
Untersuchung altersbedingter Veränderungen
der humanen Lendenwirbelsäule
und
Erstellung morphometrischer Referenzwerte
für die MRT

Dissertation

Zur Erlangung des Akademischen Grades

Doctor medicinae dentariae

(Dr. med. dent.)

vorgelegt dem Rat der Medizinischen Fakultät
der Friedrich-Schiller-Universität Jena.

von Stephan Remde
geboren am 26. November 1978 in Jena

Gutachter:

1. Prof. Dr. med. Dipl. chem. Werner A. Kaiser, Jena
2. Prof. Dr. med. dent. Harald Küpper, Jena
3. Prof. Dr. Hartmut Witte, Ilmenau

Tag der öffentlichen Verteidigung: 08.12.2008

Abkürzungsverzeichnis

Af	Anulus fibrosus
aH	anteriore Höhe
aHBs	anteriore Höhe der Bandscheibe
aHWk	anteriore Höhe des Wirbelkörpers
aKi	anteriorer Konkavitätsindex
ap	anterior posteriore Distanz = sagittaler Durchmesser
apWk	anterior posteriore Distanz des Wirbelkörpers aus sagittaler Sicht gemessen auf mittlerer Wirbelkörperhöhe
apBs	anterior posteriore Distanz der Bandscheibe aus sagittaler Sicht gemessen auf mittlerer Bandscheibenhöhe
Bs	Bandscheibe
BWK	Brustwirbelkörper
LWK	Lendenwirbelkörper
MRT	Magnetresonanztomographie
pH	posteriore Höhe
pHBs	posteriore Höhe der Bandscheibe
pHWk	posteriore Höhe des Wirbelkörpers
pKi	posteriorer Konkavitätsindex
PN	Patientengruppe norm
PrN	Probandengruppe norm
R	Referenzgruppe gesamt norm
Sk	Spinalkanal
sWq	sagittaler Wirbelkörperquotient
SWK	Sakralwirbelkörper
T1	T1-gewichtete Aufnahme = longitudinale Relaxation
T2	T2-gewichtete Aufnahme = transversale Relaxation
TSE	Turbospinechosequenz
Wk	Wirbelkörper
zHBs	zentrale Höhe der Bandscheibe
zHWk	zentrale Höhe des Wirbelkörpers

Inhaltsverzeichnis

1.	Zusammenfassung	6
2.	Einleitung	9
2.1.	Anatomie und Funktion der Lendenwirbelsäule	10
2.1.1.	Wirbelkörper	10
2.1.2.	Bandscheiben	12
2.2.	Alterung der Lendenwirbelsäule	15
2.3.	Entwicklung der morphometrischen Untersuchungen der LWS	17
3.	Aufgabenstellung	20
4.	Patienten und Methoden	21
4.1.	Patientenkollektiv	21
4.2.	Methoden	24
4.2.1.	Vorgehensweise bei der Vermessung der Lendenwirbelsäulen	26
4.3.	Datenaufbereitung	29
5.	Ergebnisse	32
5.1.	Darstellung morphometrischer Referenzwerte für die LWS	32
5.1.1.	Wirbelkörper	32
5.1.1.1.	Wirbelkörperhöhen	32
5.1.1.1.a.	Altersentwicklung der anterioren, zentralen und posterioren Wirbelkörperhöhe bei Frauen	35
5.1.1.1.b.	Altersentwicklung der anterioren, zentralen und posterioren Wirbelkörperhöhe bei Männern	36
5.1.1.1.c.	Graphische Gegenüberstellung der Altersentwicklung der anterioren, zentralen und posterioren Höhen der Wirbelkörper BWK12 bis LWK5 bei Frauen und Männern	37
5.1.1.2.	Indizes	41
5.1.1.2.a.	Sagittaler Wirbelkörperquotient (sWq)	41
5.1.1.2.b.	Anteriorer Konkavitätsindex (aKi)	43
5.1.1.2.c.	Posteriorer Konkavitätsindex (pKi)	44
5.1.1.3.	Sagittaler Wirbelkörperdurchmesser (apWk)	45
5.1.2.	Bandscheiben	47
5.1.2.1.	Bandscheibenhöhen	47
5.1.2.1.a.	Altersentwicklung der anterioren, zentralen und posterioren Bandscheibenhöhe bei Frauen	51
5.1.2.1.b.	Altersentwicklung der anterioren, zentralen und posterioren Bandscheibenhöhe bei Männern	52
5.1.2.1.c.	Graphische Gegenüberstellung der Altersentwicklung der anterioren, zentralen und posterioren Höhen der Bandscheiben BWK12/LWK1 bis LWK5/SWK1 bei Frauen und Männern	53
5.1.2.2.	Sagittaler Bandscheibendurchmesser	57
5.1.2.3.	Sagittale Bandscheibenvorwölbung	59

5.1.2.3.a.	Anteriore Bandscheibenvorwölbung	59
5.1.2.3.b.	Posteriore Bandscheibenvorwölbung	59
6.	Diskussion	60
7.	Schlussfolgerung	73
8.	Literatur- und Quellenverzeichnis	74

Anhang

Ehrenwörtliche Erklärung
Danksagung
Lebenslauf

Beiliegende Referenzdaten – CD

1. Altersbezogene Referenzwerte für die Wirbelkörperhöhen
2. Altersbezogene Referenzwerte für die sagittalen
Wirbelkörperdurchmesser
3. Altersbezogene Referenzwerte für die Bandscheibenhöhen
4. Altersbezogene Referenzwerte für die sagittalen
Bandscheibendurchmesser
5. Altersbezogene Referenzwerte für die anterioren und posterioren
Bandscheibenvorwölbungen

1. Zusammenfassung

In der vorliegenden Studie wurde die Altersentwicklung der humanen Lendenwirbelsäule auf Basis von morphometrischen Analysen magnetresonanz-tomographischer Aufnahmen untersucht. Ziel der Studie war es, Referenzwerte auf Basis als gesund beurteilter lumbaler Magnetresonanztomographien zu entwickeln. Die ermittelten Werte sollen die bestehende Morphe der Lendenwirbelsäule metrisch hinterlegen und die altersentsprechende Entwicklung plastisch darstellen. Zudem sollen sie den untersuchenden Radiologen gerade bei Grenzfällen eine orientierende Unterstützung geben zwischen altersgerecht „noch normal“ und pathologisch zu unterscheiden.

Im Zeitraum vom 22.12.1994 bis zum 31.12.2002 wurden am Institut für Diagnostische und Interventionelle Radiologie (IDIR) der Friedrich-Schiller-Universität Jena (FSU) die Lendenwirbelsäulen von 2989 Personen zur Diagnosestellung, -sicherung und zu Studienzwecken magnetresonanztomographisch untersucht. Aus diesem Aufnahme-pool konnten unter Berücksichtigung von Ausschlusskriterien Magnetresonanztomographien von 201 Personen (6,7%) selektiert werden, die von 3 Radiologen (Facharztstandard) unabhängig voneinander als altersentsprechend normal befundet wurden und das Referenzkollektiv darstellten. Hiervon waren 105 Frauen (52,2%) und 96 Männer (47,8%). 54 Personen (27%) der Referenzgruppe wurden im Rahmen einer Studie der Berufsgenossenschaft untersucht.

Folgenden Erkrankungen führten zum direkten Ausschluss aus der Studie: Chronische Rückenschmerzen, ausgeprägte Skelettanomalien (skoliotische Fehlhaltung, Wirbelkörperfrakturen sowie Grund- und Deckplatteneinbrüche, nicht eindeutig auszuschließende Übergangswirbel), Tumorwirbel und metastatischer Wirbelkörperbefall, Morbus Scheuermann im lumbalen Bereich, erosive Osteochondrose, infektiöse Spondylodiszitis sowie vorliegender Zustand nach Op. Bei allen selektierten Personen lagen anamnestisch keine Erkrankungen oder Beschwerden im Bereich der Lendenwirbelsäule vor. Einzugsgebiet der Personen war gesamt Thüringen.

Alle morphometrischen Messungen wurden an den Messkonsolen der Magnetresonanztomographen mit kalibrierten Maßstäben anhand eines standardisierten Messprotokolls durchgeführt. Aufgrund der Symmetrie der einzelnen Wirbelsäulenbestandteile erfolgte die Analyse und Einschätzung der Wirbelsäulen aus sagittaler Sicht in der Medianebene T1-gewichteter MR- Aufnahmen. Vermessen wurden die anterioren, zentralen und posterioren Höhen, der anteroposteriore Durchmesser der

Wirbelkörper und Bandscheiben sowie die anterioren und posterioren Bandscheibenvorwölbungen.

Die durchschnittlichen Wirbelkörperhöhen stiegen sowohl bei Männern als auch bei Frauen zunächst an, bis sie in der 3. Dekade (Alter = 20 – 29 Jahre) ein Maximum erreichten. Ab der 3. Dekade zeigte sich mit zunehmendem Alter ein Absinken der durchschnittlichen Wirbelkörperhöhen. Das Abnehmen infolge der 3. Dekade ist maßgeblich von der stärkeren Abnahme der zentralen gegenüber der anterioren und posterioren Wirbelkörperhöhen geprägt. Die Hypothese, dass sich dadurch mit dem Alter eine zunehmende physiologische Konkavität der Grund- und Deckplatten der Lendenwirbelkörper ergibt, konnte in der eigenen Untersuchung mittels des anterioren und posterioren Konkavitätsindex sowie des sagittalen Wirbelkörperindex bestätigt werden.

Die sagittalen Wirbelkörper- und Bandscheibendurchmesser nahmen mit zunehmendem Alter geschlechtsspezifisch zu. Während sich bei Frauen die stärkste Zunahme dieser Größe zwischen der ersten und zweiten Dekade vollzog mit anschließender vergleichsweise geringerer Zunahme, zeigte sich bei Männern ein wesentlich kontinuierlicherer altersbezogener Entwicklungsverlauf.

Die Bandscheibenhöhen zeigten innerhalb der Lendenwirbelsäule etagenbezogen unterschiedliche Entwicklungsmuster bezüglich des Alters. In der oberen Lendenwirbelsäule (BWK12/LWK1, LWK1/LWK2) zeigte sich bei beiden Geschlechtern ein Ansteigen der durchschnittlichen Bandscheibenhöhen bis ins Senium. In der Bandscheibe LWK2/LWK3 war altersbezogen bei beiden Geschlechtern ein eher asymptotischer Verlauf des Graphs zu erkennen, der bis zur 4. Dekade anstieg und infolge ein Plateau erreichte. Die Bandscheibenhöhe im Segment LWK3/LWK4 stieg zunächst bis zu einem Maximum im Alter von 40 Jahren, um danach wieder leicht an Höhe zu verlieren. Die Bandscheiben der unteren Lendenwirbelsäule (LWK4/LWK5, LWK5/SWK1) zeigten bei Frauen den für LWK3/LWK4 typischen Verlauf, bei Männern eher einen sigmoiden Verlauf mit dem stärksten Anstieg zwischen der 2. und 4. Dekade. Zusammenfassend ergibt sich für die normale Altersentwicklung der Bandscheibenhöhen innerhalb eines Funktionssegmentes altersbezogen eine relative Konstanz der posterioren Höhe, während die zentrale Bandscheibenhöhe altersbezogen die größten Veränderungen zeigt, jedoch auch die größte Höhe innerhalb der Bandscheibe darstellt. Die Bandscheibe des Funktionssegmentes LWK5/SWK1 nimmt eine Sonderstellung ein: Hier bestimmt wesentlich die anteriore Höhe die Höhe des Bandscheibenfaches, während die zentrale Bandscheibenhöhe deutlich geringer als bei den anderen Bandscheibenfächern ausgeprägt ist. Als Grund hierfür ist die Ausbildung

einer „Keilform“ dieser Bandscheibe infolge des aufrechten Ganges mit Lordosierung der Lendenwirbelsäule und die damit erforderliche Anbindung an das Sakrum anzusehen.

Die zentrale Bandscheibenhöhe zeigt bei Frauen einen linearen Anstieg bis zum Erreichen der 5. Dekade. Ab der 5. Dekade fällt diese Größe leicht ab. Bei Männern zeigt die zentrale Bandscheibenhöhe eine kontinuierliche Zunahme bis zum Erreichen der 6. Dekade. Die einzige Ausnahme stellt die Bandscheibe LWK2/LWK3 dar, hier zeigt sich auch bei Männern der oben geschilderte frauentypische Verlauf. Die anteriore Bandscheibenhöhe steigt altersbezogen zunächst an bis zur 4. Dekade und fällt ab der 4. Dekade leicht ab. Innerhalb der Lendenwirbelsäule ist für die anteriore Bandscheibenhöhe eine kraniokaudalwärts gerichtete Zunahme bezeichnend. Im Segment LWK5/SWK1 ist die anteriore Höhe die größte der Bandscheibe.

Die bis auf das Bandscheibenfach LWK5/SWK1 stets größte zentrale Höhe nicht degenerativ veränderter lumbaler Bandscheiben steigt mit zunehmendem Alter in einem höheren Maße als die anteriore und posteriore Bandscheibenhöhe. Diese Ergebnisse unterstreichen die Vermutung, dass sich mit steigendem Alter eine Zunahme der Konvexität der Bandscheiben einstellt. Die anterioren und posterioren Bandscheibenvorwölbungen zeigten keine altersbezogene Signifikanz.

Die Bandscheibe nimmt eine zentrale Rolle bei der Aufrechterhaltung der Funktion des Bewegungssegmentes ein. Angesichts der vorliegenden Ergebnisse kann geschlussfolgert werden, dass für den normalen Alterungsprozess der Lendenwirbelsäule eine Wahrung der Integrität und eine Aufrechterhaltung der Bandscheibenhöhe typisch ist. Die kaudalen und kranialen Flächen der lumbalen Bandscheiben werden mit steigendem Alter zunehmend konvexer (Ausnahme LWK5/SWK1) auch über die 3. Dekade hinaus. Es ergibt sich eine mit steigendem Alter zunehmende physiologische Konkavität der lumbalen Wirbelkörpergrund- und -deckplatten, maßgeblich durch die Höhenabnahme im zentralen Wirbelkörperbereich.

2. Einleitung

Seit mehreren Jahrzehnten sind die Altersveränderungen des diskoligamentären Systems der Lendenwirbelsäule, im speziellen der lumbalen Wirbelkörper und Bandscheiben, Thema intensiver wissenschaftlicher Forschung (Shao et al. 2004, Bogduk 2003, Sether et al. 1990, Rockoff et al. 1969, Schmorl 1932). Die Komplexität dieses Systems wird deutlich, wenn man sich die Anforderungen an die Lendenwirbelsäule im täglichen Berufs- und Freizeitleben vergegenwärtigt. Einerseits soll ausreichend Stabilität gegenüber oft hoher statischer und dynamischer axialer Belastung geboten werden, andererseits genügend Flexibilität, um ein großes Maß an Beweglichkeit des gesamten Rumpfes zu gewährleisten. Für diese gegensätzlich erscheinenden Anforderungen, ist ein perfektes Zusammenspiel muskulärer, diskoligamentärer und ossärer Komponenten erforderlich, die durch lokale und übergeordnete neuronale Systeme angesteuert werden. In diesem Zusammenhang definiert Junghans das Bewegungssegment als kleinste Bau- und Funktionseinheit der Lendenwirbelsäule (Junghans 1968). Abbildung 1 zeigt die Bestandteile des Bewegungssegmentes.

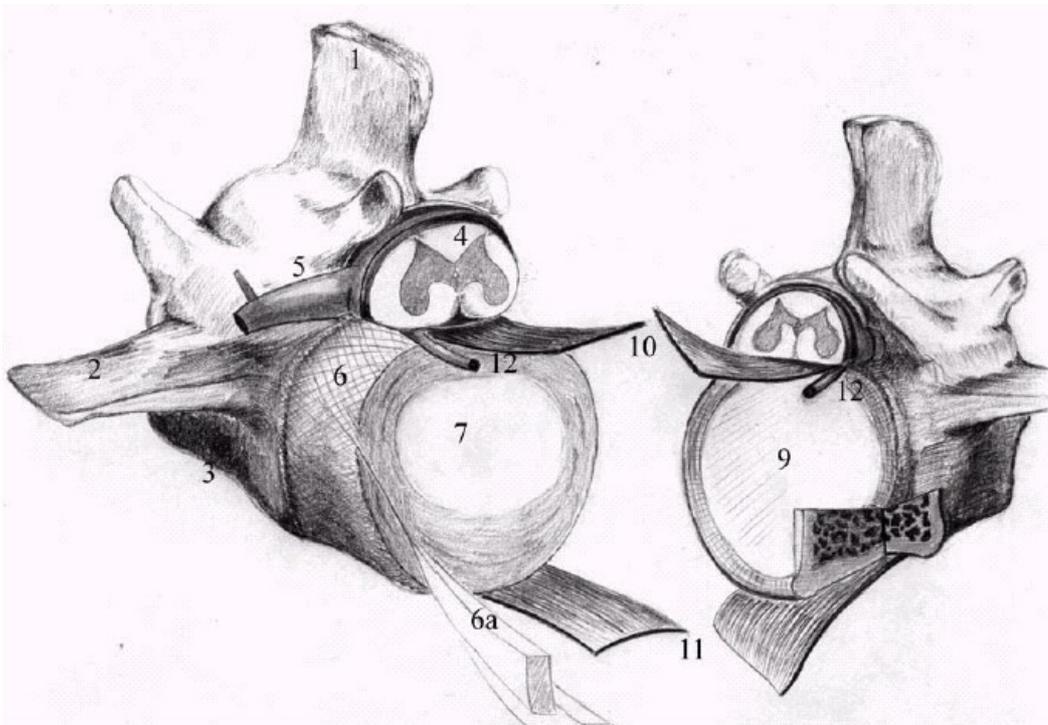


Abb. 1: Darstellung der Bestandteile des Bewegungssegmentes

- 1: Processus spinosus, 2: Processus transversus, 3: Corpus vertebrae, 4: Rückenmark, 5: Nervenwurzel, 6: Anulus fibrosus, 6a: Lamelle des Anulus fibrosus, 7: Nukleus pulposus, 9: Endplatte, 10: Ligamentum longitudinale posterius, 11: Ligamentum longitudinale anterius, 12: Epidurales Gefäß

Zu den wesentlichen Bestandteilen eines Bewegungssegmentes zählen die Zwischenwirbelscheibe (Discus intervertebralis) mit den angrenzenden Knorpelplatten, die entwicklungsgeschichtlich den jeweiligen Wirbeln zuzuordnen sind, die Hälften der benachbarten Wirbel, vorderes und hinteres Längsband (Ligamentum longitudinale anterius und posterius), das gelbe Band (Ligamentum flavum), Wirbelgelenke und alle umgebenden Weichteile, die sich in gleicher Höhe im Wirbelkanal, im Foramen vertebrale sowie zwischen den Dorn- und Querfortsätzen befinden (Junghanns 1979, Junghanns 1968 Junghanns 1951). Für das Verständnis des Alterungsprozesses der Lendenwirbelsäule ist die Kenntnis der anatomischen Komplexität der Lendenwirbelsäule notwendig. Im Folgenden wird zunächst die Morphologie und der Alterungsprozess der einzelnen Strukturelemente (Wirbelkörper und Bandscheiben) beleuchtet und infolge die Entwicklung der morphometrischen Untersuchungen der Lendenwirbelsäule dargestellt.

2.1. Anatomie und Alterungsprozess der Lendenwirbelsäule

2.1.1. Wirbelkörper

Die Lendenwirbelsäule besteht aus fünf Lendenwirbelkörpern (LWK1–LWK5). Jeder Lendenwirbel besteht aus einem ventral liegenden Wirbelkörper (Corpus vertebrae) und aus einem dorsalen Wirbelbogen (Arcus vertebrae). Diese beiden Anteile umschließen das Foramen vertebrale. Die Lendenwirbelkörper besitzen wegen einer konkaven dorsalen Einziehung eine nierenförmige Querschnittsfläche. Die Wirbelbögen bestehen aus zwei symmetrischen Hälften, die sich dorsal in dem Processus spinosi vereinigen. Am vorderen Abschnitt des Wirbelbogens, dem Pediculus arcus vertebrae, findet sich auf jeder Seite ein oberer und ein unterer Gelenkfortsatz, die Processus articulares superiores et inferiores. Diese Gelenkfortsätze sind plump und kräftig. Die konvexen Facetten der unteren Gelenkfortsätze bilden mit den entsprechenden konkaven Gelenkflächen der oberen Gelenkfortsätze des nächst tieferen Wirbels die Wirbelbogengelenke. Diese sogenannten „kleinen Wirbelgelenke“ sind besonders im Lendenwirbelbereich von einer kräftigen und straffen Kapsel umgeben. Ihre Gelenkflächen stehen sagittal und ermöglichen dadurch die Ante- und Retroflexion. Sie bilden zudem eine Leitschiene für die Wirbel und engen deren Bewegungen in bestimmten Richtungen ein. So sind sie der wichtigste Limitierungsfaktor bei der Flexion, begrenzen aber darüber hinaus auch die Rotation und Scherbewegungen (Putz und Müller-Gerbl 2003, Hake

et al. 2002, Bogduk 2000, Sharma et al. 1995, Müller-Gerbl 1974). Die nach lateral weisenden Querfortsätze (Processus costales) sind lang und platt, sie entsprechen dem Rippenrudiment der Lendenwirbel. Die Dornfortsätze (Processus spinosi) sind massiv, seitlich abgeplattet und horizontal ausgerichtet. Abbildung 2 zeigt den Aufbau eines Lendenwirbels.

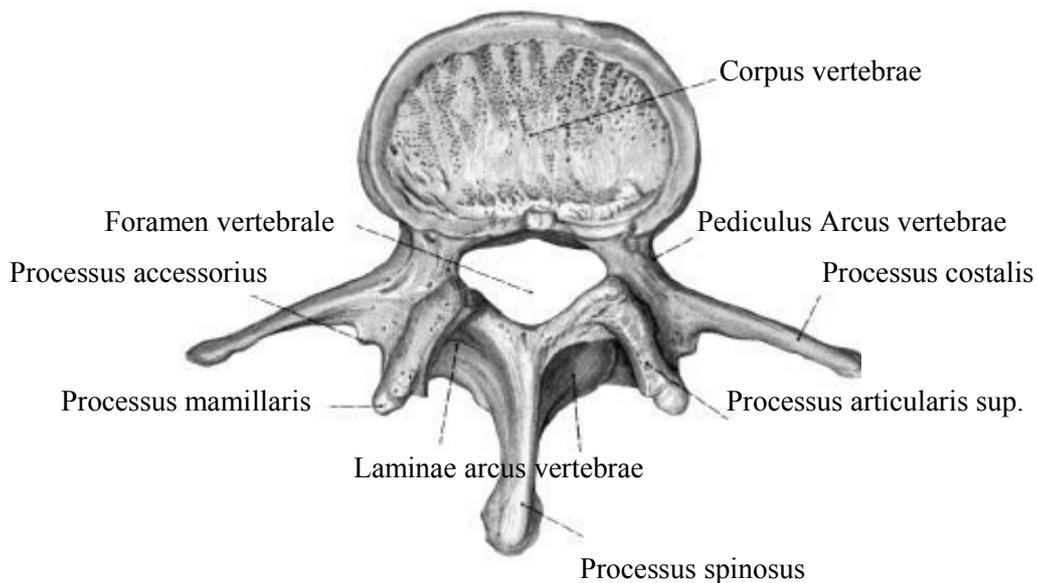


Abb. 2: Aufbau eines Lendenwirbels (Vertebra lumbalis), Ansicht von kranial (Sobotta 1988)

Die Wirbelkörper zeigen innerhalb der Wirbelsäule eine kraniokaudalwärts gerichtete Zunahme, wodurch sich bei gleichbleibenden Materialeigenschaften der Spongiosa eine Verbesserung der Tragfähigkeit ergibt (Brinckmann et al. 1989, Bogduk 2000). Bezüglich der Stabilität gegenüber axialer Druckbelastung ist die Anordnung der Trabekel innerhalb des Wirbelkörpers und deren Anzahl im Verhältnis zur kortikalen Dichte von besonderer Bedeutung (Brinckmann et al. 1989, Bryce R et al. 1995). Es zeigt sich eine inkonstante Spongiosaverteilung innerhalb der Wirbelkörper, wobei die geringste Spongiosadichte im zentralen Wirbelkörperbereich zu finden ist, während sich randplattennah eine erhöhte Spongiosadichte zeigt. Die Trabekel in der Transversalebene sind zur Zirkumferenz hin senkrecht ausgerichtet, was auf eine gleichartige Beanspruchung schließen lässt. Die radiär ausgerichteten Trabekel nehmen eher Zugbelastungen auf. Die Kortikalis der Wirbelkörper ist nur sehr dünn ausgebildet. Selbst auf Höhe deren Mitte ist sie kaum dicker als das 2- bis 3fache der Spongiosabälkchen (Graichen und Putz 1999). Somit ergibt diese Bauweise eine maximale Druckaufnahmekapazität bei geringem Gewicht (Bryce R et al. 1995). Die

Wirbelkörper stehen untereinander durch die Wirbelgelenke, den Bandapparat und die Bandscheiben in Verbindung.

2.1.2. Bandscheiben

Der zwischen den Wirbelkörpern gelagerte Discus intervertebralis soll einerseits das Rückenmark schützen, andererseits die Beweglichkeit der Wirbelsäule gewährleisten. Zudem ist er für eine gleichmäßige Druckübertragung zwischen den Wirbelkörpern innerhalb des Bewegungssegmentes von zentraler Bedeutung. Der Nucleus pulposus, der Anulus fibrosus und die hyalinknorpelige Endplatte sind die Hauptbestandteile der dorsal und ventral vom Ligamentum longitudinale dorsale und ventrale begrenzten Bandscheibe. Kollagene und Proteoglykane sind die primären strukturellen Komponenten des makromolekularen Netzwerkes im Diskus intervertebralis. Kollagene verleihen dem Gewebe Zugfestigkeit. Proteoglykane, die interaktiv mit Wasser wirken, verleihen dem Gewebe Steifheit und Widerstandsfähigkeit gegenüber Druckbelastung (Buckwalter 1995). Der zelluläre Anteil der Bandscheibe ist äußerst gering und liegt bei 1–5% des Gewebevolumens (Goupille 1998, Bogduk 2000, Humzah and Soames 1988).

Der Anulus fibrosus umfängt mit scherengitterartigen zueinander versetzten Lamellen den Nucleus pulposus, wie in Abbildung 3 dargestellt.

