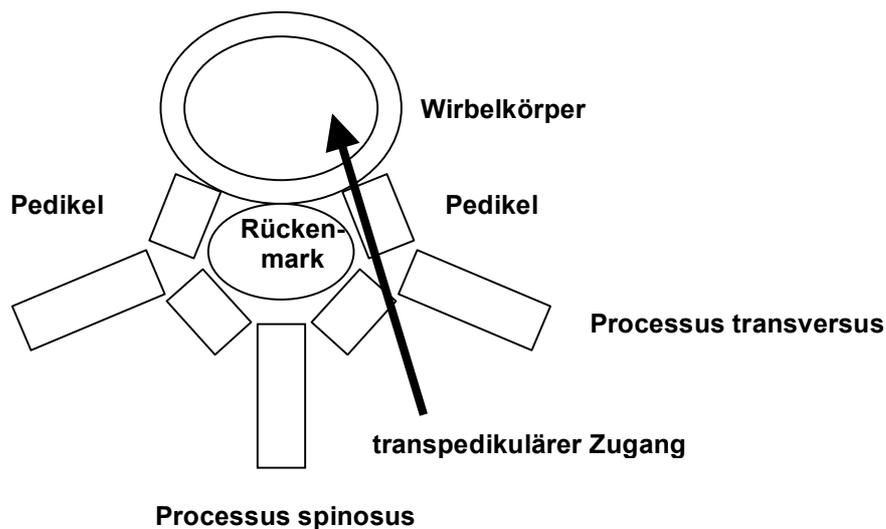


Abbildung 14: Schematische Darstellung des transpedikulären Zuganges zum Wirbelkörper (Heisenberg, 2007)



Abbildung 15: Transpedikulärer Zugangsweg (links: Wirbel von oben; rechts: Wirbel von der Seite) (Bilder von www.opti-med.de)

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse

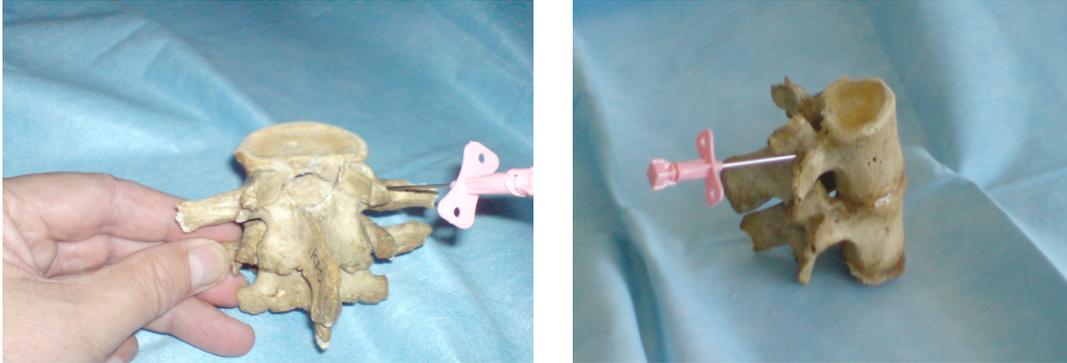


Abbildung 16: Transpedikulärer Zugang am Knochenmodell aus verschiedenen Perspektiven (Heisenberg/Beck, 2007)

2.5 Arbeitsablauf

Vertebroplastie:



Transpedikuläres Einbringen der (atraumatischen) Vertebroplastienadel mit Rotationsbewegungen unter Durchleuchtung



Weiteres Vorantreiben der Nadel mit einem Hammer



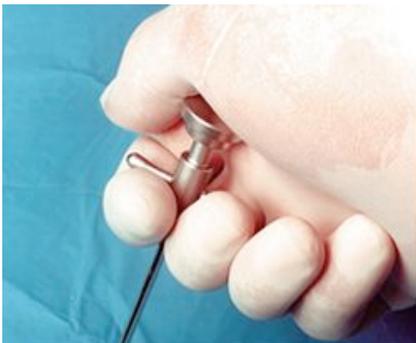
Mischen der verschiedenen Zementkomponenten



Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse



Zementinjektion durch die Hohlneedle mittels Schraubappikator. Komplette Entleerung der Nadel.



Entfernung der Nadel

(alle Bilder aus www.opti-med.de)

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse

Kyphoplastie:

Das Vorgehen bei der Kyphoplastie entsprach dem der Vertebroplastie mit dem Unterschied, dass vor der Zementapplikation ein Expanderkatheter vorgeschoben und anschliessend aufgespreizt wurde.

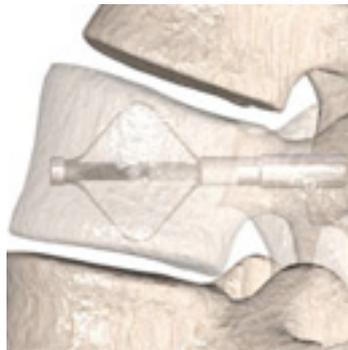
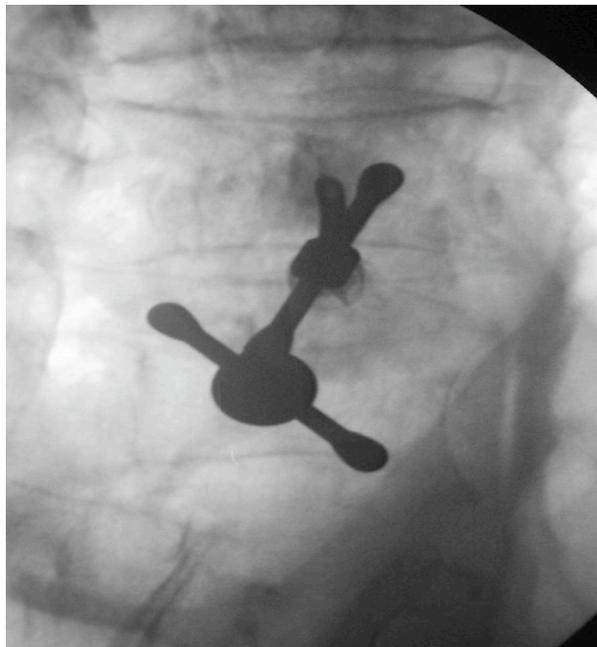


Abbildung 17: Xvoid™-Expanderkatheter (aus www.stryker.com)



**Abbildung 18: Durchleuchtungsbild nach transpedikulärer Kanülierung
(Heisenberg/Beck, 2007)**

3 Ergebnisse

3.1 Zementaustritt in Zahlen

Versuche:

	Vertebroplastie			Gesamt
Temperatur	40°C.	55°C.	>60°C.	
Wirbelkörper	26	26	26	78
Total				
Zementaustritt	4 (≈15%)	9 (≈35%)	16 (≈62%)	29 (≈37%)

	Kyphoplastie			Gesamt
Temperatur	40°C.	55°C.	>60°C.	
Wirbelkörper	4	4	4	12
Total				
Zementaustritt	0 (0%)	1 (25%)	1 (25%)	2 (≈17%)

Bariumsulfat-Kontrollgruppe:

	Vertebroplastie	Kyphoplastie
Wirbelkörper	26	26
Total		
Bariumaustritt	23 (≈90%)	20 (≈77%)

In den Versuchen kam es bei 29 von insgesamt 78 Vertebroplastien zu einem Zementaustritt. Dies entspricht ungefähr 37%. Bei den 12 Kyphoplastien kam es zu 2 Austritten (Austritte optisch oder radiologisch nachgewiesen). Das sind ungefähr 17%. Die Kontrolle mit Bariumsulfat zeigte bei der Vertebroplastie eine Austrittsrate von ungefähr 90%, dies entspricht 23 von 26 Wirbelkörpern. Bei 26

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse

Kyphoplastien mit Bariumsulfat kam es zu 20 Austritten, was ca. 77% entspricht.

3.2 Zementaustrittsort

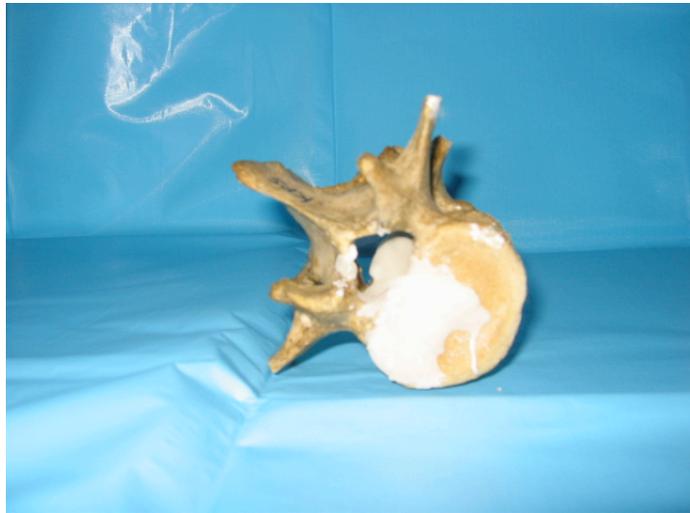
Der Zement trat mit folgenden Häufigkeiten in die jeweiligen Regionen aus (Mehrfachaustritt möglich):

Austrittsregion	Häufigkeit (%)
Bandscheibe	80
Prävertebraler Raum	30
Spinalkanal	25

Die Zahlen gelten für die Vertebro- und die Kyphoplastie.

3.3 Bildergalerie

3.3.1 Makroskopische Resultate



**Abbildung 19: Wirbelkörper nach Vertebroplastie mit Zementaustritt in den Spinalkanal
(Foto Heisenberg/Beck, 2007)**

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse

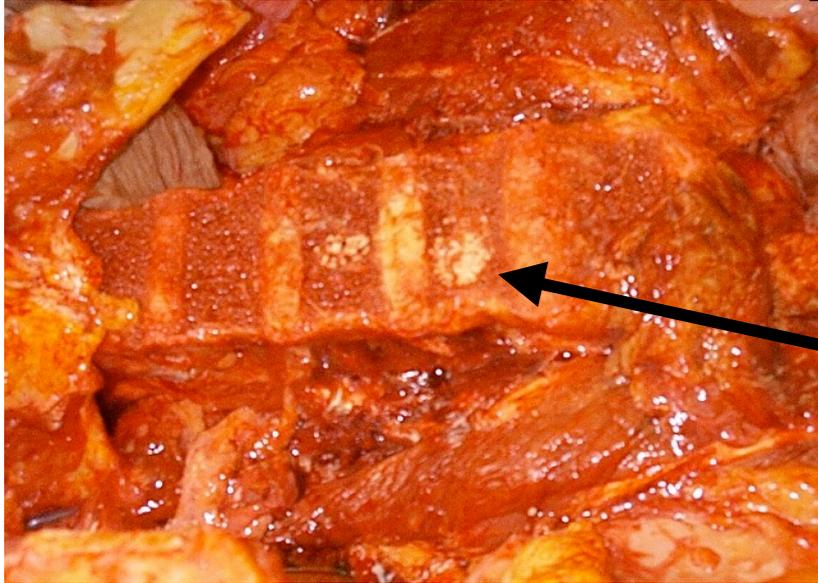


Abbildung 20: Präparat mit Zementaustritt (Pfeil)
(Foto Heisenberg/Beck, 2007)

