

Aus der Orthopädischen Universitätsklinik Friedrichsheim  
der Johann Wolfgang Goethe-Universität  
Frankfurt am Main  
und aus der Radiologischen Gemeinschaftspraxis  
Mainzer Ldstr. 191, Frankfurt

# **Röntgenmorphometrische Messungen an der Wirbelsäule**

## Grundlagen zur mathematischen Beschreibung eines Wirbelkörpers

Inaugural-Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Medizin des Fachbereichs Medizin der  
Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main

vorgelegt von

**Kalyani Nagersheth**

aus Frankfurt am Main

Frankfurt am Main, 2005

**Dekan:** Prof. Dr. J. Pfeilschifter  
**Referent:** Prof. Dr. E. Schmitt  
**Koreferent:** Priv. Doz. Dr. J. Berkefeld

**Tag der mündlichen Prüfung:** 10.10.2005

## **Inhalt**

<b>I. Einleitung</b>	
1. Historische Entwicklung	<b>S. 05</b>
1.1 Zur Geschichte der stabilisierenden Wirbelsäulenchirurgie	<b>S. 05</b>
1.2 Biomechanische Bedeutung der Pedikel	<b>S. 07</b>
1.3 Einsatz der Computer Tomographie in anatomischen Studien	<b>S. 07</b>
2. Ziel und Arbeitshypothese	<b>S. 10</b>
<b>II. Methoden</b>	
1. Beschreibung der Versuchsdurchführung und Versuchsbedingungen	<b>S. 12</b>
2. Geräte, Technik und Datenerfassung	<b>S. 12</b>
3. Patienten	<b>S. 13</b>
<b>III. Gemessene Strecken und Winkel</b>	
1. Pedikelaußen- und -innendurchmesser	<b>S. 15</b>
2. Pedikellänge	<b>S. 16</b>
3. Pedikelhöhen	<b>S. 18</b>
4. Wirbelkörperbreite und -tiefe, Ellipsenbreite und -tiefe	<b>S. 20</b>
5. Spinakanalbreite und -tiefe	<b>S. 22</b>
6. Transversaler Pedikelwinkel	<b>S. 23</b>
7. Coronarer Pedikelwinkel	<b>S. 26</b>
8. Wirbelkörperabstände	<b>S. 27</b>
9. Sagittaler Pedikelwinkel	<b>S. 28</b>
<b>IV. Ergebnisse</b>	
1. Pedikelaußen- und -innendurchmesser	<b>S. 29</b>
2. Pedikellänge	<b>S. 30</b>
3. Pedikelhöhen	<b>S. 32</b>
4. Wirbelkörperbreite und -tiefe, Ellipsenbreite und -tiefe	<b>S. 33</b>
5. Spinakanalbreite und -tiefe	<b>S. 35</b>
6. Transversaler Pedikelwinkel	<b>S. 36</b>
7. Coronarer Pedikelwinkel	<b>S. 37</b>
8. Sagittaler Pedikelwinkel	<b>S. 37</b>
<b>V. Diskussion</b>	
1. Einführung in den Literaturvergleich	<b>S. 39</b>
2. Vorzüge und Nachteile unterschiedlicher Meßmethoden	<b>S. 40</b>
3. Übersicht über Studien an Patienten und Präparaten	<b>S. 40</b>
3.1 Studien an Patienten	<b>S. 40</b>
3.2 Computertomographische Studien an Präparaten	<b>S. 42</b>
3.3 direkte Messungen an Präparaten	<b>S. 43</b>

4.	Studien zu abhängigen Variablen	S. 44
4.1	ethnische Zugehörigkeit	S. 44
4.2	Altersabhängigkeit der Werte	S. 45
4.3	Geschlecht	S. 46
4.4	Vergleich zwischen rechter und linker Körperhälfte	S. 46
5.	Morphometrische Analysen im Vergleich	S. 46
5.1	Pedikelinnendurchmesser	S. 46
5.2	Pedikelaußendurchmesser	S. 49
5.3	Pedikelhöhe	S. 50
5.4	Verhältnis Pedikelhöhe zu Pedikelaußendurchmesser (Pedikelform)	S. 51
5.5	Verhältnis Pedikelinnendurchmesser zu Pedikelaußendurchmesser (Compacta)	S. 52
5.6	Empfohlener Schraubendurchmesser	S. 54
5.7	Die Pedikellängen	S. 56
5.7.1	Die kürzeste Pedikellänge	S. 56
5.7.2	Pedikellänge bis Wirbelkörpervorderkante in Pedikelachse	S. 56
5.7.3	Pedikellänge bis Wirbelkörpervorderkante sagittal	S. 57
5.7.4	Verhältnis Pedikellänge plus Wirbelkörper sagittal zu Pedikellänge plus Wirbelkörper in Pedikelachse	S. 57
5.8	Die Pedikelwinkel	S. 58
5.8.1	Der transversale Winkel	S. 58
5.8.2	Der sagittale Winkel	S. 59
5.8.3	Der coronare Winkel	S. 59
5.9	Empfohlene Schraubenlänge	S. 60
5.10	Sonderstellung S1	S. 62
5.11	Spinalkanalform	S. 64
5.11.1	Spinalkanalbreite	S. 64
5.11.2	Spinalkanaltiefe	S. 64
5.11.3	Verhältnis Spinalkanaltiefe - transversaler Winkel - Spinalkanalbreite	S. 65
5.11.4	Spinalkanalform	S. 65
5.11.5	Spinaler Index	S. 66
5.12	Wirbelkörperform	S. 67
5.12.1	Wirbelkörperbreite	S. 67
5.12.2	Wirbelkörpertiefe	S. 67
5.12.3	Form der Wirbelkörper	S. 68
6.	Zusammenfassung des Literaturvergleichs	S. 69
7.	Neue Erkenntnisse, Möglichkeiten, Fortschritte	S. 70
<b>VI.</b>	<b>Zusammenfassung (Abstract)</b>	<b>S. 72</b>
<b>VII.</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>S. 73</b>
<b>VIII.</b>	<b>Anhang</b>	
1.	Tabellen	S. 84
2.	Legende	S. 86

## **I. EINLEITUNG**

Die Wirbelsäule bereitet vielen Menschen Beschwerden. Die Ursachen sind vielfältig und die Behandlung ist auch heutzutage noch häufig unbefriedigend. Operationen an der Wirbelsäule sind aufgrund der räumlichen Nähe zu dem Rückenmark und den Spinalnerven nach wie vor riskant. Daher ist eine exakte Kenntnis der Anatomie der Wirbelkörper unverzichtbar.

### **1. Historische Entwicklung der Wirbelsäulen Chirurgie**

#### **1. 1 Zur Geschichte der stabilisierenden Wirbelsäulen Chirurgie**

Operative Zugänge zu der Wirbelsäule wurden erstmalig 1892 in Frankreich und Italien durchgeführt, um tuberkulöse Abszesse zu entfernen (Bick, 1964). Die Tuberkulose war früher ein weit verbreitetes Krankheitsbild und brachte viele Folgeschäden mit sich. Wirbelkörperdestruktionen und die damit einhergehende Pott'sche Trias mit Lähmungen, Gibbus und Abszeßbildung erforderten Versteifungsoperationen und Dekompressionen des Spinalkanals.

Zunächst wurden Fusionen zur Versteifung der Wirbelsäule nach Albee und nach Hibbs (1911) durchgeführt. Indikationen waren Tuberkulose und progressive Skoliose. Hibbs durchtrennte die Dornfortsätze der entsprechenden Wirbelkörper und faltete sie übereinander, so daß der craniale auf dem caudalen aufgestützt war. Albee spaltete den Dornfortsatz und setzte einen tibialen Knochenspan ein. Diese Operationen führten zu vielen Pseudarthrosen (Bick, 1964).

Die Gewinnung der Knochenspäne zum Einsatz in der Wirbelsäulen Chirurgie, ihre Formung und die Art der Anlagerung wurden immer wieder variiert (LaFond, 1962; Truchly und Thompson, 1962).

Cloward postulierte bereits 1952, daß alle Bandscheibenoperationen mit Fusionen der beteiligten Wirbelkörper einhergehen sollten, weil nur dies eine permanente Heilung verspräche. Anteriore Zugänge wurden wegen der mechanischen Effektivität schon lange für die beste Methode erachtet. Cloward beschrieb nun eine Fusion von dorsal, mit subtotaler Bandscheibenentfernung, bilateraler Laminektomie und Einfügen von drei oder mehr Knochenblöcken aus dem Beckenkamm. Die Facettengelenke wurden bei dieser Technik nicht versteift. Die Heilungsrate lag 30% bis 50% höher als bei der alleinigen Bandscheibenoperation (Cloward, 1953).

Die ersten Stabilisationsoperationen mit metallenen Hilfsmitteln wurden 1891 von Hadra und 1909 von Lang durchgeführt. Hadra fixierte dislozierte Frakturen mit

Drähten, die um die angrenzenden Dornfortsätze gewunden wurden. Lang fixierte Eisenstäbe entlang der Dornfortsätze mit Draht oder Seide (Bick, 1964).

Von 1947 bis 1960 arbeitete Harrington intensiv an der Entwicklung und Verbesserung seines Instrumentariums. Er begann mit anatomischen Studien an Patienten mit neuropathischer Skoliose als Folge einer Poliomyelitis. Die ersten operativen Eingriffe führte er von 1949 bis 1954 an 19 Patienten durch. Er veränderte nicht nur die Instrumente und das Fixationssystem, sondern auch den operativen Zugang und die klinische Pflege. Bis 1960 hatte er seine Methode etabliert und weitere 104 Patienten behandelt. Verwendet wurden Haken und Stäbe aus rostfreiem Stahl. Die Haken konnten an der Lamina, den Querfortsätzen oder den Gelenkfortsätzen angebracht werden. Nachteilig blieb jedoch die lange Ruhigstellung der Patienten.

Bis 1973 führte er noch verschiedene Verbesserungen durch. Für Skoliosen war diese Methode geeignet, nicht jedoch zur Fixierung einzelner Segmente (Harrington, 1962, 1967, 1969, 1973). Willen et al. kritisierten 1984, daß zwar eine gute Begradigung der Wirbelsäule erreicht wurde, aber bei spinalen Engen die Instrumentation nach Harrington nicht indiziert war (Willen et al., 1984).

Boucher beschrieb 1959 als erster einen dorsalen Zugang mit Fixierung durch Pedikelschrauben im lumbosacralen Übergang (Boucher, 1959). Dies war eine elementare Erneuerung.

Graham erhöhte die Stabilität (Graham, 1979). Ihm folgten 1964 Pennal et al. (Pennal et al., 1964).

1984 stellte Magerl den Fixateur extern (ESSF) zur Stabilisierung der Wirbelsäule vor, welchen er seit 1977 bereits in klinischem Gebrauch hatte (Magerl, 1984).

1985 entwickelten Magerl und Dick in Zusammenarbeit diesen Prototyp so weit, daß er vollkommen versenkbar war, Internal Skeletal Fixation System (ISFS). Dick benutzte hierzu Schanz-Schrauben, welche in der sagittalen Richtung variabel mit Stäben verbunden waren (Dick et al., 1985).

Roy-Camille und Steffee verbesserten in den achtziger Jahren diese Systeme durch Verwendung von variablen Platten und Pedikelschrauben, die in der gesamten Wirbelsäule für einzelne Segmente eingesetzt werden konnten (Roy-Camille et al., 1976, 1986, 1986). Steffee et al. bevorzugten die variable Schraubenplatzierung mit Posterior Lumbar Interbody Fusion (PLIF) (Steffee et al., 1988).

Krag bemerkte, daß 15° anteromediale Neigung der Schraube 8 bis 10 mm Längengewinn brachte und damit zu einer Erhöhung der Stabilisation führte. 1985 stellten Krag et al. den Vermont Spinal Fixator (VSF) vor. Dieser sorgte für Einbeziehung von nur zwei bis drei Segmenten, nicht fünf bis sieben, wie bei den Harrington Spondylo-

desen. Eine Fixierung in allen drei Ebenen und Korrekturen in allen drei Ebenen waren möglich. Die Verletzungsgefahr des Spinalkanals war verringert, durch die Verwendung von transpedikulären Schrauben und den Verzicht auf Drähte oder Haken. Weitere Vorteile waren die komplette Versenkung (nicht wie beim Fixateur Extern von Magerl), der dorsale Zugang und die Vermeidung einer zweiten Operation zur Entfernung des Synthesematerials (Krag et al., 1986, 1988, 1988).

## 1. 2 Biomechanische Bedeutung der Pedikel

Es war durchaus logisch, die Pedikel als Fixierungsgrundlage zu nehmen, da sie sich auch aus biomechanischer Sicht dazu anbieten. Die Bogenwurzel (Pedikel) war biomechanisch die stärkste Struktur des Wirbels (Steffee et al., 1986). Daher wurde sie für die Anbringung von Schrauben zur Stabilisierung der Wirbelsäule bevorzugt. Steffee bezeichnete den Punkt, an dem der Processus transversus, die Lamina, der obere und untere Gelenkfortsatz und der Pedikel zusammentreffen, als „force nucleus“ (Steffee et al., 1986). Der Pedikel als „force nucleus“ erschien Steffee so wichtig, daß er bei Wirbelkörperersatz zusätzlichen Pedikellersatz vorschlug. Diese hemizylindrischen künstlichen Pedikel aus Polyethylen mit hoher Dichte konnten mit seinem Schrauben-Platten-System kombiniert werden (Steffee et al., 1986, 1986, 1988).

Alle Kräfte, die von dorsal auf den Wirbelkörper wirken, mußten durch diesen Punkt („force nucleus“). Gleichzeitig war der Pedikel der anatomisch limitierende Faktor für den Durchmesser der Schraube und von funktionaler Bedeutung für Bewegung und Kraftübertragung. Daher konnte durch Kontrolle des Pedikels Einfluß auf den gesamten Wirbelkörperkomplex genommen werden. Dies war bei Fixationen erwünscht.

Je größer der Schraubendurchmesser war, desto größer war der „pull out strength“. Der „pull out strength“ war die Kraft, die aufgewendet werden mußte, um die Pedikelschraube aus ihrer Position zu verändern (Krag et al., 1989).

Je größer der „pull out strength“ war, desto höher war die Stabilität. Damit hatte der Schraubendurchmesser einen großen Einfluß auf die Stabilität und den Operationserfolg. Daher waren exakte anatomische Daten zu den Pedikeln von großer Bedeutung für die Wirbelsäulen Chirurgie, um die jeweils größtmögliche Schraube auszuwählen.

## 1. 3 Einsatz der Computer Tomographie in anatomischen Studien

Vor Einführung der Computer Tomographie in die Diagnostik, mußten konventionelle Röntgenbilder ausreichen. Diese wurden üblicherweise in a. p. (anterior - posterior)

und seitlich angefertigt. Man erhielt ein Summationsbild aller im Strahlengang liegenden Strukturen. Durch die Strahlenkonvergenz und den Abstand der Strahlenquelle zum Film, wurden die ventralen Strukturen größer abgebildet, als die dorsal liegenden. Diese Faktoren erschwerten exakte Größenbestimmungen. Besonders bei kleinen anatomischen Objekten, wie den Pedikeln. Dennoch mußte diese Technik früher genügen, und es wurden viele anatomische Messungen an Röntgenbildern durchgeführt.

1934 veröffentlichten Elsberg und Dyke erstmals Normwerte für den interpedikulären Abstand, welcher der Spinalkanalbreite entsprach. Die genaueste Studie zu diesem Thema erhoben Hinck et al. 1966. Sie teilten ihr Patientengut in Altersgruppen auf und verwendeten a. p. Röntgenbilder. Ihr Hauptinteresse galt der Festlegung einer Normkurve für die jeweiligen Altersklassen. Abweichungen wiesen differentialdiagnostisch auf intraspinale Tumore oder spinale Enge hin. Eine wichtige Erkenntnis war, daß die Spinalkanalbreite von Dreijährigen bis zum Erwachsenenalter um 3 bis 5 mm zunahm. Natürlich sind die heutigen Möglichkeiten der Diagnostik und Messung von Strecken erheblich genauer, aber schon damals wurde die Bedeutung genauer Zahlen, und damit die Erstellung einer Norm, erkannt (Hinck et al., 1966).

Die praeoperative Diagnostik war besonders wichtig. Aber auch die intraoperative Kontrolle mußte gewährleistet sein. 1990 erhoben Grob et al. die Forderung, daß zu der genauen intraoperativen Platzierung der Schraube der C-Arm der Röntgenröhre zu der Durchleuchtung entsprechend der Pedikelachse gekippt werden sollte. So konnte die Ellipsenform des Pedikels identifiziert und auch die mediale Wand abgegrenzt werden. Falls dies nicht ausreichte, konnte ein intraoperatives Myelogramm durchgeführt werden (Grob et al., 1990). Die Beurteilung der medialen Pedikelwand war von besonderer Bedeutung, da hier die meisten Penetrationen erfolgten und die Gefahr der Rückenmarksverletzung bestand (Sjöström et al., 1993).

Bei Penetration der Wirbelkörpervorderkante konnten die großen Blutgefäße verletzt werden. Krag et al. empfahlen, den Strahlengang so zu kippen, daß die Wirbelkörpervorderkante tangential getroffen wurde. Beim streng seitlichem Strahlengang entstand ein Summationsbild der ovalen Kante und eine eventuelle Penetration einer nicht ganz mittigen Schraube konnte übersehen werden (Krag et al., 1988).

Schon vor Einführung der Computer Tomographie wurden die Vorteile der transversalen Schichtung erkannt. Gargano et al. veröffentlichten noch 1974 einen Artikel, welcher die Technik der konservativen Schichtung in transversaler Ebene beschrieb. Eine Röntgenröhre wurde in einem Winkel von 20° in zwei Meter Entfernung zum Röntgenfilm fixiert und rotierte axial um den dazwischen liegenden Patienten. Diese Technik wurde auch „axial transverse statigraphy“ genannt und schon 1947 von

Vallebona in Italien und Frain und Lacroix in Frankreich nahezu gleichzeitig entwickelt. Natürlich konnte die Bildqualität nicht an die der Computer Tomographie heranreichen (Gargano et al., 1974).

Die anatomischen Daten konnten von Studien an Präparaten direkt gewonnen werden. Daraus wurden Normwerte ermittelt. Aber es war nicht gewährleistet, daß alle Parameter auf den lebenden Patienten übertragbar waren. Außerdem mussten die individuellen Unterschiede beachtet werden. Heute hat man mit der Computer Tomographie eine gute und genaue Möglichkeit, nicht-invasiv individuell die anatomischen Verhältnisse an Patienten zu klären.

1972 wurde die Computer Tomographie im Patientenbetrieb eingeführt. 1979 erhielten der amerikanische Physiker A. M. Cormack und der britische Ingenieur G. N. Hounsfield den Nobelpreis für Medizin. Ihre Arbeiten waren entscheidend für die Entwicklung der Computer Tomographie (Hounsfield, 1973).

Bei der Computer Tomographie durchdrangen gebündelte Röntgenstrahlen aus verschiedenen Richtungen senkrecht zur Körperachse eine Körperschicht. Aus den so gewonnenen Meßdaten konnte ein überlagerungsfreies Querschnittsbild rechnerisch rekonstruiert werden. Im Gegensatz zum konventionellen Röntgen wurde nur die abzubildende Körperquerschicht durchstrahlt.

Die numerischen Daten konnten nun auch in alternative Ebenen (Rekonstruktionen) umgewandelt werden. Diese waren qualitativ um so besser, je dünner die Schichtdicke war. Auch bei 2 mm Schichtdicke und 2 mm Tischvorschub fand eine rechnerische Begradigung der Darstellung statt. Dies führte durch die Übertragung von 3D Daten auf 2D Daten zu einer leichten Ungenauigkeit (Unschärfe) des Bildes, die sich jedoch aus Strahlenschutzgründen nicht vermeiden ließ.

Die computertomographische Abbildung auf dem Monitor war maßstabsgetreu und zeigte eine schematische Anordnung von Grauwerten entsprechend den Röntgendichten in einer Schicht. Allein das Topogramm war in der x-Achse durch die Strahlenkonvergenz (in der richtigen Messung wurde dieser Effekt durch nebeneinander liegende Strahlenquellen ausgeschaltet) nicht exakt maßstabsgetreu. Allerdings waren auch hier Messungen in der y-Achse möglich.

Der entscheidende Fortschritt war, die Möglichkeit, auch Weichteile von nur geringem Dichteunterschied getrennt darzustellen. Die Computer Tomographie ermöglichte die getrennte Beurteilung von trabekulären und kortikalen Knochenanteilen. Weiterhin wurde durch die Schichtbildtechnik der Summationseffekt der konventionellen Röntgenbilder ausgeschaltet. Ein großer Teil der Bildinformation ging bei konventionellen Röntgenbildern verloren durch die Abbildung einer Vielzahl von

Informationen eines dreidimensionalen Körpers auf einem zweidimensionalen Röntgenfilm. Durch die Computer Tomographie konnten einzelne Objekte, unabhängig von davor oder dahinter liegenden Objekten, dargestellt werden. Schon 1973 erkannte Hounsfield, daß durch diese neue Technik ein neues Kapitel in der Röntgendiagnostik geöffnet wurde.

Hammerschlag et al. stellten 1976 zwar noch die Bedeutung der Computer Tomographie zur Diagnostik des Rückenmarks in Frage, aber z. B. spinale Stenosen ließen sich schon damals gut verifizieren (Hammerschlag et al., 1976). Die Schichtdicke betrug 8 oder 13 mm. Die Änderung der Gantrykipfung während der Untersuchung wäre zu aufwendig gewesen. Aber die Bilder waren schon sehr brauchbar, auch wenn die Untersuchungszeit noch recht lang war.

Zu Beginn der Computer Tomographie Aera wurden wegen der schlechten Dichteauflösung intrathekale Kontrastmittel gegeben. Bis heute wurde die Technik so weit verbessert, daß dies nicht mehr notwendig ist und die Untersuchung nicht-invasiv durchgeführt werden kann. Die Untersuchungszeit hat sich durch die Einführung der Spiral Computer Tomographie massiv verkürzt. Rekonstruktionen von hoher Qualität sind in allen Ebenen möglich, und es können Schichtdicken von 1 mm benutzt werden.

Rauschnig bewies in einer Studie von 1983 (Rauschnig, 1983), Krag et al. im Jahre 1986, daß computertomographische Schnittbilder akkurat mit der Anatomie von Gefrierschnitten übereinstimmten (Krag et al., 1986).

Misenheimer et al. fanden beim Vergleich direkter Messungen an Präparaten zu computertomographischen Messungen eine gute Korrelation (0,33 mm Unterschied).

Karaikovic et al. hatten an 53 Präparaten von C2 bis C7 sowohl direkte, als auch computertomographische Messungen durchgeführt. Sie kamen zu einem Korrelationskoeffizienten von 0,81 - 0,87. Damit kamen sie zu dem Schluß, daß computertomographische Untersuchungen für Operationsplanungen zuverlässig waren. Es bestand also eine gute Korrelation von Messungen an Computer Tomographie Bildern zu direkten Messungen an Präparaten (Karaikovic et al., 1997).

## **2. Ziel und Arbeitshypothese**

Es war bemerkenswert, daß trotz der verbesserten bildgebenden Verfahren die Messung der anatomischen Daten nicht parallel mit der Entwicklung der Pedikelschrauben verlief. Obwohl viele verschiedene Fixations-Systeme angeboten wurden und die Effektivität erwiesen war, gab es noch viele Fehlerquellen, die zu Irritationen der spinalen Nerven oder gar des Rückenmarks führten.

Diese Fehler waren häufig durch die Wahl einer unpassenden Pedikelschraube (in

Länge und Durchmesser), Fehlplatzierungen oder Schraubenpenetration bedingt. Mit der praeoperativen Festlegung der individuellen anatomischen Daten, konnten diese Unsicherheiten minimiert werden. Das Hauptproblem war, daß in den meisten vorhandenen Studien die anatomischen Werte einschließlich der Corticalis gemessen wurden. Die exakte Schraubenplatzierung benötigte jedoch endostale Werte. Nur sehr wenige Autoren erkannten den Stellenwert des Pedikellinnendurchmessers: An et al. (1991), Karaikovic et al. (1997), Banta et al. (1989), Misenheimer et al. (1989), Kothe et al. (1996), Moran et al. (1989) und Islam et al. (1994, 1996). Dabei waren für die praktische klinische Anwendung und zur weiteren Verbesserung des Instrumentariums nur die endostalen Pedikeldurchmesser wichtig. Doch die Wichtigkeit der endostalen Werte zur Vermeidung der obengenannten Fehlerquellen wird auch heute noch von vielen Autoren nicht gesehen.

In der vorliegenden Studie wurden Messungen mit Hilfe computertomographischer Bilder von Wirbelkörpern und Pedikeln an Patienten durchgeführt. Es sollten Normwerte eines durchschnittlichen Patientenkollektivs aufgestellt werden. Diese wurden mit Angaben aus der Literatur verglichen. Die Literatur bezog sich auf Messungen sowohl an Präparaten als auch an Patienten.

Ziel dieser Arbeit war es, zu klären:

- 1.) ob bei Durchführung einer routinemäßigen Computer Tomographie mit üblicher Schichtdicke ausreichende Informationen über die Pedikelweiten zu bekommen sind;
- 2.) ob die Routine-Untersuchungen mit der Computer Tomographie ausreichende Daten über Wirbelkörpergröße und Achsverhältnisse der Pedikel zu liefern vermögen, um verlässliche Aussagen über z. B. Schraubenrichtung und Schraubentiefe zu treffen;
- 3.) ob die, für transpedikuläre Eingriffe wichtige, operativ bedeutsame Pedikellänge mit ausreichender Genauigkeit ermittelt werden kann.

Es wurden sowohl Innen- als auch Außendurchmesser gemessen, um einen Literaturvergleich zu ermöglichen. Durch den Vergleich mit an Präparaten erhobenen Daten, sollte die Genauigkeit der computertomographischen Werte verifiziert werden.

Eine Forschung auf diesem Gebiet ist nach wie vor erforderlich, da es noch immer zu Fehlplatzierungen der Pedikelschrauben und Pseudarthrosenbildungen kommt.

## **II. METHODEN**

### **1. Beschreibung der Versuchsdurchführung und Versuchsbedingungen**

Für die röntgenmorphometrischen Messungen an der Wirbelsäule wurden computertomographische Untersuchungen einzelner Wirbelkörper benötigt. Hierzu konnte in der vorliegenden Arbeit auf das umfangreiche Patientengut aus der Radiologischen Gemeinschaftspraxis Drs. Halbsguth / Lochner, Frankfurt am Main, zurückgegriffen werden. Die relevanten Untersuchungsdaten wurden gekennzeichnet und abgespeichert. So konnten zu einem beliebigen Zeitpunkt die Daten aufgearbeitet, die Messungen durchgeführt und jederzeit wiederholt werden.

Die computertomographische Schnittführung wurde immer parallel zur Bandscheibe, d.h. parallel zur jeweiligen Deck- oder Grundplatte gelegt. Da die Untersuchungen im normalen Praxisbetrieb vorgenommen wurden und viele Medizinisch Technische Radiologie Assistentinnen (MTRAs) beteiligt waren, spiegeln sie durchschnittliche Bedingungen wider. Damit war eine Vergleichbarkeit mit allgemeinen Computertomographie Bildern gegeben.

### **2. Geräte, Technik und Datenerfassung**

Die Untersuchungen wurden an zwei vergleichbaren Geräten durchgeführt: Siemens Somatom HIQ mit der Software D30A und Siemens Somatom HIQS mit der Software VB2. Die Patienten wurden in Rückenlage, möglichst mittig und gerade gelagert. Für die bessere Darstellung der unteren Halswirbelsäule (HWS) wurden die Arme nach caudal gezogen und mit Gurten fixiert. Zum Ausgleich der Lordose der Lendenwirbelsäule (LWS) bekamen die Patienten eine Knierolle und mußten die Arme aus dem Strahlengang heraus über den Kopf nehmen.

Die Lendenwirbelsäule (LWS) wurde mit 3 mm Schichtdicke und 4 mm Tischvorschub bei 325 mAs, 133 kV, high untersucht; die Brustwirbelsäule (BWS) mit 3 mm Schichtdicke und 3 mm Tischvorschub, 240 mAs, 133 kV, ultrahigh; die Halswirbelsäule (HWS) mit 2 mm Schichtdicke und 2 mm Tischvorschub, 240 mAs, 133 kV, high.

Die Strecken wurden im Knochenfenster im distance mode am Monitor direkt vermessen.

Wie Koehler et al. bereits 1979 feststellten, war die Fenstereinstellung am Computer

Tomographen außerordentlich wichtig, um die Ergebnisse vergleichbar zu machen. Die Fensterweite (window width) war nicht so ausschlaggebend, wie die Fenstermitte (window center). Diese hatte einen entscheidenden Einfluss auf die Schärfe der Randkonturen, auf welche die vorliegenden Messungen stark angewiesen waren. Schon geringe Abweichungen führten zur Änderung der Messergebnisse um mehrere Millimeter.

Die Messungen wurden ausschließlich im Knochenfenster durchgeführt, mit einer Weite von 2000 Hounsfield Units (HU) und einem Center von 450 HU. Diese Einstellung war für Knochen optimiert, dafür waren Weichteile schlechter beurteilbar.

### **3. Patienten**

Für die Untersuchung wurden Daten aus einem normalen Patientenkollektiv verwendet, welches wegen unterschiedlicher Indikationen (hauptsächlich Bandscheibenproblematik) zur computertomographischen Untersuchung überwiesen wurde. Das bedeutete, daß es sich um keine randomisierte Patientengruppe handelte, sondern um Patienten, die zumindest Rückenschmerzen hatten. Andererseits handelte es sich nicht um eine selektive Stichprobe, da kein ausgewähltes Krankheitsbild oder Krankengut untersucht wurde, sondern ein breites Spektrum erfaßt wurde. Die interindividuelle Variabilität wurde damit repräsentiert. Für die Auswertungen wurden lediglich nicht-pathologische Wirbelkörper und Pedikel herangezogen.

Aufgrund der Strahlenbelastung sollte diese Untersuchung nicht an Freiwilligen durchgeführt werden.

Das Alter der 174 untersuchten Patienten lag zwischen 19 und 87 Jahren (im Schnitt 51 Jahre), es wurden 76 Männer und 98 Frauen untersucht. Von diesen 174 Patienten wurde jeweils ein Wirbelkörper für die vorliegende Arbeit ausgemessen. Bei allen verwendeten Wirbelkörpern wurde jeweils der rechte und der linke Pedikel ausgemessen. Aus Strahlenschutzgründen wurde der zu untersuchende Bereich so stark wie möglich eingegrenzt. Es wurden Daten von cervical (C)2 bis sakral (S)1 erfaßt. Da im thorakalen Bereich seltener Beschwerden auftraten, konnte hier nur ein geringerer Umfang erhoben werden.

**Die Anzahl der untersuchten Wirbelkörper setzte sich wie folgt zusammen:**

<b>C2:</b> 6	<b>TH01:</b> 4	<b>L1:</b> 8	<b>S1:</b> 3
<b>C3:</b> 13	<b>TH02:</b> 1	<b>L2:</b> 10	
<b>C4:</b> 10	<b>TH03:</b> 3	<b>L3:</b> 11	
<b>C5:</b> 13	<b>TH04:</b> 3	<b>L4:</b> 9	
<b>C6:</b> 12	<b>TH05:</b> 5	<b>L5:</b> 15	
<b>C7:</b> 15	<b>TH06:</b> 3		
	<b>TH07:</b> 5		
	<b>TH08:</b> 5		
	<b>TH09:</b> 5		
	<b>TH10:</b> 3		
	<b>TH11:</b> 3		
	<b>TH12:</b> 9		

Es konnten nicht bei allen Wirbelkörpern alle Daten erhoben werden, da teilweise durch die knappe Schichtführung (aus Strahlenschutzgründen) die cranialen oder caudalen Begrenzungen für die Rekonstruktionen abgeschnitten waren.

Alle Messungen wurden von nur einem Untersucher durchgeführt. Dadurch waren sie gut miteinander vergleichbar. Um den Fehler der subjektiven Festlegung der Meßstrecken zu vermeiden, wurden diese weitestgehend anatomisch standardisiert. Dies war nicht immer möglich, wie später näher ausgeführt wird.

Da bei den Messungen auf vorhandene Daten zurückgegriffen wurde, konnte die Körpergröße der Patienten nicht mehr ermittelt werden. Inwieweit diese Einfluß auf die erhobenen anatomischen Daten hatte, konnte in dieser Studie nicht ausgesagt werden. Auch die ethnische Zugehörigkeit der Patienten wurde nicht aufgegliedert, jedoch hat Frankfurt einen hohen Ausländeranteil, so daß von einer repräsentativen Mischung an Europäern ausgegangen werden kann.

### III. GEMESSENE STRECKEN UND WINKEL

#### 1. Pedikelaußen- und -innendurchmesser (E, F, G, H)

Die Pedikelaußen- und -innendurchmesser wurden in den transversalen Schichten gemessen, wobei darauf zu achten war, eine mittlere Schicht mit schmalstem Durchmesser auszuwählen. Die Strecke stand im rechten Winkel zur Pedikelachse und bezog bei dem Außendurchmesser die Compacta mit ein (rechts: E, links :F) (siehe Abb. III. 1), bei dem Innendurchmesser (rechts: G, links: H) (siehe Abb. III. 2) nicht.

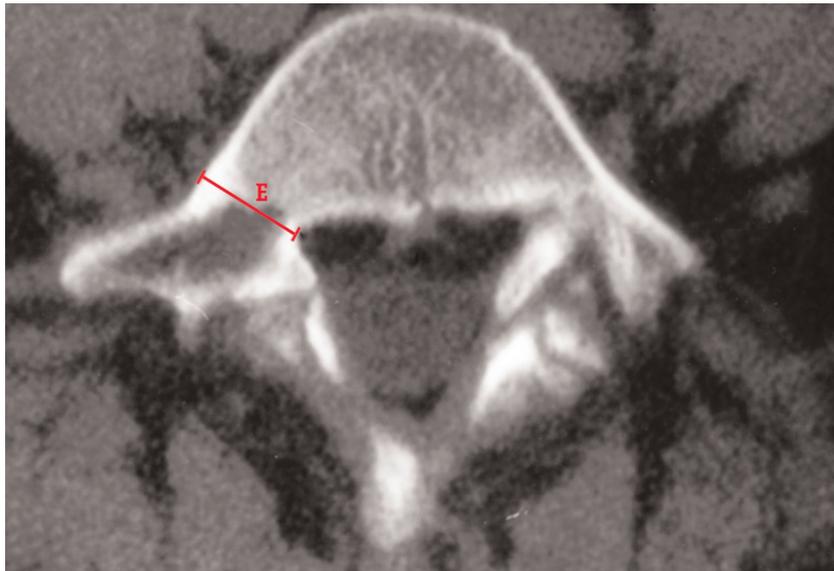


Abb. III. 1: Computer Tomographie eines Lendenwirbelkörpers, Pedikelaußendurchmesser rechts (E) mit Compacta



Abb. III. 2: Computer Tomographie eines Lendenwirbelkörpers, Pedikelinnendurchmesser rechts (G) ohne Compacta

## 2. Pedikellänge (I, J, AC, AD, AE, AF)

Die Pedikellänge wurde in verschiedenen Ebenen gemessen. Die transversale Schicht lieferte in unserem Fall das genaueste Ergebnis, da dies die Originalschicht war.

Zur Normierung wurden zwei streng coronare Tangenten als Hilfslinien an die ventrale und dorsale Begrenzung des Spinalkanals angelegt. Die Strecke zwischen diesen beiden Tangenten in der Pedikelachse wurde als Pedikellänge (rechts: I, links: J) (siehe Abb. III. 3) definiert. Die ventrale Begrenzung entsprach der Lage der Pedikelwurzel (Übergang von Wirbelkörper zu Pedikel).

Zum anderen wurden die Strecken von der dorsalen Tangente bis zur ventralen Wirbelkörperbegrenzung (ohne Compacta) in Pedikelachse (rechts: AC, links: AD) gemessen (siehe Abb. III. 5). Dies entsprach der Pedikellänge mit anschließender Wirbelkörperlänge bis zur Compacta (in der Literatur auch als chord length bezeichnet). Die selbe Messung wurde auch streng sagittal (rechts: AE, links: AF) durchgeführt (siehe Abb. III. 6). Diese Pedikelsagittale entsprach der Schraubenlänge bei streng sagittal eingeführten Pedikelschrauben, wie von Roy-Camille et al. 1986 durchgeführt.