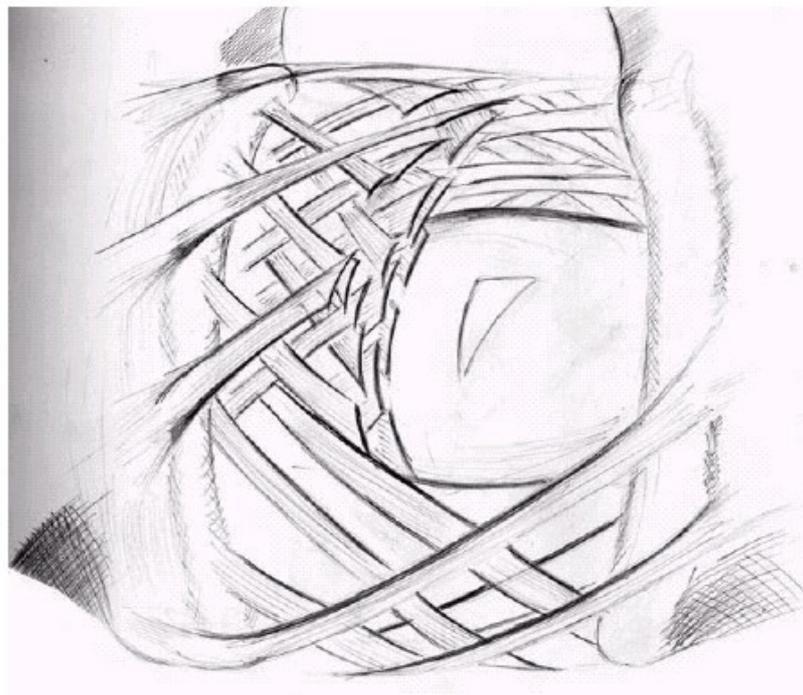


Abb. 3: Darstellung der scherengitterartigen Faserausrichtung des Anulus fibrosus

Durch die scherengitterartige Ausrichtung der Kollagenfaserbündel im peripheren Teil der Außenzone des Anulus fibrosus, die sogenannten Sharpey'schen-Fasern, die in die knöcherne Randleiste einstrahlen und dort fest verankert sind (Bogduck 2003, Humzah and Soames 1988), werden die durch die reversiblen Höhenveränderungen des Discus intervertebralis entstehenden Kräfte kompensiert. Die nach dem Prinzip der venezianischen Schere angeordneten Kollagenfaserbündel sind außerdem in der Lage die Zugspannungen aufzunehmen, die bei exzentrischer Belastung der Wirbelsäule an der Druckkraft abgewandten Seite auftreten. Außerdem sind die Kollagenfaserbündel der Innen- und Außenzone der Lamellen des Anulus fibrosus in gegenläufigen Schraubentouren ausgerichtet, um die durch Schubbelastungen in unterschiedlicher Richtung hervorgerufenen Zugspannungen aufzunehmen. Die zwiebelringartig angeordneten Lamellen des Anulus fibrosus nehmen an Dichte zum Zentrum hin ab und gehen allmählich und ohne besondere Grenzen in den Gallertkern (Nucleus pulposus) über (Tillmann B, Rudert M. 1994). Neben kollagenen Fasern wurden elektronenmikroskopisch noch elastische Fasern nachgewiesen, welche intralamellär in den oberflächlichen Lamellen des Anulus fibrosus dicht und regelmäßig arrangiert sind und sich in den tiefergelegenen Lamellen locker arrangiert darstellen. Interlamellär verlaufende elastische Fasern sind zwischen den oberflächlichen Lamellen vertikal und schräg verlaufend arrangiert. In tieferen Schichten zeigen sie einen rädären Verlauf und stellen sich in der tiefsten Schicht ein lockeres dreidimensionales Netzwerk von kollagenen und elastischen Fasern dar.

Der Nucleus pulposus liegt in Mittelstellung der Wirbelsäule, vor allem im lumbalen Bereich, mehr im dorsalen Anteil des Zwischenwirbelabschnittes. Gründe hierfür stellt restliches Gewebe der Chorda dorsalis dar, das die Grundlage des Gallertkernes bildet. Dieser besteht größtenteils aus Grundsubstanz, in der sich vorwiegend Glykoproteine und hochmolekulare Polysaccharide befinden. Die Extrazellulärmatrixbestandteile des Discus intervertebralis, Kollagene und Proteoglykane, bilden eine Funktionsgemeinschaft. Die elektrostatisch an Kollagen gebundenen Proteoglykanmakromoleküle verleihen dem Gewebe Elastizität und Festigkeit. Innerhalb der Proteoglykanpolymere zeichnen sich einige Proteoglykanmonomere, z. B. die Glykosaminglykane Chondratinsulfat und Keratonsulfat, durch ihren hohen Anteil an Sulfatgruppen aus. Die negativen Ladungen (Polyanionenstruktur) verleihen den Glykosaminoglykanen ihre Festigkeit. Die sulfatierten Gruppen können außerdem reichlich Wasser binden.

Das von den Makromolekülen der Extrazellulärmatrix gebundene Wasser (sogenanntes strukturiertes Wasser) erfüllt im Discus intervertebralis zum einen ernährungsphysiologische und zum anderen mechanische Funktionen (Tillmann und Rudert 1994). Molekularstruktur und Zusammenwirken der Proteoglykanmakromoleküle mit anderen Extrazellulärmatrixbestandteilen sind Grundlage des viskoelastischen Verhaltens der Binde- und Stützgewebe. Im Nucleus pulposus beträgt der Proteoglykananteil bei Jugendlichen etwa 14 % und nimmt im hohen Lebensalter deutlich ab, womit der Wassergehalt des Discus intervertebralis um etwa 20 % sinkt (Junghanns 1979). Dieser altersbedingte Wasserverlust kann zu funktionellen Störungen im Bewegungssegment führen, wenn die aus der Höhenminderung des Discus intervertebralis resultierende Instabilität nicht durch den aktiven Bewegungsapparat, vor allem durch die kurzen autochthonen Rückenmuskeln kompensiert werden kann.

Abgesehen von dem beschriebenen, physiologischen Alterungsprozess besteht normalerweise ein Gleichgewicht zwischen Synthese und Depolymerisation dieser Makromoleküle. Hierzu ist ein regelmäßiger Stoffaustausch im Zwischenwirbelabschnitt notwendig. Laut Krämer produzieren schlecht versorgte Bandscheibenzellen (Bindegewebszellen) Makromoleküle von minderer Qualität und Quantität mit resultierender, schlechter Funktionserfüllung. Gleiches gilt auch für die Kollagenmakromoleküle (Krämer 1994, Krämer 1993). Die Ernährung der Bandscheibe erfolgt durch Diffusion (Urban et al. 2004). Angesichts methodisch bedingter widersprüchlicher Mitteilungen im Schrifttum über die Blutversorgung der Bandscheibe (Rudert und Tillmann 1993) wurden immunhistochemische Methoden eingesetzt, mit denen in der Basalmembran von Gefäßen vorkommende Bestandteile, z. B. Laminin oder Kollagen Typ IV sicher nachgewiesen werden können (Timpl et al. 1979). Nach entsprechenden Untersuchungen von Rudert und Tillmann ist der Nucleus pulposus wie bisher einheitlich angenommen stets gefäßfrei (Rudert und Tillmann 1993). Im Anulus fibrosus lassen sich Blutgefäße jedoch bis zum 20. Lebensjahr nachweisen (Urban et al. 2004). Das Bindegewebe in der Umgebung der Bandscheibe ist in allen Lebensabschnitten gut vaskularisiert. Bandscheibeninnenraum, Knorpelplatten, Anulus fibrosus und paravertebrales Gewebe sowie Spongiosa der angrenzenden Wirbel stellen ein Stoff- und Flüssigkeitsaustauschsystem – osmotisches System – dar (Krämer 1993). Die begrenzenden Gewebsschichten des Zwischenwirbelabschnittes haben Eigenschaften einer semipermeablen Membran. Die erwähnten Räume weisen einen unterschiedlichen Belastungsdruck (hydrostatischen Druck)

auf. Während in den Weichteilen neben der Bandscheibe und in dem durch die Knochentrabekel abgestützten Hohlraumssystem des Wirbels der normale Gewebsdruck von nur wenigen mmHg herrscht (Krämer 1993), ist der Zwischenwirbelabschnitt, je nach Körperposition und Gewichten, die angehoben werden, unterschiedlich hohen Belastungsdrücken ausgesetzt (Nachemson 1966). Die im Bandscheibeninnenraum befindlichen Mucopolysaccharide verhindern, dank ihrer großen Fähigkeit Wasser anzuziehen und auch bei relativ hoher Druckbelastung zu halten bzw. aufzunehmen, dass die Zwischenwirbelscheibe ausgepresst wird. Dem hydrostatischen (Belastungs-) Druck wirkt im Bandscheibeninnenraum der onkotische Druck entgegen. Er setzt sich aus kolloidosmotischem Druck (= der von hochmolekularen Lösungen ausgeübte osmotische Druck) sowie dem Quelldruck (= Druck, mit dem ein quellbarer Körper sich gegen Widerstände bei Wasserangebot ausdehnt) zusammen. Beide Druckkräfte beeinflussen den Flüssigkeitsstrom in den Bandscheibeninnenraum hinein und hinaus entgegengesetzt. Das Wechselspiel dieser Druckverhältnisse ist von wesentlicher Bedeutung für die Ernährung der Bandscheibe sowie für die Funktion des Bewegungssegmentes (Krämer 1993, Junghanns 1979).

2.2. Alterung der Lendenwirbelsäule

In früheren Studien (Lawrence 1969, Junghanns 1968) wurde die Verschmälerung der Disci intervertebrales als eines der pathologischen Anzeichen der älter werdenden Lendenwirbelsäule betrachtet. Mit zunehmendem Alter unterliegt die Bandscheibe strukturellen Veränderungen, vermutlich in Anpassung an unterschiedliche Beanspruchung und Belastung (Eriksen 1976). Die Zahl lebensfähiger Zellen im Diskus nimmt mit zunehmendem Alter ab. Der Anteil nekrotischer Zellen beträgt im Säuglingsalter 2% und steigt im Erwachsenenalter von 50% auf 80% im Senium (Buckwalter 1995). Es kommt zu einer Verschiebung der Konzentration der Hauptbestandteile der Bandscheibe. Die Abnahme der Proteoglykane, eine verminderte Wasserbindungskapazität und die Kollagenzunahme (Hutton et al. 1998, Gruber and Hanley 1998) führt zu einer Herabsetzung viskoelastischen Eigenschaften der Bandscheibe. Von besonderer Bedeutung sind im täglichen Leben auftretende Druckbelastungen der Bandscheibe. In Abhängigkeit von Belastungskraft und Belastungsdauer (Hutton et al. 1999, Lotz und Chin 2000) können diese zur Disorganisation der Anulus fibrosus Fasern, Apoptosis, verminderter Kollagen II Expression (Lotz et al. 1998), Abnahme der Proteoglykane und Anstieg des Kollagen I Anteils (Hutton et al. 1998, Bogduk

2000) führen. Geringe Druckkräfte von 3 Atmosphären (Atm) wirken sich positiv auf die Proteoglykansynthese aus, höhere Belastung (30 Atm) wirkt sich negativ aus, da dadurch die Proteoglykansynthese gehemmt wird (Liu et al. 2001, Ishihara 1996, Ishihara 1997). Druckkräfte von beinahe 30 Atm werden bei Wirbelsäuleflexion in Kombination mit dem Heben schwerer Lasten erreicht. Die endgültige reife Form der Lendenwirbelsäule ist somit sowohl Resultat einer genetischen Programmierung als auch das Ergebnis von Stellungen und Aktivitäten als Beantwortung unterschiedlicher Belastungen, die während der Kindheit ausgeführt werden (Bogduk 2000). Alle infolge des abgeschlossenen Wachstums (siehe Altersveränderungen der Wirbelkörper) auftretenden biochemischen und strukturellen Veränderungen der Lendenwirbelsäule werden von einigen Autoren unter den Begriff Degeneration subsummiert (An et al. 2004). Dabei wird die Degeneration als Teil des normalen Alterungsprozesses angesehen. Andere Autoren sehen die Degeneration und die normalen Altersveränderungen der Wirbelsäule als unterschiedliche Prozesse an (Bogduk 2000), wobei die Degeneration des Nucleus pulposus der Zersetzung des Discus intervertebralis gleichkommt. Einige Autoren sehen die Degeneration als ein idiopathisches Phänomen (Urban et al. 2000, Melrose und Ghosh 1988), andere beschreiben das Versagen des Discus intervertebralis und die Störung der Integrität der Bandscheibe in Form der Diskusruptur als initiales Moment für die Degeneration. Als Hauptursache wird die Endplattenfraktur infolge axialer Druckbelastung angesehen (Bogduk 2000, Stokes und Iatridis 2004). Die Degradation der Bandscheibe ist ebenfalls ein Vorgang, der kein Ergebnis des normalen Alterns ist. Hierbei beschränkt sich die Zersetzung auf den Nucleus pulposus mit der Folge einer herabgesetzten Nucleus-pulposus-Funktion durch die verminderte Wasserbindungskapazität. Infolge der geminderten Druckresistenz kommt es zur Höhenabnahme des Discus intervertebralis und zur Osteophytenbildung. Für die Verschmälerung ist somit eine andere Erklärung als das normale Altern nötig, besonders wenn sie nicht in allen Segmenten der Lendenwirbelsäule auftritt. Bei intaktem Anulus fibrosus kann trotz herabgesetzter Wasserbindungskapazität die Diskushöhe relativ erhalten bleiben. Neuere Studien (Shao et al. 2002, Bogduk 2000, Vernon-Roberts 1992) beschreiben die Aufrechterhaltung der Diskushöhe (Twomey und Taylor 1985) beziehungsweise die Dimensionszunahme der lumbalen Bandscheiben als ein Zeichen des normalen Alterungsprozesses. Zwischen der 2. und 7. Dekade nimmt der anterior-posteriore Durchmesser der lumbalen Disken bei Frauen um ca. 10% und bei Männern um ca. 2% zu (Vernon Roberts und Pirie 1977). In den meisten Disken ist eine 10%ige Höhenzunahme zu verzeichnen. Die oberen und unteren Flächen der Disken werden zunehmend konvex.

2.3. Entwicklung der morphometrischen Untersuchungen der Lendenwirbelsäule

Bis zur Einführung der Magnetresonanztomographie stellten Röntgenbilder der LWS in zwei Ebenen den Standard bei Untersuchungen der Lendenwirbelsäulenerkrankungen dar. Es gab viele Vorschläge zur Beurteilung von Röntgenaufnahmen. Einige frühe Einteilungen, so zum Beispiel die Einteilung der Spondylolisthesis nach Meyerding von 1931, finden auch heute noch Anwendung (Meyerding 1931). Vor allem zur genaueren Beurteilung der Bandscheiben wurden verschiedene Meßverfahren entwickelt. Die wichtigsten Arbeiten, die sich mit der Messung lumbaler Bandscheiben befassen, stammen von Hurxthal und Farfan (Hurxthal 1968, Farfan 1973, Heuck und Bast 1999). Beide führen die Messung am seitlichen Übersichtsbild der LWS durch. Nach Hurxthal wird die Höhe der Bandscheibe aus dem Mittelwert des größten (a) und kleinsten (a') Abstandes der Konturen der Grund- und Deckplatte bestimmt (Abb. A).

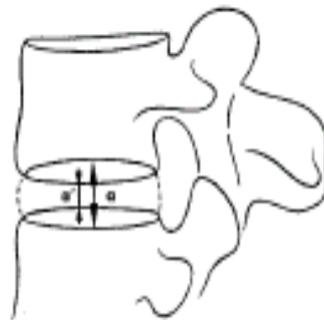


Abb. 4: Bestimmung der Bandscheibenhöhe nach Hurxthal – Methode I (aus Pope et al. 1977)

In einer nach Hurxthal modifizierten Methode wird die Mitte zwischen den Randkonturen (A) zur Höhenbestimmung benutzt.



Abb. 5: Bestimmung der Bandscheibenhöhe nach Hurxthal – Methode II (aus Pope et al. 1977)

Farfan errechnet die Bandscheibenhöhe aus dem Mittelwert des dorsalen (A) und ventralen (A') Abstandes zwischen den Wirbelkörperendplatten. Zusätzlich wird der erhaltene Wert durch die Tiefe der Bandscheibe dividiert. Dadurch erfolgt ein Ausgleich der Röntgenvergrößerung.

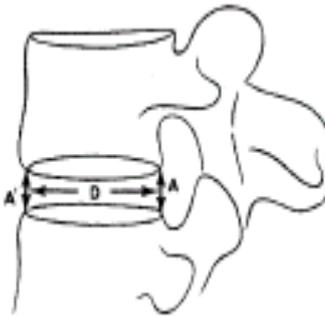


Abb. 6: Bestimmung der Bandscheibenhöhe nach Farfan (aus Pope et al. 1977)

Pope et al. verglichen 1977 fünf verschiedene Meßmethoden zur Bestimmung der Bandscheibenhöhe (darunter auch die von Hurxthal und Farfan, sowie eine nach Hurxthal modifizierte Methode). Es zeigten sich erhebliche Unterschiede in der Genauigkeit. Sie empfehlen zukünftig die Röntgenvergrößerung auszugleichen, um Ergebnisse besser miteinander vergleichen zu können (Pope et al. 1977).

Andersson et al. kamen 1981 nach Auswertung der Meßergebnisse verschiedener Untersucher auf eine Abweichung vom wahren Wert für die Bandscheibenhöhe von 50%. Die Bestimmung der Bandscheibenhöhe erfolgte nach Farfan. Eine genaue qualitative Bestimmung der Bandscheibenhöhe aus Routineaufnahmen wurde daraufhin durch die Autoren ausgeschlossen (Andersson et al. 1981).

Saraste et al. unternahmen 1985 Messungen an 12 Präparaten zur genauen Bestimmung der Bandscheibenhöhe zwischen L5 und S1. Dabei befanden sich die Präparate jeweils in verschiedenen Stellungen axialer Rotation und seitlicher Verkipfung. Auch hier zeigten sich Abweichungen von 9% bis 35% vom Mittelwert für die Bandscheibenhöhe (Saraste et al. 1985).

Viele Untersucher hatten sich mit den Messvorschriften von Hurxthal und Farfan befaßt. Die übereinstimmende Meinung war, dass zwar eine qualitative Beurteilung, jedoch keine hinreichend genaue Messung lumbaler Bandscheibenhöhen möglich ist. Die Schwierigkeit bestand darin, dass eine ideale Abbildungsgeometrie nur erreicht wird, wenn der Zentralstrahl genau durch eine Bandscheibe und damit parallel zu den angrenzenden Grund- und Deckplatten verläuft. Dies kann pro Bild maximal für einen Zwischenwirbelraum erreicht werden. Hinzu kommen weitere Abweichungen wie axiale Rotation, seitliche Verkipfung und Röntgenvergrößerung.

Mit der Methode von Frobin, Brinckmann und Biggemann 1995 (Frobin und Brinckmann 1995, Biggemann 1997) konnten laut Aussage der Autoren erstmals diese störenden Einflussfaktoren in einem Messverfahren weitestgehend beseitigt werden, indem die objektive Lagebestimmung der Eckpunkte und der räumlichen Strukturen der Wirbelkörper in die Vermessung einbezogen wurden. Außerdem wurde durch deren Arbeit eine Datenbasis von Bandscheibenhöhen gesunder Personen auf Grundlage von 683 Röntgenseitenaufnahmen der LWS erstellt und damit die Möglichkeit zum Vergleich geschaffen (Brinckmann, P. 1994). Die Genauigkeit der Messung der Bandscheibenhöhe nach dieser Methode beträgt 4,15% (Frobin et al. 1997).

Shao et al. untersuchten die altersentsprechende Bandscheibenentwicklung in 1239 seitlichen Röntgenübersichtsaufnahmen (607 Frauen und 633 Männer) nach der Frobin – Brinckmann – Biggemann – Methode unter Einbeziehung der Wirbelkörperpunkte (Shao et al. 2002).

Roberts et al. untersuchten die Altersentwicklung der lumbalen Bandscheibenhöhen auf Grundlage von MR- Aufnahmen, indem die zentrale Bandscheibenhöhe und der Flächeninhalt der Bandscheiben in der Medianebene ermittelt wurde.

Die Magnetresonanztomographie stellt in der heutigen Zeit den Goldstandard bei der Untersuchung von Lendenwirbelsäulenerkrankungen dar. In zahlreichen Studien konnte

nachgewiesen werden, dass die MRT-Diagnostik bei der Auffindung eines Korrelats für die Rückenschmerzen aussagekräftiger als die konventionellen Methoden (konventionelles Röntgen, CT, Myelographie) ist (Dullerud 1999, Kikuchi 2001, Maravilla 1985, Gualdi 1995). Im Vergleich zur klassischen Röntgendiagnostik erlaubt die Magnetresonanztomographie neben der Beurteilung der Wirbelkörper, genauer des Wirbelkörpermarkraumes, auch die Beurteilung sowohl der Bandscheiben als auch der ligamentären Strukturen und der paravertebralen Muskulatur. Sie bietet den Vorteil, dass der Anulus fibrosus und das hintere Längsband vom Nucleus pulposus unterschieden werden können. Zudem besteht für den Untersuchten keine Röntgenstrahlenbelastung.

3. Aufgabenstellung

Bereits im Jahre 1946 wurde die Grundlage für die Magnetresonanztomographie als bildgebendes Verfahren geschaffen mit der Entdeckung der Kernresonanz durch Purcel und Bloch (Purcel 1946, Bloch 1946). Erste klinisch einsetzbare Magnetresonanztomographen werden im Bereich der 80er Jahre beschrieben. Seit 1994 wird dieses bildgebende Verfahren an der Friedrich-Schiller-Universität Jena genutzt. Im Zeitraum vom 22.12.1994 bis zum 31.12.2002 wurden am Institut für Diagnostische und Interventionelle Radiologie (IDIR) der Friedrich-Schiller-Universität Jena (FSU) die Lendenwirbelsäulen von 2989 Personen zur Diagnosestellung, -sicherung und zu Studienzwecken magnetresonanztomographisch untersucht. Hiervon konnten 201 Personen (6,7%) selektiert werden, die von 3 Radiologen (Facharztstandard) unabhängig voneinander als altersentsprechend normal befundet wurden.

Ziel der vorliegenden Studie ist,

1. bei normbefundeten Personen Wirbelkörper und Bandscheibenfächer auf Grundlage sagittaler Magnetresonanztomographien zu vermessen, um altersentsprechende Referenzwerte zu definieren und morphologische Gegebenheiten metrisch zu hinterlegen.
2. die Vorwölbungen der Bandscheiben zu vermessen und altersentsprechend zu untersuchen.

Anregung zu dieser Studie war die im Klinikalltag fehlende Referenzgrundlage morphometrischer Normwerte für die MRT und die unscharfe Definition der Begriffe „altersentsprechend noch normal“ und „degeneriert erscheinend“.

4. Patienten und Methoden

4.1. Patientenkollektiv

Die morphometrischen Daten wurden anhand von Magnetresonanztomographien aus dem Archiv des Institutes für Diagnostische und Interventionelle Radiologie (IDIR) der Friedrich-Schiller-Universität Jena (FSU) erhoben. Im Zeitraum vom 22.12.1994 bis zum 31.12.2002 wurden am Institut für Diagnostische und Interventionelle Radiologie (IDIR) der Friedrich-Schiller-Universität Jena (FSU) die Lendenwirbelsäulen von 2989 Personen zur Diagnosestellung, -sicherung und zu Studienzwecken magnetresonanztomographisch untersucht. Aus diesem Aufnahme-pool konnten unter Berücksichtigung von Ausschlusskriterien die Magnetresonanztomographien selektiert werden, die von 3 Radiologen (Facharztstandard) unabhängig voneinander als altersentsprechend normal befundet wurden. Personen, bei denen entweder chronische Rückenschmerzen oder eine Krankheit, die in den Ausschlusskriterien definiert war, vorlagen, wurden ausgeschlossen.

Ausschlusskriterien

Folgenden Erkrankungen führten zum direkten Ausschluss aus der Studie:

Chronische Rückenschmerzen

Der Zusammenhang zwischen chronischen Rückenschmerzen und der Bandscheibendegeneration wird in der Literatur kontrovers diskutiert. In der vorliegenden Studie sollten jedoch nur Personen untersucht werden, bei denen kein chronifiziertes Schmerzsyndrom vorlag.

Ausgeprägte Skelettanomalien

Hierunter fielen vor allem Personen mit starker skoliotischer Fehlhaltung, Wirbelkörperfrakturen sowie Grund- und Deckplatteneinbrüchen, und Patienten mit nicht eindeutig auszuschließenden Übergangswirbeln.

Tumorstirbel und metastatischer Wirbelkörperbefall

Personen mit MR-tomographisch nachweisbaren Tumorbefall von Wirbeln wurden auch bei Beschwerdefreiheit ausgeschlossen, da eine Bandscheibenbeteiligung und somit eine Bandscheibenveränderung hinsichtlich der Signalintensität, bei bestehenden Tumorbefall, nicht sicher auszuschließen ist.

Morbus Scheuermann im lumbalen Bereich

Der Zusammenhang zwischen dem Morbus Scheuermann und der Bandscheibendegeneration wird in zahlreichen Veröffentlichungen beschrieben (Stäbler 1997, Swischuk 1998) und führte somit vor allem bei vorliegenden Schmorl'schen Knoten zum Ausschluss.

Erosive Osteochondrose

Die erosive Osteochondrose geht mit Rückenschmerzen einher und entspricht einer symptomatischen Bandscheibendegeneration bei instabilem Bewegungssegment. Beim Vorliegen entsprechender Knochenmarksveränderungen erfolgte daher der Ausschluss.

Infektiöse Spondylodiszitis

Personen mit infektiöser Spondylodiszitis wurden ebenfalls ausgeschlossen, da hier i.d.R. Rückenschmerzen bestehen und eine Zerstörung der Bandscheibe vorliegt. Hierbei kommt es auch zu Signalintensitätsänderungen der Bandscheiben (Stäbler 1998). Der Ausschluss von chronischen Rückenschmerzen konnte nur über die Befundbögen geschehen. Wenn dies wegen ungenügender Aktendokumentation schwierig war, wurden diese Personen ausgeschlossen.

Insgesamt konnten unter Berücksichtigung der oben genannten Ausschlusskriterien Magnetresonanztomographien von 201 Personen (6,7%) selektiert werden, die von 3 Radiologen (Facharztstandard) unabhängig voneinander als altersentsprechend normal befundet wurden. Zusammenfassend wurden diese als Referenzgruppe (R) bezeichnet (siehe Tab.1.). Hiervon waren 105 Frauen (52,2%) und 96 Männer (47,8%). 54 Personen (27%) der Referenzgruppe wurden im Rahmen einer Studie der Berufsgenossenschaft untersucht.