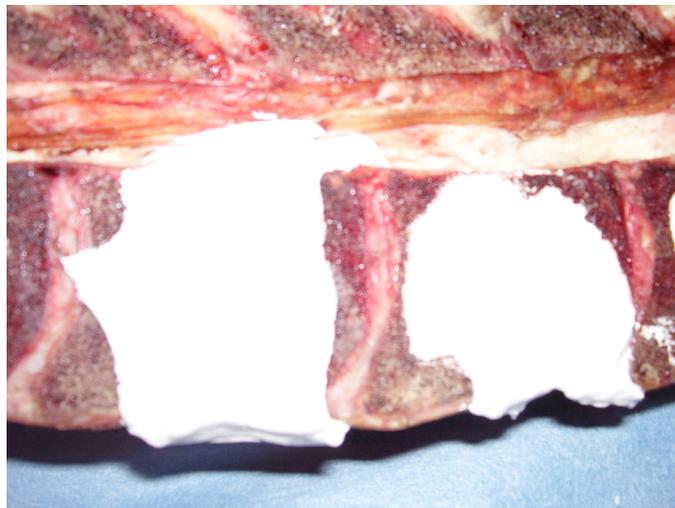


Abbildung 21: Mazerationspräparat nach Zementapplikation auf zwei Höhen (links mit Zementaustritt in den Spinalkanal, rechts ohne Austritt) (Foto Heisenberg/Beck, 2007)

3.3.2 Konventionell radiologische Resultate

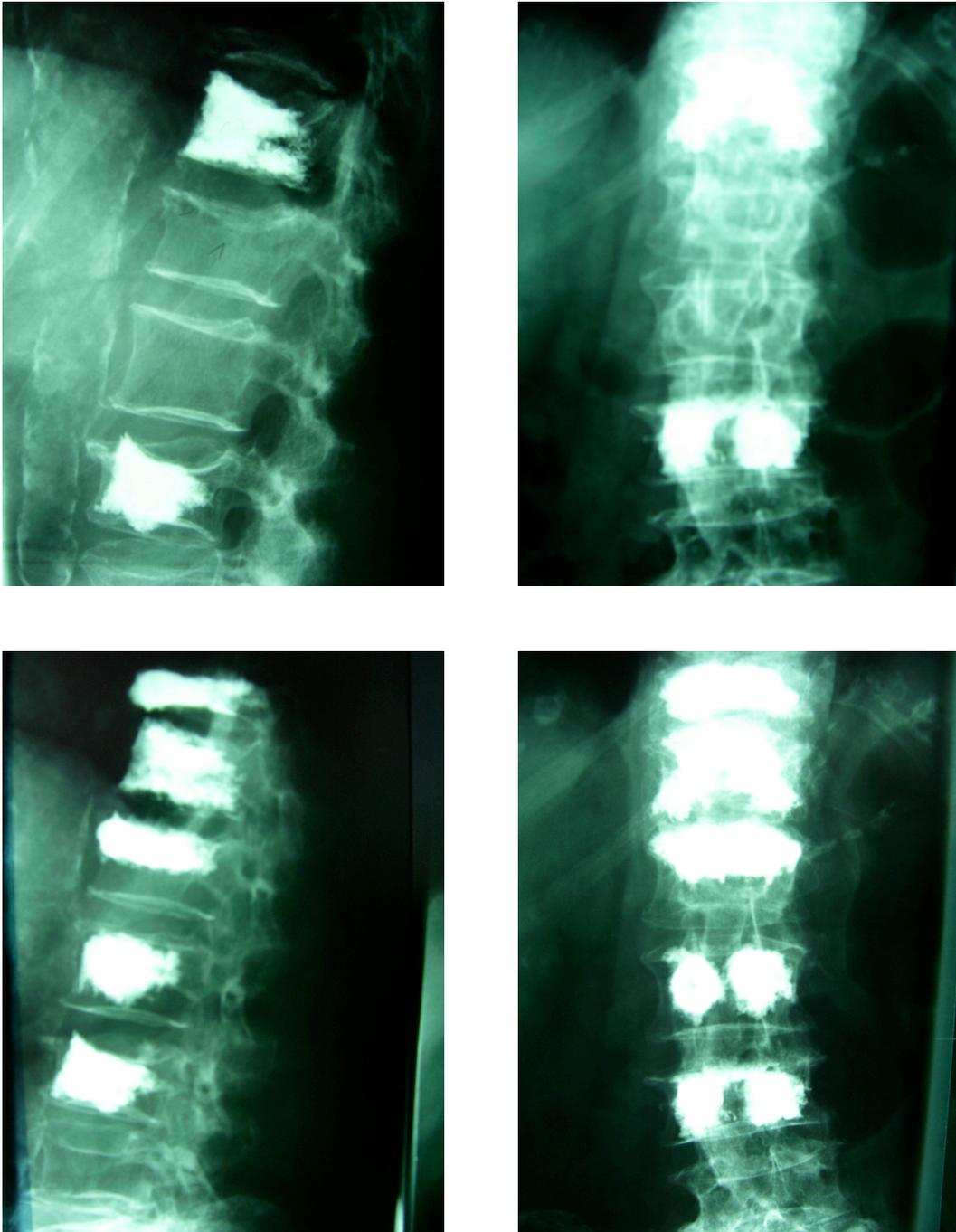


Abbildung 22: Postinterventionelle Röntgenbilder seitlich (links) und von vorne (rechts) auf mehreren Etagen ohne Zementaustritt (Heisenberg/Beck, 2007)

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse



Abbildung 23: Transpedikuläre Injektion von Zement in den Wirbelkörper unter Bildwandler-Kontrolle mit ungleichmässiger Zement-Verteilung im Wirbelkörper jedoch ohne Austritt (Heisenberg/Beck, 2007)

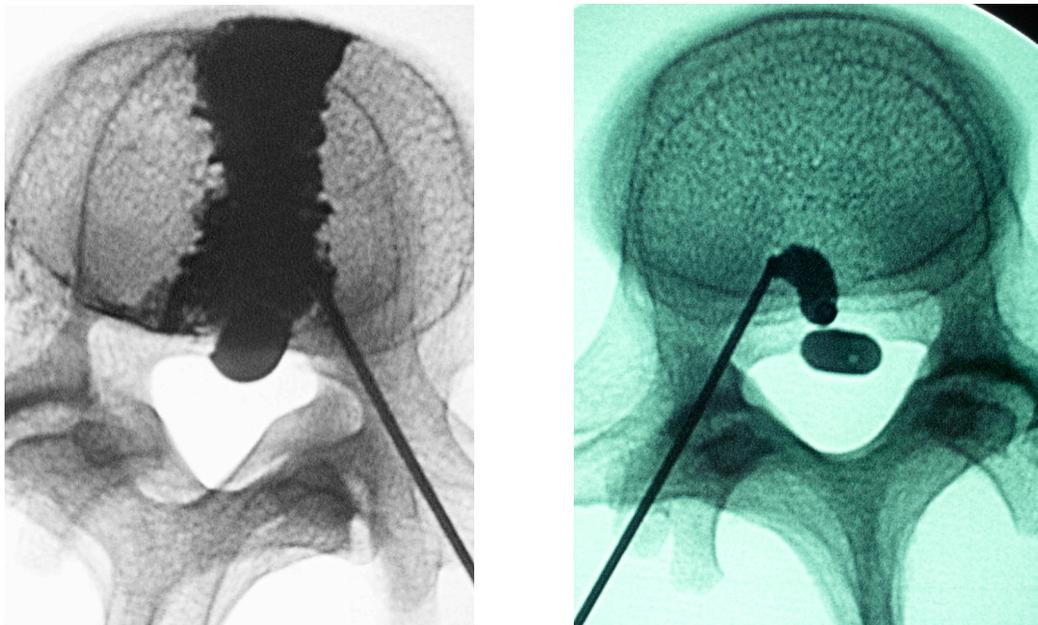
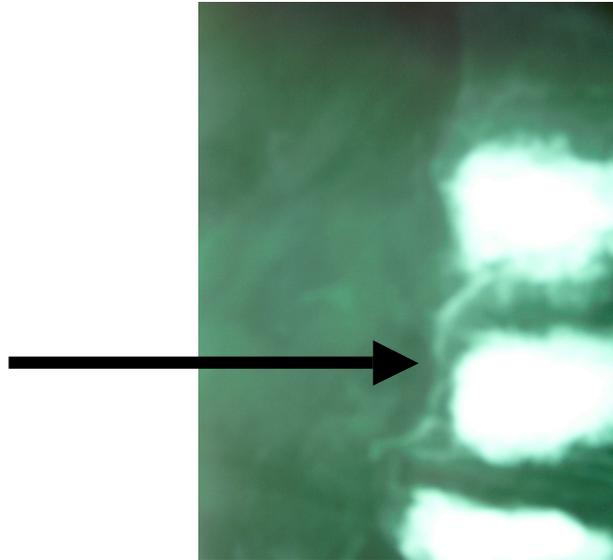


Abbildung 24: Radiologischer Nachweis von Zementaustritt in den Spinalkanal (Heisenberg/Beck, 2007)

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse



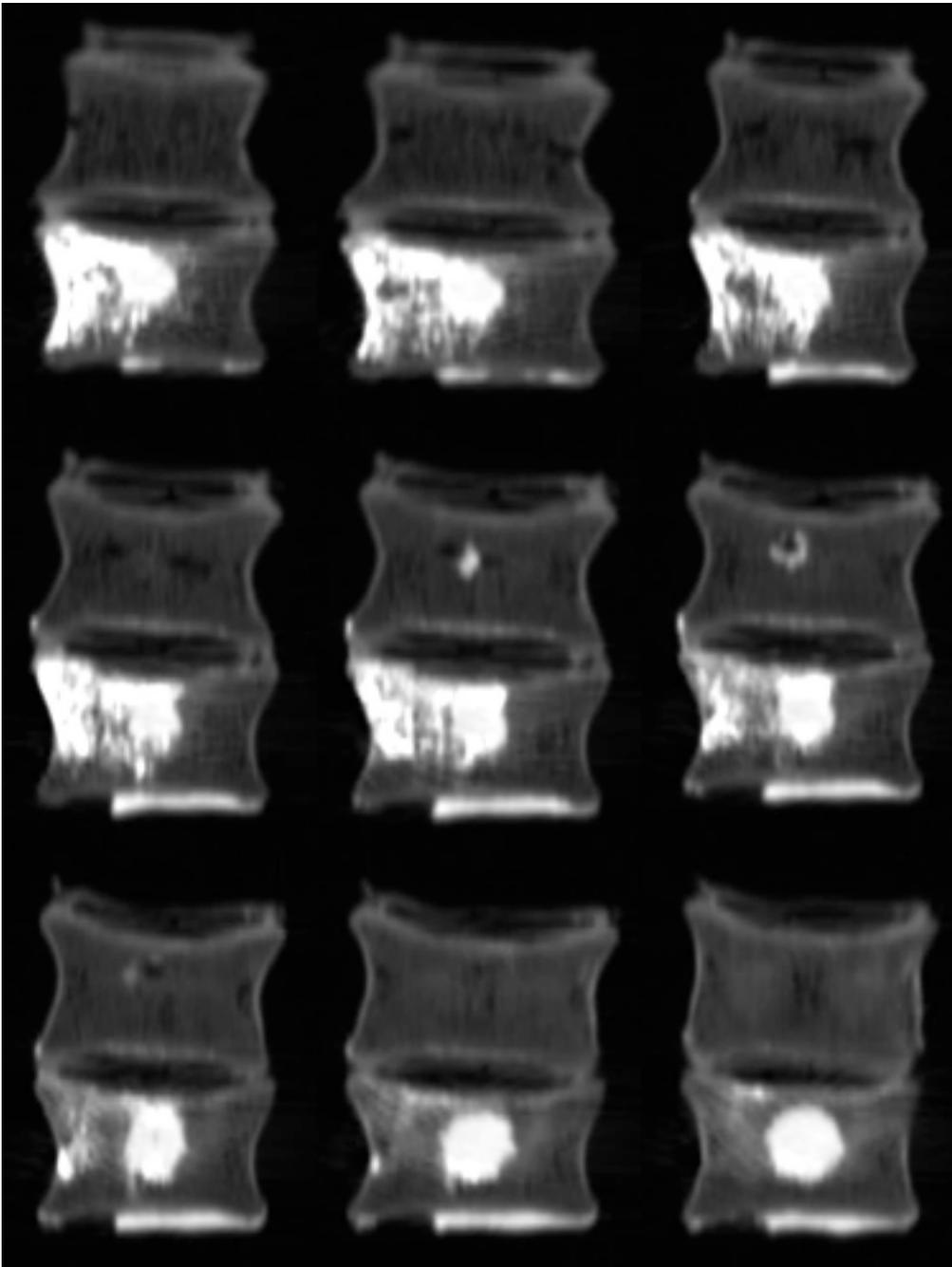
**Abbildung 25: Radiologischer Nachweis von Zement im prävertebralen Venensystem
(Pfeil) (Heisenberg/Beck, 2007)**

