

Aus dem Institut der Anatomie I
der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf
Direktor: Univ.-Prof. Dr. med. Dr. rer. pol. Svenja Caspers

Die dorsale SIG-Innervation
- Eine Grundlagenstudie

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin der Medizinischen
Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

vorgelegt von
Christina Maria Kampsen

2019

Als Inauguraldissertation gedruckt mit der Genehmigung der Medizinischen
Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

gez.:

Dekan: Prof. Dr. med. Nikolaj Klöcker

Erstgutachter: Prof. Dr. med. Timm J. Filler

Zweitgutachter: PD Dr. Jörg Felsberg

Für meine Eltern.

I. Zusammenfassung

Trotz der hohen Prävalenz von Beschwerden im Bereich des Sakroiliakalgelenks (SIG) ist die Innervation dieses Gelenks nur unzureichend erforscht. Aufgrund dieses Wissenstandes und vor dem Hintergrund der enormen klinischen Bedeutung war eine detaillierte Untersuchung der dorsalen Innervation des SIG indiziert. Die hier vorliegende Studie fokussiert dabei auf die Nervenversorgung des dorsalen Bandapparates und der dorsalen Gelenkkapsel als Quellen schmerzhafter SIG-Prozesse. Auf dieser Basis wurden anschließend die Zugangswege therapeutischer Interventionen evaluiert.

Dazu wurde die dorsale Innervation des SIG und seines Bandapparates an zehn Formaldehyd-fixierten Körperspenden (7 männliche und 3 weibliche Körperspenden zwischen 61 und 101 Jahren) analysiert. Die zur Verfügung stehenden Wirbelsäulen wurden vom zwölften Brustwirbel bis zum Steißbein freipräpariert und auf makroskopisch sichtbare Nerven untersucht. Hierbei aufgefundene Nerven wurden zu ihren Ursprungssegmenten zurückverfolgt und der bestehenden Literatur gegenüber gestellt. Zusätzlich wurden bei drei Körperspendern drei Nerven und jene Gelenkbänder, die von diesen Nerven durchzogen wurden, histologisch sowie immunhistochemisch aufgearbeitet.

Die vorliegende Untersuchung zeigt eine dorsale Innervation des SIG und seines dorsalen Bandapparates in unterschiedlicher Häufigkeit aus den Rami dorsales L2 bis S5 sowie einem kokzygealen Segment. Dabei wiesen 6 von 10 Körperspendern eine Innervation aus lumbalen Segmenten auf.

In einigen Fällen fand zwischen den aufgefundenen Nerven ein Faseraustausch im Sinne eines dorsalen lumbosakralen Nervengeflechts statt. Darüberhinaus trat bei keinem der untersuchten Präparate eine gleichförmige Innervation des SIG auf. Nicht nur zwischen den Körperspendern sondern auch intraindividuell zeigten sich deutliche Seitenunterschiede. Sowohl lumbal als auch sakral fand sich eine Häufung der gefundenen Nerven auf der linken Körperhälfte. Zusätzlich wiesen drei untersuchte Präparate einen Nerven aus L3 auf, der das Facettengelenk L2-L3 überzog.

Die anschließende histologische Untersuchung der entnommen Spinalnerven L5, S1 und S3 sowie umgebender Ligamente zeigte myelinisierte und unmyelinisierte Fasern mit einem Durchmesser von maximal 2mm. Unter Abgabe feiner Äste zogen sie durch derbe Bindegewebszüge, parallel zum Kollagen verlaufend. Zusätzlich fanden sich rezeptive Endstrukturen innerhalb der Gelenkbänder, die am ehesten Mechanorezeptoren darstellen.

Die vorliegende Studie zeigt erstmals eine dorsale Innervation des SIG aus den oberen Lumbalsegmenten L2 bis L4. In der Literatur lassen sich bislang lediglich Angaben zur dorsalen SIG-Innervation aus den Segmenten L5 bis S4 finden.

Durch die langen Verläufe der Nerven mit Ursprung aus den oberen Lumbalsegmenten erhöht sich in diesem Bereich das Risiko von Nervenreizsyndromen, die im Sinne einer Schmerzprojektion als Schmerz im SIG wahrgenommen werden. So sind zum Beispiel Nervenverläufe über lumbale Facettengelenke zu nennen, die in der vorliegenden Studie beobachtet wurden. Somit kann diese hohe lumbale SIG-Innervation eine bislang unbekannte Ursache für die hohe Anzahl therapierefraktärer SIG-Schmerzen darstellen. Dadurch ergeben sich gleichzeitig neue therapeutische Ansatzpunkte bei therapierefraktären SIG-Beschwerden wie beispielsweise höhere lumbale Injektionsverfahren.

Die zusätzlichen histologischen Untersuchungen bestätigen eine Innervation des dorsalen Bandapparates des SIG durch die makroskopisch aufgefundenen Nerven. Darüberhinaus zeigen die aufgefundenen rezeptiven Endstrukturen im Bereich der Bänder, dass der Bandapparat des SIG eine wesentlich Quelle schmerzhafter Prozesse in diesem Bereich sein kann. Somit sind auch periartikuläre Injektionsverfahren in den dorsalen Bandapparat des SIG bei SIG-Beschwerden sinnvoll.

Abstract

In spite of the high prevalence of sacroiliac pain, the exact nerve supply of the Sacroiliac Joint (SIJ) is still unknown. In the scientific literature, we only found information about a dorsal innervation from L5 to L4. This investigation concentrated on the nerve supply of the dorsal ligament structures as the main source of pain, in order to re-evaluate the current approaches to injection.

For this purpose, 17 SIJ from formaldehyde-fixed adult human body donors (3 females, 7 males, in the age of 61 to 101 years) underwent a dissection from the twelfth thoracic vertebra down to the coccyx. The courses and bony landmarks of the traced nerves pulling into the SIJ were identified. Subsequent, all observed nerves were compared with the current literature about the sacroiliac joint innervation. In addition, three nerves (from L5, S1, and S3) and their innervated ligaments were examined histologically and immunohistochemically.

Our examination showed a dorsal sacroiliac joint innervation with varying frequency from the spinal segments L2 to S5. Additionally, no body doner showed a uniform innervation: For one thing, we found significant interindividual differences. On the other hand, there were also large intra-individual side differences. Thereby, the left side was more innervated than the right one. Besides, three body donors showed nerves which circumvent exostoses of the lumbar facet joint L2/L3. The histological investigation showed myelinated and unmyelinated nerve fibers with a maximum diameter of 2mm running parallel to the collagen bundles. Furthermore, we found receptive structures in the ligaments, which correspond most closely to mechanoreceptors.

We found an innervation of the SIJ from the upper lumbar segments from L2 to L4. In the scientific literature, there is the only information about a dorsal SIJ innervation beginning at L5 down to S4. Consequently, it is possible that an upper lumbar nerve irritation causes pain the SIJ (nerve compression). As a result, a higher lumbar course of the innervation of the SIJ might be a reason for the high number of therapy failure rates and could be a new therapeutic approach. The supplementary histological investigations confirm that the dorsal ligamentous apparatus of the SIJ can be a source of SIJ diseases. Consequently, periarticular injections also can be an effective treatment.

II. Abkürzungsverzeichnis

ABC	<i>(Strept-)Avidin-Biotin-Complex</i>
al.	alii
ASIG	Akzessorisches Sakroiliakgelenk
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CGRP	<i>Calcitonin Gene-Related Peptid</i>
Co	Kokzygealsegment
DM	Deutsche Mark
h	Stunde (Uhrzeit)
HE/H.E.	Hämatoxylin-Eosin
HRP	<i>horseradish peroxidase</i>
IHC	Immunhistochemie
IgG	Immunglobulin G
L	Lumbalsegment
Lig./Ligg.	Ligamentum/ Ligamenta
M./ Mm.	Musculus/ Musculi
MR/MRT	Magnetresonanztomographie
N./ Nn.	Nervus/ Nervi
Nr.	Nummer
PBS	phosphatgepufferter Salzlösung
Proc./Procc.	Processus/ Processus (pl.)
S	Sakralsegment
SIG	Sakroiliakgelenk
sup.	superior
z.B.	zum Beispiel
ZNS	Zentrales Nervensystem
Abb.	Abbildung
Kap.	Kapitel
Tab.	Tabelle

µm	Mikrometer
mm	Millimeter
cm	Zentimeter
mg	Milligramm
g	Gramm

Abkürzungen im Bildmaterial

Co	Kokzygealsegment
L	Lumbalsegment
LWK	Lendenwirbelkörper
FG	Facettengelenk
FSD/FSP	Foramen sacralis dorsalis/ Foramen sacralis posterius
Proc./Procc.	Processus/ Processus (pl.)
S	Sakralsegment

III. Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1 SIG im Transversalschnitt.
- Abb. 2a, b Die Bänder des SIG.
- Abb. 3 Schematische Darstellung der Innervation des SIG und seines Bandapparates durch dorsale Nerven aus L2 bis S5 sowie einem kokzygealen Segment.
- Abb. 4 Innervation des SIG und seines Bandapparates aus den Segmenten L3 bis S4.
- Abb. 5 Versorgung des SIG aus lumbalen Segmenten.
- Abb. 6 Anzahl der gefundenen Segmente nach Körperhälfte.
- Abb. 7 Schematische Übersichtszeichnung der gefundenen dorsalen Nerven zur SIG- Innervation aus lumbalen Segmenten.
- Abb. 8 Beobachteter Nervenverlauf eines Nerven aus L3 über das Facettengelenk L2-L3. Schematische Darstellung.
- Abb. 9 Schematische Übersicht der gefundenen Nerven aus L3.
- Abb. 10 Abstand zwischen Proc. spinosus und Proc. articularis sup. des dritten Lumbalwirbels in Prozent.
- Abb. 11 Innervation des SIG durch dorsale Nerven aus den Segmenten L4 und L5.
- Abb. 12 Übersichtszeichnung des gefundenen Nervs von L2 bis S2.
- Abb. 13 Zeichnung des Kreuzbeines in eine Uhr zur Beschreibung der Nervenverläufe mittels Uhrzeiten.
- Abb. 14 Nervale Verbindung zwischen dorsalen Ästen aus S1 und S2.
- Abb. 15 Nervale Verbindung zwischen dorsalen Ästen aus S5 und einem kokzygealen Segment (Co1).
- Abb. 16 Innervation des SIG des Körperspenders 09/13.
- Abb. 17 Straffes kollagenes Bindegewebe und lockeres, fettreiches Gewebe im Wechsel.
- Abb. 18 Straffes kollagenes Bindegewebe und lockeres kollagenes Gewebe im Wechsel.
- Abb. 19 Straffes kollagenes Bindegewebe und lockeres kollagenes Gewebe im Wechsel.
- Abb. 20 Hyaliner Knorpel

- Abb. 21 Übersichtsaufnahme Faserknorpel
- Abb. 22 Faserknorpel
- Abb. 23 Myelinisierter, sich aufteilender Nerv in leichtem
Schrägschnitt.
- Abb. 24 Immunhistochemische Bestätigung der aufgefundenen
Neurone
- Abb. 25 Negativkontrolle der immunhistochemischen Untersuchung.
- Abb. 26 Aufteilung eines Nerven
- Abb. 27 Gewundene Gefäße begleiteten die Nerven.
- Abb. 28 Sich aufteilende Nerven, die parallel zum kollagenen
Bindegewebe verlaufen.
- Abb. 29 Rezeptive Endstruktur zwischen Kollagenfasern.
- Abb. 30 Nervenreizung durch Hyperlordosierung der
Lumbalwirbelsäule.
- Abb. 31 Stufenmodell von SIG- und lumbalen Facettengelenks-
Injektionen.
- Abb. 32a, b Übersicht des lumbosakralen Präparationsgebiets des
Körperspenders.
- Abb. 33a, b Nerv aus L3 bei seinem Überzug über das Periost des Proc.
articularis superior des LWK 3.
- Abb. 34 Übersichtszeichnung des gefundenen Nerven aus L3. Ansicht
von dorsolateral
- Abb. 35 Rechtes SIG mit den versorgenden Nerven aus den dorsalen
Neuroforamina S1 und S2.
- Abb. 36 Linkes SIG mit versorgendem Nerv aus dem dorsalen
Neuroforamen S3.
- Abb. 37 Zeichnung der Innervation des SIG bei Körperspender 02/14.
- Abb. 38a, b Kranialer Anteil des Nerven aus L3.
- Abb. 39a, b Nerv aus L3.
- Abb. 40a, b Übersichtszeichnung des gefundenen Nerven aus L3. Ansicht
von dorsolateral.
- Abb. 41a, b Versorgung des SIG aus L4 und L5.
- Abb. 42 Zeichnung der Innervation des SIG aus L4 und L5.

- Abb. 43a, b Ansicht auf das rechte SIG mit Versorgung eines dorsalen Astes aus S3.
- Abb. 44 Zeichnung der Innervation des SIG aus S3.
- Abb. 45a, b Versorgung des linken SIG aus L5.
- Abb. 46a, b Innervation des rechten SIG durch S1 bis S3
- Abb. 47 Innervation des SIG bei Körperspender 87/13.
- Abb. 48a, b Aufsicht auf die lumbale Wirbelsäule und lumbosakralen Übergang mit dem Nerv aus L2 bis S2.
- Abb. 49a, b Seitliche Sicht auf die lumbale Wirbelsäule und lumbosakralen Übergang mit dem Nerv aus L2 bis S2.
- Abb. 50a, b Aufsicht auf das linke SIG mit dem Nerv aus L2 bis S2 sowie dorsalen Nervenästen aus S1 bis S5, die in den Gelenkspalt des SIG zogen.
- Abb. 51a, b Aufsicht auf das rechte SIG mit dem Nerv aus S1, der in den Gelenkspalt des SIG zog.
- Abb. 52 Zeichnung der nervalen Verbindung von L2 bis S2. Ansicht von dorsolateral.
- Abb. 53 Übersichtszeichnung aller gefundenen Nerven des vorliegenden Körperspenders.
- Abb. 54a, b Linkes SIG, das durch dorsalen Nerven aus S1 bis S3 versorgt wird.
- Abb. 55a, b Rechtes SIG mit versorgendem dorsalen Ast aus S1.
- Abb. 56 Innervation des SIG des Körperspenders 09/13.
- Abb. 57a, b Seitliche Sicht auf die lumbale Wirbelsäule und lumbosakralen Übergang mit dem Nerv aus L3.
- Abb. 58 Zeichnung des gefundenen Nervs aus L3 von dorsolateral.
- Abb. 59a, b Aufsicht auf das dorsale Becken mit dargestellter dorsaler Innervation des SIG aus S3 und S4.
- Abb. 60 Zeichnung der Innervation des SIG bei Körperspender 10/15.

IV. Verzeichnis der Tabellen

Tab. 1	Innervation des SIG in verschiedenen Studien.
Tab. 2	Alters- und Geschlechtsverteilung der untersuchten Präparate.
Tab. 3	Segmente, deren dorsale Fasern das SIG und dessen Bandapparat versorgen.
Tab. 4	Versorgungstypen der gefundenen Nerven.
Tab. 5	Gegenüberstellung der Nerven aus dem Segment L3.
Tab. 6	Anzahl und Lokalisation der gefundenen Rami dorsales der Sakralnerven S1 bis S5.
Tab. 7	Anzahl der Präparate anatomischer Studien zur Innervation des SIG.
Tab. 8	Innervation des SIG verschiedener anatomischer Studien

Inhaltsverzeichnis

I. Zusammenfassung	
II. Abkürzungsverzeichnis	
III. Abbildungsverzeichnis	
IV. Verzeichnis der Tabellen	
1. Einleitung.....	1
1.1 Definition Kreuzschmerz	1
1.2. Problemdarstellung	1
1.3 Ziele der Arbeit.....	4
1.4 Theorie und Grundlagen	5
1.4.1 Anatomische Vorbetrachtung.....	5
1.4.2 Innervation des SIG	9
1.4.3 Versorgung der Gelenkbänder	12
2. Material und Methoden	15
2.1 Makroskopische Untersuchung.....	15
2.1.1 Präparatauswahl.....	15
2.1.2 Fixierung der Körperspenden mittels Formaldehyd.....	16
2.1.3 Verwendete Materialien.....	17
2.1.4 Präparation des Rückens	18
2.1.5. Fotodokumentation und – Bearbeitung.....	21
2.2 Histologische Aufarbeitung der Gewebeproben	21
2.2.1 Herstellung der histologischen Präparate.....	21
2.2.2 Histologische Färbung.....	23
2.2.3 Mikroskopie.....	26
3. Ergebnisteil	27
3.1 Makroskopische Analyse	27
3.1.1 Das SIG versorgende Nerven.....	27
3.1.2 Versorgungstypen der gefundenen Nerven.....	33
3.1.3 Die Verläufe der lumbalen Nerven.....	34
3.1.4 Die Verläufe der sakralen Nerven.....	42
3.1.5. Degenerationen.....	45
3.2. Mikroskopische Analyse	46
3.2.1 Grundstruktur der Bänder.....	46
3.2.2 Nerven und deren Verläufe	50

3.2.3	<i>Rezeptive Einheiten</i>	55
3.2.4	<i>Fazit</i>	56
4.	Diskussion	57
4.1	Bewertung von Material und Methoden	57
4.1.1	<i>Makroskopische Untersuchung</i>	57
4.1.2	<i>Mikroskopische Untersuchung</i>	62
4.2	Bewertung der makroskopischen Ergebnisse.....	63
4.2.1	<i>Große Variabilität der Innervation des SIG</i>	63
4.2.2	<i>Anatomie der sakralen Rami dorsales</i>	68
4.2.3	<i>Nervi clunium medii</i>	72
4.2.4	<i>Anatomie der lumbalen Nerven</i>	73
4.2.5	<i>Bedeutung der makroskopischen Ergebnisse</i>	79
4.3	Diskussion der mikroskopischen Ergebnisse.....	85
4.3.1	<i>Grundstruktur der Bänder</i>	85
4.3.2	<i>Knorpel in den Bändern</i>	87
4.3.3	<i>Verlauf der Nerven</i>	91
4.3.4	<i>Mechanosensoren</i>	93
4.3.5	<i>Bedeutung der sensiblen Innervation des Bandapparates</i>	94
4.4	Schlussfolgerung	95
5.	Literatur – und Quellenverzeichnis	98
5.1.	Bildquellennachweis.....	109
6.	Anhang I: Beschreibung der Körperspenden einzeln	110
7.	Anhang II: Posterpräsentationen	136

1. Einleitung

1.1 Definition Kreuzschmerz

Kreuzschmerzen werden definiert als allgemeine Schmerzen zwischen unterem Rippenbogen und Oberrand der Gesäßfalte, wobei der Schmerz bis in das Bein ausstrahlen kann. Darüber hinaus wird noch zwischen spezifischem und unspezifischem Kreuzschmerz unterschieden. Als unspezifischen Kreuzschmerz ist jener Schmerz definiert, der nicht auf eine erkennbare, spezifische Pathologie zurückgeführt werden kann (Ärzeschaft 2007). Laut statistischem Bundesamt betrifft dies 85% der Kreuzschmerzen (Diemer and Burchert 2002).

1.2. Problemdarstellung

In Deutschland treten Beschwerden über Kreuzschmerzen sehr häufig auf und stellen wie in allen westlichen Industrienationen ein erhebliches gesundheitliches Problem dar (Gesundheitswesen 2001).

Zahlen von mehreren Millionen Betroffenen allein in Deutschland sprechen für sich:

Nach Daten des Bundesgesundheitsurvey von 1998 klagen 39% der Frauen und 31% der Männer in Deutschland zwischen 18 und 80 Jahren unter Kreuzschmerzen, die mindestens einmal in der Woche auftreten (Robert-Koch-Institut 2006). In einer anderen Umfrage von 2002 von Erwachsenen über 60 Jahren wurde Kreuzschmerz als häufigste Beschwerde mit 84,1% angegeben; 22,9% der hier Befragten berichteten dabei von starken und erheblichen Schmerzen (Raspe 2012).

Selbst unter den Jüngsten sind Kreuzschmerzen weit verbreitet. So ergab eine HBSC- Studie der WHO, dass in Deutschland 24% der Mädchen und 19% der Jungen zwischen 11 und 17 Jahren mindestens jede Woche Kreuzschmerzen haben (Raspe 2012).

Diese weite Verbreitung der Kreuzschmerzen stellt nicht nur eine enorme individuelle Krankheitslast dar, sondern hat auch eine gewaltige gesellschaftliche Bürde zur Folge.

Letzteres wird insbesondere durch die enormen direkten Kosten im Gesundheitswesen sowie durch indirekte Kosten deutlich, die durch Arbeitsunfähigkeitstage und Erwerbsunfähigkeitsrenten entstehen. Kreuzschmerzen stellen den häufigsten Anlass für eine ambulante oder rehabilitative Behandlung dar und verursachen die meisten Arbeitsausfälle und vorzeitigen Berentungen. Die dadurch entstehenden Kosten belaufen sich in älteren Studien auf ca. 50 Milliarden DM jährlich. Somit gilt Rückenschmerz als das teuerste Symptom in Industrienationen (Raspe 2012).

Eine mögliche Differenzialdiagnose dieses Kreuzschmerzes ist der Sammelbegriff Sakroiliakalgelenk (SIG)-Syndrom, unter dem sämtliche pathologische und/ oder schmerzauslösende Prozesse im Bereich des SIG zusammen gefasst werden (Harms 2014). Zur Prävalenz dieses Syndroms gibt es keine eindeutige Datenlage. Vergleichenden Studien von Cohen zufolge liegt sie zwischen 15% und 25% (Cohen 2005).

Ursachen des SIG-Syndroms sind vielfältig und noch nicht komplett geklärt: Neben der häufigen idiopathischen Genese kommen Traumata, degenerative Veränderungen, Infektionen, autoimmune Prozesse, onkologische, muskuloskelettalen und durch Schwangerschaft induzierte Ursachen in Frage (Hansen and Helm 2003, Dreyfuss, Dreyer et al. 2004, Cohen 2005, Kayser 2008, Harms 2014). Ausstrahlende Schmerzen in die Extremitäten deuten dabei auch auf eine neuronale Schmerzeteiligung hin (Baron and Binder 2004).

Vor allem die idiopathischen Genesen können zu einer diagnostischen Verunsicherung beitragen, sodass das SIG als Schmerzursache bei Kreuzschmerzen immer noch selten differenzialdiagnostisch einbezogen wird (Hansen and Helm 2003). Neben den Wissensdefiziten über das SIG als nozizeptive Struktur erschwert auch das komplexe biomechanische Zusammenspiel des SIG und den umliegenden Strukturen das Verständnis der

Pathologie des Schmerzes. Gleichzeitig ist die Innervation des SIG nicht geklärt, obwohl sie einen möglichen therapeutischen Ansatzpunkt bei SIG-Schmerzen darstellt. Dies stellt auch auf therapeutischer Ebene eine Verunsicherung dar und zeigt, dass die Innervation des SIG eine klinische Relevanz besitzt.

Die wenige, teils widersprüchliche Literatur über die SIG-Innervation ist dabei nur teilweise mit dem durchaus erfolgreichen schmerztherapeutischen Vorgehen bei Injektionsverfahren in diesem Bereich in Einklang zu bringen. Die Aussagen reichen von Versorgung durch die Segmente L3 bis S4: Horwitz fand Nerven von S1 bis S2, Ikeda von L5 bis S3, Fortin et al. von S1-S4, Nakagawa et al. von L4 - S2 und Solonen von L3 bis S2 (Horwitz 1939, Solonen 1957, Nakagawa 1966, Ikeda 1991, Fortin, Kissling et al. 1999).

Hinsichtlich der Nerven, die die Fasern der oben genannten Segmente transportieren, wird ebenfalls eine weite Palette vorgetragen, wobei noch zwischen ventraler und dorsaler Versorgung zu unterscheiden ist (Horwitz 1939, Solonen 1957, Nakagawa 1966, Ikeda 1991, Fortin, Kissling et al. 1999). Weit zurückliegende Publikationen nennen dabei den N. obturatorius , N. gluteus superior sowie direkte Äste des Plexus lumbosacralis (Solonen 1957, Cunningham and Romanes 1964).

Bestätigungen fehlen jedoch häufig. Einige Ergebnisse werden durch spätere Arbeiten in Frage gestellt. So zum Beispiel auch die Ergebnisse von Solonen (1957), die durch Untersuchungen von Fortin et al. (1999) und Grob et al. (1995) widerlegt wurden (Grob, Neuhuber et al. 1995, Fortin, Kissling et al. 1999).

Aufgrund dieses unzureichenden Wissenstandes und vor dem Hintergrund der enormen klinischen Bedeutung der Innervation des SIG war es Ziel dieser Studie, die dorsale Innervation des SIG detaillierter zu untersuchen.

Auf Grundlage der Ergebnisse soll so mehr Gewissheit über die Anatomie des SIG und potenzielle Schmerzquellen erhalten werden. Dadurch stellt die Arbeit einen Beitrag zur Optimierung therapeutischer Vorgehensweisen bei SIG-Schmerzen bei.

1.3 Ziele der Arbeit

In der nachfolgenden Arbeit sollten folgende Fragestellungen geklärt werden:

1. Aus wie vielen Segmenten erfolgt eine dorsale Innervation des SIG? Gibt es eine dorsale lumbale Versorgung?
2. Gibt es spezielle Versorgungsmuster?
3. Können durch die Untersuchung neue Schmerzquellen und therapeutische Ansatzpunkte gefunden werden?

In der anschließenden mikroskopischen Untersuchung wurden nachfolgende Fragen zusätzlich beantwortet:

1. Welche Beschaffenheit weisen die Bänder auf bzw. fallen Besonderheiten auf?
2. Welche Eigenschaften wiesen die Nerven auf?
3. Welchen Verlauf nehmen die Nerven im Ligament?
4. Sind rezeptive Einheiten im Ligament sichtbar?
5. Finden sich durch die histologische Untersuchung anatomische Korrelate, die die Wirksamkeit therapeutischer Infiltrationsmaßnahmen erklären können?

Zur Beantwortung dieser Fragen wurden bei menschliche Körperspenden makroskopisch auffindbaren dorsalen Nerven aufgesucht, die das SIG versorgen, zu ihren Ursprungssegmenten zurück verfolgt und mit der Literatur verglichen.

Zusätzlich wurden drei aufgefundene Nerven und die von ihnen durchzogenen Gelenkbänder histologisch und immunhistochemisch untersucht, um eine sensible Innervation sicher zu stellen und Rückschlüsse auf die Funktion der Nerven ziehen zu können.

Weiterhin wurde aus diesen Ergebnissen didaktisches Material zur Veranschaulichung der dorsalen Innervation des SIG erstellt.

1.4 Theorie und Grundlagen

1.4.1 Anatomische Vorbetrachtung

Das Sakroiliakgelenk (Articulatio sacroiliaca) ist die knöchern Verbindung zwischen dem Os sacrum und Os ilium (Hansen and Helm 2003). Im Transversalschnitt durch das Becken füllt es dabei nicht den kompletten Raum zwischen Os sacrum und Os ilium aus, sondern befindet sich lediglich im ventralen Knochenzwischenraum, während der dorsale Raum durch Bänder überbrückt wird (von Luschka 1864, Resnick, Niwayama et al. 1975, Dreyfuss, Cole et al. 1995).

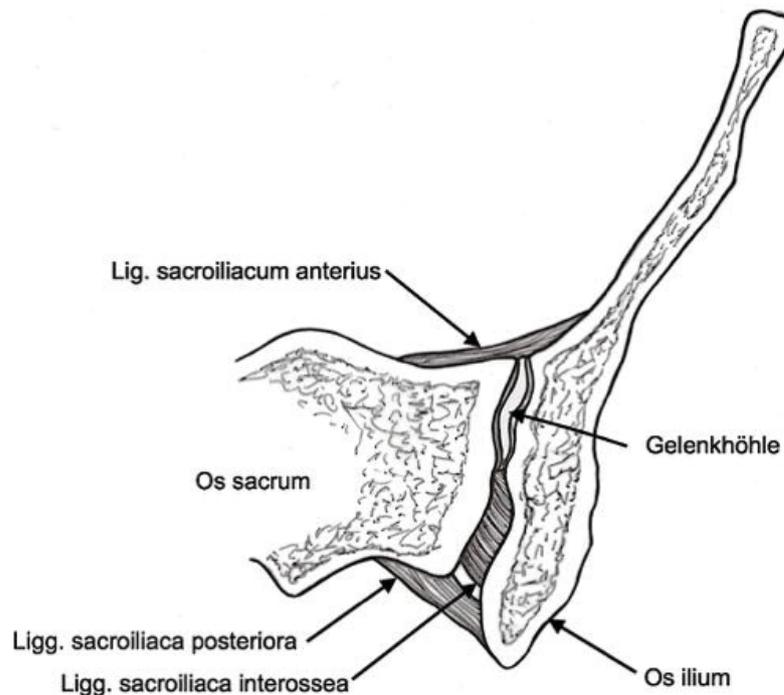


Abb. 1: SIG im Transversalschnitt.

Als synoviales Gelenk mit zwei miteinander artikulierenden, knorpeligen Gelenkflächen, einer Gelenkkapsel, Synovialmembranen und Bewegungsmöglichkeiten zwischen den Gelenkflächen erfüllt es die Charakteristika einer klassischen Diarthrose (Brooke 1924, Macdonald 1952, Resnick, Niwayama et al. 1975, Bowen and Cassidy 1981, Brunner, Kissling et al. 1991, Montandon, Bitencourt Costa et al. 2007).

Es handelt sich dabei um das größte Axialgelenk des menschlichen Körpers (Dreyfuss, Dreyer et al. 2004), das Rotationsbewegungen bis 4° und Translationsbewegungen bis 8 mm zulässt (Goode, Hegedus et al. 2008). Seine Hauptbewegungen liegen jedoch in der Nutation (Vorwärtsskipfung des Os sacrum gegenüber dem Os ilium) und Counternutation (Rückwärtsskipfung des Os sacrum gegenüber dem Os ilium) (Dreyfuss, Cole et al. 1995, Dreyfuss, Dreyer et al. 2004, Vleeming 2006).

Da die Beweglichkeit des SIG durch den mächtigen dorsalen Bandapparat jedoch stark eingeschränkt ist, wird es in der Literatur auch als Amphiarthrose bezeichnet (Brooke 1924, Brunner, Kissling et al. 1991, Benninghoff and Drenckhahn 2008, Kayser 2008). Dieser dorsale Bandapparat ist ein notwendiger Bestandteil der Verbindung zwischen Os ilium und Os sacrum und wurde in einer sehr weit zurückliegenden Studie sogar als sacroiliacale und festeste Syndesmose des menschlichen Körpers bezeichnet (Fick 1904).

An der Bildung der ohren- bis L- förmigen Gelenkflächen (Facies auricularis) des SIG sind am häufigsten der erste bis dritte Sakralwirbel beteiligt (Fick 1904, Martin 1928, Schunke 1938). Dabei stehen die Gelenkflächen nicht parallel zueinander, sondern senkrecht im Raum und konvergieren nach dorsal (Fick 1904, Martin 1928). Sie entwickeln sich in ihrer gesamten Morphologie bezüglich Gelenkform, Oberfläche und Neigungswinkeln inter- und intraindividuell, wodurch sich abhängig von Bewegungen, Geschlecht, Größe und Gewicht deutliche Unterschiede ergeben (Solonen 1957, Bellamy, Park et al. 1983, Bernard and Cassidy 1991, Brunner, Kissling et al. 1991).

Aufgrund der Gelenkform und der Lastübertragung des gesamten oberen Körpergewichts ist ein besonderer Halte- und Stützapparat notwendig (Snijders, Vleeming et al. 1993, Snijders, Vleeming et al. 1993, Vleeming 2006, Standing 2015). Dieser besteht einerseits aus einer komplexen Verzahnung der Gelenkflächen untereinander, andererseits aus einem mächtigem dorsalem Bandapparat und der angrenzenden Muskulatur:

Die Verzahnung der Gelenkflächen entwickelt sich mit Beginn der Pubertät (Bowen and Cassidy 1981). Sowohl die sakralen als auch die iliakalen Gelenkflächen zeigen viele konkave und konvexe Unebenheiten, die in die gegenüberliegenden, korrespondierenden Gelenkflächen passen. So entsteht eine komplexe Verzahnung der Gelenkflächen untereinander, durch die es zu eine Erhöhung des Formschlusses und Bildung eines Verriegelungsmechanismus kommt (von Luschka 1864, Schunke 1938, Bowen and Cassidy 1981, Brunner, Kissling et al. 1991, Bogduk 2005, Forst, Wheeler et al. 2006, Vleeming 2006).