Tab. 1: Kollektivcharakterisierung Referenzfälle

	Anzahl	Alter
Referenzgruppe norm (R)	201	30,58 ± 17,65
Gesamt		
Frauen	105(52,2%)	31,24 ± 19,23
Männer	96 (47,8%)	29,85 ± 15,81
Patientengruppe norm (PN)	147 (73%)	31,15 ± 20,08
Probandengruppe norm(PrN)	54 (27%)	29,02 ± 7,81

4.2. Methoden

Die Magnetresonanztomographie stellt in der heutigen Zeit den Goldstandard bei der Untersuchung von Lendenwirbelsäulenerkrankungen dar. Im Vergleich zur klassischen Röntgendiagnostik erlaubt die Magnetresonanztomographie neben der Beurteilung der Wirbelkörper, genauer des Wirbelkörpermarkraumes, auch die Beurteilung sowohl der Bandscheiben als auch der ligamentären Strukturen und der paravertebralen Muskulatur. Sie bietet den Vorteil, dass der Anulus fibrosus, die Längsbänder und der Nucleus pulposus unterschieden werden können. Zudem besteht für die Untersuchten keine Röntgenstrahlenbelastung.

Alle morphometrischen Messungen wurden an den Messkonsolen der Tomographen mit kalibrierten Maßstäben anhand eines standardisierten Messprotokolls durchgeführt. Grundlage waren Untersuchungen der Lendenwirbelsäule in sagittaler Schnittführung in 3mm-Schichten mit T1 und T2-gewichteten TSE-Sequenzen an einem 1,5 T Gyroscan ACS II-Tomographen (Philipp) und einem 1,5 T Vision-Tomographen (Siemens). In allen Fällen wurden die Messungen unter einheitlichen Lagerungsbedingungen im Lordoseausgleich durchgeführt. (siehe Abb.7.)



Abb. 7: Lagerung des Untersuchten während der MRT mit Kniegelenkunterpolsterung zum Ausgleich der Lendenlordose

Einleitung

Bei allen Untersuchungen wurde die Wirbelsäule von BWK12 bis SWK2 in sagittaler Schnittführung dargestellt; zusätzlich wurden noch transversale Schnitte angefertigt.

Folgende Einstellungsparameter wurden verwendet:

T1- betonte Aufnahmen: TR = 500ms, TE = 15ms (coronar)
TR = 450ms, TE = 15ms (transversal)

T2- betonte Aufnahmen: TR = 2500ms, TE = 90ms

Protonengewichtung: TR = 2500ms, TE = 15ms

Die Bildauflösung lag bei 256 x 512 Pixel.

Für die Vermessungen wurden nur die T1 gewichteten Aufnahmen in sagittaler Projektion verwendet.



Abb. 8: T1 – gewichtete MRT-Aufnahmen der Lendenwirbelsäule in sagittaler Projektion

4.2.1. Vorgehensweise bei der Vermessung der Lendenwirbelsäulen

Anhand eines einheitlichen Messprotokolls wurden die Lendenwirbelsäulen in der median-sagittalen Schicht T2-gewichteter MR-Aufnahmen vermessen. Hierzu wurden zunächst folgende Punkte an den Wirbelkörpern entsprechend der Abbildung 9 festgelegt.

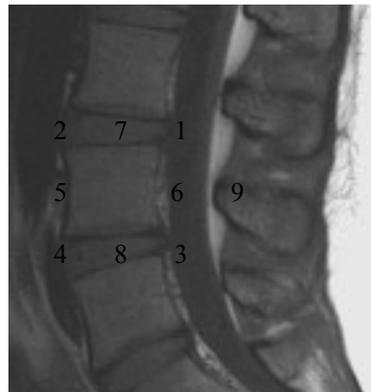


Abb. 9: Festlegung der Messpunkte in der median-sagittalen Schicht repräsentativ an LWK 3:

- 1: dorsokranieller Eckpunkt des Corpus vertebrae
- 2: ventrokranialer Eckpunkt des Corpus vertebrae
- 3: dorsokaudaler Eckpunkt des Corpus vertebrae
- 4: ventrokaudaler Eckpunkt des Corpus vertebrae
- 5: konstruierter Mittelpunkt der Ventralfläche des Corpus (Hälfte der Strecke 24)
- 6: konstruierter Mittelpunkt der Dorsalfläche des Corpus (Hälfte der Strecke 13)
- 7: konstruierter Mittelpunkt der Deckplatte des Corpus (Hälfte der Strecke 12)
- 8: konstruierter Mittelpunkt der Grundplatte des Corpus (Hälfte der Strecke 34)
- 9: ventrale Grenzfläche des Proc. spinosus

Die Punkte (1–4) sind als Grenzpunkte der Wirbelkörper definiert, wobei die Punkte 1 und 3 die dorsalen, 2 und 4 die ventralen Eckpunkte darstellen. Die Punkte 5 und 6 ergeben sich als Schnittpunkte zwischen den Streckenhalbierenden von 24 und 13 mit der ventralen beziehungsweise dorsalen Grenzfläche des Wirbelkörpers, die Punkte 7 und 8 als Schnittpunkte zwischen den Streckenhalbierenden 12 und 34 mit der Grund- beziehungsweise Deckplatte der Wirbelkörper. Der Punkt 9 stellt den Schnittpunkt einer durch die Punkte 5 und 6 verlaufenden Gerade mit der Ventralfläche des Proc. spinosus dar.

Bestimmung der Wirbelkörperhöhe

An den Wirbelkörper (BWK12, LWK1 bis LWK5) wurden, sofern dargestellt, die anteriore Höhe, aHWk (entspricht der Strecke 24 in Abb.9), die zentrale Höhe, zHWk (entspricht der Strecke 78 in Abb. 9) sowie die posteriore Höhe, pHWk (entspricht der Strecke 13 in Abb. 9) entsprechend der Abbildung 10 gemessen.



Abb. 10: Vermessung der anterioren (rot), zentralen (grün) und posterioren (blau) Wirbelkörperhöhe repräsentativ an LWK 3

Bestimmung des sagittalen Wirbelkörperdurchmessers

An den Wirbelkörper (BWK12 bis LWK5) wurden der sagittale Wirbelkörperdurchmesser, apWk (entspricht der Strecke 56 in Abb. 9) entsprechend der Abb. 11 vermessen.



Abb. 11: Vermessung der sagittalen Wirbelkörperdurchmesser repräsentativ an LWK 3

Bestimmung der Bandscheibenhöhe

Bei den Bandscheiben (BWK12/LWK1 bis LWK5/SWK1) wurde analog verfahren. Bestimmt wurden die anteriore Höhe, aHBs (entspricht der Strecke 42 in Abb. 9), die zentrale Höhe, zHBs (entspricht der Strecke 87 in Abb. 9), die posteriore Höhe, pHBs (entspricht der Strecke 31 in Abb. 9).



Abb. 12: Vermessung der anterioren (rot), zentralen (grün) und posterioren (blau) Bandscheibenhöhe repräsentativ an LWK 2/LWK 3

Bestimmung des sagittalen Bandscheibendurchmessers

Bei den Bandscheiben (BWK12/LWK1 bis LWK5/SWK1) wurde der sagittale Bandscheibendurchmesser, apBs, entsprechend der Abb. 13 bestimmt.



Abb. 13: Vermessung des sagittalen Bandscheibendurchmessers repräsentativ an LWK2/LWK3

Bestimmung der sagittalen Bandscheibenvorwölbungen

Des Weiteren wurden die anterioren und posterioren Bandscheibenvorwölbungen an den dargestellten Bandscheibenfächern (BWK12/LWK1 bis LWK5/SWK1) vermessen. Hierzu wurden die Eckpunkte zweier benachbarter Wirbelkörper sowohl im anterioren als auch im posterioren Anteil durch eine Tangente verbunden. Infolge konnte die Vorwölbung der Bandscheibe bezogen auf diese Tangente auf halber Bandscheibenhöhe bestimmt werden.

4.3. Datenaufbereitung

Die statistischen Untersuchungen wurden mittels SPSS 11.0 für Windows durchgeführt. Für die beschreibende Statistik wurden für metrische Merkmale das arithmetische Mittel, das Minimum und das Maximum berechnet. Für die Bestimmung der Absolutwerte der Referenzwerte von Wirbelkörpern (anteriore Wirbelkörperhöhe aHWk, zentrale Wirbelkörperhöhe zHWk, posteriore Wirbelkörperhöhe pHWk, sagittaler Wirbelkörperdurchmesser apWk), Bandscheiben (anteriore Bandscheibenhöhe aHBs, zentrale Bandscheibenhöhe zHBs, posteriore Bandscheibenhöhe pHBs, sagittaler Bandscheibendurchmesser apBs) und des Spinalkanals (sagittaler Spinalkanaldurchmesser apSk) erfolgte eine Mittelwertbestimmung einschließlich der Angabe der Standardabweichung sowie die alters- und geschlechtsspezifische Aufgliederung.

Zur differenzierteren Betrachtung der Altersentwicklung der Wirbelkörperhöhen zueinander wurden der sagittaler Wirbelkörperquotient (sWq), sowie der anteriore (aKi) und posteriore (pKi) Konkavitätsindex erstellt.

Der sagittale Wirbelkörperquotient (sWq) beschreibt das Verhältnis zwischen der jeweiligen anterioren und posterioren Höhe der Wirbelkörper (Wk) BWK12 bis LWK5, wobei er sich aus der Division von anteriorer (aHWk) zu posteriorer (pHWk) Wirbelkörperhöhe ergibt.

$$\mathbf{sWq(Wk) = aH(Wk) / pH(Wk)}$$

Der anteriore Konkavitätsindex (aKi), der für die Wirbelkörper (Wk) BWK12 bis LWK5 bestimmt wurde, indem die zentralen (zHWk) durch die anteriore Wirbelkörperhöhe (aHWk) dividiert wurde, stellt ein Maß für die unterschiedliche Entwicklung der zentralen gegenüber der anterioren Wirbelkörperhöhe dar.

Für den posterioren Konkavitätsindex (pKI) galt die gleiche Herangehensweise wie bei dem anterioren, lediglich mit der posterioren Höhe (pH) als Divisor, sodass hier die zentrale Höhe (zH) der Wirbelkörper zur posterioren (pH) ins Verhältnis gesetzt wurde.

$$\mathbf{aKI(Wk) = zH(Wk) / aH(Wk)}$$

$$\mathbf{pKI(Wk) = zH(Wk) / pH(Wk)}$$

Für die anterioren, zentralen, posterioren Höhen, die sagittalen Durchmesser aller Wirbelkörper und Bandscheiben, sowie für den sagittalen Spinalkanaldurchmesser erfolgt im Anhang I eine geschlechtsspezifische, altersabhängige Referenzwertangabe mit Minimum-Maximumangabe sowie Standardabweichung. Die Alterseinteilung der untersuchten Personen erfolgte in Dekaden: von 1. Dekade (Alter = 0 – 9 Jahre) bis 8. Dekade (Alter 70 – 79 Jahre). Das Alter der Personen entspricht dem Alter bei Erstellung der Magnetresonanztomographie. Die Auswertung der Daten erfolgte nach der Korrelationsanalyse von Spearman-Rho. Die Rangkorrelation von Spearman basiert darauf, dass bestimmte Merkmale nur nach einer ordinalen und nicht nach einer metrischen Skala geordnet werden können. Deshalb wird den Ausprägungen eines ordinal skalierten Merkmals eine natürliche Rangzahl zugeordnet. Die Rangskalen werden dabei als metrische Skalen aufgefasst und die Ränge rechnerisch wie Messwerte behandelt.

Unter der Annahme, dass keine Bindungen innerhalb der Rangzahlen vorliegen, also jedes Messergebnis nur einmal vorkommt, lautet in Anwendung auf Rangpaare R_x und R_y die Gleichung, mit der man die Rangkorrelation von Spearman bestimmen kann, wie folgt:

$$r_s = 1 - \frac{6 \cdot \sum_{i=1}^N [R_{xi} - R_{yi}]^2}{N \cdot (N^2 - 1)}$$

N: Anzahl der Ausprägungen des Merkmals

r_s : Rangkorrelationskoeffizient

Die Verfahrensvorschrift für die Berechnung des Rangkorrelationskoeffizienten lautet demnach:

Liegen keine originären Rangreihen für die zu korrelierenden Merkmale X und Y vor, transformiere man die beiden Messwertreihen x_i und y_i in Rangreihen, bilde pro Rangpaar die

Differenzen der Rangwerte, quadriere und summiere sie und setze das Ergebnis in obige Gleichung ein.

Wird der Test ohne Rechenprogramme gerechnet, so ist in der entsprechenden Tabelle der kritische Wert für r_s nachzuschlagen und mit dem berechneten Wert zu vergleichen. Ist der berechnete Wert gleich oder größer als der vorher definierte kritische Wert, so kann man davon ausgehen, dass im Sinne der Statistik die Abweichung signifikant ist.

Wird der Test vom Programm SPSS gerechnet, erhält man 2 Werte: den Signifikanzwert und den Wert der Stärke des Zusammenhangs. Wenn der Wert für Signifikanz unter 0,05 liegt, so ist der Wert für die Stärke des Zusammenhangs als statistisch bedeutsam anzusehen.

Möchte man gleichzeitig den Einfluss zweier Faktoren auf ein bestimmtes Merkmal untersuchen, bietet sich das Verfahren der Kreuztabelle an. Dabei werden die beobachteten Werte mit den erwarteten Werten, also den Werten, die auftreten müssten, wenn die eine Variable die andere nicht beeinflussen würde, verglichen.

Je mehr die beobachteten und die erwarteten Werte differieren, desto wahrscheinlicher ist ein signifikanter Zusammenhang der Variablen.

Die erwarteten Werte ergeben sich aus dem n_{ten} Teil des Produktes aus Spaltensumme und Zeilensumme.

Zur Entscheidung über die Signifikanz wird der χ^2 –Test zur Anwendung kommen. Wird dabei ein Signifikanzwert angegeben, der unter 0,05 liegt, ist der Zusammenhang signifikant (bei SPSS-Berechnung).

Bei der Berechnung ohne Programmhilfe wird anhand der Differenz der beobachteten und erwarteten Werte ein Wert berechnet, der mit einem (aus der entsprechenden Tabelle zu entnehmenden) kritischen Wert zu vergleichen ist.

Der Wert, der das Maß des Zusammenhangs angibt, ist Phi. Er hat einen Wertebereich zwischen 0 und 1. Je größer Phi, desto stärker ist der Zusammenhang. Da der Wertebereich von Phi nicht negativ ist, kann aus dessen Wert die Richtung des Zusammenhangs nicht abgelesen werden, d.h. ob ein positiver oder negativer Zusammenhang besteht. Jedoch besteht die Möglichkeit diese Richtung abzuschätzen anhand der beobachteten und erwarteten Werte.

5. Ergebnisse

5.1. Darstellung morphometrischer Referenzwerte für die LWS

In der Referenzgruppe, die all die Personen vereint, die keine morphologisch quantifizierbaren Degenerationen an Wirbelkörpern und Bandscheiben im MRT aufwiesen, wurden die morphometrisch erfassten Werte der Wirbelkörper und Bandscheiben geschlechtsspezifisch hinsichtlich der Altersentwicklung untersucht.

5.1.1. Wirbelkörper

5.1.1.1. Wirbelkörperhöhen

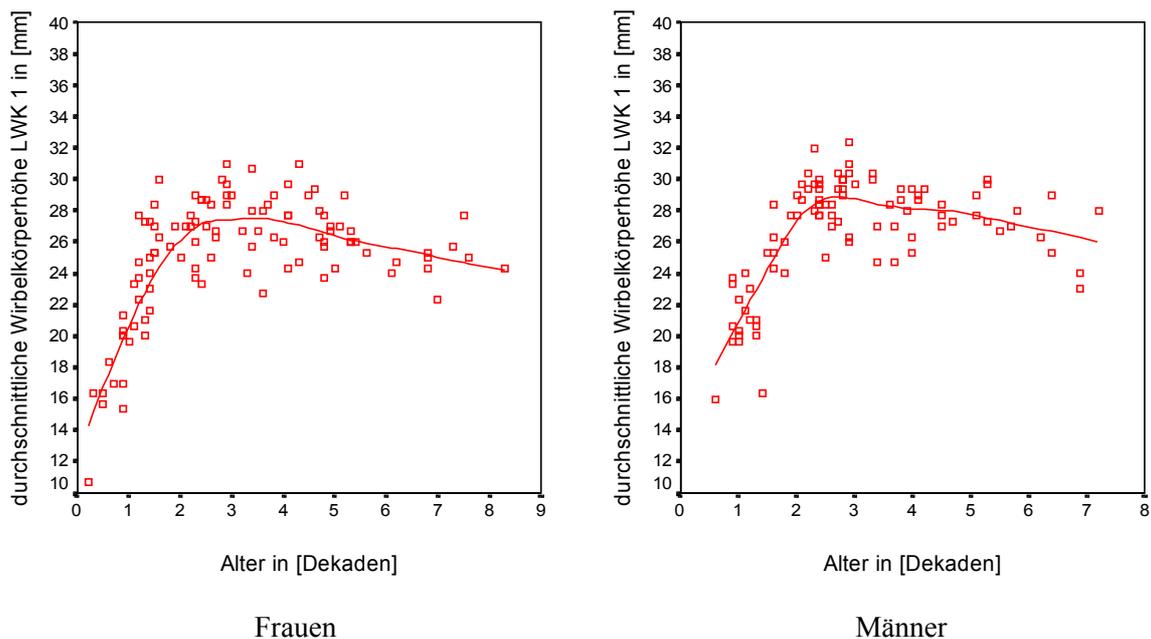


Abb. 15: Altersentwicklung der durchschnittlichen Wirbelkörperhöhen an LWK 1 bei Frauen (links) und Männern (rechts) repräsentativ für die gesamte LWS

Grundsätzlich zeigen die Graphen der durchschnittlichen Wirbelkörperhöhen bezüglich des Alters sowohl bei Frauen als auch bei Männern einen ähnlichen Verlauf.

Zunächst steigen sie an, bis sie im Bereich der 3. Dekade (Alter = 20 – 29 Jahre) ein Maximum erreichen. Ab der 3. Dekade zeigt sich ein Absinken der durchschnittlichen Wirbelkörperhöhen.

Nun wurden die anteriore, zentrale und posteriore Wirbelkörperhöhe aufgeschlüsselt betrachtet. Zwischen den anterioren, zentralen und posterioren Wirbelkörperhöhen und dem Alter besteht ein hochsignifikanter Zusammenhang auf dem 1% Fehlerniveau. (siehe Tabellen 2 und 3) Dieser wurde sowohl bei Frauen als auch bei Männern nachgewiesen. Einzig die Korrelationswerte für die zentralen Wirbelkörperhöhen zeigen bei beiden Geschlechtern geringere Werte.

Tab. 2: Korrelationskoeffizienten zwischen den anterioren, zentralen und posterioren Wirbelkörperhöhen und dem Alter (bei Frauen)

	Anteriore WK-höhe	Zentrale WK-höhe	Posteriore WK-höhe
BWK12	r = 0,427 p = 0,000	r = 0,303 p = 0,002	r = 0,469 p = 0,000
LWK1	r = 0,451 p = 0,000	r = 0,264 p = 0,006	r = 0,418 p = 0,000
LWK2	r = 0,530 p = 0,000	r = 0,334 p = 0,000	r = 0,485 p = 0,000
LWK3	r = 0,516 p = 0,000	r = 0,332 p = 0,001	r = 0,442 p = 0,000
LWK4	r = 0,504 p = 0,000	r = 0,278 p = 0,004	r = 0,347 p = 0,000
LWK5	r = 0,492 p = 0,000	r = 0,317 p = 0,001	r = 0,389 p = 0,000

Tab. 3: Korrelationskoeffizienten zwischen den anterioren, zentralen und posterioren Wirbelkörperhöhen und dem Alter (bei Männern)

	Anteriore WK-höhe	Zentrale WK-höhe	Posteriore WK-höhe
BWK12	r = 0,323 p = 0,002	r = 0,336 p = 0,001	r = 0,506 p = 0,000
LWK1	r = 0,339 p = 0,001	r = 0,296 p = 0,003	r = 0,430 p = 0,000
LWK2	r = 0,377 p = 0,000	r = 0,337 p = 0,001	r = 0,516 p = 0,000
LWK3	r = 0,453 p = 0,000	r = 0,282 p = 0,005	r = 0,508 p = 0,000
LWK4	r = 0,406 p = 0,000	r = 0,275 p = 0,007	r = 0,496 p = 0,000
LWK5	r = 0,461 p = 0,000	r = 0,242 p = 0,018	r = 0,356 p = 0,000

Bei der Einzelbetrachtung der aufgeschlüsselten Wirbelkörperhöhen bezüglich des Alters ist zu erkennen, dass deren Entwicklung besonders bis zum Erreichen der 3. Dekade geschlechtsspezifische Unterschiede aufweist.

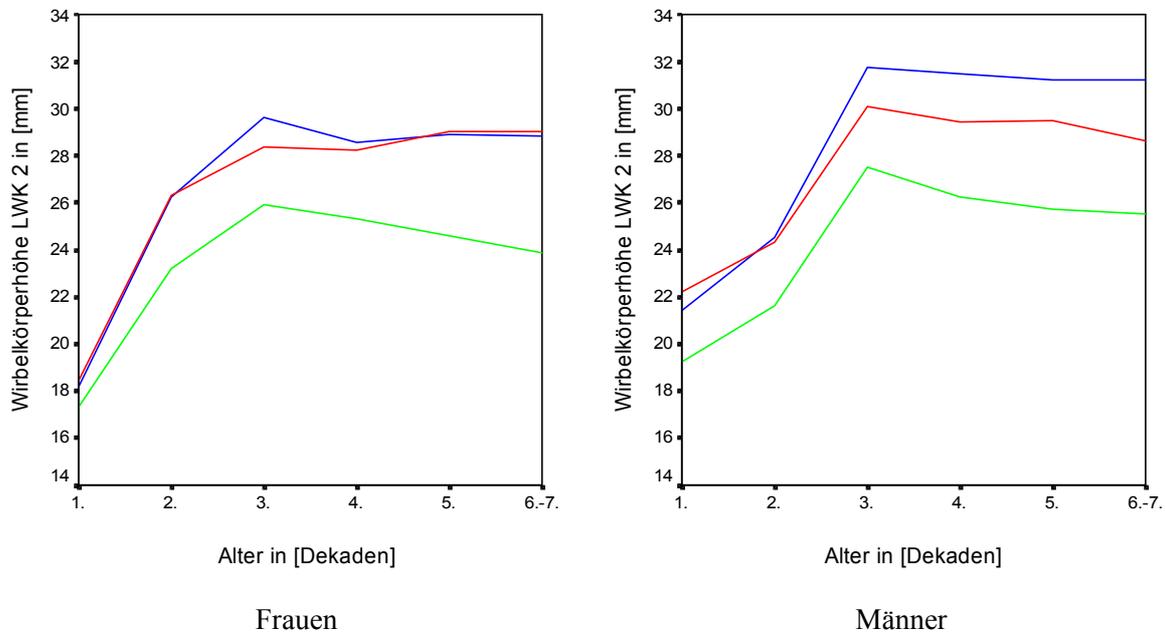


Abb. 16: Altersentwicklung der anterioren (rot), zentralen (grün) und posterioren (blau) Wirbelkörperhöhen von LWK2 bei Frauen (links) und Männern (rechts)

5.1.1.1.a. Altersentwicklung der anterioren, zentralen und posterioren Wirbelkörperhöhe bei Frauen

Bei Frauen zeigt sich ein phasenweiser Anstieg der Wirbelkörperhöhen, wobei sich dieser bis zum Erreichen der 3. Dekade zunächst steil, dann vergleichbar flacher vollzieht. Auffällig ist der annähernd simultane Verlauf der anterioren und posterioren Wirbelkörperhöhe bei BWK12, LWK1 und LWK2 innerhalb der ersten und zweiten Dekade, welcher ab LWK3 bei den kaudal gelegenen Wirbelkörpern der LWS nicht mehr nachweisbar ist. Der weitere Verlauf der anterioren Höhe zeigt entweder ein leichtes Absinken, wobei dieses durch ein nochmaliges kurzzeitiges Ansteigen im Bereich der 5. Dekade bei BWK12, LWK1, LWK3, LWK4 unterbrochen wird oder einen nach anfänglichem Absinken leicht ansteigenden Graph ab der 4. Dekade bei LWK2 und LWK5.

Bei Frauen erreicht die anteriore Höhe innerhalb der 5. Dekade ein Maximum. Infolge zeigt sich entweder eine Abnahme derselben bei BWK12, LWK1, LWK5, ein gleichbleibender Verlauf bei LWK2, LWK4 oder eine weitere Zunahme bei LWK3. Allerdings verändern sich die anteriore und posteriore Wirbelkörperhöhe nach der 3. Dekade nicht in dem Maße, wie die zentrale Wirbelkörperhöhe. Die zentrale Wirbelkörperhöhe stellt die kleinste Höhe bei Frauen dar. Diese fällt infolge des erreichten Maximums ab der 3. Dekade entweder gleichförmig bei LWK1, LWK2 oder nach nochmaligem Anstieg in der 4. Dekade bei BWK12, LWK3, LWK4, LWK5 ab, wobei das vormals erreichte Maximum nicht mehr überschritten wird.

5.1.1.1.b. Altersentwicklung der anterioren, zentralen und posterioren Wirbelkörperhöhe bei Männern

Bis zum Erreichen der 3. Dekade zeigt sich bei Männern ein Anstieg der Einzelgrößen, der im Gegensatz zu den Frauen zunächst flacher, ab der 2. Dekade steiler verläuft. Diese Zweiteilung des Anstiegs wird allerdings bei der anterioren Höhe von LWK4 und LWK5 von einem gleichmäßigen Anstieg abgelöst. Innerhalb der ersten zwei Dekaden übersteigt die zunächst kleinere posteriore Höhe der Wirbel BWK12, LWK1, LWK2, LWK3 die anteriore Wirbelkörperhöhe und stellt ab diesem Zeitpunkt die größte Höhe des Corpus der genannten Wirbel dar. Für die Wirbel LWK4 und LWK5 ist in allen Altersgruppen die anteriore gegenüber der posterioren Höhe erhöht. Ab der dritten Dekade, wo die anteriore Höhe der Wirbelkörper BWK12, LWK1, LWK2 ein Maximum erreicht, zeigt sich ein leichtes Absinken dieser Größe. Bei den sich nach kaudal anschließenden Wirbelkörpern der Lendenwirbelsäule ist durchschnittlich eine Zunahme der anterioren Wirbelkörperhöhen zu erkennen, wobei ein zwischenzeitliches leichtes Absinken in der 4. Dekade bei LWK3 und LWK4, und in der 5. Dekade bei LWK5 zu verzeichnen ist. Bei den posterioren Wirbelkörperhöhen der Corpora vertebrae, die bei Männern in der 3. Dekade ein Maximum erreichen, zeigt sich eine Abnahme dieser Größe, welche sich linear bei LWK2 beziehungsweise phasenweise bei den übrigen Wirbelkörpern vollzieht. Die zentrale Wirbelkörperhöhe ist auch bei Männern stets die kleinste Höhe, die prinzipiell einen ähnlichen Verlauf bezüglich der Altersentwicklung wie die posteriore Höhe zeigt. Sie erreicht ebenfalls innerhalb der 3. Dekade ein Maximum und zeigt infolge eine starke Abnahme.