3.3.3 Computertomografische Resultate



Abbildung 26: Koronare Rekonstruktion eines Lendenwirbelsäulen-
Computertomogrammes nach Vertebroplastie (Bild 1-6) (Heisenberg/Beck, 2007)

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse



**Abbildung 27: Koronare Rekonstruktion eines Lendenwirbelsäulen-
Computertomogrammes nach Vertebroplastie (Bild 7-15) (Heisenberg/Beck, 2007)**

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse

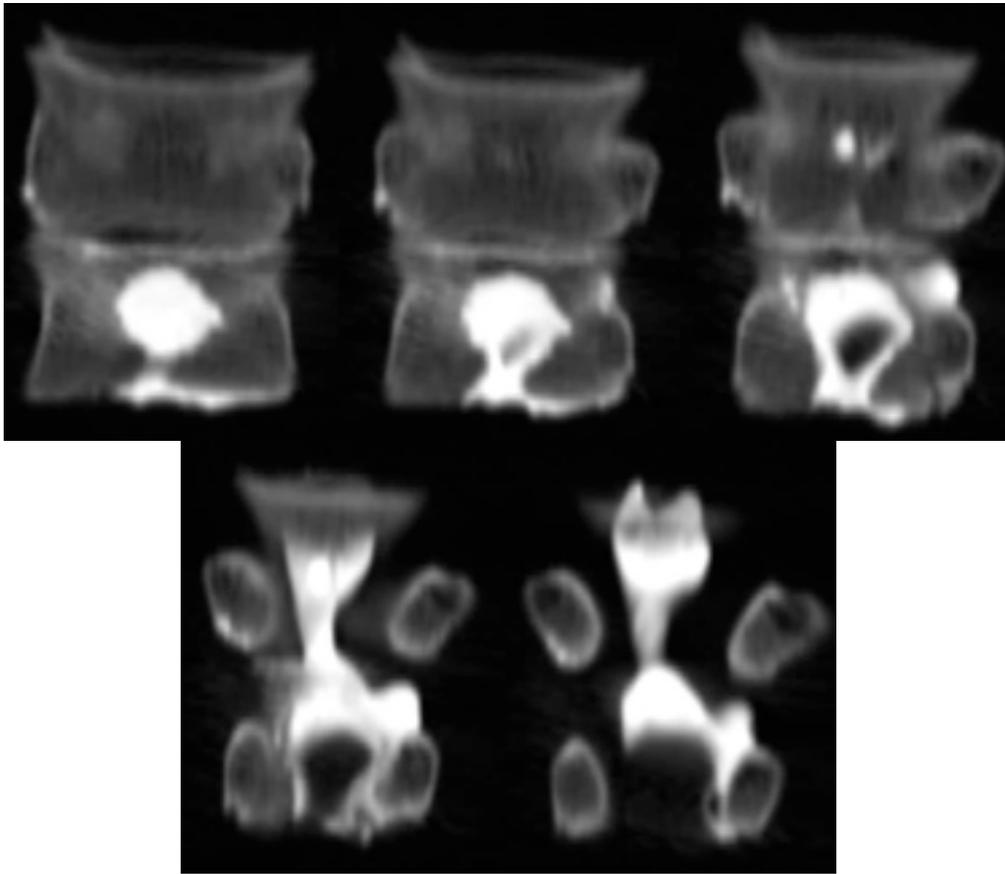


Abbildung 28: Koronare Rekonstruktion eines Lendenwirbelsäulen-Computertomogramms nach Vertebroplastie (Bild 16-20) mit Nachweis von Zementaustritt in den Spinalkanal (Bild 19 und 20) (Heisenberg/Beck, 2007)

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse

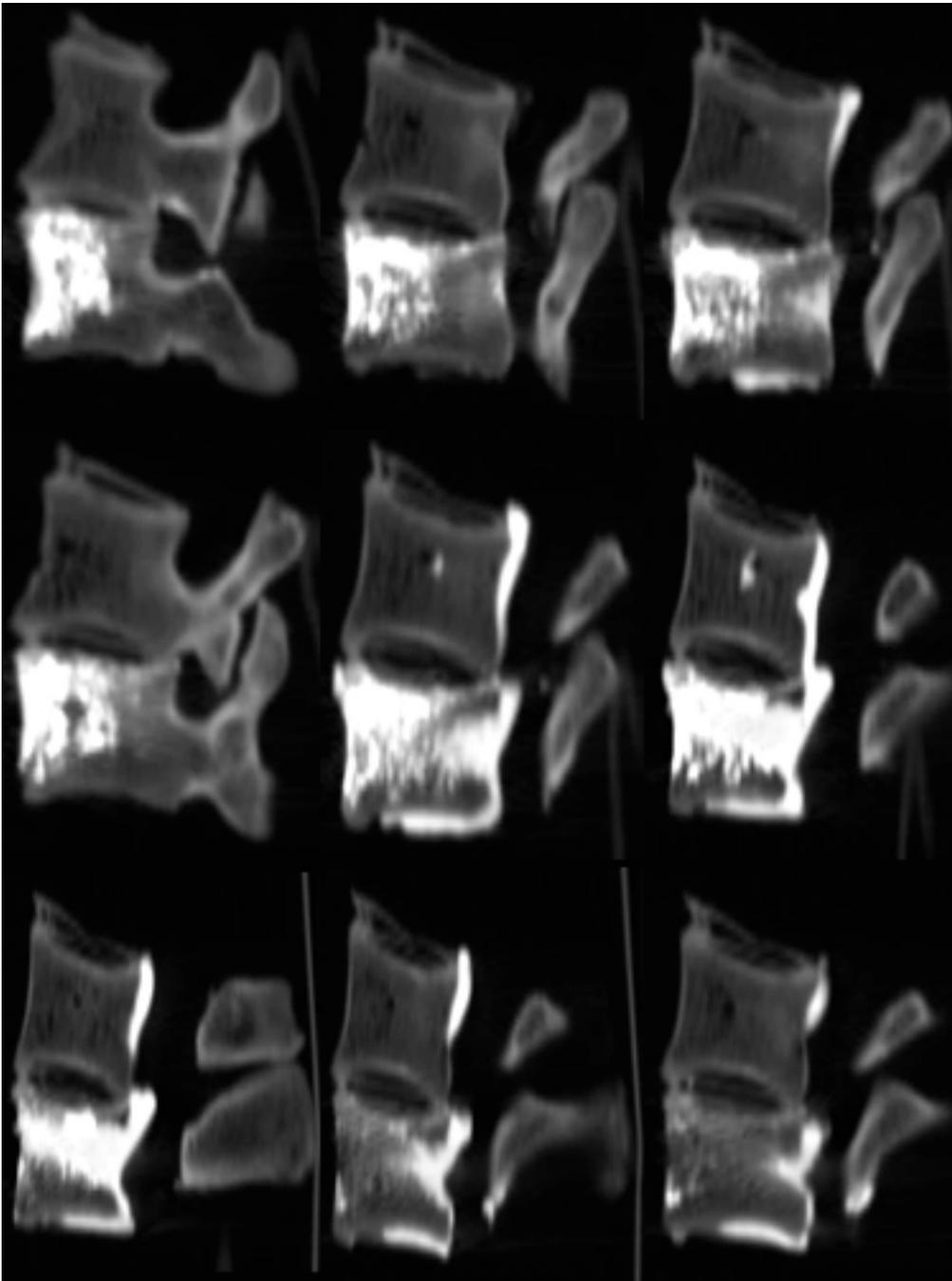


Abbildung 29: Sagittal rekonstruiertes Computertomogramm einer Lendenwirbelsäule nach Kyphoplastie (Bild 1-9) mit Nachweis eines Zementaustrittes in den Spinalkanal (Bild 3, 5-9) (Heisenberg/Beck, 2007)

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse

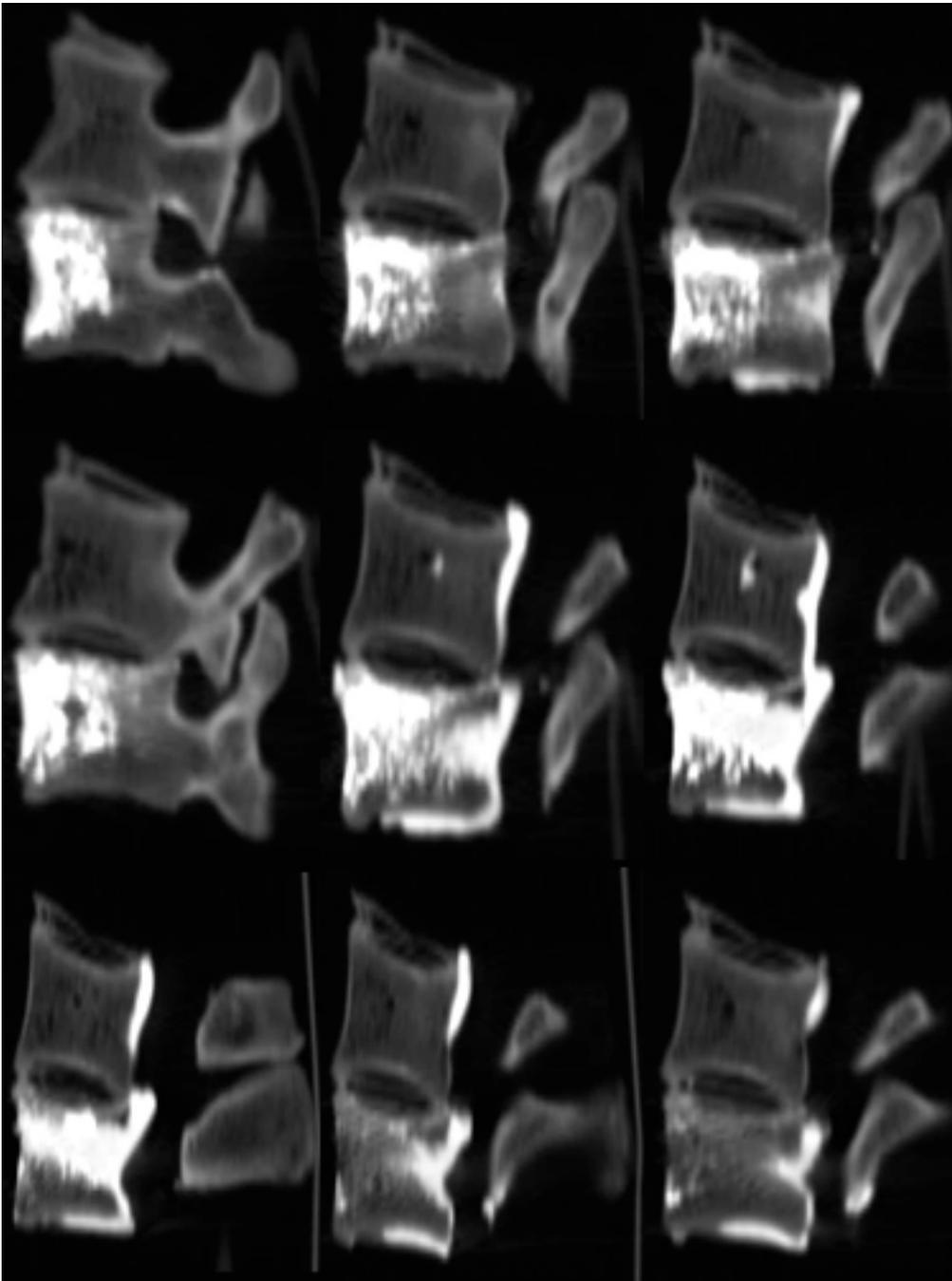


Abbildung 30: Sagittal rekonstruiertes Computertomogramm einer Lendenwirbelsäule nach Kyphoplastie (Bild 10-18) mit Nachweis eines Zementaustrittes in den Spinalkanal (Bild 11, 14-18) (Heisenberg/Beck, 2007)