Eine weitere Sicherung erfährt das Gelenk durch zahlreiche umliegende Bänder und Muskeln, die unter Einschränkungen des Bewegungsausmaßes die Sicherung des SIG auch bei Belastung und Bewegungen ermöglichen (Hansen and Helm 2003, Vleeming 2006, Ombregt 2013). Dabei strahlen die Bänder sowohl in die vordere als auch hintere Gelenkkapsel ein, sodass zwischen Bänder und Kapsel häufig nicht mehr exakt differenziert werden kann (Fick 1904, Bowen and Cassidy 1981, Bogduk 2005). Hierbei sind die Ligamenta sacroiliaca anteriora et interosseum et posteriora als auch das Ligamentum sacrospinale, Lig. sacrotuberale und Lig. iliolumbale anzuführen (siehe Abbildung 2) (Solonen 1957, Luk, Ho et al. 1986, Putz and Muller-Gerbl 1992, Pool-Goudzwaard, Kleinrensink et al. 2001, Pool-Goudzwaard, Hoek van Dijke et al. 2003, Bogduk 2005, Vleeming 2006, Eichenseer, Sybert et al. 2011, Le Goff, Berthelot et al. 2011, Ombregt 2013).

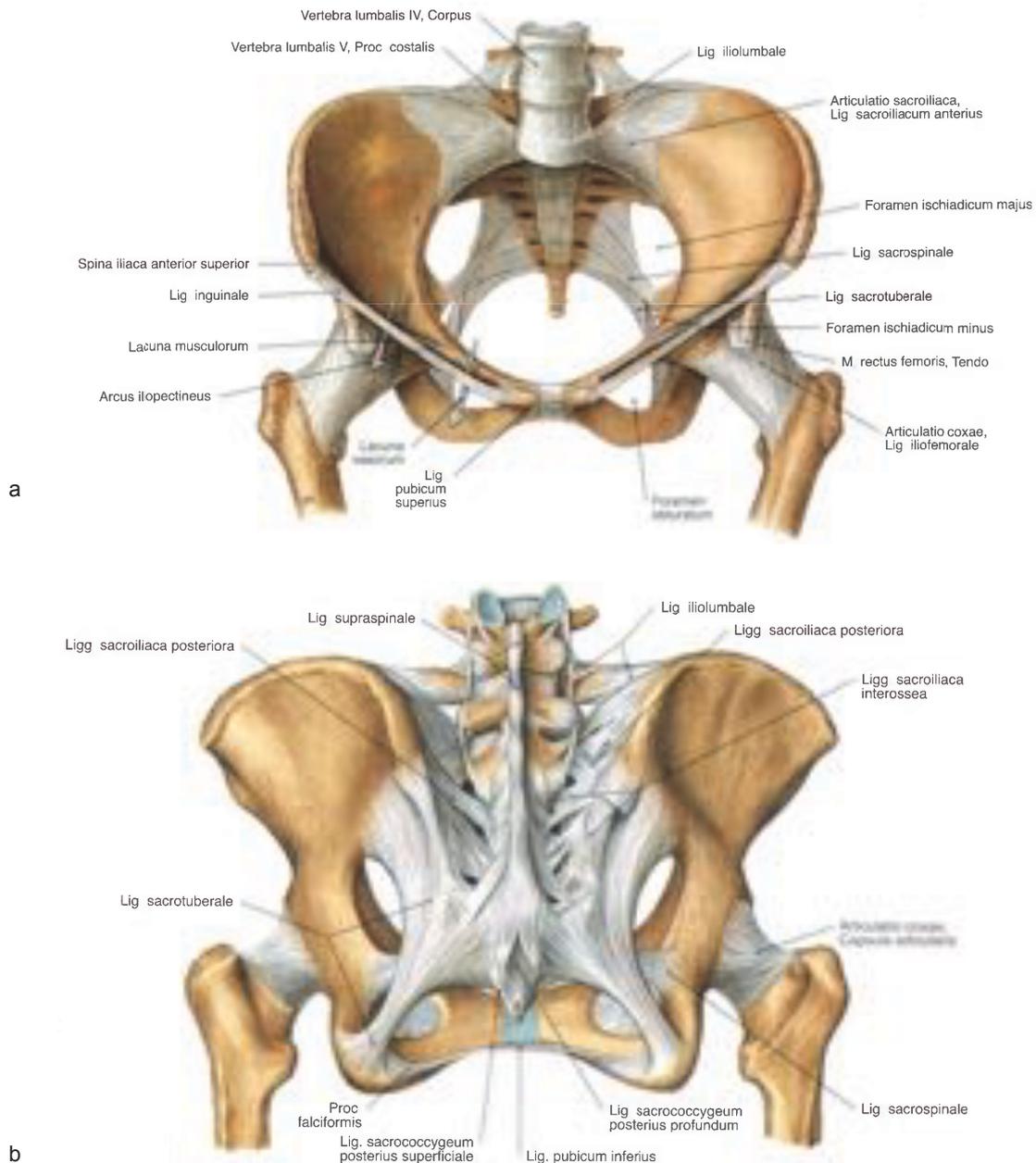


Abb. 2: Die Bänder des SIG: a: Ansicht von ventral. b: Ansicht von dorsal. Mit freundlicher Genehmigung von Elsevier (Paulsen et Waschke 2017).

Mit den oben aufgeführten Bändern stehen in direkter funktioneller Verbindung oder unmittelbarer Nachbarschaft zahlreiche Muskeln (Luk, Ho et al. 1986, Snijders, Vleeming et al. 1993, Vleeming, Pool-Goudzwaard et al. 1996, Fujiwara, Tamai et al. 2000, Pool-Goudzwaard, Kleinrensink et al. 2001, Cohen 2005, Ombregt 2013), die den größten und kräftigsten Muskelgruppen menschlichen Körpers angehören (Dreyfuss, Cole et al. 1995, Ombregt 2013).

Dadurch nimmt die Aktivität dieser Muskeln Einfluss auf die Stabilität und die Beweglichkeit des SIG (Snijders, Vleeming et al. 1993, Dreyfuss, Cole et al. 1995, Bogduk 2005, Cohen 2005, Vleeming 2006). Dazu gehören der M. gluteus maximus, M. psoas, M. quadratus lumborum, M. abdominus obliquus, M. piriformis, M. coccygeus, M. biceps femoris, M. latissimus dorsi, M. erector spinae sowie die Fascia thoracolumbalis (Fick 1904, Dreyfuss, Cole et al. 1995, Vleeming, Pool-Goudzwaard et al. 1996, Cohen 2005, McGrath and Zhang 2005, Vleeming 2006, Ombregt 2013).

Die SIG weisen mit zunehmendem Alter progredient Degenerationen auf (Macdonald 1952, Resnick, Niwayama et al. 1975, Bowen and Cassidy 1981), wobei sich schon beim zweijährigen Kind eine Abnutzungen der Gelenkknorpel zeigt (Carter and Loewi 1962). Die Prävalenz von Osteophyten, intraartikulären, fibrösen Bänder und Kalbablagerungen in der Gelenkkapsel steigt dabei besonders stark ab der sechsten und siebten Lebensdekade (Schunke 1938, Macdonald 1952, Resnick, Niwayama et al. 1975, Bowen and Cassidy 1981, Walker 1986). Trotz dieser athrotischen Veränderungen sind Ankylosen der Gelenke eine Seltenheit, sodass die Beweglichkeit der Gelenke bis in das hohe Alter erhalten bleibt (Stewart 1984, Vleeming, Van Wingerden et al. 1992).

1.4.2 Innervation des SIG

Die exakte Innervation des SIG ist unklar und stellt daher eine Streitquelle dar (Cohen and Abdi 2003, Bogduk 2005, Cohen 2005). In der Literatur lassen sich insgesamt nur wenige Abgaben zur Innervation des SIG finden, die sich gleichzeitig teilweise widersprechen (Bogduk 2005).

Ein großes Problem stellt die Tatsache dar, dass viele der nur spärlich vorliegenden Daten aus Übersichtsarbeiten ohne korrekte Quellenangabe entstammen oder nicht auf anatomischen Studien beruhen. Weiterhin finden sich in ausführlichen Standardlehrwerken der Anatomie wie dem „Benninghoff“ keine Informationen über die Innervation des SIG (Benninghoff and Drenckhahn 2008). Laut Fortin gäbe dies den Anschein, als ob das Gelenk keine Innervation

besäße oder unwichtig wäre (Fortin, Kissling et al. 1999). Beide Ansichten sind jedoch fraglich.

Die wenigen vorhandenen Aussagen über die nervale Versorgung des SIGs reichen insgesamt von den Segmenten L1 bis S4 und nennen dazu noch eine große Palette verschiedener Nerven, wobei noch zwischen ventraler und dorsaler Versorgung zu unterscheiden ist:

In einer Übersichtsarbeit zu Beginn des 20. Jahrhunderts beschrieb Fick eine Versorgung des SIGs durch alle benachbarten Nerven und nannte dabei den Plexus lumbosacralis, den N. obturatorius, den N. gluteus superior und die dorsalen Spinalnerven S1 und S2, ohne dabei auf Quellen einzugehen (Fick 1904). In Cunningham's Textbook of Anatomy wird von einer Innervation direkt durch den Plexus sacralis, durch Rami dorsalis von S1 und S2 sowie durch den N. obturatorius und den N. gluteus superior berichtet. Allerdings wird auch in diesem Buch nicht auf zitierte Quellen verwiesen (Cunningham and Romanes 1964).

Bezüglich einer Versorgung durch den N. obturatorius bestanden große Meinungsunterschiede in der Literatur (Solonen 1957). Nach Solonen war Hilton (Hilton 1879) der erste, der von einer Innervation des SIGs durch den N. obturatorius sprach und von vielen nachfolgenden Autoren zitiert wurde. Solonen selbst fand bei der Untersuchung von 18 SIG an Leichenpräparaten keine Versorgung aus diesem Nerv, jedoch aus dem N. gluteus superior, aus ventralen Ästen von L4 bis S2 (einmal auch aus L3) und aus den dorsalen Spinalästen von S1 und S2. Dabei merkte er an, dass die Innervation seitenspezifisch war (Solonen 1957).

Eine anatomische Studie von 1966 an 14 Japanern stellte eine anteriore Versorgung des Gelenks durch ventrale Äste aus L5 und S1 sowie aus dem N. gluteus superior fest, dorsal durch laterale Äste aus L5 bis S2 (Nakagawa 1966). Aus einer anderen Studie mit 18 Leichenpräparaten ging eine Versorgung ventral durch die Rami ventralis aus L3 bis S3 sowie Äste des Plexus sacralis und dorsal durch posteriore Äste aus L5, S1, S3 sowie dem

Plexus sacralis hervor. Dabei wiesen die gesuchten Nerven eine Dicke von 0,292 bis 0,997 mm auf (Ikeda 1991).

Fortin et al. stellten in ihrer Analyse eine Versorgung durch dorsale Äste aus S1 bis S4 fest. Diese myelinisierten und unmyelinisierten Nervenfasern versorgten dabei auch die ventrale Gelenkkapsel (Fortin, Kissling et al. 1999).

Zu vergleichbaren Ergebnissen sind auch Grob et al. an acht Präparierkursleichen und zwei Feten gekommen. Sie fanden eine Versorgung des Gelenkes mittels dorsaler Äste aus S1 und S2 sowie eine Versorgung der Gelenkbänder durch Rami dorsalis aus S1 bis S4. Dabei verliefen die Nerven unter Abgabe kleiner Äste zwischen oberflächlichen und tiefen Bandzügen des Lig. sacroiliacum dorsale longum hindurch, traten schließlich durch die Ursprungssehnen des M. gluteus maximus hindurch und gelangten als Nn. cluneei medii an die Haut.

Eine ventrale Innervation durch Äste aus dem Plexus sacralis oder N. obturatorius lehnten sie strikt ab und verwiesen auf Verwechslungen mit Gefäßen (Grob, Neuhuber et al. 1995).

Bei einer späteren anatomischen Untersuchung von 12 SIG beschrieben Cox und Fortin eine Innervation durch den N. gluteus superior und dorsale Äste aus L5 bis S1 (Cox and Fortin 2014). Yin et al. fanden bei der Analyse von drei Leichenpräparaten einer Versorgung der Gelenkkapsel aus S1 bis S4 und in einer klinischen Studie an Patienten eine zusätzliche Versorgung durch L5 (Yin, Willard et al. 2003).

In einer Pilotstudie an 18 Patienten mit SIG-Schmerzen konnten Cohen et. al durch eine Betäubung der Rami dorsales aus L4 und L5 sowie der Rami laterales aus S1 bis S3 die SIG- Beschwerden lindern, wodurch indirekt eine Innervation des SIG aus diesen Segmenten bestätigt wurde (Cohen and Abdi 2003).

Die nachfolgende Tabelle stellt die Ergebnisse der oben angeführten anatomischen und klinischen Studien zusammenfassend dar:

Tab. 1: Innervation des SIG in verschiedenen Studien

Autor	Rami ventralis	Rami dorsalis	Nerven
Nakagawa 1966	L5- S1	L5 - S2	N. gluteus sup.
Ikeda 1991	L3 - S3	L5, S1, S3	Äste des Plexus sacralis
Fortin, Kissling et al. 1999	Nein	S1 – S4	Nein
Grob, Neuhuber et al. 1995	Nein	S1 – S2	Nein
Cox and Fortin 2014	Nicht untersucht	L5 –S1	N. gluteus sup.
Yin, Willard et al. 2003	Nicht untersucht	L5, S1- S4	Nicht untersucht
Cohen and Abdi 2003	Nicht untersucht	L4- S3	Nicht untersucht

1.4.2.1 Innervation tierischer SIG

Bei Tierversuchen an Ratten entdeckten Unimura et al. mithilfe von Neurotracern, die in die Nähe des linken SIGs gegeben wurden, eine Innervation über die Hinterwurzeln von L1 bis L6. Eine weitere, ebenfalls Ratten untersuchende Studie identifizierte eine Versorgung der ventralen Teile des SIGs durch Rami anteriores aus L1 bis S2. Dabei verliefen die Äste aus L1 bis L3 mit dem Truncus sympathicus zusammen nach kaudal. Die hinteren Anteile des SIGs wurden von Rami dorsales aus L4 bis S2 erreicht (Murata, Takahashi et al. 2001)

1.4.3 Versorgung der Gelenkbänder

In einer Studie an 16 Leichenpräparaten haben McGrath und Zhang dorsale Äste aus S1 bis S4 aufgefunden, die das Ligamentum sacroiliacum posterio longum versorgen (McGrath and Zhang 2005). Grob et al. beschrieben ebenfalls eine Versorgung der dorsalen Bänder durch Rami dorsales aus S1 bis S4 (Grob, Neuhuber et al. 1995).

Ähnliche Ergebnisse erhielt auch Horwitz in seiner Studie an 114 Körperspenden, die eine Versorgung der dorsalen Ligamente des SIGs durch die lateralen Rami aus S1, S2 und einen zusammengesetzten Nerven aus S1 bis S4 ergab (Horwitz 1939).

Szadek et al. stießen bei der Analyse von 5 Leichenpräparaten auf kleine, ventrale Nervenäste aus L4 und L5, die in den vorderen Bandapparat des SIG zogen (Szadek, Hoogland et al. 2008).

1.4.3.1. Histologische Untersuchungen der Gelenkkapsel- und Bänder

Szadek et al. fanden neben der ventralen Versorgung der Gelenkbänder in anschließenden histologischen Untersuchungen in den Ligg. sacroiliaca anterior et interosseum Mechanosensoren und einzelne Nervenfasern, an denen die Substanz P sowie das *Calcitonin Gene-Related Peptid* (CGRP) nachgewiesen werden konnte (Szadek, Hoogland et al. 2008). Substanz P und CGRP sind Neurotransmitter, die an der Schmerzübertragung beteiligt sind (van Rossum, Hanisch et al. 1997, Snijdelaar, Dirksen et al. 2000). Dies deutet darauf hin, dass die Bänder an der Entstehung von Kreuzschmerzen partizipiert sind (Eichenseer, Sybert et al. 2011). Weitere Studien zeigten in den Bändern des SIGs freie Nervenendigungen (Varga, Dudas et al. 2008), die laut Brisby typischerweise auf Druck, Deformitäten oder chemische Reize reagieren und diese über myelinisierte A-Fasern und unmyelinisierte C-Fasern an das zentrale Nervensystem weiterleiten (Brisby 2006).

Auch andere histologische Untersuchungen wiesen Nervenfasern und ihre Enden in der Gelenkkapsel und den Bändern des SIGs nach (Nakagawa 1966, Ikeda 1991, Fortin, Kissling et al. 1999, Sakamoto, Yamashita et al. 2001, Vilensky, O'Connor et al. 2002). Die mikroskopisch untersuchten Nervenfasern wiesen eine Dicke von bis zu 50 µm auf, kamen myelinisiert und unmyelinisiert vor und wurden von kleinen Gefäßen begleitet (Nakagawa 1966, Fortin, Kissling et al. 1999). Fortin et al. suggerierten, dass das SIG durch diese Schmerzfasern empfindlich auf Entzündungsreaktionen, Tragen schwerer

Lasten und extreme Bewegungen sein kann, wodurch es als Schmerzquelle in Betracht gelangt (Fortin, Kissling et al. 1999).

Vilensky differenzierte mithilfe einer Gold-Chlorid-Technik in den Gelenkbändern Mechanosensoren vom Typ Vater Pacini-Körperchen (Typ 2a und 2b) sowie einen weiteren nicht umkapselten Mechanosensor, wobei keine genauere Differenzierung möglich war (Vilensky, O'Connor et al. 2002). Sakamoto et al. fanden in den dorsalen Ligamenten von Katzen ebenfalls Mechanorezeptoren. Ihr Hauptaugenmerk lag jedoch bei ihrer Analyse auf der Tiefensensibilität der sacroiliakalen Gelenkkapsel bei Katzen. Dabei entdeckten sie in der Kapsel 26 und in benachbarten dorsalen Muskeln 3 afferente Mechanosensoren, deren Vorkommen mit zunehmender Nähe zum Gelenk immer häufiger wurde. Insgesamt waren 28 der 29 gefundenen Rezeptoren Nozirezeptoren. Lediglich ein Rezeptor diente der Propriozeption. (Sakamoto, Yamashita et al. 2001).

2. Material und Methoden

2.1 Makroskopische Untersuchung

2.1.1 Präparatauswahl

Die makroskopische Untersuchung von 10 in wässriger Formaldehyd-Lösung fixierten Körperspenden bildete die Grundlage der vorliegenden Arbeit im Institut der Anatomie I der Heinrich Heine Universität Düsseldorf. Hierzu wurde am 23. März 2015 ein positives **Ethikvotum** mit dem **Aktenzeichen 5021** vergeben. Die untersuchten Präparate stammten von Körperspendern, die ihren Körper zu Lebzeiten an das anatomische Institut zu Ausbildungs- und Forschungszwecken vermacht hatten. Voraussetzungen waren keine schweren Körperversetzungen, keine Infektionen nach Infektionsschutzgesetz, keine pathologischen oder gerichtsmedizinischen Obduktionen sowie keine Organspenden.

Die präparierten Körperspender waren im Bereich der gesamten Lendenwirbelsäule und des SIGs unversehrt. Keines der Präparate zeigte orthopädische oder chirurgische Eingriffe an der Wirbelsäule, allerdings fanden sich in 30% der Fälle degenerative oder krankhafte Veränderungen wie Osteophyten und Skoliosen.

Neun von zehn Körperspenden wurden vor der Präparation im Studentenunterricht genutzt.

Alle neun entstammten aus dem studentischen Bewegungsapparat-Kurs, sodass vor der Untersuchung Haut und subkutanes Fettgewebe schon entfernt worden waren, aber beide Sakroiliakalgelenke sowie die für die Präparation nötige Muskulatur vollständig erhalten waren.

Drei dieser neun Körperspenden waren zusätzlich noch im studentischen Situs-Kurs präpariert worden. Hier war das rechte Bein so abgesetzt, dass nur noch die linken Körperhälften für die Präparation geeignet waren.

Beim zehnten Körperspender handelte es sich um eine erstmalige Präparation, sodass Haut und alle tieferen Gewebeschichten noch entfernt werden mussten.

Insgesamt ergab sich so eine Anzahl von 17 präparierten SIGs.

Dabei handelte es sich um 3 weibliche und 7 männliche Präparate, die zu ihrem Todeszeitpunkt zwischen 61 und 101 Jahre alt waren und allesamt eines natürlichen Todes verstorben sind (siehe Tabelle 2).

Tab. 2: Alters- und Geschlechtsverteilung der untersuchten Präparate

Nummer	Geschlecht	Alter
03/13	männlich	69
77/11	männlich	61
33/12	männlich	88
55/12	weiblich	87
01/13	männlich	69
87/13	männlich	73
81/12	weiblich	75
09/13	weiblich	101
02/14	männlich	83
10/15	männlich	80
Mittelwert	30% weiblich 70% männlich	78, 6

2.1.2 Fixierung der Körperspenden mittels Formaldehyd

Nach der Leichenschau und Entscheidung über die spätere Verwendung fand im Institut für Anatomie 1 die Rasur der kompletten Körperbehaarung statt.

Da die Haltbarkeit der Körperspenden wie bei jedem organischen Material begrenzt ist, wurden diese mittels Alkohollösung aufbereitet:

Zunächst erfolgte eine Behandlung der Leichname mit Perfusionsfixierung:

Die Arteria radialis wurde am Handgelenk aufgesucht und über diese ein Katheter eingeführt, der bis über den Ellenbogen hinaus vorgeschoben wurde. An diesen Katheter wurde ein Injektionsgerät (Hersteller: Thalheimer Kühlung GmbH und Co, Ellwangen, Deutschland, Typ IT- 4) angeschlossen, das ein

Gemisch aus 57% Ethanol, 14% destilliertes Wasser und 29% Formalin (Formaldehyd- Lösung 37%, säurefrei, stabilisiert mit Calciumcarbonat und 10% Ethanol, Hersteller: Merck KGaA, Darmstadt, Deutschland) in das arterielle System pumpfte.

Durch den von dem Injektionsgerät aufgebrauchten Druck trat das im Körperspender verbliebende Blut und die Fixierlösung aus dem arteriellen System in das Interstitium über. Insgesamt dauerte dieser Prozess zwischen 2 bis 24 Stunden. Anschließend wurden die Körperspenden für 6 Monate in einem 4-5 prozentigen Formaldehyd- Bad (Formalin von Merck KGaA, Darmstadt, Deutschland, benutzt in einer selbst hergestellten 4-5% Verdünnung mit destilliertem Wasser) aufbewahrt, in denen die Lagerung für mehrere Jahre erfolgen konnte.

Sobald ein Körperspender präpariert werden sollte, wurde er wieder aus dem Tauchbecken herausgenommen und anschließend für mindestens 8 Stunden gewässert. Bei einer Unterbrechung der Präparation wurde der Körperspender mit Flächendesinfektionsmittel (Incidin Rapid, Hersteller: Ecolab, Düsseldorf, Deutschland) erneut befeuchtet und danach mit einem in Flächendesinfektionsmitteln durchtränkten Leinentuch und einer Plastikfolie eingewickelt, um eine Austrocknung zu verhindern.

Nach der Präparation erfolgte die weitere Aufbewahrung erneut im Tauchbecken.

2.1.3 Verwendete Materialien

Als Trage für das Präparat diente ein mobiler Autopsie- Tisch mit Absauganlage, an denen mit Wechselklingen- Skalpellhaltern (BAYHA-Skalpell-Griffe Nr.1 und 3 von C. Bruno Bayha GmbH, Tuttlingen) und den Wechselklingen Nr. 20 bis 24 derselben Firma präpariert wurde.

Eine 13cm lange, gerade anatomische Pinzette (Norman May, Handel mit medizinischen Geräten, Köln, Deutschland) diente bei der Präparation der Fixierung und dem Verschieben des präparierten Gewebes. Des Weiteren wurde eine Splitterpinzette nach Feilchenfeld mit geriefter Innenfläche benutzt

(Norman May, Handel mit medizinischen Geräten, Köln, Deutschland), die dem Wegzupfen von Gewebe diene.

Zur Fixierung und Verbindung von Gewebe wurde atraumatische Nahtmaterial verwendet (Nathmaterial PGA Resorba, 4/0, 45 cm, Nürnberg).

Papiertücher aus Zellulosefasern dienten dem Aufsaugen überflüssiger Fixierlösung.

Für die Fotodokumentation wurden neben der stumpfen Pinzette auch handelsübliche Stecknadeln herangezogen. Die Messung beziehungsweise Abschätzung der Durchmesser der Nerven erfolgte mithilfe eines Geodreiecks.

2.1.4 Präparation des Rückens

Allgemeine Vorgehensweise

Die Präparation der Körperspenden erfolgte ausschließlich von dorsal. Bei der Vorpräparation wurden zunächst die Haut und das subkutane Fettgewebe entfernt.

Bei neun von zehn Körperspenden war dies schon erfolgt. Lediglich bei einem Präparat musste Haut und Fettgewebe noch entfernt werden. Dabei herauspräparierte Hautnerven wurden mittels Stecknadel markiert und fixiert, da diese durch spätere Verfolgung beim Aufsuchen des Spinalganglions halfen.

Nachdem Haut und Fettgewebe entfernt waren, wurden die Muskelfaszien der autochthonen Rückenmuskulatur entnommen. Besondere Vorsicht musste dabei im Bereich der Glutealregion gewahrt werden, da in diesem Bereich mit Entfernen der Faszien schnell die Sehnen mitentfernt werden konnten und die direkt darunter liegenden dorsalen Sakralnerven so beschädigt werden konnten.

Nach Freilegung der Muskulatur begann zur besseren Orientierung die Aufsuchung des letzten Brustwirbels anhand der Rippen. Hier wurde die gesamte Muskulatur punktuell bis auf den Wirbelknochen entfernt, um die Tiefe der Muskulatur besser abschätzen zu können.

Anschließend erfolgte das Durchpräparieren des gesamten M. erector spinae vom ersten Lumbalwirbel bis zum Os coccygis.

Auf Höhe des ersten Lumbalwirbels beginnend wurden zunächst die oberflächlichen Muskelbündel entfernt und dabei auf Nerven untersucht. Diese Kleinstarbeit war erforderlich, da die Nerven, die das SIG innervieren, direkt durch die Muskulatur ziehen. Aber auch das Auffinden von motorischen Fasern brachte einen Vorteil mit sich, da durch Verfolgung derer Verläufe die jeweiligen Spinalganglien aufgesucht werden konnten. Dabei gefundene Nerven wurden mithilfe der anatomischen Pinzette fixiert und anschließend mithilfe der Splitterpinzette und Skalpell entlang ihrer Verläufe freipräpariert.

Fand sich in der durchpräparierten Muskulatur kein Nerv, wurde vorsichtig bis zum Spinalganglion herunter präpariert und die dort austretenden Nerven bis in ihr Versorgungsgebiet verfolgt. Sobald ersichtlich wurde, dass es sich bei dem verfolgten Nerven um einen rein motorischen Nerv oder einen Hautnerven handelt, folgte die Einstellung der Verfolgung des Nervens an dieser Stelle, da der Nerv keine Bedeutung für die gesuchte Innervation des SIG hatte.

Bei einigen Körperspenden fanden sich in der Muskulatur kleine Areale Fettgewebe, die mithilfe der anatomischen Pinzette vorsichtig weggezupft wurden.

Im Bereich jedes Wirbels wurde die gesamte Muskulatur auf diese Art und Weise schließlich entfernt, sodass nur noch Knochen und zum SIG ziehende Nerven übrig blieben. Teilweise ließen sich dabei die Sehnen nicht komplett entfernen, dass diese bis auf ein Minimum am Knochen abgeschnitten wurden. Anschließend wurden die gefundenen Nerven mittels Stecknadeln für ein schnelleres Wiederfinden und die spätere Fotodokumentation markiert.

Im Bereich des Kreuzbeines befand sich größtenteils keine Muskulatur mehr, sondern nur noch Sehnen des M. erector spinae und Ligamente. Die posterioren Sakralnerven traten hier zwischen extrem straffen

Bindegewebssträngen und Sehnenblättern in einer minimalen Schicht Fettgewebe aus den Foramina sacralia posteriora aus.

An diesen Stellen wurden die obersten Bindegewebschichten vorsichtig angeritzt und anschließend vorsichtig Stück für Stück entfernt. Da teilweise die Nerven auch mit diesen Faszienblättern verbunden waren, mussten sie in diesem Bereich behutsam von den Faszien gelöst werden.

Die aufgefundenen Sakralnerven wurden dann wie die lumbalen Nerven zuvor in ihrem Verlauf weiter verfolgt und letztlich mit Stecknadeln markiert.

Auf ein Entfernen der Beckenschaufeln wurde verzichtet, da die untersuchten Becken hierbei einer zu starken Destruktion unterlegen hätten: Beim möglichst schonenden Versuch, die Beckenschaufel wegzuschlagen, wurde der Bandapparat so stark beschädigt, dass eine Verfolgung der sehr dünnen Nerven zum SIG anschließend nicht mehr möglich war.

Die gefundenen Nerven zogen sichtbar in den Bandapparat des dorsalen SIG hinein, sodass eine Innervation des SIG und seines Bandapparates angenommen werden konnte.

Während der Präparation wurde eine Lupenbrille verwendet.

Entnahme von Gewebeproben

Nach der makroskopischen Untersuchung wurden drei interessante Stellen zunächst fotografisch dokumentiert und anschließend für die histologische Aufbereitung im Histologielabor des Instituts für Anatomie 1 der HHU entnommen. Die Zwischenlagerung bis zur histologischen Aufarbeitung erfolgte in einer 5% Formaldehyd- Lösung.

Präparation bei Veränderungen der Wirbelsäule

Während der Untersuchung sind fehlgeformte Wirbelsäulen mit Skoliosen sowie verstärkten Lordosen oder Kyphosen aufgefallen. Diese Verformungen erschwerten zwar teilweise die Zugänglichkeit zum gewünschten Präpariergebiet, machten diese aber nicht unmöglich.

Des Weiteren traten bei einem Präparat Osteophyten im Bereich der Lendenwirbelsäule auf, die lediglich freipräpariert, aber nicht mit Hammer und Meißel entfernt wurden.

2.1.5. Fotodokumentation und – Bearbeitung

Die Dokumentation der Ergebnisse und Arbeitsschritte wurden mit Hilfe einer Digitalkamera von Panasonic (Panasonic Lumix DMC-TZ25, 12,1 Megapixel, 16fach optischer Zoom mit 24mm Leica DC Weitwinkel-Objektiv; Panasonic Deutschland, Hamburg, Deutschland) durchgeführt. Zur Fixierung und Markierung der Nerven wurden dabei Stecknadeln sowie anatomische Pinzetten genutzt.

Die Speicherung erfolgte als jpg- Dateien.

Die Bildbearbeitung erfolgte mit dem Mac- Programm Vorschau der Mac-Version mac-OS Sierra 10.12.4.

2.2 Histologische Aufarbeitung der Gewebeproben

2.2.1 Herstellung der histologischen Präparate

Die Gewebeproben wurden bis zur histologischen Aufarbeitung in das Histologielabor des Instituts für Anatomie 1 der HHU in fünfprozentiger Formaldehydlösung gelagert.

Im Labor erfolgte zunächst eine einwöchige Wässerung der Proben, wobei das Wasser täglich durch frisches Wasser ersetzt wurde.

Nach dem anschließenden Zuschneiden der Proben mithilfe eines Messers erfolgte die Einlegung in eine aufsteigende Alkoholreihe zur Entwässerung. Dabei wurden die Proben für jeweils 48 Stunden in die aufgeführten Alkohole (Hersteller: Carl Roth GmbH und Co KG, Karlsruhe, Deutschland) nach folgender Reihenfolge eingelegt:

- 50% Isopropanol
- 70% Isopropanol
- 90% Isopropanol
- 96% Isopropanol
- zweimal in > 99,5% 2-Propanol

Im Anschluss wurden die Proben zweimal für jeweils zwei Tage unter Bewegung in das Intermedium Roticlear® (Hersteller: Carl Roth GmbH und Co KG, Karlsruhe, Deutschland) gegeben. Für die Einbettung gelangten die Proben viermal für jeweils ein bis zwei Tage in 60°C heiße Paraffinbäder (Paraplast Plus ©, McCormick Scientific, Leica Biosystems Richmond, INC, USA).