Diese Messungen waren im HWS und BWS Bereich häufig nicht möglich, da die Pedikel mehr nach lateral als nach dorsal tendieren, d.h. einen zu großen transversalen Winkel haben (siehe Abb. III. 4). Das führte dazu, daß die Tangente weiter dorsal lag, als es der Pedikellänge entsprach. Wenn die Hinterkante nicht sichtbar war, wurde die dorsalste knöcherne Struktur für die Tangentenlage ausgewählt.



Abb. III. 3: Computer Tomographie eines Lendenwirbelkörpers, Pedikellänge rechts (I) mit Hilfslinien an der ventralen und dorsalen Begrenzung des Spinalkanals

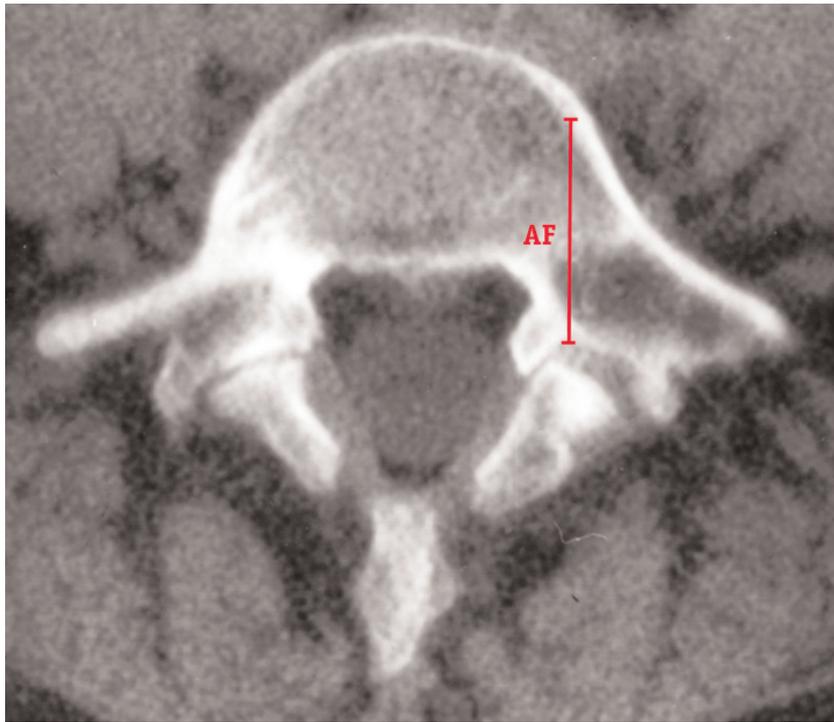


*Abb. III. 4: Computer Tomographie eines Lendenwirbelkörpers,  
Pedikellänge links (J)  
mit Hilfslinie an der ventralen Begrenzung des Spinalkanals*

*Die dorsale Begrenzung des Spinalkanals liegt durch den hohen transversalen Winkel weiter dorsal, als es der Pedikellänge entspricht.*



*Abb. III. 5: Computer Tomographie eines Lendenwirbelkörpers,  
Pedikellänge plus Wirbelkörper in Pedikelachse rechts (AC)  
Chordlength*



*Abb. III. 6: Computer Tomographie eines Lendenwirbelkörpers, Pedikellänge plus Wirbelkörper streng sagittal (AF) Pedikelsagittale*

### **3. Pedikelhöhe (K, L, Y, Z, AA, AB, AM, AN)**

Die Pedikelhöhe wurde in sagittalen Rekonstruktionen gemessen. Diese Rekonstruktionen wurden in Pedikelachse und parallel dazu in den transversalen Schichten angefertigt (siehe Abb. III. 7).

Gemessen wurden die Höhe (rechts: K, links: L) in Pedikelmittle (siehe Abb. III. 8, Strecke 2) und die Höhen am dorsalen Ende (rechts: Y, links: Z) unter Einbezug der Compacta (siehe Abb. III. 9) und am ventralen Ende (rechts: AA, links: AB) ohne Compacta, in Höhe der vorderen Spinalkanalbegrenzung (siehe Abb. III. 8, Strecke 1). Die distale Höhe konnte häufig nicht gemessen werden, da aus Strahlenschutzgründen das craniale oder caudale Ende nicht mehr von den transversalen Schichten erfaßt wurde.

Weiterhin wurde der Abstand (rechts: AM, links: AN) zwischen der Strecke der Höhe in Pedikelmittle (rechts: K, links: L) und der Strecke der ventralen Höhe (rechts: AA, links: AB) zur Standardisierung bestimmt (siehe Abb. III. 8, Strecke 3).



Abb. III. 7: Computer Tomographie eines Lendenwirbelkörpers, Ebenen, in denen sagittale Rekonstruktionen angefertigt wurden

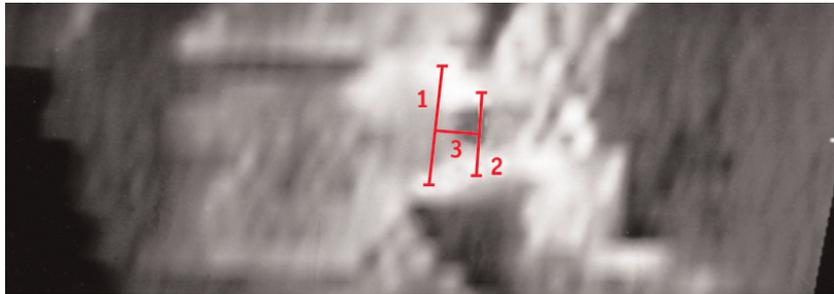


Abb. III. 8: Sagittale Rekonstruktion eines Lendenwirbelkörpers, Strecke 1: Pedikelhöhe am ventralen Ende ohne Compacta, in Höhe der ventralen Spinalkanalbegrenzung rechts (AA)

Strecke 2: Pedikelhöhe in Pedikelmittle mit Compacta rechts (K)

Strecke 3: Abstand zwischen der Strecke der Pedikelhöhe in Pedikelmittle und am ventralen Ende rechts (AM)

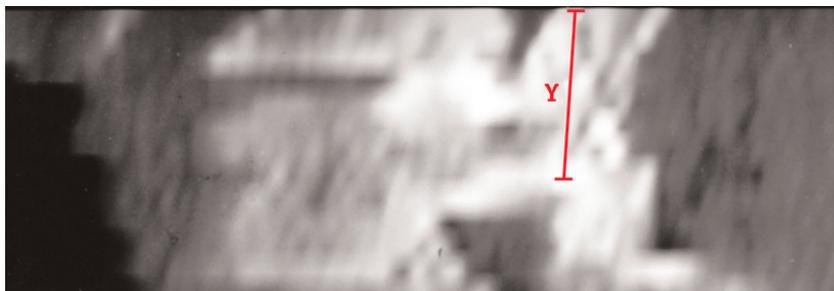


Abb. III. 9: Sagittale Rekonstruktion eines Lendenwirbelkörpers, Pedikelhöhe am dorsalen Ende mit Compacta rechts (Y)

#### 4. Wirbelkörperbreite und -tiefe, Ellipsenbreite und -tiefe (M, N, AO, AP)

Die Wirbelkörperbreite (M) wurde in der transversalen Ebene gemessen (siehe Abb. III. 10). Es wurde die jeweils breiteste Stelle in Wirbelkörpermitte ausgewählt. Die Compacta wurde nicht mitgemessen.

Die Wirbelkörpertiefe (N) wurde ebenfalls in der transversalen Ebene von der ventralen zur dorsalen Compactainnenseite in Wirbelkörpermitte gemessen (siehe Abb. III. 11).



Abb. III. 10: Computer Tomographie eines Lendenwirbelkörpers, Wirbelkörperbreite ohne Compacta in Wirbelkörpermitte gemessen (M)

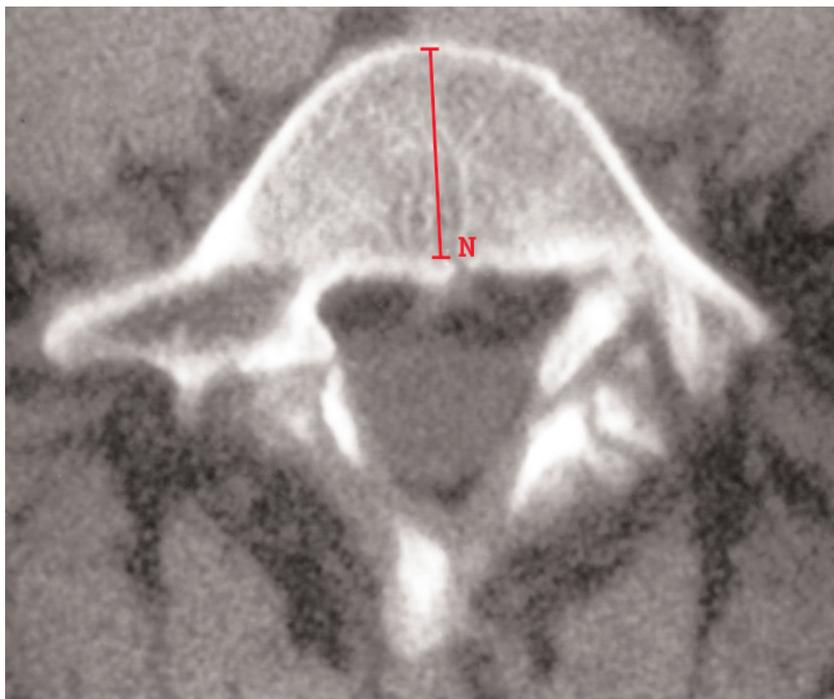
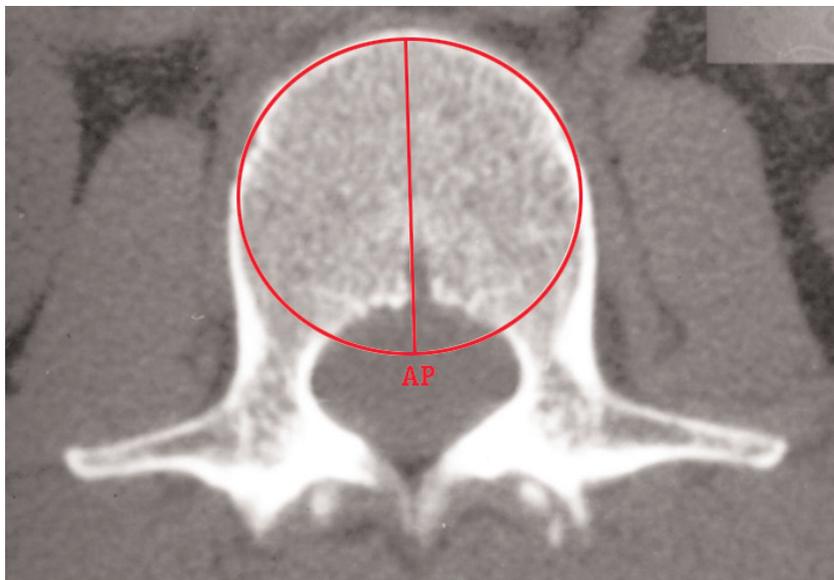


Abb. III. 11: Computer Tomographie eines Lendenwirbelkörpers, Wirbelkörpertiefe ohne Compacta in Wirbelkörpermitte gemessen (N)

Zur Normierung wurde der Form des jeweiligen Wirbelkörpers eine möglichst optimale, d. h. mit dem Deckplattenbereich deckungsgleiche Ellipse angepaßt. Diese verlief ohne Einbeziehung der Compacta durch den Spinalkanal und die Pedikelwurzeln. Ihre Breite (AO) (siehe Abb. III. 12) und Tiefe (AP) (siehe Abb. III. 13) wurde gemessen.



*Abb. III. 12: Computer Tomographie eines Lendenwirbelkörpers, Ellipsenhilfslinie eingezeichnet  
Ellipsenbreite (AO)*



*Abb. III. 13: Computer Tomographie eines Lendenwirbelkörpers, Ellipsenhilfslinie eingezeichnet  
Ellipsentiefe (AP)*

## 5. Spinalkanalbreite und -tiefe ( O, P)

Die Spinalkanalbreite (O) (siehe Abb. III. 14) und -tiefe (P) (siehe Abb. III. 15) wurden in transversalen Schichten gemessen, in der Ebene des schmalsten Pedikeldurchmessers. Die Spinalkanalbreite wurde in der Literatur auch als Pedikelabstand bezeichnet.

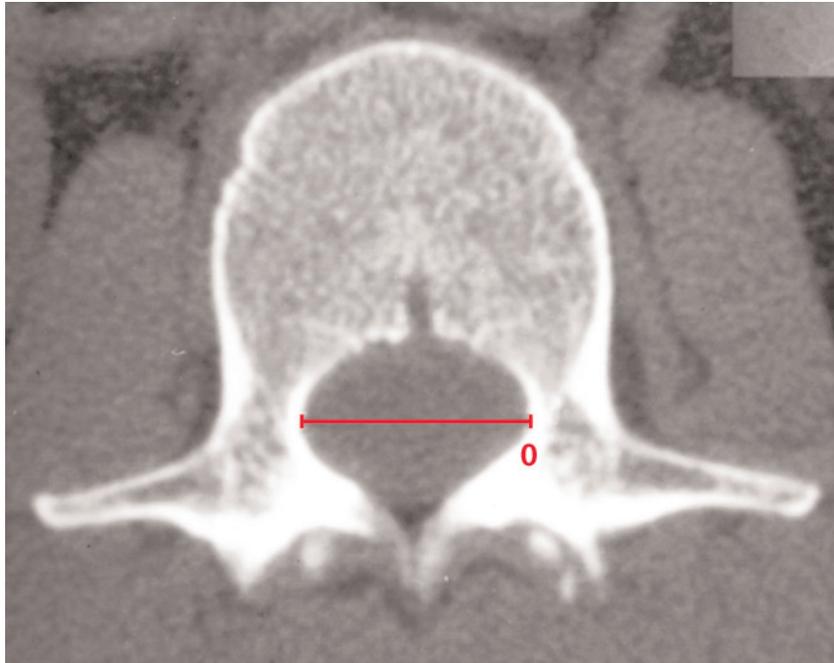


Abb. III. 14: Computer Tomographie eines Lendenwirbelkörpers, Spinalkanalbreite (O), Pedikelabstand

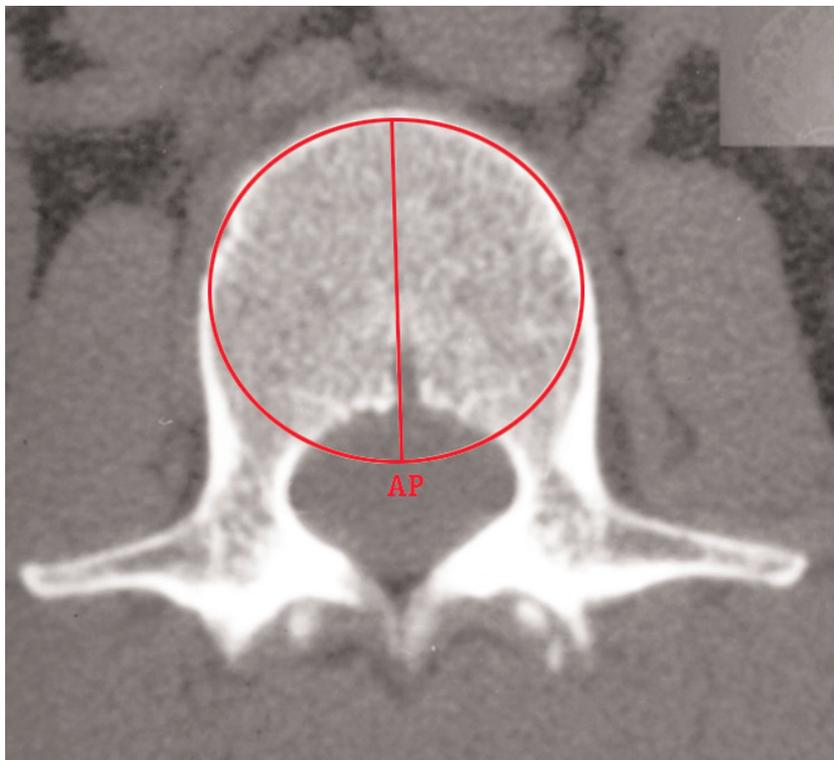
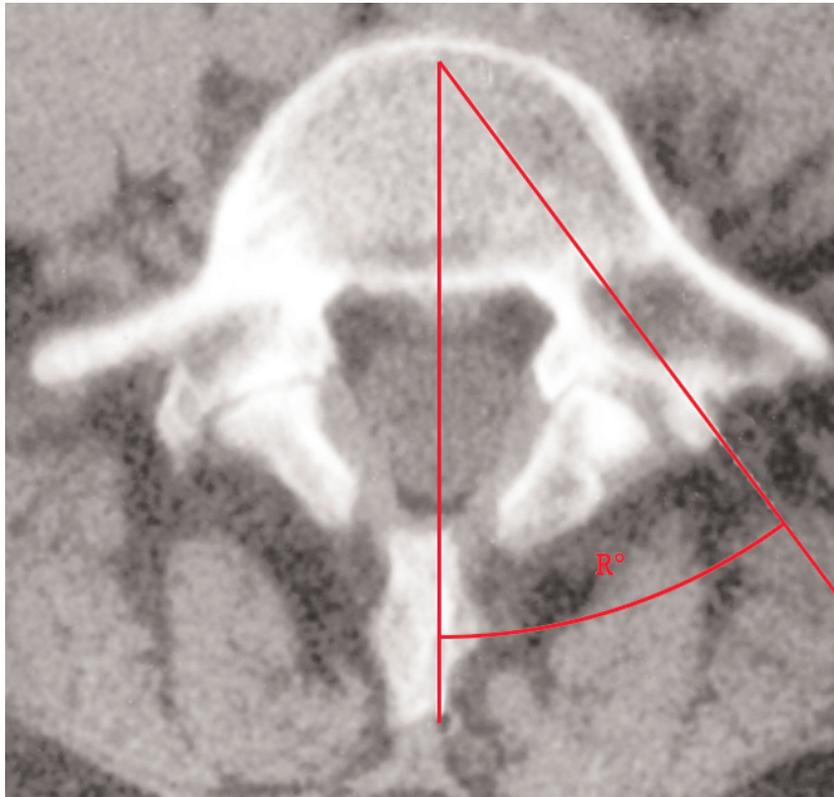


Abb. III. 15: Computer Tomographie eines Lendenwirbelkörpers, Spinalkanaltiefe (P)

## 6. Transversaler Pedikelwinkel (Q, R, S, T, AI, AJ, AK, AL)

Die transversalen Winkel wurden in den transversalen Schichten gemessen, in denen auch der schmalste Pedikeldurchmesser gemessen wurde.

Der transversale Winkel (rechts: Q, links: R) war der Winkel zwischen der Strecke durch die Pedikelachse und einer streng sagittalen Strecke durch oder parallel zum Dornfortsatz (siehe Abb. III. 16).



*Abb. III. 16: Computer Tomographie eines Lendenwirbelkörpers, positiver transversaler Winkel links (R) zwischen Strecke durch die Pedikelachse und streng sagittaler Strecke*

Öffnete sich der Winkel in anterior-posteriorer Richtung nach lateral, war er positiv, ansonsten negativ (siehe Abb III. 17, nur bei TH 08 und TH09 gefunden).

Für den Tangentialwinkel (rechts: S, links: T) wurde eine Tangente zur ventralen Begrenzung des Spinalkanals durch die Pedikelachse gelegt. Der Winkel zwischen dieser Tangente und der Strecke durch die Pedikelachse wurde bestimmt (siehe Abb. III. 18). Dieser Winkel war wichtig für die Beurteilung des coronaren Winkels.

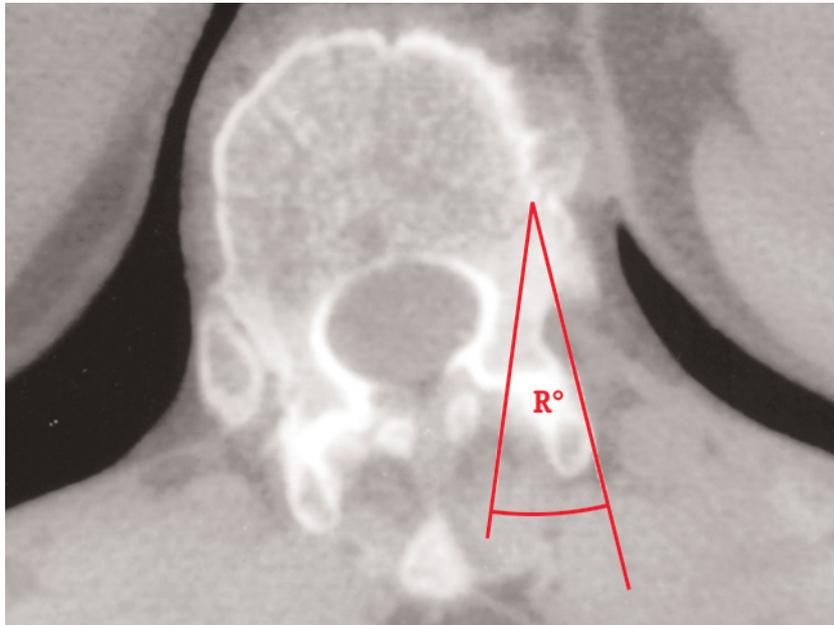


Abb. III. 17: Computer Tomographie TH08, negativer transversaler Winkel links (R) zwischen Strecke durch die Pedikelachse und streng sagittaler Strecke

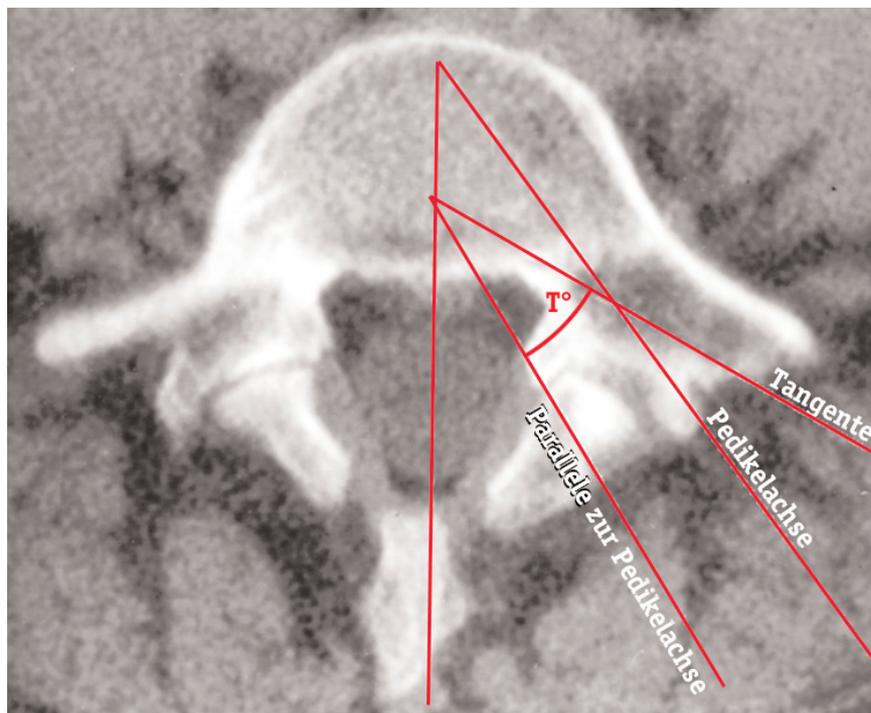


Abb. III. 18: Computer Tomographie eines Lendenwirbelkörpers, Tangentialer Winkel links (T) zwischen der Strecke der Pedikelachse und der Tangente zur ventralen Begrenzung des Spinalkanals

Außerdem wurden die transversalen Winkel in der (in die transversale Schicht eingezeichneten) Ellipse abgelesen. Hierfür wurden eine streng sagittale Strecke durch den Dornfortsatz und eine von der Pedikelwurzel (Pedikeleingang) ausgehende Gerade zum Ellipsenmittelpunkt (rechts: AI, links: AJ) (siehe Abb. III. 19) bzw. zum Mittelpunkt des breitesten Wirbelkörperquerdurchmessers (rechts: AK, links: AL) (siehe Abb. III. 20) gelegt und deren Winkel zueinander bestimmt. Auch diese Werte boten die Möglichkeit, eine standardisierte Form eines Wirbelkörpers festzulegen.

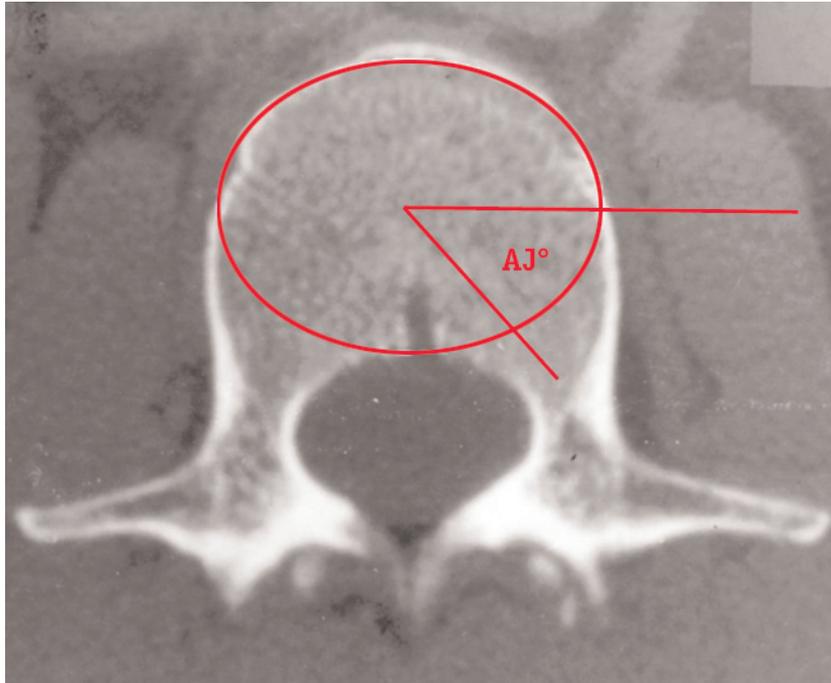


Abb. III. 19: Computer Tomographie eines Lendenwirbelkörpers, transversaler Winkel vom Pedikeleingang zum Ellipsenmittelpunkt (AJ) Ellipse als Hilfslinie eingezeichnet

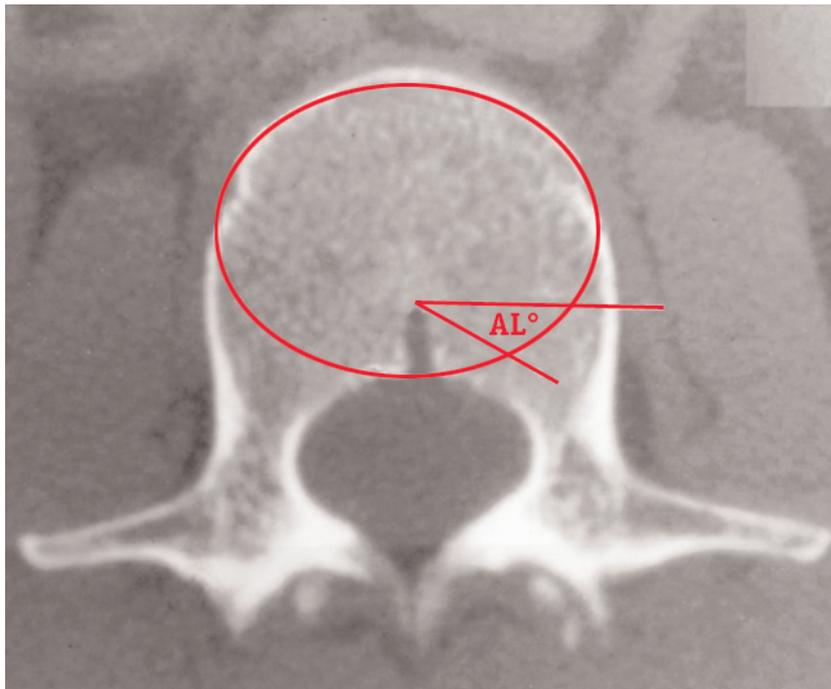


Abb. III. 20: Computer Tomographie eines Lendenwirbelkörpers, transversaler Winkel vom Pedikeleingang zum breitesten Wirbelkörperdurchmesser links (AL) Ellipse als Hilfslinie eingezeichnet

## 7. Coronarer Pedikelwinkel (U, V)

Um den coronaren Winkel (rechts: U, links: V) zu bestimmen, wurden coronare Rekonstruktionen angefertigt. Zur Standardisierung wurden sie parallel zur Wirbelkörperhinterkante gelegt und beide Winkel (rechts und links) in einer Rekonstruktionsschicht eingezeichnet (siehe Abb. III. 21).

Der Winkel wurde zwischen einer streng sagittalen, cranio-caudalen Strecke und einer Strecke durch die Hochachse in frontaler Ebene gemessen. Die Hochachse entsprach dabei der größten Pedikelhöhe in frontaler (coronarer) Ebene. War der Winkel nach caudal offen, wurde er negativ, nach cranial positiv bezeichnet (siehe Abb. III. 22, negativer Winkel).

Es entstand eine Ungenauigkeit durch die Wirbelkörperneigung in der sagittalen Ebene.



Abb. III. 21: Computer Tomographie eines Lendenwirbelkörpers, Ebenen, in denen coronare Rekonstruktionen angefertigt wurden

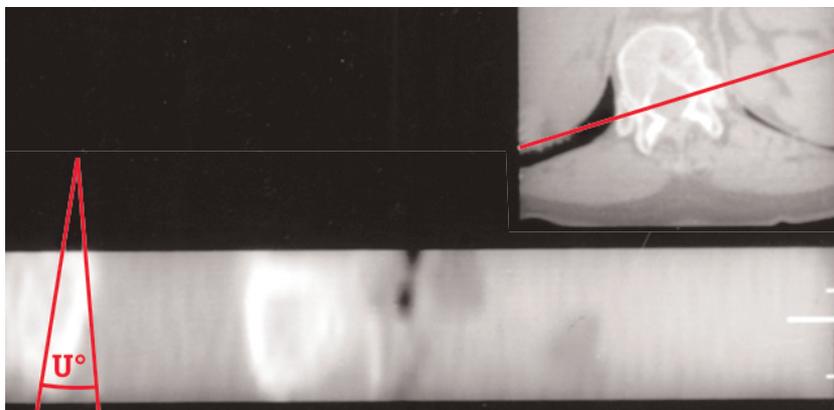


Abb. III. 22: Computer Tomographie eines Lendenwirbelkörpers, rechts oben: Ebene der coronaren Rekonstruktion

links unten: coronare Rekonstruktion, coronarer Winkel rechts (U) zwischen Strecke in frontaler Hochachse und streng sagittaler cranio-caudaler Strecke

## 8. Wirbelkörperabstände (W, X)

Die Wirbelkörperabstände wurden in dem sagittalen Übersichtsschnitt (Topogramm) gemessen. Gemessen wurde der Abstand von der Unterkante des nächsthöheren Wirbelkörpers bis zur Oberkante des Pedikels (W) (siehe Abb. III. 23) bzw. bis zur Unterkante des Pedikels (X) (siehe Abb III. 24).

Eigentlich eignete sich das Topogramm wegen der Verzerrung durch den Strahlenkegel nicht für Messungen. In der y-Achse waren diese Verzerrungen jedoch vernachlässigbar.

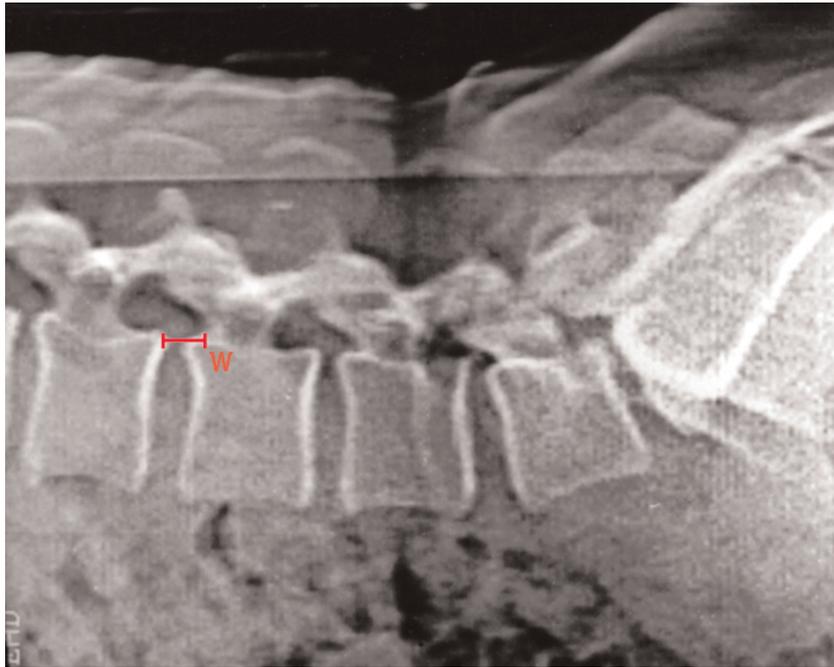


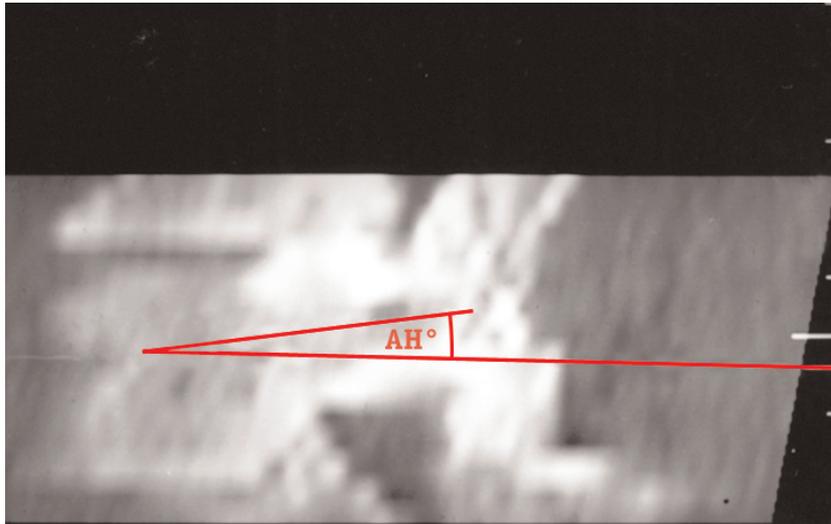
Abb. III. 23: Computertomographisches Topogramm (Übersichtsschnitt) Unterkante Lendenwirbelkörper (LWK) 2 bis Oberkante Pedikel LWK 3 (W)



Abb. III. 24: Computertomographisches Topogramm (Übersichtsschnitt) Unterkante LWK 2 bis Unterkante Pedikel LWK 3

### 9. Sagittaler Pedikelwinkel (AG, AH)

Der sagittale Winkel (rechts: AG, links: AH) wurde in den sagittalen Rekonstruktionen (siehe Abb. III. 7) bestimmt. Es wurde eine Tangente an die Wirbelkörperdeckplatte und eine Strecke in die Sagittalebene der Pedikelneigung entsprechend gelegt und der Winkel zwischen diesen beiden Strecken bestimmt. War die sagittale Pedikelachse nach cranial gerichtet, wurde der Winkel positiv, nach caudal negativ (siehe Abb. III. 25, positiver Winkel).



*Abb. III. 25: sagittale Rekonstruktion eines Brustwirbels, sagittaler Winkel links (AH) zwischen Strecke entsprechend der Wirbelkörperdeckplatte einer Strecke in der Sagittalebene entsprechend der Pedikelneigung*

## IV. ERGEBNISSE

Die vorliegende Arbeit beschäftigte sich mit der exakten anatomischen Vermessung von Wirbelkörpern am lebenden Patienten mittels Computer Tomographie. Die gewonnenen morphometrischen Erkenntnisse können sinnvoll in der Wirbelsäulenchirurgie eingesetzt werden, um Fehlplatzierungen der Pedikelschrauben zu vermeiden.