Lediglich bei LWK5 wird die zentrale Höhe von der anterioren bis zum Erreichen der 3. Dekade überragt. Es fällt auch bei Männern auf, dass die zentrale Wirbelkörperhöhe nicht nur die kleinste Höhe des Wirbelkörpers ist, sondern altersbezogen in einem stärkeren Maß fällt als die anteriore und die posteriore Höhe.

Im folgenden ist die Altersentwicklung der Wirbelkörpereinzelhöhen graphisch dargestellt. Die Referenzwerte für die anterioren, zentralen und posterioren Höhen der lumbalen Wirbelkörper sind auf der beiliegenden Referenzdaten-CD in Abschnitt 1 alters- und geschlechtsbezogen aufgeführt.

5.1.1.1.c. Graphische Gegenüberstellung der Altersentwicklung der anterioren, zentralen und posterioren Höhen der Wirbelkörper BWK 12 bis LWK 5 bei Frauen und Männern

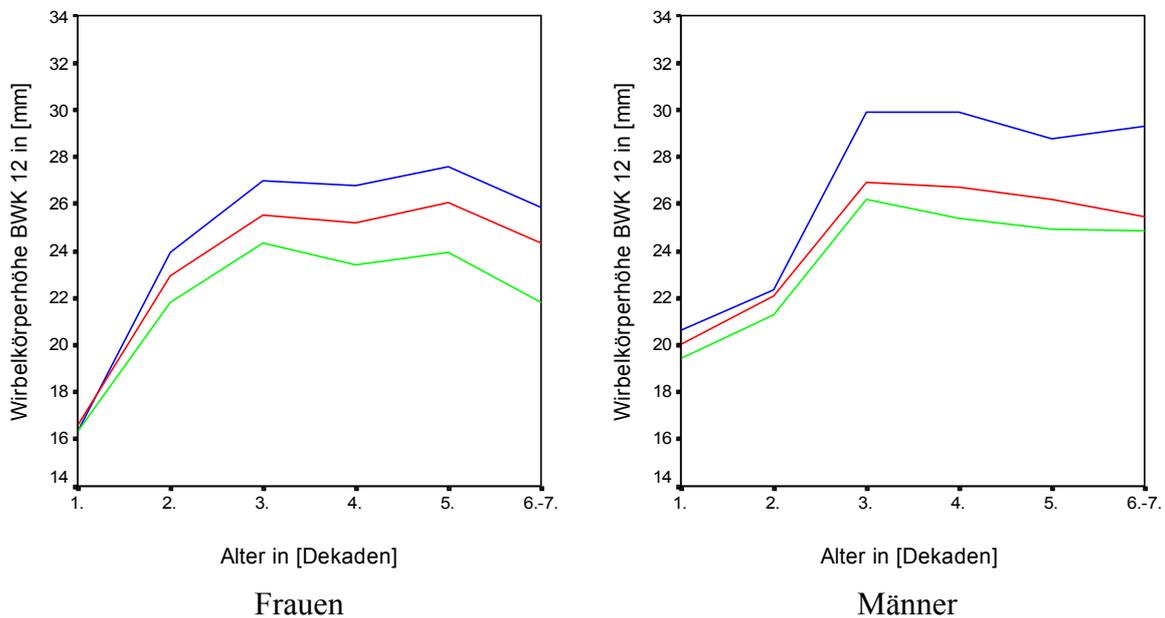


Abb. 17: Altersentwicklung der anterioren (rot), zentralen (grün) und posterioren (blau) Wirbelkörperhöhen von BWK12 bei Frauen (links) und Männern (rechts)

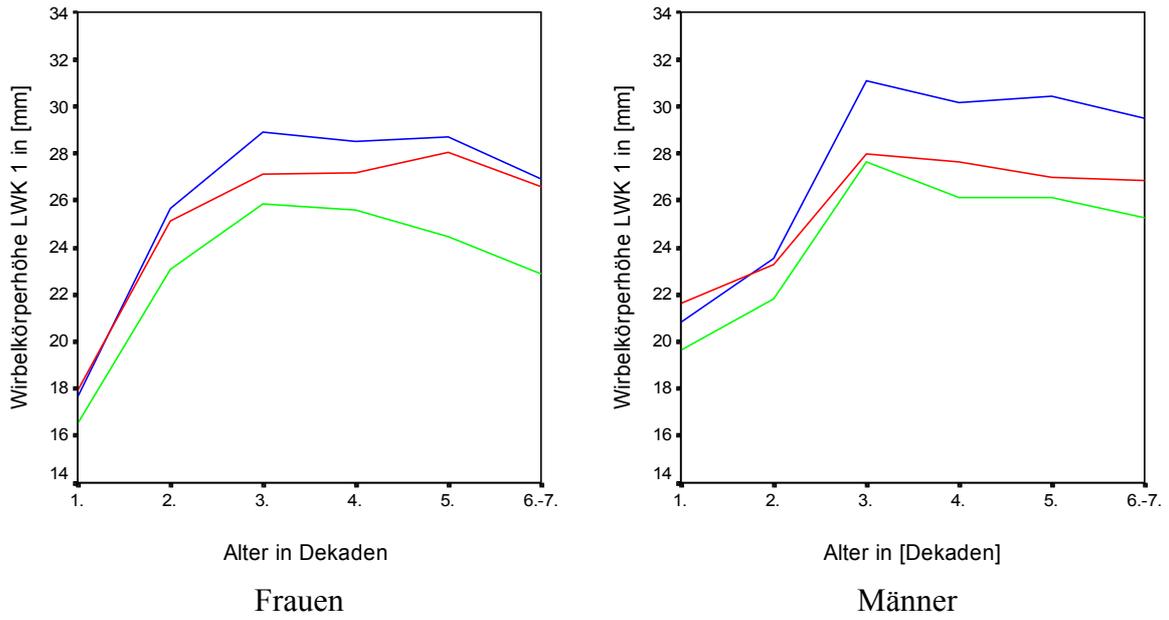


Abb. 18: Altersentwicklung der anterioren (rot), zentralen (grün) und posterioren (blau) Wirbelkörperhöhen von LWK1 bei Frauen (links) und Männern (rechts)

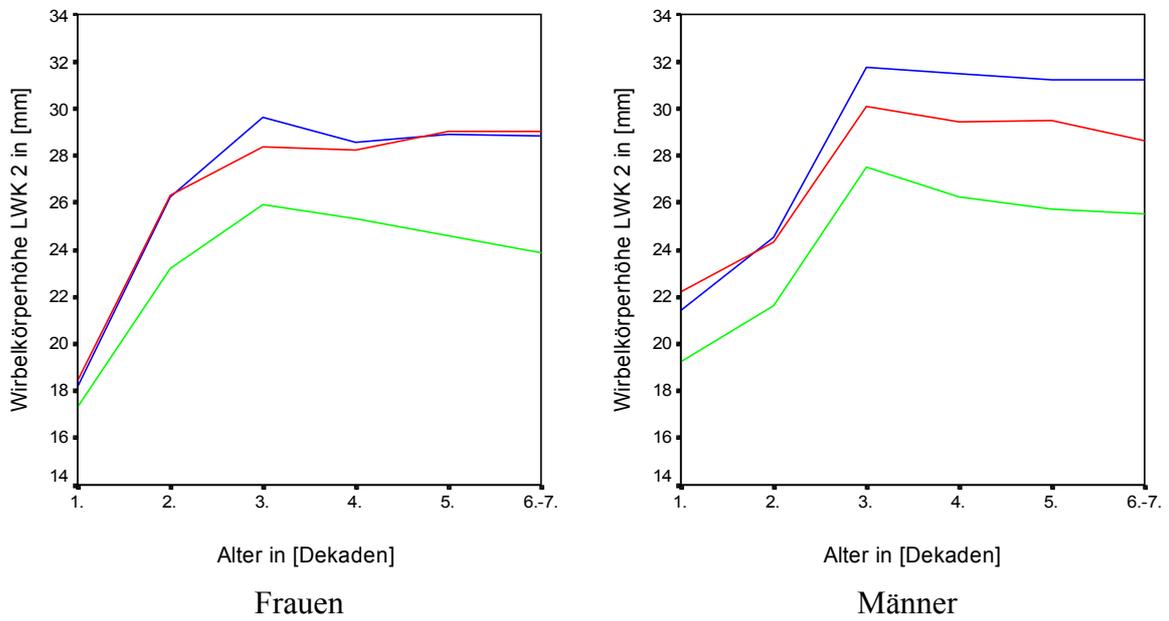


Abb. 19: Altersentwicklung der anterioren (rot), zentralen (grün) und posterioren (blau) Wirbelkörperhöhen von LWK 2 bei Frauen (links) und Männern (rechts)

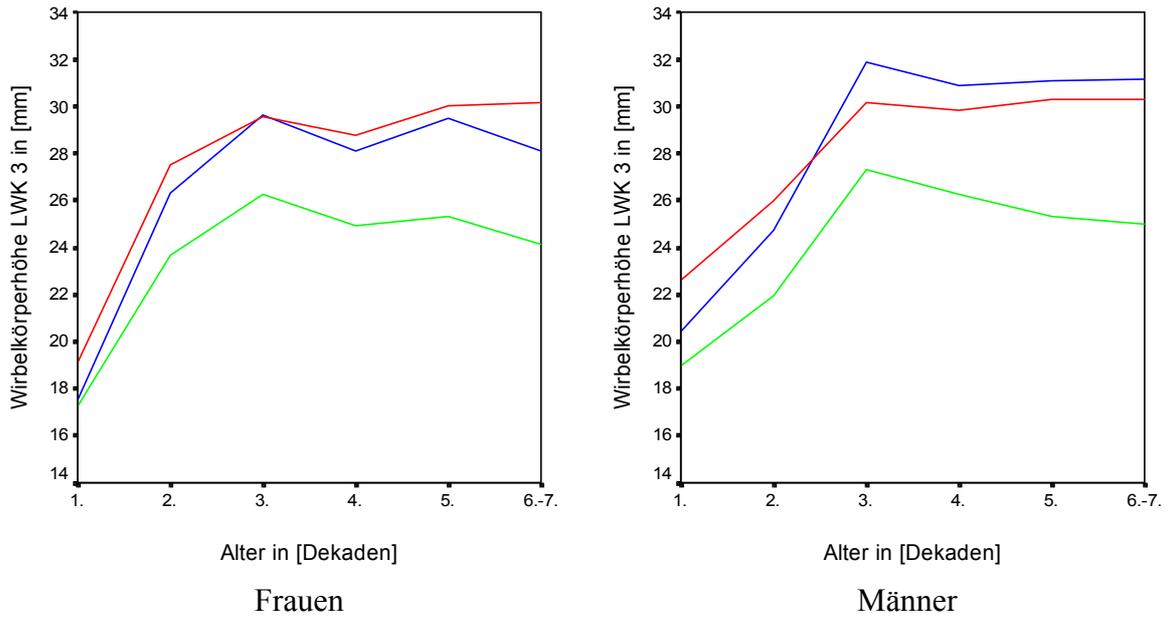


Abb. 20: Altersentwicklung der anterioren (rot), zentralen (grün) und posterioren (blau) Wirbelkörperhöhen von LWK3 bei Frauen (links) und Männern (rechts)

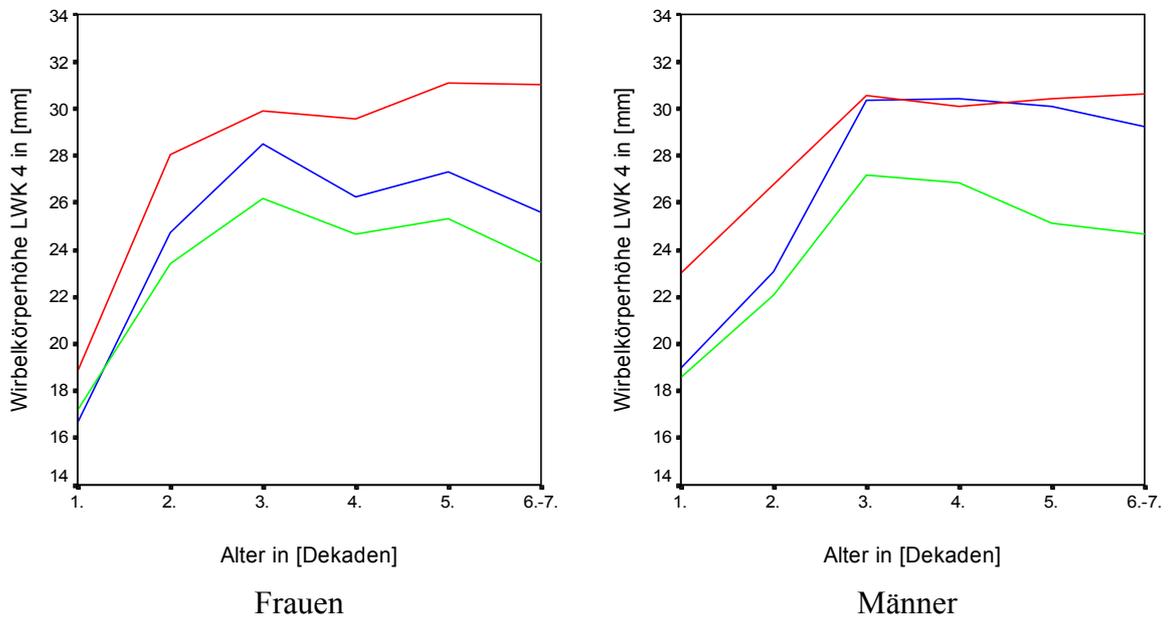


Abb. 21: Altersentwicklung der anterioren (rot), zentralen (grün) und posterioren (blau) Wirbelkörperhöhen von LWK4 bei Frauen (links) und Männern (rechts)

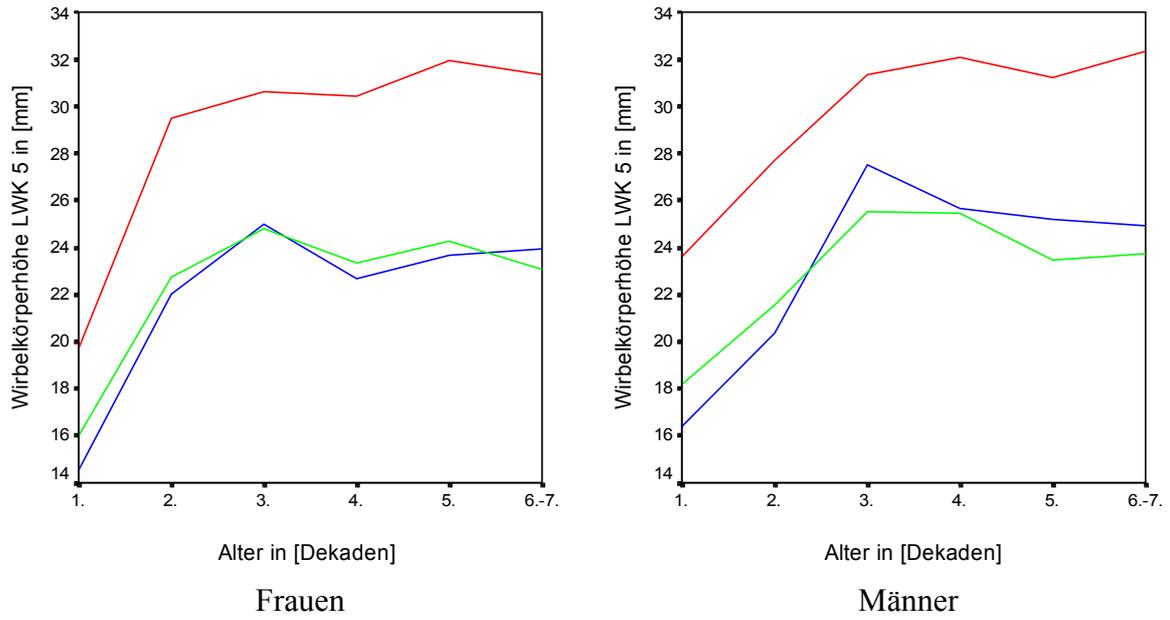


Abb. 22: Altersentwicklung der anterioren (rot), zentralen (grün) und posterioren (blau) Wirbelkörperhöhen von LWK 5 bei Frauen (links) und Männern (rechts)

5.1.1.2. Indizes

5.1.1.2.a. Sagittaler Wirbelkörperquotient (sWq)

Der sagittale Wirbelkörperquotient (sWq) beschreibt das Verhältnis zwischen der jeweiligen anterioren (aH) und posterioren Höhe (pH) der Wirbelkörper (Wk) BWK12 bis LWK5, wobei er sich aus der Division von anteriorer (aHWk) zu posteriorer wirbelkörperhöhe (pHWk) ergibt.

$$\mathbf{sWq(Wk) = aHWk / pHWk}$$

Festzustellen ist eine annähernde Gleichheit der anterioren und posterioren Höhe der Wirbelkörper der oberen und mittleren Lendenwirbelsäule. Dieses Verhältnis verschiebt sich bei LWK5 zugunsten der anterioren Höhe.

Tab. 4: durchschnittliche sagittale Wirbelkörperquotienten bei Frauen

sagittaler Wirbelkörperquotient $sWq(Wk) = aHWk / pHWk$					
	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
BWK12	100	0,79	1,22	0,9580	0,08101
LWK1	105	0,82	1,21	0,9764	0,07456
LWK2	105	0,79	1,27	0,9959	0,07327
LWK3	105	0,88	1,44	1,0389	0,08013
LWK4	105	0,89	1,48	1,1319	0,11706
LWK5	105	1,04	2,31	1,3324	0,19573

Tab. 5: durchschnittliche sagittale Wirbelkörperquotienten bei Männern

sagittaler Wirbelkörperquotient $sWq(Wk) = aHWk / pHWk$					
	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
BWK12	92	0,75	1,19	0,9197	0,07642
LWK1	96	0,69	1,27	0,9310	0,09247
LWK2	96	0,72	1,19	0,9578	0,07983
LWK3	96	0,79	1,19	0,9867	0,08065
LWK4	96	0,86	1,36	1,0567	0,10765
LWK5	96	0,93	1,65	1,2555	0,16182

5.1.1.2.b. Anteriorer Konkavitätsindex (aKi)

Der anteriore Konkavitätsindex (aKi), der für die Wirbelkörper (Wk) BWK12 bis LWK5 bestimmt wurde, indem die zentrale (zHWk) durch die anteriore Wirbelkörperhöhe (aHWk) dividiert wurde, stellt ein Maß für die unterschiedliche Entwicklung der zentralen gegenüber der anterioren Wirbelkörperhöhe dar.

$$aKi (Wk) = zHWk / aHWk$$

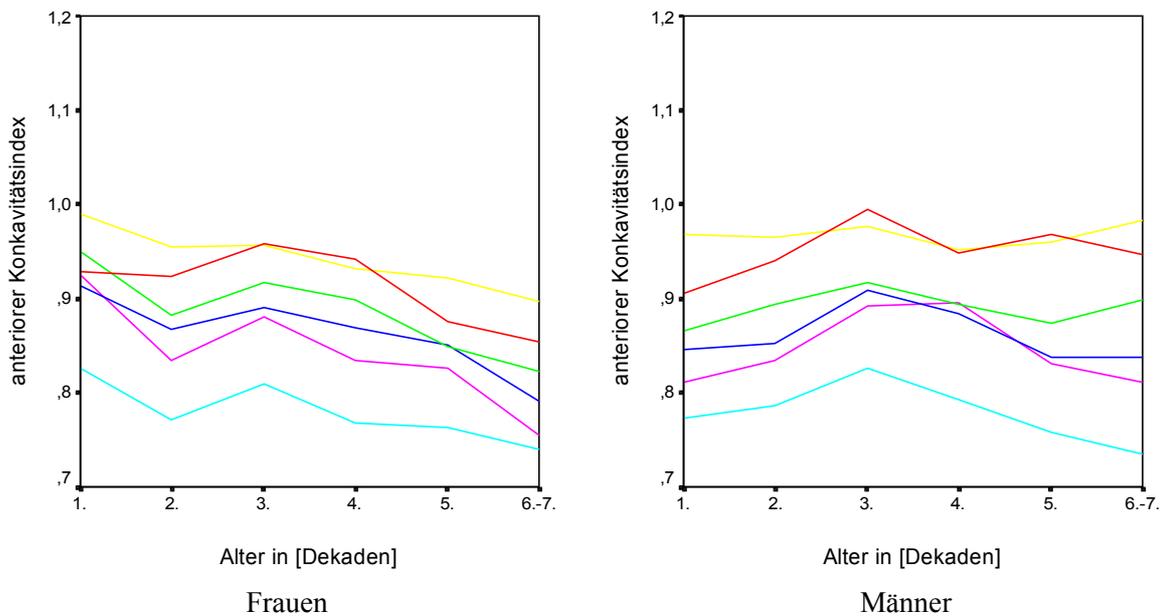


Abb. 23: Altersentwicklung des anterioren Konkavitätsindex bei Frauen und Männern

BWK12 ---, LWK1 ---, LWK2 ---, LWK3 ---, LWK4 ---, LWK5 ---

Die Darstellungen der Altersentwicklung des anterioren Konkavitätsindex zeigen geschlechtsspezifisch unterschiedliche Verläufe. Während bei den Frauen einem primären Absinken bis zur 2. Dekade ein Ansteigen bis zur 3. Dekade folgt, ist diese Entwicklungsetappe bei den Männern durch einen kontinuierlichen Anstieg geprägt.

Folgende Gemeinsamkeiten ergeben sich bei beiden Geschlechtern:

1. Der anteriore Konkavitätsindex nimmt innerhalb aller Dekaden Werte < 1 an.
2. Ab der 3. Dekade ist bei beiden Geschlechtern eine Abnahme des anterioren Konkavitätsindex zu verzeichnen, die bei Frauen allerdings stärker ausgeprägt ist.

5.1.1.2.c. Posteriorer Konkavitätsindex (pKi)

Für den posterioren Konkavitätsindex (pKi) galt die gleiche Herangehensweise wie bei dem anterioren, lediglich mit der posterioren Höhe (pHWk) als Divisor, sodass hier die zentrale Höhe (zHWk) der Wirbelkörper zur posterioren (pHWk) ins Verhältnis gesetzt wurde.

$$pKi (Wk) = zHWk / pHWk$$

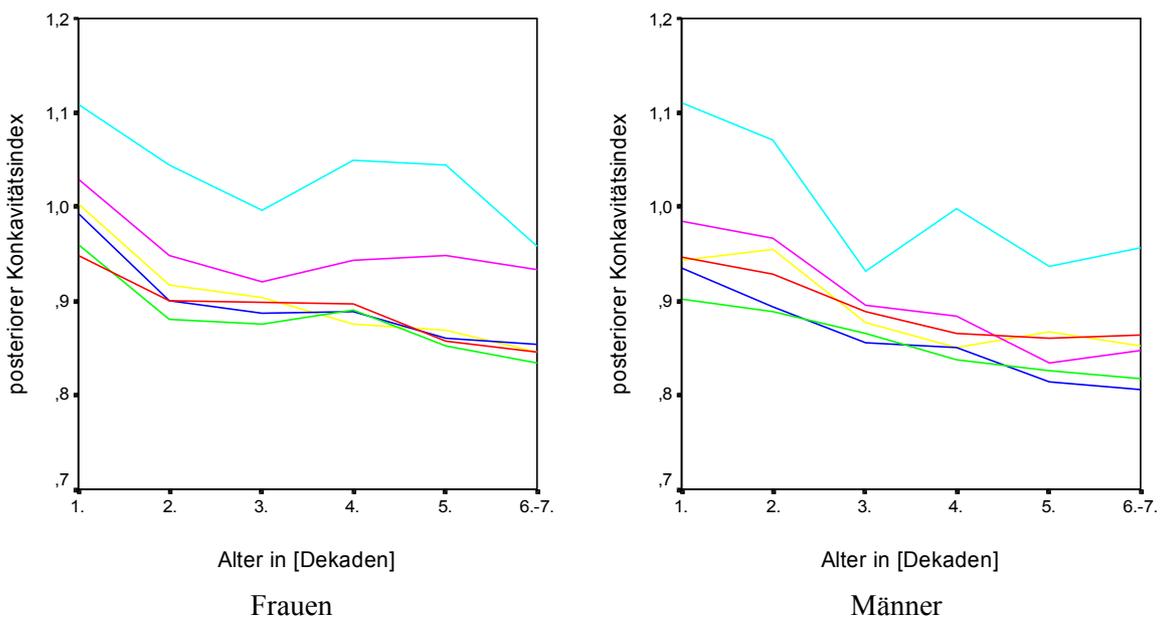


Abb. 24: Altersentwicklung des posterioren Konkavitätsindex bei Frauen und Männern

BWK12 - - - - , LWK1 - - - - , LWK2 - - - - , LWK3 - - - - , LWK4 - - - - , LWK5 - - - -

Grundsätzlich zeigt der posteriore Konkavitätsindex wie der anteriore mit zunehmendem Alter eine Abnahme bei beiden Geschlechtern, die sich allerdings in einem geringeren Maße vollzieht. Lediglich LWK4, LWK5 bei Frauen und LWK5 bei Männern zeigen zwischen der 3. und 4. Dekade eine Zunahme, der eine Abnahme folgt.

5.1.1.3. Sagittaler Wirbelkörperdurchmesser = Anteroposteriore Wirbelkörperdistanz

Die Graphen zeigen, dass die Entwicklung des sagittalen Wirbelkörperdurchmessers bezüglich des Alters geschlechtsspezifisch differiert. Während sich bei Frauen die größte Zunahme dieser Größe zwischen der ersten und zweiten Dekade vollzieht, zeigt sich bei Männern ein wesentlichen kontinuierlicherer Entwicklungsverlauf.