Darauf folgte das Gießen der Paraffinblöcke, um die Präparate anschließend zu zuschneiden: Hierzu wurde flüssiges Paraffin in eine metallische Gießformen gegeben, die auf einer 70 bis 80°C heißen Arbeitsplatte positioniert waren. Die aus dem Paraffinbad genommen Proben wurden daraufhin umgehend in die Gießformen gegeben und noch einmal mit flüssigen Paraffin übergossen. Anschließend wurden sie zum Auskühlen auf eine Eisplatte gelegt. Ein weiteres Auskühlen fand im Anschluss bei Zimmertemperatur für zwei bis drei Tage statt, wodurch die Präparate schnittbereit wurden.

Zum Schneiden wurde ein Mikrotom der Firma Microm (Walldorf, Deutschland) vom Typ HN360 verwendet, mit dem eine Serie von vier 5µm dicken Schnitten von jedem Präparat angefertigt wurde. Diese wurden anschließend auf die Objektträger aufgebracht.

2.2.2 Histologische Färbung

Die histologischen Präparate wurden entweder durch eine Hämatoxylin-Eosin (HE)- und Immunhistochemie (IHC)-Färbung angefärbt.

Zunächst wurden die Schnitte auf den Objektträgern in einem 70°C heißen Ofen fixiert. Anschließend wurden sie via absteigender Alkoholreihe entparaffiniert: Dazu gelangten sie jeweils immer drei Minuten der Reihe nach in Xylene (zweimal), 100% 2-Propanol, 90% Isopropanol, 50% Isopropanol (Hersteller: VWR International GmbH, Darmstadt, Deutschland) und zum Schluss in destilliertes Wasser.

Hämatoxylin-Eosin-Färbung

Nach Aufbringen der Präparate auf Objektträger und Deparaffinierung wurden die Schnitte für einige Minuten mit Hämatoxylin sauer nach Mayer (Mayer 1893) behandelt (Hersteller: Carl Roth GmbH und Co KG, Karlsruhe, Deutschland). Es folgte eine Spülung mit Leitungswasser, der sich eine Gegenfärbung mit 0,3-prozentigem, wässrigem Eosin (Hersteller: Merck Millipore, Darmstadt, Deutschland) und einem Schuss Essigsäure anschloss. Anschließend wurden die Dauerschnitte wieder via Leitungswasser ausgewaschen und durch eine aufsteigende Alkoholreihe (50% Isopropanol, 90% Isopropanol, 100% 2-Propanol, Xylene (zweimal); Hersteller: VWR International GmbH, Darmstadt, Deutschland) entwässert. Zum Schluss fand die Benetzung der gefärbten Objektträger mit dem Eindeckmittel DePeX (Hersteller: SERVA, Heidelberg, Deutschland) sowie das Aufbringen der Deckgläschen statt.

Immunhistochemie

Die Immunhistochemie diente in dieser Arbeit dem histologischen Nachweis von Nerven in den Präparaten mithilfe von Antikörpern, die spezifisch an Neurofilamente der gesuchten Neurone binden.

Dazu wurde die mehrstufige ABC ((*Strept-*)*Avidin-Biotin-Complex*)-Methode genutzt (Jansohn and Rothhämel 2012):

Hierbei bindet ein primärer Antikörper spezifisch an die anzufärbenden Antigene. Nach Bindung des ersten Antikörpers bindet an diesen ein zweiter Antikörper, der das Glykoprotein Biotin exprimiert. Darauf folgend wird eine *Streptavidin*-haltige Peroxidase hinzugegeben und bindet an den Biotin-haltigen Antikörper. Durch Zugabe des Substrates der Peroxidase fällt das Substrat nach Inkubation zu einem gebundenen, unlöslichen Niederschlag aus, der anschließend im Mikroskop sichtbar ist und die gesuchten Neurofilamente identifizieren lässt.

Nach Deparaffinierung und Aufbringen der Präparate auf Objektträgern folgte die sogenannte Antigen-Demaskierung. Diese war notwendig, da durch die Formaldehyd-Fixierung die Antigene in den Präparaten denaturiert und quervernetzt waren, wodurch die Bindung der Antikörper an die Antigene behindert wurde.

Um die Reaktivität dieser Antigene zu erhöhen, erfolgte deshalb eine Hitzbehandlung der Objektträger für fünf Minuten in einem haushaltsüblichen Schnellkochtopf in einer Pufferlösung (*Antigen Unmasking Solution*, Hersteller: Vector Laboratories, Burlingame, Californien/ USA).

Anschließend fand eine dreiminütige Spülung der Schnitte mit phosphatgepufferter Salzlösung (PBS; selbsthergestellt aus NaCl, Na₂HPO₄, H₂O₂, KCl, KH₂PO₄) statt.

Damit der gewünschte Farbumschlag nur durch die zugegebene *Streptavidin*-haltige Peroxidase erfolgte, mussten die endogenen Peroxidasen der Präparate zuvor blockiert werden. Dazu wurde jedes Präparat zehn Minuten mit 0,6% H₂O₂ (Hersteller: Carl Roth GmbH und Co KG, Karlsruhe, Deutschland) in haltiger PBS-Lösung bei Raumtemperatur behandelt. Es folgte eine zweimalige Spülung mit PBS für jeweils 5 Minuten.

In einem nächsten Arbeitsschritt fand die Inkubation mit dem monoklonalen primären Antikörper *Anti-h-pNF* (Hersteller: Dako Deutschland GmbH, Hamburg, Deutschland) für 35 Minuten bei Raumtemperaturen statt. Das dabei mit inkubierte Pferde-Serum verhinderte unspezifische Antigen-Antikörperbindungen, indem es sich an unspezifische Bindungsstellen

anlagerte. Durch die Blockierung dieser unspezifischen Bindungen wurden so unerwünschte Hintergrundsignale reduziert.

Nach erneutem dreimaligen Spülung mit PBS für jeweils fünf Minuten wurden Biotin- haltige Anti-Maus-IgG-Antikörper (Hersteller: Vector Laboratories, Burlingame, Californien/ USA) in PBS – Lösung für 45 Minuten bei Raumtemperatur aufgebracht, wonach wieder ein zweimaliges Spülen via PBS für jeweils 5 Minuten statt fand.

Im Anschluss daran erfolgt die Inkubation mit *Streptavidin* HRP (*horseradish peroxidase*)(Hersteller: BioLegend, San Diego, Californien/ USA) für weitere 40 min bei Raumtemperatur und wieder ein nachfolgendes Auswaschen mit PBS (zweimal für jeweils 5 Minuten).

Im nächsten Arbeitsschritt wurde das lösliche Substrat AEC substrate (Hersteller: Vector Laboratories, Burlingame, Californien/ USA) der HRP auf die Objektträger für 5 bis 60 Minuten bei Raumtemperatur aufgetragen, wodurch sich im Rahmen einer Peroxidasereaktion ein unlöslicher, gebundener Niederschlag bildete. Dieser ist im Mikroskop als rötliche bis pinke Farbe erkennbar.

Es folgte eine Spülung mit PBS (2 x 5 Minuten).

Damit die durch IHC angefärbten Areale besser von den nicht angefärbten Arealen differenziert werden konnten, wurde anschließend eine Gegenfärbung der nicht angefärbten Areale mit Hämatoxylin nach Gillson (Hersteller: Carl Roth GmbH und Co KG, Karlsruhe, Deutschland) durchgeführt. Um dabei das IHC- Signal nicht durch die Gegenfärbung zu überdecken, betrug die Inkubationszeit lediglich 15 Sekunden. Anschließend erfolgte eine Spülung mit Wasser für fünf Minuten.

Um eine bessere Kontrastierung zu erhalten, wurden die Objektträger für 30 bis 90 Sekunden in einer Lithiumcarbonate – Lösung (Hersteller: Merck Millipore, Darmstadt, Deutschland) durchtränkt und anschließend fünf Minuten mit

Leitungswasser gespült. Schließlich wurden die Objektträger mit einem Deckgläschen bedeckt.

Negativkontrolle

Um unspezifische Immunbindungen auszuschließen, wurde parallel neben der oben beschriebenen Immunhistochemie eine Negativkontrolle an Paraffinschnitten durchgeführt. Dabei wurde anstatt des Primärantikörpers ein Maus- IgG1 (Hersteller: BioLegend, San Diego, Californien/ USA) inkubiert. Ansonsten erfolgten alle Schritte analog zur Immunhistochemie und wurden wie bereits oben beschrieben ausgeführt. Die hierbei entstanden Dauerpräparate zeigten im Mikroskop keine rötlichen bis pinken Niederschläge.

2.2.3 Mikroskopie

Für die mikroskopische Auswertung wurde ein Lichtmikroskop der Firma Zeiss (Carl Zeiss Microscopy GmbH, Jena, Deutschland) vom Typ Axioplan verwendet, mit dem in einer 5-fachen bis 63-fachen Vergrößerung die hergestellten Dauerpräparate beurteilt wurden.

Zur fotografischen Dokumentation stand dabei eine an das Mikroskop angeschlossene Kamera (AxioCam MRc, Carl Zeiss Microscopy GmbH, Jena, Deutschland) zur Verfügung, die Bilder als jpg-Dateien abgespeicherte und das Einfügen eines Maßstabes auf jeder Datei ermöglichte.

Die HE-gefärbten Präparate dienten bei der Evaluierung zunächst als Übersichtsaufnahmen, um Nerven, Mechanorezeptoren und andere Strukturen im Präparat besser beurteilen zu können. Im Anschluss daran erfolgte eine Analyse der mit Immunhistochemie angefärbten Schnitte, die mithilfe der Negativkontrollen überprüft wurden.

Anschließend wurden alle Bilder mit dem Mac OS-X-Programm Vorschau weiter bearbeitet.

3. Ergebnisteil

3.1 Makroskopische Analyse

3.1.1 Das SIG versorgende Nerven

Nach Präparation der Körperspender, wie im Teil Material und Methoden beschrieben, zeigte sich bei allen zehn Präparaten eine sehr variable Innervation des Kreuz-Darmbein-Gelenks:

Die Innervation des SIG und seines Bandapparates erfolgte in unterschiedlicher Häufigkeit aus den Segmenten L2 bis S5 sowie einem kokzygealen Segment und somit teilweise aus bis zu zehn Segmenten (siehe hierzu Tab. 3):

Tab 3. Segmente, deren dorsale Fasern das SIG und dessen Bandapparat versorgen

Segment/ Nr. Körperspend er	Linkes SIG									Rechtes SIG				
	L2	L3	L4	L5	S1	S2	S3	S4	S5*	L2	L3	L4	L5	S1
03/13	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
02/14	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	X
33/12	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
55/12	-	-	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
01/13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
87/13	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X
81/12 ¹	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-	-	-	-	X
09/13	-	-	-	-	X	X	X	-	-	-	-	-	-	X
77/11	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10/15	-	-	-	-	-	-	X	X	-	-	-	-	-	-
Summe	1	4	2	3	2	2	4	2	1	0	0	0	0	4

*falls vorhanden

¹: Bei diesem Körperspender zeigte sich auf der linken Seite ein Versorgung aus einem kokzygealen Segment.
geschwärzt: Hier keine Präparation möglich.28

Abb. 3 und 4 zeigen dabei beispielhaft aus jedem Segment einen ausgewählten, gefundenen Nerven:

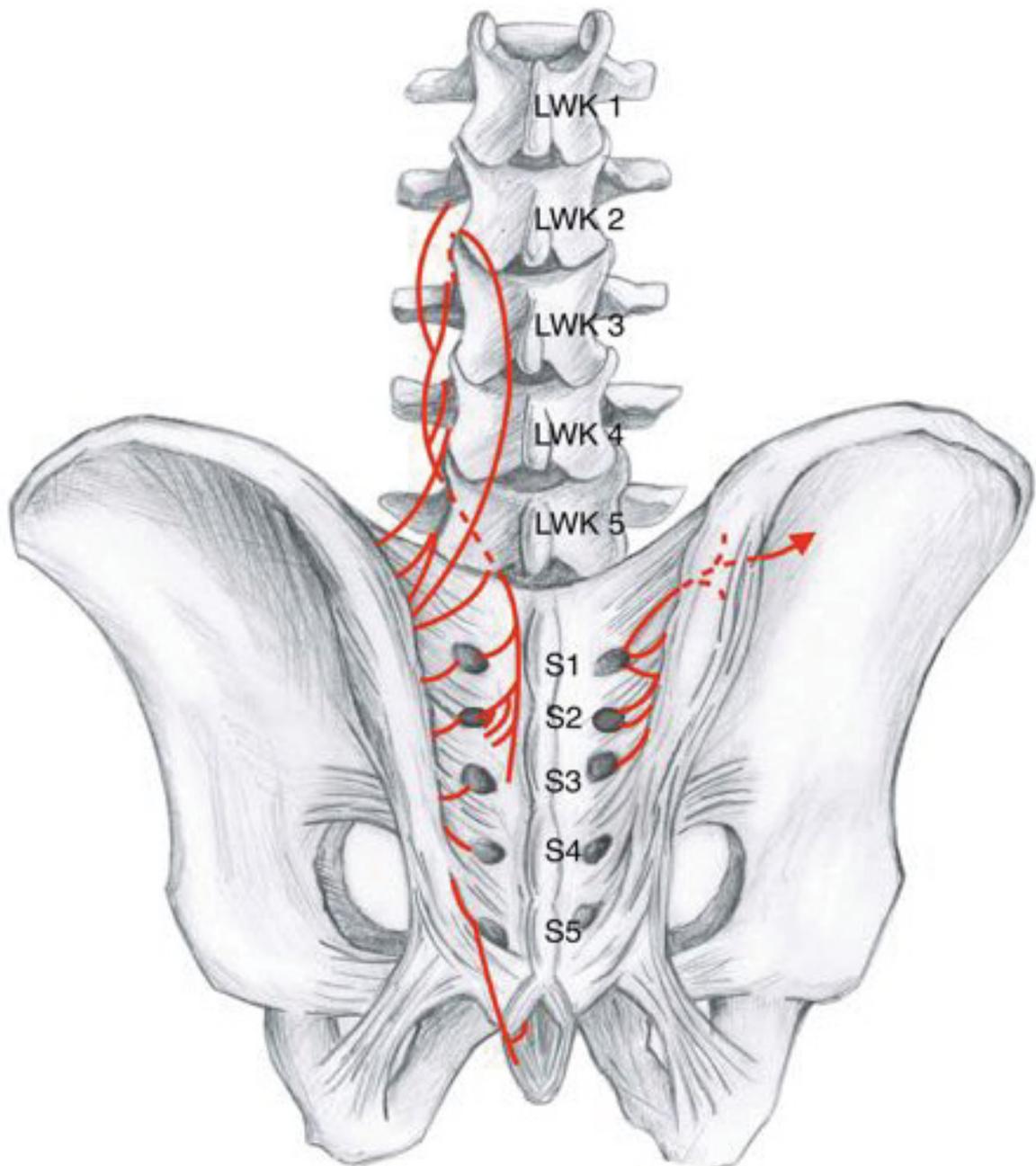


Abb. 3: Schematische Darstellung der Innervation des SIG und seines Bandapparates durch dorsale Nerven aus L2 bis S5 sowie einem kokzygealen Segment. Die ausgewählten Nerven wurden rot dargestellt. Auf der rechten Körperhälfte wurde ein Nervus clunium medius gefunden, der durch eine Pfeilspitze gekennzeichnet wurde. In einigen Bereichen waren die Nerven von Bändern oder Knochen überzogen und wurden deshalb durch eine gestrichelte Linienführung dargestellt. Siehe hierzu auch Abb. 4.

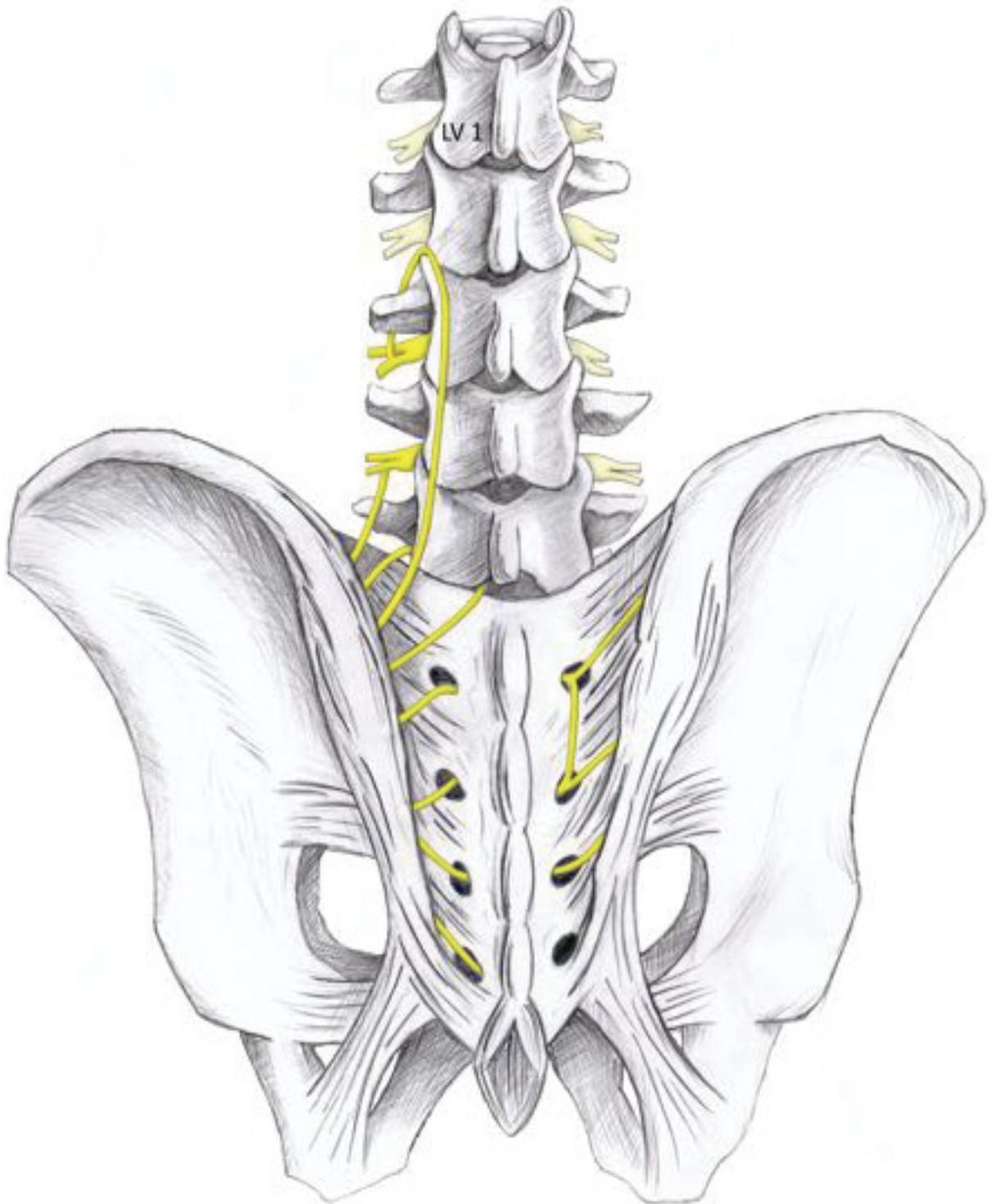


Abb. 4: Innervation des SIG und seines Bandapparates aus den Segmenten L3 bis S4. Im Gegensatz zu Abb. 3 zeigt diese kumulative Zeichnung die SIG-Innervation durch Nerven, die bei mehreren Körperspendern aufgefunden wurden. Schematische Zeichnung.

60% der Körperspender zeigten eine Innervation des SIG aus lumbalen Segmenten. Dies geht auch aus dem nachfolgendem Diagramm (Abb. 5) hervor.

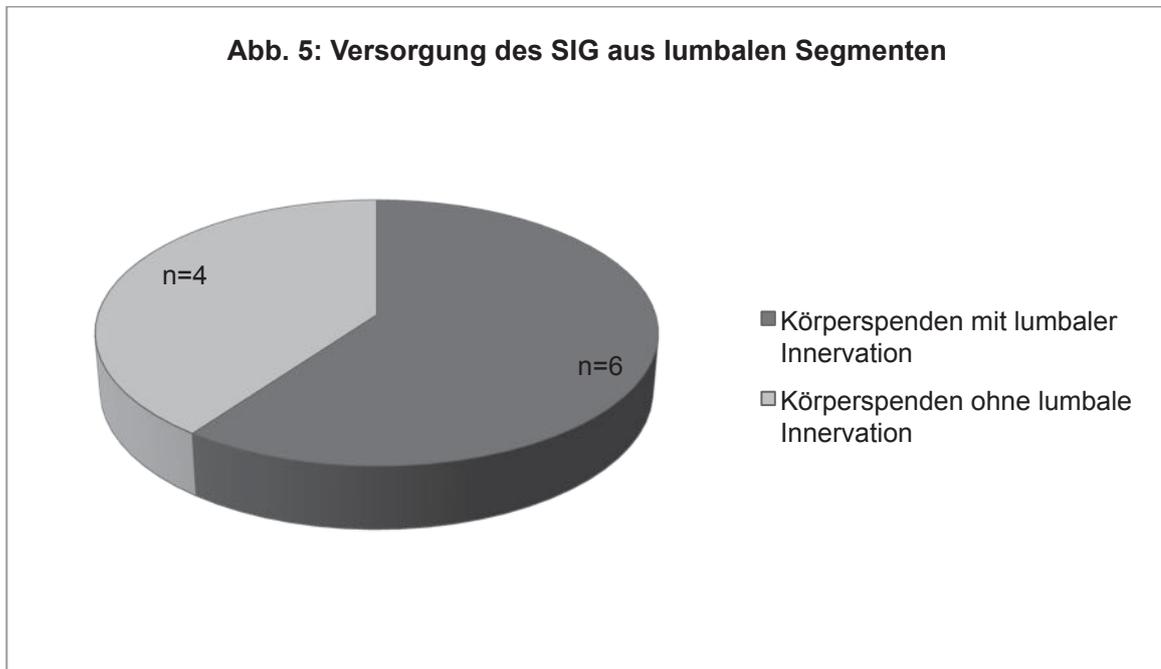


Abb. 5: Versorgung des SIG aus lumbalen Segmenten. Das Diagramm stellt den Anteil der Körperspender mit einer lumbalen Innervation des SIG gegenüber den Körperspendern ohne lumbale Versorgung des SIG.

Keiner der gesuchten Körperspender wies dabei eine gleichförmige Innervation des SIG und Bandapparates auf:

Neben großen interindividuellen Unterschieden traten auch intraindividuelle Seitendifferenzen auf. Sowohl auf lumbaler als auch sakraler Höhe zeigte sich hierbei eine Häufung der aufgefundenen Nerven auf der linken Körperhälfte. Dies geht sowohl aus der bereits angeführten Tab. 1 und der Abb. 3 und 4 als auch aus dem nachfolgendem Diagramm (Abb. 6) hervor.

Das vorliegende Diagramm vergleicht die Anzahl der SIG- innervierenden Segmente aller Körperspender aus Tab. 1 bezüglich der Körperseiten. So wird eine stärkere Versorgung des SIG auf der linken Körperhälfte mit einer durchschnittlichen Versorgung von ca. 2 Segmenten pro Körperspender deutlich, wobei auf der rechten Seite im Durchschnitt nur ca. 1 Segment pro Körperspender gefunden wurde.

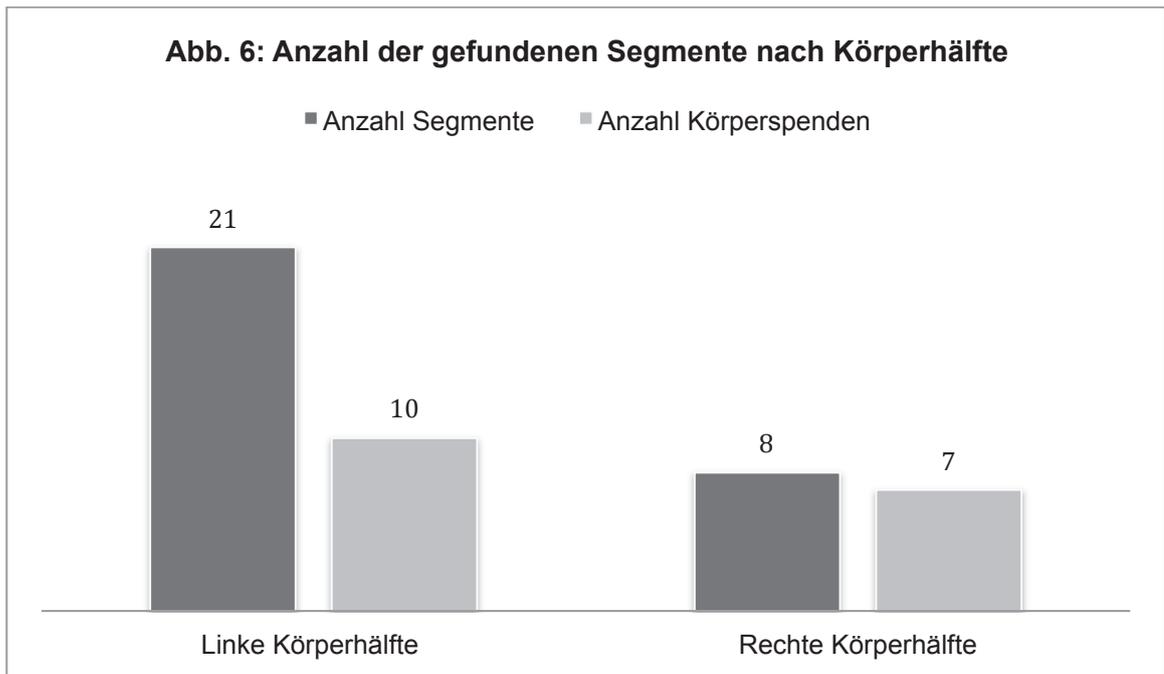


Abb. 6: Anzahl der gefundenen Segmente nach Körperhälfte.

3.1.2 Versorgungstypen der gefundenen Nerven

Die aus den lumbalen und sakralen Segmenten stammenden Fasern zeigten unterschiedliche Verläufe beziehungsweise Versorgungstypen. Während ein Großteil der Nerven direkt aus dem Segment in ihre Versorgungsgebiete zog, verbanden andere Nerven die Segmente untereinander und ermöglichten damit den Faseraustausch von Ganglion zu Ganglion (siehe hierzu Tab. 4).

Nr. Körperspender	Die gefundenen Nerven zogen direkt in ihr Versorgungsgebiet	Die gefundenen Nerven kommunizierten miteinander	Sonstiges
03/13	X	-	-
02/14	X	-	-
33/12	X	-	zwischen L3 und L4 Nerv gefunden, aber keine Bedeutung für die Innervation des SIG, da kein Nerv von L4 zum SIG gefunden wurde
55/12	X	-	-
01/13	X	-	-
87/13	X	-	-
81/12	X	X (Nerv, der die Segmente L2 bis S2 verband und weitere Verbindung zw. S5-Co1)	
09/13	X	X (Verbindung zwischen Rami dorsales aus S1 und S2)	-
77/11	X	-	-
10/15	X	-	-

Tab. 4: Versorgungstypen der gefundenen Nerven

So fand sich beim Präparat 81/12 ein Nerv, der von Ganglion zu Ganglion zog, wodurch die Segmente L2 bis S2 miteinander verbunden wurden (siehe hierzu Kap. 3.1.3.3 sowie Kap. 6.7). Bei demselben Präparat wurde eine Verbindung eines dorsalen Nervs aus S5 und einem kokzygealen Segment Co1 gefunden; bei dem Körperspender 09/13 eine Verbindung zwischen S1 und S2 (siehe hierzu auch Kap. 3.1.4.1 sowie Kap. 6.8)

3.1.3 Die Verläufe der lumbalen Nerven

Die in der Untersuchung gefunden dorsalen Nerven, die aus lumbalen Segmenten das SIG versorgten, befanden sich kontinuierlich auf der linken Körperhälfte der Körperspender (siehe hierzu Abb. 7).

Die dabei gefundenen Nerven zogen auf ihrem Weg zum SIG allesamt direkt durch die Muskulatur oder durch Fettgewebe, das im Rahmen von degenerativen Prozessen die Muskulatur ersetzt hatte.

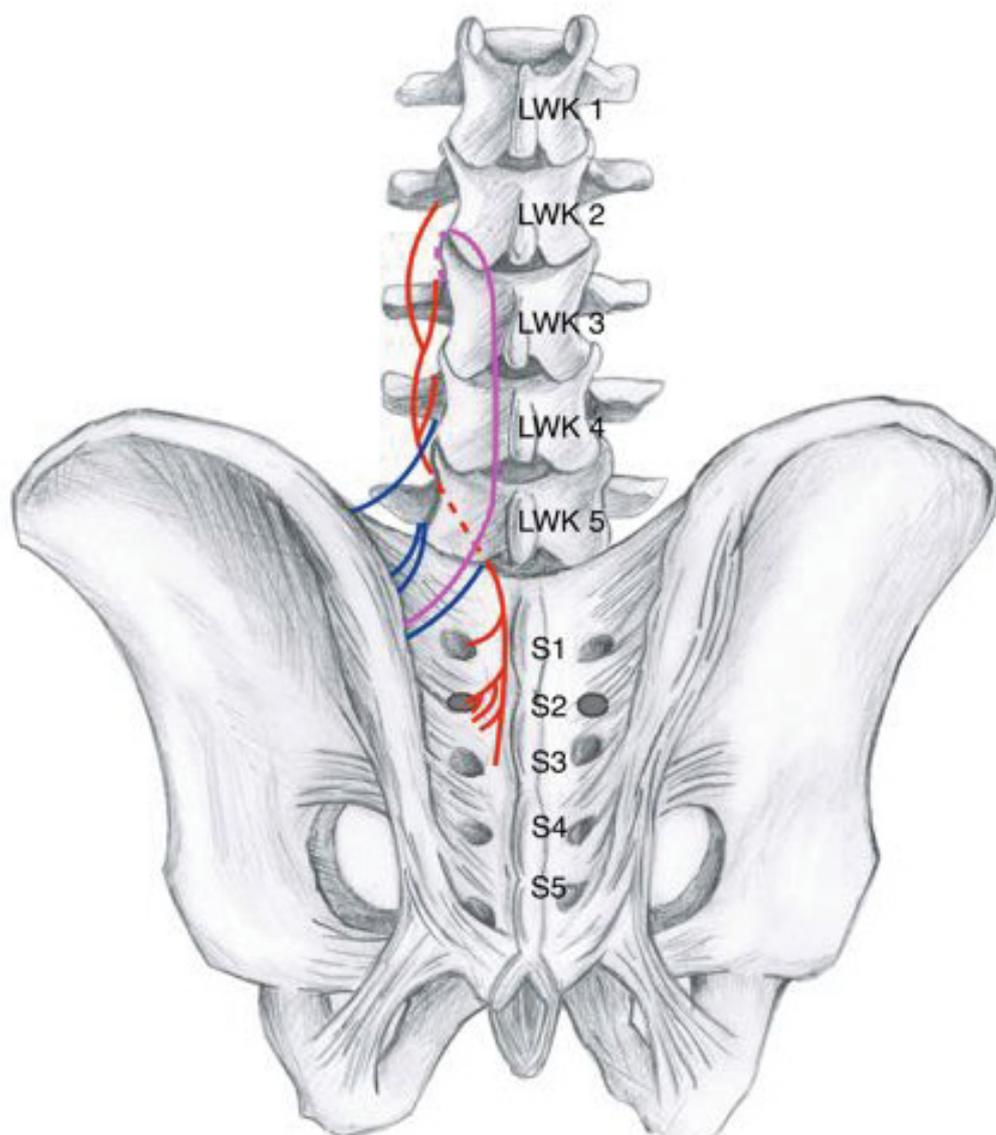


Abb. 7: Schematische Übersichtszzeichnung der gefundenen dorsalen Nerven zur SIG-Innervation aus lumbalen Segmenten. Die lumbalen Nerven können in drei Kategorien eingeteilt werden (durch unterschiedliche Farben markiert): In rot ist eine Nervenverbindung aus L2 bis S2 dargestellt, in pink der Nerv aus L3 mit ungewöhnlichem Verlauf und in blau die Nerven aus L4 und L5 (siehe hierzu auch Kap. 3.1.3 bis 3.1.5).