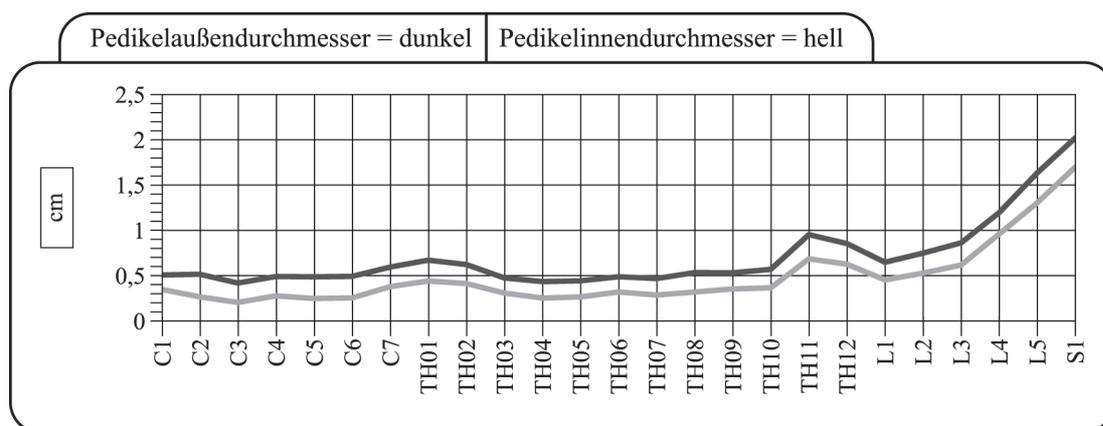
### Gemessene Strecken und Winkel

#### 1. Pedikelaußen- und -innendurchmesser

Der Pedikeldurchmesser nahm von cranial nach caudal zu, jedoch nicht kontinuierlich (siehe Graphik IV. 1 und Tab. IV. 1 bis IV. 2). Von C2 auf C3 zeigte sich eine Abnahme, danach wieder eine Zunahme mit einem deutlichen Größensprung von C6 auf C7.

Von TH02 bis TH04/05 nahm der Durchmesser stetig ab. Bei TH11 wurde der höchste Wert in der BWS erreicht.

Bis L2 fiel der Wert ab, stieg dann wieder und erreichte bei S1 sein Maximum mit über 2 cm.



Graphik IV. I: Pedikelaußen- und -innendurchmesser  
 Abszisse: Pedikel von C1 bis S1 (rechts und links zusammengefasst)  
 Ordinate: Durchmesser in cm  
 Pedikelaußendurchmesser: dunkel  
 Pedikelinnendurchmesser: hell

Pedikelaußendurchmesser	Wirbelkörper	C2	C3	C4	C5	C6	C7	TH01	TH02	TH03	TH04	TH05	TH06	TH07	TH08	TH09	TH10	TH11	TH12	L1	L2	L3	L4	L5	S1
	Minimalwert		0,37	0,30	0,33	0,34	0,30	0,43	0,57	0,60	0,43	0,34	0,34	0,42	0,33	0,37	0,39	0,43	0,66	0,50	0,31	0,38	0,47	0,51	1,23
Mittelwert		0,55	0,42	0,49	0,49	0,49	0,60	0,67	0,63	0,48	0,44	0,45	0,49	0,47	0,54	0,53	0,57	0,96	0,86	0,65	0,75	0,86	1,20	1,64	2,02
Maximalwert		0,70	0,53	0,67	0,74	0,58	0,78	0,82	0,65	0,51	0,58	0,55	0,58	0,66	0,70	0,71	0,71	1,21	1,20	1,02	1,04	1,29	1,57	1,99	2,33

Tabelle IV. I: Pedikelaußendurchmesser  
 Pedikel von C2 bis S1 (rechts und links zusammengefasst) mit Minimal-, Mittel- und Maximalwert des Pedikelaußendurchmessers in cm

Pedikellinnendurchmesser	Wirbelkörper	C2	C3	C4	C5	C6	C7	TH01	TH02	TH03	TH04	TH05	TH06	TH07	TH08	TH09	TH10	TH11	TH12	L1	L2	L3	L4	L5	S1
	Minimalwert	0,17	0,10	0,15	0,11	0,12	0,24	0,33	0,41	0,29	0,23	0,20	0,25	0,14	0,14	0,17	0,20	0,41	0,31	0,19	0,19	0,25	0,51	0,93	1,23
	Mittelwert	0,27	0,21	0,28	0,25	0,26	0,38	0,44	0,42	0,31	0,26	0,27	0,32	0,29	0,32	0,36	0,37	0,69	0,63	0,45	0,53	0,62	0,96	1,31	1,70
	Maximalwert	0,45	0,32	0,45	0,48	0,65	0,55	0,59	0,42	0,35	0,29	0,33	0,38	0,39	0,49	0,53	0,50	0,97	0,96	0,82	0,92	1,05	1,36	1,81	1,98

Tabelle IV. II: *Pedikellinnendurchmesser  
Pedikel von C2 bis S1 (rechts und links zusammengefasst) mit Minimal-, Mittel- und  
Maximalwert des Pedikellinnendurchmessers in cm*

Im Thorakalbereich waren größere Unterschiede zwischen den rechts und links gemessenen Werten auffällig als in der restlichen Wirbelsäule. Dies konnte an Lagerungsfehlern oder angeborenen Rotationsfehlstellungen liegen, die in der BWS häufiger auftraten. Die rechten Pedikeldurchmesser wurden nicht unbedingt in der selben Schicht wie die linken Pedikeldurchmesser gemessen, da auf der jeweiligen Seite die schmalste Strecke gesucht wurde. Dennoch traten deutliche Abweichungen auf. Zusätzlich wurde der Pedikellinnendurchmesser (ohne Compacta) gemessen. Die Differenz des Außen- und des Innendurchmessers ergab die Dicke der Compacta. In dieser Studie wurden die mediale und laterale Compacta nicht getrennt berücksichtigt. Die Compactadicke lag bei der HWS konstant zwischen 0,20 und 0,24 cm, nahm im Thorakalbereich bis auf 0,15 cm ab, um bei TH06/07 wieder anzusteigen und erreichte ihr Maximum bei L5/S1 mit 0,30 bis 0,34 cm. Die Dicke der Compacta korrelierte mit der Größe des Pedikeldurchmessers.

Das Verhältnis von Compacta zu Pedikeldurchmesser bleibt immer konstant. Kothe et al. stellten 1996 ein konstantes Verhältnis von Spongiosa zu Pedikeldurchmesser von 61,3 - 71,6 % fest.

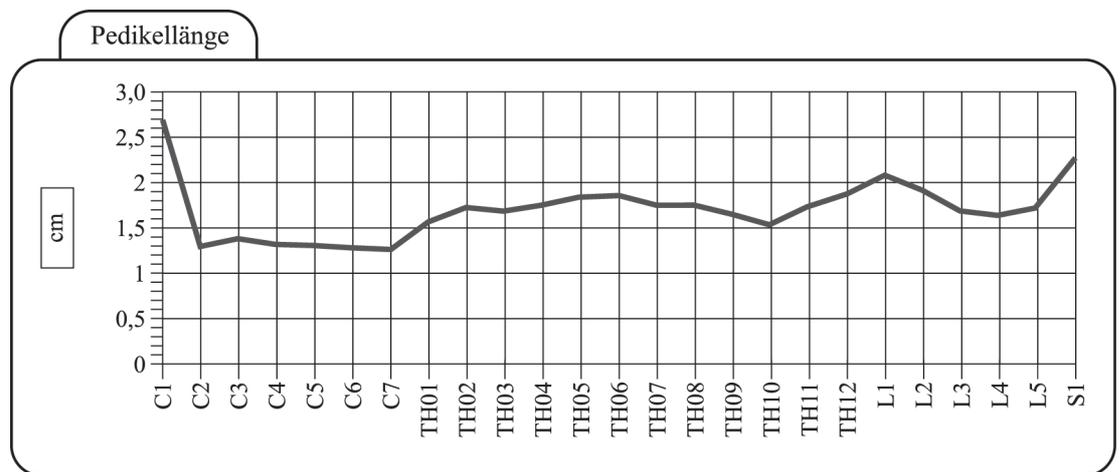
## 2. Pedikellänge

Sinnvollerweise wurde die Pedikellänge bis zur dorsalen Compacta gemessen. Die dorsale Tangente war häufig hinter der dorsalen Pedikelbegrenzung. Standardbedingungen waren wegen der großen transversalen Winkel nicht immer einzuhalten. Die Pedikellänge nahm auch von cranial nach caudal zu, zeigte jedoch in den drei einzelnen Wirbelsäulenabschnitten eine gewisse Konstanz.

Leichte Differenzen ergaben sich an den Meßwerten der HWS auch dadurch, daß die ventrale Begrenzung nicht in Höhe der Pedikelwurzel lag, so daß in diesen wenigen Fällen die Pedikellänge zu kurz gemessen wurde. Die Länge lag bei ca. 1,3 cm.

Die Pedikellängen der BWS lagen zwischen 1,5 und 1,9 cm mit Maxima bei TH05, 06 und 12.

Bei L1 fand ein deutlicher Sprung auf Werte über 2 cm statt. Bis L4 wurden die Pedikel wieder kürzer. Bei L5 und S1 zeigte sich ein erneuter Anstieg auf 2,02 bis 2,4 cm.



Graphik IV. 2 Pedikellänge  
 Abszisse: Pedikel von C1 bis S1 (rechts und links zusammengefasst)  
 Ordinate: Pedikellänge in cm

Wirbelkörper	C2	C3	C4	C5	C6	C7	TH01	TH02	TH03	TH04	TH05	TH06	TH07	TH08	TH09	TH10	TH11	TH12	L1	L2	L3	L4	L5	S1
Minimalwert	1,12	0,84	0,99	0,94	0,92	0,95	1,35	1,61	1,45	1,61	1,55	1,75	1,43	1,57	1,39	1,36	1,49	1,55	1,84	1,51	1,43	1,28	1,14	2,02
Mittelwert	1,30	1,38	1,32	1,31	1,28	1,26	1,57	1,73	1,69	1,75	1,84	1,86	1,75	1,75	1,65	1,54	1,73	1,88	2,08	1,92	1,69	1,64	1,72	2,27
Maximalwert	1,48	1,72	1,59	1,65	1,59	1,67	1,77	1,84	1,94	1,92	2,03	1,94	2,06	2,13	2,04	1,77	2,07	2,40	3,21	3,11	2,10	2,27	2,97	2,40

Tabelle IV. 3: Pedikellänge  
 Pedikel von C2 bis S1 (rechts und links zusammengefasst) mit Minimal-, Mittel- und Maximalwert der Pedikellänge in cm

Zusätzlich wurden die Pedikellängen bis zur ventralen Wirbelkörperkante in Pedikelachse (chord length) und streng sagittal (Pedikelsagittale) gemessen, wobei die sagittalen Werte immer kleiner waren als die in Pedikelachsenrichtung gemessenen (siehe Graphik IV. 3 und Tabellen IV. 4 und 5).

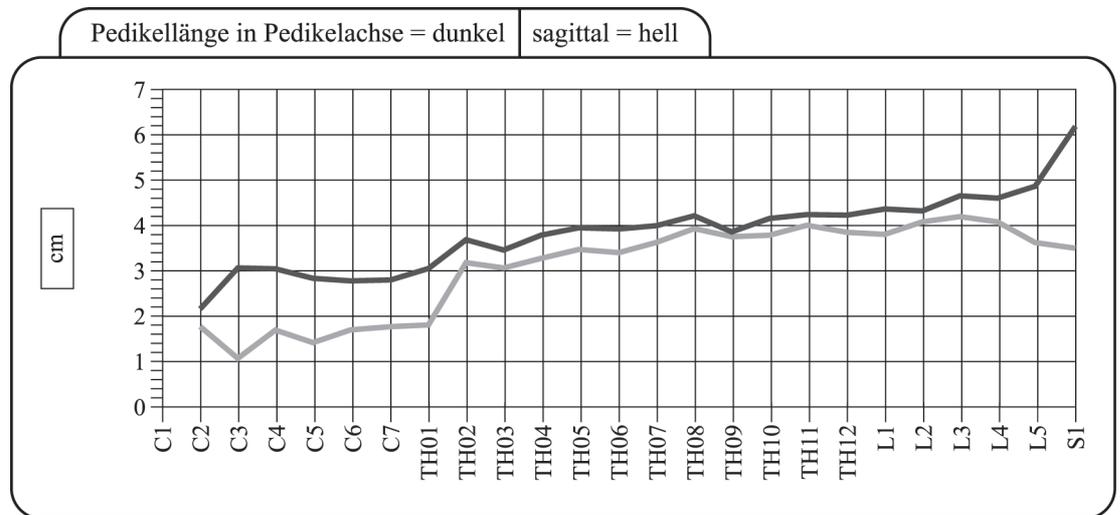
Die Strecken in Pedikelachsenrichtung (chord length) hatten ihr Maximum in der HWS bei C3 und C4 mit über 3 cm. Von C2 auf C3 zeigte sich ein deutlicher Anstieg, da hier auch die Wirbelkörperlänge zunahm.

Von C7 auf TH01 und nochmal auf TH02 verlängerten sich die Pedikel erheblich und nahmen dann bis TH08 kontinuierlich zu. Hier erreichten sie über 4 cm. TH09 lag jedoch wieder unter 4 cm. Ab TH10 stiegen die Werte weiter an mit einem großen Sprung bei L1 und einem weiterem Anstieg, bis bei S1 Werte zwischen 5,56 und 6,98 cm gemessen wurden.

Die streng sagittal gemessenen Pedikellängen (Pedikelsagittale) existierten im oberen HWS-Bereich wegen der großen Transversalwinkel nicht immer. Wenn der Transversalwinkel deutlich größer als 45° war, lagen die Pedikel nicht mehr dorsal des Wirbelkörpers, sondern eher lateral.

Das Maximum in der BWS lag ebenfalls bei TH08 und TH11 mit deutlichem Anstieg bis L2 und dann stetiger Abnahme bis S1. Auch das Verhältnis AC, AD zu AE, AF

nahm zu, da die Wirbelkörper ihre Form veränderten, im Sinne einer deutlichen Breitenzunahme. Die sagittalen Strecken kreuzten dadurch frühzeitig die Wirbelkörperkante.



Graphik IV. 3: Pedikellänge in Pedikelachse und sagittal  
 Abszisse: Pedikel von C1 bis S1 (rechts und links zusammengefasst)  
 Ordinate: Pedikellänge in cm  
 Pedikellänge in Pedikelachse: dunkel  
 Pedikellänge sagittal: hell

Wirbelkörper	Pedikellänge in Pedikelachse																							
	C2	C3	C4	C5	C6	C7	TH01	TH02	TH03	TH04	TH05	TH06	TH07	TH08	TH09	TH10	TH11	TH12	L1	L2	L3	L4	L5	S1
Minimalwert	1,93	2,42	2,62	2,43	2,40	2,21	2,71		3,13	3,52	3,37	3,75	3,43	3,89	3,25	3,73	3,86	3,67	3,80	3,90	3,93	4,13	4,04	5,56
Mittelwert	2,16	3,06	3,04	2,83	2,78	2,80	3,05	3,69	3,46	3,79	3,95	3,92	4,00	4,21	3,86	4,16	4,24	4,23	4,36	4,32	4,65	4,60	4,87	6,19
Maximalwert	2,51	4,07	3,56	3,41	3,28	3,45	3,48		3,65	4,21	4,30	4,12	4,33	4,40	4,45	4,59	4,66	4,62	4,75	5,05	5,63	5,11	5,96	6,98

Tabelle IV. 4: Pedikellänge in Pedikelachse  
 Pedikel von C2 bis S1 (rechts und links zusammengefasst) mit Minimal-, Mittel- und Maximalwert der Pedikellänge in Pedikelachse in cm

Wirbelkörper	Pedikellänge sagittal																							
	C2	C3	C4	C5	C6	C7	TH01	TH02	TH03	TH04	TH05	TH06	TH07	TH08	TH09	TH10	TH11	TH12	L1	L2	L3	L4	L5	S1
Minimalwert			1,37	0,87	1,08	1,26	1,41		2,44	2,97	2,91	3,06	2,89	3,45	2,89	3,37	3,25	2,55	2,52	3,01	3,31	3,48	2,64	3,10
Mittelwert	1,77	1,07	1,69	1,42	1,70	1,77	1,81	3,18	3,06	3,28	3,47	3,40	3,63	3,93	3,75	3,79	4,01	3,85	3,80	4,08	4,20	4,08	3,62	3,50
Maximalwert			1,93	2,00	2,30	2,17	2,19		3,49	3,56	3,89	3,66	4,14	4,37	4,37	4,47	4,54	4,45	4,48	4,70	5,30	4,68	4,69	4,30

Tabelle IV. 5: Pedikellänge sagittal  
 Pedikel von C2 bis S1 (rechts und links zusammengefasst) mit Minimal-, Mittel und Maximalwert der Pedikellänge sagittal in cm  
 Bei TH02 konnten zu wenige Daten erhoben werden

### 3. Pedikelhöhe

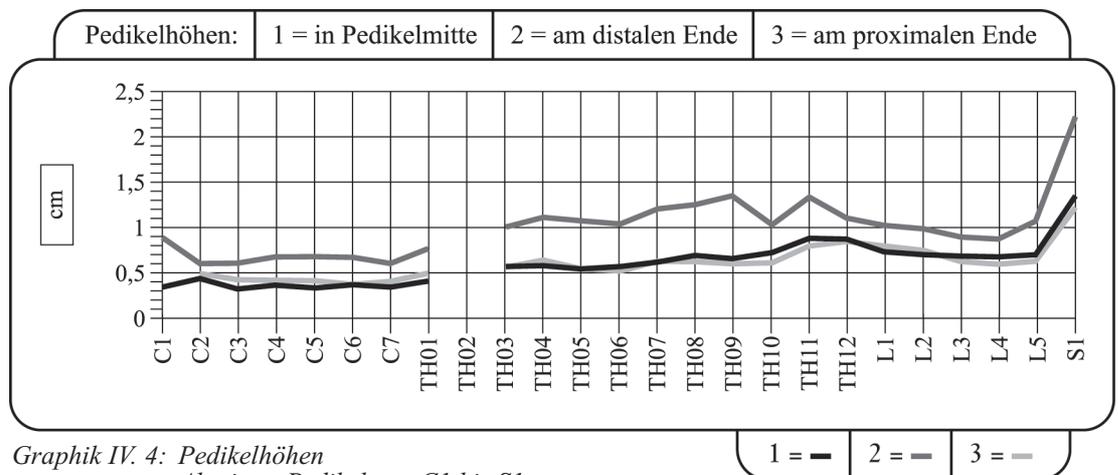
Die Pedikelhöhe wurde ohne Compacta gemessen (siehe Graphik IV. 4 und Tabelle IV. 6). Aufgrund der geringen Schichtzahl, war häufig die Compactagrenze nicht zu erkennen.

Es zeigte sich eine Abweichung der rechts und links gemessenen Werte, was wahrscheinlich an den leicht variierenden Winkeln der einzeln angefertigten Rekonstruk-

tionen lag. Aber die von cranial nach caudal steigende Tendenz, mit Maxima bei TH11/12 und S1 war auf beiden Seiten deutlich zu erkennen, so daß die Abweichungen in einem akzeptablen Bereich lagen.

Die Werte der HWS lagen auf einem Plateau, die der BWS/LWS auf einem etwas höheren Plateau mit einem Peak bei TH11/12.

Die dorsale sagittale Höhe war immer größer als die ventrale sagittale Höhe, wobei das Verhältnis im Thorakalbereich am höchsten und im Lumbalbereich am niedrigsten war. Die dorsale Höhe nahm bis L1 zu, dann ab. Aufgrund der Konvexität der Pedikel, wurde der Pedikel nicht in der ganzen Ausdehnung erfaßt, so daß ein scheinbarer Verlust der Trompetenform entstand.



Graphik IV. 4: Pedikelhöhen  
 Abszisse: Pedikel von C1 bis S1  
 (rechts und links zusammengefasst)  
 Ordinate: Pedikelhöhen in cm  
 1: Pedikelhöhe in Pedikelmittle  
 2: Pedikelhöhe am distalen Ende  
 3: Pedikelhöhe am proximalen Ende  
 Bei TH02 konnten keine Daten erhoben werden

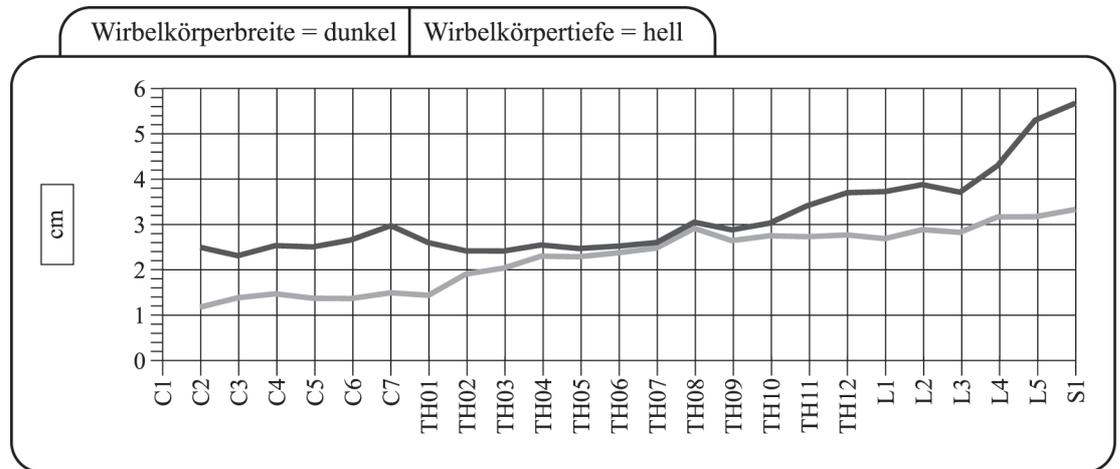
Wirbelkörper	C2	C3	C4	C5	C6	C7	TH01	TH02	TH03	TH04	TH05	TH06	TH07	TH08	TH09	TH10	TH11	TH12	L1	L2	L3	L4	L5	S1
Minimalwert	0,45	0,25	0,34	0,37	0,59	0,36	0,70		0,95	0,94	0,84	0,99	0,94	1,16	1,06	1,31	1,39	1,38	1,15	0,85	1,04	1,04	0,66	2,18
Mittelwert	0,86	0,63	0,71	0,65	0,72	0,67	0,80		1,12	1,13	1,06	1,11	1,21	1,35	1,28	1,41	1,72	1,70	1,43	1,37	1,34	1,32	1,37	2,64
Maximalwert	1,20	0,86	0,98	0,82	0,92	0,97	0,88		1,38	1,32	1,38	1,23	1,40	1,62	1,52	1,46	2,01	1,98	1,89	2,04	1,69	1,72	1,87	3,08

Tabelle IV. 6: Pedikelhöhe  
 Pedikelhöhe in Pedikelmittle von C2 bis S1 (rechts und links zusammengefasst) mit Minimal-, Mittel- und Maximalwert in cm  
 Bei TH02 konnten keine Daten erhoben werden

#### 4. Wirbelkörperbreite und -tiefe, Ellipsenbreite und -tiefe

Die Wirbelkörperbreite (siehe Tabelle IV. 7) nahm von cranial nach caudal zu. Im HWS-Bereich war sie bei C7 am größten, wurde bei TH01 wieder kleiner, machte bei

TH07/08 und ab TH10/11 einen Größensprung, um dann kontinuierlich zuzunehmen. Von L3 auf L4 fand wiederum ein großer Sprung statt, bei S1 waren die Wirbelkörper schließlich am breitesten.



Graphik IV. 5: Wirbelkörperbreite und -tiefe  
 Abszisse: Wirbelkörper von C1 bis S1  
 Ordinate: Wirbelkörperbreite und -tiefe in cm  
 Wirbelkörperbreite: dunkel  
 Wirbelkörpertiefe: hell

Wirbelkörper	C2	C3	C4	C5	C6	C7	TH01	TH02	TH03	TH04	TH05	TH06	TH07	TH08	TH09	TH10	TH11	TH12	L1	L2	L3	L4	L5	S1
Minimalwert	2,05	2,05	2,20	2,22	2,10	2,22	2,01		2,30	2,33	2,17	2,46	2,48	2,58	2,48	2,88	3,19	2,97	3,20	3,46	3,43	3,61	4,74	5,53
Mittelwert	2,50	2,31	2,54	2,51	2,66	2,98	2,60	2,42	2,42	2,55	2,47	2,53	2,60	3,05	2,88	3,03	3,41	3,70	3,73	3,88	3,71	4,30	5,30	5,68
Maximalwert	2,61	2,55	2,92	2,98	3,48	3,45	3,39		2,59	2,80	2,85	2,63	2,72	3,92	3,31	3,13	3,80	4,44	4,73	4,25	4,77	4,85	6,13	5,83

Tabelle IV. 7: Wirbelkörperbreite  
 Wirbelkörperbreite von C2 bis S1 mit Minimal-, Mittel- und Maximalwert in cm  
 bei TH02 konnten zu wenige Daten erhoben werden

Wirbelkörper	C2	C3	C4	C5	C6	C7	TH01	TH02	TH03	TH04	TH05	TH06	TH07	TH08	TH09	TH10	TH11	TH12	L1	L2	L3	L4	L5	S1
Minimalwert	0,96	1,08	1,24	1,16	1,11	1,19	1,35		1,91	2,04	2,13	2,27	2,28	2,58	2,08	2,57	2,45	2,23	2,41	2,51	2,51	2,58	2,59	2,77
Mittelwert	1,18	1,39	1,47	1,37	1,37	1,50	1,44	1,91	2,04	2,30	2,29	2,38	2,48	2,92	2,65	2,75	2,73	2,77	2,69	2,89	2,83	3,17	3,17	3,33
Maximalwert	1,65	1,59	1,73	1,83	1,76	1,94	1,60		2,15	2,48	2,37	2,56	2,63	3,87	3,06	3,06	3,08	3,22	3,29	3,14	3,97	3,54	4,08	3,93

Tabelle IV. 8: Wirbelkörpertiefe  
 Wirbelkörpertiefe von C2 bis S1 mit Minimal-, Mittel- und Maximalwert in cm  
 bei TH02 konnten zu wenige Daten erhoben werden

Die Wirbelkörpertiefe (siehe Tabelle IV. 8) nahm ebenfalls von cranial nach caudal zu. Im HWS-Bereich blieb sie von C4 bis C6 etwa gleich. Im BWS Bereich war sie bei TH08 am größten, bei Th06 bis Th08 blieb sie nahezu gleich. In der LWS nahm sie kontinuierlich zu, bis sie bei S1 den größten Wert erreichte.

Die Wirbelkörperbreite war fast immer größer als die Wirbelkörpertiefe (siehe Graphik IV. 5). Der Quotient Breite zu Tiefe war in der HWS am größten (über 2), d. h. die Wirbelkörper waren queroval. Im Thorakalbereich war der Quotient am kleinsten

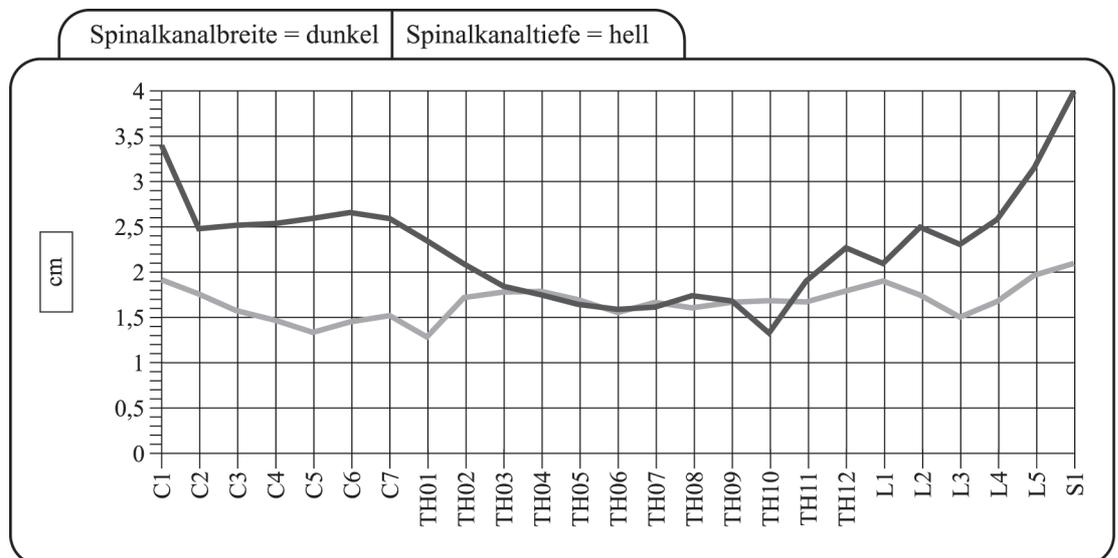
(fast 1), d. h. die Wirbelkörper waren fast rund. In einzelnen Fällen (bei TH05, 06, 07, 08) war die Tiefe sogar größer als die Breite, was zu einer längsovalen Form führte. Nach caudal erreichten die Wirbelkörper wieder zunehmend ihre querovale Form. Die Ergebnisse der Messung des Ellipsenquer- und Ellipsenlängsdurchmessers korrelierten gut mit den direkten Messungen der Wirbelkörperbreite und -tiefe. Die Meßwerte der Ellipsen unterlagen natürlich erheblich stärker individuellen Schwankungen, vermittelten aber eine deutlichere Darstellung des optischen Eindrucks von der Wirbelkörperform.

### 5. Spinalkanalbreite und -tiefe

Die Spinalkanalbreite zeigte keine durchgängige Zu- oder Abnahme (siehe Tabelle IV. 9). Auffällig war lediglich eine Senke im Thorakalbereich mit dem schmalsten Durchmesser bei TH06/07. Hier bestand eine runde bis längsovale Form des Spinalkanals, so daß hier auch die Spinalkanalbreite zum limitierenden Faktor für eine spinale Enge werden konnte.

Die Werte von L5 lagen nur leicht oberhalb der Werte von C2. Die Maxima wurden bei S1 erreicht. Im Thorakalbereich lagen die Maxima bei TH01 und TH12.

Auch die Spinalkanaltiefe blieb, grob betrachtet, konstant zwischen 1,4 und 2 cm (siehe Tabelle IV. 10). Sie sank im Cervicalbereich bis C5, stieg dann wieder leicht an und erreichte im unteren Thorakalbereich ein Plateau bei 1,6 cm. Bei L5 und S1 traten Maxima über 2 cm auf.



Graphik IV. 6: Spinalkanalbreite und -tiefe  
 Abszisse: Spinalkanal von C1 bis S1  
 Ordinate: Spinalkanalbreite und -tiefe in cm  
 Spinalkanalbreite: dunkel  
 Spinalkanaltiefe: hell

Spinalkanalbreite	Wirbel körper	C2	C3	C4	C5	C6	C7	TH01	TH02	TH03	TH04	TH05	TH06	TH07	TH08	TH09	TH10	TH11	TH12	L1	L2	L3	L4	L5	S1	
	Minimalwert	2,26	2,27	2,27	2,33	2,31	2,11	1,88			1,68	1,60	1,46	1,38	1,43	1,39	1,41	1,44	1,70	1,80	2,13	2,08	2,02	2,05	2,42	3,78
	Mittelwert	2,41	2,44	2,47	2,52	2,58	2,52	2,28	2,03		1,79	1,70	1,60	1,54	1,57	1,69	1,63	1,29	1,85	2,20	2,04	2,43	2,24	2,51	3,06	3,91
	Maximalwert	2,56	2,68	2,86	2,79	2,91	2,70	2,73			1,88	1,77	1,69	1,63	1,87	2,01	2,08	2,10	1,96	2,74	2,52	2,74	2,86	2,81	3,76	4,02

Tabelle IV. 9: Spinalkanalbreite  
 Spinalkanalbreite von C2 bis S1 mit Minimal-, Mittel- und Maximalwert in cm  
 bei TH02 konnten zu wenige daten erhoben werden

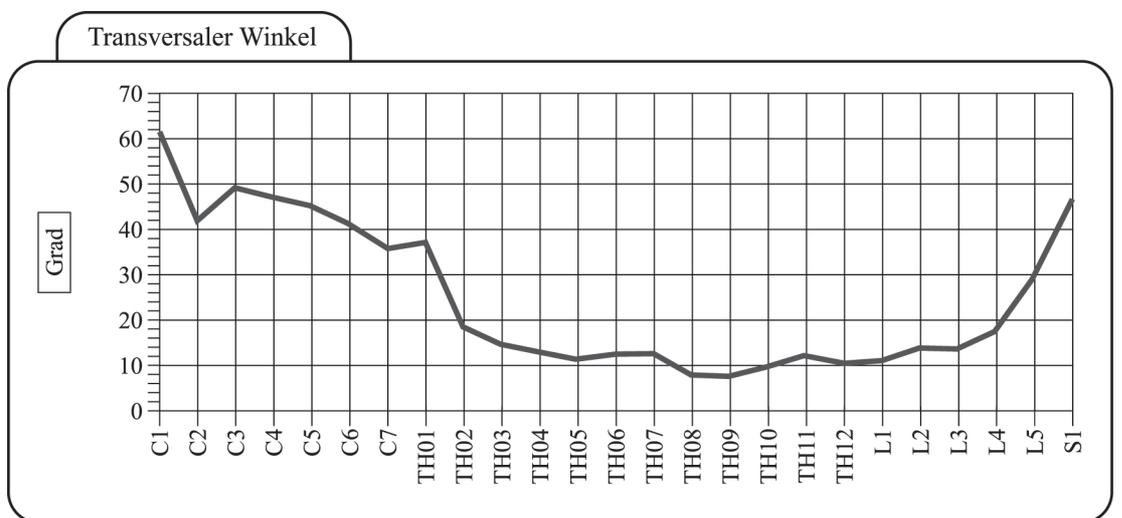
Spinalkanaltiefe	Wirbel körper	C2	C3	C4	C5	C6	C7	TH01	TH02	TH03	TH04	TH05	TH06	TH07	TH08	TH09	TH10	TH11	TH12	L1	L2	L3	L4	L5	S1	
	Minimalwert	1,61	1,25	1,09	1,01	1,22	1,17	1,75			1,64	1,65	1,51	1,41	1,36	1,30	1,40	1,46	1,45	1,38	1,54	1,42	1,21	0,99	1,19	1,63
	Mittelwert	1,71	1,53	1,43	1,30	1,41	1,48	1,25	1,67		1,73	1,74	1,65	1,51	1,62	1,56	1,62	1,64	1,62	1,74	1,85	1,70	1,46	1,63	1,91	2,04
	Maximalwert	1,83	1,76	1,76	1,56	1,63	1,63	1,32			1,80	1,80	1,78	1,60	1,94	2,03	1,87	1,96	1,78	1,96	2,01	1,94	1,97	2,07	2,70	2,27

Tabelle IV. 10: Spinalkanaltiefe  
 Spinalkanaltiefe von C2 bis S1 mit Minimal-, Mittel- und Maximalwert in cm  
 bei TH02 konnten zu wenige daten erhoben werden

### 6. Transversaler Pedikelwinkel

Die transversalen Winkel wurden aus den Strecken der Pedikelachse und der streng sagittalen Strecke gebildet. Sie waren, bis auf zwei Ausnahmen, positiv, d. h. die Pedikel waren in der transversalen Ebene nach lateral geneigt (siehe Graphik IV. 7, Tabelle IV. 11). In der HWS nahm die Neigung von cranial nach caudal von 60° auf 35° ab. Bei TH01 zeigte sich ein leichter Anstieg, dann pendelte sie sich bei einem Plateau um 10° ein, bis sich bei L5 / S1 ein steiler Anstieg zeigte.

Die großen Schwankungen bei TH08 und TH09 entstanden, da hier bei jeweils einem Wirbelkörper negative Werte gemessen wurden (jeweils für den rechten und den linken Pedikel). Die Pedikel waren deutlich nach medial geneigt.