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse

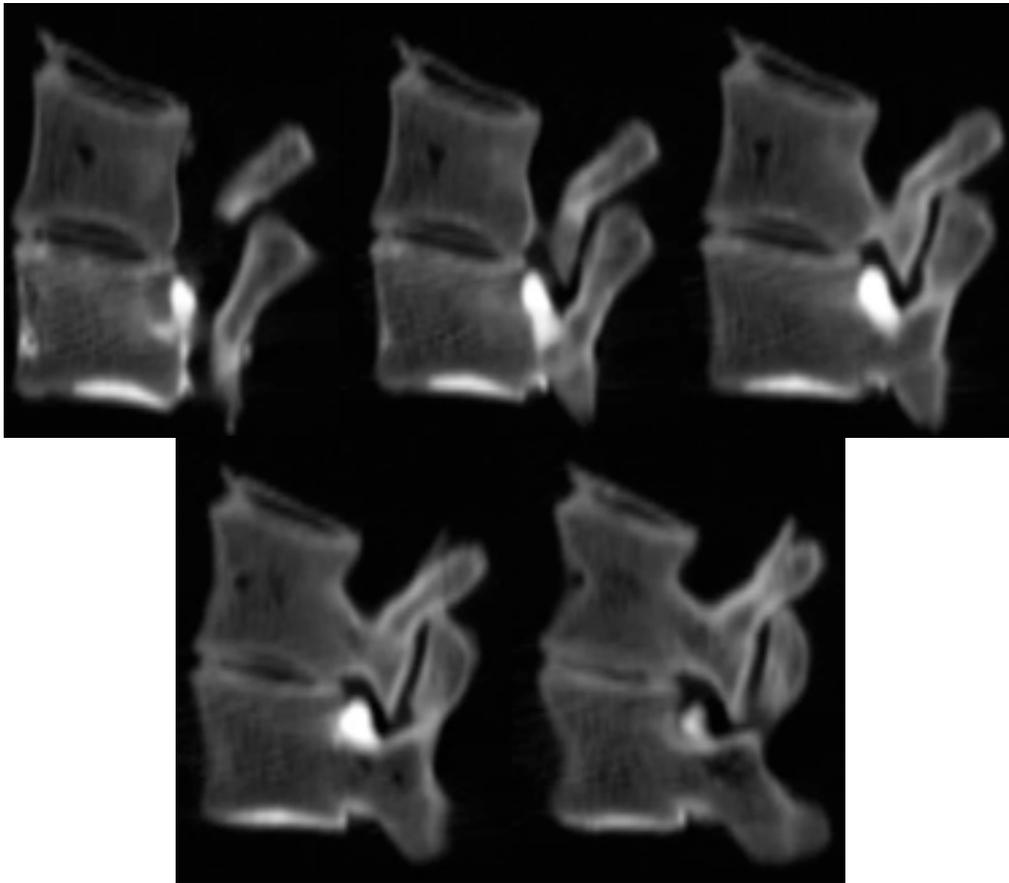


Abbildung 31: Sagittal rekonstruiertes Computertomogramm der Lendenwirbelsäule nach Kyphoplastie (Bild 19-23) mit Nachweis eines Zementaustrittes in den Spinalkanal (alle Bilder) (Heisenberg/Beck, 2007)

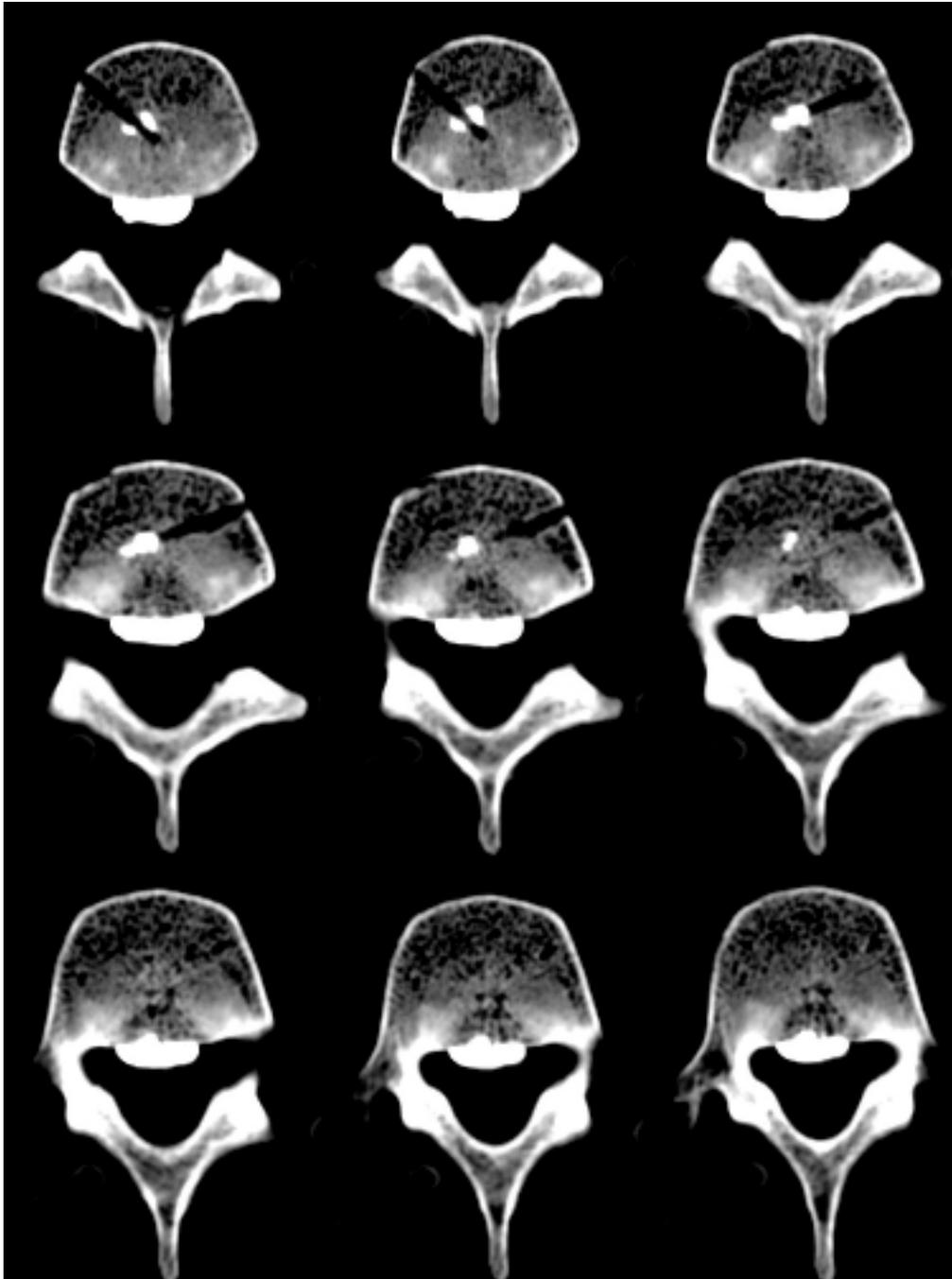


Abbildung 32: Computertomogramm einer Lendenwirbelsäule nach Vertebroplastie (Bild 1-9) mit Nachweis von Zementaustritt in den Spinalkanal (alle Bilder) (Heisenberg/Beck, 2007)

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse

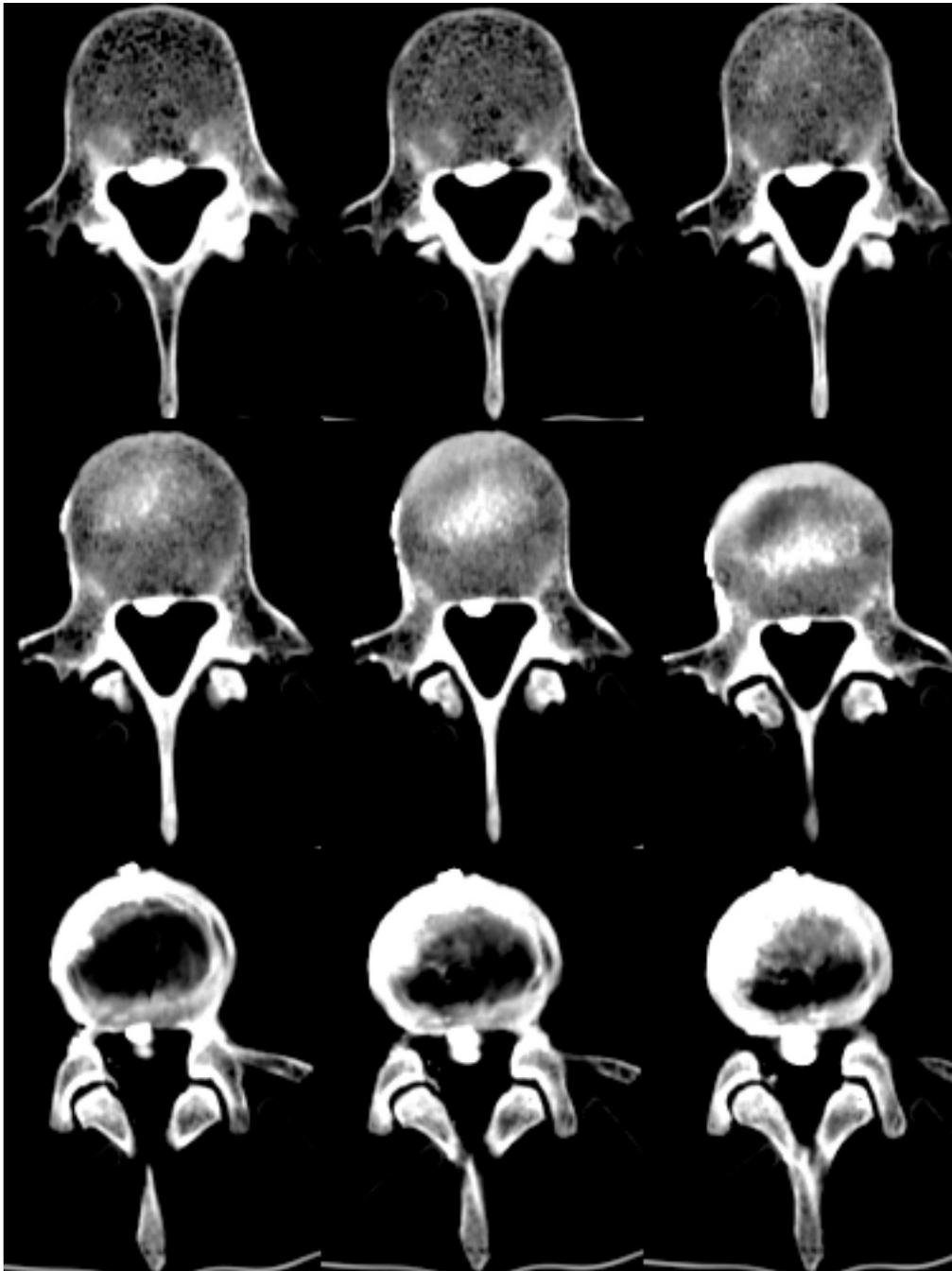


Abbildung 33: Computertomogramm einer Lendenwirbelsäule nach Vertebroplastie (Bild 10-18) mit Nachweis von Zementaustritt in den Spinalkanal (alle Bilder) (Heisenberg/Beck, 2007)