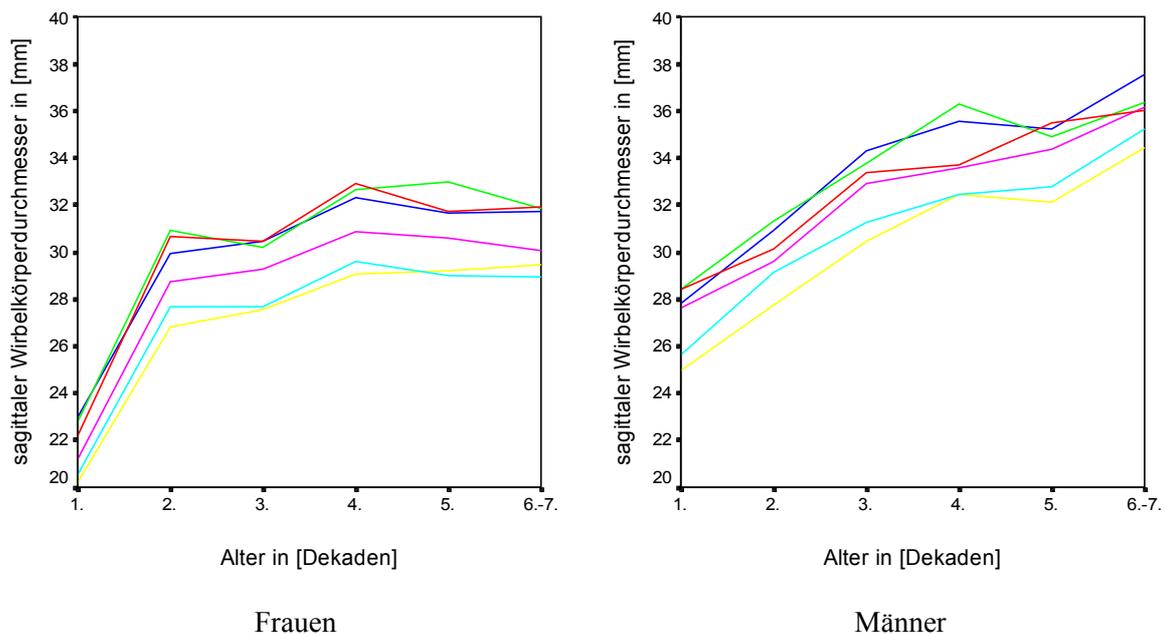


Abb. 25: Altersentwicklung des sagittalen Wirbelkörperdurchmessers bei Frauen und Männern

BWK12 ----, LWK1 ----, LWK2 ----, LWK3 ----, LWK4 ----, LWK5 ----

Zwischen dem sagittalen Wirbelkörperdurchmesser der Wirbelkörper BWK 12 bis LWK 5 und dem Alter bestehen ausnahmslos hochsignifikante Zusammenhänge auf dem 1%-Fehlerniveau, wobei diese bei den Männern geringfügig stärker ausgeprägt sind als bei den Frauen (siehe Tabelle 6).

Die anterior-posteriore Ausdehnung der Wirbelkörper nimmt mit steigendem Alter sowohl bei Männern als auch bei Frauen zu.

Bei Frauen ergibt sich eine durchschnittliche durch lineare Regression ermittelte Zunahme von $m = 0,10$ mit steigendem Alter, bei Männern von $m = 0,14$.

Tab.6: Korrelationskoeffizienten zwischen dem sagittalen Wirbelkörperdurchmesser der Wirbelkörper BWK12 bis LWK5 und dem Alter bei Frauen und Männern

	Bei Frauen	Bei Männern
BWK12	$r = 0,529$ $p = 0,000$	$r = 0,654$ $p = 0,000$
LWK1	$r = 0,435$ $p = 0,000$	$r = 0,633$ $p = 0,000$
LWK2	$r = 0,446$ $p = 0,000$	$r = 0,583$ $p = 0,000$
LWK3	$r = 0,448$ $p = 0,000$	$r = 0,590$ $p = 0,000$
LWK4	$r = 0,444$ $p = 0,000$	$r = 0,508$ $p = 0,000$
LWK5	$r = 0,444$ $p = 0,000$	$r = 0,539$ $p = 0,000$

Die Referenzwerte für der sagittalen Wirbelkörperdurchmesser sind auf der beiliegenden Referenzdaten-CD in Abschnitt 2 alters- und geschlechtsbezogen aufgeführt.

5.1.2. Bandscheiben

5.1.2.1. Bandscheibenhöhen

Die Entwicklung der Bandscheibenhöhen vollzieht sich in den Bandscheibenetagen geschlechtsspezifisch different.

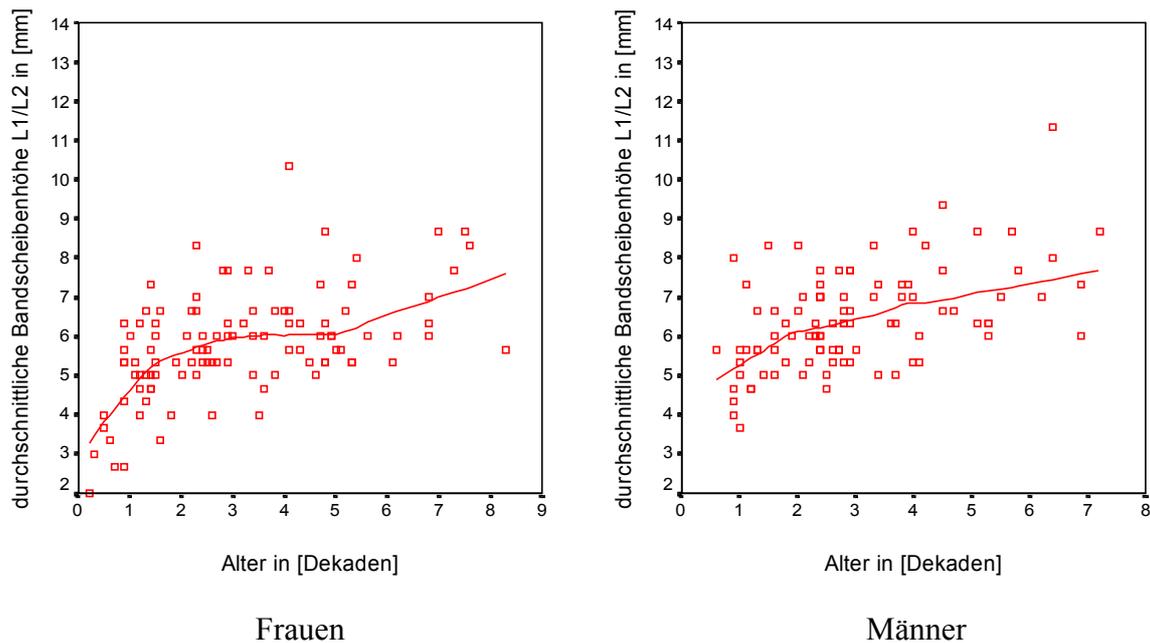


Abb.26: Altersentwicklung der durchschnittlichen Bandscheibenhöhen im Funktionssegment LWK1/LWK2 bei Frauen (links) und Männern (rechts) repräsentativ für die Entwicklung dieser Größe in der oberen Lendenwirbelsäule

Bei den Bandscheiben der oberen Lendenwirbelsäule (BWK/LWK1, LWK1/LWK2) zeigt sich bei Frauen ein steiler Anstieg der durchschnittlichen Bandscheibenhöhen bis zur 2. Dekade, zwischen der 3. und 5. Dekade folgt eine Plateauphase, an welche sich ein weiteres Ansteigen anschließt. Bei Männern zeigt die durchschnittliche Bandscheibenhöhe der oberen Lendenwirbelsäule einen kontinuierlichen Anstieg mit zunehmendem Alter.

Bei LWK2/LWK3 ist bei beiden Geschlechtern ein eher asymptotischer Verlauf des Graphs zu erkennen, der bis zur 4. Dekade ansteigt und infolge auf dieser Höhe verbleibt. Die Bandscheiben in Höhe LWK3/LWK4 steigen zunächst auch, bis sie im Alter von 40 Jahren ein Maximum erreichen, und fallen infolge leicht ab. Die Bandscheiben der unteren Lendenwirbelsäule (LWK4/LWK5, LWK5/SWK1) zeigen bei Frauen den bei LWK3/LWK4 typischen Verlauf, bei Männern eher einen sigmoiden Verlauf mit dem stärksten Anstieg zwischen dem 20. und 40. Lebensjahr.

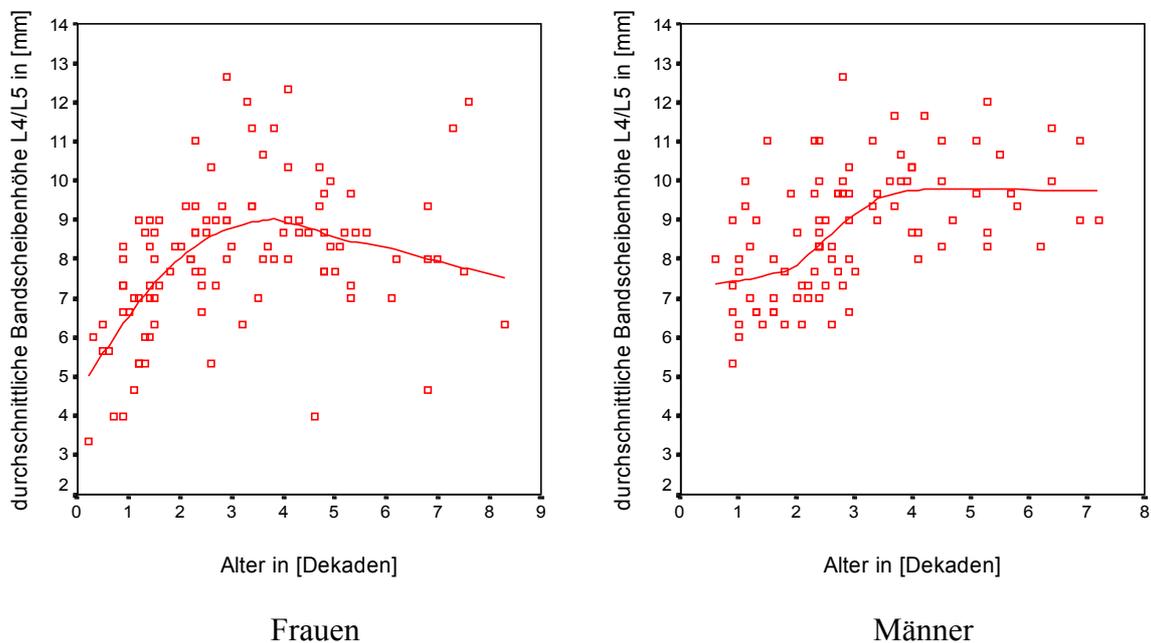


Abb.27: Altersentwicklung der durchschnittlichen Bandscheibenhöhen im Funktionssegment LWK4/LWK5 bei Frauen (links) und Männern (rechts) repräsentativ für die Entwicklung dieser Größe in der unteren Lendenwirbelsäule

Nun wurden die Bandscheibenhöhen in anterior, zentral und posterior aufgeschlüsselt. Bei Frauen besteht zwischen den anterioren und zentralen Bandscheibenhöhen und dem Alter ein hochsignifikanter Zusammenhang auf dem 1%-Fehlerniveau (siehe Tabelle 7). Die Zusammenhänge zwischen der posterioren Bandscheibenhöhe und dem Alter sind in den Bandscheibenetagen BWK12/LWK1, LWK1/LWK2, LWK5/SWK1 signifikant, aber vergleichsweise schwächer. Bei LWK3/LWK4 und LWK4/LWK5 verändern sich diese Werte mit dem Alter nicht statistisch bedeutsam.

Tab. 7: Korrelationskoeffizienten zwischen den morphometrischen Bandscheibenhöhen und dem Alter (bei Frauen)

	Anteriore Bs-höhe	Zentrale Bs-höhe	Posteriore Bs-höhe
BWK12/LWK1	r = 0,366 p = 0,000	r = 0,511 p = 0,000	r = 0,359 p = 0,000
LWK1/LWK2	r = 0,410 p = 0,000	r = 0,546 p = 0,000	r = 0,308 p = 0,000
LWK2/LWK3	r = 0,278 p = 0,000	r = 0,496 p = 0,000	r = 0,284 p = 0,003
LWK3/LWK4	r = 0,291 p = 0,000	r = 0,363 p = 0,000	r = 0,113 p = 0,250
LWK4/LWK5	r = 0,301 p = 0,000	r = 0,358 p = 0,000	r = 0,191 p = 0,051
LWK5/SWK1	r = 0,312 p = 0,000	r = 0,568 p = 0,000	r = 0,261 p = 0,007

Bei Männern besteht ebenfalls zwischen den anterioren und zentralen Bandscheibenhöhen und dem Alter ein signifikanter Zusammenhang auf dem 1%-Fehlerniveau (siehe Tabelle 8). Die Zusammenhänge zwischen der posterioren Bandscheibenhöhe und dem Alter korrelieren lediglich in den Bandscheibenetagen BWK12/LWK1, LWK2/LWK3, sind hier allerdings nur schwach ausgeprägt und auf dem 5%-Fehlerniveau signifikant.

Tab. 8: Korrelationskoeffizienten zwischen den morphometrischen Bandscheibenhöhen und dem Alter (bei Männern)

	Anteriore Bs-höhe	Zentrale Bs-höhe	Posteriore Bs-höhe
BWK12/LWK1	r = 0,459 p = 0,000	r = 0,546 p = 0,000	r = 0,237 p = 0,021
LWK1/LWK2	r = 0,520 p = 0,000	r = 0,429 p = 0,000	r = 0,142 p = 0,168
LWK2/LWK3	r = 0,508 p = 0,000	r = 0,479 p = 0,000	r = 0,216 p = 0,034
LWK3/LWK4	r = 0,348 p = 0,000	r = 0,538 p = 0,000	r = 0,115 p = 0,266
LWK4/LWK5	r = 0,379 p = 0,000	r = 0,567 p = 0,000	r = 0,185 p = 0,071
LWK5/SWK1	r = 0,399 p = 0,000	r = 0,442 p = 0,001	r = 0,106 p = 0,303

Die Darstellung der durchschnittlichen Höhen der Bandscheiben beleuchtet die individuelle Entwicklung der Einzelgrößen im anterioren, zentralen, posterioren Bereich der Bandscheibe nur unzureichend, sodass diese genauer betrachtet wurden.

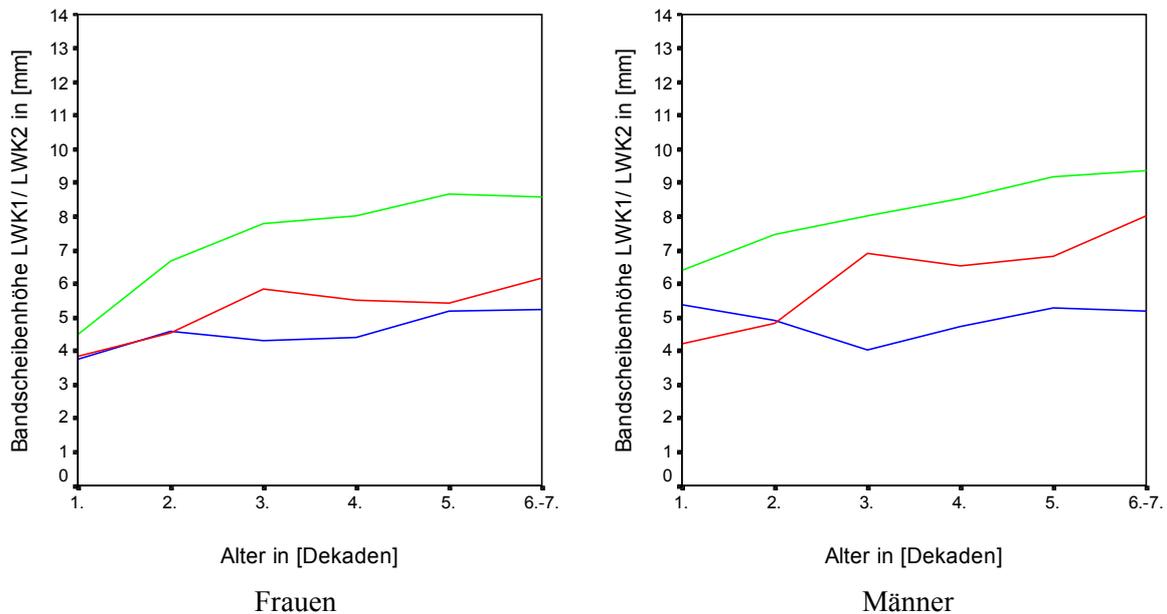


Abb. 28: Altersentwicklung der anterioren (rot), zentralen (grün) und posterioren (blau) Bandscheibenhöhen im Bewegungssegment LWK1/LWK2 bei Frauen (links) und Männern (rechts)

5.1.2.1.a. Altersentwicklung der anterioren, zentralen und posterioren Bandscheibenhöhe bei Frauen

Die anterioren Bandscheibenhöhen zeigen bei Frauen eine Zunahme, die bis zur 2. Dekade vergleichsweise gering ansteigt, zwischen der 2. und 3. den stärksten Zuwachs verzeichnet und in der 4. (bei LWK1/LWK2, LWK2/LWK3, LWK3/LWK4, LWK4/LWK5) beziehungsweise in der 5. Dekade (bei BWK12/LWK1, LWK5/SWK1) einem Maximum entgegenstrebt und infolge abnimmt. Ausnahme bildet für die abschließende Abnahme die Bandscheibe LWK1/LWK2, die ab der 5. Dekade weiter zunimmt. Während die anteriore Höhe in den Bandscheiben der oberen Lendenwirbelsäule bei Frauen einen ähnlichen Verlauf wie die posteriore Höhe zeigt, nähert sich ihr Verlauf mit absteigender Bandscheibenetage immer mehr der zentralen Bandscheibenhöhe an und übersteigt diese bei LWK5/SWK1. Die

zentrale Höhe nimmt die größten Werte verglichen mit den anderen Bandscheibenhöhen an, zeigt die größte Zunahme bis zum Erreichen der 2. Dekade, erreicht in der 5. Dekade ein Maximum und fällt infolge ab. Das Abfallen der zentralen Bandscheibenhöhe infolge der 5. Dekade konnte nicht bei der Bandscheibe LWK5/SWK1 festgestellt werden. Diese steigt weiter an. Die geringsten Werte für die Bandscheibenhöhen wurden für die posterioren Höhen ermittelt. Im Vergleich zu den anterioren und zentralen Bandscheibenhöhen sind die Veränderungen der posterioren eher als gering einzustufen. In den Bandscheibenetagen BWK12/LWK1, LWK2/LWK3 zeigt sich ein eher linearer Verlauf. Bei den übrigen Bandscheiben der Lendenwirbelsäule vollziehen sich die eher geringen Zunahmen zwischen der 3. und 4. Dekade.

5.1.2.1.b. Altersentwicklung der anterioren, zentralen und posterioren Bandscheibenhöhe bei Männern

Bei den Männern zeichnet sich für die Entwicklung der anterioren Bandscheibenhöhen der oberen Lendenwirbelsäule (BWK12/LWK1, LWK1/LWK2) ein ähnlicher Verlauf wie bei LWK1/LWK2 bei den Frauen ab und damit die nochmalige Zunahme ab der 5. Dekade. Bis dahin steigen die anterioren Höhen aller lumbalen Bandscheiben zunächst leicht an, der stärkste Zuwachs folgt zwischen der 2. und 3. Dekade, das Maximum wird in der 5. Dekade erreicht, infolge nehmen die Werte bei LWK2/LWK3, LWK3/LWK4, LWK4/LWK5, LWK5/SWK1 ab. Auch bei den Männern stellt die posteriore Bandscheibenhöhe die kleinste dar. Lediglich bei den Bandscheiben BWK12/LWK1, LWK1/LWK2, LWK2/LWK3, LWK3/LWK4 wird diese bis zum Erreichen der 2. Dekade (Alter = 10–19 Jahre) von der anterioren Höhe unterschritten. Bei den posterioren Höhen dieser eben genannten Bandscheiben ist bei Männern ein Abfallen bis zur 3. Dekade (Alter = 20–29 Jahre) zu erkennen, welchem ein Ansteigen folgt (BWK12/LWK1, LWK1/LWK2). Bei den Bandscheiben LWK2/LWK3, LWK3/LWK4, LWK4/LWK5, LWK5/SWK1 zeigt sich ein nochmaliges Absinken in der 5. Dekade. Der stärkste Anstieg ist zwischen der 3. und 4. Dekade zu verzeichnen. Die zentralen Bandscheibenhöhen zeigen wie bei den Frauen die größten Werte gegenüber den übrigen Bandscheibenhöhen (bei BWK12/LWK1, LWK1/LWK2, LWK2/LWK3, LWK3/LWK4). Der Anstieg ist allerdings linearer verlaufend und nicht so stark ausgeprägt wie bei den Frauen. Die Ausnahme bietet hier die Bandscheibe LWK5/SWK1, in der die anteriore Höhe die größte Ausdehnung zeigt.

Im Folgenden ist die Altersentwicklung der Bandscheibeneinzelhöhen graphisch dargestellt. Die Referenzwerte für die anteriore, zentrale und posteriore Höhe der lumbalen Bandscheiben sind auf der beiliegenden Referenzdaten-CD in Abschnitt 3 aufgeführt.

5.1.2.1.c. Graphische Gegenüberstellung der Altersentwicklung der anterioren, zentralen und posterioren Höhen der Bandscheiben BWK12/ LWK1 bis LWK5/ SWK1 bei Frauen und Männern

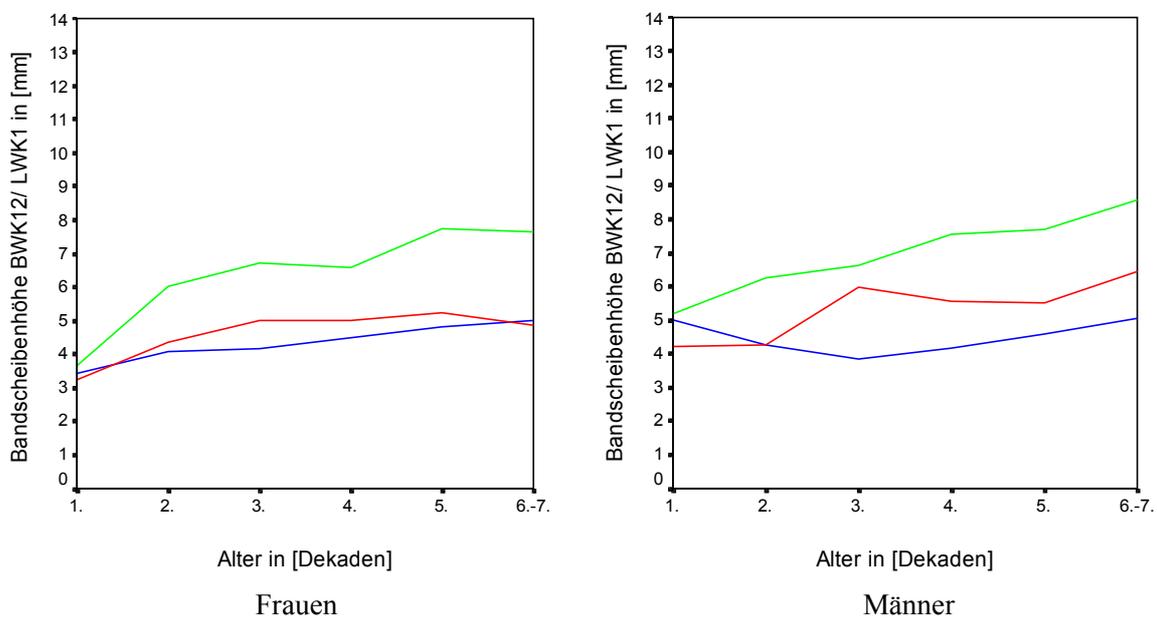


Abb. 29: Altersentwicklung der anterioren (rot), zentralen (grün) und posterioren (blau) Bandscheibenhöhen im Bewegungssegment BWK12/LWK1 bei Frauen (links) und Männern (rechts)

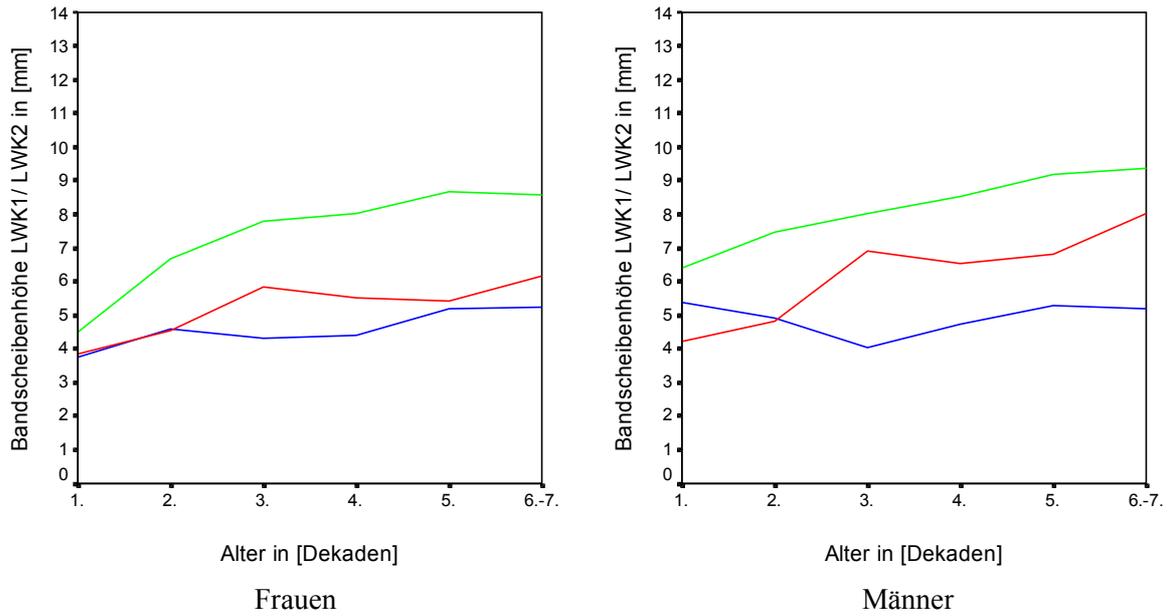


Abb. 30: Altersentwicklung der anterioren (rot), zentralen (grün) und posterioren (blau) Bandscheibenhöhen im Bewegungssegment LWK1/LWK2 bei Frauen (links) und Männern (rechts)