Graphik IV. 7: Transversaler Winkel  
 Abszisse: Pedikel von C1 bis S1 (rechts und links zusammengefasst)  
 Ordinate: transversaler Winkel in Grad

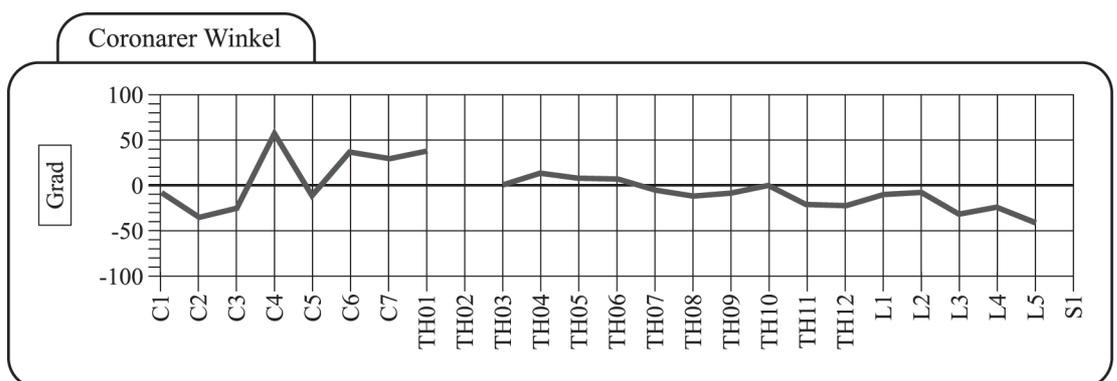
Wirbelkörper	C2	C3	C4	C5	C6	C7	TH01	TH02	TH03	TH04	TH05	TH06	TH07	TH08	TH09	TH10	TH11	TH12	L1	L2	L3	L4	L5	S1
Minimalwert	24	41	35	27	28	26	27		11	11	7	11	6	-5	-5	5	10	7	7	8	8	10	18	33
Mittelwert	41,9	49,2	47,1	45,2	41,3	35,8	37,1	18,5	14,7	13	11,4	12,5	12,6	7,9	7,6	9,67	12,2	10,5	11,1	13,8	13,6	17,5	29	46,7
Maximalwert	54	57	56	59	50	44	43		23	15	14	14	21	15	16	15	17	19	15	20	29	27	44	56

Tabelle IV. 11: *Transversaler Winkel*  
*Transversaler Winkel von C2 bis S1 mit Minimal-, Mittel- und*  
*Maximalwert in Grad*  
*bei TH02 konnten zu wenige Daten erhoben werden.*

### 7. Coronarer Pedikelwinkel

Bei sehr kurzen Pedikeln und bei sehr großem Tangentialwinkel (S, T) war die Auswertung erschwert, da die Pedikel in den rekonstruierten Abbildungen kaum abgrenzbar waren (siehe Graphik IV. 8 und Tabelle IV. 12). Es fanden sich Werte von  $-41$  bis  $+57^\circ$ .

In der HWS zeigten sich starke Schwankungen mit einer maximalen Öffnung nach oben bei C4. In der BWS standen die Pedikel fast senkrecht. In der LWS zeigte sich eine Öffnung nach unten.



Graphik IV. 8: *Coronarer Winkel*  
*Abszisse: Pedikel von C1 bis S1 (rechts und links zusammengefasst)*  
*Ordinate: Coronarer Winkel in Grad*  
*Bei TH02 und S1 konnten keine Daten erhoben werden*

Wirbelkörper	C2	C3	C4	C5	C6	C7	TH01	TH02	TH03	TH04	TH05	TH06	TH07	TH08	TH09	TH10	TH11	TH12	L1	L2	L3	L4	L5	S1
Mittelwert	-35	-25	57,1	-11	36,8	29,5	38		0,5	13,5	8	7	-5,3	-12	-8,5	0	-21	-22	-10	-7,7	-32	-24	-41	

Tabelle IV. 12: *Coronarer Winkel*  
*Mittelwert des coronaren Winkels der Pedikel (rechts und links zusammengefasst) in Grad.*  
*Bei TH02 und S1 konnten keine Daten erhoben werden*

### 8. Sagittaler Pedikelwinkel

Bei der Messung des sagittalen Winkels war es unerheblich, daß die Neigung in der coronaren Ebene nicht berücksichtigt werden konnte. Es zeigten sich auch keine extremen Abweichungen zwischen den rechten und linken Pedikeln.

Jedoch waren die Wirbelkörperdeckplatten nicht immer plan, sondern häufig flachkonvex, so daß die Ausgangslinie nicht immer klar zu definieren war. Die nachgezeichnete Außenlinie ist in Abb. IV. 26 dargestellt.

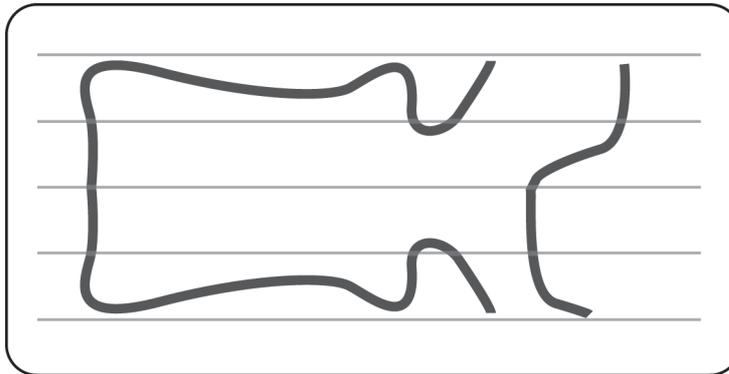
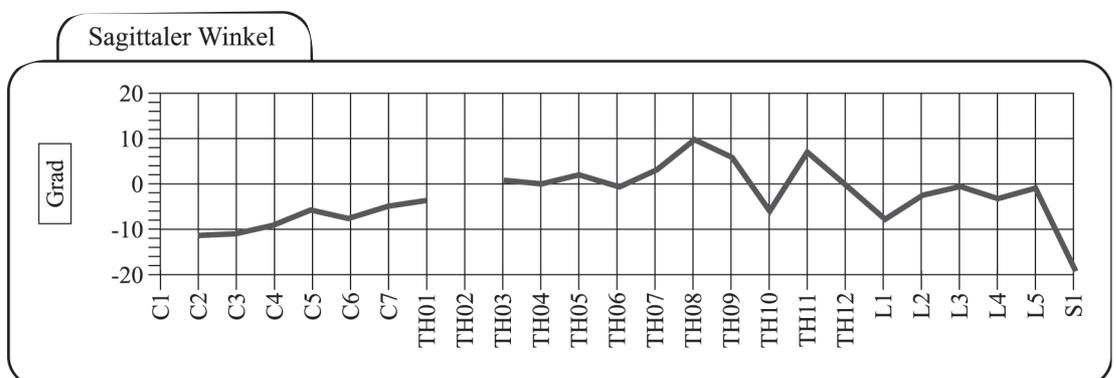


Abb. IV. 26: nachgezeichnete Außenkonturen eines Wirbels in sagittaler Ansicht

In der HWS wurden nur negative Werte gemessen, also waren die Pedikel immer nach caudal gekippt (siehe Graphik IV. 9 und Tabelle IV. 13). Allerdings wurden die Werte beständig kleiner, bis im oberen BWS Bereich  $0^\circ$  erreicht wurden. Ab TH07 stiegen die Werte weiter an, bei TH08 wurde die maximale craniale Kippung gefunden, die dann bis TH12 wieder auf  $0^\circ$  abfiel. In der LWS waren die Pedikel, wie in der HWS, nach caudal gekippt, mit dem Maximum bei S1.

TH10 war als einziger Wert im BWS Bereich negativ und konnte nur an einem einzigen Wirbel belegt werden.



Graphik IV. 9: Sagittaler Winkel  
Abszisse: Pedikel von C1 bis S1 (rechts und links zusammengefasst)  
Ordinate: Sagittaler Winkel der Pedikel in Grad  
Bei TH02 konnte keine Daten erhoben werden

Wirbel körper	C2	C3	C4	C5	C6	C7	TH01	TH02	TH03	TH04	TH05	TH06	TH07	TH08	TH09	TH10	TH11	TH12	L1	L2	L3	L4	L5	S1
Minimalwert	-29	-24	-17	-14	-17	-17	-9		-1		-5	-6	-5	7	0		0	-8	-12	-9	-9	-7	-11	-27
Mittelwert	-11	-11	-9,1	-5,8	-7,6	-4,9	-3,7		0,8	0	2	-0,7	3,13	9,75	5,83	-6	7	-0,6	-7,8	-2,5	-0,6	-3,3	-0,9	-19
Maximalwert	0	0	4	10	0	9	7		5		14	4	12	14	12		13	10	0	8	7	0	5	-14

Tabelle IV. 13: Sagittaler Winkel  
Sagittaler Winkel der Pedikel (rechts und links zusammengefasst) mit Minimal-, Mittel- und Maximalwert in Grad  
Bei TH02 konnten keine Daten erhoben werden

## V. DISKUSSION

### 1. Einführung in den Literaturvergleich

Die Definition des Pedikels war in der Literatur uneinheitlich. Besonders bei C2 wurde häufig die eigentliche Pars interarticularis als Pedikel bezeichnet. Die Pars interarticularis war der Abschnitt der Vereinigung von Pedikel und Lamina (Esses und Bednar, 1989). An sich war der Pedikel die Struktur, die den Wirbelkörper mit den dorsalen Elementen verbindet (Benzel, 1996).

Ebraheim et al. (1996, 1997) verwendeten den Begriff Pedikel für den Bereich zwischen dem superioren und inferiorem Gelenkfortsatz. Der deutsche Begriff „Bogenwurzel“ für Pedikel beschrieb die anatomische Lage recht gut. In der vorliegenden Arbeit wurde zur Standardisierung die ventrale Begrenzung des Pedikels in der Ebene des ventralen Endes des Spinalkanals festgelegt. Auch die dorsale Begrenzung war in der Literatur sehr uneinheitlich. Auch hier hat sich diese Arbeit an der dorsalen Tangente zum Spinalkanal orientiert.

Die wichtigste vermessene Strecke war der Pedikelinnendurchmesser, weil diese den limitierenden Faktor für den Schraubendurchmesser in der Wirbelsäulen Chirurgie darstellte. Dieser Strecke wurde in den bisherigen Veröffentlichungen zu wenig Bedeutung zugemessen.

In der Literatur wurde dem Thema der Pedikel und Wirbelkörperanatomie bereits viel Aufmerksamkeit geschenkt. Die vorliegende Arbeit war jedoch die umfangreichste, die an lebenden Patienten durchgeführt wurde. In den meisten Publikationen wurden lediglich Präparate untersucht. Zum Teil wurden diese direkt vermessen, und zum Teil computertomographisch. Dadurch war eine Verifizierung der computertomographischen Werte möglich, welche mit unserer Studie nicht durchführbar war, da es sich um lebende Patienten handelte. Da in der Literatur überwiegend eine gute Korrelation zwischen direkten Messungen und computertomographischen Messungen gefunden wurde, konnten die Werte dieser Studie auch mit Werten von Präparaten verglichen werden.

In vielen Veröffentlichungen war die genaue Schicht- oder Schnittführung nicht angegeben. Häufig war auch keine genaue Definition der Meßstrecken gegeben (Anfang, Ende und Winkel- bzw. Achslage). Daher waren die Vergleiche schwierig und ungenau. Die Problematik der Verkippung in drei Ebenen wurde in den seltensten Fällen berücksichtigt. Besonders die Verkippung in der coronaren Ebene wurde meist außer Acht gelassen.

Es gab sehr wenige Autoren, die die gesamte Wirbelsäule vermessen hatten. Zu der

LWS gab es die meisten Daten, da hier auch häufiger operative Eingriffe vorgenommen wurden. Einige Autoren hatten einzelne Wirbelkörper ausgewählt, wobei die Übergangswirbelkörper C7 und S1 besonders häufig beschrieben wurden.

Im Folgenden werden die einzelnen Studien kurz in ihrer Methodik und ihrem Umfang vorgestellt, dann werden die Meßergebnisse mit denen der vorliegenden Arbeit verglichen.

## **2. Vorzüge und Nachteile unterschiedlicher Meßmethoden**

Es standen generell unterschiedliche bildgebende Verfahren sowie direkte Messungen zur Erhebung morphometrischer Daten zur Verfügung. Am ungenauesten waren Röntgenaufnahmen aufgrund ihrer Strahlenkonvergenz und ihrer Bildunschärfe. Sie waren nicht ausreichend, um in der stabilisierenden Wirbelsäulenchirurgie die erforderliche Länge, den Durchmesser und den Einführungswinkel der Pedikelschraube präoperativ zu bestimmen. Bei der computer tomographischen Untersuchung war die Genauigkeit von der Schichtdicke und dem Tischvorschub abhängig. Sinnvoll wären Schichtdicken von 2 mm, wobei man sich auf den betroffenen Bereich aufgrund des Strahlenschutzes beschränken sollte. Unter diesen Voraussetzungen war die Computer Tomographie mit direkter Messung, wie sie z. B. in anatomischen Studien an Präparaten durchgeführt wurden, zu vergleichen.

## **3. Übersicht über Studien an Patienten und Präparaten**

### 3.1 Studien an Patienten

Wie bereits erwähnt, wurden nur wenige Studien an lebenden Patienten durchgeführt. Krag et al. untersuchten 41 Patienten von TH09 bis L5 mit 4 mm dicken Computer Tomographie Schichten. Die Messungen führten sie jeweils an der Schicht durch, in der der Pedikeldurchmesser am größten erschien. Da am Film, und nicht am Monitor gemessen wurde, mußte jeweils ein Korrekturfaktor von 1,25 einberechnet werden. An acht Wirbelkörpern wurden Computer Tomographie und direkte Messungen durchgeführt, welche gut mit einander korrelierten (Krag et al., 1986). Da in der vorliegenden Studie direkt am Monitor vermessen wurde, fiel der Filmunschärfekorrekturfaktor weg. Diese Ergebnisse sind daher genauer.

Olsewski et al. führten an 49 Präparaten direkte Messungen von L1 bis L5 durch, davon in 21 Fällen mit Hilfe konventioneller Röntgenbilder. Zusätzlich untersuchten sie 53 junge Erwachsene mit Computer Tomographie (4 mm dicke Schichten) und Röntgen. Sie fanden signifikante Unterschiede zwischen direkten Messungen und Messungen von Röntgenbildern. Jedoch waren diese nicht standardisierbar, sondern

mal größer, mal kleiner (Olsewski et al., 1990). In der vorliegenden Studie wurden geringere Schichtdicken verwendet, was wiederum zu einer größeren Genauigkeit führte. Ferree hatte 203 computertomographische Untersuchungen von Kindern von TH12 bis S1 ausgewertet. Allerdings handelte es sich dabei hauptsächlich um Abdomen oder Becken Untersuchungen. Daher betrug die Schichtdicke 5 bis 15 mm und die Schichten waren vermutlich nicht pedikel- bzw. wirbelkörperparallel. Da die Aufnahmen im Weichteilfenster vorlagen, konnten nur die Außenkonturen gemessen werden. Durch den Summationseffekt, bedingt durch die große Schichtdicke, waren Feinheiten nicht beurteilbar (Ferree, 1992).

Chen et al. untersuchten 100 chinesische Freiwillige am Computer Tomographen von L2 bis S1. Aus Strahlenschutzgründen läßt sich eine solche Studie nicht mit ethischen Grundsätzen vereinbaren. Sie stellten keinen Unterschied zu den Ergebnissen aus der westlichen Literatur fest. Die Schichtdicke war nicht angegeben, die Gantrykipfung des Computer Tomographen und damit auch die Schichtführung war parallel zur jeweiligen Bandscheibe (Chen et al., 1994).

Bernard et al. hatten bei 154 Patienten mit Wirbelsäulenbeschwerden eine Computer Tomographie durchgeführt. Die Schichtdicke war nicht angegeben. Leider wurden die Schichten parallel zum Monitor und nicht zu einer anatomischen Struktur gelegt. Damit entsprachen die Schnitte nie der Pedikelachse. Weiterhin wurden die vier unteren beweglichen Segmente immer als L2 bis S1 definiert, unabhängig davon ob es mehr oder weniger als fünf Lendenwirbelkörper gab. Es wurde jeweils die Schicht ausgewertet, welche durch den Mittelpunkt des Pedikels verlief. Dies wurde am Übersichtstopogramm festgelegt. Der Pedikelaußendurchmesser wurde im Knochenfenster im distance mode direkt vermessen (Bernard et al., 1992).

Van Schaik et al. hatten an 123 Patienten computertomographische Untersuchungen von L3 bis L5 durchgeführt. Die Schichten waren 3 - 4,5 mm dick, mit 4,5 mm Tischvorschub und wurden parallel zur Wirbelkörpergrundplatte gelegt. Zum Ausmessen wurde jeweils die Schicht am caudalen Pedikelende ausgewählt. Diese entsprach nicht unbedingt der schmalsten Stelle des Pedikels. Sie stellten fest, daß bei L5 der Pedikel mit dem Processus transversus fusioniert. Außerdem divergierten die Seitenwände des Wirbelkörpers in anteroposteriorer Richtung sehr stark. Bei L4 war diese Divergenz geringer, die Pedikel setzten dennoch lateral am Wirbelkörper an. Bei L3 setzten sie medial der Wirbelkörperseitenwand an (Van Schaik et al., 1985). Dies konnte in der vorliegenden Studie durch den ansteigenden transversalen Winkel im Bereich der LWS bestätigt werden. Jedoch war der Winkel in der HWS deutlich höher und auch die streng sagittale Pedikellänge war in der HWS seltener messbar.

Dies zeigte, dass die Pedikel noch weiter lateral am Wirbelkörper ansetzen.

Vaccaro et al. erhoben einen Wert, den sie als chord length bezeichneten, an 19 Patienten, an denen computertomographische Untersuchungen mit 5 mm Schichtdicke in Pedikelmittle durchgeführt wurden. Diese Untersuchung entsprach dem Wert AC, AD der vorliegenden Studie (die Pedikellänge bis zur Wirbelkörpervorderkante in Pedikelachse, siehe Kapitel III. 2), wobei auf Vaccaro et al.'s schematischen Darstellung die Strecke der Pedikellänge nicht in der selben Achse verlief, wie die Strecke der chord length. Bei beiden war jedoch angegeben, sie seien in der Pedikelachse gemessen worden (Vaccaro et al., 1995).

Schwarzenbach et al. führten postoperative Computer Tomographien an 162 Pedikeln von TH11 bis S2 durch. Sie untersuchten die Genauigkeit von Computer assistierten Pedikelschraubenplatzierungen an Patienten. Das Problem bei der Auswertung waren die Metallartefakte, die zwar bei Verwendung von Titanschrauben geringer wurden, aber dennoch zu Meßungenauigkeiten führten. Sie gaben weder genau an, wie die computertomographische Schnittführung war, noch wo anatomisch exakt die Messungen durchgeführt wurden. Allerdings zeigten sie die Bedeutung der präoperativen Computer Tomographie auf, um überhaupt Computer geführte Systeme verwenden zu können. Sie betonten jedoch die hohe Variabilität in der Anatomie der Pedikel (Schwarzenbach et al., 1997).

### 3.2 Computertomographische Studien an Präparaten

Barrey et al. (2003) führten an 18 C7 Wirbeln computertomographische Messungen mit multiplanaren Rekonstruktionen der Pedikel durch. Sie zeigten gute Übereinstimmungen mit den Ergebnissen der vorliegenden Studie.

Jones et al. betonten die hohe Variabilität der Pedikeldimensionen. Sie führten Messungen an 10 Präparaten von C2 bis C7 durch, wobei Pedikelhöhe und Pedikeldurchmesser direkt gemessen wurden. Für den transversalen Winkel wurden 2 mm dicke computertomographische Schichten angefertigt (Jones et al., 1997).

Zindrick et al. untersuchten 601 Pedikel von TH01 bis L5 am Computer Tomographen. Die genaue Schichtführung und Schichtdicke war nicht angegeben. Der Pedikelaußendurchmesser wurde am Monitor vermessen. Zusätzlich wurden einzelne Wirbelkörper direkt auf einen Röntgenfilm gelegt und konventionell geröntgt. Dadurch entfiel ein Vergrößerungsfaktor (Zindrick et al., 1986).

In dem 1987 ebenfalls von Zindrick et al. veröffentlichten Artikel wurden 2905

Pedikel von TH01 bis L5 sowohl durch Computer Tomographie, als auch durch konventionelles Röntgen untersucht. Sie wiesen darauf hin, daß kein signifikanter Unterschied zwischen den Ergebnissen der Computer Tomographie und denen der Röntgenuntersuchung bestand (Zindrick et al., 1987).

### 3.3 Direkte Messungen an Präparaten

Mc Lain et al. (2002) teilten die Wirbelsäulen von 18 Präparaten von TH01 bis TH06 in die einzelnen Wirbelkörper und führten direkte Messungen zum Pedikeldurchmesser, der Pedikelhöhe und der Pedikellänge durch.

McCormack et al. hatten an 11 Präparaten Strecken und Winkel von TH01 bis TH12 direkt gemessen (McCormack et al., 1995).

Xu et al. konzentrierten sich auf den Axis (C2), den sie an 50 Präparaten direkt vermessen hatten (Xu et al., 1995).

Bailey et al. untersuchten 9 Wirbelsäulenpräparate, welche bereits in 5 mm dicke Schichten geschnitten und eingefroren waren. Jeder Wirbelkörper war in drei Teile zerlegt; oberes, mittleres und unteres Segment. Die Schnitte waren senkrecht zur Wirbelkörperachse geführt worden, lagen also nicht unbedingt in der Pedikelachse. Auch war bei 5 mm dicken Schichten nicht garantiert, daß der Pedikel an seiner schmalsten Stelle getroffen wurde. Jedenfalls wurden auf diese Weise C5 bis TH03 über Scanner und direkt ausgemessen (Bailey et al., 1995).

Panjabi et al. hatten in drei Veröffentlichungen die gesamte Wirbelsäule von C2 bis L5 dreidimensional an zwölf Präparaten untersucht. An der HWS wurden 72 Wirbelkörper ausgemessen. Sie unterteilten sie in drei Zonen: die obere bis C2, die mittlere von C3 bis C5 und die untere als thorakalen Übergangsbereich von C6 bis C7. Diese Unterteilungen nahmen sie auch am Rest der Wirbelsäule vor und begründeten diese hauptsächlich mit dem sich ändernden Verhältnis der Spinalkanalbreite zur Spinalkanaltiefe (Panjabi et al., 1991). Die BWS wurde an 144 Wirbelkörpern untersucht und von TH01 bis TH02, TH03 bis TH09 und TH10 bis TH11 eingeteilt (Panjabi et al., 1991, 1997). Die LWS wurde an 60 Wirbelkörpern untersucht und von L1 bis L2 und L4 bis L5 als jeweilige Übergangszone eingeteilt (Panjabi et al., 1992).

Ebraheim et al. untersuchten in einer Studie von 1997 43 Präparate von TH01 bis TH12. Die Pedikel wurden direkt vermessen (Ebraheim et al., 1997).

Mirkovic et al. führten direkte Messungen an 12 Präparaten von L3 bis S1 durch (Mirkovic et al., 1995).

## 4. Studien zu abhängigen Parametern

### 4.1 Ethnische Gruppen

Postacchini et al. verglichen 63 italienische Wirbelkörperpräparate mit 58 indischen mittels direkten Vermessungen. Sie fanden eine große Differenz zwischen diesen beiden ethnischen Gruppen. Die italienischen Präparate zeigten größere Werte für die Spinalkanaltiefe und den Wirbelkörperdurchmesser. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie entsprachen den italienischen besser (Postacchini et al., 1983).

Vaccaro et al. erhoben Werte von TH04 bis TH12 an 17 Präparaten, von denen 15 aus Asien stammten (Vaccaro et al., 1995). Ihre Ergebnisse wichen jedoch kaum von denen der vorliegenden Studie ab.

Kim et al. veröffentlichten eine Studie über die anatomischen Verhältnisse bei Koreanern. Dazu führten sie an 73 Präparaten direkte Messungen von TH01 bis L5 durch. Sie fanden einen signifikanten Unterschied zwischen Koreanern und Nicht-Asiaten. Da die Ergebnisse der vorliegenden Studie gut mit den an Koreanern gemessenen übereinstimmten, kann der Autor diesen Unterschied nicht bestätigen (Kim et al., 1994).

Hou et al. führten an 40 chinesischen Präparaten direkte Messungen von TH09 bis L5 durch. Die Arbeitsgruppe konnte keine deutlichen Unterschiede zu nicht-asiatischen Ergebnissen nachweisen (Hou et al., 1994).

Eisenstein hatte direkte Messungen und Vermessungen an seitlichen Röntgenbildern des Spinalkanals an Präparaten von Weißen und Afrikanern verschiedener Stämme von L1 bis L5 durchgeführt. Der Unterschied zwischen den Rassen war größer als zwischen den Geschlechtern, aber dennoch nicht signifikant (Eisenstein, 1976, 1977).

Amonoo-Kuofi führte Untersuchungen an a. p. Röntgenbildern und direkte Messungen an Präparaten von Nigerianern von L1 bis L5 durch. Er fand ein immer gleichbleibendes Verhältnis vom Spinalkanal- zum Wirbelkörperdurchmesser von 0,6. Im Vergleich zu Hinck et al. und Eisenstein sah er jedoch deutliche Unterschiede der Meßergebnisse zwischen Weißen und Afrikanern verschiedener Stämme (Amonoo-Kuofi, 1982, 1985).

Datir et al. (2004) führten Untersuchungen an Pedikeln von 18 indischen Präparaten von TH01 bis TH12 mit Hilfe der Computer Tomographie, Röntgen Bildern und

direkten Vermessungen durch. Sie empfahlen, sogar Schrauben von 4 mm Durchmesser nur vorsichtig zu verwenden, und diese unbedingt in der Pedikelachse einzuführen. Eine Pedikellänge von 25 bis 30 mm erschien ihnen im Bereich der BWS als sicher. Ihre erhobenen Meßdaten waren insgesamt nur geringfügig kleiner als die der vorliegenden Studie.

Da in der vorliegenden Studie keine ethnischen Unterschiede beachtet wurden, konnte hier zu diesem Thema nicht Stellung genommen werden. Jedoch zeigten diese Werte gute Übereinstimmungen mit den asiatischen und afrikanischen Werten der anderen Autoren, so daß in dieser Studie nicht von großen ethnischen Unterschieden ausgegangen wird. Natürlich waren die Meßmethoden nicht in allen Studien identisch, so daß Abweichungen auch dadurch bedingt sein konnten.

#### 4.2 Altersabhängigkeit der Werte

Es fanden sich vier aussagekräftige Publikationen zu morphometrischen, altersabhängigen Besonderheiten der Wirbel. Larsen und Smith haben an 83 Myelographiepatienten Wirbelkörperbreite und -tiefe von L1 bis L5 ausgemessen, jedoch ohne genaue Angaben über die Technik. Sie verglichen drei Gruppen mit unterschiedlichen Schweregraden an spinaler Stenose, fanden aber keinen signifikanten Unterschied. Lediglich mit dem Alter nahm die Wirbelkörperbreite zu, wegen der Zunahme an degenerativen Veränderungen im Sinne von spondylophytären Anbauten (Larsen und Smith, 1980). Die Behauptung, daß die Spinalkanalbreite oder -tiefe altersabhängig sei, kann vom Autor der vorliegenden Studie nicht bestätigt werden. McCormack et al. (1995) und Hinck et al. (1966) sagten, diese Größen nähmen mit dem Alter zu. Dies kann hier nicht bestätigt werden.

Ferree hat 203 Computer Tomographische Untersuchungen von Kindern von TH12 bis S1 ausgewertet. Wichtige Erkenntnisse waren, daß der Pedikelaußendurchmesser bis zum zwölften Lebensjahr um einen konstanten Faktor zunahm, danach mit einem niedrigeren Faktor. Ab dem sechzehnten Lebensjahr war das Pedikelwachstum abgeschlossen. Obwohl Mädchen zwei Jahre früher mit dem Wachstum beginnen, war kein signifikanter Geschlechtsunterschied in den Werten der selben Altersstufe zu finden (Ferree, 1992). Die vorliegende Arbeit untersuchte keine Kinder und konnte somit keine eigenen Vergleiche aufführen. Die solide Analyse von Ferree wurde jedoch an einer großen Anzahl von jungen Patienten durchgeführt, so dass seine Ergebnisse als sehr wahrscheinlich erschienen.

### 4.3 Geschlecht

Die vorliegende Studie konnte keine Aussagen zu geschlechtsspezifischen Unterschieden von morphometrischen Messungen an Wirbeln treffen. In den meisten Fällen wiesen Frauen geringfügig niedrigere Größen auf. Aber größtenteils lagen die Werte sehr eng zusammen, so daß sie für die Auswertung zusammengefaßt wurden. In der Literatur zu diesem Thema wurden - bis auf die Arbeit von Xu et al. (1995) - keine signifikanten Unterschiede gesehen, zudem war die Körpergröße unberücksichtigt gelassen. Diese hat jedoch vermutlich den stärksten Einfluß auf Größenunterschiede der einzelnen gemessenen anatomischen Werte. Xu et al. (1995) fanden bei C7 statistisch signifikante Unterschiede zwischen Männern und Frauen für den Pedikeldurchmesser, jedoch nicht für die Pedikelhöhe oder die Winkelmessungen.

### 4.4 Vergleich der rechten und linken Körperhälfte

In der Literatur wurden vereinzelt die rechte und linke Wirbelhälfte mit einander verglichen. Marchesi et al. führten an 33 Präparaten von TH06 bis L5 direkte Messungen durch. Zusätzlich röntgten sie die einzelnen Wirbelkörper transversal und halbierte Wirbelkörper seitlich. Sie fanden keinen signifikanten Unterschied zwischen den Ergebnissen der direkten Messung und den durch Röntgen gewonnenen.

Es fielen Unterschiede zwischen dem rechten und linken Pedikel des selben Wirbelkörpers auf. Jedoch konnte wegen des geringen Umfangs keine statistische Korrelation erstellt werden (Marchesi et al., 1988). In der vorliegenden Studie war der Umfang an sich auch zu gering, um eine statistische Signifikanz zu belegen. Jedoch lagen die Werte für die rechten und die linken Pedikel so dicht beieinander, daß die Aussage von Marchesi et al. nicht bestätigt werden konnte. Auch Stanescu et al. (1994), Mc Lain et al. (2002) und Xu et al. (1995) konnten keinen signifikanten Unterschied zwischen rechts und links finden.

## **5. Morphometrische Analysen im Vergleich**

### 5.1 Pedikelinnendurchmesser

In der Literatur gab es erstaunlicherweise nur wenige Angaben zum Pedikelinnendurchmesser, obwohl dieser der eigentliche limitierende Faktor bei Stabilisierungsoperationen der Wirbelsäule war. Sobald die Pedikelschraube größer als der Innendurchmesser war, bestand die Gefahr der Penetration oder auch Fraktur des Pedikels und damit ein Stabilitätsverlust.

An et al. führten direkte Messungen an 22 Präparaten von C7 bis TH02 durch.

Sie fanden für C7 bis TH02 5,2; 6,3 und 5,5 mm für den Pedikellinnendurchmesser. Die Werte der vorliegenden Studie lagen, wie bei den Pedikelaußendurchmessern jeweils ca. 1 mm niedriger. Die Pedikellängendifferenzen waren auf die abweichende Definition der Pedikelachse zurückzuführen (An et al., 1991).

Karaikovic et al. haben die Messung des Pedikellinnendurchmesser mit Computer Tomographie an 53 Präparaten von C2 bis C7 durchgeführt. Bis auf C2 stimmten die Werte sehr genau mit den vorliegenden überein (Karaikovic et al., 1997).

Banta et al. hatten an 16 Wirbelsäulen TH06 bis L5 ausgemessen. Einerseits wurden an a.p. und seitlichen Röntgenbildern der Pedikelaußendurchmesser und die Pedikelhöhe gemessen. Andererseits haben sie den Pedikellinnendurchmesser direkt gemessen, indem die Spongiosa bis zur Corticalis entfernte wurde und dann Sonden eingeführt wurden. Den größten Sondendurchmesser (ohne Corticaliserstörung) definierten sie als „effective pedicle diameter“. Hierbei spielte jedoch die ovale Form der Pedikel keine Rolle. In drei Fällen fanden sie im Thorakalbereich keine Knochenmarkshöhle, so daß sie zu dem Schluß kamen, daß es Pedikel gab, die von der Anatomie her keine Schrauben tolerieren (Banta et al., 1989). Die Pedikellinnendurchmesser stiegen kontinuierlich von 4,8 mm bei TH06 bis 5,9 mm bei L5 an. Die Werte der vorliegenden Studie lagen im BWS Bereich unter und im LWS Bereich über ihren, da hier die ovale Form der Pedikel beachtet wurde.

Misenheimer et. al. untersuchten 6 Präparate von TH01 bis L5. Für den Pedikelaußendurchmesser führten sie computertomographische Messungen in transversaler Schichtführung durch. Allerdings waren die Schichten 5 mm dick, wenn auch mit einem Tischvorschub von nur 3 mm (also überlappend gefahren). Dadurch entstand für jedes Bild eine Summation aus 5 mm, was zu Meßungenauigkeiten führte, besonders bei Rekonstruktionen. Diese hatten sie in der coronaren Ebene zur Messung des Pedikellinnendurchmessers angefertigt, jedoch nicht die genaue Lage angegeben. Weiterhin führten sie die Messung am Film durch und nicht am Monitor. Hier kam noch die Filmunschärfe als Fehlerquelle hinzu. Dennoch zeigten ihre Messwerte von der Computer Tomographie eine gute Korrelation mit den direkt gemessenen Werten. Weiterhin wurde der Pedikellinnendurchmesser durch Einführen immer größer werdender Sonden ausgetestet. Die Kurve verlief parallel zu der Kurve ihrer Pedikelaußendurchmesser, nur nach unten verschoben. Im LWS Bereich zeigte sie einen weniger steilen Anstieg. Damit wich sie hier etwas stärker von der Kurve der vorliegenden Studie ab und zeigte auch nicht die Schwankung bei TH11. Die restlichen Werte entsprachen sich in etwa. Die Kurve der Sondenmessung lag etwas niedriger und zeigte im LWS Bereich nur einen ganz flachen Anstieg (Misenheimer et al., 1989).

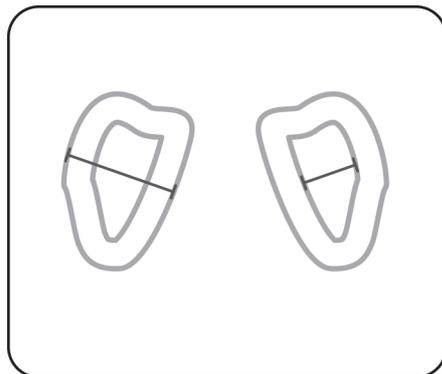
Kothe et al. hatten den Pedikelaußendurchmesser und die jeweilige Corticalisdicke

gemessen. Die Differenz ergab den Pedikellinnendurchmesser für TH02: 4,7 bis 5,4 mm; TH06: 2,3 bis 3 mm; TH10: 4,4 bis 5,1 mm. Diese Werte korrelierten sehr gut mit den vorliegenden (Kothe et al., 1996).

Moran et al. hatten den minor und major cancellous Durchmesser gemessen. Der minor dürfte den hier gemessenen Strecken entsprechen. TH02 4,6 (6,0) mm; TH07 3,8 (3,1) mm; TH12 3,9 (4,5) mm; L1 8,8 (4,0) mm; L3 6,0 (5,9) mm; L5 3,4 (7, 4) mm. Die Werte entsprachen den vorliegenden Ergebnissen recht gut. Lediglich bei L5 wurden hier 10 mm erreicht (Moran et al., 1989).

Islam et al. (1994,1996) betonten die Wichtigkeit des Pedikellinnendurchmessers, den sie den „minimal cancellous diameter“ nannten. Sie erhoben diese direkten Messungen an 702 Wirbeln von TH11 bis L5 und behaupteten, diese Messung wäre in vivo nicht möglich. Dies war jedoch durch die bildgebenden Verfahren sehr wohl erreichbar. Besonders durch die moderne Spiral Computer Tomographie konnten sehr genaue Rekonstruktionen in allen Ebenen dargestellt werden.

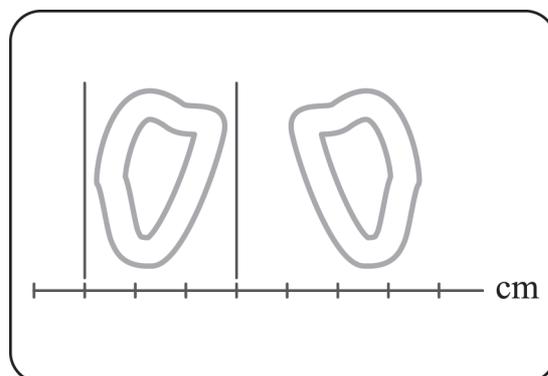
In der coronaren Ebene wurde an der schmalsten Stelle der Innen- und Außendurchmesser des Pedikels von Islam et al. ausgemessen (siehe schematische Abb. V. 1).



*Abb. V. 1: schematische Darstellung der Pedikel in coronarer Ansicht mit Compacta.  
Rechts: Messung des Außendurchmessers  
Links: Messung des Innendurchmessers*

Dies dürfte den vorliegenden Messungen in der transversalen Ebene entsprochen haben, wobei hier die Neigung in der coronaren Ebene nicht miteinbezogen wurde.

Der transversale Durchmesser wurde von Islam et al. ebenfalls in der coronaren Ebene am gesamten Pedikel einschließlich der coronaren Neigung gemessen (siehe Abb. V. 2).