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse



**Abbildung 34: Computertomografie einer Brustwirbelsäule nach Vertebroplastie (ohne Nachweis von Zementaustritt)(3a/c: sagittal, 3b: koronar, 3d: axial)
(aus www.radiologie-lmu.de)**

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse



Abbildung 35: Computertomografie einer Brustwirbelsäule nach Kyphoplastie (ohne Nachweis von Zementaustritt) (aus www.karl-olga-krankenhaus.de)

4 Diskussion

4.1 Einleitung

Die Vertebro- und Kyphoplastie gewinnen seit ihren Erstdurchführungen 1984 respektive 1998 zunehmend an Popularität in der Behandlung von Wirbelkörperfrakturen. Der unkontrollierte Zementaustritt ist relativ häufig, verläuft jedoch meist ohne unmittelbare Folgen für den Patienten. Dennoch gilt es, Zementaustritte wenn möglich zu minimieren. Die vorliegende Arbeit soll die Abhängigkeit der Austrittsrate von der jeweiligen Methode und Zementtemperatur im experimentellen Versuch zeigen.

4.2 Eigene Resultate

In den Versuchen kam es insgesamt 31 mal zu einem Zementaustritt. Von den 78 mit Vertebroplastie behandelten Wirbelkörpern waren insgesamt 29 von einem Austritt betroffen. Dies entspricht ca. 37%. Bei den 12 mit Kyphoplastie behandelten Wirbelkörpern kam es bei 2 zu einem Zementaustritt. Dies entspricht ca. 17%. Die Austrittshäufigkeit nahm mit steigender Zementtemperatur zu. Der Zement trat zu 80% in die Bandscheibenregion, zu 30% in den prävertebralen Raum und zu 25% in den Spinalkanal aus.

4.3 Literaturvergleich

In der Literatur finden sich sehr viele klinische Arbeiten, die sich mit dem Thema Vertebro- und Kyphoplastie und deren Komplikationen beschäftigen. Im Folgenden werden unsere experimentell gefundenen Zementaustrittswerte mit einzelnen ausgewählten Studien und mit den durchschnittlichen Werten von

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse

zwei Review-Studien, die eine von Hulme et al¹⁹ aus dem Jahre 2006 und die andere von Lee et al²⁰ aus dem Jahre 2007 verglichen.

Tabelle 9: Literaturvergleich bei der Vertebroplastie

Autor (Jahr)	Anzahl Patienten	Wirbelkörper (insgesamt)	Zementaustritt (%)	symptomatisch (%)
Layton (2007)	552	1000	25 (bei 673 VPs)	0.45
Mirovsky (2006)	66	66	41	keine
Ramos (2006)	12	19	84	keine
Krauss (2006)	114	148	46	keine
Schmidt (2005)	21	29	81	3.4
McKiernan (2004)	46	66	15	keine
Fourney (2003)	56	97	9	keine
Hulme (2006)	27 Studien	2283	41	?
Lee (2007)	89 Studien	7184	43	1.08
eigene Resultate		78	37	nicht möglich

Beim Vergleich fällt eine relativ grosse Bandbreite bei der Zementaustrittsrate von 9% bei der Arbeit von Fourney und bis zu 84% bei der Arbeit von Ramos auf. Die sehr hohen Zementaustrittsraten bei Ramos sind wahrscheinlich damit erklärbar, dass die radiologischen Nachkontrollen mittels Computertomografie (und nicht nur konventionell radiologisch) vorgenommen wurden; so können

¹⁹ Hulme PA, Krebs J, Ferguson SJ, Berlemann U. Vertebroplasty and Kyphoplasty: A systematic review of 69 clinical studies. Spine 2006;31(17):1983-2001.

²⁰ Lee M, Cahill P, Dumonski M, Stanley T, Park D, Singh K. A comparison of complications from Vertebroplasty and Kyphoplasty: a meta-analysis of 124 studies. The Spine Journal 2007;7 (5):19S.

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse

schon minimste Zementaustritte identifiziert und dokumentiert werden. Es zeigt sich aber, dass die experimentellen Ergebnisse bei der Vertebroplastie die klinische Situation bezüglich der Zementaustrittsrate sehr gut abbilden, wie aus den durchschnittlichen klinischen Ergebnissen der beiden grossen Review-Studien von Hulme et al. und Lee et al. ersichtlich ist.

Wie der Vergleich auch zeigt, werden die wenigsten Zementleckagen klinisch relevant, durchschnittlich sind dies ungefähr 1% bei der Vertebroplastie, wie die Review-Studie von Lee et al zeigt.

Für die Kyphoplastie fanden sich folgende Zahlen:

Tabelle 10: Literaturvergleich bei der Kyphoplastie

Autor (Jahr)	Anzahl Patienten	Wirbelkörper (insgesamt)	Zementaustritt (%)	symptomatisch (%)
Pflugmacher (2005)	22	35	14.2	?
Hillmeier (2004)	102	192	7	Keine
Rhyne (2004)	52	82	9.8	?
Phillips (2003)	29	61	9.8	Keine
Fourney (2003)	32	32	0	
Dudeney (2002)	18	55	4	Keine
Lieberman (2001)	30	70	8.6	Keine
Hulme (2006)	18 Studien		9	1.3
Lee (2007)	37 Studien		8.8	0.04
eigene Resultate		12	17	nicht möglich

Bei der Kyphoplastie zeigt sich im Gegensatz zur Vertebroplastie eine sehr enge Bandbreite bei der Zementaustrittsrate von 0% bei Fourney et al. bis

14.2% bei Pflugmacher et al. Die fehlenden Zementaustritte bei Fourny führen die Autoren auf eine genaue Indikationsstellung, auf die Verwendung von hochviskösem Zement und auf eine geringe Injektionsmenge zurück.

Die experimentell gefundenen Zahlen bei der Kyphoplastie sind aufgrund der geringen Wirbelkörperanzahl mit Vorsicht zu beurteilen, liegen jedoch auch deutlich unter denen der Vertebroplastie.

Der Zement trat bei den Versuchen unabhängig von der jeweiligen Methode am häufigsten in die Bandscheibenregion aus (80% der Austritte), gefolgt von prävertebral (30%) und spinal (25%).

Zum Vergleich wurde die Review-Studie von Hulme et al. verwendet. Dort finden sich folgende Austrittsorte:

- Vertebroplastie:
 - epidural (32%)
 - paraspinal (32.5%)
 - intradiscal (30.5%)
 - foraminal (3.3%)

- Kyphoplastie:
 - epidural (11%)
 - paraspinal (48%)
 - intradiscal (38%)
 - foraminal (1.5%)

Es zeigt sich, dass im Experiment die Bandscheibenregion häufiger von Zementaustritten betroffen ist, als in den klinischen Resultaten. Eine Erklärung für diese Diskrepanz könnte in der Tatsache liegen, dass die Bandscheiben bei den Präparaten degenerative Veränderungen aufweisen und der Zement somit den Weg des geringsten Widerstandes nimmt. Die experimentellen Austrittsraten in den Spinalkanal entsprechen ungefähr den klinischen

Resultaten der Zementaustritte in den epiduralen Raum, da bei den Präparaten keine Dura vorhanden ist. Der Spinalkanal stellt sich in diesem Fall als epiduraler Raum dar.

4.4 Schlussfolgerungen

Die in dieser Arbeit experimentell gefundenen Resultate von 37% Zement-Leckagen bei der Vertebroplastie und 17% Zement-Leckagen bei der Kyphoplastie passen sehr gut zu den in der Literatur gefundenen Resultaten aus klinischen Studien. Es gibt jedoch keine Studien, bei denen die Zementaustrittsrate in Abhängigkeit von der Zementtemperatur untersucht wurde. Zementaustritte sind insgesamt also relativ häufig anzutreffen. Die Kyphoplastie zeigt bezüglich des Zementaustrittes im Experiment sowie in der Literatur deutlich bessere Werte. Hauptsächlich kann die Komplikationsbeziehungsweise Zementaustrittsrate aber durch eine exakte Indikationsstellung, eine sorgfältige Durchführung durch einen erfahrenen Operateur und unter kontinuierlicher radiologischer Kontrolle reduziert werden.

Der Grund für die besseren Werte bei der Kyphoplastie liegt höchstwahrscheinlich im deutlich niedrigeren Zement-Injektionsdruck. Wie im Experiment gesehen, spielt auch die Zementtemperatur (und somit die Viskosität) eine wesentliche Rolle in der Austrittsrate. Je wärmer der Zement ist, desto flüssiger wird er und desto häufiger kommt es zu einem Zementaustritt. Eine höhere Zementtemperatur bringt jedoch den Vorteil der besseren Applizierbarkeit durch die Vertebro- oder Kyphoplastienadel und die kürzere Aushärtungszeit.

Nach der Versuchsreihe und der Literaturrecherche erachten wir die Ballon- oder Expander-Kyphoplastie mit einer Zementtemperatur von ca. 50° Celsius als die momentan sicherste Methode, um einen Zementaustritt und die daraus resultierenden Komplikationen so klein wie möglich zu halten. Aufgrund

unterschiedlicher Indikationen ist es natürlich nicht möglich, immer eine Kyphoplastie durchzuführen.

4.5 Limitationen

Im Vergleich mit klinischen Resultaten ist bei der vorliegenden experimentellen („ex-vivo“) Versuchsreihe eine Aussage nur eingeschränkt möglich. Der im Vergleich zum menschlichen Körper verminderte Gewebswiderstand bei den Präparaten hat zur Folge, dass im Versuch mit einem niedrigeren Zementinjektionsdruck als im Körper gearbeitet werden kann. Dies führt im Experiment sicherlich zu einer niedrigeren Zementaustrittsrate ins umliegende Gewebe. Andererseits kann der oben erwähnte verminderte Gewebswiderstand auch dazu führen, dass es schon bei geringeren Injektionsdruckwerten zu einem Zementaustritt kommt.