3.1.3.1 Versorgung aus L3

Im Rahmen der Präparation fand sich im Bereich des dritten Lumbalsegmentes bei drei Körperspendern jeweils ein Nerv aus L3, der einen ungewöhnlichen Verlauf aufwies:

Nach Austritt aus dem Spinalganglion L3 zog der Nerv zunächst nach kranial, um in einem Bogen direkt über das Periost des Facettengelenks L2/ L3 zu ziehen. Anschließend zog der Nerv nach kaudal, wo zwei der drei gefundenen Nerven in den Gelenkspalt des SIG zogen und ein weiterer auf dem Kreuzbein verlief (siehe hierzu Abb. 8 und 9).

Bei einem Körperspender zeigte der beobachtete Nerv aus L3 über dem Facettengelenk einen Kalibersprung seines Durchmessers von 1mm auf 5mm.

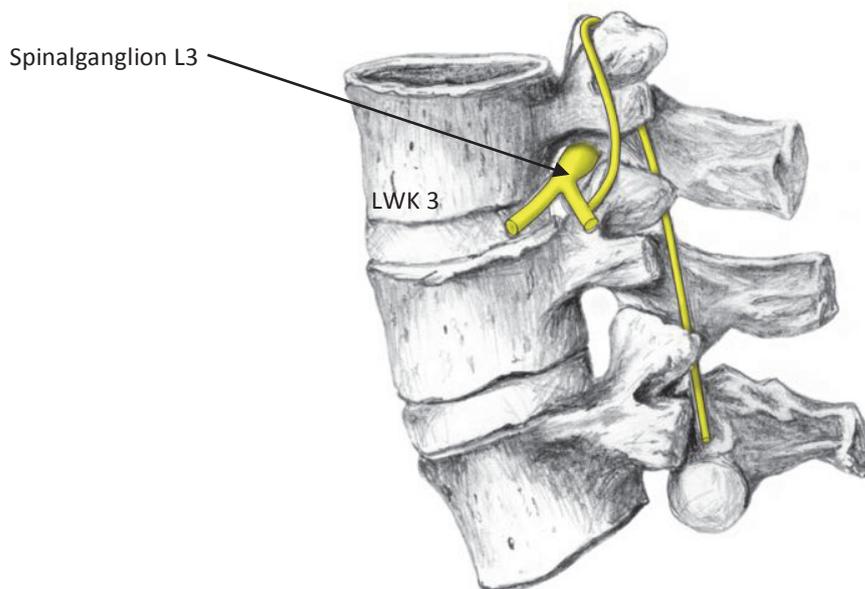


Abb. 8: Beobachteter Nervenverlauf eines Nerven aus L3 über das Facettengelenk L2-L3. Schematische Darstellung – zur besseren Ansicht würde das Lumbalganglion L3 kaudaler eingezeichnet als üblich.

Von diesen Nerven müssen ebenfalls in dieser Arbeit gefundene kleine Äste aus L2 oder L3 abgegrenzt werden, die ebenfalls über die Processus articularis zogen und die Muskulatur sowie Facetten- oder Zwischenwirbelgelenke innervierten (siehe auch Duale Facettengelenksinnervation nach Bogduk) (nicht in

Abb. 8 eingezeichnet). Dabei handelte es sich um kürzere Nerven mit geringerem Durchmesser.

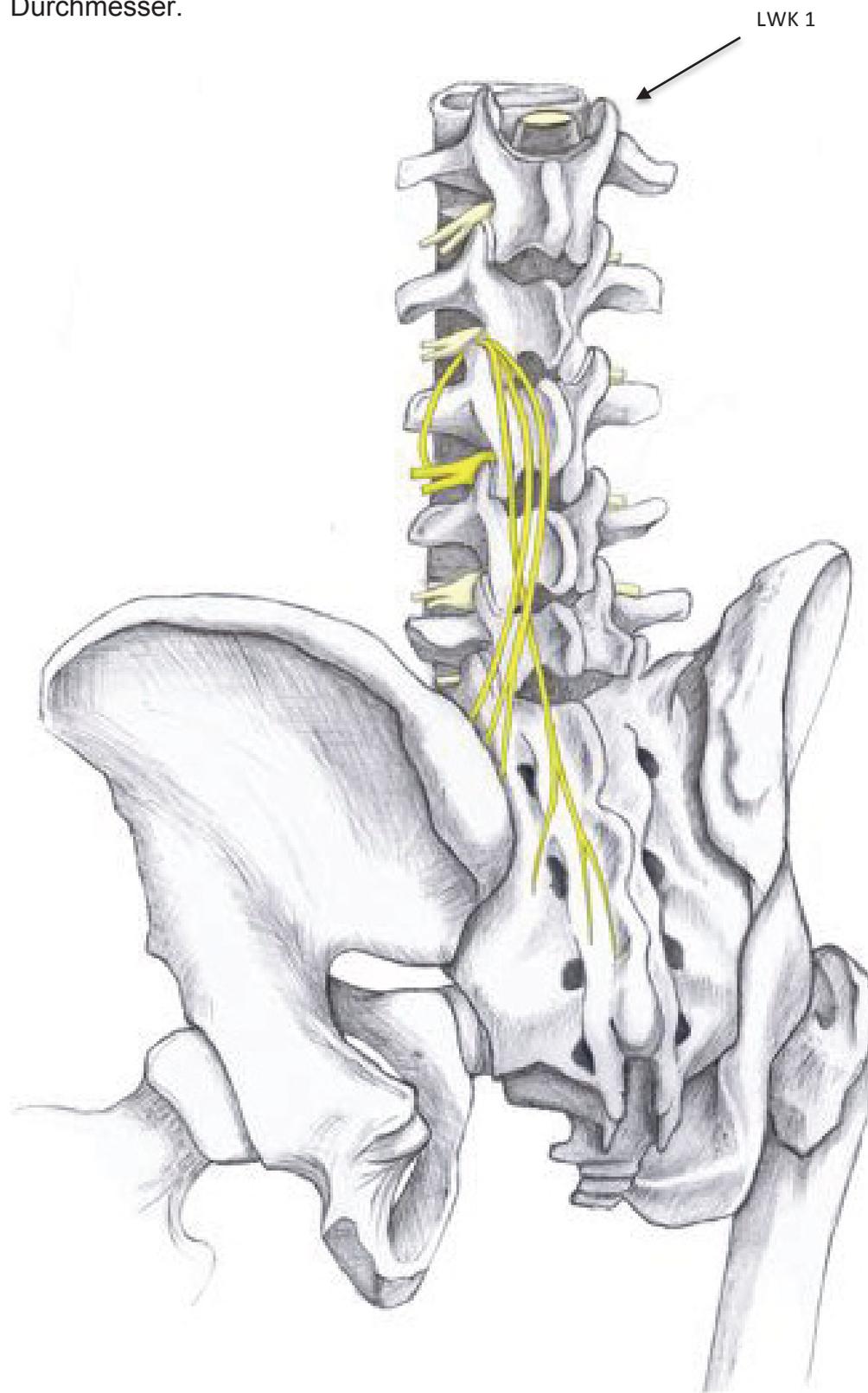


Abb. 9: Schematische Übersicht der gefundenen Nerven aus L3. Zwei dieser Nerven traten nach Überzug des Facettengelenks an den Gelenkspalt des SIG heran. Der dritte Nerv verlief im Bereich der Ligamente des Kreuzbeines.

In der nachfolgenden Tabelle (Tab. 3) wurden die drei aufgefundenen Nerven gegenübergestellt:

Tab. 5: Gegenüberstellung der Nerven aus dem Segment L3

Nr. Körperspender	03/13	77/11	33/12
Verlauf	(siehe unten)	(siehe unten)	(siehe unten)
Tiefendistanz*	Ca. 2,5 cm	Ca. 3 cm	2-3 cm
Abstand zw. Proc. spinosus und Proc. articularis sup.**	95%	ca. 50%	ca. 33%
Durchmesser Nerv	1 mm	2mm	1,5mm
Besonderheiten	Im Bereich des Processus articularis superior auf bis zu 5mm verdickt		

* Tiefendistanz: entspricht dem Abstand zwischen der Spitze des Proc. spinosus von LWK 3 und dem Nerven bei seinem Übergang über den Proc. articularis superior des LWK 3

** siehe hierzu Abb. 7: Abstand zwischen Proc. spinosus und Proc. articularis superior des dritten Lumbalwirbels in Prozent

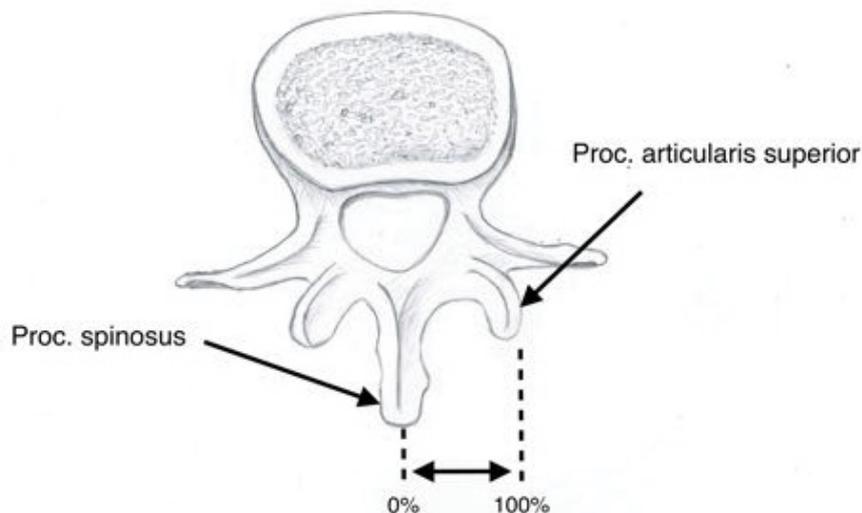


Abb. 10: Abstand zwischen Proc. spinosus und Proc. articularis sup. des dritten Lumbalwirbels in Prozent. Die Abbildung gibt den Abstand der gefundenen Nerven aus L3 zwischen dem Proc. spinosus und dem lateralen Rand des Proc. articularis superior des dritten Lumbalwirbels an. 0% bedeutet dabei, dass der Nerv auf der Mitte des Proc. spinosus des Lendenwirbels verläuft; 100% entspricht hingegen einem Verlauf auf dem lateralen Rand des Proc. articularis sup. der Lendenwirbel. Durch dieses Schema kann somit der Überzug der drei gefundenen Nerven aus L3 miteinander verglichen werden.

Verlauf der Nerven aus L3

Körperspender 03/13

- Der gefundene Nerv zog aus dem Spinalganglion L3 hinaus, gelangte zunächst nach kranial und zog in einem Bogen über das Periost des Processus articularis superior des dritten Lendenwirbels. Nach diesem Überziehen des Periosts zog er zwischen Muskelsträngen relativ direkt nach kaudal. Auf Höhe des Promontoriums durchbrach er die unter ihm liegende autochthone Rückenmuskulatur und verlief weiter auf dem Kreuzbein (siehe hierzu auch Kap. 6.1)

Körperspender 77/11

- Nach Austritt des Nerven aus dem dritten lumbalen Spinalganglion zog d zunächst nach kranial, um in einem Bogen über das Periost des medialen Processus articularis superior des dritten Lendenwirbels zu ziehen. Danach erfolgte ein Verlauf des Nerven nach kaudal. Hierbei verlief er zwischen den Processi spinosi und den Artikularfortsätzen eingebettet in Muskulatur. Auf Höhe des fünften Lendenwirbels zog er nach lateral und verlief über das Os sacrum ziehend in den Gelenkspalt des SIGs (siehe hierzu auch 9.9)

Körperspender 33/12

- Wie bei den zuvor genannten Körperspendern 03/13 und 77/11 entstammte der Nerv dem dritten lumbalen Spinalganglion. Nach Austritt aus diesem Segment zog der Nerv zunächst nach kranial, wo er in einem Bogen über das Periost des Facettengelenks zwischen LWK 2 und LWK 3 verlief und anschließend nach lateral-kaudal zog. Kurz vor seinem Eintritt in den Gelenkspalt teilte er sich in 2 Äste auf, die beide ins SIG eintraten (siehe hierzu auch 6.3)

3.1.3.2 Nerven aus L4 und L5

Aus den Nervenganglien L4 konnte bei dem Körperspender 55/12 auf der linken Körperhälfte ein Nerv gefunden werden, der nach Austritt aus dem Spinalganglion

nach kaudal verlief in Richtung des sacroiliacalen Gelenkspalts eintrat (siehe hierzu Abb.8).

Bei den Körperspendern 55/12 und 87/13 konnten Nerven gefunden werden, die auf der linken Seite aus dem 5. Lumbalen Spinalganglion austraten. Sie verliefen ebenfalls durch autochthone Rückenmuskulatur sowie Bindegewebe hindurch zum sacroiliacalen Gelenkspalt und traten hier in die sich dort befindlichen Ligamente ein (siehe hierzu Abb. 11).

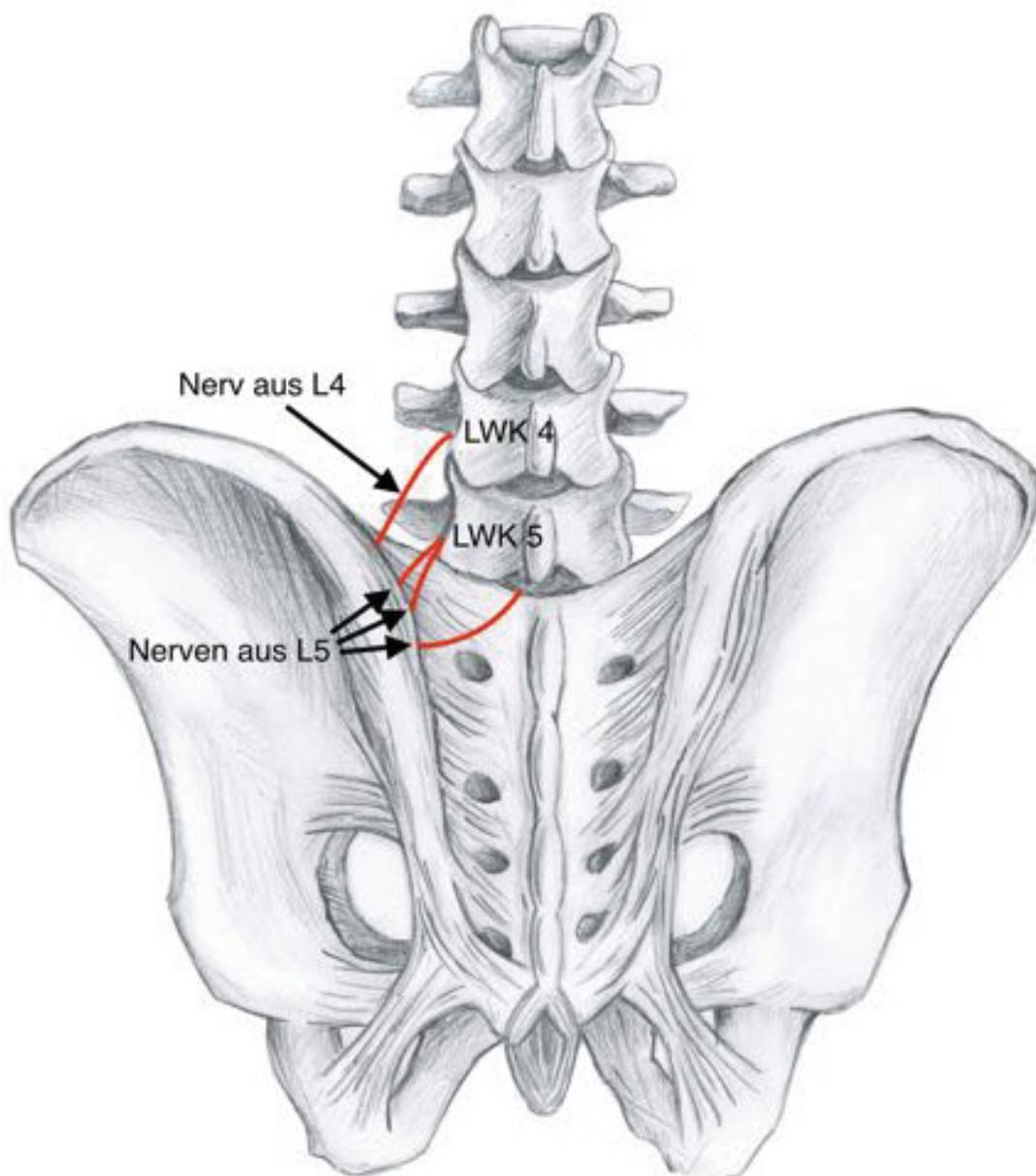


Abb. 11: Innervation des SIG durch dorsale Nerven aus den Segmenten L4 und L5. Die dabei gefundenen Nerven wurden rot dargestellt und durch Pfeile markiert. Schematische Zeichnung.

3.1.3.3 Nerv, der den Faseraustausch zwischen den Segmenten L2 bis S2 ermöglicht

In der vorliegenden Untersuchung zeigte sich bei dem Körperspender 81/12 auf der linken Seite ein ca. 1 mm dicker Ramus medialis oder intermedialis, der aus dem zweiten Spinalganglion austrat und über die Hinterfläche der Processi costales der nachfolgenden Wirbel nach kaudal zum Kreuzbein zog. Dabei nahm der Nerv in seinem Verlauf aus jedem kaudal liegenden Segment bis S2 weitere Nervenfasern auf, sodass ein Nervengeflecht von L2 bis S2 gebildet wurde (siehe Abb. 12).

Zwischen den Processi costales und der Nervenverbindung befand sich eine 0,5cm dicke Muskelschicht. Der Abstand zwischen der Spitze des Processus spinosus und dem Nerven betrug in ca. 3,5- 4 cm.

Zwischen dem vierten Lumbalwirbel und dem Kreuzbein waren bei diesem Körperspender die Räume zwischen den Wirbelkörpern durch Osteophyten ausgefüllt. Der gefundene Nerv zog auf Höhe des Proc. costalis des vierten Lumbalwirbels in diese hinein. Knapp oberhalb des Eingangs in den Sakralkanal zog er wieder aus den Osteophyten heraus und verlief danach zwischen der Crista mediana sacralis und den Foramina sacralia posteriora nach kaudal. Dabei gab er Äste an die posterioren Neuroforamina S1 und S2 ab, aus denen auch Nerven an das SIG abgegeben wurden.

Er endete schließlich zwischen dem zweiten und dritten Sakralwirbel.

An die umliegende Muskulatur wurden keine Fasern abgegeben (siehe hierzu auch Abb. 12).

Diese intersegmentale Nervenverbindung entsprach nicht dem Truncus sympathicus, der ventral der Processi costales direkt über die Vorderfläche der Wirbelkörper verläuft.

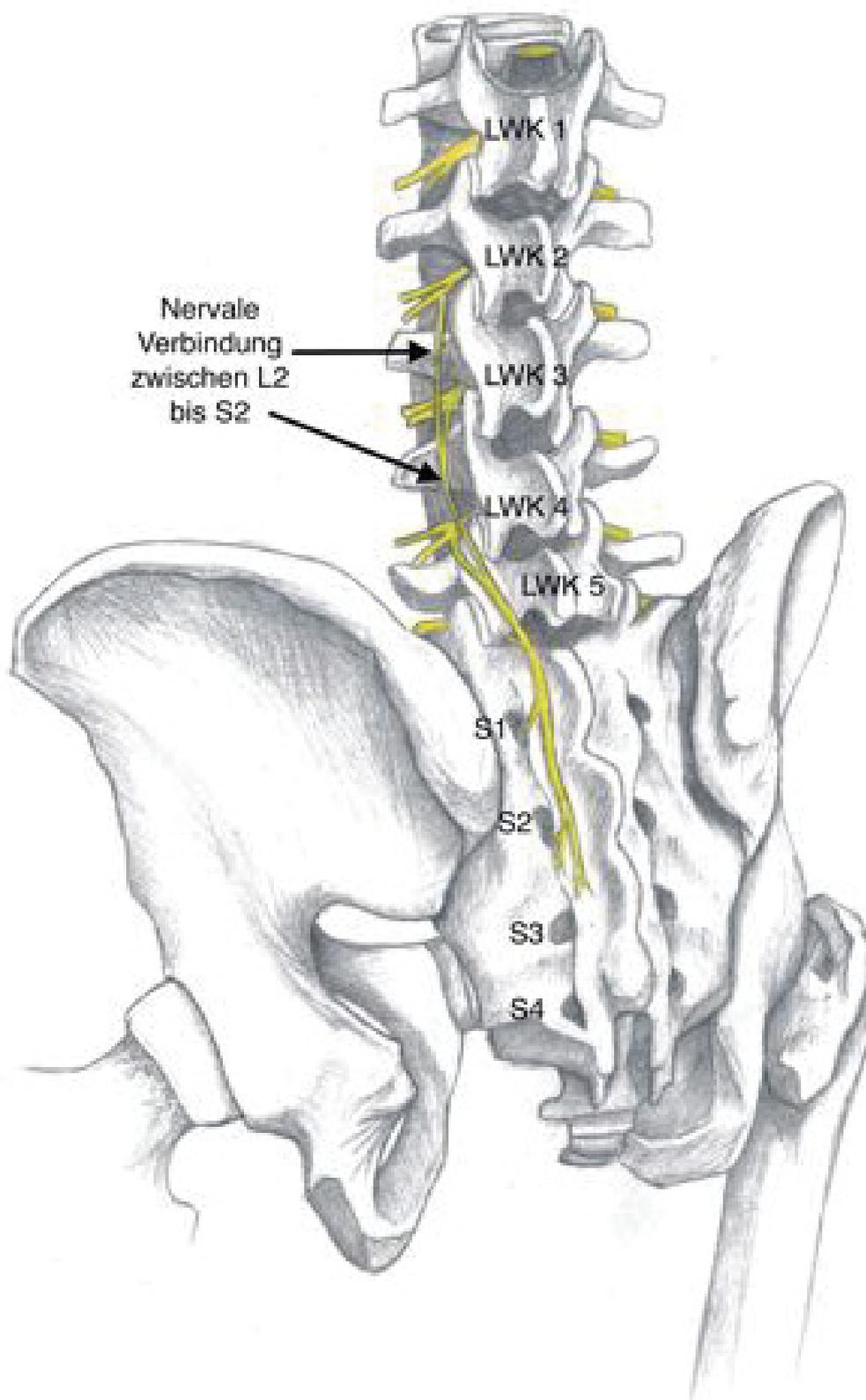


Abb. 12: Übersichtszeichnung des gefundenen Nervs von L2 bis S2. Schematische Zeichnung.

3.1.4 Die Verläufe der sakralen Nerven

Während der Präparation fanden sich 0,1 bis 2mm dicke Rami dorsales des ersten bis fünften Sakralnerven, die begleitet von kleinen Gefäßen aus den Foramina sacralia dorsales austraten. Im Bereich des Austritts aus diesen Foramina waren die Gefäß- Nervenbündel dabei von lockerem Fettgewebe umgeben.

Unterhalb und oberhalb des Fettgewebes befanden sich derbe Bindegewebsplatten und -stränge. Diese setzten sich zusammen aus den Aponeurosen des M. erector spinae und M. gluteus maximus sowie den Ligamenta sacroiliaca interosseum et posteriora, wobei die Bänder und Aponeurosen ineinander fortliefen und dadurch teilweise nicht mehr exakt voneinander abgegrenzt werden konnten.

Zwischen den Bindegewebszügen verliefen die austretenden Rami dorsalis nach lateral zum sacroiliacalen Gelenkspalt, wobei sich der Großteil der Nerven zwischen den tiefen und oberflächlichen Schichten der Ligamenta sacroiliaca posteriora befand. In ihrem Verlauf gaben die Nerven kleine Äste an die Ligamenta und darüber liegenden Faszien bzw. Sehnenplatten ab.

Bei 31,6 % der Foramina sacralia posteriora traten mehrere Nerven gleichzeitig aus den Foramina aus. Dies geht aus Tabelle 6 hervor, die neben der Anzahl der gefundenen Rami dorsales der Sakralnerven S1 bis S5 auch die genaue Lokalisation bzw. Verlaufsrichtung der gefundenen Nerven in Richtung Gelenkspalt zeigt. Zur besseren Beschreibung dieser Verläufe wurden Uhrzeiten verwendet (siehe Abb. 13).

Tab. 6. Anzahl und Lokalisation der gefundenen Rami dorsales der Sakralnerven S1 bis S5
(angegeben durch Uhrzeiten – siehe hierzu Abb. 13)

Nr. Körper-spender	S1		S2		S3		S4		S5	
	Links	rechts	Links	rechts	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	rechts
02/14	*	2 h 4 h 5 h	*	2h	8h	-	-	-	-	-
01/13	-	-	-	-	-	3h	-	-	-	-
87/13	-	5h		1h 2h		3h	-	-	-	-
81/12	9h	4h (9h)**	9h	-	10h	-	9 h 10h	-	6h, 9h	-
09/13	8,5h	4h (12h, 11h)**	7h	-	8h	-	-	-	-	-
10/15	-	-	-	-	7,5h	-	9h	-	-	-
Summe	2 (3)	6 (9)	2(3)	3	4	2	3	0	2	0

* Aus diesen Segmenten stammten Nerven, deren vollständiger Verlauf nicht dargestellt werden konnte.

** Die in Klammern angegebenen Nerven zogen nicht in den Gelenkspalt, sondern versorgen nur die umliegenden bindegewebigen Strukturen.

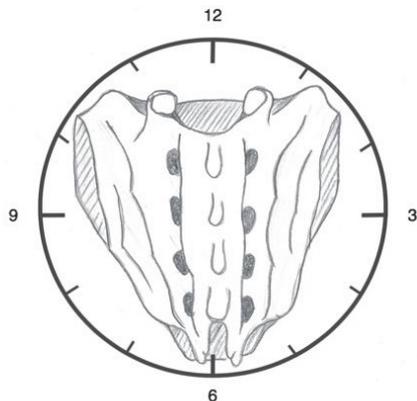


Abb. 13: Zeichnung des Kreuzbeines in eine Uhr zur Beschreibung der Nervenverläufe mittels Uhrzeiten.

3.1.4.1 Nervale Verbindungen zwischen Rami dorsales verschiedener Sakralnerven

Weiterhin zeigte die vorliegende Untersuchung im Bereich des Kreuzbeines nervale Verbindungen zwischen den Hauptstämmen von S1 und S2 sowie einem Ast aus S5 mit einem kokzygealen Ast aus Co1.

So fand sich bei Körperspender 02/14 auf der rechten Körperhälfte eine Verbindung des 4h – Nervens aus S1 mit dem 2h –Nerven aus S2; bei dem Körperspender 81/ 12 auf der linken Seite zwischen dem 6h – Nerv aus S5 und dem 12h –Nerv aus Co1 (siehe hierzu Abb. 14 und 15).

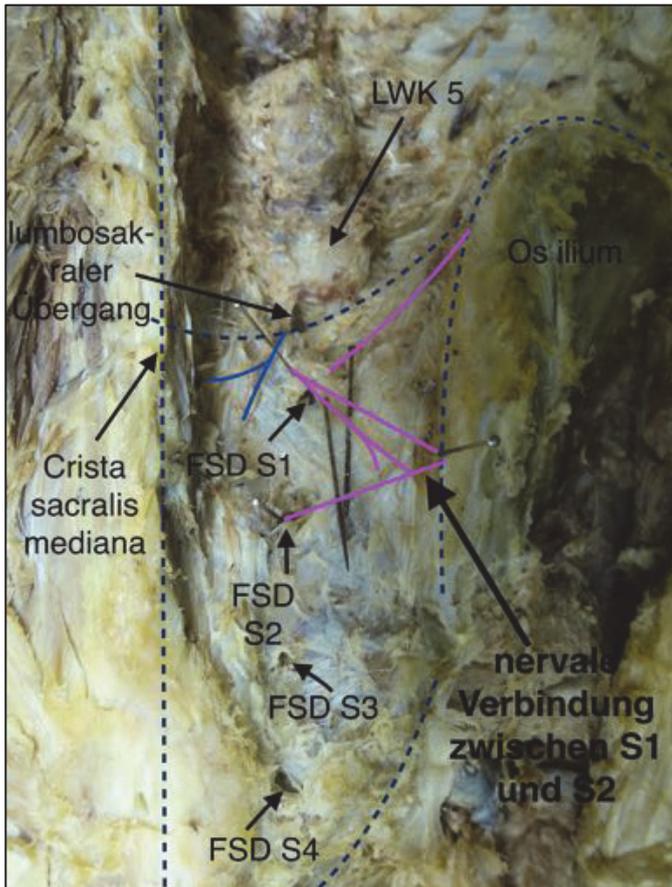


Abb. 14: Nervale Verbindung zwischen dorsalen Ästen aus S1 und S2. Bearbeitetes Foto. Anatomische Leitstrukturen wurden nachgezeichnet und beschriftet; die gefundenen Nerven aus S1 und S2 zum SIG sind pink nachgezeichnet, der Fund aus L5 zum Bindegewebe des OS sacrum mittelblau (siehe hierzu auch Kap. 6.2). FSD: Foramina sacralia dorsales.

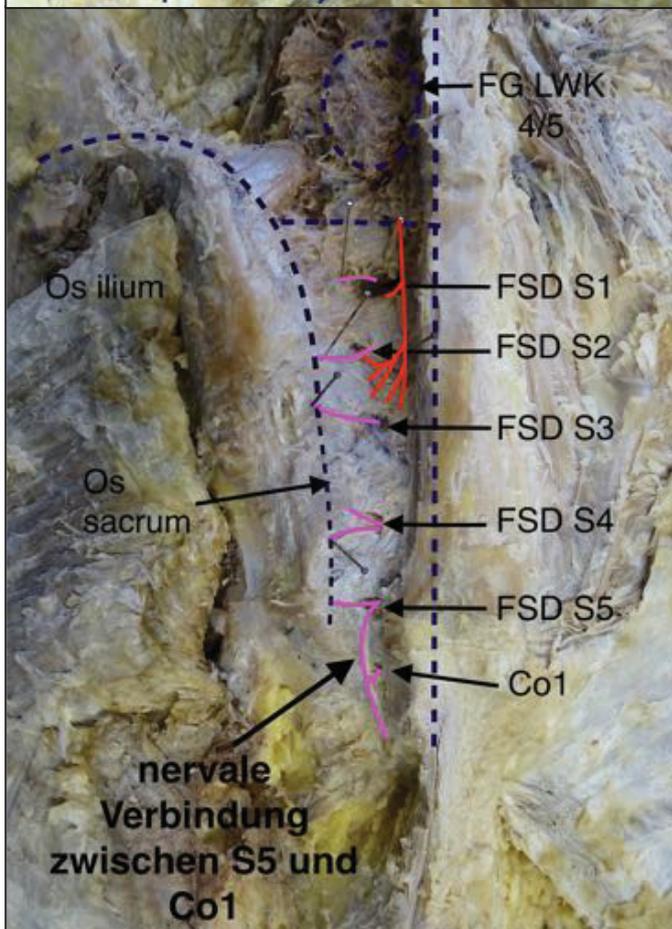


Abb. 15: Nervale Verbindung zwischen dorsalen Ästen aus S5 und einem kokzygealen Segment (Co1). Bearbeitetes Foto. Nachzeichnung und Beschriftung anatomischer Leitstrukturen wie der Facettengelenke (FG). Die gefundenen Nerven, die das SIG aus S1 bis S5 versorgen, wurden pink nachgezeichnet. Zusätzlich wurde ein Nerv aus einem kokzygealen Segment (Co1) pink eingezeichnet, der mit einem Ast aus S5 verbunden war. Der Nerv aus L2 bis S2 ist rot nachgezeichnet, um diesen abzugrenzen. Die Stecknadeln dienen der Markierung der SIG-versorgenden Nerven aus S1 bis S5 (siehe hierzu auch Kap. 6.7). FSD: Foramina sacralia dorsales.

3.1.4.2 Nervus clunium medius

Der Körperspender 09/13 wies neben Nerven aus S1 bis S3 an das SIG einen aus S1 kommenden dorsalen Ramus spinalis auf, der nach Durchsetzen des Bandapparates und Abgabe kleiner Äste an Bänder und an den Gelenkspalt des SIG die Ursprungssehne des M. gluteus superior durchsetzte und in das subkutane Fettgewebe weiterzog (siehe Abb. 16).