*Abb. V. 2: schematische Darstellung der Pedikel in coronarer Ansicht mit Compacta  
Rechts: Darstellung der Messung des Pedikelaußendurchmessers ohne Beachtung der coronaren Verkippung*

Diese Messung entsprach nicht dem Durchmesser der vorliegenden Studie. Jedoch waren sämtliche Messungen auch am Computer Tomographen in vivo möglich. Islam et al. fanden, daß die Pedikel im cranialen Bereich der Wirbelsäule oval geformt mit einem kleinen coronaren Winkel waren. Nach caudal veränderte sich die Form. Die laterale Seite wurde spitzer, so daß sie an eine Dreiecksform erinnerte, der coronare Winkel wurde größer. Der Pedikelinnendurchmesser stieg in ihrer Messung von 5,1 mm bei TH11 bis 8,1 mm bei L5.

Die Compactadicke blieb von TH11 bis L3 fast konstant 2 mm und stieg bei L4 auf 3 mm. Die Corticalis machte ca. 28 % des Pedikels aus. Diese Ergebnisse entsprachen den hier vorliegenden recht gut (Islam et al., 1994, 1996).

### 5.2 Pedikelaußendurchmesser

Zum Pedikelaußendurchmesser fanden sich die meiste Literaturstellen. Übereinstimmung mit den vorliegenden Ergebnissen fanden sich bei Datir et al. (2004), McLain et al. (2002), Barrey et al. (2003), Moran et al. (1989), Stanescu et al. (1994), Ebraheim et al. (1996), Cotteril et al. (1986), den Werten der achtzehnjährigen von Ferree (1992), Berry et al. (1987), Olsewski et al. (1990), Kim et al. (1994), Roy-Camille et al. (1986), Krag et al. (1988), Schwarzenbach et al. (1997), Vaccaro et al. (1995), Kothe et al. (1996), Misenheimer et al. (1989) und Panjabi et al. (1991). Krag et al. (1988) hatten diese Strecke senkrecht zur Pedikelachse, zum 0° Winkel und zum 15° Winkel gemessen. Hierbei wurden jedoch keine großen Unterschiede gefunden.

Moran et al. (1989) hatten den schmalsten und den breitesten Durchmesser gemessen, wobei der schmalste mit den vorliegenden Ergebnissen vergleichbar war. Bernard et al. legten die computertomographische Schnittführung nicht parallel zur Pedikelachse, sondern parallel zum Monitor. Daher waren deren Werte nicht mit anderen identisch.

Marchesi et al. (1988) waren die einzigen, die bei L5 einen größeren Pedikelaußendurchmesser als Pedikelhöhe fanden. Ansonsten war immer der Pedikelaußendurchmesser der limitierende Faktor für den Schraubendurchmesser. Bei Kim et al. (1994) stand in der schematischen Zeichnung die gemessene Strecke nicht senkrecht auf der Pedikelachse, sondern eher parallel zur Wirbelkörper vorderkante. Mirkovic et al. (1995) fanden von L3 bis S1 11,6 mm bis 16,8 mm. Die vorliegenden Werte zeigten den selben Verlauf, jedoch eine etwas größere Streubreite. Banta et al. (1989) fanden

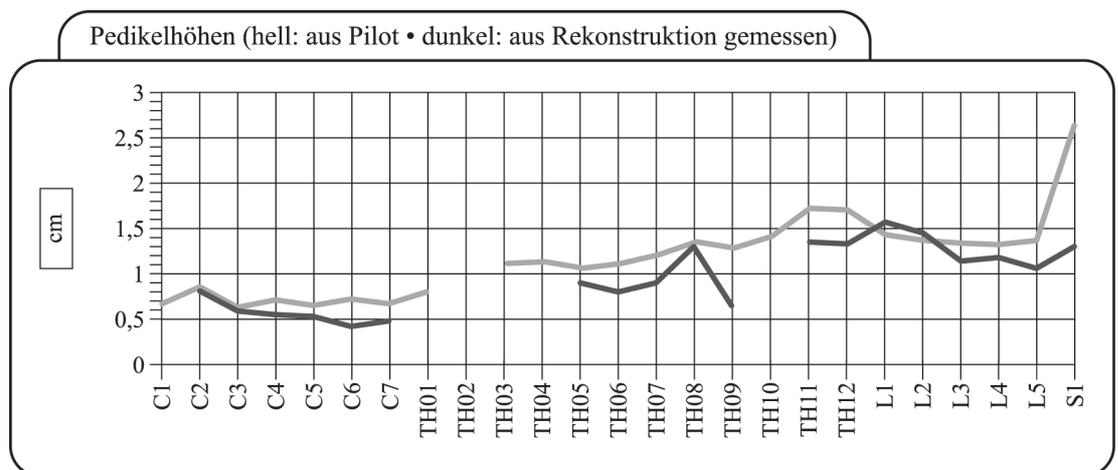
an konventionellen Röntgenbildern extrem von diesen Ergebnissen abweichende Werte. Höhere Werte als hier vorliegend wurden von McCormack et al. (1995), An et al. (1991), Karaikovic et al. (1997), Jones et al. (1997), Zindrick et al. (1987), Misenheimer et al. (im Thorakalbereich) (1989), Hou et al. (1994), Chen et al. (1994) und Tominaga et al. (1995) gefunden, sie zeigten aber alle den selben Kurvenverlauf. Bailey et al. (1995) und Scoles et al. (1988) fanden kleinere Werte.

Schwarzenbach et al. (1997) stellten fest, daß über ein Drittel der von ihnen gemessenen Pedikel (TH 11 bis S2) weniger als 10 mm Durchmesser hatten.

### 5.3 Pedikelhöhe

Die Pedikelhöhe wurde einerseits in den sagittalen Rekonstruktionen direkt gemessen, andererseits konnte sie aus den Messungen am Pilot (Orientierungsbild zur Festlegung der Schnittführung am Computer Tomographen) errechnet werden. Wurde W (Unterkante des nächsthöheren Wirbelkörpers bis Oberkante Pedikel) von X (Unterkante des nächsthöheren Wirbelkörpers bis Unterkante Pedikel) subtrahiert, hätte das Ergebnis der Pedikelhöhe entsprechen müssen. Dies war leider nicht ganz der Fall. Die Werte aus der Messung am Pilot waren deutlich niedriger, als die direkt gemessenen. Dies konnte mehrere Ursachen haben. Wegen der leicht verzerrten Abbildung durch die Divergenz des Strahlenkegels wurden Messungen am Pilot vom Gerätehersteller nicht empfohlen. Außerdem war die Bildqualität des Pilots erheblich schlechter, als die der einzelnen Schnittbilder, da er nicht zur Diagnostik, sondern lediglich zur Übersicht diente. Die genauen anatomischen Grenzlinien konnten nicht so klar definiert werden. Also sollten keine Messungen am Pilot durchgeführt werden.

Die Literaturlauswertung der Computer Tomographischen Studien erbrachten bezüglich der Vorgehensweise bei der Pedikelhöhenmessung keine exakten Angaben.



Graphik. V.1 Pedikelhöhen

Abszisse: Pedikel von C1 bis S1 (rechts und links zusammengefasst)

Ordinate: Pedikelhöhe in cm

hell: in Übersichtspilot gemessen

dunkel: in sagittalen Rekonstruktionen gemessen

Beide Messungen konnten nicht für alle Wirbel vollständig erhoben werden

In den meisten Artikeln war nicht genau angegeben, ob die Pedikelhöhe mit oder ohne Compacta gemessen wurde. Übereinstimmung mit den vorliegenden Werten fanden sich bei McCormack et al. (1995), Vaccaro et al. (1995), Panjabi et al. (1997), An et al. (1991), Scoles et al. (1988), Karaikovic et al. (1997), Ebraheim et al. (1997), Jones et al. (1997), Kim et al. (1994), Berry et al. (1987), Zindrick et al. (1987), Marchesi et al. (1988), Tominaga et al. (1995) und Stanescu et al. (1994). Die vorliegenden Werte waren niedriger als die von Hou et al. (1994), bei Roy-Camille (1986) zeigten sie sogar einen anderen Kurvenverlauf. Ebraheim et al. (1996) fanden bei dieser Messung die größte Streubreite. Olsewski et al. (1990) hatten sowohl an Präparaten, als auch an Röntgenbildern von Präparaten und Patienten abweichende Werte gewonnen. Banta et al. (1989) hatten die Messungen an seitlichen konventionllen Röntgenbildern durchgeführt, wobei die Verkippung in der coronaren Ebene nicht beachtet werden konnte. Die Werte lagen 1 bis 5 mm unter den vorliegenden. Kothe et al. (1996) hatten die äußere Pedikelhöhe und die jeweilige Corticalisdicke gemessen. Die Differenz entsprach der inneren Pedikelhöhe, lag jedoch unter den vorliegenden Ergebnissen.

Sämtliche Autoren beschrieben die Pedikelhöhe des jeweiligen Pedikels größer als den dazugehörigen Pedikeldurchmesser. Dies entsprach auch den vorliegenden Analysen. Lediglich Marchesi et al. (1988) fanden bei L5 eine Ausnahme. Barrey et al. (2003) hatten für C7 ähnliche Werte für den Pedikeldurchmesser und die Pedikelhöhe, jedoch lagen ihre Angaben für die Pedikelhöhe fast einen cm niedriger als die des Autors. Dies konnte an der unterschiedlichen Definition der anatomischen Lage der Pedikelhöhe liegen.

#### 5.4 Verhältnis Pedikelhöhe - Pedikelaußendurchmesser (Pedikelform)

Wurde die Pedikelhöhe zu dem Pedikelaußendurchmesser in Relation gesetzt, lag das Ergebnis zum größten Teil über eins. Das bedeutete, daß die Pedikelhöhe meist größer als der Pedikelaußendurchmesser war. Lediglich bei L5 wurde bei 16 von 23 Pedikeln ein umgekehrtes Verhältnis gefunden. Bei C7 zeigten 7 von 28 Pedikeln eine niedrigere Pedikelhöhe. In einigen Fällen konnte dieses Verhältnis nicht errechnet werden, da einer der beiden Werte nicht gemessen werden konnte. Prinzipiell blieb die Aussage gültig, daß der Pedikelaußendurchmesser (besser noch der Pedikelinnendurchmesser) den limitierenden Faktor für die Schraubengröße darstellte, da er die geringste Größe hatte. L5 und C7 stellten als Übergangswirbel Ausnahmen dar.

Weiterhin ließ sich an der Größe dieser Relation die Form der Pedikel ablesen. Im HWS-Bereich lag sie zwischen 1,11 und 1,75. Im Thorakalbereich stieg sie auf 2,93. Bis L5 sank sie auf 0,85. Dies zeigte, daß die Pedikel in der BWS am stärksten längs-oval ausgeprägt waren und nach cranial und caudal deutlich runder wurden.

Kothe et al. teilten die BWS in obere, mittlere und untere und hatten TH02, TH06/07 und TH10/11 ausgemessen. Sie fanden eine sich ändernde Pedikelform von anterior nach posterior in der coronaren Ebene. In der Mitte war sie eher nierenförmig als oval (Kothe et al., 1996). Karaikovic et al. sahen, daß das Breiten - Höhen - Verhältnis der Pedikel von C2 bis C7 zunahm, die Pedikel also in der oberen HWS ovaler, in der unteren HWS runder waren (Karaikovic et al., 1997).

Berry et al. (1987) und Moran et al. (1989) stellten fest, daß die Pedikel caudal symmetrischer aufgebaut waren, als cranial.

Panjabi et al. veröffentlichten einen Artikel, der die Form der thorakalen Pedikel darstellte. Die coronaren Schnitte zeigten unterschiedliche Formen und Orientierungen der einzelnen BWS-Regionen, sogar innerhalb derselben Pedikel. Im oberen BWS-Drittel wurden sie von posterior nach anterior in der coronaren Ebene von einer Tropfenform zu einer Nierenform. In den beiden unteren Dritteln wurden sie von einer Tropfenform zu einer umgedrehten Tropfenform. Daher sollten die Pedikelschrauben immer in der Pedikelmittle eingeführt werden, da die Pedikel sich entweder nach cranial oder nach caudal verjüngten.

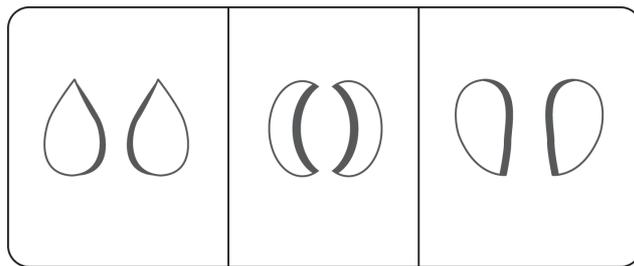


Abb. V. 3: Schematische Darstellung der Pedikel in der coronaren Ebene in der BWS  
Veränderung von der Tropfenform über die Nierenform zur umgedrehten Tropfenform

Sie waren immer in der coronaren Ebene nach lateral konkav gewölbt und die mediale Corticalis war dicker (Panjabi et al., 1997). Diese so unterschiedliche Form sogar innerhalb eines Pedikels, erklärte die relativ große Streubreite der Meßwerte. Die Schnittebene bei verschiedenen Pedikeln konnte nicht immer exakt identisch sein und außerdem zeigten die einzelnen Pedikel große Variationen.

### 5.5 Verhältnis Pedikelinnendurchmesser - Pedikelaußendurchmesser (Compacta)

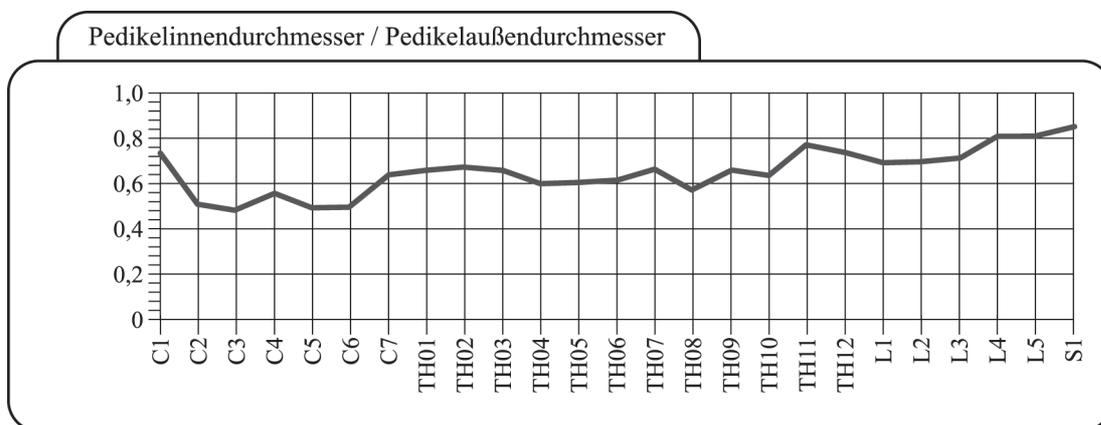
Zieht man den entscheidenden Pedikelinnendurchmesser vom -außendurchmesser ab, so erhält man die Stärke der Compacta. Nach den vorliegenden Analysen betrug der Pedikelinnendurchmesser zwischen 50 und 80% vom Pedikelaußendurchmesser (siehe Graphik V.2).

In der HWS lag er mit ca. 50% am niedrigsten. In der BWS stieg er auf 60 -70% und in der LWS auf 70 - 80% an. In den drei Abschnitten der Wirbelsäule blieb das Verhältnis jeweils nahezu konstant.

Kothe et al. hatten 18 Thorakalwirbel in 1 mm dicke coronare Schnitte senkrecht zur Pedikelachse angefertigt und diese durch Kontaktradiographie ausgewertet. Sie fanden in jedem Wirbelkörper einen Anteil von 61,3 bis 71,6% an Spongiosa (cancellous core). Auffällig war, daß die laterale Compactadicke immer geringer war als die mediale (Kothe et al., 1996). Auch Datir et al. (2004) bestätigten diese Aussage.

Die Compactadicke lateral wie medial war meistens größer als 0,2 cm, lediglich in der BWS war sie kleiner als 0,2 cm. Da hier aber auch der Pedikeldurchmesser insgesamt geringer war, lag sie prozentual gesehen dennoch im mittleren Bereich.

Moran et. al untersuchten 30 Präparate von TH02 bis L5. Dabei haben sie den breitesten und den schmalsten Pedikelaußendurchmesser, Corticalisdurchmesser und Spongiosadurchmesser beachtet. Es wurde reichlich Spongiosa gefunden. Die Compactadicke lateral und medial addiert betrug 10 bis 40% des Pedikelaußendurchmessers bei TH02 bis L5 (Moran et al., 1989).



Graphik V. 2: Abszisse: Pedikel von C1 bis S1 (rechts und links zusammengefasst)  
Ordinate: Verhältnis Pedikelinnen- zu -außendurchmesser

Das Verhältnis vom Innen- zum Außendurchmesser ist von großer klinischer Bedeutung. Sjöström et al. stellten fest, daß 85% der Pedikel größer wurden, wenn der Schraubendurchmesser größer als 65% des Pedikelaußendurchmessers war. Merkwürdigerweise wurde größtenteils die mediale Pedikelwand penetriert, obwohl diese dicker als die laterale war. Es wurden die Pedikeldimensionen vor Implantation und nach Entfernen der Pedikelschrauben verglichen. Es fand sich eine statistisch signifikante Veränderung des Pedikeldurchmessers und eine Formveränderung (die konkave Form der Pedikel wurde begradigt) (Sjöström et al., 1993).

Misenheimer et al. führten zur Messung des Pedikelinnendurchmessers Sonden mit immer größer werdendem Durchmesser ein. Sie stellten ebenfalls fest, daß sich der Pedikelaußendurchmesser änderte, wenn der Sondendurchmesser 80% des Pedikeldurchmessers überschritt (Misenheimer et al., 1989).

## 5.6 Der empfohlene Schraubendurchmesser

Der in der Praxis verwendete, empfohlene Pedikelschraubendurchmesser lag in der HWS meist bei 3,5 mm, in der BWS meist bei 5 und in der LWS meist bei 6,5 mm. Je größer er war, desto besser war die Stabilität. Hierfür wurde in der Literatur der Pedikelaußendurchmesser als limitierender Faktor angegeben. Der Pedikellinnendurchmesser wurde fast immer außer acht gelassen. Da die Pedikelschraube jedoch in die Compacta eindringen durfte, und dadurch auch der Halt und die Stabilität verbessert wurde, war dies durchaus legitim. Andererseits wurde dadurch die Gefahr der Pedikelsprengung und Formveränderung massiv erhöht.

In der **HWS** lag der Pedikelaußendurchmesser bei den vorliegenden Messungen meist über 4 mm.

**Bei C2** war das Minimum 3,7 mm. Von 11 Pedikeln lag nur einer unter 4 mm (9%).

**Bei C3** war das Minimum 3,0 mm. Von 23 Pedikeln lagen 8 unter 4 mm (35%).

**Bei C4** war das Minimum 3,3 mm. Von 19 Pedikeln lagen 5 unter 4 mm (26%).

**Bei C5** war das Minimum 3,4 mm. Von 22 Pedikeln lagen 4 unter 4 mm (18%).

**Bei C6** war das Minimum 3,0 mm. Von 23 Pedikeln lagen 5 unter 4 mm (22%).

**C7** zeigte als Übergangswirbel schon größere Werte. Sein Minimum war 4,3 mm. Von 26 Pedikeln lagen 7 unter 5 mm (27%). Bei TH01 und TH02 könnten schon Pedikelschrauben von 6 mm Durchmesser verwendet werden. Ihr Minimum war 5,7 mm. Von 9 Pedikeln lag nur einer unter 6 mm (1%). In der mittleren BWS nahmen die Größen jedoch wieder ab.

**Bei TH03** war das Minimum 4,3 mm, das Maximum 5,1 mm.

**Bei TH04** war das Minimum 3,4 mm, das Maximum 5,8 mm und nur ein Pedikel von 6 unter 4 mm (17%).

**Bei TH05** war das Minimum 3,4 mm. Von 8 Pedikeln lagen 2 unter 4 mm (25%).

**Bei TH06** war das Minimum 4,2 mm, das Maximum 5,8 mm.

**Bei TH07** war das Minimum 3,3 mm. Von 10 Pedikeln lagen 2 unter 4 mm (20%).

**Ab TH08** könnten größere Schrauben von 5 mm Durchmesser verwendet werden.

**Bei TH08** war das Minimum 3,7 mm. Von 10 Pedikeln lagen 4 unter 5 mm (40%).

**Bei TH09** war das Minimum 3,9 mm. Von 10 Pedikeln lagen 3 unter 5 mm (30%).

**Bei TH10** war das Minimum 4,3 mm. Von 6 Pedikeln lagen 2 unter 5 mm (33%).

**Ab TH11** könnten 6 mm Schrauben verwendet werden. Bei TH11 war das Minimum 6,6 mm.

**Bei TH12** war das Minimum 5,0 mm. Von 17 Pedikeln lagen 3 unter 6 mm (27%).

**Bei L1** war das Minimum 3,1 mm. Von 15 Pedikeln lagen 4 unter 6 mm (27%).

**Bei L2** war das Minimum 3,8 mm. Von 19 Pedikeln lagen 4 unter 6 mm (21%).

**Bei L3** war das Minimum 4,7 mm. Von 22 Pedikeln lag einer unter 6 mm (5%).

**Bei L4** war das Minimum 8,1 mm, bei L5 12,3 mm. Es lag kein Pedikel unter 8 mm.

**Bei S1** lag von 6 Pedikeln keiner unter 17 mm.

Aus den Zahlen war zu ersehen, daß in der LWS 6 mm Schrauben verwendet werden könnten, in der BWS 4 bis 5 mm und in der HWS höchstens 4 mm. Jedoch gab es immer individuelle Abweichungen. Vor jedem Eingriff sollten die Werte ausgemessen werden.

Jeanneret et al. führten an 33 Pedikeln von C3 bis C7 Pedikelschrauben mit 4 mm Durchmesser in einem transversalen Winkel von 45° ein und kamen zu sehr guten Ergebnissen, so daß sie diese Technik auch an drei Patienten mit Frakturen in diesem Bereich anwendeten. Da die meisten Sprengungen in der lateralen Pedikelwand stattfanden, sollte der transversale Winkel eher größer als kleiner gewählt werden. Ansonsten wurden 4 mm Schrauben in der caudalen HWS gut toleriert (Jeanneret et al., 1994).

Xu et al. empfahlen für C7 die Schraubeführung durch die Pedikel und nicht durch die Massae laterales, die sie sonst bevorzugten, da die Massae laterales hier sehr dünn waren und damit keine gute knöcherne Fixierung garantierten (Xu et al., 1995).

Ebraheim et al. hingegen empfahlen 1991 die Einführung der Schrauben in der HWS durch die Mitte der Gelenkfortsätze und nicht durch die Pedikel. Die Schrauben konnten 16 mm lang sein und sollten einen transversalen Winkel von mindestens 15° haben. In einer Studie von 1997 an 40 Präparaten von C3 bis C7 kamen sie zu dem Ergebnis, daß auch in der HWS Pedikelschrauben sicher verwendet werden konnten, wenn auch manchmal nur mit einem Durchmesser von 2,7 mm (Ebraheim et al., 1991, 1997).

Es bestanden große individuelle Schwankungen im Pedikelaußendurchmesser (bei L1 wurden auch Pedikel von nur 3,1 mm Durchmesser gefunden!). Daher sollten vor jeder Operation die Messungen für die betroffenen Wirbelkörper an Hand von computertomographischen Schnittbildern durchgeführt werden, um die individuelle Schraubengröße festzulegen. Auch sollte unbedingt beachtet werden, daß der Pedikelinnendurchmesser 50 bis 80% kleiner als der Pedikelaußendurchmesser ist. Der Schraubendurchmesser sollte daher nicht mehr als 65% des Pedikelaußendurchmessers betragen.

## 5.7 Die Pedikellängen

### *5.7.1 Die kürzeste Pedikellänge*

Die Literaturangaben wichen deutlich voneinander ab. Diese Strecke war anatomisch schwierig zu definieren und zeigte starke interindividuelle Schwankungen. Selbst wenn Anfangs- und Endpunkt identisch waren, war der Winkel der Pedikelachse sehr vom Untersucher abhängig.

Lediglich die Werte von Vaccaro et al. (1995) stimmten mit der vorliegenden Studie überein, obwohl die Länge nicht in Pedikelachse, sondern sagittal gemessen wurde. An et al. (1991), Scoles et al. (1988), Karaikovic et al. (1997) und Ebraheim et al. (1991, 1997) hatten niedrigere Zahlen gemessen. Dies hing mit den unterschiedlichen Definitionen der Pedikellänge zusammen. Zum Teil wurde diese Strecke sagittal gemessen (Krag et al., 1986, 1988), zum Teil wurden andere anatomische Landmarken festgelegt.

Marchesi et al. (1988) hatten die Pedikellänge in Pedikelachse und sagittal gemessen, fanden hierbei jedoch keinen statistisch signifikanten Unterschied, obwohl die sagittale Strecke meist 0,1 mm bis 0,5 mm kürzer war. Dies sprach dafür, daß die Definition des Winkels der Pedikelachse nicht für die große Streubreite der Meßergebnisse verantwortlich war. Also waren die anatomischen Landmarken und die interindividuellen Schwankungen die ausschlaggebenden Faktoren.

### *5.7.2 Pedikellänge bis Wirbelkörpervorderkante in Pedikelachse*

Für diese Strecke fanden sich in der Literatur viele verschiedene Definitionen. Vaccaro et al. (1995) und An et al. (1991) hatten eine abweichende Pedikelachse, bzw. eine lateral verschobene Meßstrecke und daher höhere Werte als die vorliegende Studie. Bailey et al. (1995) hatten sowohl die posteriore, als auch die anteriore Corticalis mitgemessen. Barrey et al. (2003), Chen et al. (1994) und Karaikovic et al. (1997) hatten diese Strecke dorsal bis zum Punkt der Pedikelprojektion auf die dorso-laterale Corticalis ausgedehnt. Daher hatten sie ebenfalls höhere Werte, aber denselben Kurvenverlauf wie hier. Scoles et al. (1988) zeigten keine Übereinstimmung, weder in den Werten, noch im Kurvenverlauf. Ferree (1992) fand bei Kindern niedrigere Zahlen und stärkere Kurvenschwankungen. Eine relativ gute Vergleichbarkeit zeigte sich bei Datir et al. (2004), Kim et al. (1994), Olsewski et al. (1990), Zindrick et al. (1986, 1987), Hou et al. (1994) und Ebraheim et al. (1991, 1997), wobei in der LWS das Maximum in der vorliegenden Studie bei L5 lag, bei den anderen Autoren zum Teil jedoch zwischen L2 und L4 schwankte. Kim et al. (1994) hatten als einzige

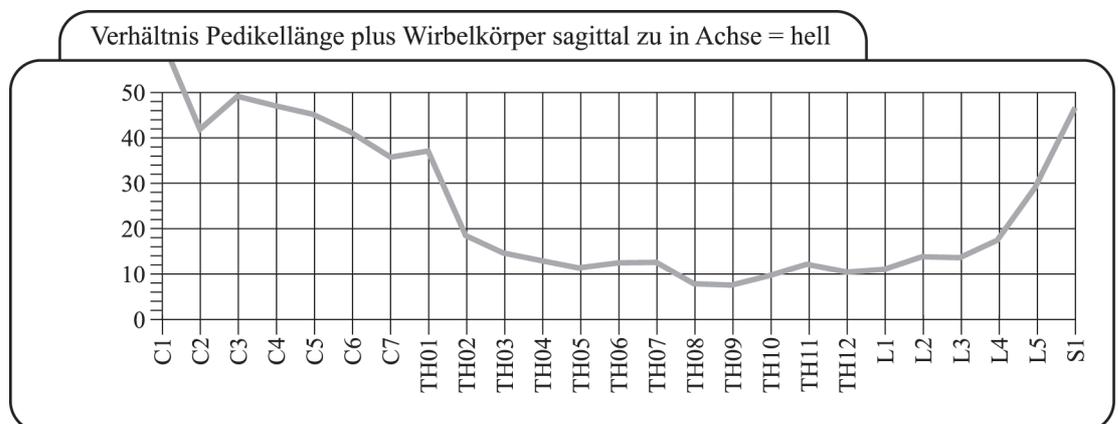
bei TH11 und TH12 kleinere Zahlen als bei der entsprechenden streng sagittal gemessenen Strecke. Sie führten dies auf den ebenfalls hier gefundenen negativen transversalen Winkel zurück. In der vorliegenden Studie und bei den restlichen Autoren, die beide Strecken gemessen hatten, war die Strecke in der Pedikelachse immer länger als die sagittale Strecke.

### 5.7.3 Pedikellänge bis Wirbelkörpervorderkante sagittal

Die Literaturangaben zeigten recht ähnliche Ergebnisse mit einem Maximum bei L2. Jedoch lagen in allen Vergleichen (Kim et al., 1994, Berry et al., 1987, Zindrick et al., 1986, 1987, Hou et al., 1994 und Chen et al., 1994) die vorliegenden Werte niedriger, zeigten aber denselben Kurvenverlauf. Dies war auf die Definition des Autors für die dorsale Begrenzung zurückzuführen. Lediglich Marchesi et al. (1988) zeigten einen abweichenden Verlauf mit einem Anstieg von 37,3 mm bei TH06 bis 4,1 mm bei TH12 und dann einem Abfall auf 33,4 mm bei L5.

### 5.7.4 Verhältnis Pedikellänge plus Wirbelkörper sagittal zu Pedikellänge plus Wirbelkörper in Pedikelachse

Betrachtete man das Verhältnis der Pedikellänge plus Wirbelkörper sagittal im Vergleich zu der Pedikellänge plus Wirbelkörper in Pedikelachsenrichtung gemessen, war meist die Strecke in Pedikelachse länger als die sagittale (siehe Graphik V. 3). In allen Fällen, in denen ein negativer transversaler Winkel vorlag, war jedoch die sagittale Strecke länger. Diese Längenunterschiede waren wichtig für stabilisierende Wirbelsäulenoperationen und bei der Auswahl der geeigneten Schraubenlängen. In der BWS lag der transversale Winkel bei vielen Pedikeln fast bei 0°. In diesen Fällen waren auch diese beiden Strecken fast gleich lang.



Graphik V. 3: Abszisse: Pedikel von C1 bis S1 (rechts und links zusammengefasst)  
 Ordinate: Verhältnis Pedikellänge plus Wirbelkörper sagittal zu Pedikellänge plus Wirbelkörper in Pedikelachse

Die Pedikellänge plus Wirbelkörper in Pedikelachse (AC, AD) war in der HWS doppelt so lang wie die sagittale Wirbelkörpertiefe (N). In BWS und LWS war sie nur noch ca. 1,5 mal so lang. Die Wirbelkörpertiefen in der LWS waren doppelt so groß wie in der HWS, aber die Pedikellänge nahm nicht im selben Verhältnis zu.

Krag et al. beschrieben diese Strecke (Pedikellänge plus Wirbelkörper) als chord length oder screw - path length. Sie hatten sie in 0°, 5°, 10° und 15° posterolateral zur sagittalen Ebene für die LWS gemessen. Bei 15° wurden die jeweils höchsten Werte gefunden. Sie waren ca. 1 cm länger, als bei 0°. Das hieß, die Schraube konnte bei anteromedialer Angulation tiefer eingeführt werden. Sie kamen bei einem Winkel von 15° auf ein Verhältnis von 1,6; also zwei Drittel so lang, wie die Wirbelkörpertiefe. Aber diese 15° entsprachen nicht immer der Pedikelachse. Daher waren diese Zahlen nicht genau mit den vorliegenden vergleichbar. Für 0° kamen Krag et al. auf 1,32, also ein Drittel länger als die Wirbelkörpertiefe (Krag et al., 1986, 1988). Dieser Wert war mit der streng sagittal gemessenen Pedikellänge plus Wirbelkörper vergleichbar. In der HWS stieg dieser von 0,8 auf 1,2 an und erreichte in BWS und LWS ca. 1,4. Damit war er kleiner, als der Wert in Pedikelachse.

Besonders in der oberen HWS war die streng sagittale Schraubenführung gar nicht möglich, da die Pedikel durch den großen transversalen Winkel nicht dorsal des Wirbelkörpers, sondern lateral davon lagen.

Auch aus diesen Zahlen wurde deutlich, daß durch Einführen der Pedikelschraube in Richtung der Pedikelachse mehr Länge erzielt wurde als durch streng sagittales Einführen. Dies führte wiederum zu einer größeren Stabilität der Fixation. Also ergab der Wert der Pedikellänge plus Wirbelkörper in Pedikelachse die Schraubenlänge, die verwendet werden konnte.

## 5.8 Die Pedikelwinkel

### *5.8.1 Transversaler Winkel*

Eine gute Übereinstimmung der vorliegenden Werte fand sich bei Barrey et al. (2003), McCormack et al. (1995), Panjabi et al. (1992), Jones et al. (1997), Krag et al. (1988), Kim et al. (1994), Berry et al. (1987), Zindrick et al. (1987), Ferree (1992), Chen et al. (1994), Stanescu et al. (1994) und Moran et al. (1989). Roy-Camille et al. fanden 1986, daß der transversale Winkel nie größer als 10° war, außer bei L5 mit 30°. Von TH04 bis L4 war er fast 0°.

Lediglich die negativen Werte, die hier bei TH08 und TH09 gemessen wurden, wurden von sämtlichen Autoren bei TH12 angegeben. Die Werte der vorliegenden Studie waren niedriger als die von Ebraheim et al. (1996) und höher als die von Olsewski et al. (1990) und Scoles et al. (1988).

Datir et al. (2004) fanden den größten transversalen Winkel in BWS bei TH01 mit 30°. Von TH05 bis TH12 waren die Winkel  $< 5^\circ$ . Sie beschrieben jedoch keine negativen Winkel.

Güven et al. führten 1994 postoperative Computer Tomographien zur Bestimmung der Lage der Pedikelschrauben durch. Dabei stellten sie die Wichtigkeit des transversalen Winkels fest. Bei den Pedikelschrauben, die die laterale Pedikelwand penetrierten, war größtenteils der transversale Winkel zu groß gewählt worden.

Alle Schrauben, die in den Spinalkanal eindringen, hatten einen zu kleinen Winkel. Mediale Penetration fanden sie meist in Regionen mit großen Variationen der anatomischen Landmarken, wie im thorako-lumbalen Übergang. Laterale Penetration fanden sie meist bei voroperierten Patienten in der LWS. Trotz der Metallartefakte bot die postoperative Computer Tomographie eine gute Kontrollmöglichkeit der Schraubenposition.

### *5.8.2 Sagittaler Winkel*

Die Literaturangaben wichen sehr stark voneinander ab. Sie waren weder mit den vorliegenden Ergebnissen, noch untereinander vergleichbar. Lediglich Barrey et al. (2003) fanden bei C7 sehr ähnliche Werte. Jedoch zeigten auch die vorliegenden Werte eine große Streubreite für die einzelnen Pedikel und starke Schwankungen im Kurvenverlauf. Die Schwierigkeiten bestanden in der Reproduzierbarkeit der Rekonstruktionen. Die Festlegung des Schnittwinkels dürfte an Präparaten untersucherabhängig sein. Dies führte zu den Abweichungen der Werte bei den verschiedenen Literaturangaben.

Der sagittale Winkel zeigte die größte Streuung. Jedoch fanden Pedikelpenetrationen meist medial oder lateral statt.

### *5.8.3 Coronarer Winkel*

Der coronare Winkel wurde von den meisten Autoren vollständig außer Acht gelassen. Er war zwar für die Schraubenführung vernachlässigbar, jedoch für die Festlegung der Schnittebenen in den Rekonstruktionen wichtig. In der coronaren Ebene ließ sich eine deutliche Veränderung der Pedikelform beobachten. In der BWS waren sie längsoval, nach cranial und caudal wurden sie runder. Phillips et al. brachten Drahtschlaufen an Pedikeln an und röntgen diese im pa Strahlengang. Die Drähte stellten sich oval, entsprechend den hier angefertigten coronaren Rekonstruktionen dar. Wurde der Strahlengang nach lateral rotiert, veränderte sich der Pedikeldurchmesser. Wurde er nach sagittal rotiert, veränderte sich die Pedikelhöhe. Das Maximum fand sich, wenn die Kippung der Pedikelachse entsprach (Phillips et al., 1994).

### 5.9 Empfohlene Schraubenlänge

In der stabilisierenden Wirbelsäulen Chirurgie wurden Pedikelschrauben durch die Pedikel in den Wirbelkörper eingeführt und durften maximal bis zur Wirbelkörper-vorderkante reichen. Wie oben beschrieben, war durch Neigung in Pedikelachsen-richtung ein längere Strecke zu erzielen als durch streng sagittale Führung. Daher war der limitierende Faktor für die Pedikelschraubenlänge die Pedikellänge plus Wirbelkörper in Pedikelachsenrichtung.