Für die Versuche wurden zwar alte (fraglich osteoporotische), jedoch nicht frakturierte Wirbelkörper verwendet. Eine genaue Aussage aufgrund der in dieser Arbeit verwendeten Präparate - betreffend der Zementaustrittsrate - verglichen mit osteoporotisch frakturierten Wirbelkörpern ist somit nur ungefähr möglich. Dennoch gibt die vorliegende Arbeit eine approximative Richtung der Zementaustrittshäufigkeit abhängig von der jeweiligen Methode und Zementtemperatur vor.

4.6 Ausblick

Das bei zunehmender Lebenserwartung der Bevölkerung ansteigende durchschnittliche Lebensalter führt dazu, dass die Häufigkeit von (osteoporotischen) Wirbelkörperfrakturen in den nächsten Jahren und Jahrzehnten noch deutlich zunehmen wird.

Osteoporotisch bedingte Wirbelkörperfrakturen führen häufig zu invalidisierenden und immobilisierenden Schmerzen. Dadurch kommt es bei älteren Patienten vermehrt zu Hospitalisationen und als Folge der verminderten Mobilität und zunehmenden Bettlägerigkeit auch zu einer Zunahme von Komplikationen (Bsp. Lungenentzündung). Die Zunahme der Mortalität dieser Patienten (im Vergleich zur gleichaltrigen „gesunden“ Bevölkerung) beträgt etwa 30%²¹.

Wirbelkörperfrakturen werden heute in den meisten Fällen konservativ (siehe Kapitel 1.2 und 1.7) behandelt. Diese konservative Therapie führt jedoch häufig nur langsam zu einer Reduktion der Schmerzen und hat keinen unmittelbaren stabilisierenden Effekt auf den Wirbelkörper. Der Wunsch der Patienten (und der Ärzte) nach einer schonenden Behandlungsmethode, die die Schmerzen schnell reduziert und den eingebrochenen Wirbelkörper stabilisiert oder sogar wieder aufrichtet, kann durch die Vertebro- und Kyphoplastie erfüllt werden.

Trotz der mittlerweile guten Erfahrungen und Fortschritte sind jedoch wesentliche Fragen wie Langzeitergebnisse/-komplikationen, die beste Zementart oder technische Aspekte noch nicht vollständig geklärt. Auch nach vielen Jahren Vertebro- und Kyphoplastie existieren noch immer keine grossen Studien, die die beiden interventionellen Methoden mit der konventionellen Therapie vergleichen.

Trotzdem sind beide Methoden wichtige Behandlungsarten bei (vor allem osteoporotischen) Wirbelkörperfrakturen und tumorbefallenen Wirbelkörpern. In den Händen eines erfahrenen Untersuchers und bei guter Indikationsstellung sind die beiden Eingriffe sicher und effektiv einsetzbar.

²¹ Kado DM, Browner WS, Palermo L, et al. Vertebral fractures and mortality in older women: a prospective study. Study of Osteoporotic Fractures Research Group. Arch Intern Med 1999;159:1215-20.

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse

Die Kostenfrage soll bei der Vertebro- und Kyphoplastie ebenfalls in die Diskussion miteinbezogen werden. In der Schweiz wurde deshalb eine Zertifizierung eingeführt, welche eine gute Indikationsstellung, die sachgemässe Durchführung und auch die Qualitätskontrolle, vor allem bei der teureren Kyphoplastie gewährleisten soll.

5 Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist, die beiden Wirbelkörper-stabilisierenden Verfahren Vertebro- und Kyphoplastie im Bezug auf die Komplikations- bzw. Zementaustrittsrate im experimentellen Versuch zu vergleichen.

Vertebroplastien und Kyphoplastien werden in immer grösserer Anzahl als Therapie eingesetzt. Nicht seltene Komplikationen und unbefriedigende klinische Ergebnisse verlangen eine experimentelle Nachbearbeitung der bereits eingeführten Methode.

In den vorliegenden Experimenten werden insgesamt 26 Präparate (20 Rinder-Wirbelkörperpräparate und 6 menschliche Mazerationspräparate mit jeweils mehreren Wirbelkörpern pro Präparat) entweder mit einer Vertebro- oder Kyphoplastie und mit unterschiedlichen Zementtemperaturen behandelt und anschliessend mit verschiedenen Röntgen-Methoden untersucht. Besonderer Wert wird auf die Komplikations-, bzw. Zementaustrittsrate gelegt.

Bei insgesamt 78 Vertebroplastien kam es in 29 Fällen zu Zementaustritten (37%), bei insgesamt 12 Kyphoplastien kam es zweimal zu Zementaustritten (17%). Neben der am häufigsten betroffenen Bandscheibenregion sind auch der prävertebrale Raum und der Spinalkanal von Zementaustritten betroffen. Die Folge einer höheren Zementtemperatur war eine höhere Zementaustrittsrate. Der Vergleich mit der Literatur zeigt ähnliche Resultate im Bezug auf einen Zementaustritt.

Bei der Vertebro- und Kyphoplastie sind die Komplikationen nicht korrigierbar, es sei denn durch operative Eingriffe. Die Vermeidung von Komplikationen durch niedervisköse Zemente ohne extreme Hitzeentwicklung ist Voraussetzung der Therapie. Komplikationen mit Austritt in den Spinalkanal, in die Neuroforamina, in die Bandscheibenregion, in den prävertebralen Raum und prävertebralen Plexus können experimentell wie auf klinischen Bildern beobachtet werden. Die Kyphoplastie und Vertebroplastie sind unseres

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse

Erachtetens als Methode in der Entwicklung anzusehen, die keinesfalls abgeschlossen ist.

6 Literaturverzeichnis

Acosta FL, et al. Kyphoplasty-augmented short-segment pedicle screw fixation of traumatic lumbar burst fractures: initial clinical experience and literature review. *Neurosurg Focus* 2005;18:1-6.

Aebli N, Krebs J, Davis G, Walton M, Williams MJ, Theis JC. Fat embolism and acute hypotension during vertebroplasty: an experimental study in sheep. *Spine* 2002;27:460-66.

Amar AP, Larsen DW, Esnaashari N, et al. Percutaneous transpedicular polymethylmethacrylate vertebroplasty for the treatment of spinal compression fractures. *Neurosurgery* 2001;49:1105-14.

Bailey DA, McKay HA, Mirwald RL, Crocker PR, Faulkner RA: A six-year longitudinal study of the relationship of physical activity to bone mineral accrual in growing children: the university of Saskatchewan bone mineral accrual study. *J Bone Miner Res* 1999;14:1672-1679.

Barr JD: Point of view: An in vivo comparison of the potential for extravertebral cement leak after vertebroplasty and kyphoplasty. *Spine* 2002;27:2178-9.

Barr JD, Barr MS, Lemley TJ, et al. Percutaneous vertebroplasty for pain relief and spinal stabilization. *Spine* 2000;25:923-8.

Becker S., Ogon M. Ballonkyphoplastie, Kapitel 11 Bohner M. Springer Wien New York 2005.

Bernhard J, Marx S. Behandlung der osteoporotischen Wirbelkörperfraktur mittels Vertebroplastik? *Schweiz Med Forum* 2006;6:1028-33.

Berlemann U, Franz T, Orlor R, et al. Kyphoplasty for treatment of osteoporotic vertebral fractures: A prospective non-randomized study. *Eur Spine J* 2004;13:496-501.

Bouza C, Lopez T, Magro A, Navalpotro L, Amate JM. Efficacy and safety of balloon kyphoplasty in the treatment of vertebral compression fractures: a systematic review. *Eur Spine* 2006;15:1050-67.

Brown DB, Gilula LA, Sehgal M, Shimony JS. Treatment of chronic symptomatic vertebral compression fractures with percutaneous vertebroplasty. *AJR* 2004;182:319-22.

Brown DB, Glaiberman CB, Gilula LA, Shimony JS. Correlation between preprocedural MRI findings and clinical outcomes in the treatment of chronic symptomatic vertebral compression fractures with percutaneous vertebroplasty. *AJR* 2005;184:1951-55.

Burton AW, Mendel E. Vertebroplasty and kyphoplasty. *Pain Physician* 2003;6:335-343.

Burton AW, Rhines LD, Mendel E. Vertebroplasty and kyphoplasty: a comprehensive review. *Neurosurg Focus* 2005;18:1-9.

Carlier RY, Gordji H, Mompoin DM, et al. Osteoporotic vertebral collaps: Percutaneous vertebroplasty and local kyphosis correction. *Radiology* 2004;233:891-8.

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse

Choe DH, Marom EM, Ahar K, Truong MT, Madewell JE. Pulmonary embolism of polymethyl methacrylate during percutaneous vertebroplasty and kyphoplasty. *AJR* 2004;183:1097-1102.

Cloft HJ, Jensen ME. Kyphoplasty: An assesment of a new technology. *AJNR* 2007;28:200-3.

Cooper C, Atkinson EJ, Jacobsen SJ, O'Fallon WM, Melton LJ. Population-based study of survival after osteoporotic fractures. *Am J Epidemiol* 1993;137:1001-5.

Cooper C, Atkinson EJ, O'Fallon WM, et al. Incidence of clinically diagnosed vertebral fractures: a population-based study in Rochester, Minnesota, 1985-1989. *J Bone Miner Res* 1992;7(2):221-7.

Cortet B, Cotten A, Boutry N, et al. Percutaneous vertebroplasty in the treatment of osteoporotic vertebral compression fractures: An open prospective study. *J Rheumatol* 1999;26:2222-8.

Coumans JV, Reinhardt MK, Lieberman IH. Kyphoplasty for vertebral compression fractures: 1-year clinical outcomes from a prospective study. *J Neurosurg* 2003;99:44-50.

Cyteval C, Sarrabere MP, Roux JO, et al. Acute osteoporotic vertebral collaps: Open study on percutaneous injection of acrylic surgical cement in 20 patients. *AJR Am J Roentgenol* 1999;173:1685-90.

DaFonseca K, Baier M, Grafe I, Libicher M, Nöldge G, Kasperk C, Meeder PJ. Ballonkyphoplastie in der Therapie von Wirbelkörperfrakturen. *Unfallchirurg* 2006;109:391-400.

Da Fonseca K. et al. Kyphoplastie mit "Biozement". *J Miner Stoffwechs* 2004;11 (Suppl 1): 16-19.

Darius T, Vanderschot P, Broos P. Balloonkyfoplastiek: Een Nieuwe Behandelingsmethode voor Wevelfracturen bij Osteoporose. *Tijdschr voor Geneeskunde* 2003;59:1141-51.

De Negri P, Tirri T, Paternoster G, Modano P. Treatment of painful osteoporotic or traumatic vertebral compression fractures by percutaneous vertebral augmentation procedures: A nonrandomized comparison between vertebroplasty and kyphoplasty. *Clin J Pain* 2007;23:425-30.

Deramond H, Depriester C, Galibert P, et al. Percutaneous Vertebroplasty with Polymethylmethacrylate. Technique, indications and Results. *Radiologic Clinics of North America* 1998;36:533-46.

Dublin AB, Hartmann J, Latchaw RE, Hald JK, Reid MH. The vertebral body fracture in osteoporosis: restoration of height using percutaneous vertebroplasty. *AJNR* 2005;26:489-92.

Dudeney S, Lieberman IH, Reinhardt MK, Hussein M. Kyphoplasty in the treatment of osteolytic vertebral compression fractures as a result of multiple myeloma. *J Clin Oncol.* 2002;20(9):2382-7

Eichholz KM, O'Toole JE, Christie SD, FRCSC, Fessler RG. Vertebroplasty and kyphoplastie. *Neurosurg Clin N Am* 2006;7:507-18.