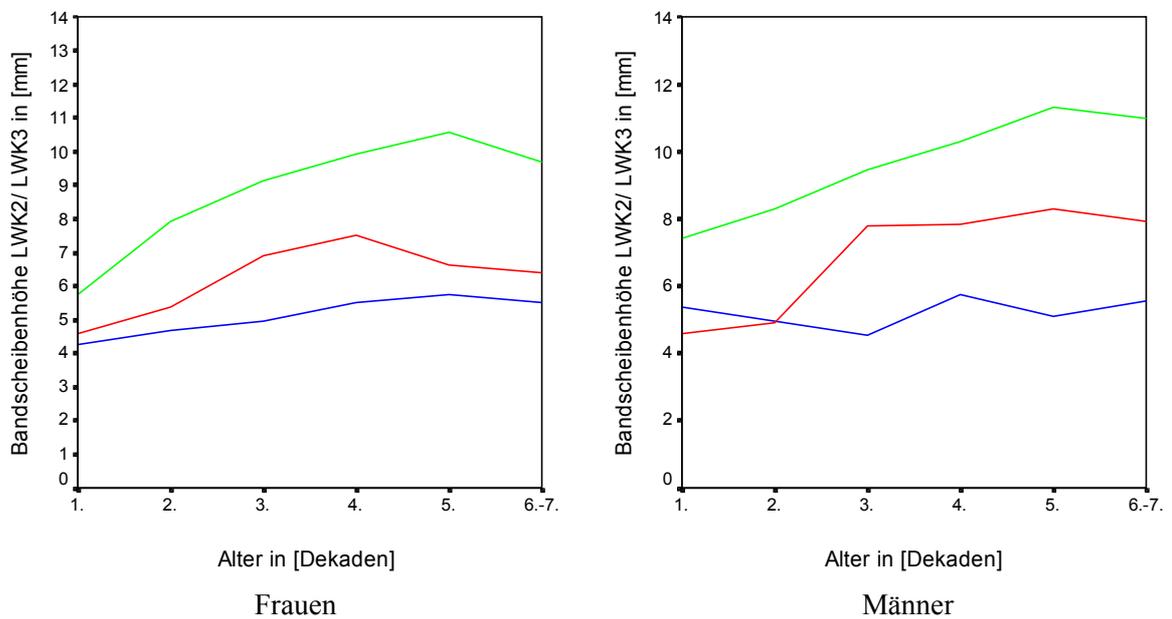


Abb. 31: Altersentwicklung der anterioren (rot), zentralen (grün) und posterioren (blau) Bandscheibenhöhen im Bewegungssegment LWK2/LWK3 bei Frauen (links) und Männern (rechts)

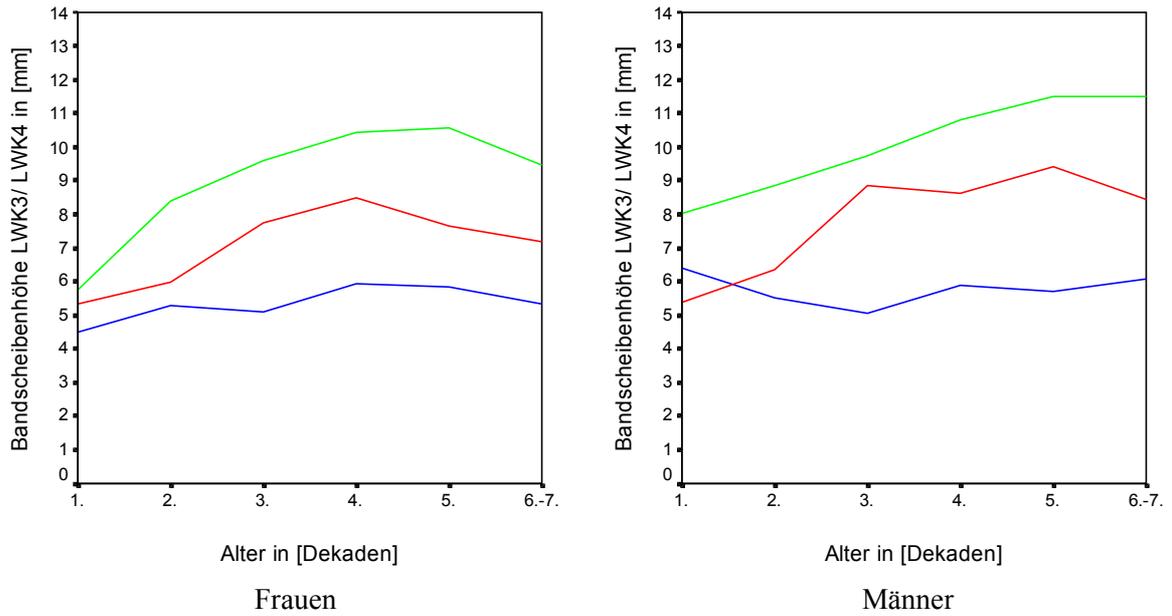


Abb. 32: Altersentwicklung der anterioren (rot), zentralen (grün) und posterioren (blau) Bandscheibenhöhen im Bewegungssegment LWK3/LWK4 bei Frauen (links) und Männern (rechts)

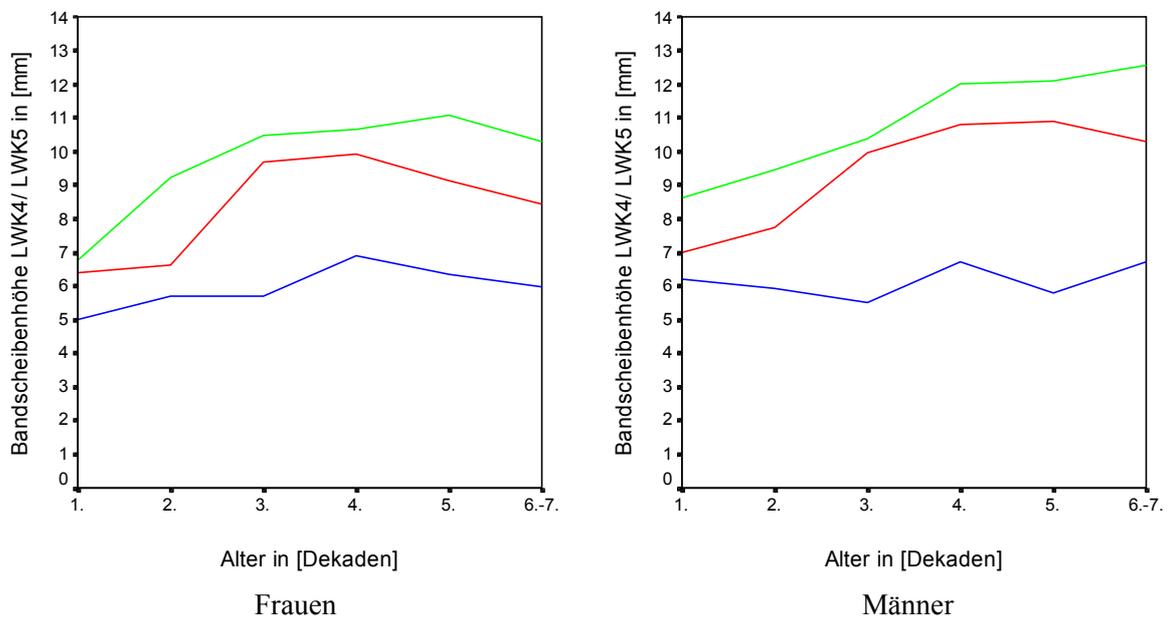


Abb. 33: Altersentwicklung der anterioren (rot), zentralen (grün) und posterioren (blau) Bandscheibenhöhen im Bewegungssegment LWK4/LWK5 bei Frauen (links) und Männern (rechts)

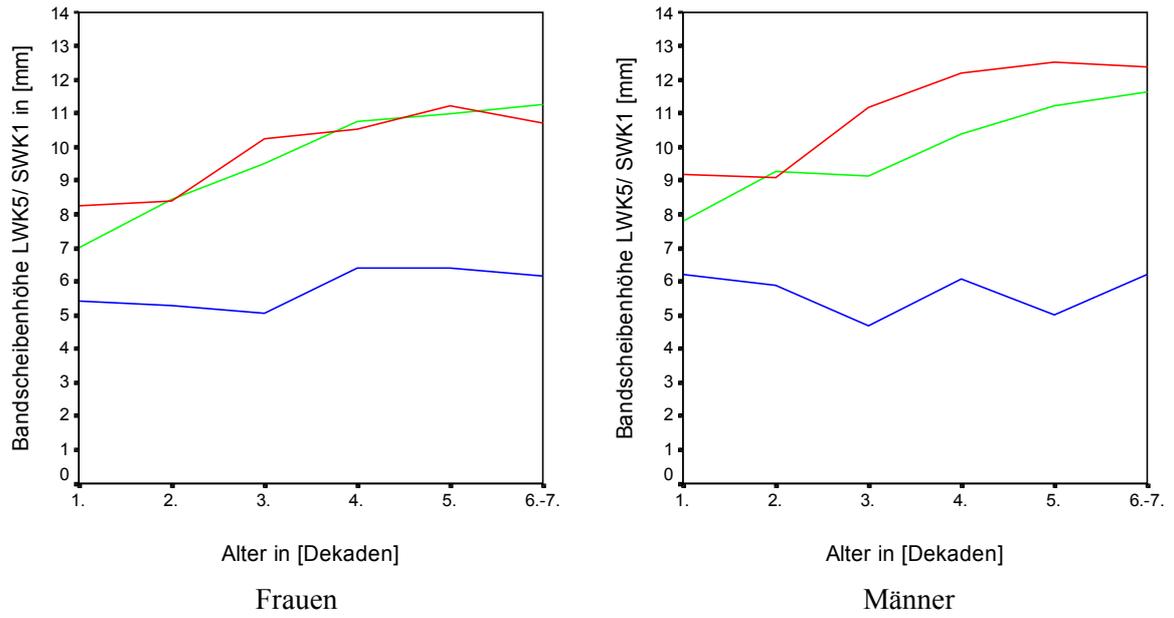


Abb. 34: Altersentwicklung der anterioren (rot), zentralen (grün) und posterioren (blau) Bandscheibenhöhen im Bewegungssegment LWK5/SWK1 bei Frauen (links) und Männern (rechts)

5.1.2.2.Sagittaler Bandscheibendurchmesser

Die Graphen zeigen, dass die Entwicklung der sagittalen Bandscheibendurchmesser bezüglich des Alters geschlechtsspezifisch differiert. Während sich bei Frauen die größte Zunahme des sagittalen Bandscheibendurchmessers zwischen der ersten und zweiten Dekade vollzieht, zeigt sich bei Männern ein wesentlichen kontinuierlicherer Entwicklungsverlauf.

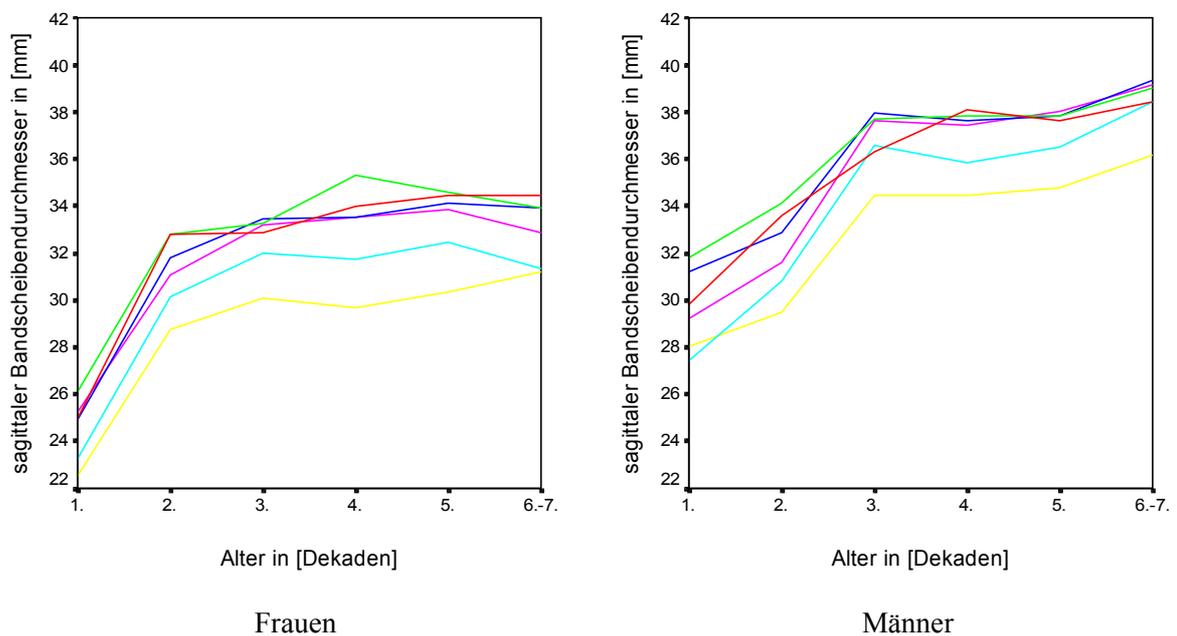


Abb. 35: Altersentwicklung des sagittalen Bandscheibendurchmesser bei Frauen (links) und Männern (rechts) BWK12 ----, LWK1 - - - -, LWK2 - - - -, LWK3 - - - -, LWK4 - - - -, LWK5 - - - -

Zwischen den sagittalen Bandscheibendurchmessern der Bandscheiben BWK12/LWK1, LWK1/LWK2, LWK2/LWK3, LWK3/LWK4, LWK5/SWK1 und dem Alter bestehen ausnahmslos signifikante Zusammenhänge auf dem 1%-Fehlerniveau, wobei diese bei den Männern stärker ausgeprägt sind als bei den Frauen (siehe Tabelle 9). Die sagittalen Bandscheibendurchmesser aller Bandscheiben nehmen mit steigendem Alter sowohl bei Männern als auch bei Frauen zu.

Tab. 9: Korrelationskoeffizienten zwischen dem sagittalen Bandscheibendurchmesser und dem Alter

	Bei Frauen	Bei Männern
BWK12	r = 0,466 P = 0,000	r = 0,580 p = 0,000
LWK1	r = 0,392 P = 0,000	r = 0,612 p = 0,000
LWK2	r = 0,422 P = 0,000	r = 0,563 p = 0,000
LWK3	r = 0,457 P = 0,000	r = 0,517 p = 0,000
LWK4	r = 0,363 P = 0,000	r = 0,454 p = 0,000
LWK5	r = 0,474 P = 0,000	r = 0,476 p = 0,000

Die Referenzwerte für die sagittalen Durchmesser der lumbalen Bandscheiben sind auf der beiliegenden Referenzdaten-CD in Abschnitt 4 aufgeführt.

5.1.2.3. Sagittale Bandscheibenvorwölbungen

Die Bandscheibenvorwölbungen wurden geschlechtsspezifisch und altersabhängig im anterioren und posterioren Bereich der Bandscheibe untersucht. Da die zu korrelierenden Variablen alle metrisch skaliert sind, wurde auch hier nach dem Verfahren nach Pearson getestet.

5.1.2.3.a. Anteriore Bandscheibenvorwölbung

Bei Frauen sind alle Signifikanzwerte $p > 0.05$, sodass davon ausgegangen werden kann, dass kein Zusammenhang zwischen anteriorer Bandscheibenvorwölbung und Alter besteht.

Bei den Männern ergibt sich bei zwei Bandscheibenetagen (LWK1/LWK2 und LWK3/LWK4) ein signifikanter Zusammenhang zwischen Alter und anteriorer Bandscheibenvorwölbung. In beiden Fällen ist der Zusammenhang allerdings ziemlich gering, das heißt, dass mit zunehmendem Alter die anteriore Bandscheibenvorwölbung geringfügig größer wird.

5.1.2.3.b. Posteriore Bandscheibenvorwölbung

Bei Männern ergeben sich keine Signifikanzwerte unterhalb des Schwellenwertes. Das heißt, dass keine Signifikanz zwischen Alter und posteriorer Bandscheibenvorwölbung besteht.

Die Referenzwerte für die anterioren und posterioren Vorwölbungen der lumbalen Bandscheiben sind im auf der beiliegenden Referenzdaten-CD in Abschnitt 5 aufgeführt.

6. Diskussion

Das diskoligamentäre System der Wirbelsäule stellt ein außerordentlich komplexes System von Einzelkomponenten dar, welches Stabilität, Dynamik und Schutzfunktion gewährleisten muß. Zur Umsetzung dieser komplexen Anforderungen dient ein ausbalanciertes System muskulärer, diskoligamentärer und ossärer Elemente, die durch lokale und übergeordnete neuronale Systeme angesteuert werden. Störungen dieses Systems im Sinne akuter und chronischer Rückenschmerzen sind in der Bevölkerung weit verbreitet und in allen Alters- und Berufsgruppen anzutreffen. Seit mehreren Jahrzehnten sind insbesondere die Altersveränderungen dieses komplexen Systems, im speziellen der lumbalen Wirbelkörper und Bandscheiben, sowie die Frage nach der normalen Altersentwicklung der Lendenwirbelsäule Thema intensiver wissenschaftlicher Forschungen (Shao et al. 2004, Bogduk 2003, Sether et al. 1990, Vernon–Roberts und Pirie. 1977). Bereits 1945 wurde durch Publikationen Coventrys et al. die Frage behandelt, welchen Veränderungen die Bandscheiben mit zunehmendem Alter unterliegen (Coventry et al. 1945a, Coventry et al. 1945b). Seither wurden zahlreiche Studien – mit kontroversen Diskussionsansätzen und – ergebnissen – auch bezüglich anderer Strukturen der lumbalen Wirbelsäule hinsichtlich des „normalen“ Alterns untersucht und veröffentlicht (grundlegend: Shao et al. 2004, Hellinger 1995, Hickey et al. 1986, Olsewski et al. 1996, Schiebler et al. 1991, Jensen 1994, Terti et al. 1991, Sether et al. 1990, Modic 1990, Boden et al. 1990, Pope et al. 1977). Da die Lendenwirbelsäule altersabhängigen Veränderungen hinsichtlich ihrer Form, der Orientierung der Zygapophysealgelenke, ihrer Lordosierung und ihres Bewegungsspieles sowie weiterer morphometrischer Parameter unterworfen ist, sollten Referenzwerte in erster Linie eine altersabhängige Entwicklung typischer morphometrischer Parameter der Lendenwirbelsäule abbilden, die sich innerhalb der gesunden Bevölkerung am häufigsten nachweisen lassen. Der Begriff der Normalität wird in der Medizin unterschiedlich gebraucht. Für die Zwecke dieser Untersuchung wird der Normalitätsbegriff in seiner „typischen“ Bedeutung als Durchschnittswert in der symptomfreien Allgemeinbevölkerung verstanden. Problematisch bleibt in jedem Fall die Abgrenzung der Randgruppen – was ist noch normal, was bereits pathologisch? Der Begriff der Normalität wird maßgeblich vom Alter bestimmt, sodass ein Normstandard nur altersabhängig definiert werden kann. In der bildgebenden Diagnostik der Wirbelsäule wurden in der Vergangenheit bereits verschiedene Modelle zur Klassifikation normaler und noch normaler Morphen angegeben. Wichtige Arbeiten, die sich mit der Messung lumbaler Bandscheiben befassen, stammen von Hurxthal und Farfan. Beide führten

die Messung am seitlichen Übersichtsbild der LWS durch (Hurxthal 1968, Farfan 1973). Nach Hurxthal wird die Höhe der Bandscheibe aus dem Mittelwert des größten und kleinsten Abstandes der Konturen der Grund- und Deckplatte eines Bewegungssegmentes bestimmt. In einer nach Hurxthal modifizierten Methode wird die Mitte zwischen den Randkonturen zur Höhenbestimmung lumbaler Bandscheiben benutzt. Farfan errechnet die Bandscheibenhöhe aus dem Mittelwert des dorsalen und ventralen Abstandes zwischen den Wirbelkörperendplatten eines Funktionssegmentes. Zusätzlich wird der erhaltene Wert durch die Tiefe der Bandscheibe dividiert. Dadurch erfolgt ein Ausgleich der Röntgenvergrößerung (Pope et al. 1977).

Pope et al. verglichen 1977 fünf verschiedene Meßmethoden zur Bestimmung der Bandscheibenhöhe (darunter auch die von Hurxthal und Farfan, sowie eine nach Hurxthal modifizierte Methode). Es zeigten sich erhebliche Unterschiede in der Genauigkeit. Sie empfehlen zukünftig die Röntgenvergrößerung auszugleichen, um Ergebnisse besser miteinander vergleichen zu können (Pope et al. 1977). Andersson et al. kamen 1981 nach Auswertung der Meßergebnisse verschiedener Untersucher auf eine Abweichung vom wahren Wert für die Bandscheibenhöhe von 50%. Die Bestimmung der Bandscheibenhöhe erfolgte nach Farfan. Eine genaue qualitative Bestimmung der Bandscheibenhöhe aus Routineaufnahmen wurde daraufhin durch die Autoren ausgeschlossen (Andersson et al. 1981). Saraste et al. unternahmen 1985 Messungen an 12 Präparaten zur genauen Bestimmung der Bandscheibenhöhe zwischen L5 und S1. Dabei befanden sich die Präparate jeweils in verschiedenen Stellungen axialer Rotation und seitlicher Verkippung. Auch hier zeigten sich Abweichungen von 9% bis 35% vom Mittelwert für die Bandscheibenhöhe (Saraste et al. 1985). Mit der Methode von Frobin, Brinckmann und Biggemann 1995 (Frobin und Brinckmann 1995, Biggemann 1997), in der die objektive Lagebestimmung der Eckpunkte und der räumlichen Strukturen der Wirbelkörper in die Vermessung einbezogen wurden, wurde ein Verfahren zur Messung der Bandscheibenhöhe entwickelt, für welches eine Ergebnisabweichung von 4,15% angegeben wird (Frobin, W. et al. 1997). Es wurde durch deren Arbeit eine Datenbasis von Bandscheibenhöhen gesunder Personen auf Grundlage von 683 Röntgenseitenaufnahmen der LWS erstellt. Allerdings handelt es sich bei diesen Untersuchungen, wie auch bei Shao et al. der nach derselben Methode die altersentsprechende Bandscheibenentwicklung an 1239 seitliche Röntgenübersichtsaufnahmen (607 Frauen und 633 Männer) untersuchte (Shao et al. 2002) um Untersuchungen auf Basis röntgenologischer Aufnahmen. Trotz einer angegebenen Präzision der Messungen der Bandscheibenhöhe, für die Shao in seinen Untersuchungen 3,9%

angibt (Shao et al. 2002), besteht die Schwierigkeit objektivierbarer Messungen bei Röntgenaufnahmen darin, daß eine ideale Abbildungsgeometrie nur erreicht wird, wenn der Zentralstrahl genau durch eine Bandscheibe und damit parallel zu den angrenzenden Grund- und Deckplatten verläuft. Dies kann pro Bild maximal für einen Zwischenwirbelraum erreicht werden. Hinzu kommen weitere Abweichungen wie axiale Rotation, seitliche Verkipfung und Röntgenvergrößerung.

Für die Magnetresonanztomographie finden sich in der Literatur nur wenige Normwerte hinsichtlich der Wirbelkörper und des diskoligamentären Systemes. Roberts et al. untersuchten die Altersentwicklung der lumbalen Bandscheibenhöhen auf Grundlage von MRT-Aufnahmen, indem die zentrale Bandscheibenhöhe und der Flächeninhalt der Bandscheiben in der Medianebene ermittelt wurde (Roberts et al. 1997). Schwachpunkt ist die fehlende altersabhängige Einteilung; insbesondere auch weiterer diskaler Elemente. Dies ist insofern von Belang, als die Magnetresonanztomographie heute nicht nur der Goldstandard in der klinischen Routinediagnostik, sondern auch Referenzverfahren in der Begutachtung von Wirbelsäulenprozessen geworden ist. Es reicht heute nicht mehr aus von einer „altersentsprechend“ regelrecht konfigurierten Wirbelsäule zu sprechen – diese Beurteilung muss durch nachprüfbare Parameter in Bezug auf Referenzwerte belegt werden. Mit der Magnetresonanztomographie steht uns hierzu ein nichtinvasives, bildgebendes Verfahren zur Verfügung, mit dem Darstellungen der einzelnen Wirbelsäulensegmente in allen Raumachsen erstellt werden können. Sie ist heute Goldstandard in der Diagnostik von degenerativen Wirbelsäulenveränderungen, da insbesondere auch der Grad der Hydratation sowie der Protrusionsgrad der Bandscheibe bestimmt werden kann. Zudem ist der Patient keiner Strahlenbelastung ausgesetzt. In zahlreichen Studien konnte nachgewiesen werden, dass die MRT-Diagnostik bei der Auffindung eines Korrelats für die Rückenschmerzen aussagekräftiger als die konventionellen Methoden (konventionelles Röntgen, CT, Myelographie) ist (grundlegend: Dullerud 1999, Kikuchi 2001, Maravilla 1985, Gualdi 1995). Derzeit gibt es noch keine Referenzwerte für die MRT.

In der vorliegenden Studie wurden aus den 2989 Magnetresonanztomographien der Lendenwirbelsäule, die im Zeitraum vom 22.12.1994 bis zum 31.12.2002 am Institut für Diagnostische und Interventionelle Radiologie (IDIR) der Friedrich-Schiller-Universität Jena (FSU) erstellt wurden, unter Berücksichtigung von Ausschlusskriterien Magnetresonanztomographien von 201 Personen (6,7%) selektiert, die von 3 Radiologen (Facharztstandard) unabhängig voneinander als altersentsprechend normal befundet wurden.

Hiervon waren 105 Frauen (= 52,2%) und 96 Männer (= 47,8%). 54 Personen (= 27%) der Referenzgruppe wurden im Rahmen einer Studie der Berufsgenossenschaft untersucht.

Folgende Erkrankungen führten zum direkten Ausschluss aus der Studie: chronische Rückenschmerzen, ausgeprägte Skelettanomalien (skoliotische Fehllhaltung, Wirbelkörperfrakturen sowie Grund- und Deckplatteneinbrüche, nicht eindeutig auszuschließende Übergangswirbel), Tumorwirbel und metastatischer Wirbelkörperbefall, Morbus Scheuermann im lumbalen Bereich, erosive Osteochondrose, infektiöse Spondylodiszitis, sowie vorliegender Zustand nach Op. Bei allen selektierten Personen lagen anamnestisch keine Erkrankungen oder Beschwerden im Bereich der Lendenwirbelsäule vor. Einzugsgebiet der Personen war gesamt Thüringen.