Aufgrund der vorliegenden Studien sollte für die **HWS** die Schraubenlänge in bis zu zwei Dritteln der Fälle bei 25 mm liegen. Im Folgenden wurden diese Schraubenlänge zu Pedikellänge plus Wirbelkörper in Pedikelachsenrichtung in Relation gesetzt.

**Bei C2** lagen die Längen zwischen 19,3 und 25,1 mm. Von 10 Pedikeln lagen nur einer unter 20 mm (10%).

**Bei C3** lagen die Längen zwischen 24,2 und 40,7 mm. Von 19 Pedikeln lag nur einer unter 25 mm (5%) und 8 unter 30 mm (4%).

**Bei C4** lagen die Längen zwischen 26,2 und 35,6 mm. Von 20 Pedikeln lag keiner unter 25 mm und 10 unter 30 mm (50%).

**Bei C5** lagen die Längen zwischen 24,3 und 33,3 mm. Von 19 Pedikeln lag nur einer unter 25 mm (5%).

**Bei C6** lagen die Längen zwischen 24 und 32,8 mm. Von 23 Pedikeln lagen 4 unter 25 mm (17%).

**Bei C7** lagen die Längen zwischen 22,1 und 34,5 mm. Von 22 Pedikeln lagen 6 unter 25 mm (27%)

Aufgrund der vorliegenden Studien sollte für die **BWS** die Schraubenlänge in bis zu zwei Dritteln der Fälle bei 35 bis 40 mm liegen.

**Bei TH01** lagen die Längen zwischen 27,1 und 34,8 mm. Von 8 Pedikeln lag keiner unter 25 mm und 5 unter 30 mm (17%).

**Bei TH02** lagen die Längen zwischen 35,8 und 37,9 mm.

**Bei TH03** lagen die Längen zwischen 31,3 und 36,5 mm. Von 6 Pedikeln lagen 2 unter 35 mm (33%).

**Bei TH04** lagen die Längen zwischen 35,2 und 42,1 mm. Von 6 Pedikeln lag keiner unter 35 mm.

**Bei TH05** lagen die Längen zwischen 33,7 und 41,8 mm. Von 8 Pedikeln lagen 2 unter 35 mm (25%).

**Bei TH06** lagen die Längen zwischen 37,5 und 41,2 mm. Von 6 Pedikeln lag keiner unter 35 mm.

**Bei TH07** lagen die Längen zwischen 34,3 und 43,3 mm. Von 10 Pedikeln lag einer unter 35 mm (10%).

**Bei TH08** lagen die Längen zwischen 38,9 und 44 mm. Von 10 Pedikeln lag nur einer unter 40 mm (10%).

**Bei TH09** lagen die Längen zwischen 32,5 und 44,5 mm. Von 10 Pedikeln lag nur einer unter 35 mm und 5 unter 40 mm (50%).

**Bei TH10** lagen die Längen zwischen 37,3 und 45,9 mm. Von 6 Pedikeln lag nur einer unter 40 mm (17%).

**Bei TH11** lagen die Längen zwischen 38,6 und 46,6 mm. Von 6 Pedikeln lag nur einer unter 40 mm (17%).

**Bei TH12** lagen die Längen zwischen 37,2 und 46,2 mm. Von 16 Pedikeln lagen 5 unter 40 mm (31%).

McLain et al. (2002) empfahlen 30 mm als sichere Schraubenlänge bei TH01 und TH02, 35 mm bei TH04 und TH05 und 40 mm bei TH05 und TH06. Bei TH05 und TH06 sollten nach den vorliegenden Messungen eher Schrauben mit einer Länge von 35 mm gewählt werden.

Aufgrund der vorliegenden Studien sollte für die **LWS** die Schraubenlänge in bis zu zwei Dritteln der Fälle bei 40 bis 45 mm liegen.

**Bei L1** lagen die Längen zwischen 38 und 47,5 mm. Von 14 Pedikeln lag nur einer unter 40 mm (7,1%).

**Bei L2** lagen die Längen zwischen 39 und 50,5 mm. Von 16 Pedikeln lagen 2 unter 40 mm (13%) und 5 unter 45 mm (31%).

**Bei L3** lagen die Längen zwischen 39,3 und 56,3 mm. Von 24 Pedikeln lag nur einer unter 40 mm (4%) und 8 unter 45 mm (33%).

**Bei L4** lagen die Längen zwischen 41,3 und 51,1 mm. Von 16 Pedikeln lag keiner unter 40 mm und 7 unter 45 mm (44%).

**Bei L5** lagen die Längen zwischen 40,4 und 59,6 mm. Von 26 Pedikeln lagen 4 unter 45 mm (15%).

**Bei S1** lagen die Längen zwischen 55,6 und 69,8 mm. Von 6 Pedikeln lag keiner unter 55 mm.

Die Schraubenlänge als limitierender Faktor war wichtig, da von ihr die Stabilität der Fixierung abhing. Auf die Schraube wurde eine Hebelwirkung ausgeübt. Um so länger der verankerte Hebel war, um so mehr Kraft war zur Lockerung notwendig. Es sollte die jeweils längstmögliche Schraube ausgewählt werden, um die größtmögliche Stabilität zu erreichen.

Krag et al. führten eine Studie durch, in der die Stabilität der Pedikelschrauben in Abhängigkeit von der Insertionstiefe gemessen wurde. Es wurde getestet, wieviel Kraft aufgewendet werden mußte, um die Schraube aus ihrer ursprünglichen Lage zu verändern. Dabei wurde zwischen Torsionskraft und Flexionskraft unterschieden. Für den Torsionstest wurde die Kraft in der transversalen Ebene eingesetzt, um die Schraubenspitze nach lateral zu biegen. Der Flexionstest wurde in der sagittalen Ebene durchgeführt, die Schraubenspitze sollte sich nach cranial bewegen. Wegen der großen interindividuellen Unterschiede wurden jeweils der rechte und der linke Pedikel eines Präparates verglichen. Die Studie kam zu dem Ergebnis, daß Schrauben, die bis zur ventralen Wirbelkörpercompacta eingeführt waren, die größte Stabilität hatten. Schrauben, die bis 80% der Wirbelkörpertiefe eingeführt waren,

waren zwar stabiler als die bis 50% eingeführten. Der Sprung zwischen 80% und 100% war jedoch deutlich größer, weil die Schraubenspitze schon in die Compacta eingedrungen war. Die Compacta bot aufgrund ihrer höheren Dichte einen größeren Halt als die Spongiosa. Allerdings nahm das Operationsrisiko zu, je weiter die Schraube eingeführt wurde, da die ventrale Wirbelkörpercompacta durchbohrt und die davor liegenden großen Gefäße verletzt werden konnten. Dieses Risiko sollte immer individuell abgewogen werden. Desweiteren stellte die Arbeitsgruppe fest, daß eine Rotation einer Schraube am dorsalen Ende um 1° eine Verschiebung der Schraubenspitze um 0,7 mm bedeutete. Dies führte zu einer Zerstörung trabekulärer Strukturen und konnte eine weitere Schraubenlockerung bewirken. Daher war es außerordentlich wichtig, die Schraube so tief, wie möglich einzuführen, um eine möglichst große Stabilität zu erreichen (Krag et al., 1989).

### 5.10 Sonderstellung S1

Die Übergangswirbel, wie C7, TH01, TH12, L1, L5 und S1 nahmen Sonderstellungen ein, da sich in diesen Bereichen die Wirbelsäulenkrümmung und die Anatomie der Wirbelkörper änderte. L5 und S1 waren dabei am häufigsten von angeborenen Variationen betroffen, im Sinne von Lumbalisation (der erste Sacralwirbel wurde zu einem freien sechsten Lendenwirbelkörper) und Sacralisation (der fünfte Lendenwirbelkörper wurde zu einem fixierten ersten Sacralwirbelkörper). Diese Variationen gab es natürlich auch an den anderen Übergangswirbeln, allerdings erheblich seltener.

In der Sacralwirbelsäule sind die Bandscheiben größtenteils gar nicht, in Einzelfällen noch rudimentär, vorhanden. Die Wirbelkörper sind miteinander verschmolzen und auch die Querfortsätze sind untereinander und mit den Wirbelkörpern verschmolzen. Bei S1 gab es daher Schwierigkeiten bei der genauen Definition der Pedikel, da sie lateral übergangslos zur Ala sacralis werden. Die laterale Wand der Pedikel ist nicht klar abgrenzbar. Da die Ala sacralis weiter nach ventral reicht, als die ventrale Corticalis des Wirbelkörpers, ist auch der transversale Winkel nicht eindeutig. Jacobson et al. schrieben sogar, bei S1 gäbe es keine echten Pedikel mehr (Jacobson et al., 1975).

Eine technische Schwierigkeit ergab sich aus der teilweise sehr starken Kippung der Wirbelkörper und der eingeschränkten Möglichkeit der Gantrykippung des Computer Tomographen nur bis 26°. Somit war nicht immer eine Schnittführung parallel zur Wirbelkörperdeck- oder -grundplatte gegeben. Dies verfälschte sämtliche Meßwerte.

Zahlreiche Arbeitsgruppen beschäftigten sich mit dieser Sonderstellung des ersten Sacralwirbels (Ebraheim et al., 1997, Miller et al., 1993, Steinmann et al., 1990,

Asher et al., 1986, De Peretti et al., 1991). Die umfangreichste Arbeit stellten Xu et al. (1995) vor. Sie hatten an 50 Präparaten ausschließlich S1 direkt vermessen. Für die Wirbelkörperbreite und die Spinalkanalbreite fanden sie signifikante Unterschiede zwischen Männern und Frauen. Sie teilten hierbei die Pedikel in zwei Zonen ein. Zone eins war der Bereich von der vorderen Wirbelkörperkante bis zur posterioren Sacrumkante ventral des oberen Facettengelenks. Zone zwei lag lateral davon. Zone zwei empfahlen sie als sicherer für die Schraubenplatzierung.

Für die Pedikellänge bis Wirbelkörpervorderkante hatten sie in Zone eins 34,6 bis 34,9 mm, in Zone zwei 41,7 bis 43,7 mm gemessen. Der Wert der vorliegenden Studie lag bei 60,8 bis 62,9 mm. Die Werte waren nicht direkt vergleichbar. Der transversale Winkel zeigte in Zone eins eine große Streubreite mit  $10,4^\circ$  bis  $10,9^\circ$  und in Zone zwei  $39,4^\circ$ . Der Untersucher in der vorliegenden Studie fand  $43,67^\circ$  bis  $49,67^\circ$ . Die Spinalkanalbreite gaben sie mit 26 bis 27,5 mm an, wir mit 39,1 mm. Die Pedikelhöhe wurde mit 20,6 bis 21 mm gemessen, hier mit 26,2 bis 26,5 mm. Die Wirbelkörperbreite gaben sie mit 41,7 bis 45,4 mm an, der Untersucher hier mit 56,8 mm. Den Pedikelaußendurchmesser fanden sie in Zone eins bei 34,6 bis 34,9 mm und in Zone zwei bei 15,6 bis 14,7 mm. Die vorliegende Studie fand ihn bei 20,2 mm. Die Wirbelkörpertiefe gaben sie bei 29,3 bis 30,5 mm an, hier lag sie bei 33,3 mm. Die Unterschiede bei den Ergebnissen der genannten Messungen waren auf die unterschiedlichen Untersuchungsmethoden (direkte Vermessung, computertomographische Messungen) und die dadurch bedingten technischen Unterschiede zurückzuführen.

Zwei interessante Arbeiten führten morphometrische Analysen von S1 durch und untersuchten die optimale Platzierung von Pedikelschrauben an S1.

Morse et al. führten eine computertomographische Untersuchung an den S1 Pedikeln von 10 Präparaten durch. Dabei errechneten sie einen Mittelwert für den transversalen Winkel (anders definiert als in dieser Studie). In diesem festgelegten Winkel führten sie dann Pedikelschrauben ein und fanden eine hohe Fehlplatzierungsrate. Ihr Ergebnis war, daß es bei S1 keine Standardwinkel gab bzw. diese ein zu hohes Risiko der Schraubenpenetration darstellten. Es war daher notwendig, vor jeder Operation an S1 eine individuelle computertomographische Winkelfestlegung durchzuführen (Morse et al., 1994). Mirkovic et al. verwendeten an 22 Präparaten Pedikelschrauben mit einem Durchmesser von 6,5 mm und einem sagittalen Winkel von  $25^\circ$ . Den transversalen Winkel variierten sie mit  $30^\circ$  (38 mm Schraubenlänge) und  $45^\circ$  (44 mm Schraubenlänge). Der  $30^\circ$  Winkel führte häufiger zu Verletzungen der Vena iliaca interna, der  $45^\circ$  Winkel häufiger zur Verletzung des Plexus lumbosacralis.

Sie beschrieben die Zone medial des Ileosacralgelenks unter Verwendung eines  $30^\circ$  Winkels als am sichersten (Mirkovic et al., 1991).

Obwohl die Meßergebnisse im Literaturvergleich große Variationen zeigten, waren Schraubenplazierungen bei S1 sicher durchführbar, da die Pedikel zwar kurz waren, aber lateral viel Platz boten. Wenn also ein großer transversaler Winkel gewählt wurde, bestand relativ viel Spielraum. Dennoch sollten gerade in diesem Bereich aufgrund der großen individuellen Unterschiede (große Streubreite auch innerhalb der einzelnen Studien) unbedingt präoperative Computer Tomographien durchgeführt werden. Für S1 standen hier nur eine relativ geringe Stückzahl und teilweise unklare anatomische Begrenzungen der Pedikel zur Verfügung, so daß auch hier eine große Streuung der Werte vorlag. Darüber hinaus mußte das Vorhandensein von Übergangswirbeln beachtet werden. In der vorliegenden Studie wurde der jeweils erste fixierte Wirbelkörper als S1 definiert.

### 5.11 Die Spinalkanalform

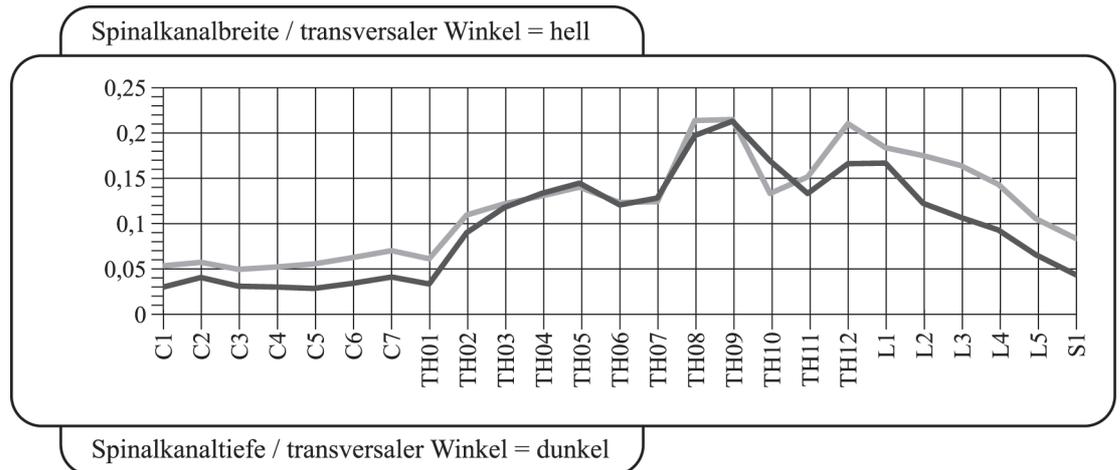
#### *5.11.1 Spinalkanalbreite*

Für die Spinalkanalbreite zeigte die gesamte Literatur eine gute Übereinstimmung. McCormack et al. (1995), Panjabi et al. (1991, 1997), Berry et al. (1987), Marchesi et al. (1988), Tominaga et al. (1995), Dommissie (1975) und de Peretti et al. (1993) entsprachen den vorliegenden Messungen sowohl in den Werten, als auch im Kurvenverlauf sehr gut. Scoles et al. (1988), Eisenstein (1976, 1977, 1983) und Amonoo-Kuofi (1982, 1985) hatten etwas kleinere Zahlen gefunden. Ebenfalls Cotterill et al. (1986) hatten bei einzelnen Wirbelkörpern kleinere Spinalkanalbreiten gemessen. Im Vergleich mit Postacchini et al. (1983) stimmten die vorliegenden Ergebnisse besser mit den italienischen als den indischen Präparaten überein. Die meisten Autoren betonten, daß die Spinalkanalbreite immer größer als die Spinalkanaltiefe war. Eisenstein (1976, 1977, 1983) hatte keine Spinalkanalbreite unter 16 mm gemessen.

#### *5.11.2 Spinalkanaltiefe*

Die Spinalkanaltiefe wurde in der Literatur zum Teil (Postacchini et al., 1983 und Eisenstein, 1976, 1977, 1983) am cranialen und caudalen Ende des entsprechenden Wirbelkörpers gemessen, daher waren nicht alle Zahlen vergleichbar. Eine gute Übereinstimmung mit den vorliegenden Ergebnissen fanden sich bei Panjabi et al. (1991, 1997), Berry et al. (1987), Marchesi et al. (1988), Tominaga et al. (1995). und de Peretti et al. (1993). Bei Postacchini et al. (1983) entsprachen diese Werte eher seinen an italienischen Präparaten erhobenen. Scoles et al. (1988) und Cotterill et al. (1986) zeigten insgesamt niedrigere Werte. Amonoo-Kuofi (1982, 1985) betonte die Sanduhrform von L1 bis L5 mit einem Minimum bei L3. Dies konnte hier bestätigt werden.

### 5.11.3 Verhältnis Spinalkanaltiefe - transversaler Winkel - Spinalkanalbreite



Graphik V. 4: Abszisse: Pedikel von C1 bis S1 (rechts und links zusammengefasst)  
 Ordinate: hell: Verhältnis Spinalkanalbreite zu transversalem Winkel  
 dunkel: Verhältnis Spinalkanaltiefe zu transversalem Winkel

Zwischen der Spinalkanaltiefe und dem transversalen Winkel bestand eine Korrelation. Obwohl die Größe der Spinalkanaltiefe über die gesamte Wirbelsäule ziemlich konstant blieb und der transversale Winkel in den drei Wirbelsäulenabschnitten stark variierte, zeigte sich ein Korrelationsfaktor. In der HWS war er am deutlichsten und lag in einem engen Bereich von 0,02 bis 0,05. In der BWS lag er zwischen 0,1 und 0,2; in der LWS sank er von 0,2 auf 0,05 ab.

Für das Verhältnis zwischen Spinalkanalbreite und transversalem Winkel ergaben sich dieselben Faktoren: HWS 0,06; BWS 0,15; LWS 0,16. Die Kurven entsprachen sich.

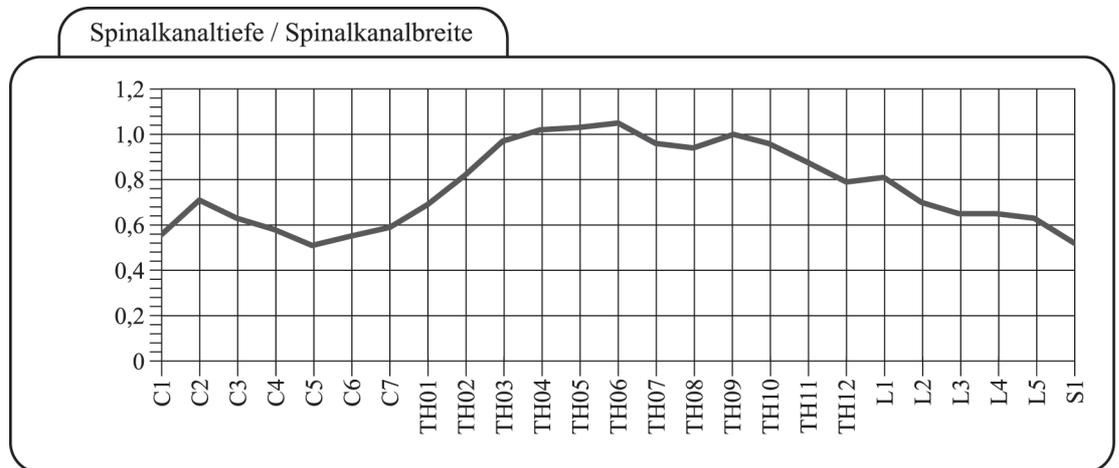
Da die Pedikel den Spinalkanal seitlich begrenzen, wurde die Breite des Spinalkanals um so größer, je größer der transversale Winkel der Pedikel wurde und je länger die Spinalkanaltiefe wurde, desto steiler mußte der transversale Winkel werden. Die sagittale Tiefe wurde dementsprechend kürzer, wenn der transversale Winkel größer wurde.

Also änderte sich die Fläche des Spinalkanals nicht abhängig vom transversalen Winkel. Damit hatte dieser auch keinen direkten Einfluß auf die Spinalkanalstenose, wie Eisenstein (1983) postulierte. Andererseits hatte der transversale Winkel einen großen Einfluß auf die Spinalkanalform. Je größer er war, desto querovaler wurde die Form. Damit beeinflusste er die Spinalkanalbreite stärker als die Spinalkanaltiefe. Allerdings wurde die Spinalkanaltiefe kleiner, wenn zu einem großen transversalen Winkel eine kurze Pedikellänge hinzukam.

### 5.11.4 Spinalkanalform

Dommissie hatte die Spinalkanaltiefe und -breite an sechs Skeletten von TH01 bis S1 und an 19 weiteren von L1 bis S1 ausgemessen. Die Spinalkanalbreite wurde anhand

von 50 Röntgenbildern von Patienten von TH01 bis S1 verifiziert. Er kam zu dem Ergebnis, daß der Spinalkanal lumbal und zum lumbosacralen Übergang hin breiter und flacher wurde. Bei TH06 fand er die jeweils niedrigsten Werte und eine fast runde Form des Spinalkanals. Bei S1 war der Unterschied zwischen beiden Werten am größten. Diese Meßwerte allein gesehen waren aber von geringer klinischer Relevanz, da auch der Inhalt des Spinalkanals sich änderte, vom Rückenmark zur Cauda equina (Domisse, 1975).



Graphik V. 5: Abszisse: Pedikel von C1 bis S1 (rechts und links zusammengefasst)  
Ordinate: Verhältnis von Spinalkanaltiefe zu Spinalkanalbreite

Da nach den vorliegenden Messungen die Spinalkanaltiefe relativ konstant blieb, war sowohl die Form, als auch die Flächengröße des Spinalkanals von der Spinalkanalbreite abhängig. Die Spinalkanaltiefe war bei den meisten Wirbelkörpern kleiner als die Spinalkanalbreite und somit der limitierende Faktor für die Spinalkanalstenose. Lediglich im mittleren BWS-Bereich erreichte der Faktor P / O (Spinalkanaltiefe geteilt durch Spinalkanalbreite)  $\geq 1$ . d. h., hier waren Spinalkanaltiefe und -breite fast gleich und die Spinalkanalform war nahezu rund. Bei TH04 und TH05 war die Spinalkanalbreite der limitierende Faktor, jedoch war diese Tatsache von geringer klinischer Relevanz, da in der BWS wenige Spinalstenosen vorkamen. Von TH01 auf TH03 zeigte die Kurve einen steilen Anstieg. Der Abfall im thorakolumbalen Übergang verlief flacher.

#### 5.11.5 Spinaler Index

Der spinale Index nach Jones und Thomson war die Spinalkanaltiefe (SKT), multipliziert mit der Spinalkanalbreite (SKB), dividiert durch das Produkt aus Wirbelkörpertiefe (WKT) und Wirbelkörperbreite (WKB).

$$\frac{SKT \times SKB}{WKT \times WKB}$$

(Eisenstein, 1976)

Ein weiter Spinalkanal ergab einen niedrigen Index. Für die gesamte Wirbelsäule betrug der Index 0,66. Jedoch zeigten sich in den einzelnen Wirbelsäulenabschnitten große Unterschiede. Die HWS hatte den größten Wert mit 1,04. Dann kam die BWS mit 0,45 und die LWS mit 0,36. Daraus konnte geschlossen werden, daß in der LWS der kleinste Spinalkanal im Verhältnis zur Wirbelkörpergröße bestand. Direkte Rückschlüsse auf das Vorliegen einer Spinalkanalstenose konnten jedoch nicht gezogen werden. Eisenstein erhielt für die LWS ein Ergebnis zwischen 1: 2,8 und 1: 3,8. Für kaukasische Männer kam er auf 1: 3,6. Jedoch sah auch er den spinalen Index nicht als zuverlässigen Faktor für die Spinalkanalstenose an, sondern ausschließlich die Spinalkanaltiefe (Eisenstein, 1976).

### 5.12 Die Wirbelkörperform

#### *5.12.1 Wirbelkörperbreite*

Gute Übereinstimmung fanden sich mit Bailey et al. (1995), Berry et al. (1987), Marchesi et al. (1988) und Eisenstein (1976, 1977, 1983).

Scoles et al. (1988) hatten die Wirbelkörperbreite an der Wirbelkörperdeckplatte gemessen, ihre Werte waren also etwas höher. Tominaga et al. (1995) hatten cranial und caudal gemessen, wobei der caudale Wert immer höher lag. Die vorliegenden Werte des größten Durchmessers entsprachen gut den caudalen von Tominaga. Cotteril et al. (1986) und van Schaik et al. (1985) fanden bei einzelnen Wirbelkörpern höhere Werte. Larsen und Smith (1980) bemerkten eine Zunahme der Größe im Alter, die sie jedoch in Abhängigkeit von degenerativen Prozessen im Sinne von periostalen Anbauten sahen. Sie fanden deutlich höhere Werte. Eisenstein (1976, 1977, 1983) betonte einen Unterschied zwischen Männern und Frauen.

#### *5.12.2 Wirbelkörpertiefe*

In einigen Fällen (Eisenstein (1976, 1977, 1983), Scoles et al. (1988) Berry et al. (1987) und Cotteril et al. (1986)) fand sich eine gute Übereinstimmung der Werte. Einige Autoren (Vaccaro et al. (1995), Tomonaga et al. (1995) und Stanescu et al. (1994)) hatten diese Strecke an der Wirbelkörperdeck- oder -grundplatte vermessen und waren daher nicht exakt vergleichbar. Bailey et al. (1995), Krag et al. (1986, 1988), Marchesi et al. (1988), Van Schaik et al. (1985) und Larsen und Smith (1980) hatten höhere Werte gefunden. Eisenstein (1976,1977,1983) und Larsen und Smith (1980) fanden einen deutlichen Unterschied zwischen Männern und Frauen.

Krag et al. (1986, 1988) sahen die Bedeutung dieser Messung hauptsächlich in der

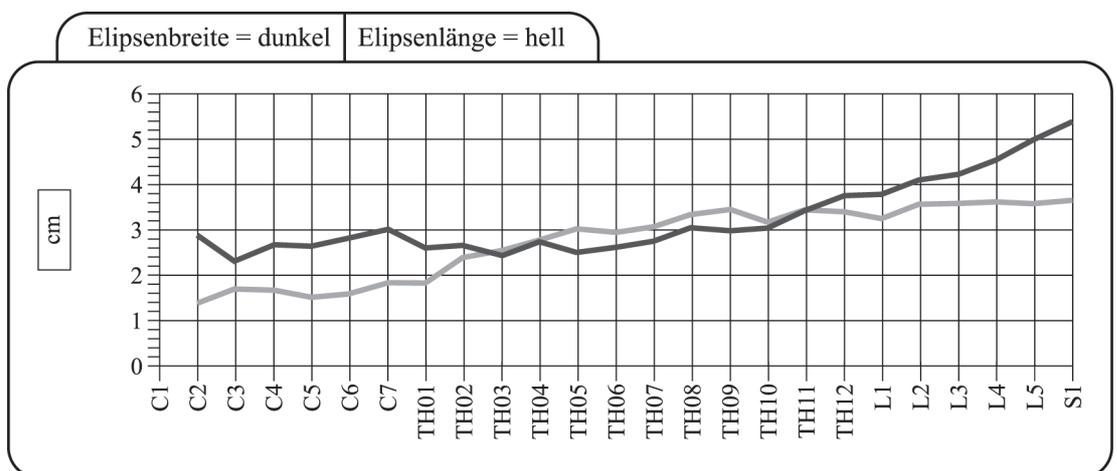
Festlegung eines Verhältnisses zur chord length (Pedikellänge plus Wirbelkörper in Pedikelachsenrichtung). So könnte die Pedikellänge auch anhand eines konventionellen seitlichen Röntgenbildes nur durch Messung der Wirbelkörpertiefe errechnet werden, durch Multiplikation mit dem Faktor 1,5.

### 5.12.3 Form der Wirbelkörper

Die Form der Wirbelkörper variierte in den drei Teilen der Wirbelsäule. In der HWS war sie queroval. Nach der vorliegenden Analyse betrug das Verhältnis von Wirbelkörpertiefe zu Wirbelkörperbreite 0,4 bis 0,6. In der BWS betrug das Verhältnis 0,8 bis 1. Die Wirbelkörper waren fast rund, einige auch längsoval. In der LWS sank das Verhältnis wieder auf 0,7 bis 0,8.

Dies deckte sich mit den Zahlen von Van Schaik et al. (1985), die bei L3 bis L5 0,78; 0,78 und 0,75 fanden. Die Wirbelkörper der LWS waren also weniger oval geformt, als die der HWS.

Die eingezeichneten Ellipsen veranschaulichten dasselbe Ergebnis, obwohl der Ellipsenmittelpunkt weder dem Wirbelkörpermittelpunkt noch dem Mittelpunkt des breitesten Wirbelkörperdurchmessers entsprach. Dennoch zeigten der Ellipsenlängsdurchmesser und der Ellipsenquerdurchmesser dasselbe Verhältnis wie die Wirbelkörpertiefe und Wirbelkörperbreite. Beide Messungen repräsentierten also die Wirbelkörperform. Die Kurven verliefen fast spiegelbildlich und überschritten sich in den Übergangsregionen von HWS zu BWS und von BWS zu LWS.



Graphik V. 6: Ellipsenbreite und -länge  
 Abszisse: Pedikel von C1 bis S1 (rechts und links zusammengefasst)  
 Ordinate: hell: Ellipsenlänge in cm  
 dunkel: Ellipsenbreite in cm

## 6. Zusammenfassung des Literaturvergleichs

Der wichtigste morphometrische Wert vom menschlichen Wirbel in Hinblick auf die Wirbelsäulenchirurgie, war der Pedikellinnendurchmesser. Er wurde jedoch von den meisten Autoren nicht beachtet. Dabei war dieser der limitierende Faktor bei Manipulationen am Pedikel. Da auch die Corticalisdicke schwanken konnte, waren Messungen des Pedikelaußendurchmessers nicht ausreichend. Dieser Tatsache wurde in der bisherigen Literatur zu wenig Bedeutung geschenkt.

Auch die Wichtigkeit des transversalen Winkels wurde unterschätzt. Für die Schraubenführung war die genaue Kenntnis dieses Wertes nicht zu vernachlässigen, da sonst die mediale oder laterale Pedikelwand penetriert werden konnte (Göven et al., 1994). Daß die Pedikel der untersten thorakalen Wirbelkörper eine posteromediale Angulation zeigten, ist kaum bekannt.

Die umfassende Literaturrecherche zeigte ein Problem bei der Vergleichbarkeit der Daten deutlich auf. Verantwortlich waren hierfür die unterschiedlich gewählten anatomischen Landmarken. Jedoch, soweit die Vergleichbarkeit gegeben war, kamen die meisten Autoren zu ähnlichen Ergebnissen, die auch den vorliegenden Analysen entsprachen. Auch wenn die Daten nicht exakt übereinstimmten, zeigten die Kurvenverläufe die gleiche Tendenz. Das bedeutete, daß die anatomischen Relationen gleich blieben, trotz interindividueller Schwankungen.

Auch die direkt an Präparaten gemessenen Daten stimmten gut mit den computertomographisch erhobenen Daten überein. Daher konnte die Computer Tomographie als zuverlässige Methode für die Messung anatomischer Strecken angesehen werden.

Der entscheidende Erkenntnisgewinn der vorliegenden Arbeit lag in der großen Anzahl von untersuchten Wirbelkörpern (174) und der morphometrischen Analyse des für die Wirbelsäulenchirurgie so entscheidenden Pedikellinnendurchmessers. Bei Werten des Pedikellinnendurchmessers von 0,10 bis 1,98 cm, muß somit zu einem individuell angepassten Einsatz von Pedikelschrauben nach vorliegender Computer Tomographie der entsprechenden Region dringend geraten werden. Zusätzlich sollte der transversale Winkel exakt vermessen werden. Nur so können optimale Ergebnisse erzielt werden.

## 7. Neuere Erkenntnisse, Möglichkeiten, Fortschritte

Kalfas et al. zeigten 1995 ein optimiertes Vorgehen auf, wie es der Autor der vorliegenden Arbeit nach aktuellen Datenlage auch empfehlen würden. Mit Hilfe von „frameless stereotaxy“ könnten Pedikelschrauben sicherer und korrekter platziert werden. Praeoperative Computer Tomographien des entsprechenden Segments wurden in ein Graphic-Computer-Programm geladen. Mit einem elektronischen Gerät konnte der Chirurg eine Landmarke im Operationsgebiet festlegen und erhielt multiplanar rekonstruierte Computer Tomographie Bilder auf der Workstation. Diese Bilder konnten manipuliert werden, so daß der Chirurg den z.B. Schraubeneintrittspunkt, die Schraubenlänge, den Schraubendurchmesser und so weiter definieren konnte.

Lavallee et al. (1995) stellten ein ähnliches System vor. Der klinische Gewinn war, zuverlässige und optimale transpedikuläre Fixation zu gewährleisten und diese auch cranial der LWS möglich zu machen.

Die Möglichkeiten der Computer assistierten bildgesteuerten Verfahren intraoperativ entwickeln sich immer weiter. Computer tomographisch gesteuerte und intraoperative Durchleuchtungsverfahren wurden von Austin et al. (2002) der konventionellen Technik der Laminoforaminotomie gegenübergestellt. Die Pedikelschrauben konnten insbesondere durch computer tomographisch gesteuerte Verfahren viel akkurater platziert werden. Insbesondere bei krankhaft veränderten anatomischen Verhältnissen empfahlen sie die bildgesteuerten Verfahren. Solange die Form der Wirbelkörper und Pedikel im Normbereich liegt, hält der Autor der vorliegenden Arbeit eine Navigation nicht für zwingend erforderlich, sondern eine präoperative Computer Tomographie für ausreichend.

Ebmeier et al. (2003) testeten das spinale Navigationssystem (EasyGuideSpine und Tomoscan M-EG, Philips Medical Systems). Die intraoperative Computer Tomographischen Bilder waren sehr hilfreich. Dennoch kam es in 6,3% der Patienten zu Schraubenfehlplatzierungen. Schnake et al. (2004) beschrieben 1,9% Fehlpplatzierungen trotz eines auf Computer Tomographie basierenden optoelektronischen Navigationssystems. Grutzner et al. (2004) fanden 1,7% Fehlpplatzierungen. Sie kamen zu dem Ergebnis, daß das Siremobil Iso-C(3D) (Siemens, Spiral CT) eine sehr akkurate Methode zur Pedikelschraubenplatzierung sei. Wang et al (2004) sahen eine höhere Sensitivität bei der Durchleuchtung, aber eine höhere Spezifität bei Computer Tomographie zur Untersuchung der Schraubenplatzierung. Dennoch wurden die intraoperativen Navigationen, basierend auf Computer Tomographie auch von Bostelmann et al. (2004) aufgrund der multidimensionalen Kontrolle der Schraubenplatzie-

rungen empfohlen. Die besseren Ergebnisse in der Schraubenplatzierung wogen die etwas längere Operationszeit wieder auf.

Berrey et al. betonten noch 2003, daß die morphologischen Hinweise noch nicht ausreichen, um eine korrekte Schraubenplatzierung zu gewährleisten. 2001 behaupteten Chaynes et al., daß lediglich der Pedikeldurchmesser den Schraubendurchmesser limitiert. Diese Einstellung sollte dringend überdacht werden. Die vorliegende Arbeit zeigte deutlich, daß zum einen der Pedikellinnendurchmesser der eigentlich entscheidende limitierende Faktor ist. Dieser Tatsache wird jedoch in den meisten Publikationen nach wie vor nicht genügend Aufmerksamkeit geschenkt. Zum anderen beeinflussen die Pedikelwinkel, bzw. die Anordnung der Pedikel am Wirbelkörper und die Pedikelform sehr wohl die Schraubenauswahl.