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse

Evans AJ, Jensen ME, Kip KE, et al. Vertebral compression fractures: pain reduction and improvement in functional mobility after percutaneous polymethylmethacrylate vertebroplasty-retrospective report of 245 cases. *Radiology* 2003;226:366-72.

Feltes C, Fountas KN, Machinis T, et al. Immediate and early postoperative pain relief after kyphoplasty without significant restoration of vertebral body height in acute osteoporotic vertebral fractures. *Neurosurg Focus* 2005;18:e5.

Fessler R, Roemer FW, Bohndorf K. Percutaneous vertebroplasty for osteoporotic vertebral compression fractures: Experiences and prospective clinical outcome in 26 consecutive patients with 50 vertebral fractures (in German). *Rofo* 2005;177:884-92.

Fergus E, McKiernan. Kyphoplast and Vertebroplasty: How good is the evidence? *Curr Rheum Rep* 2007;9:57-65.

Fourney DR, Schomer DF, Nader R, Chian-Fourney J, Suki D, Ahrar K, Rhines LD, Gokaslan ZL. Percutaneous vertebroplasty and kyphoplasty for painful vertebral body fractures in cancer patients. *J Neurosurg*. 2003 Jan;98(1 Suppl):21-30.

Franck H, Boszczyk BM, Bierschneider M, Jaksche H. Interdisciplinary approach to balloon kyphoplasty in the treatment of osteoporotic vertebral compression fractures. *Eur Spine* 2003;12 Suppl 2:S163-S167.

Fribourg D, Tang C, Sra P, Delamarter R, Bae H. Incidence of subsequent vertebral fracture after kyphoplasty. *Spine* 2004;29:2270-76.

Fuentes S, Métellus P, Pech-Gourg G, Adetchessi T, Dufour H, Grisoli F. Traitement par kyphoplastie à foyer ouvert des métastases rachidiennes. *Neurochirurg* 2007;53:49-53.

Gaitanis IN, Hadjipavlou AG, Katonis PG, et al. Balloon kyphoplasty for the treatment of pathological vertebral compressive fractures. *Eur Spine J* 2005;15:250-60.

Galibert P, Deramond H, Rosat P, et al. Note préliminaire sur le traitement des angiomes vertébraux par vertébroplastie acrylique percutanée. *Neurochirurgie* 1987;33:166-8.

Garfin SR, Yuan HA, Reiley MA. New technologies in spine: kyphoplasty and vertebroplasty for treatment of painful osteoporotic compression fractures. *Spine* 2001;26:1511-15.

Gerszten PC, et al. Combination kyphoplasty and spinal radiosurgery: a new treatment paradigm for pathological fractures. *Neurosurg Focus* 2005;18:1-6.

Gaughen JR Jr, Jensen ME, Schweickert PA, et al. Relevance of antecedent venography in percutaneous vertebroplasty for the treatment of osteoporotic compression fractures. *AJNR Am J Neuroradiol* 2002b;23:594-96.

Gaughen JR, Jensen ME, Schweickert PA, Marx WF, Kallmes DF. The therapeutic benefit of repeat percutaneous vertebroplasty at previously treated vertebral levels. *AJNR* 2002;23:1657-61.

Grados F, Depriester C, Cayrolle G, et al. Long-term observations of vertebral osteoporotic fractures treated by percutaneous vertebroplasty. *Rheumatology (Oxford)* 2000;39:1410-14.

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse

Green DL, Isaac R, Neuwirth M, Bitan FD. The eggshell technique for prevention of cement leakage during kyphoplasty. *J Spinal Disord Tech* 2007;20:229-32.

Grohs JG, Krepler P. Minimal-invasive Stabilisierung osteoporotischer Wirbelkörperbrüche. *Radiologe* 2004;44:254-59.

Grohs JG, Matzner M, Trieb K, et al. Minimal invasive stabilization of osteoporotic vertebral fractures: A prospective nonrandomized comparison of vertebroplasty and balloon kyphoplasty. *J Spinal Disord Tech* 2005;18:238-42.

Hanna J, Letizia MJ. Kyphoplasty: a treatment for osteoporotic vertebral compression fractures. *Orthopaedic Nursing* 2007;26:342-46.

Hee HT, et al. Percutaneous vertebroplasty: Current concepts and local experience. *Neuro India* 2005;53: 475-82.

Heini PF, Orlor R. Kyphoplasty for treatment of osteoporotic vertebral fractures. *Eur Spine J* 2004;13:184-92.

Heini PF, Walchli B, Berlemann U. Percutaneous transpedicular vertebroplasty with PMMA: Operative technique and early results. A prospective study for the treatment of osteoporotic compression fractures. *Eur Spine J* 2000;9:445-50.

Hillmeier J, Grafe I, Da Fonseca K, et al. The evaluation of balloon kyphoplasty for osteoporotic vertebral fractures. An interdisciplinary concept (in German). *Orthopade* 2004;33:893-904.

Hiwatashi A, Sidhu R, Lee RK, deGuzman RR, Piekut DT, Westesson PLA. Kyphoplasty versus vertebroplasty to increase vertebral body height: a cadaveric study. *Radiology* 2005;237:1115-19.

Hodler J, Peck D, Gilula LA. Midterm outcome after vertebroplasty: Predictive value of technical and patient-related factors. *Radiology* 2003;227:662-8.

Hulme PA MSC, Krebs J DVM, Ferguson SJ PhD, Berlemann U MD. Vertebroplasty and Kyphoplasty: A systematic Review of 69 clinical studies. *Spine* 2006;17:1983-2001.

Jang JS, Kim DY, Lee SH. Efficacy of percutaneous vertebroplasty in the treatment of intervertebral pseudarthrosis associated with noninfected avascular necrosis of the vertebral body. *Spine* 2003;28:1588-92.

Jang JS, Lee SH, Jung SK. Pulmonary embolism of polymethylmethacrylate after percutaneous vertebroplasty: a report of three cases. *Spine* 2002;27:E416-E418.

Jensen ME, Dion JE. Vertebroplasty relieves osteoporosis pain. *Diagn Imaging (San Franc)* 1997;19:68, 71-68, 72.

Johnell, O, Kanis, JA. An estimate of the worldwide prevalence and disability associated with osteoporotic fractures. *Osteoporos Int* 2006;17:1726.

Ju SW, Lee PC, Ma CH, et al. Vertebroplasty for the treatment of osteoporotic compression spinal fracture: comparison of remedial action of different stages of injury. *J Trauma* 2004;56:629-32.

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse

Kado DM, Browner WS, Palermo L, et al. Vertebral fractures and mortality in older women: a prospective study. Study of Osteoporotic Fractures Research Group. Arch Intern Med 1999;159:1215-20.

Kallmes DF, Jensen MJ. Percutaneous vertebroplasty. Radiology 2003;229:27-36.

Kallmes DF, Schweickert PA, Marx WF, Jensen ME. Vertebroplasty in the mid-and upper thoracic spine. AJNR 2002;23:1117-20.

Katscher S, Blattner T, Glasmacher S, Gonschorek O, Josten C. Fehler und Komplikationen bei der Kyphoplastie. Akt Traumatol 2006;36:23-28.

Kasperk C, Hillmeier J, Nöldge G, et al. Treatment of painful vertebral fractures by kyphoplasty in patients with primary osteoporosis: A prospective nonrandomized controlled study. J Bone Miner Res 2005;20:604-12.

Kasperk C., Hillmeier J., Nöldge G., Libicher M., Kauffmann G.W., Nawroth P.P., Meeder P.-J. Kyphoplastie – Konzept zur Behandlung schmerzhafter Wirbelkörperbrüche. Deutsches Ärzteblatt 2003;100 (25): 1748-1752.

Kaufmann TJ, Jensen ME, Schweickert PA, Marx WF, Kallmes DF. Age of fracture and clinical outcomes of percutaneous vertebroplasty. AJNR 2001;22:1860-63.

Kim AK, Jensen ME, Dion JE, Schweickert PA, Kaufmann TJ, Kallmes DF. Unilateral transpedicular percutaneous vertebroplasty: initial experience. Radiology 2002;222:737-41.

Kim DY, Lee SH, Jang JS, et al. Intravertebral vacuum phenomenon in osteoporotic compression fracture: Report of 67 cases with quantitative evaluation of intravertebral instability. J Neurosurg 2004;100:24-31.

Kobayashi K, Shimoyama K, Nakamura K, et al. Percutaneous vertebroplasty immediately relieves pain of osteoporotic vertebral compression fractures and prevents prolonged immobilization of patients. Eur Radiol 2005;15:360-7.

Kornp M, Ruetten S, Godolias G. Minimal-invasive Therapie der funktionell instabilen osteoporotischen Wirbelkörperfraktur mittels Kyphoplastie. Prospektive Vergleichsstudie von 19 Operierten und 17 konservativ behandelten Patienten. J Miner Stoffwechs 2004;11:13-5.

Krauss M, Hirschfelder H, Tomandl B, Lichti G, Bär I. Kyphosis reduction and the rate of cement leaks after vertebroplasty of intravertebral clefts. Eur Radiol. 2006;16(5):1015-21.

Lane JM, Hong R, Koob J, et al. Kyphoplasty enhances function and structural alignment in multiple myeloma. Clin Orthop Relat Res 2004;426:49-53.

Laredo JD, Hamze B. Complications of percutaneous vertebroplasty and their prevention. Skeletal Radiol 2004;33:493-505.

Lavelle W, Carl A, Lavelle ED, Khaleel MA. Vertebroplasty and kyphoplasty. Med Clin N Am 2007;91:299-314.

Layton KF, Thielen KR, Koch CA, Luetmer PH, Lane JI, Wald JT, Kallmes DF. Vertebroplasty, first 1000 levels of a single center: evaluation of the outcomes and complications. AJNR Am J Neuroradiol. 2007 Apr;28(4):683-9.

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse

Ledlie JT, Renfro M. Balloon kyphoplasty: One-year outcomes in vertebral body height restoration, chronic pain, and activity levels. *J Neurosurg* 2003;98:36-42.

Lee M, Cahill P, Dumonski M, Stanley T, Park D, Singh K. A comparison of complications from Vertebroplasty and Kyphoplasty: a meta-analysis of 124 studies. *The Spine Journal* 2007;7(5):19S.

Lee ST, Chen JF. Closed reduction vertebroplasty for the treatment of osteoporotic vertebral compression fractures. Technical note. *J Neurosurg* 2004;100:392-6.

Legroux-Gérot I, Lormeau C, Boutry N, et al. Long-term follow-up of vertebral osteoporotic fractures treated by percutaneous vertebroplasty. *Clin Rheumatol* 2004;23:310-7.

Libicher M, Vetter M, Wolf I, Nöldge G, Kasperk C, Grafe I, DaFonseca K, Hillmeier J, Meeder PJ, Meinzer HP, Kauffmann GW. CT volumetry of intravertebral cement after kyphoplasty. Comparison of polymethylmethacrylate and calcium phosphate in a 12-month follow-up. *Eur Radiol* 2005;15:1544-1549.

Liebermann ICH, Dudeney S, Reinhardt MK, et al. Initial outcome and efficacy of „kyphoplasty“ in the treatment of painful osteoporotic vertebral compression fractures. *Spine* 2001;26:1631-8.

Liebermann I, Reinhardt MK. Vertebroplasty and kyphoplasty for osteolytic vertebral collaps. *Clin Orthop Relat Res.* 2003;415:S176-86.

Lin EP, Ekholm S, Hiwatashi A, Westesson PL. Vertebroplasty : cement leakage into the disc increases the risk of new fracture adjacent vertebral body. *AJNR* 2004;25:175-80.