Aufgrund der Vorpräparation im Studentenkurs (Entfernung der Haut und des subkutanen Fettgewebes) war eine weitere Verfolgung bis in den Hautbereich nicht mehr möglich. Allerdings ist eine Versorgung der Haut des Nerven als N. clunium medius anzunehmen (siehe hierzu auch Abb. 16).

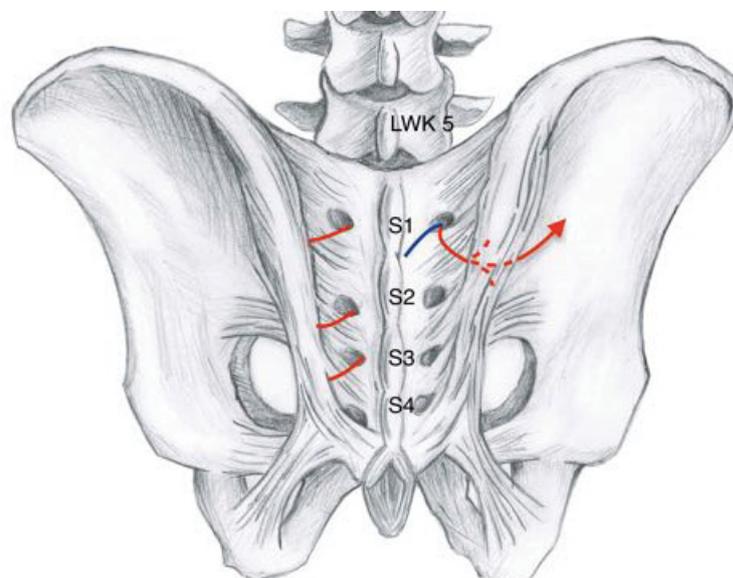


Abb. 16: Innervation des SIG des Körperspenders 09/13. Auf der linken Seite zeigt sich eine Versorgung des SIG aus S1 bis S3, während auf der rechten Seite in ein Nerv aus S1 mit einer Pfeilspitze abgebildet ist, der sich als Nervus clunium medius darstellt. In dem Bereich, wo er das Lig. sacroiliacum dorsale longum durchzieht, wurde sein Verlauf gestrichelt eingezeichnet. In diesem Bereich gab er auch die ebenfalls gestrichelt dargestellten Abgänge an das SIG und den Bandapparat ab. Schematische Zeichnung.

3.1.5. Degenerationen

Während der Untersuchung ließen sich bei einem Körperspender (Nr. 81/ 12) Osteophyten im Bereich des vierten Lumbalwirbels bis zum Kreuzbein finden. Des Weiteren wurde bei einem Präparat (Nr. 10/15) eine sehr starke Skoliose, bei einem anderen Körperspender (Nr. 01/13) eine leichte Skoliose festgestellt (siehe auch Kap. 6).

3.2. Mikroskopische Analyse

Die für die histologische Untersuchung entnommenen Gewebeproben stammten aus dem dorsalem Knochenspalt zwischen dem Os sarum und Os ilium und wiesen makroskopischen sichtbar einen Nerven auf, der in das jeweilige Band hineinzog. Es handelte sich hierbei um einen Rami dorsales aus L5, S1 und S3 der Körperspender 01/13, 09/13 und 55/12.

3.2.1 Grundstruktur der Bänder

In allen Gewebeproben zeigten sich lockeres und zum Teil fettreiches Bindegewebe und Bereiche aus straffen kollagenen Zügen im Wechsel (siehe hierzu Abb. 17- 19).

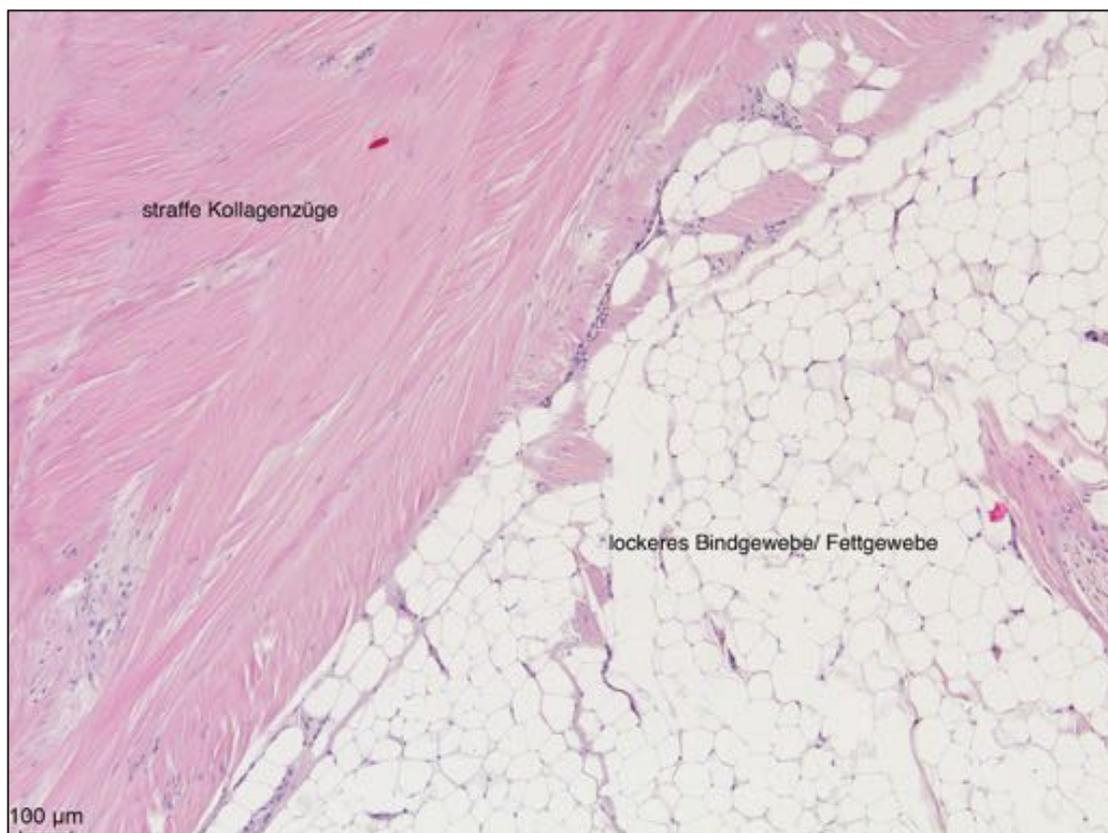


Abb. 17: Straffes kollagenes Bindegewebe und lockeres, fettreiches Gewebe im Wechsel;
Färbung: H.E.

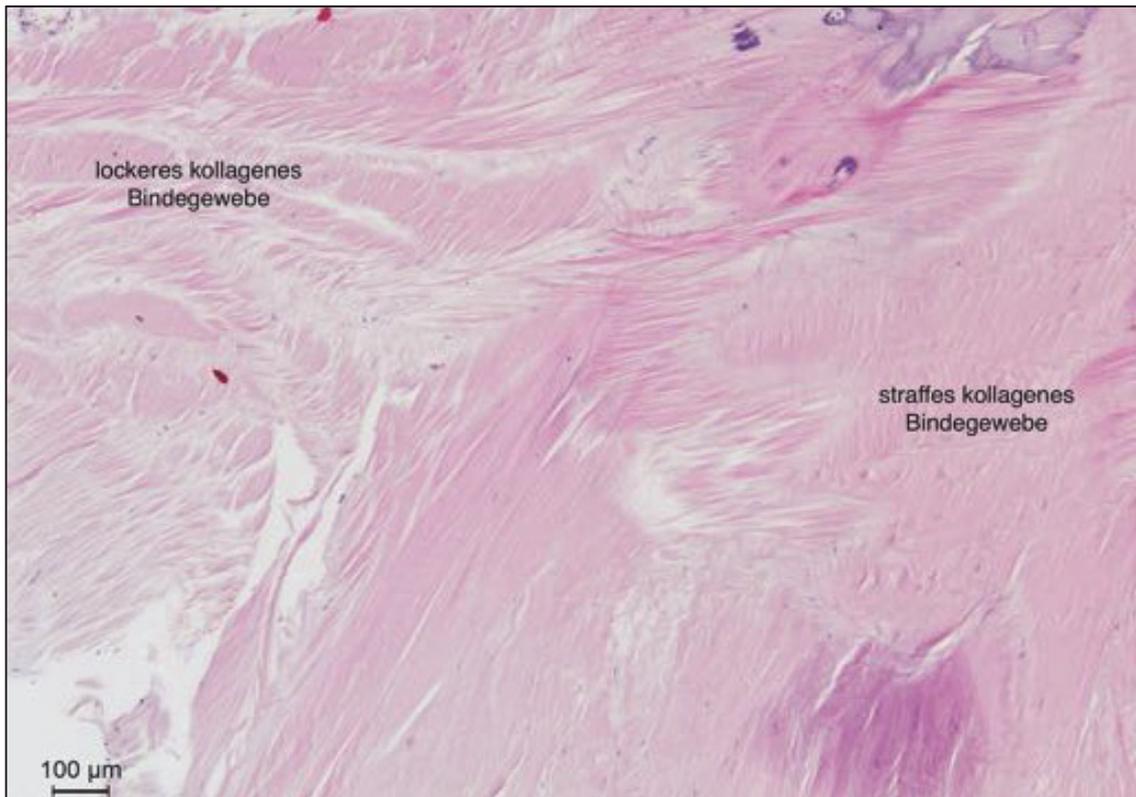


Abb. 18: Straffes kollagenes Bindegewebe und lockeres kollagenes Gewebe im Wechsel; Färbung: H.E.

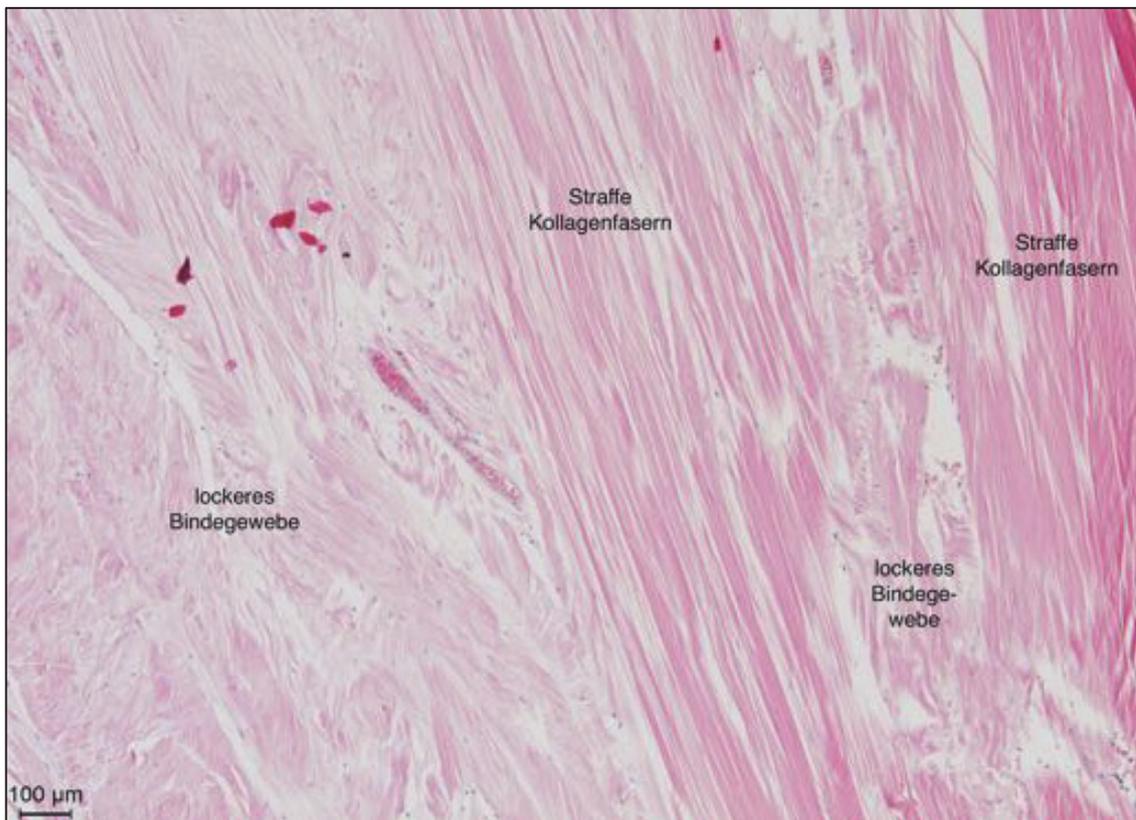


Abb. 19: Straffes kollagenes Bindegewebe und lockeres kollagenes Gewebe im Wechsel; Färbung: H.E.

In einer Gewebeprobe fanden sich zwischen den kollagenen Bandzügen kleine Areale eines Knorpels, der teilweise mehrere Chondrozyten in Territorien und eine Matrix ohne sichtbare Kollagenbündel aufwies, sodass er an hyalinen Knorpel erinnert. In der direkten Nachbarschaft fanden sich auch nicht maskierte Kollagenbündel, in denen ebenfalls einzelne Chondrozyten vorhanden waren (siehe hierzu Abb. 20).

Bei der untersuchten Gewebeprobe handelte es sich um Bandmasse aus dem sacroiliacalen Gelenkspalt, die knochennah entnommen wurde.

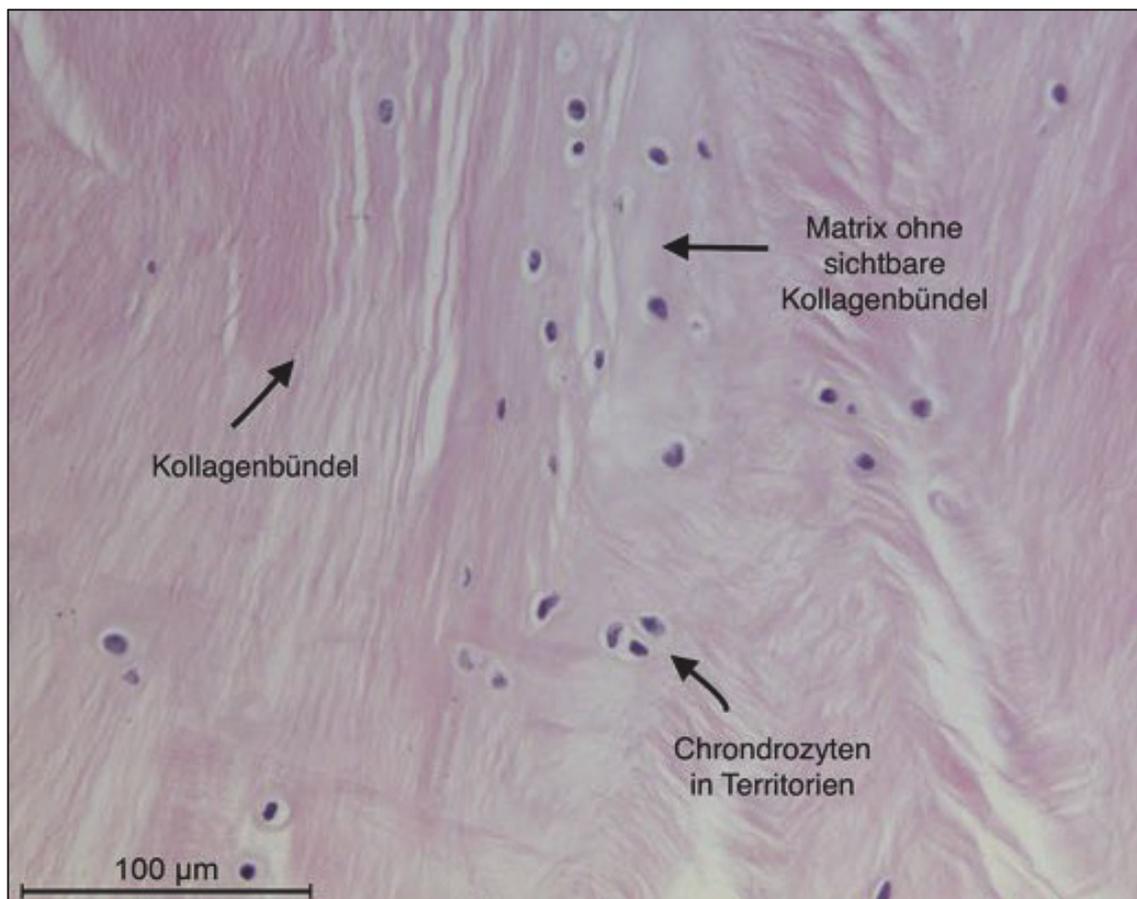


Abb. 20: Hyaliner Knorpel mit 1- 3 Chondrozyten pro Territorium und teilweise Matrix ohne sichtbare Kollagenbündel. In direkter Umgebung straffe Kollagenbündel, die teilweise auch einzelne Chondrozyten enthalten; Färbung: H.E.

Eine weitere Gewebeprobe wies ebenfalls knorpelige Areale auf, die jedoch Faserknorpel glichen. In der direkten Umgebung zeigte sich straffes kollagenes Bindegewebe (siehe hierzu Abb. 21-22).

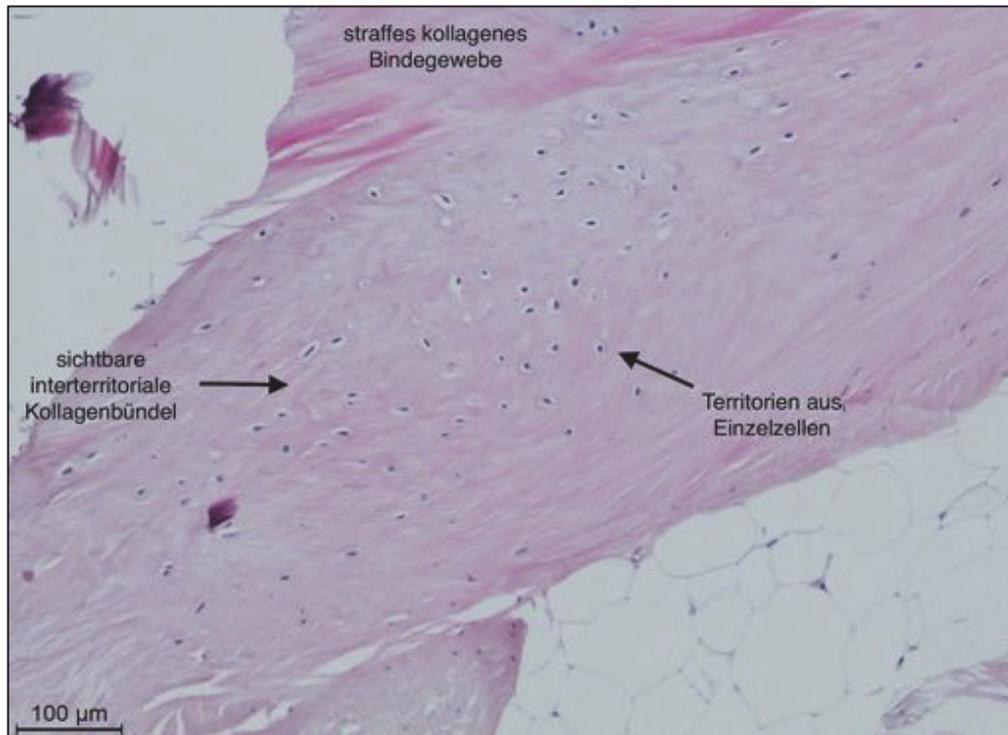


Abb. 21: Übersichtsaufnahme Faserknorpel mit aus Einzelzellen bestehenden Territorien und sichtbar interterritorialen Kollagenbündeln. In direkter Nachbarschaft straffes kollagenes Bindegewebe; Färbung H.E.

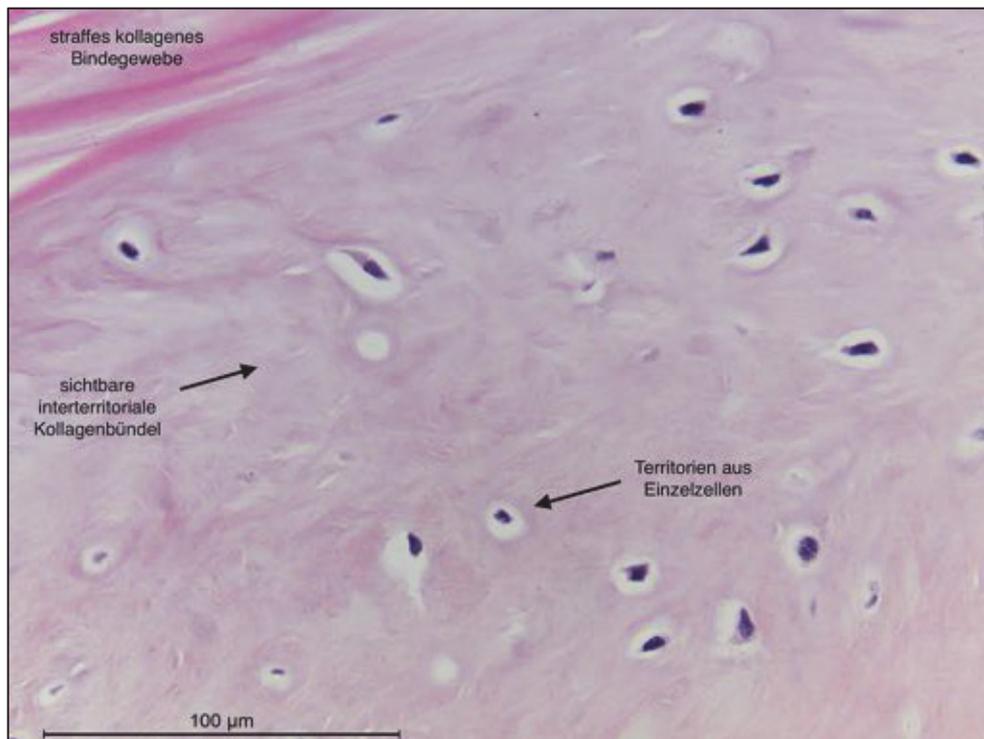


Abb. 22: Faserknorpel mit aus Einzelzellen bestehenden Territorien und sichtbar interterritorialen Kollagenbündeln. In direkter Nachbarschaft straffes kollagenes Bindegewebe; Färbung H.E.

3.2.2 Nerven und deren Verläufe

Alle untersuchten Gewebeproben wiesen Nerven auf, die teilweise myelinisiert waren und einen Durchmesser von bis zu 2mm aufwiesen. Diese wurden durch eine H.E.- Färbung aufgesucht und in immunhistochemischen Untersuchungen als neuronale Strukturen sicher bestätigt. Unspezifische Bindungen der immunhistologischen Färbung wurden durch eine Negativkontrolle ausgeschlossen (siehe auch Kap. 2.2.2 sowie Abb. 23-25).

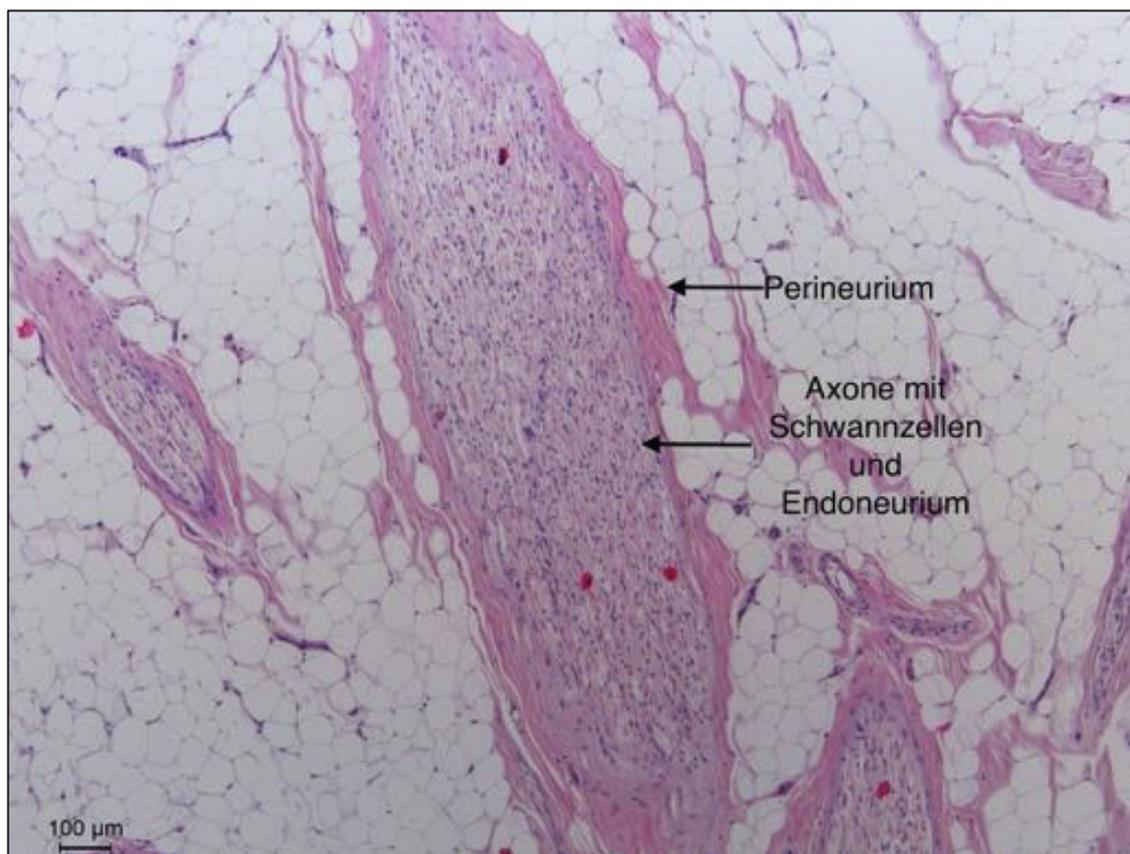


Abb. 23: Myelinisierter, sich aufteilender Nerv in leichtem Schrägschnitt. Die Axone mit Schwannzellen sind umgeben von Endoneurium, das wieder von Perineurium umzogen ist. Färbung: H.E.

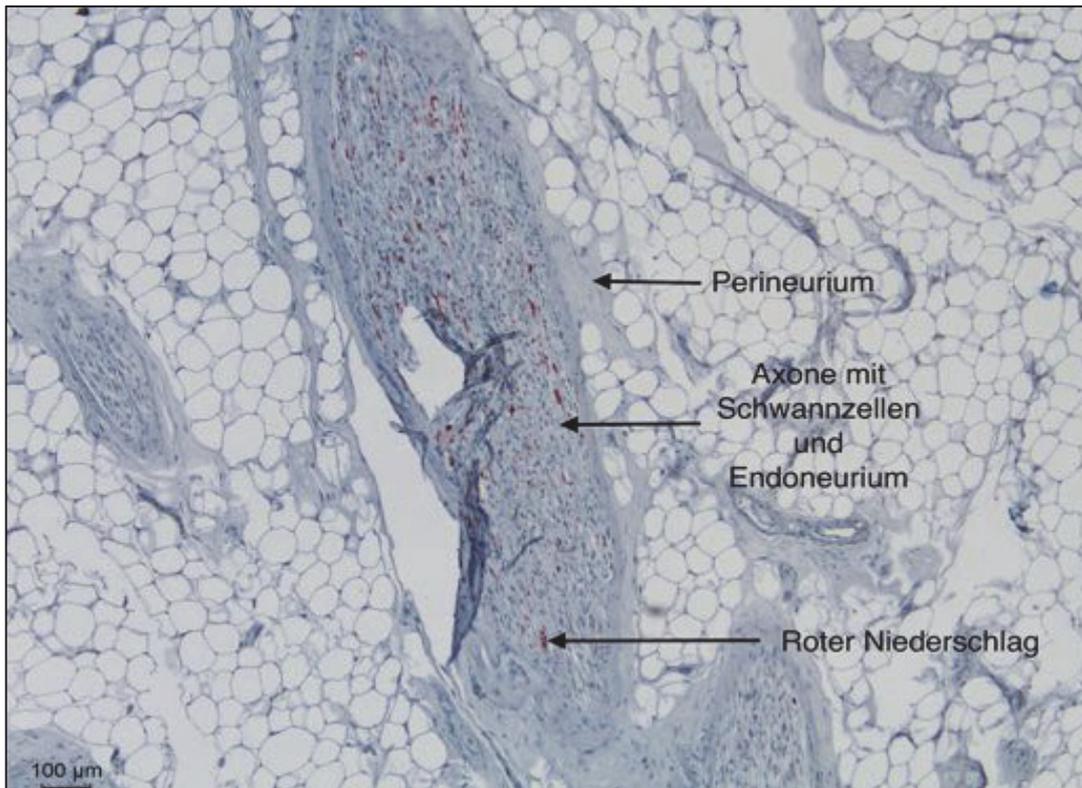


Abb. 24: Immunhistochemische Bestätigung der aufgefundenen Neurone durch Antikörper, die spezifisch an Neurofilamente der gesuchten Neurone binden und als roter Niederschlag im Präparat sichtbar sind. Färbung: Immunhistochemie (siehe auch Kap. 2.2.2).

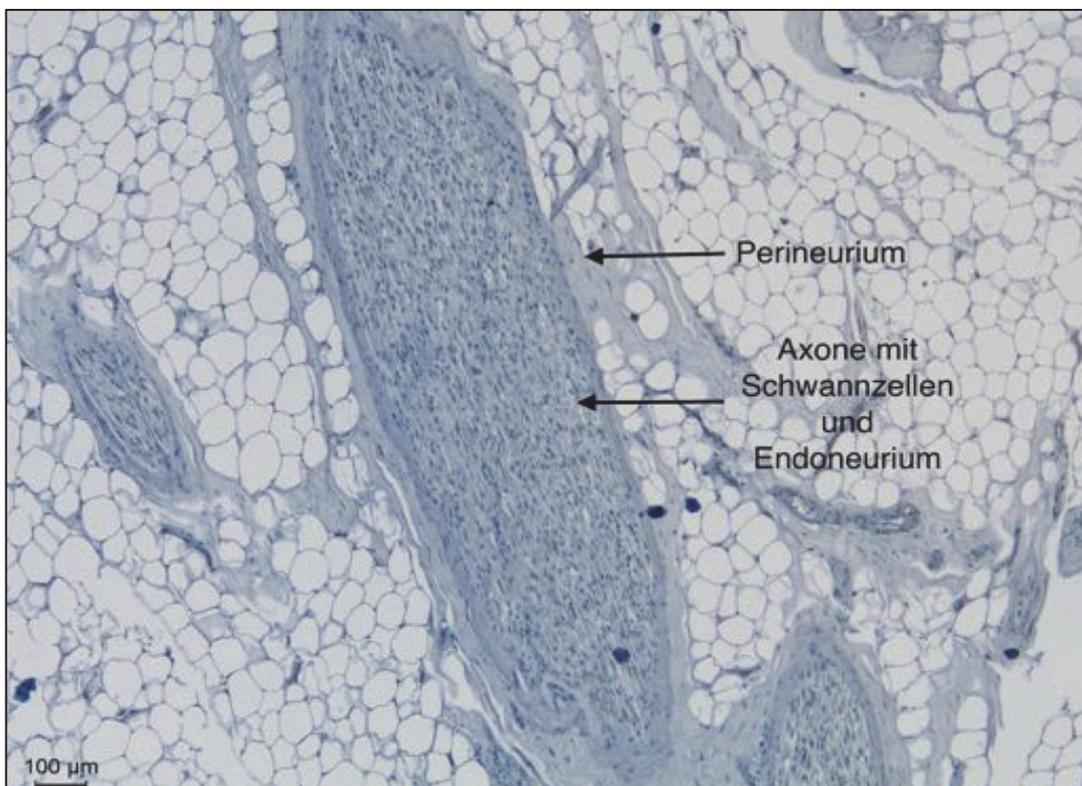


Abb. 25: Negativkontrolle der immunhistochemischen Untersuchung. Da kein rötlicher Niederschlag gefunden wurde, können unspezifische Immunbindungen der Antikörper ausgeschlossen werden. Färbung: Immunhistochemie mit Verwendung eines ein Maus- IgG1 anstatt des Primärantikörpers (siehe auch Kap. 2.2.2).

Die aufgefundenen Nerven wurden von Gefäßen begleitet und zeigten zahlreiche Aufzweigungen, die sich immer wieder mit kleiner werdenden Aufteilungen im Gewebe finden ließen (siehe hierzu Abb. 26).