Alle morphometrischen Messungen wurden an den Messkonsolen der Magnetresonanztomographen mit kalibrierten Maßstäben anhand eines standardisierten Messprotokolls durchgeführt. Aufgrund der Symmetrie der einzelnen Wirbelsäulenbestandteile erfolgte die Analyse und Einschätzung der Wirbelsäulen aus sagittaler Sicht in der Medianebene T1-gewichteter MR-Aufnahmen. Vermessen wurden die anterioren, zentralen und posterioren Höhen, der sagittale Durchmesser der Wirbelkörper und Bandscheiben sowie die anterioren und posterioren Bandscheibenvorwölbungen. Ziel der hier dargestellten Studie war es, Referenzwerte auf Basis als gesund beurteilter lumbaler Magnetresonanztomographien zu entwickeln. Zusammenfassend sollen die hier ermittelten Werte die bestehende Morphe der Lendenwirbelsäule metrisch hinterlegen und die altersentsprechende Entwicklung plastisch darstellen. Zudem sollen sie den untersuchenden Radiologen gerade bei Grenzfällen eine orientierende Unterstützung geben zwischen altersgerecht „noch normal“ und pathologisch zu unterscheiden. Die in dieser Arbeit aufgestellten metrischen Werte sind als orientierende Referenzwerte aufzufassen. Für allgemeingültige Referenzwerte bestand kein ausreichend großes Kollektiv, sodass diese durch Vermessungen weiterer, größerer Personengruppen möglicherweise korrigiert oder bestätigt werden müssen. Inwieweit die Werte durch das regional begrenzte Kollektiv ausschließlich lokale Gültigkeit besitzt, müssen weiterführende überregionale Untersuchungen zeigen.

Grundsätzlich muss der Ergebnisdiskussion vorangestellt werden, dass aufgrund des retrospektiven Aufbaus der Studie von den untersuchten Personen jeweils nur eine Momentaufnahme in der jeweiligen Altersgruppe (Dekade) beurteilt wurde. Mit einer durchschnittlichen Zusammenfassung der bestimmten Absolutwerte wurde auf den zeitlichen Alterungsverlauf rückgeschlossen. Zudem konnten die Tageszeiten, zu denen die

Magnetresonanztomographien erstellt wurden, durch den bestehenden retrospektiven Studienaufbau nicht nachvollzogen und folglich nicht mit in die Betrachtung einbezogen werden. Da die Bandscheibe durch eine bestehende Wassershift einer täglichen Höhenänderung unterworfen ist, muss dies kritisch betrachtet werden.

6.1. Wirbelkörper

Die durchschnittlichen Wirbelkörperhöhen steigen sowohl bei Männern als auch bei Frauen zunächst an, bis sie in der 3. Dekade (Alter = 20–29 Jahre) ein Maximum erreichen. Ab der 3. Dekade zeigt sich mit zunehmendem Alter ein Absinken der durchschnittlichen Wirbelkörperhöhe. Der anfängliche Anstieg der Wirbelkörperhöhen steht im Zusammenhang mit dem longitudinalen Wachstum der Wirbelkörper und ist Ergebnis von Proliferation und Ossifikation des Knorpelgewebes der superior und inferior befindlichen Wachstumsplatten der Wirbelkörper (Bick und Copel 1950, Caffey 1972) sowie der Ossifikationszentren und Kerne im posterioren Bereich der Wirbelkörper. Die Ossifikation der vertikal angeordneten Knorpelsäulen vollzieht sich hier in gleicher Weise wie an den Metaphysen langer Röhrenknochen (Bogduk 2000, Ham und Cormack 1979). Bei der aufgeschlüsselten Betrachtung der Wirbelkörperhöhen durch Messung der anterioren, zentralen und posterioren Höhen zeigen die Ergebnisse im Unterschied zu den oben angeführten Arbeiten, dass sich innerhalb eines Wirbelkörpers keine einheitliche longitudinale Entwicklung der Wirbelkörperhöhen bezüglich des Alters vollzieht, sodass eine Durchschnittsangabe, wie u.a. bei N. Bogduk 2000 publiziert, diesem Entwicklungsmuster nur unzureichend Rechnung trägt (Bogduk, N. 2000). Die anterioren und posterioren Höhen steigen bei beiden Geschlechtern bis zum Erreichen der dritten Dekade in einem stärkeren Maße an als die zentrale Wirbelkörperhöhe. Eine mögliche Erklärung ist die Bildung der Ringapophysen. Diese entwickeln sich bis zum 10. Lebensjahr an den anterioren, lateralen und posterioren Rändern der Wirbelkörper als Kalzifikationsherde, die später aufgrund einer vaskulären Infiltration ossifizieren und mit dem Wirbelkörper fusionieren. Laut N. Bogduk sind diese nicht am eigentlichen Wachstum der Wirbelkörper beteiligt (Bogduk, N. 2000), allerdings stellt die Ossifikation und Fusion dieser Kalzifikationsherde einen Substanzzuwachs eben im anterioren und posterioren Randbereich dar, welcher sich in einer stärkeren Höhenzunahme gegenüber dem zentralen Wirbelkörperbereich widerspiegelt. Zudem übt die veränderte Lage des Nucleus pulposus, die Folge der Ausbildung der Lendenlordose ist, einen Wachstumsreiz

auf die peripheren Wirbelkörperregionen aus, so dass diese vergleichsweise stärker an Höhe zunehmen. Dies wurde bereits 1985 in Studien von Taylor und Twomey nachgewiesen (Taylor und Twomey 1985, Twomey und Taylor 1985). Für das Wachstum und das Ausmaß der zentralen Wirbelkörperhöhe wird eine genetische Disposition diskutiert (Bogduk 2000). Das Abnehmen der durchschnittlichen Wirbelkörperhöhen ab der 3. Dekade ist maßgeblich von der stärkeren Abnahme der zentralen gegenüber der anterioren und posterioren Wirbelkörperhöhe geprägt.

Die Hypothese, dass sich dadurch mit dem Alter eine zunehmende physiologische Konkavität der Grund- und Deckplatten der Lendenwirbelkörper ergibt, konnte in der eigenen Untersuchung mittels des anterioren und posterioren Konkavitätsindex sowie dem sagittalen Wirbelkörperindex nachgewiesen werden. Dies steht im Einklang zu den publizierten Ergebnissen von Shao et al. (Shao et al. 2002): hier wurden die altersabhängigen Veränderungen der lumbalen Wirbelkörper und Bandscheibenfächer auf Basis röntgenologischer Aufnahmen untersucht. Die zunehmende Konkavität der superioren und inferioren Wirbelkörperoberflächen wurde allerdings nur bezüglich der anterioren Wirbelkörperhöhe nachgewiesen. Berichte von Vernon-Roberts beschreiben ebenfalls eine Höhenabnahme der zentralen Wirbelkörperhöhen nach einem erreichten Maximum (Vernon-Roberts 1992). Mögliche Erklärungen sind einerseits die mit zunehmendem Alter abnehmende Knochendichte der gesamten lumbalen Wirbelkörper (Cummings et al. 2002, Melton et al. 1997, Melton et al. 1993, Cummings und Black 1995, Marshall et al. 1996, Ericksen 1976, Taylor und Twomey. 1985), und die damit verbundene abnehmende Stärke des Knochens (White und Panjabi 1978) oder die Veränderungen in der Größe und Anordnung der Trabekel der Wirbelkörper (Bogduk 2000). Innerhalb der Wirbelkörper kommt es mit zunehmendem Alter zum irreversiblen Abbau der horizontalen Trabekel, wodurch sich eine fehlende Abstützung der vertikalen Trabekel, besonders im mittleren Bereich des Wirbelkörpers, ergibt. Die vertikalen Trabekel werden ebenfalls absorbiert (Atkinson 1967, Twomey et al. 1983). Durch das geschwächte Trabekelsystem fehlt besonders im zentralen Bereich des Wirbelkörpers die subkortikale Abstützung. Bei axialer Kompressionsbelastung der Wirbelsäule muss nun der Großteil der Belastung vom zunehmend geringer stabilisierten kortikalen Knochen der Wirbelkörper getragen werden. Während der trabekuläre Anteil des Wirbelkörpers eine 9,5%ige Deformation toleriert, versagt der kortikale Bereich bereits bei einer 2%igen Formänderung (White, Panjabi 1978). McBroom et al. stellten fest, dass die Wirbel an den Endplatten zuerst brechen und folgerten daraus, dass diese im Vergleich zum kortikalen Mantel den entscheidenden Beitrag zur

mechanischen Festigkeit leisten (McBroom et al. 1985). Mit diesen Ergebnissen übereinstimmend fanden Cheng et al. eine höhere Korrelation der mechanischen Versagenslast mit der trabekulären Dichte ($r = 0,71$) als mit der kortikalen Dichte ($r = 0,35$) (Cheng et al. 1997, Cheng et al. 1998). In einer früheren Studie stellten Rockoff et al. im Gegensatz dazu in biomechanischen Experimenten einen weitaus größeren Beitrag von 45 bis 75 % des Kortex zur mechanischen Festigkeit des Wirbelkörpers fest (Rockoff et al. 1969). Bezüglich der Druckverteilung an den vertebralen Endplatten bei axialer Kompression werden in der Literatur unterschiedliche Standpunkte diskutiert. Geht man von einer Gleichverteilung der Druckbelastung an den vertebralen Endplatten aus (Bogduk 2000), so ist die fehlende subkortikale Abstützung eine mögliche Erklärung für die Deformierung der vertebralen Endplatten. In einer Studie von L. Dai konnte gezeigt werden, dass durch axiale Druckbelastung der Wirbelsäule bei der normalen Kontrollgruppe die höchste Druckausbreitung und -belastung (stress distribution) gerade in diesem geschwächten Bereich der zentralen Wirbelkörpergrund- und Deckplatten stattfindet, obwohl durch den Anulus fibrosus eine Gleichverteilung der Belastung erfolgt. Jedoch findet sich im anterioren und posterioren Bereich eine stärkere subkortikale Abstützung (Dai 1998). Die überwiegende kortikale Abstützung im zentralen Wirbelkörperbereich sowie die fehlende Stabilisierung des darunter befindlichen Knochens mindern die Resistenz des Wirbelkörpers gegenüber Verletzungen und Deformationen, sodass es infolge auftretender Mikrofrakturen der vertebralen Endplatten (Hansson und Roos 1981) zur zunehmenden Konkavität der superioren und inferioren Flächen der Wirbelkörper kommt, was sich auch in der eigenen Untersuchung in den morphometrischen Daten und dem anterioren und posterioren Konkavitätsindex widerspiegelt.

Der sagittale Wirbelkörperdurchmesser der Wirbelkörper BWK12 bis LWK5 nimmt allgemein mit zunehmendem Alter zu. Dies steht im Einklang zu einer Studie von Knirsch et al., die den sagittalen Wirbelkörperdurchmesser auf Basis von MRT-Aufnahmen bei Kindern im Alter von 6 bis 17 Jahren untersucht (Knirsch et al. 2005). In der eigenen Studie wurden geschlechtsspezifische Unterschiede festgestellt. Während sich bei Frauen die stärkste Zunahme dieser Größe zwischen der ersten und zweiten Dekade vollzieht, zeigt sich bei Männern ein wesentlich kontinuierlicherer Anstieg. Als mögliche Erklärung für das horizontale Wachstum des Wirbelkörpers lässt sich die periostale Ossifikation (Brandner 1970, Caffey 1972) diskutieren. Es besteht bei axialer Belastung der Bandscheiben ein Druck auf die begrenzenden ligamentären Strukturen, welche ihrerseits Zug auf die

Wirbelkörperbereich ausüben, wodurch sich ein osteophytäres, appositionelles Wachstum durch Traktion ergibt.

6.2. Bandscheiben

Die altersbezogene Entwicklung der durchschnittlichen Bandscheibenhöhen der Lendenwirbelsäule unterliegt etagenbezogen einem unterschiedlichen Wachstumsmuster. Bei den Bandscheiben der oberen Lendenwirbelsäule (BWK12/LWK1, LWK1/LWK2) zeigt sich bei Frauen ein steiler Anstieg der durchschnittlichen Bandscheibenhöhen bis zur 2. Dekade, zwischen der 3. bis 5. Dekade folgt eine Plateauphase, an welche sich ein weiteres Ansteigen anschließt. Bei Männern zeigt die durchschnittliche Bandscheibenhöhe in diesen Bandscheibenetagen einen kontinuierlichen Anstieg mit zunehmendem Alter. In der Bandscheibe LWK2/LWK3 ist bei beiden Geschlechtern ein eher asymptotischer Verlauf des Graphs zu erkennen, der bis zur 4. Dekade ansteigt und danach ein Plateau erreicht. Die Bandscheibenhöhe im Segment LWK3/LWK4 steigt zunächst bis zu einem Maximum im Alter von 40 Jahren, um danach wieder leicht an Höhe zu verlieren. Die Bandscheiben der unteren Lendenwirbelsäule (LWK4/LWK5, LWK5/SWK1) zeigen bei Frauen den für LWK3/LWK4 typischen Verlauf, bei Männern eher einen sigmoiden Verlauf mit dem stärksten Anstieg zwischen der 2. und 4. Dekade.

Insgesamt können diese etagenbezogen unterschiedlichen Wachstumsmuster als Folgen unterschiedlicher biomechanischer Beanspruchungen interpretiert werden, die zu unterschiedlichen Altersentwicklungen der Bandscheiben in verschiedenen Funktionssegmenten führen. Die sich ebenfalls unterschiedlich entwickelnden Einzelhöhen im anterioren, zentralen und posterioren Bereich einer Bandscheibe zeigen, dass die Angabe einer Durchschnittsgröße für die Bandscheibenhöhen wie bei Bogduk publiziert (Bogduk 2000), oder gar eine altersabhängige Formel zur Errechnung der Bandscheibenhöhe (Shao et al. 2002) nur unzureichend Auskunft über die bandscheibeninterne Altersentwicklung gibt.

Zusammenfassend ergibt sich für die normale Altersentwicklung der Bandscheibenhöhen innerhalb eines Funktionssegmentes altersbezogen eine relative Konstanz der posterioren Höhe, während die zentrale Bandscheibenhöhe altersbezogen die größten Veränderungen zeigt, jedoch auch die größte Höhe innerhalb der Bandscheibe darstellt.

Die Bandscheibe des Funktionssegmentes LWK5/SWK1 nimmt eine Sonderstellung ein: Hier bestimmt wesentlich die anteriore Höhe die Höhe des Bandscheibenfaches, während die zentrale Bandscheibenhöhe deutlich geringer als bei den anderen Bandscheibenfächern

ausgeprägt ist. Als Grund hierfür ist die Ausbildung einer „Keilform“ dieser Bandscheibe infolge des aufrechten Ganges mit Lordosierung der Lendenwirbelsäule und die damit erforderliche Anbindung an das Sakrum anzusehen.

Die zentrale Bandscheibenhöhe zeigt bei Frauen einen linearen Anstieg bis zum Erreichen der 5. Dekade. Ab der 5. Dekade fällt diese Größe leicht ab. Bei Männern zeigt die zentrale Bandscheibenhöhe eine kontinuierliche Zunahme bis zum Erreichen der 6. Dekade. Die einzige Ausnahme stellt die Bandscheibe LWK2/LWK3 dar, hier zeigt sich auch bei Männern der oben geschilderte frauentypische Verlauf. Die anteriore Bandscheibenhöhe steigt altersbezogen zunächst an bis zur 4. Dekade und fällt ab der 4. Dekade leicht ab. Innerhalb der gesamten Lendenwirbelsäule ist für die anteriore Bandscheibenhöhe eine kraniokaudalwärts gerichtete Zunahme bezeichnend. Im Segment LWK5/SWK1 ist die anteriore Höhe die größte der Bandscheibe. Grundsätzlich zeigt sich in den Bandscheiben der oberen Lendenwirbelsäule (BWK12/LWK1, LWK1/LWK2) beider Geschlechter ein Anstieg der Einzelhöhen sowie ein Anstieg der durchschnittlichen Werte und ist damit mit den Ergebnissen von Shao et al. (Shao et al. 2002) sowie Twomey und Taylor (Twomey und Taylor 1985) für diesen Lendenwirbelsäulenabschnitt übereinstimmend. Die Ergebnisse von Shao et al. 2002 Grundlage radiologisch morphometrischer Untersuchungen gehen von einem linearen Anstieg der durchschnittlichen Bandscheibenhöhen in allen Segmenten aus. In der vorliegenden Studie wurde eine kontinuierliche Linearität bezüglich des Anstiegs der Bandscheibenhöhen lediglich bei den Bandscheiben BWK12/LWK1 und LWK1/LWK2 festgestellt, bei Betrachtung der Einzelhöhen konnte eine Kontinuität nur für die zentralen Bandscheibenhöhen der Männer verzeichnet werden. Die Untersuchungen der vorliegenden Studie zeigten weiter, dass sowohl die durchschnittlichen als auch die einzelnen Bandscheibenhöhen der mittleren und unteren Wirbelsäule nach erfolgtem Anstieg abfallen. Speziell im Verlauf der anterioren Höhe zeigt sich in der mittleren und unteren Lendenwirbelsäule bei beiden Geschlechtern ab der 5. Dekade nach erfolgtem Anstieg ebenfalls eine Abnahme der Höhe. Mögliche Gründe für die bestehenden Abweichungen der vorliegenden Studie zu Shao et al. können die unterschiedlichen Untersuchungsmethoden sein. Bei Shao et al. erfolgten die morphometrischen Untersuchungen auf Grundlage röntgenologischer Aufnahmen nach der Methode von Frobin, Brinckmann und Biggemann 1995 (Frobin, W. und Brinckmann, P. 1995, Biggemann 1997, Frobin et al. 1997a, Frobin et al. 1997b, Frobin et al. 2001). Trotz einer angegebenen Genauigkeit der Messung der Bandscheibenhöhe 4,15% (Frobin et al. 1997a, Frobin et al. 1997b) beziehungsweise 3,9% (Shao et al. 2002) besteht die Schwierigkeit objektiver Messungen bei

Röntgenaufnahmen darin, daß eine ideale Abbildungsgeometrie nur erreicht wird, wenn der Zentralstrahl genau durch eine Bandscheibe und damit parallel zu den angrenzenden Grund- und Deckplatten verläuft. Dies kann pro Bild maximal für einen Zwischenwirbelraum erreicht werden. Hinzu kommen weitere Abweichungen wie axiale Rotation, seitliche Verkipfung und Röntgenvergrößerung. Zudem bestehen zu Untersuchungen röntgenologischer Auswertung Unterschiede bezüglich der Auswertestrategie. Bei morphometrischer Röntgenauswertung wurde durch Konstruktion der Wirbelkörpereckpunkte und Vermessung des Bandscheibenfaches auf die Bandscheibenhöhe rückgeschlossen. In der eigenen Untersuchung auf Grundlage magnetresonanztomographischer Aufnahmen konnten die Bandscheiben direkt vermessen werden. Inwieweit regionale und berufs- und belastungsbedingt veränderte Unterschiede zwischen den Kollektiven bestehen, kann nicht genau nachvollzogen werden. Aufgrund des retrospektiven Studienaufbaus konnte keine genaue Tätigkeits- bzw. Berufsanamnese erhoben werden. Die Ergebnisse der eigenen Studie stehen im Einklang zu denen der Publikationen von Amonoo-Kuofi und Al-Hadidi, wonach die Bandscheibenhöhen stetig ansteigen bis zur 5. Dekade und anschließend abnehmen (Amonoo-Kuofi 1991, Al-Hadidi 2001). Somit unterstützt die vorliegende Studie die Annahme, dass die zentrale Höhe nicht degenerativ veränderter lumbaler Bandscheiben mit zunehmendem Alter ansteigt, in einem höherem Maße als die anteriore und posteriore Bandscheibenhöhe. Die bis auf das Bandscheibenfach LWK5/SWK1 stets größte zentrale Bandscheibenhöhe unterstreicht die Vermutung, dass sich mit steigendem Alter eine Zunahme der Konvexität der Bandscheiben einstellt. Dies steht im Einklang mit den Ergebnissen von Shao et al., wonach diese Veränderungen der Bandscheiben sich in der zunehmenden Konkavität der Wirbelkörper widerspiegeln (Shao et al. 2002). Zu diesem Ergebnis führten ebenfalls MR-Untersuchungen von Roberts et al. 1997, wo die zentralen Bandscheibenhöhen lumbaler Bandscheibenfächer einer älteren (Alter = 50–60 Jahre) und einer jüngeren Population (Alter = 20–30 Jahre) gegenübergestellt wurde (Roberts et al. 1997). Es wurde eine signifikant höhere zentrale Bandscheibenhöhe in der älteren Population gegenüber einer jüngeren festgestellt. Allerdings trifft diese Studie keine Aussage über die kontinuierliche Altersentwicklung der zentralen Bandscheibenhöhe, da das Zeitintervall (Alter = 30–50 Jahre) nicht betrachtet wird. Beim Abfallen der zentralen Bandscheibenhöhe bei Frauen ab dem 50. Lebensjahr als ein Ergebnis der vorliegenden Studie werden immer noch Werte erreicht, die höher sind als die zentralen Bandscheibenhöhen im Alter von 20–29 Jahren, sodass auch hier die Übereinstimmung zu den Ergebnissen von Roberts et al. konstatiert werden kann. Jedoch wurde zwischenzeitlich ein Maximum erreicht. Die Annahme, dass die zentrale

Bandscheibenhöhe nicht degenerativ veränderter lumbaler Bandscheiben mit dem Alter ansteigt, spiegelt die oben beschriebene Entwicklung an den Grund- und Deckplatten lumbaler Wirbelkörper wieder. Diese werden mit zunehmendem Alter aus bereits ausgeführten Gründen konkaver. In anderen morphometrischen Studien röntgenologischer Darstellungen lumbaler Bandscheiben wurden lediglich die anterioren und posterioren Höhen ausgewertet und die zentralen Bereiche nicht mit in die Betrachtung einbezogen. Infolge der Ergebnisse der vorliegenden Studie ist es aus o.g. Gründen unbedingt notwendig die zentralen Bereiche der Wirbelkörper und Bandscheiben mit in die Betrachtung einzubeziehen, da die Zusammensetzung der Bandscheibe sowohl innerhalb der Bandscheibe als auch mit dem Alter variiert (Antoniou et al. 1996).

In früheren Studien (Lawrence 1969, Schmorl Junghans 1971) wurde die Verschmälerung der Disci intervertebrales als eines der pathologischen Zeichen der älter werdenden Lendenwirbelsäule betrachtet. Neuere Studien (Vernon-Roberts 1977, Bogduk 2000) beschreiben die Aufrechterhaltung der Diskushöhe beziehungsweise die Dimensionszunahme der lumbalen Bandscheiben als ein Zeichen eines normalen Alterungsprozesses. Vernon und Roberts Untersuchungen ergaben in den meisten Disken ist eine 10%ige Höhenzunahme sowie eine zunehmende Konvexität der oberen und unteren Flächen der Disken (Vernon-Roberts 1977). Die Wahrung der Integrität der Bandscheibe und damit die Aufrechterhaltung ihrer Dimensionen sowie der biomechanischen Funktion spiegelt sich ebenfalls in folgendem Konstruktionsprinzip wider. Bei axialer Kompression stellt die vertebrale Endplatte den schwächsten Bestandteil dar, diese versagt bevor es zum Zerreißen des Anulus fibrosus kommt (Bogduk 2003, McBroom et al. 1985). Einige Autoren beschreiben eine zunehmende Bandscheibenausdünnung und -austrocknung mit steigendem Alter (Twomey und Taylor 1985). Die Untersuchungen von Vernon-Roberts und Pirie zeigten eine Reduktion der Bandscheibenhöhe in Verbindung mit Bandscheibendegeneration, wobei diese bei Männern eher als bei Frauen einsetzt (Vernon-Roberts 1992). Miller et al. fanden an 600 untersuchten lumbalen Bandscheiben heraus, dass Bandscheibenveränderungen infolge Degenerationen zuerst bei Männern in der zweiten Dekade, bei Frauen eine Dekade später auftreten. Des Weiteren, dass mit 50 Jahren circa 97% aller lumbalen Bandscheiben degeneriert sind und dass die am meisten betroffenen Segmente LWK3/LWK4, LWK4/LWK5 und LWK5/SWK1 sind. In diesem Zusammenhang werden bezüglich der Bandscheibenalterung die Begriffe Degeneration und Degradation oft synonym verwendet und mit dem normalen Alterungsprozess gleichgesetzt. Andere Autoren beschreiben zwar, dass die Degeneration mit steigendem Alter zunimmt, allerdings 72% der älteren Bandscheiben keine degenerativen

Veränderungen im Sinne Bandscheibenausdünnung und Osteophytenbildung zeigen. Mögliche Ursachen einer Höhenabnahme der Bandscheiben können einmal durch Substanzverlust aufgrund Herniation oder durch Volumenverlust aufgrund von Dehydration auftreten. Trotz der vorherrschenden traditionellen Meinung wird eine Bandscheibe unter Kompression nicht durch einen Prolaps versagen (Brinkmann 1986). Ein normaler Diskus intervertebralis ist kohärent und widersteht einer Herniation. Die normalen Bandscheiben widerstehen einem Vorwölben in die mit altersbezogen steigender Inzidenz auftretenden Mikrofrakturen der Wirbelkörperendplatten (Brinckmann und Grootenboer 1991). Bezüglich der Bandscheibenausdünnung durch Dehydration konnte durch Untersuchungen Püschels bereits 1930 gezeigt werden, dass der größte Wasserverlust während der Kindheit bzw. der Adoleszenz stattfindet (Püschel 1930, Bogduk 2003). Der Wassergehalt des Anulus fibrosus bleibt relativ konstant im Erwachsenenalter, während der des Nucleus pulposus lediglich um 6% bis ins höhere Alter abnimmt (Bogduk 2003, Adams und Muir 1976, Bushel et al. 1977). Andere Autoren vertreten die Meinung, dass degenerative Veränderungen der Bandscheiben als natürlicher Teil des Alterns auftreten (An et al. 2004). Pfirrmann et al. untersuchten bei 70 asymptomatischen Personen (Alter = 20–78 Jahre) die Veränderungen der Bandscheibenhöhe, -form und -volumen mit zunehmendem Alter und/oder Degeneration (Pfirrmann et al. 2006). Laut den Untersuchungen Pfirrmanns führt Bandscheibendegeneration zum Abfallen der Bandscheibenhöhe sowie einer Abnahme der Bandscheibenkonvexität und dem -volumen. Bei Abwesenheit von Bandscheibendegeneration korreliert die Bandscheibenhöhe, die Bandscheibenkonvexität und das -volumen bezüglich des Alterns entgegengesetzt. Dies würde bedeuten, dass – wie bereits durch Bogduk vermutet (Bogduk 2003) – die Bandscheibendegeneration und der normale Alterungsprozess der Bandscheiben unterschiedliche Vorgänge sind und nicht begriffssynonym verwendet werden dürfen.