Schon allein durch Verwendung der Spiral Computer Tomographie steht ein deutlich verbessertes bildgebendes Verfahren zur Verfügung. Rekonstruktionen sind in allen Ebenen mit erheblich besserer Qualität möglich. Es sollte vor jeder Wirbelsäulen Operation dringend eine Computer Tomographie des entsprechenden Bereichs mit Rekonstruktionen der betroffenen Pedikel angefertigt werden. Wir sollten uns nicht auf standardisierte Normwerte verlassen, sondern immer anatomische oder pathologische Varianten vorher genau abklären. Sonst ist mit falscher Schraubenauswahl von bis zu einem Drittel der Fälle zu rechnen (siehe Kapitel V.5.6 und V.5.9).

Die postoperative Abklärung der richtigen Schraubenplatzierung mittels Computer Tomographie ist jedoch durch die Metallartefakte sehr erschwert. Fayyazi et al. (2004) hatten dies an Präparaten überprüft und kamen zu dem Ergebnis, daß die Computer Tomographie eine relativ schlechte Sensitivität zur Lage der Pedikelschrauben aufwies. Yeom et al. (2003) arbeiteten jedoch an der Möglichkeit, Daten aus der Computer Tomographie auf einen personal Computer (PC) zu übertragen, wodurch die Metallartefakte reduziert wurden. Die Schraubenlage konnte dadurch besser identifiziert werden. Diese könnte entscheidend sein für die postoperative Evaluation des Operationserfolgs.

## VI. ZUSAMMENFASSUNG

Der Erfolg der stabilisierenden Wirbelsäulenchirurgie hängt entscheidend von der Auswahl der richtigen Pedikelschraube ab. Insbesondere der Schraubendurchmesser, die Schraubenlänge und der Einführungswinkel sind zu berücksichtigen, da es große (inter-) individuelle anatomische Schwankungen gibt.

Die vorliegende Arbeit beschäftigte sich mit den röntgenmorphometrischen Gegebenheiten der Wirbel. Es wurde bei einem großem Patientenkollektiv an 174 Wirbelkörpern folgende entscheidende Messungen durchgeführt: Pedikelaußen- und -innendurchmesser, Pedikellänge und Pedikelwinkel. Dabei ist der Pedikelinnendurchmesser deutlich hervorzuheben, da er dem tatsächlichen Schraubendurchmesser entsprechen sollte und in der gegenwärtigen Literatur bisher zu wenig Beachtung gefunden hat. Als Richtlinien für die Pedikelschraubendurchmesser empfiehlt sich für die Halswirbelsäule (HWS) bis zu 4 mm, für die Brustwirbelsäule (BWS) 4 - 5 mm und für die Lendenwirbelsäule (LWS) 6 mm. Die Schraubenlänge (wenn im entsprechenden transversalen Winkel eingeführt) beträgt in der HWS 25 mm, in der BWS 35 - 40 mm und in der LWS 40 - 45 mm. Dabei sollte die Pedikelschraube stets geringfügig in die ventrale Compacta eindringen, da hierdurch eine größere Stabilität gewährleistet wird. Hierbei kann es dennoch in einem Drittel der Fälle zu einer Penetration kommen, daher ist, wie aus der vorliegenden Arbeit zu ersehen ist, eine individuelle präoperative computertomographische Darstellung des betroffenen Wirbelsäulenabschnitts mit multiplanaren Rekonstruktionen der Pedikel unerlässlich.

Die Zielsetzung der Arbeit war die Klärung der Frage, ob mittels routinemäßig durchgeführter computertomographischer Untersuchungen ausreichend genaue Daten ermittelt werden können, um eine stabilisierende Wirbelsäulenoperation durchzuführen. Dies konnten anhand detaillierter Analyse erfolgreich bestätigt werden.

## VII. LITERATURVERZEICHNIS

- Aebi M, Etter C, Kehl T, Thalgott J: The internal skeletal fixation system: A new treatment of thoracolumbar fractures and other spinal disorders. Clin Orthop., 227: 30- 43, 1988
- Amonoo- Kuofi HS: Maximum and minimum lumbar interpedicular distances in normal adult Nigerians. J. Anat., 135, 2: 225- 233, 1982
- Amonoo- Kuofi HS: The sagittal diameter of the lumbar vertebral canal in normal adult Nigerians. J. Anat., 140, 1: 69 - 78, 1985
- An HS, Gordin R, Renner K : Anatomic consideration for plate-screw fixation of the cervical spine. Spine, 16 (suppl): 548- 51, 1991
- Asher MA, Strippgen WE: Anthropometric studies of the human sacrum related to dorsal transsacral implant designs. Clin Orthop, 203: 58- 62, 1986
- Austin MS, Vaccaro AR, Brislin B, Nachwalter R, Hilibrand AS, Albert TJ: Image-guided spine surgery: a cadaver study comparing conventional open laminoforaminotomy and two image-guided techniques for pedicle screw placement in posterolateral fusion and nonfusion models. Spine. 27 (22): 2503 - 8, 2002
- Bailey AS, Stanescu S, Yeasting RA, Ebraheim NA, Jackson WT: Anatomic relationships of the cervicothoracic junction. Spine,20 (13): 1431- 1439, 1995
- Banta CJ, King AG, Dabezies EJ, Liljenberg RL: Measurement of effective pedicle diameter in the human spine. Orthopedics, 12 (7): 939 -942, 1989
- Barrey C, Cotton F, Jund J, Mertens P, Perrin G: Transpedicular screwing of the seventh cervical vertebra: anatomical considerations and surgical technique. Surg Radiol Anat. 25 (5 - 6): 354 - 60, 2003
- Benzel EC: Anatomic consideration of C 2 pedicle screw placement (letter). Spine, 21(19): 2301 - 2, 1996
- Bernard TN, Seibert CE: Pedicle diameter determined by Computer Tomography. Its relevance to pedicle screw fixation in the lumbar spine. Spine, 17 (6 suppl): 160- 162, 1992

Berry JL, Moran JM, Berg WS, Steffee AD: A morphometric study of human lumbar and selected thoracic vertebrae. *Spine*, 12 (4): 362- 367, 1987

Bick EM: An essay on the history of spine fusion operations. *Clin Orthop.*,35: 9- 15, 1964

Bostelmann R, Benini A: Computer-assisted surgery (CAS) in transpedicular lumbar fusion. Experiences of the Spinal Neurosurgery Department Schweiz Rundschau Med Prax. 93 (4): 96 - 102, 2004

Boucher HH : A method of spinal fusion. *J. Bone Joint Surg.*, 41 B (2): 248-259, 1959

Chen IH, Hou CH, Huang CI, Lee LS: Measurement of chinese lumbar pedicles: With special reference to transpedicular screw fixation. *Chin Med J (Taipei)*, 53 (6): 351- 356, 1994

Cloward RB: The treatment of ruptured lumbar intervertebral discs by vertebral body fusion. I. Indications, operative technique, after care. *J. Neurosurg.*, 10: 154- 168, 1953

Cotterill PC, Kostuik JP, D'Angelo G, Fernie GR, Maki BE: An anatomical comparison of the human and bovine thoracolumbar spine. *J Orthop Res.*, 4 (3): 298- 303, 1986

Datir SP, Mitra SR: Morphometric study of the thoracic vertebral pedicle in an Indian population. *Spine*, 29 (11): 1174 - 81, 2004

de Peretti F, Hovorka I, Ganansia P, Puch JM, Bourgeon A, Argenson C: The vertebral foramen: A report concerning its contents. *Surg Radiol Anat.*, 15 (4): 287- 94, 1993

de Peretti F, Argenson C, Bourgeon A, Omar F, Eude P, Aboulker C: Anatomic and experimental basis for the insertion of a screw at the first sacral vertebra. *Surg Radiol Anat.*, 13: 133- 137, 1991

Dick W, Kluger P, Magerl F, Woersdörfer O, Zäch G: A new device for internal fixation of thoracolumbar and lumbar spine fractures: The „fixateur interne“. *Paraplegia*, 23: 225- 232, 1985

Dommissie G: Morphological aspects of the lumbar spine and lumbosacral region. *Othop Clin North Am.*, 6 (1): 163- 175, 1975

Ebmeier K, Giest K, Kalff R: Intraoperative computerized tomography for improved accuracy of spinal navigation in pedicle screw placement of the thoracic spine.

*Acta Neurochir Suppl.* 85: 105 - 13, 2003

Ebraheim NA, Hoeflinger MJ, Salpietro B, Chung SYM, Jackson WT: Anatomic considerations in posterior plating of the cervical spine.

*J Orthop Trauma*, 5 (2): 196- 199, 1991

Ebraheim NA, Xu R, Biyani A, Nadaud MC: Morphologic considerations of the first sacral pedicle for iliosacral screw placement.

*Spine*, 22 (8): 841 - 846, 1997

Ebraheim NA, Xu R, Ahmad M, Yeasting RA: Projection of the thoracic pedicle and its morphometric analysis. *Spine*, 22 (3): 233- 238, 1997

Ebraheim NA, Xu R, Knight T, Yeasting RA: Morphometric evaluation of lower cervical pedicle and its projection. *Spine*, 22(1): 1- 6, 1997

Ebraheim NA, Rollins JR, Xu R, Yeasting RA: Projection of the lumbar pedicle and its morphometric analysis. *Spine*, 21 (11): 1296-1300, 1996

Eisenstein S: Measurements of the lumbar spinal canal in 2 racial groups. *Clin. Orthop.*, 115: 42- 46, 1976

Eisenstein S: Lumbar vertebral canal morphometry for computerised tomography in spinal canal stenosis. *Spine*, 8 (2): 187- 191, 1983

Eisenstein S: The morphometry and pathological anatomy of the lumbar spine in South African Negroes and Caucasoids with specific reference to spinal stenosis. *J Bone Joint Surg.*, 59 B: 173- 180, 1977

Esses SI, Bednar DA: The spinal pedicle screw: Techniques and systems. *Orthop. Rev*, 18 (6): 676- 682, 1989

Fayyazi AH, Hugate RR, Pennypacker J, Gelb DE, Ludwig SC: Accuracy of Computed Tomography in Assessing Thoracic Pedicle Screw Malposition. *J Spinal Disord Tech.* 17 (5): 367 - 371, 2004

Ferree BA: Morphometric characteristics of pedicles of the immature spine. *Spine*, 17 (8): 887-891, 1992

Francis CC: Dimensions of the cervical vertebrae. *Anat Rec.*, 122: 603- 609, 1955

Gargano FP, Jacobson R, Rosomoff H: Transverse axial tomography of the spine. *Neuroradiology*, 6: 254- 258, 1974

Graham CE: Lumbosacral fusion using internal fixation with a spinous process for the graft. *Clin Orthop.*, 140: 72- 77,1979

Grob D, Magerl F, McGowan DP: Spinal pedicle fixation: reliability and validity of roentgenogram-based assessment and surgical factors on successful placement (letter, comment). *Spine*, 15: 251, 1990

Grutzner PA, Beutler T, Wendl K, Von Recum J, Wentzensen A, Nolte LP: Intraoperative three-dimensional navigation for pedicle screw placement. *Chirurg*, (Epub, PMID 15365645), 2004

Güven O, Yalcin S, Karahan M, Sevinc TT: Postoperative evaluation of transpedicular screws with computed tomography. *Orthop Rev.*, 23: 511- 516, 1994

Hammerschlag S, Wolpert SM, Carter BL: Computed tomography of the spinal canal. *Radiology*, 121: 361- 367, 1976

Harrington PR: Treatment of scoliosis. *J Bone Joint Surg*, 44-A: 591- 610, 1962

Harrington PR, Tullos HS: Reduction of severe spondylolisthesis in children. *Southern Med J*, 62: 1- 7, 1969

Harrington PR: Instrumentation in spine instability other than scoliosis. *S Afr J Surg*, 5: 7- 12, 1967

Harrington PR, Dickson JH: An eleven-year clinical investigation of Harrington instrumentation. *Clin Orthop*, 93: 113- 130, 1973

Hertlein H, Mittlmeier T, Schürmann M, Lob G : Anterior transpedicular instrumentation of the lumbar spine: An anatomical study. *J Spinal Disord*, 5 (3): 330 - 334, 1992

Hinck VC, Clark WM, Hopkins CE: Normal interpediculate distances (minimum and maximum) in children and adults. *Am J Roentgenol Radiat Ther Nucl Med*, 97 (1): 141 - 153, 1966

Hou S, Hu R, Shi Y: Pedicle morphology of the lower thoracic and lumbar spine in a Chinese population. *Spine*, 18 (13): 1850- 1855, 1994

Hounsfield GN: Computerized transverse axial scanning (tomography): Part I. Description of system. *Br J Radiol* 46: 1016- 1022, 1973

Islam C, Güzel MB, Sakul BU: Clinical importance of the minimal cancellous diameter of lower thoracic and lumbar vertebral pedicles. *Clinical Anatomy*, 9: 151- 154, 1996

Islam C, Sakul BU, Güzel MB: Real minimal diameter of the lower thoracic and lumbar vertebral pedicles. *Clin Anat*, 7: 271- 274, 1994

Jacobson RE, Gargano FP, Rosomoff HL: Transverse axial tomography of the spine. Part I: axial anatomy of the normal lumbar spine. *J Neurosurg*, 42: 406 - 411, 1975

Jeanneret B, Gebhard JS, Magerl F: Transpedicular screw fixation of articular mass fracture - separation: Results of an anatomical study and operative technique. *J Spinal Disord*, 7 (3): 222- 229, 1994

Jones EL, Heller JG, Silcox DH, Hutton WC: Cervical pedicle screws versus lateral mass screws. Anatomic feasibility and biomechanical comparison. *Spine*, 22 (9): 977- 982, 1997

- Kalfas IH, Kormos DW, Murphy MA, McKenzie RL, Barnett GH, Bell GR, Steiner CP, Trimble MB, Weisenberger JP: Application of frameless stereotaxy to pedicle screw fixation of the spine. *J Neurosurg*, 83 (4): 641- 647, 1995
- KaraiKovic EE, Daubs MD, Madsen RW, Gaines RW: Morphologic characteristics of human cervical pedicles. *Spine*, 22 (5): 493- 500, 1997
- Kim N, Lee H, Cung I, Kim H, Kim S: Morphometric study of the pedicles of thoracic and lumbar vertebrae in Koreans. *Spine*, 19 (12): 1390 - 1394, 1994
- King D: Internal fixation for lumbosacral fusion. *Am J Surg*, 66 (3): 357- 361, 1944
- Koehler PR, Anderson RE, Baxter B: The effect of computed tomography viewer controls on anatomical measurements. *Radiology*, 130: 189- 194, 1979
- Kothe R, O'Holleran JD, Liu W, Panjabi MM: Internal architecture of the thoracic pedicle. An anatomic study. *Spine*, 21 (3): 264 - 70, 1996
- Krag MH, Weaver DL, Beynnon BD, Haugh LD: Morphometry of the thoracic and lumbar spine related to transpedicular screw placement for surgical spinal fixation. *Spine*, 13 (1): 27-32, 1988
- Krag MH, Beynnon BD, Pope MH, Frymoyer JW, Haugh LD, Weaver DL: An internal fixator for posterior application to short segments of the thoracic, lumbar and lumbosacral spine: Design and testing. *Clin Orthop*, 203: 75- 98, 1986
- Krag MH, Beynnon BD, Pope MH, DeCoster TA: Depth of insertion of transpedicular vertebral screws into human vertebrae: effect upon screw - vertebra interface strength. *J. Spinal Disord*, 1 (4):287- 294, 1989
- LaFond G: Surgical treatment of spondylolisthesis. *Clin Orthop*, 22: 175- 179, 1962
- Larsen JL, Smith D: Vertebral body size in lumbar spinal canal stenosis. *Acta Radiol (Diagn) (Stockh)*, 21: 785- 788, 1980

- Lavallee S, Sautot P, Troccaz J, Cinquin P, Merloz P: Computer-assisted spine surgery: A technique for accurate transpedicular screw fixation using CT data and a 3- D optical localizer.  
Journal of Image Guided Surgery, 1: 65- 73, 1995
- Lee BCP, Kazam E, Newman AD: Computed tomography of the spine and spinal cord. Radiology, 128: 95- 102, 1978
- Luque ER, Cassis N, Ramirez-Wiella G: Segmental spinal instrumentation in the treatment of fractures of the thoracolumbar spine. Spine 7 (3): 312- 317, 1982
- Luque E: Interpeduncular segmental fixation. Clin Orthop, 203: 54- 57, 1986
- Magerl FP: Stabilization of the lower thoracic and lumbar spine with external skeletal fixation. Clin Orthop, 189: 125- 141, 1984
- Marchesi D, Schneider E, Glauser P, Aebi M: Morphometric analysis of the thoracolumbar and lumbar pedicles, anatomo-radiologic study.  
Surg Radiol Anat, 10: 317- 322, 1988
- McCormack BM, Benzel EC, Adams MS, Baldwin NG, Rupp FW, Maher DJ: Anatomy of the thoracic pedicle. Neurosurgery, 37 (2): 303- 308, 1995
- McLain RF, Ferrara L, Kabins M: Pedicle morphometry in the upper spine: limits to safe screw placement in older patients.  
Spine. 27 (22): 2467 - 71, 2002
- Michaelis J: Medizinische Statistik und Informationsverarbeitung.  
Thieme, 1980
- Miller MD, Cain JE, Lauermann WC, Littlefield WG, Platenberg RC, Wilson MR: Posterior sacroiliac fixation using a sacral pedicle targeting device: An anatomical study. J Orthop Trauma, 7 (6): 514- 520, 1993
- Mirkovic S, Abitbol JJ, Steinman J, Edwards CC, Schaffler M, Massie J, Garfin SR: Anatomic consideration for sacral screw placement.  
Spine, 16 (6): 289- 294, 1991

Mirkovic SR, Schwartz DG, Glazier KD: Anatomic considerations in lumbar posterolateral percutaneous procedures. *Spine*, 20 (18): 1965- 1971, 1995

Misenheimer GR, Peek RD, Wiltse LL, Rothman SLG, Widell EH: Anatomic analysis of pedicle cortical and cancellous diameter as related to screw size. *Spine*, 14 (4): 367- 372, 1989

Moran JM, Berg WS, Berry JL, Geiger JM, Steffee AD: Transpedicular screw fixation. *J Orthop Res*, 7 (1): 107- 114, 1989

Morse BJ, Ebraheim NA, Jackson WT: Preoperative CT determination of angles for sacral screw placement. *Spine*, 19 (5): 604- 607, 1994

Olsewski JM, Simmons EH, Kallen FC, Mendel FC, Severin CM, Berens DL: Morphometry of the lumbar spine: Anatomical perspectives related to transpedicular fixation. *J Bone Joint Surg*, 72 A (4): 541- 549, 1990

Panjabi MM, O'Holleran JD, Crisco JJ, Kothe R: Complexity of the thoracic spine pedicle anatomy. *Eur Spine J*, 6 (1): 19- 24, 1997

Panjabi MM, Takata K, Goel V, Federico D, Oxland T, Duranceau J, Krag M: Thoracic human vertebrae: Quantitative three-dimensional anatomy. *Spine*, 16 (8): 888- 901, 1991

Panjabi MM, Duranceau J, Goel V, Oxland T, Takata K: Cervical human vertebrae: Quantitative three-dimensional anatomy of the middle and lower regions. *Spine*, 16 (8): 861- 869, 1991

Panjabi MM, Goel V, Oxland T, Takata K, Duranceau J, Krag M, Price M: Human lumbar vertebrae: Quantitative three-dimensional anatomy. *Spine*, 17 (3): 299- 306, 1992

Pennal GF, McDonald GA, Dale GG: A method of spinal fusion using internal fixation. *Clin Orthop*, 35: 86- 94, 1964

Philips JH, Kling TF Jr, Cohen MD: The radiographic anatomy of the thoracic pedicle. *Spine*, 19 (4): 446- 449, 1994

Postacchini F, Ripani M, Carpano S: Morphometry of the lumbar vertebrae. An anatomic study in two Caucasoid ethnic groups. *Clin Orthop*, 172: 296-303, 1983

Rauschnig W: Computed tomography and cryomicrotomy of lumbar spine specimens. A new technique for multiplanar anatomic correlation. *Spine*, 8 (2): 170- 180, 1983

Roy-Camille R, Saillant G, Berteaux D, Salgado V: Osteosynthesis of thoraco-lumbar spine fractures with metal plates screwed through the vertebral pedicles. *Reconst Surg Traumatol*, 15: 2- 16, 1976

Roy-Camille R, Saillant G, Mazel C: Plating of thoracic, thoracolumbar, and lumbar injuries with pedicle screw plates. *Orthop Clin North Am*, 17 (1): 147-159, 1986

Roy-Camille R, Saillant G, Mazel C: Internal fixation of the lumbar spine with pedicle screw plating. *Clin Orthop*, 203: 7- 17, 1986

Schnake KJ, König B, Berth U, Schroeder RJ, Kandziora F, Stockle U, Raschke M, Haas NP: Accuracy of CT-based navigation of pedicle screws in the thoracic spine compared with conventional technique. *Unfallchirurg*. 107 (2): 104 -12, 2004

Schwarzenbach O, Berlemann U, Jost B, Visarius H, Arm E, Langlotz F, Nolte LP, Ozdoba C: Accuracy of computer-assisted pedicle screw placement. An in vivo computed tomography analysis. *Spine*, 22 (4): 452- 458, 1997

Scoles PV, Linton AE, Latimer B, Levy ME, Digiovanni BF: Vertebral body and posterior element morphology: The normal spine in middle life. *Spine*, 13 (10): 1082- 1086, 1988

Sjöström L, Jacobsson O, Karlström G, Pech P, Rauschnig W: CT analysis of pedicles and screw tracts after implant removal in thoracolumbar fractures. *J Spinal Disord*, 6 (3): 225- 231, 1993

Stanescu S, Ebraheim NA, Yeasting R, Bailey AS, Jackson WT: Morphometric evaluation of the cervico-thoracic junction. Practical considerations for posterior fixation of the spine. *Spine*, 19 (18): 2082- 2088, 1994

Steffee AD, Biscup RS, Sitkowski DJ: Segmental spine plates with pedicle screw fixation. A new internal fixation device for disorders of the lumbar and thoracolumbar spine. *Clin Orthop*, 203: 45- 53, 1986

Steffee AD, Sitkowski DJ: Posterior lumbar interbody fusion and plates. *Clin Orthop*, 227: 99- 102, 1988

Steffee AD, Sitkowski DJ, Topham LS: Total vertebral body and pedicle arthroplasty. *Clin Orthop* 203: 203- 208, 1986

Steinmann JC, Mirkovic S, Abitbol JJ, Massie J, Subbaiah P, Garfin SR: Radiographic assessment of sacral screw placement. *J Spinal Disord*, 3 (3): 232- 237, 1990

Steinmann JC, Herkowitz HN, El-Kommos H, Wesolowski DP: Spinal pedicle fixation: Confirmation of an image-based technique for screw placement. *Spine*, 18 (3): 1856- 1861, 1993

Tominaga T, Dickmann CA, Sonntag VKH, Coons S: Comparative anatomy of the baboon and the human cervical spine. *Spine*, 20 (2): 131- 137, 1995

Truchly G, Thompson WAL: Posterolateral fusion of the lumbosacral spine. *J Bone Joint Surg*, 44-A (3): 505- 512, 1962

Vaccaro AR, Rizzolo SJ, Allardyce TJ, Ramsey M, Salvo J Balderstone RA, Cotler JM: Placement of pedicle screws in the thoracic spine. Part I: Morphometric analysis of the thoracic vertebrae. *J Bone Joint Surg*, 77-A (8): 1193- 1199, 1995

Van Schaik JJP, Verbiest H, Van Schaik FDJ: Morphometry of lower lumbar vertebrae as seen on CT scans: Newly recognized characteristics. *Am J Roentgenol*, 145: 327- 335, 1985

Wang MY, Kim KA, Liu CY, Kim P, Apuzzo ML: Reliability of three-dimensional fluoroscopy for detecting pedicle screw violations in the thoracic and lumbar spine. *Neurosurgery*, 54 (5): 1138 - 42, 2004

Weinstein JN, Rydevik BL, Rauschnig WR: Anatomic and technical considerations of pedicle screw fixation. *Clin Orthop*, 284: 34- 46, 1992

Whelan MA, Gold RP: Computed tomography of the sacrum: 1. Normal anatomy. *Am J Roentgenol* 139: 1183- 1190, 1982

Willen J, Lindahl S, Irstam L, Nordwall A: Unstable thoracolumbar fractures: A study by CT and conventional roentgenology of the reduction effect of Harrington instrumentation. *Spine* 9 (2): 214- 219, 1984

Xu R, Ebraheim NA, Yeasting RA, Wong FY, Jackson WT: Morphometric evaluation of the first sacral vertebra and the projection of its pedicle on the posterior aspect of the sacrum. *Spine*, 20 (8): 936- 940, 1995

Xu R, Nadaud MC, Ebraheim NA, Yeasting RA: Morphology of the second cervical vertebra and the posterior projection of the C2 pedicle axis. *Spine*, 20 (3): 259- 263, 1995

Xu R, Ebraheim NA, Yeasting RA, Wong F, Jackson WT: Anatomy of C7 lateral mass and projection of pedicle axis on its posterior aspect. *J Spinal Disord*, 8 (2): 116- 120, 1995

Yeom JS, Chung MS, Lee CK, Kim Y, Kim N, Lee JB: Evaluation of pedicle screw position on computerized tomography scans. Technical note. *J Neurosurg Spine*. 98 (1): 104 - 9, 2003

Zindrick MR, Wiltse LL, Doornik A, Widell EH, Knight GW, Patwardhan AG, Thomas JC, Rothman SL, Fields BT: Analysis of the morphometric characteristics of the thoracic and lumbar pedicles. *Spine*, 12 (2): 160- 166, 1987

Zindrick MR, Wiltse LL, Widell EH, Thomas JC, Holland WR, Field BT, Spenser CW: A biomechanical study of interpeduncular screw fixation in the lumbosacral spine. *Clin Orthop*, 203: 99- 111, 1986

## VIII. ANHANG • Tabellen sämtlicher Meßdaten der Wirbel

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	
1	6831/290155	m	HIQ S	C1	0,64		0,39			1,64						3,57	2,21	66				-8	
2	4542/270657	w	HIQ S	C1	0,37		0,31			3,73						3,03	1,51	57				17	
3	3994/181241	w	HIQ S	C2	0,65	0,37	0,34	0,18	1,2	1,24	0,69	0,58	2,53	1,12	2,53	1,82	47	36	22	25	-42	-31	
4	6222/120844	w	HIQ S	C2	0,45	0,59	0,25	0,43	1,4	1,42	1,11	0,84	2,8	1,14	2,35	1,63	41	41	27	15			
5	5970/290955	m	HIQ II	C2	0,47	0,48	0,2	0,17	1,48	1,18	0,87	0,87	2,61	1,19	2,56	1,65	54	49	11	14			
6	6059/220575	w	HIQ II	C2	0,57	0,4	0,32	0,19	1,12	1,12	1,01	0,75	2,45	1,02	2,26	1,83	44	30	12	12			
7	3699/100150	m	HIQ S	C2	0,48	0,7	0,24	0,45	1,38	1,3	1,2	1,04	2,55	1,65	2,4	1,71	44	24	12	25	-45	-49	
8	7477/150767	w	HIQ II	C2	0,53		0,18			1,41			0,45		2,05	0,96	2,35	1,61	51			15	-9
9	4542/270657	w	HIQ S	C3	0,3		0,1			1,63			0,25		2,05	1,32	2,36	1,45	56			15	7
10	5639/060943	m	HIQ II	C3	0,42	0,49	0,2	0,3	1,4	1,69	0,56	0,74	2,55	1,59	2,68	1,76	57	55	16	7			
11	7539/170241	m	HIQ II	C3	0,53	0,49	0,31	0,25	0,84	1,04	0,64	0,65	2,53	1,51	2,56	1,76	44	51	19	7			
12	3791/081157	m	HIQ S	C3	0,53	0,45	0,26	0,24	1,49	1,5	0,81	0,74	2,14	1,57	2,33	1,54	48	43	17	14	-58	-39	
13	5970/290955	m	HIQ II	C3	0,36	0,4	0,11	0,16	1,42	1,41	0,69	0,59	2,35	1,22	2,5	1,45	47	58	27	22			
14	6131/200756	w	HIQ S	C3	0,35		0,15			1,39			0,56		2,46	1,36	2,65	1,49	56			10	-10
15	3994/181241	w	HIQ S	C3	0,43	0,37	0,2	0,18	1,29	1,29	0,82	0,75	2,3	1,28	2,37	1,58	43	47	18	18	22	17	
16	7477/150767	w	HIQ II	C3	0,44		0,24			1,72			0,27		2,13	1,08	2,3	1,33	44			26	-9
17	5608/011029	w	HIQ II	C3	0,33	0,35	0,16	0,13	1,28	1,36	0,59	0,56	2,26	1,32	2,51	1,9	51	51	19	4			
18	6222/120844	w	HIQ S	C3	0,45	0,41	0,25	0,25	1,58	1,63	0,47	0,5	2,21	1,51	2,35	1,26	41	48	26	18			
19	3840/030256	w	HIQ S	C3	0,41	0,38	0,21	0,15	1,46	1,14	0,67	0,64	2,28	1,51	2,37	1,68	42	44	14	14	-83	-73	
20	7451/310165	m	HIQ II	C3	0,48	0,55	0,26	0,32	1,52	1,27	0,86	0,79	2,46	1,22	2,53	1,46	55	53	15	13			
21	3342/161049	m	HIQ II	C3	0,39	0,36	0,16	0,17	1,26	1,16	0,71	0,63	2,36	1,53	2,27	1,25	46	51	16	13			
22	7446/060548	w	HIQ II	C4	0,5	0,55	0,27	0,27	0,99	1,17	0,68	0,79	2,22	1,3	2,27	1,54	53	55	10	13			
23	3335/280109	w	HIQ S	C4	0,54	0,47	0,19	0,19	1,3	1,27	0,76	0,73	2,56	1,56	2,45	1,09	35	39	23	21			
24	7415/240527	m	HIQ S	C4	0,61	0,67	0,41	0,45	1,25	1,31	0,74	0,78	2,69	1,6	2,42	1,18	38	39	22	20			
25	3345/170740	m	HIQ S	C4	0,58	0,48	0,37	0,33	1,38	1,5	0,97	0,83	2,65	1,67	2,55	1,43	56	45	23	26	80	81	
26	4542/270657	w	HIQ S	C4	0,35		0,15			1,46			0,34		2,22	1,24	2,43	1,5	52			15	4
27	8096/271136	w	HIQ S	C4	0,33	0,39	0,16	0,18	1,36	1,4	0,79	0,67	2,2	1,38	2,36	1,15	50	51	18	11			
28	5608/011029	w	HIQ II	C4	0,38	0,33	0,2	0,15	1,22	1,13	0,66	0,6	2,48	1,25	2,51	1,76	42	55	26	20			
29	4858/290851	m	HIQ S	C4	0,45	0,42	0,24	0,27	1,52	1,49	0,5	0,67	2,83	1,51	2,86	1,62	52	42	19	27	70	64	
30	6054/170548	m	HIQ S	C4	0,6	0,65	0,41	0,43	1,59	1,37	0,98	0,77	2,92	1,49	2,53	1,38	51	49	29	22	50	51	
31	3342/161049	m	HIQ II	C4	0,51	0,55	0,34	0,29	1,23	1,11	0,67	0,61	2,59	1,73	2,27	1,6	40	51	17	16			
32	3342/161049	m	HIQ II	C5	0,5	0,46	0,22	0,25	0,97	1,08	0,58	0,63	2,58	1,53	2,27	1,03	43	45	20	17			
33	3948/280554	w	HIQ S	C5	0,4	0,45	0,2	0,23	1,22	1,46	0,62	0,62	2,55	1,32	2,6	1,28	41	50	16	16			
34	5046/110740	w	HIQ II	C5	0,7		0,48			1,65		0,49			2,98	1,53	2,57	1,19	47			28	-15
35	7415/240527	m	HIQ S	C5	0,59	0,71	0,31	0,44	1,17	1,05	0,75	0,82	2,93	1,82	2,56	1,2	27	33	32	27			
36	833/291236	w	HIQ S	C5	0,48	0,47	0,25	0,22	1,52	1,4	0,84	0,71	2,22	1,37	2,39	1,35	51	47	22	11			
37	4542/270657	w	HIQ S	C5	0,4		0,2			1,51		0,4			2,32	1,21	2,6	1,38	44			21	3
38	7452/230534	m	HIQ II	C5	0,64	0,74	0,38	0,48	1,3	1,47	0,82	0,8	2,89	1,65	2,79	1,56	51	47	27	24			
39	4979/190355	w	HIQ S	C5	0,48	0,45	0,17	0,22	1,33	1,27	0,62	0,66	2,49	1,22	2,52	1,48	43	45	18	15	63	57	
40	5051/100351	w	HIQ II	C5	0,52		0,31			1,53		0,37			2,37	1,31	2,52	1,28	51			18	-7
41	3887/190156	w	HIQ S	C5	0,35		0,11			1,34		0,65			2,47	1,16	2,59	1,37	38			21	
42	8288/120745	w	HIO S	C5	0,41	0,52	0,15	0,26	1,3	1,48	0,71	0,68	2,29	1,2	2,33	1,33	50	50	13	21			
43	3956/090965	w	HIQ S	C5	0,34	0,36	0,17	0,14	1,29	1,36	0,48	0,54	2,22	1,19	2,53	1,4	53	59	13	19	-90	-90	
44	8096/271136	w	HIQ S	C5	0,43	0,36	0,16	0,15	0,94	1,1	0,81	0,73	2,29	1,36	2,48	1,01	37	43	25	21			
45	833/291236	w	HIQ S	C6	0,44	0,48	0,22	0,28	1,16	1,15	0,76	0,68	2,12	1,51	2,49	1,29	42	42	18	14			
46	3956/090965	w	HIQ S	C6	0,46		0,21			1,47		0,59			2,75	1,11	2,71	1,46	47			24	56
47	3336/200243	m	HIQ S	C6	0,46	0,54	0,21	0,25	1,35	1,59	0,92	0,79	2,96	1,35	2,91	1,49	28	34	16	18			
48	3342/161049	m	HIQ II	C6	0,46	0,39	0,19	0,23	1,33	0,92			2,29	1,38	2,31	1,23	50	50	18	20	-9		
49	4965/290550	m	HIQ S	C6	0,83	0,85	0,61	0,65	1,21	1,13	0,77	0,7	3,48	1,76	2,35	1,49	32	31	32	37	59	58	
50	1475/120242	w	HIQ S	C6	0,62	0,53	0,36	0,26	1,33	1,53			2,5	1,44	2,5	1,47	50	42	18	14			
51	7276/060731	w	HIQ II	C6	0,55	0,57	0,28	0,34	1,17	1,18	0,65	0,6	2,51	1,33	2,38	1,22	45	38	13	19			
52	3948/280554	w	HIQ S	C6	0,48	0,43	0,24	0,21	1,18	1,31	0,61	0,71	2,8	1,37	2,66	1,23	38	43	25	26	57	52	
53	1390/230951	m	HIQ S	C6	0,4	0,39	0,14	0,12	1,2	1,31	0,81	0,76	2,61	1,31	2,77	1,58	50	44	13	17			
54	8457/100668	m	HIQ S	C6	0,3	0,51	0,14	0,26	1,05	1,24	0,75	0,6	2,44	1,23	2,61	1,49	37	43	23	20	5	8	
55	995/050470	m	HIQ S	C6	0,48	0,39	0,24	0,15	1,56	1,44	0,92	0,73	2,77	1,3	2,7	1,63	43	46	30	8			
56	3887/190156	w	HIQ S	C6	0,45	0,35	0,16	0,14	1,38	1,28	0,67	0,7	2,67	1,33	2,59	1,33	44	32	19	19	45		
57	3844/200245	m	HIQ S	C7	0,78	0,74	0,54	0,47	1,26	1,16	0,84	0,78	3,29	1,94	2,7	1,47	44	31	25	19	70	72	
58	7992/040240	w	HIQ S	C7	0,67		0,42			1,29		0,36			3	1,36	2,42	1,45	41			29	9
59	7539/170241	m	HIQ II	C7	0,47	0,47	0,24	0,26	1,28	1,01	0,89	0,97	3,07	1,73	2,56	1,17	42	37	23	24			
60	833/291236	w	HIQ S	C7	0,44	0,62	0,27	0,47	0,95	1,03	0,78	0,86	2,22	1,44	2,45	1,29	26	28	35	22			
61	8453/130847	w	HIQ S	C7	0,54	0,53	0,32	0,33	1,45	1,31	0,66	0,69	3,16	1,76	2,54	1,36	36	38	24	18			
62	6833/080547	m	HIQ S	C7	0,75		0,55			1,44		0,55			3,09	1,49	2,53	1,55	34			11	21
63	7993/070817	w	HIQ S	C7	0,67		0,48			1,55		0,4			3,42	1,56	2,52	1,37	31			30	10
64	7691/100743	w	HIQ II	C7	0,49	0,65	0,35	0,46	1,34	1,05	0,59	0,57	3,22	1,35	2,52	1,45	31	36	27	20			
65	7687/300336	w	HIQ II	C7	0,73	0,53	0,52																