Abb. 26: Aufteilung eines Nerven mit zwei kleineren Ästen, der durch zahlreiche Gefäße begleitet wird. **a:** Übersichtsdarstellung zur Orientierung. **b:** Ausschnitt der Nervenauftellung. Färbung H.E.

Die die Nerven begleitenden Gefäße zeigten dabei einen gewundenen bis geknäulten Verlauf (siehe hierzu Abb. 27).



Abb. 27: Gewundene Gefäße begleiteten die Nerven. Färbung: H.E.

Die sich aufteilenden Nerven zogen auch in derbe kollagene Bindegewebszüge hinein, in denen sie parallel zum Kollagen verliefen (siehe Abb. 28).

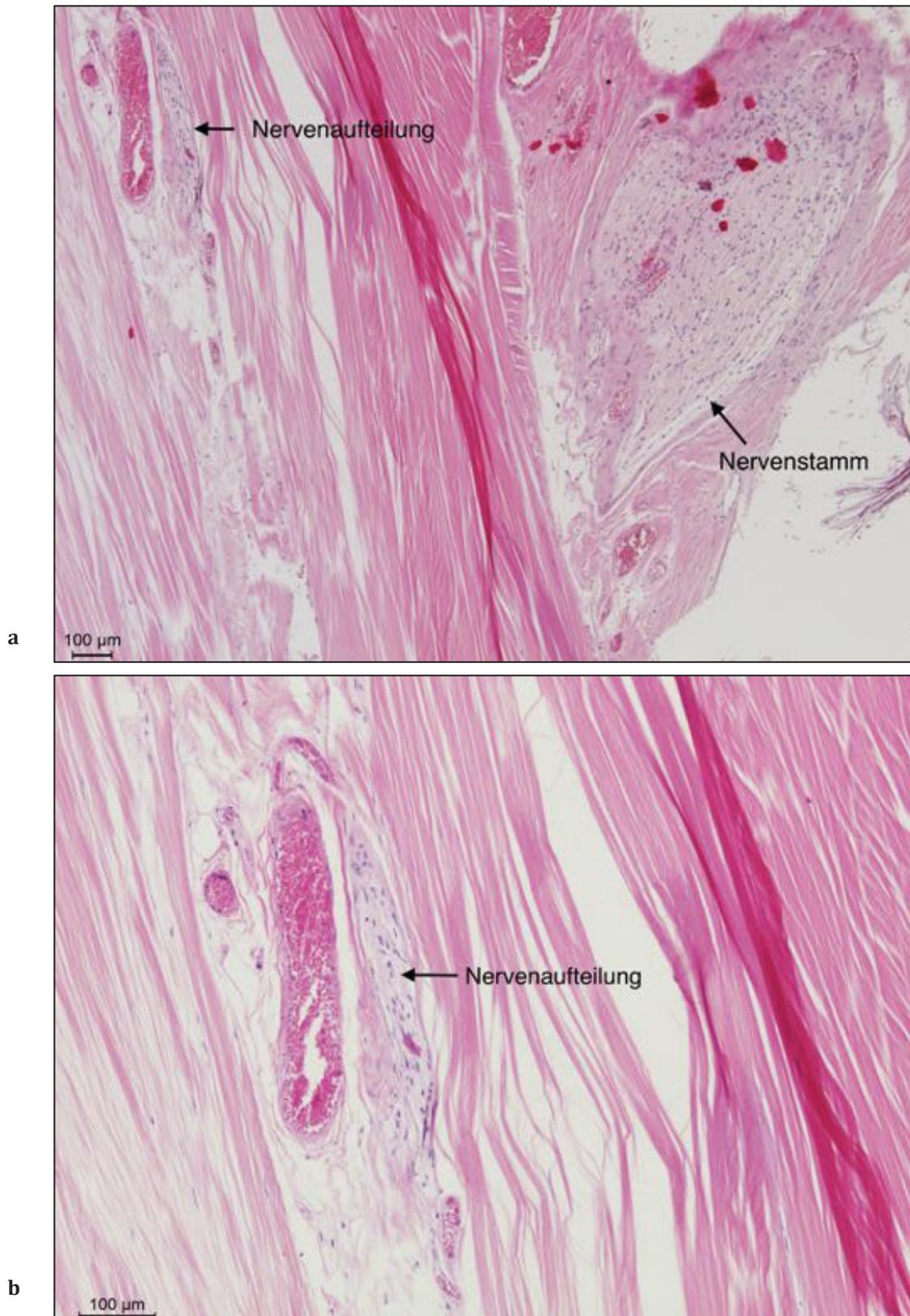


Abb. 28: Sich aufteilende Nerven, die parallel zum kollagenen Bindegewebe verlaufen. a: Übersicht des Nervenstamms mit einer Aufteilung. **b:** Ausschnitt mit der Nervenaufteilung. Färbung: H.E.

3.2.3 Rezeptive Einheiten

Zwischen Kollagenzügen konnte eine rezeptive Endstruktur mit einer Größe von ca. 30 μ m durch den roten Niederschlag in der Immunhistochemie nachgewiesen werden (siehe Abb. 29).

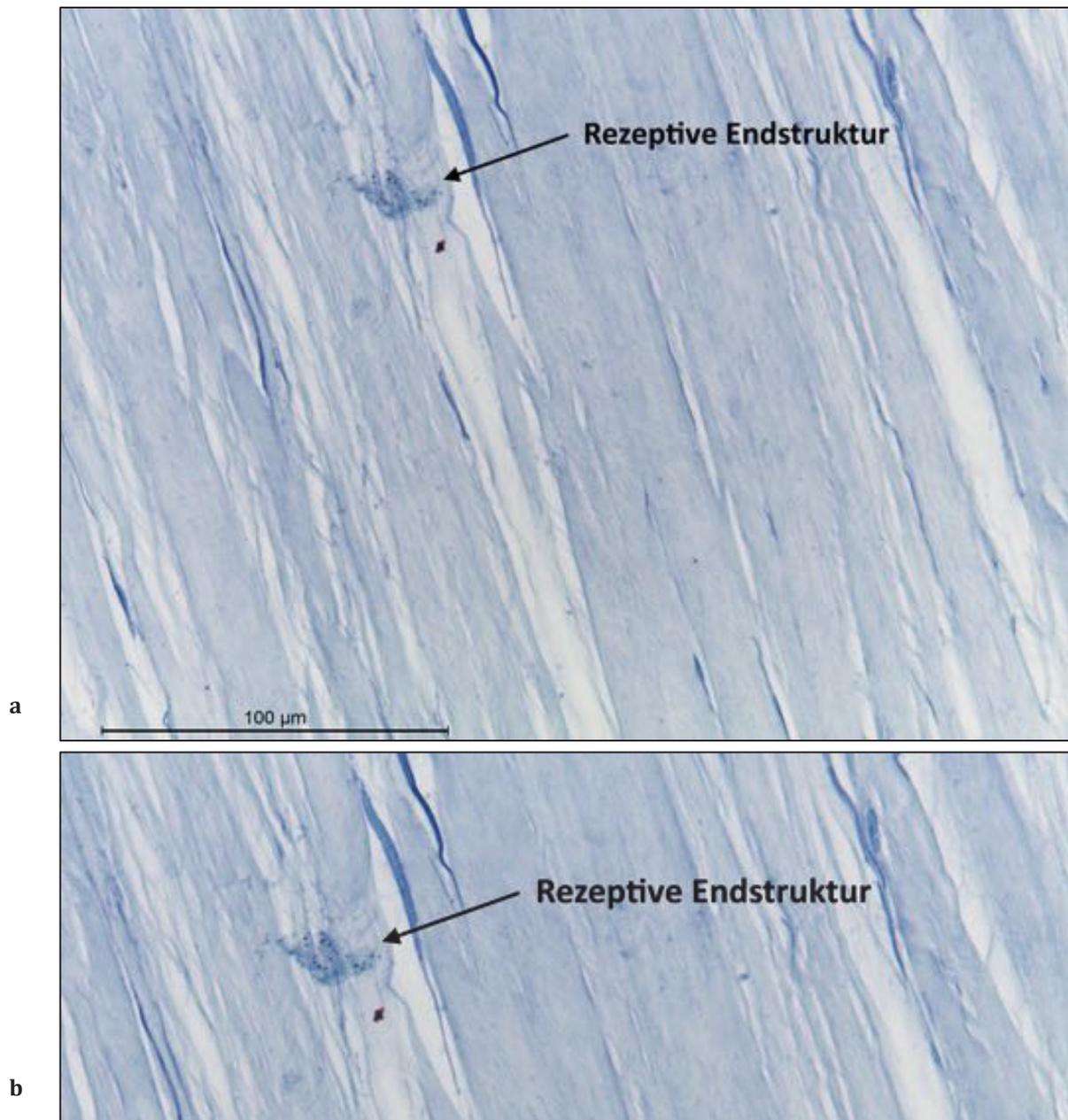


Abb. 29: Rezeptive Endstruktur zwischen Kollagenfasern. Unterhalb der Nervenendung ein weiterer sehr deutlicher rot- bräunlicher Niederschlag, der ein Färbeartefakt darstellt. Nachgewiesen durch den feinen roten Niederschlag der positiven Immunhistochemie. **a:** Übersicht der Endigung im kollagenen Bindegewebe. **b:** Vergrößerung aus der Übersicht. Färbung: Immunhistochemie (siehe auch Kap. 2.2.2).

5.2.4 Fazit

Somit ist eine Versorgung des dorsalen Bandapparates des SIGs durch die Segmente L5, S1 und S3 bei den Körperspendern 01/13, 09/13 und 55/12 auch histologisch nachgewiesen.

4. Diskussion

4.1 Bewertung von Material und Methoden

4.1.1 Makroskopische Untersuchung

4.1.1.1 Allgemeine Vorgehensweise

Das Sezieren von Leichen nimmt seit der Antike einen enormen Stellenwert in der Wissenschaft ein. Alle wichtigen anatomischen Kenntnisse sind letztendlich auf diese Untersuchungsart zurückzuführen (Benninghoff and Drenckhahn 2008).

Somit wurde in der vorliegenden Arbeit wie bei diversen anderen anatomische Studien über die Innervation des SIG ebenfalls die Präparation von Körperspendern genutzt. Dies ist insofern nachvollziehbar, da es momentan keine adäquate Alternative gibt, die Innervation des SIG mit hoher Genauigkeit zu untersuchen.

Alternativ wären radiologische Untersuchungsmethoden denkbar. Da jedoch der Durchmesser der gesuchten Nerven den Ergebnissen dieser Studie zufolge unter 2mm ist, ist ein Auffinden der Nerven mit unbekanntem Verlauf trotz modernster Geräte nicht möglich aufgrund der begrenzten Auflösung der Bilder und nicht durchführbarer Diskriminierung des Gewebes.

Andere Studien (wie beispielsweise Cohen and Abdi 2003), die auf einer Lokalanästhesie der lumbalen und sakralen Spinalganglien mit dem Ziel einer Schmerzausschaltung beruhen, liefern ebenfalls keine exakten Erkenntnisse über die Innervation, da nicht genau nachvollziehbar ist, wo der genaue Infiltrationsraum und damit auch der genaue Wirkort sich befindet.

4.1.1.2 Präparatanzahl

Im Rahmen der Untersuchung wurden 10 Körperspender bzw. 17 SIG präpariert, sodass anatomisch aufschlussreiche Ergebnisse erhalten werden konnten. Diese Erkenntnisse sollten durch nachfolgende Untersuchungen mit statistisch aussagekräftigen Präparatanzahlen bestätigt werden

In der Literatur findet sich zurzeit keine anatomische Studie über die Innervation des SIG, bei der eine größere Anzahl als 18 Präparate bzw. Patienten untersucht wurden (siehe dazu Tabelle 1).

Tab. 7: Anzahl der Präparate anatomischer Studien zur Innervation des SIG

Autor	Anzahl Präparate	Anzahl untersuchter SIG
Solonen 1957	9	18
Nakagawa 1966	10	?
Ikeda 1991	18 *	?
Fortin, Kissling et al. 1999	7	3 ventral, 4 dorsal
Grob, Neuhuber et al. 1995	8	7 ventral, 4 dorsal
Yin, Willard et al. 2003	3	6 dorsal
Cox and Fortin 2014	9	12 dorsal
Unsere Untersuchung	10	17 dorsal

*Aus den Tabellen der Publikation geht hervor, dass nicht bei allen Körperspendern die gesamte Innervation untersucht wurde

4.1.1.3 Präparatauswahl

Bei den Körperspendern handelte es sich aufgrund der Verfügbarkeit der Körperspender um sieben Männer und drei Frauen. Da diese Verteilung nicht repräsentativ für die natürliche Geschlechterverteilung ist, sollte diese in nachfolgenden Untersuchungen berücksichtigt werden, sofern dies aufgrund der Verfügbarkeit der Präparate möglich ist.

Weiterhin sollte bei der Auswahl darauf geachtet werden, dass die Körperspender in einem möglichst gutem Allgemeinzustand sind, um den natürlichen Verlauf der Nerven besser darzustellen zu können.

4.1.1.4 Fixierung

Neben dem Alter und dem körperlichen Allgemeinzustand hängen die Qualität und Quantität der gefundenen Nerven auch in hohem Maße von der Dauer und Art der Konservierung ab.

Wie in anderen Studien zur Innervation des SIG wurde auch für diese Untersuchung eine Konservierung durch Formaldehyd gewählt. Vorteile dieser Fixierungsart sind die jahrelange Haltbarkeit, niedrige Kosten, die einfache Handhabung sowie die große Verfügbarkeit am Institut für Anatomie I der Heinrich-Heine-Universität.

Dabei wurde in Kauf genommen, dass es durch die Konservierung zu einer Artefaktbildung kam, die zu Konsistenz- und Farbveränderungen führte. Dies hatte große Auswirkungen auf die Kompaktheit des Gewebes und die Beschreibung der Gewebemorphologie: Die organischen Gewebe verloren ihre Farbe und erhielten ein relativ einheitliches, gelb bis bräunliches Kolorit. Dadurch war die Darstellung und Abgrenzung von Nerven, Faszien und Muskeln deutlich erschwert.

Gleichzeitig nahm die Kompaktheit und Festigkeit des Gewebes so stark zu, dass die Präparation der autochthone Rückenmuskulatur aufwendig war.

Im Bereich des Kreuzbeines waren die Faszienblätter soweit verklebt, dass die dazwischenliegenden Nerven nicht immer in ihrem vollständigen Verlauf dargestellt werden konnten und somit auch nicht in die spätere Auswertung mit aufgenommen werden konnten. Dies betrug im Durchschnitt einen Ramus dorsalis sakralis pro Körperspender.

Zudem schrumpft das Gewebe häufig, wodurch teilweise nur noch relative Längen und Lagebeziehungen ableitbar sind.

In nachfolgenden Studien sollte deshalb überdacht werden, ob Thiel- oder Formaldehyd-fixierte Präparate gewählt werden.

4.1.1.5 Probleme bei der Präparation

Neben der bereits aufgeführten Problematik der Formaldehyd-Fixierung ergaben sich weitere Probleme bei der Präparation:

In dem sowieso schon sehr festen und kompakten Gewebe befanden sich immer wieder eingeblutete Areale in der Muskulatur, die sich teilweise nur als Block herauschneiden ließen. Wahrscheinlich handelte es sich dabei um Totenflecke (Livores mortis). Dies erschwerte die Suche nach Nerven.

Der teilweise extrem geringe Durchmesser der Nerven und das damit verbundene schnelle Reißen in dem kompakten umgebenen Gewebe erwies sich ebenfalls problematisch. Dabei handelte es sich meistens um Durchmesser von unter 1mm. Der dickste Nerv wies einen Querschnitt von ca. 2mm auf.

Des Weiteren wurde die Präparation im Bereich der Lendenwirbelsäule durch das häufige Auffinden von Nerven erschwert, bei denen sich nach langwieriger Präparation herausstellte, dass sie die Muskulatur oder Haut und nicht, wie erhofft, das SIG versorgten. Diese die Muskulatur und Haut versorgenden Nerven dürfen nicht mit jenen verwechselt werden, die das SIG innervieren.

Auch die unmittelbare Nähe zwischen den Ansätzen bzw. Ursprüngen der Muskelsehnen und den Nerven stellte sich für die Präparation als schwierig dar. Zum Teil waren die Nerven mit den Sehnen durch bindegewebige Züge verbunden, die vor Entfernung der Sehnen zunächst vorsichtig durchtrennt werden mussten. Ansonsten wären bei der Entfernung der Sehnen die aufgefundenen Nerven mit ausgerissen und somit nicht mehr in ihrem Verlauf darstellbar gewesen.

Im Bereich des Kreuzbeines und SIG verliefen die gefundenen Nerven zwischen den extrem straffen Bindegewebssträngen und den Sehnenblättern der dort ansetzenden Muskulatur. Um an die Nerven frei zu präparieren, musste die obere Faszie, die aus den Sehnen der autochthonen Rückenmuskulatur bestand, vorsichtig abgetrennt werden.

Häufig waren die Sehnen und Faszien miteinander verbunden oder durch die Fixierung verklebt, sodass beim Entfernen des Bindegewebes die Nerven schnell mit ausrissen.

Möglicherweise wäre eine Darstellung der Nerven somit ohne eine Fixierung mit starken Konsistenzveränderungen für nachfolgenden Untersuchungen sinnvoll.

Da die jeweiligen Muskelstränge des M. erector spinae selbst keine eigenen Muskelfaszien besitzen, scheinen die Nerven für den Präparierenden relativ wahllos durch die enorm dicken Muskelstränge zu verlaufen.

Aus diesem Grund musste die gesamte Muskulatur in diesem Bereich vorsichtig präpariert werden, was einen erheblichen Zeitaufwand mit sich zog.

Diese Schwierigkeiten hatten unter anderem auch zur Folge, dass einige gefundene Nerven, die zunächst den Anschein erweckten, das SIG zu innervieren, nicht in ihrem gesamten Verlauf dargestellt werden konnten. Dies schloss eine Aufnahme dieser Nerven in die Auswertung aus.

Einige dieser Probleme können sicherlich durch die Wahl einer anderen Fixierung in nachfolgenden Studien gelöst werden. Allerdings wird eine andere Konservierungsmöglichkeit nicht alle Probleme – wie zum Beispiel die enge topographische Beziehung der enorm dünnen Nerven zur Muskulatur und Sehnen – lösen können, sodass in diesem Bereich das Auffinden der Nerven zeitaufwändig bleiben wird.

4.1.1.6 Messung der gefundenen Strukturen

Ein weiteres Problem stellt die Messung der makroskopisch aufgefundenen Strukturen dar, die mit einem Zentimetermaß durchgeführt wurden. Dadurch sind exakte Messungen im Millimeterbereich nur eingeschränkt möglich.

Durch die schlechte Abgrenzbarkeit der Strukturen untereinander sowie leichte Schrumpfungsprozesse durch die Formaldehyd-Fixierung sind weitere Messfehler denkbar.

4.1.1.7 Präparationsgebiet

Im Gegensatz zu vergleichbaren anatomischen Studien wurde in der vorliegenden Arbeit neben dem lumbosakralen Übergang und der sakralen Wirbelsäule auch die gesamte Lendenwirbelsäule präpariert. Dadurch konnte eine Innervation ab dem zweiten Lumbalwirbel aufgefunden werden. Bis auf Solonen und Ikeda untersuchten andere Autoren wie Cox and Fortin 2014, Grob, Neuhuber et al. 1995, McGrath and Zhang 2005 nur die kaudalen Anteile der Wirbelsäule. Möglicherweise entging ihnen hierdurch eine Versorgung aus lumbalen Segmenten.

4.1.2. Mikroskopische Untersuchung

In der mikroskopischen Untersuchung wurden die Präparate mit Hämatoxylin-Eosin-Färbung nach (Mayer 1893) und Immunhistochemie gefärbt. Die HE-Färbung nutzte dabei der Übersicht der Gewebeproben, um Leitungsbahnen, mögliche Mechanosensoren und die Beschaffenheit der untersuchten Bänder zu identifizieren.

Die Immunhistochemie diente in dieser Arbeit dem histologischen Nachweis von Nerven mithilfe von Antikörpern, die spezifisch an Neurofilamente der gesuchten Neurone binden. Um unspezifische Immunbindungen auszuschließen, wurde parallel neben der oben beschriebenen Immunhistochemie eine Negativkontrolle an Paraffinschnitten durchgeführt. Somit konnten die in der HE-Färbung aufgefundenen Nerven durch die Anfärbung mit Immunhistochemie sicher nachgewiesen und Fehlinterpretationen vermieden werden.

Ähnlich wie bei der makroskopischen Analyse ergaben sich auch in der histologischen Aufarbeitung der Proben Probleme durch die Formaldehyd-Fixierung. Es zeigte sich in den mikroskopischen Präparaten nur noch eine geringe Reaktivität der Gewebeproben mit der Immunhistochemie. Dadurch wurden nicht alle nervalen Strukturen ausreichend angefärbt.

Sicher nachgewiesene Aussagen über mögliche nervliche Komponenten in den Gewebeproben sind nur erlaubt, wenn sie sich eindeutig anfärben lassen. Möglicherweise kann die Reaktivität der Präparate gesteigert werden, in dem eine Thiel-Fixierung oder eine kürzere Formaldehyd-Fixierung gewählt wird. Dies sollte in nachfolgenden Studien beachtet werden.

4.2 Bewertung der makroskopischen Ergebnisse

4.2.1 Große Variabilität der Innervation des SIG

In der Literatur lassen sich Angaben über eine Innervation des SIG durch Rami dorsales aus den Segmenten L5 bis S4 finden:

So fand Solonen (1957) dorsale Spinalästen aus S1 und S2. Nakagawa (1966) beschreibt eine Versorgung durch L5 bis S2, während Ikeda's Untersuchungen Rami dorsales aus L5, S1 und S3 aufzeigte (Ikeda 1991).

Neuere Studien wie die von Fortin et al (1999) fanden Nerven aus S1 bis S4. Grob et al. (1995) beschreiben eine Versorgung aus S1 bis S2, Cox et al. (2014) aus L5 bis S1 und Yin et al. (2003) aus L5- S4 (siehe hierzu auch Tabelle 1).

Demgegenüber steht die vorliegende Studie, die SIG innervierende Rami dorsales in unterschiedlicher Häufigkeit aus den Segmenten L2 bis S5 sowie einem kokzygealen Segment aufzeigt. Somit erfolgte hierbei eine Innervation des SIG aus bis zu zehn verschiedenen Segmenten. Demnach könnte das SIG bezüglich der Anzahl der Segmente eines der meist innervierten Gelenk des menschlichen Körpers darstellen.

Über eine dorsale Versorgung des SIG aus den lumbalen Segmenten L2 bis L4 lassen sich in der Literatur und den oben genannten Publikationen keine Aussagen finden (siehe hierzu auch Tab.1).

Tab. 8: Innervation des SIG verschiedener anatomischer Studien

Autor	Rami ventrales	Rami dorsales	Nerven
Solonen (1957)	L3-S1	S1-S2	N. gluteus sup.
Nakagawa (1966)	L5- S1	L5 - S2	N. gluteus sup.
Ikeda (1991)	L3 - S3	L5, S1, S3	Äste des Plexus sacralis
Fortin, Kissling et al. (1999)	nein	S1 – S4	nein
Grob, Neuhuber et al. (1995)	nein	S1 – S2	nein
Cox and Fortin (2014)	nicht untersucht	L5 –S1	N. gluteus sup.
Yin, Willard et al. (2003)	nicht untersucht	L5, S1- S4	nicht untersucht
Funde der vorliegenden Untersuchung	nicht untersucht	L2- S5, Co1	nein

Gründe für die Abweichungen der Ergebnisse dieser Studie mit den Erkenntnissen anderer Autoren sind nicht leicht zu klären und gewiss vielfältig. Ein Grund könnte die Auswahl des Präparationsgebietes sein. Im Rahmen dieser Studie wurde die Wirbelsäule ab dem ersten Lumbalwirbel bis zum Steißbein präpariert. Mit Ausnahme von Ikeda (1991) und Solonen (1957) untersuchten die anderen oben aufgeführten Arbeiten lediglich die Beckenregion und gegebenenfalls den lumbosakralen Übergang.

Ikeda (1991) untersuchte die dorsale Innervation erst ab dem 4. Lumbalganglion; bei Solonen ist unklar, inwieweit seine Nachforschungen die lumbale dorsale Versorgung beinhalteten (Solonen 1957).

Diese bislang unbekannt hohe lumbale dorsale Innervation sowie die daraus resultierende Breite und Varianz der Versorgung des SIG kann die hohe Anzahl therapierefraktärer SIG-Beschwerden erklären. Möglicherweise hängt auch die große Prävalenz unspezifischer Rücken- und Kreuzschmerzen hiermit

zusammen, da sich aufgrund dieser Erkenntnisse neue Schmerzursachen ergeben:

Wegen des Ursprungs der Nerven aus der oberen und mittleren Lendenwirbelsäule und den damit verbundenen Nervenverläufen sind in diesem Bereich Nervenreizsyndrome denkbar, die im Sinne der Projektion als SIG-Schmerz wahrgenommen werden. Damit ergeben sich nicht nur neue Pathologien für Nervenreizungen bei SIG-Beschwerden, sondern auch neue therapeutische Ansatzpunkte. So wären beispielsweise Injektionsverfahren im Bereich der lumbalen Spinalganglien eine mögliche Therapieoption (siehe dazu auch Kap. 4.2.5.3 Injektionsverfahren als Therapieansatz).

4.2.1.1. Inter- und intraindividuelle Seitenunterschiede

Des Weiteren beschreiben Solonen (1957), Ikeda (1991) und Cox et Fortin (2014) inter- und intraindividuelle Unterschiede der Innervation des SIG (Solonen 1957, Ikeda 1991, Cox and Fortin 2014). Eine große Variabilität im Bereich des dorsalen Plexus sacralis wird weiterhin von Willard (1998), Yin (2003) sowie (Horwitz 1939) bestätigt.

Wie bereits von anderen Autoren beschrieben zeigte auch diese Untersuchung starke Versorgungsunterschiede: Bei keinem der untersuchten Körperspender fand sich eine gleichförmige dorsale SIG-Innervation. Nicht nur zwischen den Präparaten sondern auch intraindividuell zeigten sich deutliche Seitenunterschiede.

Dabei wurde sowohl auf lumbaler als auch sakraler Höhe eine Häufung der aufgefundenen Nerven auf der linken Körperhälfte aufgefunden. Obwohl die oben genannten Autoren ebenfalls intraindividuelle Unterschiede auffanden, beschreiben sie keine derartige Kumulation.

Diese seitendifferente Versorgung lässt eine sehr große Variabilität der Innervation des SIG vermuten.

Gleichzeitig stellt sich die Frage, ob das zentrale Nervensystem auf mehr Informationen über die Stellung des linken SIG und seiner Umgebung angewiesen ist? Wozu sollte ein solch verstärkter Informationsfluss nötig sein?

Zhang et al (2017) zeigten durch neuronale Bildgebungen, dass neuronale Verbindung zwischen der unteren Wirbelsäule mit ihren umliegenden Strukturen und sensorischen, am Gleichgewicht beteiligten Strukturen des Gehirns bestehen müssen: Sie fanden bei Patienten mit Kreuzschmerzen abnormale neuronale Aktivitäten im Cerebellum und sensorischen Cortexarealen (Zhang, Wu et al. 2017).

Somit liegt der Rückschluss nahe, dass es sich bei den Informationen aus dem SIG um sensible bzw. propriozeptive Informationen handelt, die der Aufrechterhaltung des Gleichgewichts dienen (siehe hierzu auch Kap. 4.2.5.1 Die Bedeutung des SIG für das Gleichgewicht).

Auch die seitendifferente Versorgung könnte mit der Aufrechterhaltung des Gleichgewichts zusammenhängen:

Es ist anzunehmen, dass während der Embryogenese die Innervation der Wirbelsäule auf beiden Körperhälften zunächst gleich angelegt wurde. Minimale kongenitale Seitendifferenzen zwischen der linken und rechten Körperhälfte kommen vor, jedoch nicht in dem Ausmaß, wie es in der vorliegenden Studie aufgefunden wurde.

Andererseits kann eine sekundäre Zurückbildung der Nerven stattfinden, wenn diese nicht ausreichend gebraucht werden. Im Falle der vorliegenden Seitenunterschiede dieser Untersuchung hieße dies, dass bei den untersuchten Körperspenden die Nerven zum SIG und dessen Umgebung auf rechten Körperhälfte weniger genutzt wurden und sich somit zurückgebildet haben. Gleichzeitig lässt sich der Umkehrschluss ziehen, dass das zentrale Nervensystem auf mehr Informationen über die Stellung des linken SIG und dessen Umgebung angewiesen ist und deshalb keine Rückbildung der Nerven auf dieser Seite stattfand.

In Hinblick auf die oben beschriebene Funktion des SIG für das Gleichgewicht kann daher vermutet werden, dass die linke Seite der unteren Wirbelsäule eine größere Rolle für die Aufrechterhaltung des Gleichgewichtes einnimmt als auf der rechten Körperhälfte.

Dabei könnte ein Zusammenhang bestehen mit der Tatsache, dass jeder Mensch eine dominante Körperhälfte besitzt. Bei der Mehrheit der Menschheit ist dies die rechte Körperhälfte.

Vor allem Bereich der Hände ist dieser Dominanz-Unterschied stark ausgeprägt, sodass ein Zusammenhang zwischen der deutlich häufigeren Rechtshändigkeit und der stärkeren Innervation des linken SIG bestehen könnte. Dadurch ergibt sich die Vermutung, dass für Bewegungen der rechten Hand und des rechten Arms eine stärkere Stabilisierung der linken Körperhälfte nötig ist, um das Gleichgewicht bzw. den zweibeinigen Stand zu sichern.

Andererseits könnten auch im Bereich der Beine Dominanzunterschiede vorliegen:

Beim Rechtshänder müsste das rechte Bein das Spielbein darstellen, während das linke Bein das Standbein wäre. Demzufolge ist das linke SIG mehr Druck ausgesetzt als das rechte SIG. Dies macht eine stärkere Stabilisierung des linken SIG notwendig. Möglicherweise beruht somit die verstärkte Innervation des linken SIG auf der Notwendigkeit vermehrter sensorischer Informationen, um einer solchen Stabilisierung nachzukommen.

Damit käme dem SIG eine Schlüsselrolle für das zweibeinige Stehen und Gehen zu.

Durch die deutlichen Seitenunterschiede bzw. die stärkere Innervation auf der linken Körperhälfte wären auch bei der Prävalenz von SIG-Beschwerden Seitenunterschiede denkbar, da durch eine größere Versorgung auf der linken Seite mehr Irritationen im Nervenverlauf möglich sind. Derartige seitenunterschiedliche Prävalenzen sind in der Literatur nicht bekannt.

4.2.1.2 Ausblick

Da es keine adäquaten Vergleichsarbeiten bezüglich der lumbalen Versorgung des SIG und Seitenunterschiede der Innervation bei bestehender klinischer Relevanz gibt, sollten diese durch nachfolgende anatomische Untersuchungen weiter analysiert werden. Weiterhin sollte die Bedeutung der Gleichgewichts-Propriozeption des SIG untersucht werden. Dies könnte neben anatomischen Studien über die seitendifferente Innervation auch durch sportmedizinische Gleichgewichtsuntersuchungen erfolgen.

Da die Seitenunterschiede der SIG-Innervation theoretisch auch seitendifferente Prävalenzen von Beschwerden verursachen könnten, sollte dies durch Folgestudien ebenfalls untersucht werden, indem beispielsweise Patienten mit SIG-Syndromen gezielt auf Seitendifferenzen klinisch untersucht werden.

4.2.2 Anatomie der sakralen Rami dorsales

4.2.2.1 Innervation aus S1 bis S5

Die dorsalen Spinalnerven S1 bis S5 traten im Bereich des Kreuzbeines in einer kleinen Schicht lockeren Bindegewebes aus den dorsalen Neuroforamina aus, wobei sie von straffen Bindegewebssträngen der umliegenden Ligamente umgeben und den festen Sehnenblättern der autochthonen Rücken- und Glutealmuskulatur überzogen waren. Zu selbigen Aussagen kamen auch Grob et al. (1995).

Je nach Präparat ließen sich unterschiedlich viele Hauptstämme auffinden, die teils sehr unterschiedliche Verlaufsrichtungen aufwiesen. Aus einigen Neuroforamina traten bis zu drei Nervenstämme verschiedener Richtungsverläufe aus. Dies wird durch Angaben von Cox et al. (2014) und Grob et al. (1995) bestätigt.