Lindsay R, Silverman SR, Cooper C, et al. Risk of new vertebral fracture in the year following a fracture. *JAMA* 2001;285:320-3.

Lyles KW. Management of patients with vertebral compression fractures. *Pharmacotherapy* 1999;19 (1 Pt 2):21S-4S.

Majd ME, Farley S, Holt RT. Preliminary outcomes and efficacy of the first 360 consecutive kyphoplasties for the treatment of painful osteoporotic vertebral compression fractures. *Spine J* 2005;5:244-55.

Martin JB, Jean B, Sugiu, et al. Vertebroplasty: clinical experience and follow-up results. *Bone Vol* 1999;25:11S-15S.

Mathis JM, Ortiz OA, Zoarski GH. Vertebroplasty versus kyphoplasty: a comparison and contrast. *AJNR* 2004;25:840-45.

McGraw JK, Heatwole EV, Strnad BT, et al. Predictive value of intraosseous venography before percutaneous vertebroplasty. *J Vasc Interv Radiol* 2002;13:149-53.

McGraw JK, Lippert JA, Minkus KD, Rami PM, Davis TM, Budzik RF. Prospective evaluation of pain relief in 100 patients undergoing percutaneous vertebroplasty: results and follow-up. *J Vasc Interv Radiol* 2002;13:883-86.

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse

McKiernan F, Jensen R, Faciszewski T. The dynamic mobility of vertebral compression fractures. *J Bone Miner Res* 2003;18:24-9.

McKiernan F, Faciszewski T, Jensen R. Reporting height restoration in vertebral compression fractures. *Spine* 2003;28:2517-21.

McKiernan F, Faciszewski T, Jensen R. Quality of life following vertebroplasty. *J Bone Joint Surg Am* 2004;86-A:2600-6.

Mehbod A, Aunoble S, Le Huec JC. Vertebroplasty for osteoporotic spine fracture: prevention and treatment. *Eur Spine* 2003;12 (Suppl 2):S155-S162.

Mirovsky Y, Anekstein Y, Shalmon E, Blankstein A, Peer A. Intradiscal cement leak following percutaneous vertebroplasty. *Spine* 2006 May 1;31(10):1120-4.

Moreland DB, Landi MK, Grand W. Vertebroplasty: techniques to avoid complications. *Spine J* 2001;1:66-71.

Mousavi P, Roth S, Finkelstein J, et al. Volumetric quantification of cement leakage following percutaneous vertebroplasty in metastatic and osteoporotic vertebrae. *J Neurosurg* 2003;99:56-9.

Müller CW, Berlemann U. Kyphoplasty: chances and limits. *Neurol India* 2005;53:451-7.

Nirala AP, Vatsal DK, Husain M, et al. Percutaneous vertebroplasty: An experience of 31 procedures. *Neurol India* 2003; 51:490-2.

Nordstrom A, Olsson T, Nordstrom P. Sustained benefits from previous physical activity on bone mineral density in males. *J Clin Endocrinol Metab* 2006;91:2600-4.

O'Brien JP, Sims JT, Evans AJ. Vertebroplasty in patients with severe vertebral compression fractures: A technical report. *AJNR Am J Neuroradiol* 2000;21:1555-8.

Olszynski WP, Shawn Davison K, et al. Osteoporosis in men: epidemiology, diagnosis, prevention, and treatment. *Clin Ther* 2004;26(1):15-28.

Peh WC, Gelbart MS, Gilula LA, et al. Percutaneous vertebroplasty: Treatment of painful vertebral compression fractures with intraosseous vacuum phenomena. *AJR Am J Roentgenol* 2003;180:1411-7.

Peh WC, Giulua LA, Peck DD. Percutaneous vertebroplasty for severe osteoporotic vertebral body compression fractures. *Radiology* 2002;223:121-126.

Perez-Higueras A, Alvarez L, Rossi RE, et al. Percutaneous vertebroplasty: Long-term clinical and radiological outcome. *Neuroradiology* 2002;44:950-4.

Petit MA, McKay HA, MacKelvie KJ, Heinonen A, Khan KM, Beck TJ: A randomized school-based jumping intervention confers site and maturity-specific benefits on bone structural properties in girls: a hip structural analysis study. *J Bone Miner Res* 2002;17:363-372.

Pflugmacher et al. Vertebroplasty and Kyphoplasty in Osteoporotic Fractures of Vertebral Bodies – a Prospective 1-Year Follow-up Analysis. *Fortschr Röntgenstr* 2005;177:1670-1676.

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse

Phillips FM, Ho E, Campbell-Hupp M, et al. Early radiographic and clinical results of balloon kyphoplasty for the treatment of osteoporotic vertebral compression fractures. *Spine* 2003;38:2260-7.

Phillips FM, Wetzel FT, Lieberman I, Campbell-Hupp M. An in vivo comparison of the potential for extravertebral cement leakage after vertebroplasty and kyphoplasty. *Spine* 2002;27:2173-79.

Ramos L, de Las Heras JA, Sánchez S, González-Porras JR, González R, Mateos MV, San Miguel JF. Medium-term results of percutaneous vertebroplasty in multiple myeloma. *Eur J Haematol.* 2006 Jul;77(1):7-13.

Rhyne A III, Banit D, Laxer E, et al. Kyphoplasty: Report of eighty-two thoracolumbar osteoporotic vertebral fractures. *J Orthop Trauma* 2004;18:294-9.

Ryu KS, Park CK, Kim MC, et al. Dose-dependent epidural leakage of polymethylmethacrylate after percutaneous vertebroplasty in patients with osteoporotic vertebral compression fractures. *J Neurosurg* 2002;96:56-61.

Schmidt R, Cakir B, Mattes T, Wegener M, Puhl W, Richter M. Cement leakage during vertebroplasty: an underestimated problem? *Eur Spine J* 2005;14:466-73.

Scroop R, Eskridge J, Britz GW. Paradoxical cerebral arterial embolization of cement during intraoperative vertebroplasty: case report. *AJNR* 2002;23:868-70.

Stallmeyer MJ, Zoarski GH, Obuchowski AM. Optimizing patient selection in percutaneous vertebroplasty. *J Vasc Interv Radiol* 2003;14:683-696.

Stricker K, Orlor R, Yen K, Takala J, Luginbühl M. Severe Hypercapnia due to pulmonary embolism of polymethylmethacrylate during vertebroplasty. *Anesth Analg* 2004;98:1084-6.

Taylor RS, Fritzell P, Taylor RJ. Balloon kyphoplasty in the management of vertebral compression fractures: an updated systematic review and meta-analysis. *Eur Spine J* 2007;16:1085-1100.

Taylor RS, Taylor RJ, Fritzell P. Balloon kyphoplasty and vertebroplasty for vertebral compression fractures: a comparative systematic review of efficacy and safety. *Spine* 2006;31:2747-55.

Theodorou DJ, Theodorou SJ, Duncan TD, et al. Percutaneous balloon kyphoplasty for the correction of spinal deformity in painful vertebral body compression fractures. *Clin Imaging* 2002;26:1-5.

Uppin AA, Hirsch JA, Centenera LV, Pfeifer BA, Pazianos AG, Choi IS. Occurrence of new vertebral body fracture after percutaneous vertebroplasty in patients with osteoporosis. *Radiology* 2003;226:119-24.

Vasconcelos C, Gailloud P, Beauchamp NJ, et al. Is percutaneous vertebroplasty without pretreatment venography safe? Evaluation of 205 consecutive procedures. *AJNR Am J Neuroradiol* 2002;23:913-7.

Komplikationen der Vertebroplastie und Kyphoplastie:
Eine experimentelle Studie und klinische Ergebnisse

Villavicencio AT, et al. Intraoperative three-dimensional fluoroscopy-based computerized tomography guidance for percutaneous kyphoplasty. *Neurosurg Focus* 2005;18:1-7.

Wade Wong, D.O., F.A.C.R. and John M. Mathis, M.D. Vertebroplasty and kyphoplasty: techniques for avoiding complications and pitfalls. *Neurosurg Focus* 18 (3): E2, 2005.

Watts NB, Harris ST, Genant HK. Treatment of painful osteoporotic vertebral fractures with percutaneous vertebroplasty or kyphoplasty. *Osteoporos Int* 2001;12:429-37.

Weber CH, Krötz N, Hoffmann RT, Euler E, Heining S, Pfeiffer KJ, Reiser M, Linsenmaier U. CT-gesteuerte Vertebro- und Kyphoplastie: Vergleichende Untersuchung zu technischem Erfolg und Komplikationen bei 101 Eingriffen. *Fortschr Röntgenstr* 2006;178:610-17.

Weisskopf M, Herlein S, Birnbaum K, et al. Kyphoplasty-A next minimally invasive treatment for repositioning and stabilising vertebral bodies (in German). *Z Orthop Ihre Grenzgeb* 2003;141:406-11.

Wilhelm K, Stoffel M, Ringel F, et al. Preliminary experience with balloon kyphoplasty for the treatment of painful osteoporotic compression fractures (in German). *Rofo* 2003;175:1690-6.

Zoarski GH, Snow P, Olan WJ, et al. Percutaneous vertebroplasty for osteoporotic compression fractures: Quantitative prospective evaluation of long-term outcomes. *J Vasc Intervent Radiol* 2002;13:139-48.

Zoarski GH, Stakkneyer MJB, Obuchowski A. Percutaneous Vertebroplasty: A to Z. *Techniques in Vascular and Interventional Radiology* 2002;5:223-38.

Webseiten:

www.brustkrebstage-mannheim.de
www.karl-olga-krankenhaus.de
www.kyphon.com
www.opti-med.de
www.radiologie-lmu.de
www.stryker.com
www.wikipedia.org

Danksagung

Mein ganz herzlicher Dank gilt vor allem Professor Dr. Dr. Andreas Beck, der mit Engelsgeduld und guten Tipps die praktische Durchführung meiner Dissertation in der Radiologischen Klinik Konstanz möglich machte.

Mein weiterer Dank gilt Professor Dr. med. Philippe L. Pereira, der es mir ermöglichte meine Dissertation an der Universität Tübingen einzubringen.

Zudem möchte ich meinem Partner Daniel für die wertvolle Unterstützung und wichtigen „Inputs“ danken.

Ein weiterer Dank geht an Herrn Wöhrle aus Hornberg für das zur Verfügung stellen der Rinderknochen.

Zuletzt bedanke ich mich bei meinen lieben Eltern und meiner lieben Großi für die langjährige persönliche und finanzielle Unterstützung und für zahlreiche wertvolle Tipps während meines Medizinstudiums an der Universität Tübingen.

Curriculum Vitae

Personalien

Name: **Heisenberg**
Vorname: **Helena**
Geburtsdatum/-ort: 30. November 1979, Heidelberg
Staatsangehörigkeit: CH / D

Schulen / Studium

1986-1991 Rudolf Steiner Schule Kreuzlingen
1991-1999 Ellenrieder-Gymnasium Konstanz, Abitur Juni 1999
ab Oktober 2000 Medizinstudium Universität Tübingen
März 2003 ärztliche Vorprüfung
8. Mai 2007 Staatsexamen Universität Tübingen

Wahlstudienjahr

Februar-Juni 2006 Unterassistentin Chirurgie, Kantonsspital Bruderholz CH
Juni-Oktober 2006 Unterassistentin Innere Medizin, Kantonsspital Aarau CH
Oktober-Februar 2006/2007 Unterassistentin Radiologie, Klinikum Friedrichshafen