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
88	726/271144	w	HIQ S	TH06	0,48	0,44	0,28	0,32	1,84	1,92	1,12	1,23	2,46	2,31	1,38	1,41	11	11	25	14		
89	2316/010527	w	HIQ S	TH06	0,56	0,46	0,38	0,34	1,92	1,75	1,05	1,11	2,63	2,27	1,62	1,6	14	12	21	19		
90	5198/310117	w	HIQ S	TH07	0,36	0,33	0,14	0,2	2,06	1,96	0,94	0,97	2,72	2,28	1,87	1,94	21	19	0	0	-9	9
91	7985/310334	w	HIQ II	TH07	0,44	0,48	0,29	0,24	1,95	1,92	1,4	1,33	2,65	2,49	1,46	1,84	8	6	19	20		
92	2316/010527	w	HIQ S	TH07	0,43	0,41	0,34	0,23	1,59	1,62	1,23	1,33	2,65	2,63	1,52	1,54	10	8	13	16		
93	726/271144	w	HIQ S	TH07	0,51	0,48	0,35	0,33	1,66	1,78	1,25	1,25	2,52	2,44	1,43	1,41	10	12	26	20		
94	2506/021127	m	HIQ II	TH07	0,6	0,66	0,39	0,37	1,43	1,53	1,06	1,34	2,48	2,58	1,56	1,36	16	16	9	12	-9	-12
95	1262/270337	m	HIQ S	TH08	0,42	0,47	0,27	0,29	2,13	2,05	1,62	1,35	3,27	2,81	2	2,03	-3	-5	14	18		
96	2506/021127	m	HIQ II	TH08	0,62	0,69	0,33	0,45	1,57	1,59	1,33	1,37	2,77	2,72	1,51	1,3	15	15	12	13	-17	-13
97	2316/010527	w	HIQ S	TH08	0,37	0,52	0,2	0,35	1,58	1,71	1,43	1,16	2,58	2,61	1,54	1,48	10	8	17	17		
98	7985/310334	w	HIQ II	TH08	0,7	0,58	0,49	0,28	1,8	1,6	1,29		2,72	2,58	1,39	1,65	7	14	30	0		-10
99	5198/310117	w	HIQ S	TH08	0,39	0,58	0,14	0,28	1,59	1,6			3,92	3,87	2,01	1,34	14	14	0	0	-7	-10
100	2316/010527	w	HIQ S	TH09	0,58	0,58	0,41	0,42	1,44	1,39			2,66	2,58	1,46	1,46	11	12	20	18		
101	1262/270337	m	HIQ S	TH09	0,6	0,52	0,42	0,37	2,04	1,95	1,52	1,41	3,31	2,81	2,08	1,87	-5	-9	18	18		
102	7985/310334	w	HIQ II	TH09	0,71	0,58	0,53	0,41	1,63	1,6	1,12	1,06	3,04	3,06	1,41	1,63	5	5	20	16		
103	5198/310117	w	HIQ S	TH09	0,39	0,39	0,22	0,17	1,82	1,6	1,36		2,93	2,7	1,6	1,63	11	14	9	13	-8	-9
104	8533/020161	w	HIQ S	TH09	0,5	0,48	0,3	0,3	1,56	1,48	1,29	1,23	2,48	2,08	1,62	1,51	16	16	21	9		
105	5198/310117	w	HIQ S	TH10	0,43	0,43	0,24	0,2	1,77	1,67	1,31		3,13	2,57	2,1	1,96	15	9	12	12	-9	9
106	7985/310334	w	HIQ II	TH10	0,62	0,71	0,43	0,46	1,39	1,58			3,08	3,06	1,44	1,49	8	5	24	17		
107	2316/010527	w	HIQ S	TH10	0,59	0,65	0,38	0,5	1,36	1,44	1,46	1,47	2,88	2,63	1,62	1,46	11	10	28	15		
108	3280/260634	w	HIQ II	TH11	1,07	0,93	0,88	0,73	1,49	1,5	2,01	1,94	3,25	3,08	1,7	1,45	10	13	12	10	-24	-18
109	813/030344	w	HIQ S	TH11	1,21	1,17	0,97	0,95	1,91	2,07	1,91	1,52	3,8	2,67	1,96	1,78	17	12	33	22		
110	7871/170548	w	HIQ II	TH11	0,66	0,69	0,41	0,49	1,71	1,71	1,56	1,39	3,19	2,45	1,88	1,64	11	10	14	7		
111	3229/081137	m	HIQ S	TH12	1,2	1,2	0,87	0,87	1,99	2,05	1,9	1,98	3,81	2,81	1,8	1,69	9	10	17	18		
112	9161/211244	w	HIQ S	TH12	0,89	0,89	0,69	0,66	1,73	1,84	1,74	1,71	3,53	2,47	2,13	1,81	12	9	17	10		
113	7893/080240	w	HIQ II	TH12	0,9	0,78	0,72	0,57	1,55	1,6	1,38	1,59	3,35	2,92	2	1,51	8	10	21	14		
114	3696/230340	w	HIQ S	TH12	0,51	0,52	0,31	0,32	1,64	1,73	1,71	1,69	2,97	2,23	2,48	1,73	10	10	0	0	-6	-14
115	8550/120732	w	HIQ S	TH12	0,5	0,73	0,34	0,5	1,9	1,88	1,94	1,63	3,39	2,53	1,98	1,38	12	7	10	12		
116	3489/081234	w	HIQ II	TH12	0,73	0,71	0,54	0,56	1,79	1,82	1,53	1,75	4,22	3,22	2,74	1,93	19	10	13	14	-36	-22
117	3280/260634	w	HIQ II	TH12	1,08	1,14	0,96	0,78	2	2	1,8	1,78	3,96	3,08	2,37	1,73	11	13	16	20	-51	-25
118	7864/201163	m	HIQ II	TH12	0,9	0,77	0,66	0,5	1,83	2,14	1,68	1,73	3,66	2,74	2,08	1,93	9	8	26	17		
119	4160/270740	m	HIQ S	TH12	1,1		0,84		2,4		1,43		4,44	2,94	2,25	1,96	11		30		-2	
120	3951/130839	w	HIQ S	L1	0,37	0,46	0,23	0,24	1,84	1,9	1,36	1,16	3,2	2,55	2,52	1,96	14	15	12	12	-10	-16
121	8550/120732	w	HIQ S	L1	0,38	0,31	0,24	0,19	1,88	1,92	1,38	1,29	3,48	2,58	2,13	1,54	10	7	14	14		
122	4160/270740	m	HIQ S	L1	1,02		0,82		3,21		1,23		4,73	3,29	2,43	1,93	11		24		-4	
123	9161/211244	w	HIQ S	L1	0,7	0,66	0,44	0,46	1,95	1,9	1,42	1,49	3,51	2,58	2,24	1,87	12	9	16	8		
124	4902/271120	w	HIQ S	L1	0,78	0,7	0,61	0,55	2,03	2,1	1,38	1,36	3,82	2,62	2,28	1,75	13	9	28	19		
125	7864/201163	m	HIQ II	L1	0,65	0,66	0,47	0,47	2,14	2,08	1,89	1,66	4,01	2,72	2,18	2,01	11	12	21	17		
126	813/030344	w	HIQ S	L1	0,89	0,83	0,64	0,59	2	2,23	1,67	1,69	3,63	2,77	2,24	1,81	9	9	27	21		
127	7973/010132	w	HIQ II	L1	0,66	0,68	0,43	0,44	2,03	2,01	1,15	1,34	3,43	2,41	2,3	1,91	13	12	16	5		
128	7688/131130	w	HIQ II	L2	0,38	0,45	0,19	0,29	1,58	1,76	1,22	1,23	3,56	2,7	2,28	1,67	10	9	19	15		
129	7996/140742	m	HIQ S	L2	0,65		0,45		3,11		1,07		3,87	3,02	2,74	1,86	18		34		-4	
130	8534/150553	w	HIQ S	L2	0,85	0,77	0,64	0,55	1,74	2,06	1,2	1,25	4	3,13	2,56	1,85	20	16	30	27		
131	8550/120732	w	HIQ S	L2	0,43	0,4	0,27	0,2	2,09	2,06	1,18	1,13	3,6	2,51	2,26	1,48	10	12	16	11		
132	8455/020337	m	HIQ S	L2	0,83	0,81	0,47	0,52	2,05	2,03	1,04	0,85	4,15	3,1	2,58	1,83	9	10	36	25		
133	7454/120348	m	HIQ II	L2	0,82	0,81	0,53	0,6	2,02	2,15	1,66	1,66	3,96	2,82	2,43	1,75	18	14	21	20		
134	3998/010130	m	HIQ S	L2	1,04	1,12	0,85	0,92	1,57	1,56	1,92	1,56	4,06	3,14	2,08	1,42	14	14	32	23	25	26
135	8998/040607	m	HIQ S	L2	0,68	0,8	0,48	0,59	2	2,04	1,44	1,39	4,25	3,06	2,46	1,94	8	15	37	22		
136	3697/030509	w	HIQ S	L2	0,79	0,86	0,62	0,61	1,67	1,51	1,28	1,26	3,9	2,8	2,6	1,47	17	10	29	17	-28	-18
137	3730/190756	w	HIQ II	L2	0,92	0,85	0,7	0,59	1,65	1,74	2,04	1,63	3,46	2,6	2,26	1,7	20	19	26	16	-12	-43
138	7703/200633	m	HIQ II	L3	1,29	1,24	1,05	1,01	1,44	1,51	1,32	1,69	4,22	3,37	2,02	1,21	16	12	46	30		
139	8095/071149	w	HIQ S	L3	0,61	0,75	0,41	0,5	1,52	1,72	1,07	1,04	3,57	2,51	2,26	1,63	12	9	19	22		
140	4902/271120	w	HIQ S	L3	0,86	0,79	0,73	0,56	1,52	1,65	1,36	1,26	3,87	2,63	2,52	1,56	14	13	23	25		
141	8550/120732	w	HIQ S	L3	0,65	0,47	0,45	0,25	1,72	1,77	1,21	1,11	3,68	2,76	2,49	1,6	11	11	18	16		
142	8094/271254	m	HIQ S	L3	0,72	0,61	0,43	0,3	1,68	1,69		1,04	4,62	3,97	2,57	1,56	11	8	15	19		
143	7484/271061	m	HIQ II	L3	0,93	0,92	0,57	0,63	1,81	1,63	1,4	1,71	4,4	3,15	2,86	1,67	13	14	24	26		
144	2928/250140	w	HIQ S	L3	0,77	0,84	0,53	0,62	1,89	1,91	1,2	1,26	3,9	2,93	2,4	1,77	9	9	16	24	-28	-32
145	2919/281237	w	HIQ II	L3	0,94	0,99	0,68	0,72	2,01	2,1	1,28	1,29	3,43	2,73	2,68	1,97	29	22	24	25	-45	-45
146	8395/140738	w	HIQ S	L3	0,78	0,87	0,57	0,64	1,43	1,63	1,52	1,45	3,82	3,1	2,35	1,57	10	16	17	25		
147	2634/261155	m	HIQ II	L3	0,96	1,03	0,75	0,75	1,68	1,75	1,53	1,57	4,28	3,36	2,5	1,73	12	14	23	16	-20	-20
148	8527/040131	m	HIQ S	L3	1	1	0,78	0,7	1,58	1,48	1,39	1,4	4,77	3,43	2,23	1,25	17	18	25	27		
149	6049/080637	m	HIQ S	L4	1,12	1,21	0,85	1,02	1,91	1,87	1,32	1,4	4,85	3,53	2,65	1,44	10	10	39	29	-25	-18
150	4651/101266	m	HIQ II	L4	0,9	1,11	0,71	0,81	1,45	1,7	1,11	1,44	4,11	3,14	2,79	1,67	23	19	18	21	-47	-45
151	5818/081225	m	HIQ S	L4	1,24		0,95		2,27		1,05		4,6	3,39	2,81	2,07	14		30		-8	
152	7450/020230	w	HIQ II	L4</																		

	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP				
1		1,74																					
2																							
3						1,93	2,09					14	18	11	16			2,43	1,22				
4	1,25	1,15	1,16	1,18	1,06	2,32	2			-11	-9	16	22	13	13	0,27	0,27	2,94	1,45				
5	1,27			0,63	0,72	2,34	2,08			-11	-6	22	14	18	10	0,23	0,26	2,74	1,39				
6						2,11	2,14			0	0	18	19	14	16			2,73	1,19				
7	1,4	1,6	1,46	1,26	1,22	2,51	2,08		1,77	-25	-29	20	24	21	19	0,23	0,31	3,04	1,41				
8	1,65	0,52		0,67								7											
9	1,25	0,86																					
10	1,6		1,22		0,79	3,4	4,07				0	27	32	21	16			0,3	2,26	1,85			
11	1,76			0,75	0,67	2,9	3,04	1,07		-18	-18	21	18	22	15	0,23	0,33	2,11	2				
12	1,5					3,36	3,14					22	28	30	27	0,21	0,3	1,98	1,7				
13	1,5					2,88	3,01			-18	-16	16	14	18	11			2,2	1,28				
14	1,2	1,2		0,74		2,93				-24		22		19		0,38		2,44	1,45				
15	0,85			0,95	0,87	2,56	2,42			0	0	10	11	24	17	0,3	0,29	2,1	1,53				
16	1,6	0,59		0,57								6											
17	1,1					2,97	2,99					26	17	18	10			2,1	1,5				
18	1,21				0,76	3,27	3,34			-15	-12	29	24	22	14	0,29	0,28	2,12	1,73				
19	1,45	1,75	1,53	0,74	0,77	3,01	2,48			0	-9	16	21	23	20	0,25	0,27	2,25	1,69				
20	1,28	1,28	1,2	0,87	1,05	3,26	3,2			-14	-9	18	21	23	18	0,33	0,34	2,44	1,52				
21	1,5	1,04		1,12	0,96	3,14	2,98			-14	-9	20	26	29	23	0,27	0,18	2,46	1,72				
22	1			0,83	0,64	2,68	2,86			-5	-15	18	18	18	15	0,36	0,28	2,4	1,32				
23	1,05	0,96	1,97	0,7	0,61	2,96	2,63	1,46	1,5	0	-15	16	19	23	20	0,32	0,23	2,69	1,71				
24	2,17			0,62	0,79	2,97	3,04	1,82	1,9	-11	-11	18	18	11	10	0,25	0,31	2,63	1,56				
25	1,31	1,38	1,22	0,98	0,78	3,45	3,16	1,8	1,93	-17	-8	17	19	22	14	0,27	0,22	2,61	1,63				
26	1,1																						
27	0,95		1,24		0,67	3,11	2,97				4	23	19	15	11	0,35	0,24	2,34	1,65				
28	1,16			0,65		2,62	2,78			-13	-10	18	19	20	13	0,31		2,35	1,43				
29	0,95	1,13	1,23	1,05	0,92	3,32	3,24			-9	-6	18	22	21	19	0,43	0,32	2,72	1,55				
30	1	1,28	1,28	1,13	0,89	3,56	2,94	1,7	1,76	-11	-11	19	19	15	18	0,38	0,24	2,81	1,59				
31				1,52	0,95	0,89	3,48	3,03	1,37		-8	29	23	23	26	0,26	0,23	2,61	2,04				
32		1,32	1,31	0,87	0,83	2,51	2,64	0,87	0,88	0	0	20	17	20	18	0,2	0,24	2,43	1,63				
33	1,1	1,26	1,72	0,75	0,72	2,72	2,65	1,7	1,66	0	-12	16	19	16	18	0,23	0,2	2,51	1,26				
34	1,26	0,98																					
35	2,02	1,63	1,65	0,65	0,65	2,97	2,94	1,39	2	-8	-8	29	18	14	12	0,25	0,28	2,84	1,92				
36	1,3	1,13	1,06	0,78	0,71	3,2	3,02			-6	-6	23	25	20	20	0,31	0,3	2,31	1,52				
37	1,05																						
38	1,32			1,05	0,99	3,33	3,41					19	17	12	12	0,38	0,36	2,8	1,91				
39	0,82	1,42	1,35	0,77	0,99	2,66	2,59			-8	-11	17	15	23	17	0,41	0,29	2,52	1,16				
40	0,95	0,94																					
41	1,02					2,61						15		22				2,65	1,3				
42	1,53			0,71	0,62	2,89	2,82			0	-14	17	17	21	15	0,27	0,26	2,45	1,21				
43	1,27	1,27		1,03	0,91	2,85	2,67			-13	-7	11	11	14	12	0,34	0,3	2,31	1,29				
44	1,02	1,53		0,79	0,71	2,43	2,95			10	-9	23	20	32	21	0,31	0,27	2,6	1,38				
45	1,13	1	1,11	0,73	0,78	2,77	2,77			-13	0	20	20	23	22	0,24	0,28	2,83	1,58				
46						2,43						14		14				2,71	1,34				
47	1,12	1,62	1,63	0,67	0,56	2,4	2,61	1,95	2	-17	-16	13	18	19	19	0,36	0,36	2,93	1,69				
48	1,1					3,08	2,45		1,08			25	24	22	26			2,4	1,62				
49	1,22	0,88	0,9	0,63	0,7	3,13	2,89	2,3	2,04	-11	-4	28	23	27	26	0,23	0,26	3,01	1,79				
50	0,73					2,93	2,82	1,39	1,12			19	20	21	19			2,63	1,52				
51	0,66	1,41	0,9	0,65	0,62	2,8	2,74	1,62	1,58	-10	-9	18	18	21	19	0,31	0,23	2,56	1,43				
52	1,2	1,64	1,73	0,71	0,71	2,46	2,81	1,82	1,65	-6	-6	18	15	20	18	0,3	0,38	2,74	1,53				
53	1,13	1,28	1,49	0,79	0,72	2,93	2,81			-3	-4	21	20	25	20	0,34	0,22	2,66	1,33				
54	1	1,21	1,27	0,98	0,85	2,69	2,69			-6	-7	21	14	19	11	0,44	0,31	2,59	1,41				
55	1,05	1,64	1,28	0,87	0,7	3,28	3,03	1,83		-8	-2	17	20	19	19	0,24	0,23	2,7	1,64				
56	1,06					2,83	2,56					16	23	24	22			2,79	1,46				
57				0,64	0,77	3,41	3,21	1,89	1,91		-10	26	22	25	23	0,31	0,25	3,19	2,04				
58		0,7		0,68								10											
59	1,88	2,11	0,8	0,8	0,99	2,83	2,71	1,84	1,8	-17	-11	22	22	27	13	0,26	0,28	3,26	2,04				
60	0,79	1,01	1,23	0,56	0,76	2,45	2,6	1,93	2,05	0	0	24	22	25	22	0,28	0,25	2,84	1,67				
61	1,11	1,01	1,01	0,71	0,76	3,28	3,45	1,87	1,97	-8	-8	20	26	23	14	0,36	0,31	2,89	2,21				
62																							
63		1,01		0,48								9				1,22							
64	1,01		0,86	0,64	0,57	2,52	2,68	1,7	1,72	-12	-12	19	18	17	14	0,3	0,27	3,2	1,67				
65		1,04	0,87	0,74	0,77	2,21	2,46	1,26	1,65	7	9	18	21	23	18	0,29	0,28	3,08	1,65				
66			0,88	0,74	0,68	2,94	2,41	1,87	2,06	0	0	18	20	20	18	0,45	0,31	3,17	1,92				
67		0,76		0,84								13											
68	0,97	1,05	1,29	0,67	0,79	2,46	2,68	1,79	2,17	-9	-12	23	23	28	27	0,23	0,28	2,42	1,42				
69		1,66	1,39	0,93	0,97	2,83	2,57	1,62	1,8	4	9	18	24	14	14	0,43	0,34	2,86	1,64				
70		0,97	1,59	1	1,04	3,33	3,31	1,47	1,5	-11	-6	24	27	25	18	0,37	0,33	2,23	1,61				
71	1,43	1,17	1,18	0,67	0,74	2,34	3	1,64	1,41	-8	-8	22	17	28	16	0,41	0,35	2,77	1,57				
72		1,32	1,69	0,79	0,96	3,48	2,83	1,57	1,96	7	4	24	26	18	16	0,42	0,51	3,1	1,86				
73		1,6	1,45	0,89	1	2,71	2,93	1,91	1,68	-10	-9	23	27	31	26	0,31	0,29	2,4	1,55				
74		1,51	1,42	1,02	1,16	3,1	2,96	1,41	1,93	-9	-5	27	22	28	30	0,39	0,32	2,27	1,62				
75						2,94	3,46	2,19				40	41	35	37			2,25	2,01				
76						3,79	3,58	3,26	3,1			40	38	53	41			2,56	2,3				
77					1,08	3,51	3,65	3,49	3,21	0	0	44	42	41	44	0,41	0,27	2,76	2,51</				

	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP				
88	1,2	1,97	2,25	1,11	1,15	3,76	3,92	3,6	3,66	-6	-6	53	50	50	54	0,38	0,39	2,54	2,44				
89				0,87	0,82	3,91	3,75	3,06	3,47	4	4	50	48	53	50	0,22	0,2	2,58	3,05				
90		1,59	1,78	1,03	1,1	3,99	4,33			0		63	58	64	57	0,54	0,46	2,44	2,54				
91		2,29	2,87	1,76	1,69	4	4,14	3,9	4,14	10	12	50	51	49	48	0,56	0,48	2,7	3,2				
92		1,83	2,94	1,16	1,66	4,13	4,17	3,56	3,92	4		55	56	59	63	0,29	0,37	3,05	3,33				
93	1,6	2,02	2,28	1,02	0,95	3,96	4,11	3,66	3,89	-5	-4	55	49	50	50	0,26	0,4	2,54	2,63				
94		2,87	3,08	0,85	1,05	3,7	3,43	2,89	3,07	0	8	48	50	51	51	0,29	0,37	2,51	3,07				
95	1,9	3,05	3,2	1,3	1,22	4,36	4,21	4,37	4,21	7	7	48	45	52	47	0,44	0,3	3,43	3,25				
96		1,87	2,26	1	1,11	4,2	3,89	3,8	3,63	12	10	52	48	53	57	0,41	0,38	2,89	3,37				
97		2,47	2,37	1,11	0,98	4,04	4,19	3,45	3,86	14	10	47	55	53	54	0,25	0,18	2,69	3,11				
98		2,31		1,52		4,13	4,4	4,02		7		47	65	55	65	0,53		2,77	3,42				
99						4,36	4,4					59	65	68	65			2,89	2,92				
100						3,63	3,69	3,47	3,58			46	52	53	58			2,77	3,56				
101	1,6	3,55	3,66	1,23	1,18	4	4,02	4,37	4,28	6	6	45	43	45	46	0,43	0,43	3,38	3,05				
102		2,49	2,28	1,32	1,22	4,03	4,45	3,99	4,31	12	5	47	61	60	61	0,41	0,28	3,18	3,9				
103						4,33	3,65					54	65	58	61	0,34		2,54	3,18				
104	1,5	2,11	2,14	1,11	0,98	3,54	3,25	3,13	2,89	0	6	41	37	45	40	0,27	0,26	2,48	2,92				
105		1,81		1,22		4,21	4,23	3,62	3,37			48	49	54	50	0,38		2,72	2,86				
106						4,17	4,59	4,11	4,47			55	61	53	63			3,06	3,25				
107		2,01	2,22	1,24	1,12	3,73	4	3,47	3,67	-4	-8	48	53	55	52	0,28	0,25	3	3,05				
108	2,3	2,35	3,23	1,51	1,43	4,47	4,09	4,26	3,93	10	13	50	47	52	50	0,37	0,42	3,37	3,9				
109	2,1	2,38	2,51	1,52	1,61	4,35	4,66	4,34	4,54	4	0	37	39	35	40	0,51	0,46	3,68	3,24				
110		2,64	2,54	1,66	1,61	4,01	3,86	3,71	3,25	8	7	43	42	58	43	0,41	0,49	2,84	2,8				
111		2,11	2,5	1,36	1,76	4,6	4,49	4,38	4,27	0	0	43	42	45	44	0,38	0,33	4,25	3,7				
112	2,25	1,76	2,06	1,8	1,6	3,86	4,08	3,82	3,72	0	-4	39	31	40	32	0,32	0,37	3,4	3,27				
113		2,51	1,91	1,36	1,41	4,34	4,2	4,08	3,92	3	-5	41	44	42	38	0,23	0,67	3,37	3,5				
114	2,01	2,16	2,07	1,8	1,72	3,67	3,72	2,58	2,55	-8	-6	43	41	46	50	0,29	0,35	2,89	2,31				
115	2,4	2,07	2,17	1,71	1,6	3,85	3,95	3,28	3,63		-4	41	36	45	36	0,43	0,55	3,58	3,06				
116	1,9	1,97	2,24	1,85	2	4,44	4,52	4,44	4,26	5	10	39	41	43	42	0,57	0,53	3,97	3,27				
117	2,9	2,16	2,77	1,48	1,35	4,58	4,59	4,45	4,1	-5	0	45	38	46	46	0,43	0,47	3,89	3,64				
118	2,25	2,39	2,11	1,81	1,83	4,14	4,62	3,9	4,19	5	0	41	43	42	38	0,55	0,57	3,57	3,43				
119	2,5	1,72																					
120		1,69	1,58	1,53	1,37	4,18	4,32	3,52	3,51	-10	-9	43	40	49	45	0,43	0,31	3,12	3,09				
121	2,3	2,08	2,2	1,5	1,28	3,8	4,03	3,11	2,86	-11	-12	37	39	47	40	0,43	0,46	3,65	2,83				
122	2,5																						
123	2,36				1,42	4,33	4,28	4,15	3,97			43	38	59	42	0,39	0,3	3,63	2,77				
124	2,2		1,9	1,4	1,38	4,44	4,65	4,16	4,43	-7	-8	37	39	37	42	0,55	0,4	3,87	3,29				
125	2,2	1,85	1,64	1,91	1,85	4,65	4,71	4,48	4,48	0	-8	46	49	54	47	0,56	0,54	4,1	3,76				
126	3,2	2,45	2,61	1,7	1,78	4,62	4,75	4,18	4,47	-5	-8	39	44	40	43	0,37	0,44	3,86	3,42				
127	2,35					4,13	4,2	2,52	3,42			39	36	34	30			3,27	2,73				
128	2,52	1,69	1,72	1,5	1,46	3,9	4,31	3,71	3,59	-6	-5	43	39	48	34	0,42	0,45	3,54	3,28				
129	2,41	1,06		1,37								37				1,78							
130	2,4			1,03	1,01	4,86	5,05	3,78	4,7			39	38	44	44	0,48	0,43	3,92	3,84				
131	2,6		2,38	1,25	1,03	4,27	3,95	3,68	3,01	-8	-9	43	37	55	43	0,26	0,41	3,79	2,88				
132	2,41					4,91	4,96	4,62	4,44			49	40	37	30			4,05	4				
133	2,45			1,63	1,64	4,79	4,83	4,22	4,4	0	0	39	36	41	40	0,37	0,35	3,99	3,55				
134	2,55				1,59	4,73	4,76	4,17	4,44	0	0	42	41	46	44	0,41	0,32	4,25	3,27				
135	2,28	1,85	1,64	1,7	1,64	4,87	5,05	4,73	4,68	8	3	45	42	41	30	0,46	0,41	4,42	3,88				
136	1,89	1,73	1,91	1,13	1,46	4,19	4,14	3,94	3,71	-9	-9	36	32	41	42	0,29	0,28	3,88	2,92				
137	2,6	3,39	1,89	2,23	1,7	4,28	4,25	3,95	3,67	0	0	34	41	39	40	0,47	0,33	3,68	3,27				
138	2,55	1,52	1,92	1,12	1,3	4,76	4,69	4,25	4,16	0	0	37	41	45	41	0,33	0,33	4,29	3,71				
139	2,32					4	4,5	3,77	4,03			45	42	45	43			3,67	2,82				
140	1,94	1,46	1,45	1,2	1,11	3,93	4,09	3,79	3,82	0	0	31	35	42	40	0,35	0,3	4	3,34				
141	1,8	2,22	2,1	1,27	1,35	4,33	4,32	3,98	3,74	-9	-8	47	38	46	43	0,31	0,47	3,8	2,96				
142					0,79	5,63	5,5	5,3	5,09			50	48	53	46			0,5	4,44	4,26			
143		2,12	1,2	1,51	1,38	4,86	4,84	4,33	4,11	0	0	40	34	46	40	0,45	0,5	4,41	3,87				
144	2,21			1	1,14	4,5	4,64	4,17	4,27	-4	0	41	44	43	46	0,33	0,31	4,03	3,5				
145	1,95			1,22	1,37	4,72	4,67	3,91	3,31	0	0	30	41	37	40	0,4	0,37	3,69	3,04				
146	2,3			1,2	1,27	4,34	4,69	4,03	4,02			37	38	43	38	0,35	0,48	3,98	3,4				
147	2,75			1,22	1,3	4,79	4,74	4,59	4,45	7	6	42	44	47	47	0,44	0,39	4,37	3,6				
148	2,3				4,9	4,94	4,53	4,64				54	41	59	40								
149	2,13	1,64		1,39	4,95	5,11	4,51	4,68				35	36	34	40	0,49		5,07	3,63				
150	2,6			0,95	1,14	4,39	4,79	3,9	4,24			36	36	44	39	0,31	0,39	4,29	3,33				
151	2,16	1,91																					
152	2,09	1,98	1,61	1,1	1,18	4,13	4,34	3,69	3,56	-7	-2	41	35	41	35	0,32	0,43	3,56	3,15				
153	2,3			0,92	0,9	4,46	4,34	3,48	3,69			34	36	34	34	0,41	0,42	3,65	2,89				
154	2,02					4,63	4,72	4,08	4,11		0	33	39	31	32			4,59	3,62				
155	2,6					4,6	4,87	4,08	4,12			32	32	38	29			4,61	3,82				
156	2,9					4,72	4,39	4,19	4,22			29	36	31	32			4,61	3,49				
157	2,4	1,69	1,4	1,5	1,39	4,49	4,71	4,44	4,29	-4		37	34	40	32	0,47	0,27	4,56	3,93				
158	2,07	1,58	1,01	0,93	0,84	4,61	4,87	2,64	2,86	-4		31	28	18	19	0,55	0,56	4,47	3,21				
159	2,4	1,57	1,83	1,37	1,23	4,71	4,66	3,02	3,3		-4	21	24	28	23	0,54	0,47	4,37	2,9				
160	2,21			1,14	1,26	4,61	4,69	3,89	3,13			29	27	29	24	0,3	0,31	4,51	3,68				
161	2,46					4,58	4,67	4,25	4,														

## Legende zur Tabelle der Meßdaten

- A:** Nummer / Geburtsdatum des Patienten
- B:** Geschlecht
- C:** CT Gerätebezeichnung
- D:** Wirbelkörper
- E:** Pedikelaußendurchmesser (inklusive Compacta) in transversaler Schicht gemessen; rechts
- F:** wie E; links
- G:** Pedikelinnendurchmesser (ohne Compacta) in transversaler Schicht gemessen; rechts
- H:** wie G; links
- I:** Pedikellänge in Pedikelachse gemessen von der anterioren zur posterioren Begrenzung des Spinalkanals in transversaler Schicht; rechts
- J:** wie I; links
- K:** mittlere Pedikelhöhe in sagittalen Rekonstruktionen gemessen; rechts
- L:** wie K; links
- M:** maximale Wirbelkörperbreite (ohne Compacta) in transversaler Schicht gemessen
- N:** maximale Wirbelkörpertiefe (ohne Compacta) in transversaler Schicht gemessen
- O:** Pedikelabstand (Spinalkanalbreite) in transversaler Schicht gemessen
- P:** Spinalkanaltiefe in transversaler Schicht gemessen
- Q:** transversaler Winkel, + nach lateral, - nach medial, in transversaler Schicht gemessen; rechts
- R:** wie Q; links
- S:** Winkel zwischen Tangente zum Spinalkanal und Pedikelachse in transversaler Schicht gemessen; rechts
- T:** wie S; links
- U:** coronarer Winkel - nach unten offen, +nach oben offen, in coronaren Rekonstruktionen gemessen; rechts
- V:** wie U; links
- W:** Unterkante des nächsthöheren Wirbelkörpers bis Oberkante Pedikel in sagittalem Pilot gemessen
- X:** Unterkante des nächsthöheren Wirbelkörpers bis Unterkante Pedikel in sagittalem Pilot gemessen
- Y:** Pedikelhöhe am distalen Ende in sagittalen Rekonstruktionen gemessen; rechts
- Z:** wie Y; links
- AA:** Pedikelhöhe am proximalen Ende in sagittalen Rekonstruktionen gemessen; rechts
- AB:** wie AA; links
- AC:** Pedikellänge von posteriorer Begrenzung des Spinalkanals bis anteriorem Ende des Wirbelkörpers (ohne Compacta) in Pedikelachse in transversaler Schicht gemessen; rechts
- AD:** wie AC; links
- AE:** Pedikellänge von posteriorer Begrenzung des Spinalkanals bis Wirbelkörperende (ohne Compacta) streng sagittal in transversaler Schicht gemessen; rechts
- AF:** wie AE; links
- AG:** sagittaler Winkel + nach oben, - nach unten, in sagittalen Rekonstruktionen gemessen; rechts
- AH:** wie AG; links
- AI:** Winkel in Ellipse zwischen zwei Strecken, ausgehend vom Ellipsenmittelpunkt: sagittal und zur Pedikelwurzel in transversaler Schicht gemessen; rechts
- AJ:** wie AI; links
- AK:** Winkel zwischen zwei Strecken, ausgehend vom Mittelpunkt des breitesten Wirbelkörperdurchmessers: sagittal und zur Pedikelwurzel in transversaler Schicht gemessen; rechts
- AL:** wie AK; links
- AM:** Abstand zwischen der Strecke K, L und der Strecke AA, AB; rechts
- AN:** wie AM; links
- AO:** Ellipsenquerdurchmesser in transversaler Schicht gemessen
- AP:** Ellipsenlängsdurchmesser in transversaler Schicht gemessen

## LEBENS LAUF

### PERSÖNLICHE DATEN

Name	Kalyani Nagersheth
Geburtsdatum	05. Mai 1967
Geburtsort	Frankfurt
Staatsangehörigkeit	Deutsch
Familienstand	ledig
Wohnhaft	Vogelweidstr. 12, 60596 Frankfurt

1986	Allgemeine Hochschulreife am Schillergymnasium, Frankfurt
1987	Rettungssanitäter, ASB Frankfurt
1988	MTRA Examen, Städt. Kliniken Offenbach
1988 - 1990	MTRA Tätigkeit in der Nuklearmedizinischen Abteilung der Städt. Kliniken Offenbach
1991 - 2002	MTRA Tätigkeit in der Radiologischen Gemeinschaftspraxis Drs. Halbsguth / Lochner am MRT
1996	3. Staatsexamen des Medizinstudiums an der Johann Wolfgang Goethe Universität, Frankfurt
1996 - 1997	AIP in der Orthopädischen Universitätsklinik Friedrichsheim, Frankfurt
1997	AIP Radiologische Praxis Dr. Schweinshaut, Frankfurt
1997 - 1999	Assistenzärztin Radiologische Gemeinschaftspraxis, Friedberg
1999 - 2001	Ausbildung in ayurvedischer Medizin
2001	Eröffnung einer privatärztlichen Praxis für ayurvedische Medizin

## EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre ehrenwörtlich, daß ich die dem Fachbereich Medizin der Johann Wolfgang Goethe Universität in Frankfurt am Main zur Promotionsprüfung eingereichte Arbeit mit dem Titel:

Röntgenmorphometrische Messungen an der Wirbelsäule  
Grundlagen zur mathematischen Beschreibung eines Wirbelkörpers

in der Orhtopädischen Uniklinik Friedrichsheim unter der Leitung von Prof. Schmitt (mit Unterstützung durch Dr. Scale) und der Radiologischen Gemeinschaftspraxis Drs. Halbsguth / Lochner und ohne sonstige Hilfe selbst durchgeführt und bei der Abfassung der Arbeit keine anderen als die in der Dissertation angeführten Hilfsmittel benutzt habe.

Ich habe bisher an keiner in- und ausländischen Medizinischen Fakultät bzw. Fachbereich ein Gesuch um Zulassung zur Promotion eingereicht, noch die vorliegende Arbeit als Dissertation vorgelegt.

Frankfurt, 20.01.2005



Kalyani Nagersheth