Einige der austretenden Hauptstämme teilten sich in mehrere kleinere Zweige auf, die einerseits die Gelenkbänder durchsetzend zum SIG verliefen, andererseits auch in die benachbarte Muskulatur zogen und damit wahrscheinlich neben dem SIG auch den Bandapparat und die Sehnen der Rücken- und Glutealmuskulatur versorgen. Ähnliche bzw. gleiche Aussagen trafen Grob et al. (1995), Willard (1998) und Cox et al. (2014).

Dass Nerven neben Gelenken auch angrenzende Ligamente und Muskeln versorgen, ist von anderen Gelenken des menschlichen Körpers bekannt: So zeigten Kennedy et al. dies in makroskopischen, histologischen und neurophysiologischen Untersuchungen an menschlichen Knien (Kennedy, Alexander et al. 1982). Zu selbigen Aussagen kamen auch Freeman und Wyke, die jedoch Kniegelenke von Katzen untersuchten (Freeman and Wyke 1967).

Weiterhin zeigt die vorliegende Untersuchung foramennahe nervale Verbindungen zwischen den Hauptstämmen von S1 und S2 sowie S5 und einem kokzygealen Segment, die in der Literatur bekannt sind:

Grob (1995) beschreibt ebenfalls Längsverbindungen der Rami dorsales untereinander, während Willard (1998) eine Verbindung zwischen den Segmenten S1 und S3 zeigte. Cox (2014) und Johnston (1908) fanden kokzygeale Fasern, die ebenfalls mit den sakralen Rami dorsales kommunizierten. Horwitz konnte in einer großen Studie mit 60 Präparaten sogar 5 verschiedene Typen dieser nervalen Verbindungen auffinden, die er als dorsalen Plexus sacralis bezeichnete (Horwitz 1939) und teilweise von Nagakawa bestätigt wurde (Nakagawa 1966).

Neben diesen foramennahen Verbindungen ist auch von weiter peripher gelegenen Verbindungen zwischen den Sakralnerven der verschiedenen Segmente auszugehen.

Die Wirbelkörper der höheren Wirbelsäule sowie deren direkte Umgebung werden umfangreich von Ästen der darüber- und darunterliegenden Segmente versorgt (Van den Berg and Cabri 2003, Jerosch and Steinleitner 2009), sodass ein Nervengeflecht mit zahlreichen feinen nervalen Verbindungen um jeden Wirbelkörper wahrscheinlich ist.

Da das Os sacrum onto- und phylogenetisch aus einzelnen Wirbeln bestand (Martin 1928, Solonen 1957), liegt es nahe, dass sich im Bereich des Os sacrum ebenfalls ein solches übersegmentales Geflecht befindet. Derartige periphere Nervenverbindungen dürften jedoch so fein sein, dass sie makroskopisch nicht auffindbar sind. Trotzdem müssten sie an der Bildung eines dorsalen Nervenplexus beteiligt sein.

Daneben existieren auch nervale Verbindungen zwischen lumbalen und sakralen Segmenten, die in Kap. 4.2.4 weiter beschrieben werden.

Insgesamt zeigt sich in dieser Untersuchung eine sehr variable inter- und intraindividuelle sakrale Versorgung und Bildung eines dorsalen Nervenplexus bzw. Plexus sacralis bzw. lumbosacralis. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von Horwitz (1939), Willard (1998) und Cox (2014), Grob (1995), Nakagawa (1966) und Yin (2003).

Die Anzahl der beteiligten Segmente sowie die Bildung eines dorsalen Nervenplexus deutet auf eine sehr große Innervation des Kreuzbeines, SIG und der umliegenden Umgebung hin. Vermutlich handelt es sich hierbei um eine propriozeptive Versorgung, wie die Ergebnisse von Zhang et al (2017) durch neuronale Bildgebungen vermuten lassen (siehe Kap. 4.2.1.1).

Eine solche überproportionale Versorgung des SIG nimmt insofern klinische Relevanz ein, dass das SIG und seine direkte Umgebung auch zentral stark repräsentiert sein müssen.

Laut Ahrens et al. ist die Wirbelsäule im ZNS stark präsent. Dies gilt vor allem für lumbale Bereiche. Daraus ziehen die Autoren den Rückschluss, dass kleine pathologische Veränderungen an der Wirbelsäule bewusst werden, die in anderen Bereichen des Bewegungsapparates nicht wahrgenommen werden (Jerosch and Steinleitner 2009).

Diese Aussagen sind auch auf den SIG-Komplex übertragbar, was die hohe Prävalenz von SIG-Beschwerden erklären könnte. Mit anderen Worten: Das SIG ist wie die Lendenwirbelsäule schmerzempfindlicher als andere Stellen des Bewegungsapparates.

Gleichzeitig ergeben sich in dieser Untersuchung durch den Verlauf der aufgefundenen Nerven auch mehrere Ursachen für SIG-Schmerzen, die durch die große propriozeptive Innervation früher bewusst werden können:

Durch die enge topographische Verbindung zum umliegenden Stütz- und Halteapparat ergibt sich für die aufgefundenen Nerven die Gefahr, Druckschädigungen und Spannungen in ihrem Verlauf ausgesetzt zu sein.

Eine weitere Schmerzquelle könnte die Tatsache darstellen, dass in der vorliegenden Studie das SIG, umliegende Bänder und Faszien sowie die Muskulatur von denselben Nerven versorgt werden. Dabei sind sowohl die Bänder, als auch die Muskulatur und Faszien als Ursachen für unspezifische Kreuzschmerzen bekannt (van Rossum, Hanisch et al. 1997, Snijdelaar, Dirksen et al. 2000, Mense 2001, Szadek, Hoogland et al. 2008, Varga, Dudas et al. 2008, Eichenseer, Sybert et al. 2011, Tesarz, Hoheisel et al. 2011). In diesen Strukturen entstehende Schmerzen können somit im Sinne eines übertragenen Schmerzes auch in das SIG projiziert werden. Wahrscheinlicher ist jedoch ein schlecht lokalisierbarer Schmerz des gesamten SIG- Komplexes. Es stellt sich daher die Frage, ob ein reiner SIG-Schmerz überhaupt möglich ist oder es sich aufgrund des Innervationsmuster um Schmerzen im Bereich des gesamten SIG-Komplexes handelt.

Dies hätte auch auf die Therapie bei SIG-Beschwerden Auswirkungen:

Infiltrationen von Lokalanästhetika und Glukokortikoiden in den Bereich des SIG sind seit langem etabliert. Ergebnissen von Grob et al. (1995), Cox et al. (2014), Willard et al. (1998) und dieser Untersuchung würden neben intrartikulären Injektionen auch periartikuläre und gegebenenfalls intramuskuläre Infiltrationen bei SIG- Beschwerden Sinn machen. Die deckt sich mit Beobachtungen von Rosenberg et al., die in einer prospektiven Doppelblind-Studie zeigten, dass nur 22% der Injektionen tatsächlich intraartikulär injiziert wurden, wobei deutlich mehr Injektionen jedoch erfolgreich durchgeführt werden. Somit müssen in der direkten Umgebung des SIG weitere potenziell schmerzhaft Strukturen vorhanden sein (Rosenberg, Quint et al. 2000). Dies deckt sich mit den Aussagen zweier Doppelblindstudien, die eine positive

Wirkung von periartikulären Injektionen in den dorsalen Bandapparat zeigten (Luukkainen, Nissila et al. 1999, Luukkainen, Wennerstrand et al. 2002).

4.2.2.2 Ausblick der Ergebnisse der sakralen Präparation

Eine derart enge topographische Beziehung zwischen den Sakralnerven, der umliegenden Muskulatur, Bändern und Faszien wie in dieser Untersuchung vorgefunden ist in der Literatur nicht ausreichend beschrieben. Gleiche Aussagen trafen auch Willard et al. (Willard, Carreiro et al. 1998).

Dabei ist diese gemeinsame Innervation von klinischer Relevanz. Dementsprechenden sollte den Ergebnissen und den daraus ableitbaren Hypothesen dieser Untersuchung in Folgestudien nachgegangen werden.

4.2.3 Nervi clunium medii

Grob (1995) und Willard (1998) beschreiben in ihren Untersuchungen Nerven aus den dorsalen Segmenten S1 und S2, die sowohl den Bandapparat dorsal des SIG als auch die Ursprungssehnen des M. gluteus superior durchsetzten. Schließlich gelangten sie in oberflächlichere Hautschichten, sodass sie als Nn. clunium medii identifizieren werden konnten. Auch Johnston (1908) beschreibt eine Innervation der Haut durch den dorsalen Plexus sakralis.

Wie die bereits genannten Autoren zeigt auch die vorliegende Untersuchung einen aus S1 kommenden Ramus spinalis, der nach Durchsetzen des Bandapparates sowie Abgabe kleiner Äste an Bänder sowie an den Gelenkspalt des SIG die Ursprungssehnen des M. gluteus superior durchsetzte und in das subkutane Fettgewebe weiterzog. Da in dieser Studie die Haut der untersuchten Präparate schon vollkommen entfernt war, kann der gefundene Nerv nicht sicher als N. clunium medius bezeichnet werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass es um den gleichen Fund wie bei Grob (1995) und Willard (1998) handelt. Insofern können wir die Aussagen Grob's (1995) und Willard's (1998) bestätigen.

Dieser Nervenverlauf erklärt, weshalb es bei symptomatischen SIG zu ausstrahlenden Schmerzen in die Glutealregion im Sinne eines übertragenen Schmerzes kommen kann. Gleiche Ansichten vertreten auch Grob et al. (Grob, Neuhuber et al. 1995). Bekräftigt wird dies durch die Tatsache, dass die Ursprungssehnen eine manualtherapeutische Irritationszone des SIG darstellen (Grob, Neuhuber et al. 1995, Dvořák, Dvořák et al. 1997).

4.2.4 Anatomie der lumbalen Nerven

4.2.4.1 Versorgung aus L4 und L5

Cohen und Abdi (2003) injizierten bei 18 Patienten mit SIG-Beschwerden Lidocain im Bereich der Rami dorsales von L4 und L5 sowie der Rami laterales von S1 bis S3. Auf diese Weise konnten sie eine Linderung des Schmerzes bei 17 von 18 Patienten erzielen; bei 72% fand eine signifikante Schmerzreduktion um mehr als 50% statt (Cohen and Abdi 2003). Damit erreichten sie ein besseres Outcome als Studien, die lediglich Injektionen im Bereich des SIG injizierten (Maugars, Mathis et al. 1992, Dussault, Kaplan et al. 2000, Ojala, Klemola et al. 2001).

Dieses bessere Outcome lässt eine Innervation aus L4 und L5 vermuten. Dennoch beweist die Studie von Cohen und Abdi (2003) die lumbale Versorgung des SIG nicht eindeutig, da die Schmerzquelle durch die zusätzlichen sakralen Injektionen nicht genau bestimmbar ist.

Nagakawa (1966), Ikeda (1991), Cox et Fortin (2014) und Yin et al (2003) fanden in anatomischen Studien dorsale Spinaläste aus dem fünften Lumbalsegment, die das SIG versorgten. Durch diesen Fund kann teilweise das bessere Outcome der Patienten in der oben genannten Studie von Cohen und Abdi (2003) erklärt werden. Über eine dorsale SIG-Innervation aus L4 lassen sich jedoch in der Literatur keine Aussagen finden.

Im Rahmen der vorliegenden Studie zeigte sich eine Innervation des SIG durch Rami dorsales aus L5, bei der die Nerven auf direktem Weg vom Ganglion an

sakroiliakalen Spalt herantraten und in den dort befindlichen Bandapparat verschwanden. Somit bestätigt diese Untersuchung die Innervation aus L5.

Darüberhinaus zeigte sich eine dorsale Innervation des SIG aus dem Segment L4 und bietet damit das anatomische Korrelat für das oben beschriebene bessere Outcome von Injektionsverfahren im Bereich L4, welche von Cohen und Abdi (2003) durchgeführt wurden. Somit bekräftigen sich die vorliegenden Ergebnisse und die Resultate von Cohen und Abdi (2003) gegenseitig.

Eine weitere Bestätigung für die aufgefundene Innervation aus L4 und L5 in der hier präsenten Arbeit stellt die Studie von Blaettner und Thoden (1992) dar: Ihre Untersuchung zeigte bei 82% der Patienten mit einem Bandscheibenprolaps auf Höhe L3/L4, L4/L5 und L5/ S1 SIG-Blockierungen und -Schmerzen (Blaettner and Thoden 1992). Blaettner und Thoden (1992) nennen muskuläre Verspannungen als Ursache der SIG- Problematik, während nach den Funden dieser Arbeit eine Wurzelkompression von L4 und L5 als Ursache der SIG-Beschwerden ebenfalls in Betracht kommt. Somit unterstützen ihre Beobachtungen den vorliegenden Fund.

Die Kenntnis der lumbalen SIG-Mitinnervation aus den Rami dorsales der Segmente L4 und L5 weist neue Schmerzursachen und therapeutische Ansatzpunkte bei SIG-Problematiken auf. Hier sind beispielsweise lumbale Injektionsverfahren anzuführen, die von Cohen und Abdi (2003) bereits erfolgreich durchgeführt wurden.

4.2.4.2 Versorgung aus L2 bis S2

Im Rahmen dieser Untersuchung zeigte sich bei einem Körperspender auf der linken Seite ein ca. 1mm dicker Ramus medialis oder intermedialis, der aus dem zweiten Spinalganglion austrat und über die Hinterfläche der Processi costales der nachfolgenden Wirbel nach kaudal zum Kreuzbein zog. Dabei nahm der Nerv in seinem Verlauf aus jedem kaudal liegenden Segment bis S2 weitere Nervenfasern auf, sodass ein Nervengeflecht von L2 bis S2 gebildet wurde. Dieser Plexus kommunizierte gleichzeitig mit Nerven, die an den Gelenkspalt des SIG herantraten. An die umliegende Muskulatur wurden keine Fasern abgegeben.

Diese intersegmentale Nervenverbindung entsprach nicht dem Truncus sympathicus, der ventral der Processus costales direkt über die Vorderfläche der Wirbelkörper verläuft.

In der Literatur wird in Bezug über die SIG-Innervation kein derartiger Nerv oder Nervenverbindung genannt. Ursache hierfür könnte ein sehr seltenes Vorkommen sein.

Andererseits könnte auch die fehlende Präparation der oberen dorsalen lumbalen Wirbelsäule durch andere anatomische Studien der Grund dafür sein, dass eine derartige Versorgung nicht in der Literatur beschrieben ist.

Intersegmentale Nervenverbindungen zwischen bis zu drei dorsalen Nervenwurzeln sind im lumbalen und sakralen Bereich bekannt, ohne dass eine Beziehung zum SIG beschrieben wurde (Johnston 1908, Pedersen, Blunck et al. 1956, Bogduk, Wilson et al. 1982).

Im Gegensatz zu den oben genannten Studien zeigt der vorliegende Fund eine Verbindung zwischen 7 Segmenten mit Bezug zur SIG-Innervation, wobei von einer ähnlichen nervalen Verbindung wie bei den oben genannten Autoren auszugehen ist.

Bei der Funktion des gefundenen Nervengeflechts könnte eine sensible Innervation der Bänder der Wirbelsäule sowie des SIG und seines Bandapparates vorliegen, da diese Untersuchung keine direkte Abgabe von Nervenfasern an die umliegende Muskulatur zeigte. Gleichzeitig waren Verbindungen mit Nerven vorhanden, die das SIG versorgten.

Unterstützt wird dies durch Aussagen von Johnston (1906) und Pedersen (1956), die ähnliche nervale Verbindung beschreiben und von einer sensorische Innervation der Bänder der Wirbelsäule ausgehen (Johnston 1908, Pedersen, Blunck et al. 1956).

Die Bildung eines nervalen Verbindung von der oberen Lumbalwirbelsäule bis zum Kreuzbein, die an der Versorgung des SIG und seines Bandapparates beteiligt ist nimmt wie in Kap. 4.2.1 bereits beschrieben eine große Bedeutung

für die Gleichgewichtspropriozeption ein und stellt therapeutische Ansatzpunkte dar (siehe dazu auch Kapitel 4.2.1 sowie Kapitel 4.2.5.1).

4.2.4.3 Versorgung aus L3

Während der Präparation fand sich bei drei von zehn Körperspendern ein 1 bis 2mm dicker Ramus doralis aus dem dritten Lumbalsegment. Nach Austritt aus dem Ganglion zog der Nerv zunächst in allen Fällen nach kranial, um in einem Bogen direkt über das Facettengelenk L2/L3 zu ziehen. Danach verlief der Nerv weiter nach kaudal, wo zwei der drei gefundenen Nerven in knöchernen Spalt zwischen Os sacrum und Os ilium zogen und ein weiterer auf dem Kreuzbein verlief.

Von diesen gefundenen Nerven müssen unbedingt solche abgegrenzt werden, die – wie von Bogduk (1982) und Pedersen (1956) beschrieben - aus den Segmenten L2 und L3 entstammen und die Facetten- oder Zwischenwirbelgelenke innervieren. Dabei handelt es sich um deutlich schmalere und kürzere Nerven (Pedersen, Blunck et al. 1956, Bogduk, Wilson et al. 1982, Cavanaugh, Ozaktay et al. 1996).

Andere Autoren beschreiben keinen derartigen Nerven (Solonen 1957, Nakagawa 1966, Ikeda 1991, Grob, Neuhuber et al. 1995, Fortin, Kissling et al. 1999, Cohen and Abdi 2003, Yin, Willard et al. 2003, Cox and Fortin 2014).

Dabei nimmt der aufgefundene Nerv aus L3 eine große klinische Bedeutung bei Lumbalgien und Ischialgien ein:

Aus dem direkten Überzug des Nervs über ein Gelenk kann eine mechanische Irritation durch Gelenkbewegungen resultieren (Triano and Luttgies 1982, Baron and Binder 2004). Daneben können auch direkt benachbarte Facettengelenksarthropathien und damit verbundene inflammatorische Prozesse eine Nervenreizung begünstigen (Kang, Georgescu et al. 1995, Baron and Binder 2004, Rehart and Lehnert 2008). Hierbei muss beachtet werden, dass derartige degenerative Veränderungen der Facettengelenke nicht

nur Ursache chronischer Rückenschmerzen sind (Shealy 1976, Cavanaugh, Ozaktay et al. 1996, Eubanks, Lee et al. 2007), sondern auch eine Volkskrankheit darstellen (Eubanks, Lee et al. 2007): Bei 57% der 20 bis 29 Jährigen zeigen sich bereits athrotische Veränderungen; bei den über 60-Jährigen beträgt die Prävalenz 100% (Eubanks, Lee et al. 2007).

Neben diesen Gelenkbewegungen und Facettengelenks-Degenerationen ist eine mechanische Dehnung des gefundenen Nervs auch durch eine Hyperlordose denkbar, da er das Facettengelenk direkt überzieht und dieses dadurch als Drehpunkt fungiert (siehe Abb. 30).

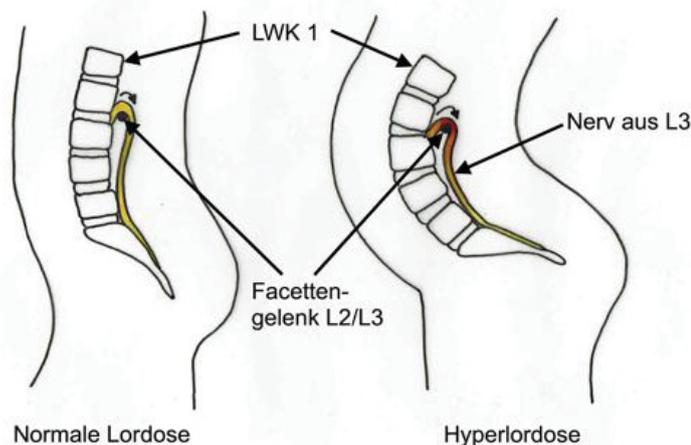


Abb. 30: Nervenreizung durch Hyperlordosierung der Lumbalwirbelsäule. Dabei wurde der Nervenverlauf einer normalen Lordose einer Hyperlordose gegenüber gestellt. Im Falle der Hyperlordose wird der Nerv im Bereich des Überzugs des Facettengelenks L2/L3 kann es zu einer Dehnung kommen; in diesem Bereich wurde der Nerv rot dargestellt. Schematische Zeichnung.

Die vorliegende Untersuchung zeigt ein derartiges Phänomen an einem Körperspender, der den oben beschriebenen Nerv aus L3 aufwies: Im Bereich des Überzuges über das Facettengelenk zeigte sich eine Verdickung des Nervs auf ca. 5mm, wobei er in seinem restlichen Verlauf nur eine Dicke von ca. 1mm aufwies. Diese Bindegewebswucherung lässt sich als Neuritis deuten, die mechanisch oder entzündlich- degenerativ entstanden ist.

Die so entstehenden Nervenreizsyndrome können im Sinne einer Projektion als reine SIG-Beschwerden oder auch als Lumboischialgien empfunden werden. Bestätigt wird dies durch Aussagen Dihlmanns (1978), der bei SIG-Erkrankungen ausstrahlende Schmerzen im Bereich der Segmente L2 und L3

beschreibt (Dihlmann 1978). Auch Mooney und Robertson (1976) bekräftigen diese Vermutungen. Sie zeigten in ihrer Studie über lumbale Facettengelenksinjektionen, dass nozizeptive Stimuli im Bereich der lumbalen Facettengelenke zu den typischen Schmerzbildern der Lumbalgie und Ischialgie führen können (Mooney and Robertson 1976).

Die bis dato nicht bekannte Innervation aus L3 und der prekäre Verlauf des aus L3 entstammenden Nervens stellt eine bislang unbekannte Schmerzursache dar, die möglicherweise einen Teil der großen Anzahl therapierefraktärer Schmerzen erklären kann. Gleichzeitig ergeben sich hieraus auch neue therapeutische Ansatzpunkte wie beispielsweise Injektionsverfahren auf Höhe L2/L3, über die bislang bei symptomatischem SIG keine Studien bestehen.

4.2.4.4 Ausblick der Ergebnisse der lumbalen Präparation

Die dorsale Versorgung des SIG aus L2 bis L5 kann sowohl Schmerzursache als auch therapeutischen Ansatzpunkt darstellen und nimmt insofern eine große klinische Bedeutung ein.

Da jedoch kaum anatomische Vergleichsarbeiten über die lumbale Versorgung des SIG bestehen und die gefundene Versorgung aus L2, L3 und L4 durch keine andere anatomische Studie belegt ist, sollte dies durch weitere und umfangreichere präparatorische Studien überprüft werden. Dabei sollte auch auf pathologische Veränderungen der Nerven und Wirbelsäule geachtet werden, die einen Nerven aus diesen Segmenten in seinem Verlauf beeinträchtigen können. Derartige Veränderungen können zur Klärung der pathologischen Mechanismen beitragen und der Erarbeitung neuer therapeutische Ansätze dienen.

Zusätzlich könnten auch bei SIG-Syndromen Injektionsverfahren im Bereich der Spinalganglien L2, L3 und L4 in Nachfolgestudien angestrebt werden (siehe hierzu auch Kap. 4.2.5.3). Hierbei ist zu beachten, dass die einzelnen Lumbalganglien separat und nicht wie bei Cohen und Abdi (2003) simultan mit

anderen Segmenten behandelt werden. Nur so ist eine genaue Schmerzlokalisierung und Rückschluss auf eine eventuell bestehende Innervation möglich.

4.2.5 Bedeutung der makroskopischen Ergebnisse

4.2.5.1 Bedeutung des SIG für das Gleichgewicht

Die vorliegende Untersuchung zeigt wie in den Kapiteln 4.2.1, 4.2.2 und 4.2.4 beschrieben eine umfangreiche Innervation des SIG aus lumbalen und sakralen Segmenten sowie die Bildung eines großen dorsalen lumbosakralen Nervengeflechts. Dabei ist von einer propriozeptiven Funktion dieser neuralen Strukturen auszugehen. Den Erkenntnissen dieser Studie zufolge gibt es kein anderes Gelenk des menschlichen Bewegungsapparates, das stärker innerviert wird als das SIG. Somit muss das SIG auch zentral stärker repräsentiert sein als andere Gelenke. Eine vergleichbare Überrepräsentation ist nur von der Lumbalwirbelsäule bekannt (Jerosch and Steinleitner 2009).

Die Aufrichtung des menschlichen Körpers hatte zur Folge, dass der menschliche Gleichgewichtssinn viel abhängiger von Bewegungen wurde (Jerosch and Steinleitner 2009). Dabei muss man sich die Wirbelsäule wie einen langen Hebelarm vorstellen, auf dem kranial der Kopf balanciert (Jerosch and Steinleitner 2009, Stofft 2011). Das bedeutet, dass schon minimale Bewegungen der unteren Wirbelsäule zu großen Lageveränderungen des Schädels führen (Jerosch and Steinleitner 2009).

Das SIG ist die bewegliche Verbindung der Wirbelsäule mit den Beinen. Dementsprechend können schon kleine Bewegungen des SIG wie dem Gehen zu Stellungsänderungen der Wirbelsäule und damit auch des Schädels führen. Ohne propriozeptive Informationen aus dem SIG wäre somit eine Berechnung der Stellung der Wirbelsäule und damit auch des Schädels erschwert bis nicht möglich. Durch die fehlenden Informationen könnte das Gleichgewicht nicht korrekt bestimmt werden; möglicherweise käme es sogar zu Schwindel

vertebragenen Ursprungs, der bislang für die Halswirbelsäule beschrieben ist (Brandstätter 2004, Reid 2016).

Wenn also das SIG eine solche propriozeptive Gleichgewichtsfunktion einnimmt, kommt dem Gelenk eine Schlüsselrolle beim zweibeinigen Gehen und Stehen zu. Dazu wäre eine starke Innervation im Bereich des SIG, Becken und der Lumbalwirbelsäule nötig.

Gleichzeitig stellt die Wirbelsäule keinen starren Mast dar (Lewit, A et al. 2010). Stattdessen besteht sie aus zahlreichen aneinander gereihten und miteinander artikulierenden Wirbel (Lewit, A et al. 2010, Eickhoff 2012). Da jedes Wirbelgelenk das darüberliegende Körpergewicht tragen muss, ist diese Wirbelkette generell instabil (Eickhoff 2012), sodass eine muskuläre und ligamentäre Stabilisierung nötig ist (Lewit, A et al. 2010, Eickhoff 2012). Es ist davon auszugehen, dass Bewegungen im SIG diese Wirbelkette weiter instabilisieren. Um einem aufrechter Stand sowie das Gehen zu ermöglichen, muss die Wirbelsäule auch Ausgleichsbewegungen nachkommen (Stofft 2011). Ohne eine exakte Stellung der Wirbel im Raum dürfte dies nicht möglich sein.

Deshalb lässt sich vermuten, dass das ZNS alleine für die Stabilisierung dieser beweglichen Wirbelkette auf eine zentrale Überrepräsentation der Wirbelsäule und des SIG angewiesen ist, um den Tonus in der autochthonen Rückenmuskulatur zu kontrollieren. Dabei konnte die lumbale Innervation des SIG auch dazu dienen, bereits auf Rückenmarksebene die Bewegungsänderungen des SIG zu analysieren und davon abhängig den Tonus der autochthonen Muskulatur anzupassen.

Insgesamt zieht sich auch der vorliegenden Untersuchung das Resümee, dass die vermutete Überrepräsentation des SIG zum einen der Aufrechterhaltung des Gleichgewichts dient, zum anderen auch der muskulären Stabilisierung der Wirbelsäule dient. Auf diese Weise ist ein zweibeiniges Stehen und Gehen möglich.

4.2.6.2 Bildgebenden Verfahren - Möglichkeiten und Grenzen

Der radiologischen Bildgebung käme bei Kreuzschmerzen eine große Bedeutung zu, wenn die Innervation des SIG und der Lumbalwirbelsäule dargestellt werden könnten. Nicht für die Diagnostik würde dies einen großen Zugewinn bedeuten; auch therapeutische Maßnahmen könnten gezielter durchgeführt werden.

Eine solche Darstellung könnte durch nervenspezifisches Kontrastmittel ermöglicht werden. Die momentan existierenden Verfahren setzen jedoch tumoröse oder entzündliche Prozesse voraus (Bendszus, Wessig et al. 2005, Lutz, Weishaupt et al. 2005, Bierry, Jehl et al. 2009, Eppenberger, Chhabra et al. 2012, Chhabra, Zhao et al. 2013), die wegen ihres begrenzten Einsatzgebietes bei der großen Maße der Patienten mit Kreuzschmerzen nicht in Frage kommen. Andere Studien, wie die von Murata et al., sind nur am Tier und nicht am lebenden Menschen durchführbar, da die angefärbten Nervenstrukturen entnommen und anschließend histologisch aufgearbeitet wurden (Murata, Takahashi et al. 2001).

Nach unserem Wissensstand befindet sich somit momentan kein geeignetes Kontrastmittel auf dem Markt.

Seit wenigen Jahren ist auch eine nicht Nerven-selektive Bildgebung möglich, bei der die Auflösung der MRT-Geräte so hoch sein soll, dass selbst kleinste Nerven hierdurch dargestellt werden. Dadurch kann mithilfe dreidimensionaler MR-Sequenzen sogar der Verlauf gekrümmter Nerven sichtbar werden (Andreiseka, Farshad-Amackera et al. 2013). Laut Andreiseka et al. dient dies zur Abklärung peripherer Neuropathien, sodass dieses Verfahren in Zukunft eine wichtige Rolle in der Bildgebung des peripheren Nervensystems spielen wird (Andreiseka, Farshad-Amackera et al. 2013).

Allerdings gibt es momentan noch erhebliche Hürden dieser Bildgebung: Voraussetzung solcher Nervendarstellungen sind die technische Ausstattung der Kliniken mit derartigen Hochfeldgeräten sowie dafür geschulte Neuroradiologen. Bisher sind derartige Methoden nur an zwei (Stand: Juni

2019) akademischen Zentren in Deutschland vertreten: In Hamburg und Heidelberg.

Sicherlich wird in naher Zukunft diese Diagnostik auch Einzug in weitere Zentren erhalten. Doch auch wenn eine solche MR- Neurographie nutzbar ist, stellt sich die Frage, ob die Innervation des SIG tatsächlich dargestellt werden kann:

Da die Nerven in der vorliegenden Untersuchung einen maximalen Durchmesser von 2mm besaßen und der Verlauf so variabel ist, dass er in jeder Untersuchung als unbekannt angenommen werden muss, bestehen Zweifel daran, dass diese Methode der Nervendarstellung eine effektive Lösung darstellen wird, um die Innervation des SIG zu untersuchen.

4.2.6.3 Injektionsverfahren als Therapieansatz

In der Literatur und auch im klinischen Alltag sind intra- und periartikuläre Injektionsverfahren von Lokalanästhetika und Kortikoiden bei SIG-Beschwerden längst etabliert. Häufig werden diese Injektionen sowohl als diagnostisches als auch therapeutisches Verfahren genutzt (Bollow, Braun et al. 1996, Luukkainen, Nissila et al. 1999, Rosenberg, Quint et al. 2000, Ojala, Klemola et al. 2001, Luukkainen, Wennerstrand et al. 2002, Cohen and Abdi 2003, Cohen 2005). Dabei ist die Wirksamkeit jedoch nicht bewiesen (Cohen 2005).

Der Nutzen dieser Therapiemaßnahmen schwankt von Studie zu Studie teilweise stark: So zeigten die SIG-Injektionen häufig, aber nicht immer eine gute Schmerzreduktion (Cohen 2005). In der Studie von Ojala et al (2001) zeigte sich bei 40% der Patienten nach Injektion von Anästhetika kein Effekt (Ojala, Klemola et al. 2001). Demgegenüber stehen Studien wie die von Bollow et al. (1996), die nach Kortisoninjektion bei 92,5% der Patienten nach wenigen Tagen eine Reduktion der Beschwerden für 10 ± 5 Monate erreichten (Bollow, Braun et al. 1996).

Ursachen für diese Diskrepanzen des Nutzen von derartigen Injektionen in den verschiedenen Studien sind vielfältig: So hängt die Effektivität sowohl vom

Therapeuten und dessen Vorgehensweise, injizierten Medikamenten, Ort der Lokalisation, dem Patienten bezüglich der Anatomie, Schmerzbild und -Ursache, Reaktion auf die Medikamente und psychischen Komponenten, Placebo-Effekten und vielen weiteren Faktoren ab.