Die Ergebnisse der eigenen morphometrischen Studie spiegeln weiterhin den natürlichen Lordoseverlauf der Lendenwirbelsäule wider. Bei beiden Geschlechtern stellten die posterioren Bandscheibenhöhen die kleinsten Höhen dar, die anterioren Höhen übersteigen diese bis auf oben genannte Ausnahmen. Somit ergibt sich bei dem oben dargestellten ausgewogenen Verhältnis zwischen anteriorer und posteriorer Wirbelkörperhöhe im oberen und mittleren Lendenwirbelsäulenbereich, wie durch den sagittalen Wirbelkörperindex nachgewiesen, sowie der gegenüber der posterior erhöhten anterioren Wirbelkörperhöhe der unteren Lendenwirbel die typische Lordoseform. Diese vollzieht sich im oberen und mittleren

LWS-Bereich leichter und im unteren LWS-Bereich stärker, was durch die sakrale Anbindung der sagittal keilförmig erscheinenden Bandscheibe LWK5/SWK1 dargestellt wird.

Die anterior posteriore Distanz der Bandscheiben, gemessen in der Mediansagittalen, nimmt mit zunehmendem Alter zu. Jedoch sind auch hier wie bei der sagittalen Wirbelkörperausdehnung geschlechtsspezifische Unterschiede festzustellen. Während sich bei Frauen die stärkste Zunahme dieser Größe zwischen der ersten und zweiten Dekade vollzieht, zeigt sich bei Männern ein wesentlich kontinuierlicherer Anstieg.

Dies steht im Einklang zu Ergebnissen von Vernon-Roberts und Pirie, wonach zwischen dem 2. und 7. Lebensjahrzehnt nimmt der anterior posteriore Durchmesser der lumbalen Disken bei Frauen und Männern zunimmt (Vernon-Roberts und Pirie 1977). Die anterioren und posterioren Bandscheibenvorwölbungen zeigen keine altersbezogene Signifikanz.

7. Schlussfolgerung

Die humane Lendenwirbelsäule unterliegt mit zunehmendem Alter Veränderungen hinsichtlich ihrer Form, der Orientierung der Zygapophysealgelenke, ihrer Lordosierung und ihres Bewegungsspieles sowie weiterer morphometrischer Parameter. Die Hypothese, dass sich mit dem Alter eine zunehmende physiologische Konkavität der Grund- und Deckplatten der Lendenwirbelkörper ergibt, konnte in der eigenen Untersuchung mittels des anterioren und posterioren Konkavitätsindex sowie dem sagittalen Wirbelkörperindex nachgewiesen werden. Für die lumbalen Bandscheiben ist mit zunehmendem Alter eine Wahrung der Integrität und eine Aufrechterhaltung der Bandscheibenhöhe typisch. Da es heute nicht mehr ausreicht von einer „altersentsprechend“ regelrecht konfigurierten Wirbelsäule zu sprechen, muss diese Beurteilung durch nachprüfbare Parameter in Bezug auf Referenzwerte belegt werden. Für allgemeingültige Referenzwerte, die nicht nur lokale Gültigkeit besitzen, sollten Vermessungen weiterer, größerer Personengruppen folgen, die die vorliegenden Ergebnisse möglicherweise korrigieren oder bestätigen. Um mögliche Fehleinschätzungen zu vermeiden, sollten einheitliche Messprotokolle verwendet werden, nach denen die morphometrischen Analysen durchgeführt werden. Da die Magnetresonanztomographie heute nicht nur der Goldstandard in der klinischen Routinediagnostik, sondern auch Referenzverfahren in der Begutachtung von Wirbelsäulenprozessen geworden ist, ist dieses Verfahren für der Festlegung von Referenzwerten zu favorisieren.

8. Literatur- und Quellenverzeichnis

Adams P, Muir H. 1976. Quantitative changes with age of proteoglycans of human lumbar discs. *Ann Rheum Dis* 35, 289-296.

[Al-Hadidi MT](#), [Badran DH](#), [Al-Hadidi AM](#), [Abu-Ghaida JH](#). 2001. Magnetic resonance imaging of normal lumbar intervertebral discs. [Abstract] [Saudi Med J](#). 22(11), 1013-18.

Amonoo-Kuofi HS. 1991. Morphometric changes in the heights and anteroposterior diameters of the lumbar intervertebral discs with age. *J Anat* 175, 159–168.

An HS, Anderson PA, Haughton VM, Iatridis JC, Kang JD, Lotz JC, Natarajan RN, Oegema TR, Roughley P, Setton LA, Urban JP, Videman T, Andersson GBJ, Weinstein JN. 2004. Disc Degeneration: Summary. *SPINE* Volume 29, Number 23, 2677–2678.

Andersson G B J, Schultz A, Nathan A, Irstam L. 1981. Roentgenographic measurement of lumbar intervertebral disc height. *Spine*, 6, 154–158.

Antoniou J, Goudsouzian NM, Heathfield TF. 1996. The human lumbar endplate. Evidence of changes in biosynthesis and denaturation of the extracellular matrix with growth, maturation, aging, and degeneration. *Spine* 21, 1153–1161.

Atkinson. 1967. Variations in trabecular structure of vertebrae with age. *Calcif Tissue Res* 1: 24–32

Bick und Copel. 1950. Longitudinal growth of the human vertebrae. *J Bone Joint Surg* 32A: 803–814

Biggemann, M., W. Frobin, P. Brinckmann: Physiologisches Muster lumbaler Bandscheiben. *Fortschr Röntgenstr* 1997; 167: 11–15

Bloch F. 1946. Nuclear induction. *Phys Rev* 69, 127–136.

Bogduk N. 2000. *Klinische Anatomie von Lendenwirbelsäule und Sakrum*, Springer Verlag 2000; ISBN 3-540-67098-X

Bogduk N. 2003. Functional anatomy of the disc and the lumbar spine. The artificial disc. K. Buttner-Janzen, Hochschuler S, Mc Affee. Berlin u.a. Springer Verlag: 19–32

Boden SD, Davis DO, Dina TS, Patronas NJ, Wiesel SW. 1990. Abnormal magnetic-resonance scans of the lumbar spine in asymptomatic subjects. A prospective investigation. J Bone Joint Surg Am 72(3), 403–408

Brandner. 1970. Normal values of the vertebral body and intervertebral disc index during growth. Am J Roentgenol 110: 618–627

Brinckmann. 1986. Injury of the annulus fibrosus and disc protrusions: an in vitro investigation on human lumbar discs. Spine 11: 149–153

Brinckmann P und Grootenboer. 1991. Change of disc height, radial disc bulge, and intradiscal pressure from discectomy: an in vitro investigation on human lumbar discs. Spine 16: 641–6

Brinckmann P, Frobin W, Biggemann M, Hilweg D, Seidel S, Burton K, Tillotson M, Sandover J, Atha J, Quinnell R. 1994. Quantification of overload injuries to thoracolumbar vertebrae and discs in persons exposed to heavy physical exertions or vibration at the work place. Clinical Biomechanics 9, 1–83.

Brinckmann P, Biggemann M, Hilweg P. 1989. Prediction of the compressive strength of human lumbar vertebrae. Spine 14, 606–609.

Bryce R, Aspden RM, Wytch R. 1995 Stiffening effects of cortical bone on vertebral cancellous bone in situ. Spine 20, 999–1003

Buckwalter JA. 1995. Aging and degeneration of the human intervertebral disc. Spine 20(11), 1307–1314.

Bushel, Ghosh, Taylor et al. 1977. Proteoglycans chemistry of the intervertebral disc. Clin Orthop 129: 115–123

Caffey. 1972. *Pediatric X-ray diagnosis*. 6th edn. Year Book Medical Publishers, Chicago.

Cheng, Lowet, Boonen, Nicholson, Van Der, Dequeker. 1998. Prediction of vertebral and femoral strength in vitro by bone mineral density measured at different skeletal sites. *J Bone Miner Res* 13:1439–1443.

Cheng XG, Nicholson PH, Boonen S, Lowet G, Brys P, Aerssens J, Van Der PG, Dequeker J 1997 Prediction of vertebral strength in vitro by spinal bone densitometry and calcaneal ultrasound. *J Bone Miner Res* 12: 1721–1728.

Coventry MB, Ghormley RK, Kernohan JW. 1945a. The intervertebral disc: Its microscopic anatomy and pathology: part II. Changes in the intervertebral disc concomitant with age. *J Bone Joint Surg (Am)* 27, 233–247.

Coventry MB, Ghormley RK, Kernohan JW. 1945b. The intervertebral disc: its microscopic anatomy and pathology: part III. pathological changes in the intervertebral disc. *J Bone Joint Surg (Am)* 27, 460–474.

Cummings SR, Black DM. 1995 Bone mass measurements and risk of fracture in caucasian women: A review of findings from prospective studies. *Am J Med* 98, 24–28

Cummings SR, Bates D, Black DM 2002 Clinical use of bone densitometry: scientific review. *JAMA* 288, 1889–1897.

Dai L. 1998. The relationship between vertebral body deformity and disc degeneration in the lumbar spine of senile. *Eur Spine J* 7, 40–44.

Dullerud R. 1999. Diagnostic imaging in lumbago and sciatica. *Ugeskr Laeger* 161(38), 5299–5303

Eriksen MF. 1976. Some aspects of aging in the lumbar spine. *Am J Phys Anthropol* 45: 575–580

Farfan HF. 1973 *Mechanical disorders of the low back*. Lea and Febinger, Philadelphia

Frobin W und Brinckmann P. 1995. Objektive Messung der Höhe lumbaler Bandscheiben. Westfälische-Wilhelms-Universität, Zentrum für Orthopädie - Mitteilungen aus dem Institut für Experimentelle Biomechanik 38, 1–52.

Frobin W, Brinckmann P, Biggemann M. 1997a. Objektive Messung der Höhe lumbaler Bandscheiben aus seitlichen Röntgen-Übersichtsaufnahmen. Zeitschrift für Orthopädie, 135, 394–402.

Frobin W, Brinckmann P, Biggemann M, Tillotson M, Burton K. 1997b. Precision measurement of disc height, vertebral height and sagittal plane displacement from lateral radiographic views of the lumbar spine. Clinical Biomechanics 12, 1–64

Frobin W, Brinckmann P, Kramer M, Hartwig E. 2001. Height of lumbar discs measured from radiographs compared with degeneration and height classified from MR images. Eur Radiol. 11, 263–269

Goupille, P. 1998. Matrix metalloproteinases: the clue to intervertebral disc degeneration? Spine 23(14), 1612–1626.

Graichen und Putz 1999. Anatomische und funktionelle Aspekte von Brust- und Lendenwirbelsäule. Orthopädie 28, 424–431.

Gruber HE and Hanley EN. 1998. Analysis of aging and degeneration of the human intervertebral disc. Comparison of surgical specimens with normal controls. Spine 23(7), 751–757.

Gualdi GF, Trasimeni G, Ianilli M. 1995. Role of CT and MR in the assessment of lumbar degenerative disk disease. Clin. Ter. 146(10), 635–648

Hake A, Brinckmann P, Frobin W, Biggemann M. 2002. Sagittale Rotations- und Translationsbewegung lumbaler Segmente mit höhengeminderten Bandscheiben. Fortschr Röntgenstr 174: 996–1002 Georg Thieme Verlag Stuttgart.

Ham und Cormack. 1979. Histology, 8th edn. Lippincott, Philadelphia, p. 373

Hansson und Roos. 1981. Microcallues of the trabeculae in the lumbar vertebrae and their relation to the bone mineral content. *Spine* 6: 375–380

Hellinger J. 1995. *Meßmethoden in der Skelettradiologie*, Georg Thieme Verlag.

Heuck F und Bast B. 1999. *Radiologische Skizzen und Tabellen, Schädel – Gehirn, Wirbelsäule – Rückenmark*. Georg Thieme Verlag Stuttgart.

Hickey DS, Aspden RM, Hukins DW, Jenkins JP, Isherwood I. 1986. Analysis of magnetic resonance images from normal and degenerated lumbar intervertebral discs. *Spine* 11(7):702–708.

Humzah and Soames RW. 1988. Human intervertebral disc: structure and function. *Anat Rec.* 220(4), 337–356.

Hutton WC et al. 1998. The effect of compressive force applied to the intervertebral disc in vivo. A study of proteoglycans and collagen. *Spine* 23(23), 2524–2537.

Hutton WC et al. 1999. The effect of hydrostatic pressure on intervertebral disc metabolism. *Spine* 24(15), 1507–1515.

Hurxthal LM. 1968. Measurement of anterior vertebral compressions and biconcave vertebrae. *American Journal of Roentgenological Radium Therapie and Nuclear Medicine* 103(3), 635–644

Ishihara, McNally, Urban, Hall. 1996. Effects of hydrostatic pressure on matrix synthesis in different regions of the intervertebral disk. *Journal of Applied Physiology*, Vol 80, Issue 3 839–846

Jensen MC, Brant-Zawadzki MN, Obuchowski N, et al. 1994. Magnetic resonance imaging of the lumbar spine in people without back pain. *N Engl J Med* 331, 69–73.

Junghanns H. 1979. *Die Wirbelsäule in der Arbeitsmedizin. Teil II – Einflüsse der Berufsarbeit auf die Wirbelsäule*. Stuttgart: Hippokrates

Junghanns H. 1968. Die gesunde und die kranke Wirbelsäule in Röntgenbild und Klinik. Georg Thieme Verlag, Stuttgart.

Junghanns H. 1951. Die funktionelle Pathologie der Zwischenwirbelscheiben als Grundlage für klinische Betrachtungen. Langenbecks Arch Klin Chir 267, 393–417.

Kikuchi S. 2001. Values and problems in MRI for the evaluation of low back pain. Semin Musculoskelet Radiol 5(2), 127–128

Knirsch, Kurtz, Haffner, Langer, Kececioglu. 2005. Normal values of the sagittal diameter of the lumbar spine (vertebral body and dural sac) in children measured by MRI. Pediatr Radiol Apr;35(4):419–24.

Krämer J. 1993. Bandscheibenbedingte Erkrankungen. 3. Auflage. Stuttgart: Thieme–Verlag.

Krämer J. Biomechanische Veränderungen im lumbalen Bewegungssegment. In: Junghanns H, Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis. Bd LVIII. Stuttgart: Hippokrates, 1973

Krämer J. Kreuzschmerzen aus orthopädischer Sicht. Dt Ärztebl 1994; 5: C-198–203

Lawrence. 1969. Disc degeneration, its frequency and relationship to symptoms. Ann Rheum Dis 28: 121–138

Liu; Ishihara; Osada, Kimura; Tsuji. 2001. Nitric Oxide Mediates the Change of Proteoglycan Synthesis in the Human Lumbar Intervertebral Disc in Response to Hydrostatic Pressure. Spine. 26(2):134–141

Lotz JC et al. 1998. Compression-induced degeneration of the intervertebral disc: an in vivo mouse model and finite-element study. Spine 23(23), 2493–2506.

Lotz JC und Chin JR. 2000. Intervertebral disc cell death is dependent on the magnitude and duration of spinal loading. Spine 25(12), 1477–1483.

Maravilla KR, Lesh P, Weinreb JC, Mooney V. 1985. MRI of the lumbar spine with CT correlation. AJNR 6(2), 237–245

Marshall D, Johnell O, Wedel H. 1996. Meta-analysis of how well measures of bone mineral density predict occurrence of osteoporotic fractures. *BMJ* 312, 1254–1259

McBroom, Hayes, Edwards, Goldberg, White. 1985. Prediction of vertebral body compressive fracture using quantitative computed tomography. *J Bone Joint Surg Am* 67: 1206–1214.

Meyerding HW, 1931 Spondylolisthesis. *The Journal of Bone and Joint Surgery*, 13 (24), 39–48.

Modic MT and Herfkens RJ. 1990. Intervertebral disk: normal age-related changes in MR signal intensity. *Radiology*. 177(2), 332–3; discussion 333–4

Melrose, J., and P. Ghosh. 1988. The noncollagenous proteins of the intervertebral disc. In P. Ghosh (ed.) *The biology of the intervertebral disc*, CRC Press, Boca Raton.

Melton LJ, Atkinson EJ, O'Fallon WM, Wahner HW, Riggs BL. 1993. Longterm fracture prediction by bone mineral assessed at different skeletal sites. *J Bone Miner Res* 8, 1227–1233.

Melton LJ, III, Thamer M, Ray NF, Chan JK, Chesnut CH, III, Einhorn TA, Johnston CC, Raisz LG, Silverman SL, Siris ES. 1997. Fractures attributable to osteoporosis: report from the National Osteoporosis Foundation. *J Bone Miner Res* 12, 16–23.

Müller-Gerbl M. 1974. Die Rolle der Wirbelgelenke für die Kinematik der Bewegungssegmente. *Annals of Anatomy* 174 , 48–53

Nachemson A. 1966. The load on lumbar discs in different positions of the body. *Clin Orthop* 45, 107–123.

Olsewski JM, Schendel MJ, Wallace LJ, Ogilvie JW, Gundry CR. 1996. Magnetic resonance imaging and biological changes in injured intervertebral discs under normal and increased mechanical demands. *Spine* 21(17), 1945–51.

Pfarrmann, Metzendorf, Elfering, Hodler, Boos. (2006), Effect of aging and degeneration on disc volume and shape: A quantitative study in asymptomatic volunteers. *Journal of Orthopaedic Research* [Volume 24, Issue 5](#), Pages 1086–1094

Pope, M. H., Hanley, E. N., Mattern, R. E., Wilder, D. G., und Frymoyer, M. D. (1977) Measurement of intervertebral disc space height. *Spine*, 2, 282–286.

Purcell E (1946) Resonance adsorption by nuclear magnetic moments in a solid. *Phys Rev* 69: 37–43.

Püschel. 1930. Der Wassergehalt normaler und degenerativer Zwischenwirbelscheiben. *Beitr Pathol Anat* 84: 123

Putz und Müller-Gerbl. 2003. *Rumpf. Anatomie. Drenckhahn. München/ Jena. Urban & Fischer* 1.: 412–58

Roberts N, Gratin C, Whitehouse GH. MRI analysis of lumbar intervertebral disc height in younger and older populations. *J Magn Reson Imaging* 1997; 7: 880–6

Rockoff, Sweet, Bleustein. 1969. The relative contribution of trabecular and cortical bone to the strength of human lumbar vertebrae. *Calcif Tissue Res* 3:163–175.

Rudert M, Tillmann B. Histochemischer und immunhistochemischer Nachweis von Blut- und Lymphgefäßen im Discus intervertebralis des Menschen. *Ann Ant* 1993; 175: 237–243

Saraste, H., Broström, L. A., Aparisi, T., Axdorph, G., und Albee, F. H. (1985) Radiographic measurement of the lumbar spine. A clinical and experimental study in man. *Spine*, 10, 236–241.

Schiebler ML, Camerino VJ, Fallon MD, Zlatkin MB, Grenier N, Kressel HY, In vivo and ex vivo magnetic resonance imaging evaluation of early discdegeneration with histopathologic correlation. *Spine*. 1991;16(6):635–40

Schmorl. 1932. Zur pathologischen Anatomie der Lendenbandscheiben. *Klin Wschr*; 2: 1369.

Schmorl und Junghans. 1971. The human spine in health and disease. 2nd American edn. Grune & Stratton, New York, p 18

Sether, Yu, Haughton, Fischer. 1990. Intervertebral disk: normal age-related changes in MR signal intensity. Department of Anatomy, Medical College of Wisconsin, Froedtert Memorial Hospital, Milwaukee 53226. Radiology; 177(2):385–8

Shao, Zengwu MD; Rompe, G MD, Schiltenswolf, M MD; Radiographic changes in the lumbar intervertebral discs and lumbar vertebrae with age. Spine 2002 27(3): pp. 263–268

Shao, Zengwu MD; Rompe, G MD, Schiltenswolf, M MD; Radiographic changes in the lumbar intervertebral discs and lumbar vertebrae with age. Spine 2004 29(1): pp. 108–9

Sharma, M.; Langrana, N. A.; Rodriguez, J.: Role of Ligaments and Facets in Lumbar Spinal Stability; Spine; Vol. 20, No. 8 (1995); S. 887–900

Sobotta: Atlas der Anatomie des Menschen, Band 2; J. Staubesand (Hrsg.); Urban & Schwarzenberg Verlag; München, Wien, Baltimore 1988

Stäbler A, Weiss M, Reiser M. 1997. MRI of enhancing intraosseous disk herniation (Schmorl's nodes). AJR 168, 933–938

Stäbler A, Baur A, Krüger A, Weiss M, Helmberger T, Reiser M. Differential diagnosis of erosive osteochondrosis and bacterial spondylitis: magnetic resonance tomography (MRT) Rofo Fortschr Geb Röntgenstr Neuen Bildgeb Verfahr 1998; 168(5):421–428

Stokes und Iatridis. 2004. Mechanical Conditions That Accelerate Intervertebral Disc Degeneration: Overload Versus Immobilization. Spine. 29 (23): 2724–2732

Swischuk LE, John SD, Allbery S. 1998. Disk degenerative disease in childhood: Scheuermann's disease, Schmorl's nodes and the limbus vertebra: MRI finding in 12 patients. Pediatr Radiol. 28(5), 334–8

Taylor und Twomey. 1985. Age changes in the subchondral bone of the human lumbar apophyseal joints. *J Anat* 1985; 143: 233

Tertti M, Paajanen H, Laato M, Aho H, Komu M, Kormanc M, Disc degeneration in magnetic resonance imaging. A comparative biochemical, histologic, and radiologic study in cadaver spines. *Spine*. 1991;16(6):629–34

Tillmann B, Rudert M. Struktur und Funktion des Discus intervertebralis. In: Noack W, Hrsg., *Die Bandscheibe. Praktische Orthopädie Bd 24*. Stuttgart – New York: Thieme, 1994: S. 1–6

Timpl, Rohde, Robey, Rennard, Foidart, Martin. 1979. Laminin—a Glycoprotein from Basement Membranes *J. Biol. Chem.* 254, 9933–9937)

Twomey und Taylor. 1985. Age changes in lumbar intervertebral discs. *Acta Scand* 56: 496–499

Twomey, Taylor, Furniss. 1983. Age changes in the bone density and structure of the lumbar vertebral column. *J Anat* 136: 15–25

Urban, Roberts, Ralphs. 2000. The Nucleus of the Intervertebral Disc from Development to Degeneration. *American Zoologist* 40(1):53–61

Urban, Jill P.G., PhD, Stanton Smith, DPhil, and Jeremy C. T. Fairbank, MD, FRCS Nutrition of the Intervertebral Disc. *Spine* Volume 29, Number 23, pp 2700–2709, 2004

Vernon–Roberts und Pirie. 1977. The normal aging of the spine: Degeneration and Arthritis. aus Anderson, G. B. J., McNeill, T. W., *Lumbar Spinal Stenosis*. ISBN 0-8016-0090-1, 1992 PP. 57–75

Vernon-Roberts. 1992. Age related and degenerative pathology of the intervertebral discs and apophyseal joints. In M.I.V. Jayson (ed.) *The lumbar spine and back pain*, Vol. 4:pp. 17-41 Churchill Livingstone, London.

White, A.A., and Panjabi, M.M. (1978). "Clinical biomechanics of the spine." Lippincott, Philadelphia.

Anhang

Ehrenwörtliche Erklärung

Danksagung

Lebenslauf

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass mir die Promotionsordnung der Medizinischen Fakultät der Friedrich-Schiller-Universität bekannt ist,

ich die Dissertation selbst angefertigt habe und alle von mir benutzten Hilfsmittel,

persönliche Mitteilungen und Quellen in meiner Arbeit angegeben sind,

mich folgende Personen bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der

Herstellung des Manuskriptes unterstützt haben: Herr Prof. Dr. med. Kaiser,

Herr OA Dr. med. W. Behrendt, Herr OA Dr. med. A. Petrovitsch,

die Hilfe eines Promotionsberaters nicht in Anspruch genommen wurde und dass Dritte weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen von mir für Arbeiten erhalten haben, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen,

dass ich die Dissertation noch nicht als Prüfungsarbeit für eine staatliche oder andere wissenschaftliche Prüfung eingereicht habe und

dass ich die gleiche, eine in wesentlichen Teilen ähnliche oder eine andere Abhandlung nicht bei einer anderen Hochschule als Dissertation eingereicht habe.

Saalfeld, den 24.09.2007

Stephan Remde

Danksagung

Ich danke Herrn Prof. Dr. med. Dipl.-chem. W.A. Kaiser herzlich für die freundliche Überlassung des Themas der Promotion.

Bei Herrn OA Dr. med. A. Petrovitch bedanke ich mich für die begleitende Unterstützung, für die Hilfe bei der Nutzung der Patientenkollektive, für die Sammlung und Auswertung der Daten, sowie für die Unterstützung bei Erstellung der Arbeit.

Desweiteren richte ich ein herzliches Dankeschön an die Oberarzt- und Chefsekretärinnen des Instituts für Interventionelle und Diagnostische Radiologie, insbesondere an Frau Mihlan, die durch ihre Arbeit nach zeitweiligem Verschwinden der Arbeit den letzten Abschnitt vor dem Einreichen beschleunigte.

Besonders danke ich meiner lieben Ehefrau Anni für ihr Durchhaltevermögen und für ihr ständiges Mut machen, wenn es mal wieder nicht so lief, wie es sollte.

Saalfeld, den 24.09.2007

Stephan Remde

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Remde
Vorname: Stephan Gunter
Geburtsdatum: 26.November1978
Geburtsort: 07745 Jena
Familienstand: verheiratet
Anschrift: Pfortenstr. 7, 07318 Saalfeld
Tel./e-mail: 0162/ 40 59 678 / stephan.remde@googlemail.com

Schulbildung

1985 - 1991 Besuch der „Otto-Grotewohl-Oberschule“ in Pößneck
1991 - 1997 Besuch des Gymnasiums „Am weißen Turm“ in Pößneck

Grundwehrdienst

1997 - 1999 im Sanitätsdienst der Bundeswehr in Feldkirchen und München

Hochschulausbildung

1999 - 2005 Studium der Zahnheilkunde an der FSU Jena
seit 2001 Doktorandentätigkeit am Institut für Diagnostische und Interventionelle Radiologie
(Direktor: Prof. Dr. med. Dipl.-chem. W.A. Kaiser)

beruflicher Werdegang

01/05 – 01/07 Assistenz Zahnarzt in Praxis Drs. Stirkat in Greiz
seit 01/07 angestellter Zahnarzt in Praxis Drs. Stirkat in Greiz