Dass jedoch die Bänder mit den darin verlaufenden Nerven und rezeptiven Strukturen die Hauptursache für SIG-Schmerzen darstellen, zeigen die Ergebnisse dieser Arbeit. Somit stellen periartikuläre Injektionen in den Halteapparat eine sinnvolle Therapieoption dar.

Intraartikuläre Injektionen in das SIG sind hingegen nicht praktikabel. Zum einen ist aufgrund der Anatomie das Gelenk auch mithilfe bildgebender Verfahren mit einer Injektionsnadel kaum erreichbar. Andererseits besteht durch das Verfahren eine Infektionsgefahr. Vor allem ist jedoch in Frage zu stellen, ob im Gelenk selbst überhaupt nozizeptive Strukturen vorhanden sind, die blockiert werden können.

Möglicherweise hängen ein Teil der nicht zufriedenstellenden Zahlen auch mit der enormen Variabilität der SIG-Innervation zusammen, da ein Effekt der injizierten Anästhetika und Korticoide nur eintreten kann, wenn im Bereich der Injektion auch dafür empfängliche aktivierte nozizeptive Strukturen vorhanden sind. In der vorliegenden Studie zeigte sich bei 6 von 10 Körperspendern eine zusätzliche Innervation des SIG aus lumbalen Segmenten. Somit sollten neben sakralen Infiltrationen auch lumbale Injektionen bei therapierefraktären SIG-Beschwerden in Betracht gezogen werden.

Dass Injektionsverfahren zusätzlich im Bereich der Lumbalwirbelsäule bei SIG-Beschwerden wirksam sind, konnten Cohen und Abdi (2003) in ihrer Pilotstudie nachweisen. Bei 18 Patienten injizierten sie Lidocain in Bereiche der Rami dorsales von L4 und L5 sowie S1 bis S3 und erreichten dadurch bei über 90% eine Schmerzreduktion.

Auch Mooney und Robertson (1976) zeigten durch Injektionen von Lokalanästhetika und Steroiden an den Facettengelenken L3/L4 bis zu den ursprünglichen Facettengelenken S1/S2 bei Patienten mit Lumboischialgie-Beschwerden eine Linderung der Schmerzen: So konnte bei 51% der Patienten

eine langanhaltende Beschwerdefreiheit erreicht werden, während ein weiteres Drittel eine Reduktion der Beschwerden erfuhr (Mooney and Robertson 1976). Allerdings handelte es sich bei beiden Studien nicht um eine stufenweise Behandlung der Segmente, sodass eine genaue Schmerzlokalisierung nicht möglich ist.

Trotz der lumbalen Innervation sollte in der Therapie von SIG-Beschwerden zunächst eine sakroiliakale Infiltration in den dorsalen Bandapparat erfolgen, durch den die Nerven aus dem lumbalen Bereich ebenfalls verlaufen. Dabei kann jedoch in Frage gestellt werden, ob die Zugangswege für sakroiliakale Infiltrationen im Bereich des ersten Sakralforamen überdacht werden sollen: Es ist fraglich, ob durch Injektionen nahe des ersten Sakralforamen der gesamte Bandapparat und damit auch Bandareale kranial des ersten Sakralforamens blockiert werden. Ein Zugang in die am weitesten kranial gelegenen dorsalen Bandareale des SIG könnte eine mögliche Alternative darstellen, um Nervenäste aus lumbalen Segmenten zu besser zu erreichen.

Bei weiterhin therapierefraktären Beschwerden sollen daraufhin sekundär lumbale Infiltrationen in Betracht gezogen werden. Ein derartiges Vorgehen ist in Abb. 10 dargestellt. Auf diese Art und Weise lässt sich eine lumbale Schmerzquelle als Ursache der SIG-Problematik auch diagnostizieren.

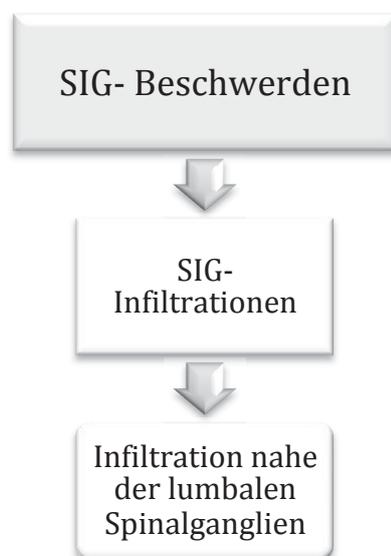


Abb. 31: Stufenmodell von SIG- und lumbalen Injektionen. Nach diesem Modell soll nach unzureichender Schmerzreduktion bei SIG- Infiltration eine Injektion entlang der Lumbalwirbelsäule erfolgen.

4.3 Diskussion der mikroskopischen Ergebnisse

Nervale Komponenten in Bändern und Gelenkkapsel des SIG sind von Interesse, da es ohne nozizeptive Strukturen keine Schmerzwahrnehmung geben kann. Bei diesen Strukturen kann es sich um freie Nervenenden, aber auch um Mechano- und Propiorezeptoren handeln. Dabei stellen diese Nozizeptoren eine potenzielle Schmerzquelle bei unteren Kreuzschmerzen dar (Fortin, Kissling et al. 1999).

Die für die histologische Untersuchung entnommenen Gewebeproben stammten aus dem dorsalem Knochenspalt zwischen Kreuz- und Darmbein. Alle Proben wiesen makroskopisch sichtbar einen Nerven auf, der durch das Ligamentum sacroiliacum interosseum zum SIG zog. Es handelte sich hierbei um einen Ramus dorsalis aus L5, S1 und S3.

4.3.1 Grundstruktur der Bänder

In den untersuchten Gewebeproben zeigte sich ein Wechsel zwischen Bereichen aus straffen, parallel verlaufenden Kollagenzügen und lockerem, zum Teil auch sehr fettreichen Bindegewebe. In den Arealen lockeren Bindegewebes fanden sich große Gefäß- und Nervenstränge, wobei kleinere Leitungsbahnen auch im straffen Bindegewebe gefunden wurden.

Diese Konsistenz entspricht nicht der eines typischen, stabilisierenden Gelenkbandes, das in der Regel aus straffem, parallelfaserigen Kollagenzügen besteht (Kusswetter and Refior 1985).

Andere Autoren nennen ebenfalls Diskrepanzen zwischen diesem interossären Ligament und anderen Gelenkbändern:

So erwähnte Fick schon 1904, dass das Lig. sacroiliacum interosseum gut von anderen Bändern unterschieden werden kann, da es sich strukturell von den restlichen Gelenkbändern des Körpers abgrenzt. Zwischen den Kollagenbündeln fand er wie in unserer Untersuchung locker verteiltes Fettgewebe (Fick 1904).

Ähnlich wie Fick kam auch Bechtel (2001) bei der Untersuchung der dorsalen Bandstrukturen unmittelbar dorsal des SIGs zu der Ansicht, dass es sich nicht um gewöhnliche Bandstruktur handelt. In seiner Studie untersuchte er die mechanischen Eigenschaften sowie die histologische Struktur eines Abschnitts des interossären Ligaments, der sich direkt dorsal des SIG befand. Es stellte sich heraus, dass zwar Kollagenfaserbündel vorhanden waren, diese aber eine andere Dichte aufwiesen, als es für die Ligamente eines Gelenkes typisch ist. Außerdem stellte er weniger Kollagen pro Flächeneinheit fest, aber gleichzeitig deutlich mehr Fettzellen und Blutgefäße als es für Gelenkbänder üblich ist. Aus der geringen Bruchfestigkeit und Bruchspannung des untersuchten Ligaments schlussfolgerte er, dass es keine mechanische Funktion im SIG einnehmen kann. Stattdessen spekuliert er darüber, ob das Band ähnlich wie die Gelenkbänder der Hand eine propriozeptive Funktion einnimmt (Bechtel 2001). Daneben gab er diesem Teil des Ligamentum sacroiliacum interosseum den Namen „axialäres sacroiliacales Ligament“ (Bechtel 2001).

Nach Ergebnissen von Fick (1904), Bechtel (2001) und der vorliegenden Untersuchung über die Konsistenz des Ligamentum sacroiliacum interosseum beziehungsweise des „axialären sacroiliacalen Ligaments“ liegt eine propriozeptive Funktion näher als eine mechanisch-stabilisierende Aufgabe. Andererseits kann ein stabilisierendes Band zusätzlich eine propriozeptive Funktion einnehmen. Dies konnte am vorderen Kreuzband gezeigt werden (Haus, Halata et al. 1992). Insofern unterstützen Haus et al. (1992) weiterhin die These, dass der umliegende Halteapparat des SIG eine propriozeptive Funktion einnimmt.

Die mögliche propriozeptive Funktion lässt den Rückschluss zu, dass das menschliche Gehirn auf zahlreiche Informationen über die Stellung der Bänder des SIG angewiesen ist. Möglicherweise sind diese Informationen für die Aufrechterhaltung des Gleichgewichtes und das zweibeinige Gehen und Stehen notwendig (siehe auch Kap. 4.2.5.1). Gleichzeitig könnten diese sensiblen Informationen auch für Stellungsreflexe auf Höhe der unteren Wirbelsäule dienen.

In der vorliegenden makroskopischen Untersuchung fiel sowohl eine ungleiche Verteilung als auch sehr große Innervation des SIG auf, die ebenfalls den Rückschluss ziehen ließen, dass die Versorgung des SIG eine entscheidende Rolle für die Aufrechterhaltung des Gleichgewichts einnehmen könnte. Folglich sind die makroskopischen sowie mikroskopischen Ergebnisse und Schlussfolgerungen konkordant.

In nachfolgenden Studien sollten die mikroskopischen Ergebnisse dieser Studie durch ausreichend große Probenanzahl bestätigt werden. Zusätzlich sollte der Kollagentyp der Bänder analysiert werden.

4.3.2 Knorpel in den Bändern

Die vorliegende Untersuchung zeigte bei zwei Körperspendern unabhängig voneinander knorpelige Areale zwischen kollagenen Bindegewebszügen. Bei einem Körperspender erinnerte dies eher an hyalinen Knorpel, bei dem anderen Präparat glichen sie Faserknorpel.

Hyaliner Knorpel

Schon seit Beginn des 20. Jahrhunderts sind akzessorische Sakroiliakalgelenke (ASIG) als anatomische Variante bekannt (Fortin and Ballard 2009). Laut Prassopoulos et al. stellt es sogar die häufigste anatomische Anomalie im Bereich des SIGs dar (Prassopoulos, Fafila et al. 1999). In zahlreichen anatomischen und radiologischen Untersuchungen wurde das Vorhandensein dieser anatomischen Variante untersucht, wobei nach deren Ergebnissen die Prävalenz zwischen 3,6 % und 50% schwankt (Petersen 1905, Jazuta 1929, Seligmann 1935, Trotter 1937, Trotter 1940, Hadley 1952, Bakland and Hansen 1984, Ehara, el-Khoury et al. 1988, Valojerdy and Hogg 1990, Prassopoulos, Fafila et al. 1999, Demir, Mavi et al. 2007, Fortin and Ballard 2009).

Die mikros- und makroskopischen Untersuchungen zeigten dabei hyaline Gelenkflächen, einen Gelenkspalt sowie eine Gelenkkapsel dieser ASIG auf, sodass die gefundenen Gelenke als Diarthrosen klassifiziert werden konnten

(Petersen 1905, Jazuta 1929, Seligmann 1935, Trotter 1937, Trotter 1940, Hadley 1952, Bakland and Hansen 1984).

Die vorliegende Studie zeigte ebenfalls zungenförmige Areale hyalinen Knorpels zwischen Bereichen lockeren kollagenen Bindegewebes, wobei auch im benachbarten kollagenen Bindegewebe einzelne Chondrozyten nachweisbar waren. Bei der untersuchten Gewebeprobe handelte es sich um Bandmasse dorsal des SIG, die knochennah entnommen wurde.

Somit liegt der Rückschluss nahe, dass es sich um ein zusätzliches akzessorisches SIG oder eine sakroiliakale Verbindung handelt:

Die Existenz des hyalinen Knorpels in der untersuchten Gewebeprobe spricht dabei für einen Anschnitt eines echten, angeborenen ASIG, wie es von den oben genannten Autoren bereits beschrieben wurde. Gegen ein solches ASIG spricht jedoch, dass weder makroskopisch noch mikroskopisch eine Gelenkkapsel oder ein Gelenkspalt aufweisbar waren.

Andererseits fanden sich im benachbarten kollagenen Bindegewebe ebenfalls vereinzelt Chondrozyten. Dies könnte für eine fibrocartilaginäre Verbindung sprechen, wie sie von Trotter (1964 und 1937), Seligmann (1935), Bakland et Hansen (1984) und Ehara et al. (1998) ebenfalls beschrieben wurden.

Eine Differenzierung des in dieser Arbeit vorliegenden Fundes zwischen einem möglichen ASIG oder einer fibrocartilaginären, sakroiliakalen Verbindung ist deutlich erschwert, da in der Gewebeprobe nur ein kleines Areal Knorpel aufweisbar war. Trotzdem beweist dieser Fund, dass neben dem SIG zusätzliche sakroiliakale Verbindungen vorhanden sind.

Die Entstehung derartiger akzessorischer SIGs oder sakroiliakaler Verbindungen ist teilweise unklar (Fortin and Ballard 2009):

Hyaliner Knorpel kommt in Diarthrosen vor und nimmt eine druckabfedernde Funktion ein (Mow, Holmes et al. 1984, Bruns and Steinhagen 2000). Er entsteht während Embryonalentwicklung aus mesenchymalen Gewebe (Glenister 1976).

Folglich deutet das Vorhandensein von echten Gelenken mit hyalinem Knorpelüberzug auf eine angeborene Herkunft dieser Anomalie hin. Bekräftigt wird dies durch die Tatsache, dass sich bei Kindern schon zusätzliche sakroiliakale Verbindungen finden lassen (Bollow, Braun et al. 1997).

Dass derartige akzessorischen Verbindungen auch Ursache für chronische Kreuzschmerzen sein können, ist bekannt (Chiu, Chou et al. 2007, Rosa Neto, Vitule et al. 2009): Bei genauerer Analyse dieser zusätzlichen Gelenke zeigten sich stärkere degenerative Veränderungen im akzessorischen Verbindungen als im SIG (Chiu, Chou et al. 2007). Auch Demir et al. sowie Prassopoulos et al. stellten Degenerationen wie Sklerose, Osteophyten und Ankylose auf den Gelenkflächen von ASIGs fest (Prassopoulos, Fafila et al. 1999, Demir, Mavi et al. 2007).

Derartige Studien zeigen also neben der Tatsache, dass solche Verbindungen existieren, auch die klinische Relevanz dieser zusätzlichen Verbindungen als potentielle Schmerzquelle.

Dabei scheint jedoch die Existenz solcher Strukturen relativ unbekannt zu sein, obwohl diese Varianten laut Seligmann (1935) schon 1753 beschrieben wurden. So lassen sich in den Standardwerken der Anatomie, aber auch in Orthopädie-Büchern keine Angaben hierzu finden.

Vor diesem Hintergrund und der gegebenen klinischen Relevanz sollte die Existenz der zusätzlichen sakroiliakalen Verbindungen und die stark schwankende Prävalenz zwischen 3,6 bis 50% in mikroskopischen und makroskopischen Untersuchungen genauer analysiert werden.

Faserknorpel

Eine weitere Gewebeprobe wies faserknorpelige Areale, bei dem die Chondrozyten in kollagene Stränge eingebettet waren. Im Gegensatz zum oben beschriebenen Präparat fanden sich keine hyalinen Areale.

In der Literatur sind Funde von faserknorpeligen Arealen in Bändern bekannt:

Zum einen tritt Faserknorpel im Bereichen des Bandansatzes auf. Dabei unterscheidet Kusswetter einen vier Zonen- Bau: Band – unmineralisierter Knorpel – mineralisierter Knorpel – Knochen (Kusswetter and Refior 1985). Seine Funktion liegt dabei im Ausgleich der unterschiedlichen Elastizität von Band und Knochen und dient so als Dämpfungssystem (Kusswetter and Refior 1985, Petersen and Tillmann 2000). Da die vorliegende Untersuchungen keine Mineralisierung des Knorpels oder ein Übergang von einem Gewebe in das andere wie von Kusswetter beschrieben zeigt, kann diese Entstehung als unwahrscheinlich angenommen werden.

Andererseits kann Faserknorpel auch als funktionelle Anpassung an Zug- und Druckkräfte aus straffem Bindegewebe hervorgehen und deutet so auf eine große Zugbeanspruchung des Bandes hin. Dies ist beispielsweise für das hintere Kreuzband beschrieben (Petersen and Tillmann 2000).

Des Weiteren sind sakroiliakale fibrocartilaginäre Verbindung in der Literatur von Trotter (1964 und 1937), Seligmann (1935), Bakland et Hansen (1984) und Ehara et al. (1998) bereits beschrieben. Möglicherweise handelt es sich also bei dem vorliegendem Fund auch um eine zusätzliche sakroiliakale Verbindung. Da es sich in dem vorliegendem Präparat jedoch nur um einen Ausschnitt handelt, kann eine solche Verbindung weder bestätigt noch ausgeschlossen werden.

Hierbei stellt sich auch die Frage, ob eine solche sakroiliakale, fibrocartilaginäre Verbindung auf eine funktionelle Anpassung zurückzuführen sein könnte. Dafür spricht, dass Trotter (1964 und 1937) und Seligmann (1935) eine ansteigende Prävalenz mit zunehmendem Alter beobachteten (Seligmann 1935, Trotter 1937, Trotter 1964). Trotter zog daraus die Schlussfolgerung, dass die Entwicklung dieser Anomalie wahrscheinlich mit dem Tragen schwerer Lasten auf dem Rücken in Zusammenhang steht und somit eine funktionelle Anpassung darstellt (Trotter 1937, Trotter 1964).

Eine solche Entstehung des Faserknorpels, die möglicherweise auch zu einer Ausbildung einer sakroiliakalen Verbindung führt, deutet auf eine große

Beanspruchungen des dorsalen Bandapparates des SIG durch Zug- und Druckkräfte hin.

Diese starke Belastung der Bänder könnte auch Ursache für Schmerzen im Bereich des SIG sein. Als weiteres Indiz für die starke Zugbeanspruchung des untersuchten Bandes zeigt sich in dieser Untersuchung ein sehr stark gewundener Verlauf der Gefäße durch das Ligament.

Da in der vorliegenden Untersuchung nur ein Körperspender derartige Faserknorpelbereiche aufwies, lassen sich keine Angaben darüber machen, ob es sich um ein häufiges Vorhandensein oder eine anatomische Rarität handelt. Daher sollte dies durch weitere Studien mit statistisch signifikanten Probengrößen untersucht werden, um allgemein gültige Aussagen zu erhalten. Auch eine genaue Untersuchung, ob es sich um funktionelle Anpassungen oder sakroiliakale, fibrocartilaginäre Verbindungen handelt, sollte erfolgen.

In weiterführenden Studien sollte auch Faserknorpel genauer untersucht werden. So ist beispielsweise der Kollagentyp in diesem Gewebe von Interesse, da die unterschiedlichen Kollagene verschiedene Funktionen einnehmen und dadurch näheren Aufschluss über die Funktion des gefundenen Knorpels geben können.

4.3.3 Verlauf der Nerven

Alle untersuchten Gewebeproben wiesen Nerven auf, die eine Innervation des dorsalen Bandapparates aus den Segmenten L5, S1 und S3 sichern:

In den histologischen Präparaten zeigten sich myelinisierte und unmyelinisierte Nerven mit einem maximalen Durchmesser von bis zu 2mm, die senkrecht zum kollagenen Bindegewebe verliefen. Varga et al. beschrieben in ihren Untersuchungen über die Ligamenta sacrospinale et sacrotuberale ebenfalls solch größere, senkrecht zum kollagen verlaufenden Nerven. Dabei geben sie jedoch keine detaillierten Messgrößen der Nerven an (Varga, Dudas et al. 2008).

In ihrem Verlauf durch das Bindegewebe wurden in dieser Studie die gefundenen Nerven von Gefäßen begleitet, was von Nakagawa ebenfalls beschrieben wurde (Nakagawa 1966).

Die Nerven zeigten in der Untersuchung zahlreiche Aufteilungen, die sich im Gewebe mit immer kleiner werdenden Verzweigungen wiederfinden ließen. Dabei zogen die myelinisierten und unmyelinisierten Äste auch in derbe Bindegewebsstränge hinein, in denen sie parallel zum kollagenen Bindegewebe verliefen.

Vergleichbare Aussagen trafen auch Varga et al. (2008), die derartige Aufteilungen in den Ligamenta sacrospinale et sacrotuberale als Hinweis auf eine propriozeptive Funktion auffassten und - unterstützt durch ihre biomechanischen Untersuchungen - vermuteten, dass die Bänder eher eine sensible als mechanische Funktion einnehmen (Varga, Dudas et al. 2008).

Fortin et al. (1999) und Grob et al. (1995) fanden in der ventralen Gelenkkapsel eine gleiche Nervenversorgung, bei der die Nerven parallel zum Kollagen verliefen und dabei myelinisierte und unmyelinisierte Äste abgaben. In weiteren Untersuchungen an Feten kamen Grob et al. dabei zu dem Ergebnis, dass die Innervation der vorderen Gelenkkapsel nur durch Rami dorsales erfolgen kann, die zunächst den dorsalen Bandapparat des SIG durchlaufen (Grob et al. 1995).

Daraus lässt sich der Rückschluss ziehen, dass in der ventralen und dorsalen Gelenkkapsel sowie dem dorsalen Bandapparat eine gleiche Nervenversorgung auffindbar ist. Somit bestätigen die Funde von Grob et al. und Fortin et al. die vorliegenden Ergebnisse.

Fortin et al (1999) deutete seinen Fund so, dass die Prävalenz dieser feinen unmyelinisierten Nervenfasern in der dichten Kollagenmatrix darauf hinweisen, dass sie Schmerzimpulse leiten. Wie Varga et al. (2008) nimmt also auch er eine sensible Funktion dieser Aufzweigungen an (Fortin, Kissling et al. 1999).

Insgesamt kommt die vorliegende Studie zu den gleichen Vermutungen wie Varga et al. (2008) und Fortin et al. (1999), dass der dorsale Bandapparat des SIG eine sensible Funktion besitzt. Derartige Verzweigungen der Nerven bis hin zu unmyelinisierten Ästen macht ein alleiniges Passieren der Bänder auf dem Weg zu anderen Strukturen als terminales Innervationsgebiet wie zum Beispiel der umliegenden Muskulatur sehr unwahrscheinlich.

Gleichzeitig bestätigt das gefundene Aufteilungsmuster der Nerven im Bandapparat die Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Analyse der Grundstruktur des Ligamentum sacroiliacum interosseum: Hier zeigte sich ebenfalls eine sensible bzw. propriozeptive Funktion. Dabei können die sensiblen Informationen aus dem dorsalen Bandapparat für das zweibeinige Gehen und Stehen und die Aufrechterhaltung des Gleichgewichtes nötig sein. Anhand der gefundenen Nerven im Lig. sacroiliacum interosseum kann auch darauf geschlossen werden, dass der Bandapparat des SIG an der Schmerzentstehung und -Übertragung beteiligt sein kann und somit eine wesentliche Quelle von SIG-Beschwerden darstellt. Eine therapeutische Blockierung dieser Nerven kann daher eine sinnvolle Maßnahme bei Schmerzen im SIG darstellen.

In weiterfolgenden Studien sollten diese Thesen mittels ausreichend großer Probenanzahl überprüft werden.

4.3.4 Mechanosensoren

Mechanosensoren in den Ligamenten des SIG sind in der Literatur bekannt:

Ikeda (1999) beschreibt fünf morphologisch unterschiedliche Nervenenden in Gelenkkapsel und Gelenkbänder, allerdings ist unklar, welche Bänder und Kapseln er genau untersuchte (Ikeda 1991). Szadek et al. (2008) fanden durch immunhistochemische Untersuchungen mit Antikörpern gegen Calcitonin Gene Related-Peptide (CGRP) und Substanz P in der vorderen Gelenkkapsel sowie den Ligamenta sacroiliaca interosseum et anterior Mechanorezeptoren vom Typ 2. Diese Mechanorezeptoren deuten auf eine sensible Funktion hin, die

Varga et al. als morphologisches Korrelat der propriozeptiven Funktion des Bandapparates des SIG annahmen (Varga, Dudas et al. 2008).

Unsere Studie zeigte ca. 30 µm große rezeptive Endstrukturen zwischen den Kollagenzügen des Lig. sacroiliacum interosseum. Da in diesem Bereich keine motorischen Strukturen vorhanden waren, deutet dies auf eine propriozeptive Funktion dieser Endstruktur hin. Insofern stimmen die vorliegenden Ergebnisse mit denen von Szadek et al. (2008) und Ikeda (1999) überein.

Derartige Sensoren unterstützen die Vermutung einer sensiblen Innervation des SIG und seines Bandapparates durch die aufgefundenen Nerven der vorliegenden Untersuchung. Die Mechanosensoren können dabei auch an der Schmerzentstehung und -übertragung beteiligt sein und stellen somit ein anatomisches Korrelat für Kreuzschmerzen dar. Damit sind sie gleichzeitig auch ein Ansatzpunkt für therapeutische Injektionsmaßnahmen bei SIG-Beschwerden.

4.3.5 Bedeutung der sensiblen Innervation des Bandapparates

Die histologischen Untersuchungen zeigten eine sensible Innervation der dorsalen Bänder und Gelenkkapsel durch die gefundenen Nerven sowie das Vorhandensein von rezeptiven Endstrukturen. Zusammen mit der untersuchten Grundstruktur des Lig. sacroiliacum interosseum, die sich von anderen Gelenkbändern unterscheidet, deuten diese sensiblen Strukturen auf eine propriozeptive Funktion des dorsalen Halteapparates des SIG hin. Dieser sensiblen Funktion des Bandapparats kann eine Bedeutung für das zweibeinige Gehen und Stehen sowie die Aufrechterhaltung des Gleichgewichtes zukommen.

Gleichzeitig können die gefundenen sensiblen Strukturen auch nozizeptiv fungieren und dadurch maßgeblich an schmerzhaften Prozessen des SIG beteiligt sein.

Somit können periartikuläre Infiltrationsmaßnahmen bei schmerzhaften SIG eine wirksame Therapiemaßnahme darstellen. Dies wird bestätigt durch zwei Doppelblindstudien, die eine positive Wirkung von therapeutischen Injektionen

in den dorsalen Bandapparat des SIG bewiesen (Luukkainen, Nissila et al. 1999, Luukkainen, Wennerstrand et al. 2002).

4.4 Schlussfolgerung

Ziel der vorliegenden Studie war es, mehr Gewissheit über die Innervation des SIG und damit potenzielle Schmerzquellen zu erhalten, um einen Beitrag zur Optimierung therapeutischer Verfahren bei SIG-Beschwerden zu leisten. Zu diesem Zweck wurde an 10 Körperspendern die dorsale SIG-Innervation sowohl makroskopischen als auch histologischen untersucht.

Anhand der histologischen Ergebnisse kann gezeigt werden, dass der dorsale Bandapparat des SIG eine wesentliche Quelle schmerzhafter SIG-Prozesse darstellt:

Hierfür spricht zum einen der Verlauf der untersuchten Nerven parallel zum Kollagen, die Aufteilung der Nerven im Bandapparat sowie das Vorhandensein von rezeptiven Endstrukturen. Diese Strukturen können nozizeptiv fungieren und stellen somit ein mögliches anatomisches Korrelat bei SIG-Beschwerden dar.

Daraus ergibt sich, dass Beschwerden im Bereich des SIG durch eine Blockierung dieser anatomischen Korrelate (z. B. durch gezielte Injektionsmaßnahmen) behandelt werden können.

Die makroskopische Untersuchung der vorliegenden Studie zeigt eine dorsale Innervation des SIG durch Rami spinales aus den Segmenten L2 bis Co1. Dabei ist besonders hervorzuheben, dass über eine Versorgung aus den höheren Lumbalsegmenten L2 bis L4 in der gegenwärtigen Literatur bisher keine Angaben zu finden sind. Die in der Literatur bereits beschriebene dorsale Versorgung aus L5 bis S4 konnte in dieser Studie weiter bestätigt werden.

Durch die langen Verläufe der gefundenen Nerven mit Ursprung aus der oberen Lumbalwirbelsäule ergibt sich ein höheres Risiko für Nervenreizsyndrome, in deren Folge eine Schmerzprojektion in das SIG erfolgen kann. An dieser Stelle

ist zu betonen, dass bei 3 von 10 Körperspendern ein Nerv aus L3 gefunden werden konnte, der über das Facettengelenk L2-L3 zog. In einem Fall wies der Nerv über dem Gelenk ein Kalibersprung von 1mm auf 5mm auf, was als Neuritis im Rahmen einer stattgefundenen Nervenreizung interpretiert werden kann.

Dieser Fund zeigt eindrücklich, dass die hohe lumbale Innervation des SIG eine unbekannte Schmerzquelle für Kreuzschmerzen darstellen kann und dadurch eine mögliche Ursache für die hohe Anzahl idiopathischer und therapierefraktärer SIG-Schmerzen darstellt.

Somit ist eine logische Konsequenz dieser hohen lumbalen Versorgung für den Untersucher, dass bei SIG-Beschwerden auch Veränderungen im Bereich der Lumbalwirbelsäule als mögliche Quelle der SIG-Beschwerden in Betracht gezogen werden müssen. In nachfolgenden Studien sollte daher ein diagnostischer Algorithmus geschaffen werden, der eine rasche Identifikation einer hohen lumbalen Innervation als eine Ursache bei SIG-Problematiken ermöglicht.

Gleichzeitig ergeben sich auf Grundlage dieser Arbeit neue therapeutische Ansatzpunkte und Zugangswege bei therapierefraktären SIG-Beschwerden: So sind an dieser Stelle beispielsweise Injektionsmaßnahmen im Bereich der lumbalen Spinaläste zu nennen, die bei erfolglosen sakroiliakalen Infiltrationen in Betracht gezogen werden können.

Auch die Zugangswege für sakroiliakale Infiltrationen im Bereich des ersten Sakralforamen sollten überdacht werden: Es ist fraglich, ob durch Injektionen nahe des ersten Sakralforamen der gesamte Bandapparat und vor allem die Areale kranial des ersten Sakralforamens infiltriert werden. Ein Zugang in die am weitesten kranial gelegenen dorsalen Bandareale des SIG könnte eine mögliche Alternative darstellen, um auch Nervenäste aus höheren Segmenten zu blockieren.

Derartigen Infiltrationsmaßnahmen sollte in nachfolgenden klinischen Studien ebenfalls nachgegangen werden.

Insgesamt stellen die Ergebnisse und Schlussfolgerungen dieser Arbeit die Basis für weitere wissenschaftliche Arbeiten dar, die sich dem Diagnostik und

Therapie von SIG-Beschwerden annehmen. Dadurch trägt sie grundlegenden zur Optimierung der Behandlung von SIG-Schmerzen bei.

5. Literatur – und Quellenverzeichnis

1. Andreiseka, G., N. Farshad-Amackera and R. Guggenberger (2013). "MR-Neurographie – eine neue bildgebende Methode zur Abklärung peripherer Nervenleiden." Schweiz Med Forum **2013**(33): 639–641.
2. Ärzteschaft, A. d. d. (2007). "Empfehlungen zur Therapie von Kreuzschmerzen. Arzneiverordnung in der Praxis, Band 34 Sonderheft 2 (Therapieempfehlungen)." Retrieved 11.05.2017, 2017, from <http://www.akdae.de/Arzneimitteltherapie/TE/A-Z/PDF/Kreuzschmerz.pdf>.
3. Bakland, O. and J. H. Hansen (1984). "The "axial sacroiliac joint"." Anat Clin **6**(1): 29-36.
4. Baron, R. and A. Binder (2004). "Wie neuropathisch ist die Lumboischialgie? Das Mixed-pain-Konzept." Der Orthopäde **5**: 568-575.
5. Bechtel, R. (2001). "Physical characteristics of the axial interosseous ligament of the human sacroiliac joint." Spine J **1**(4): 255-259.
6. Bellamy, N., W. Park and P. J. Rooney (1983). "What do we know about the sacroiliac joint?" Semin Arthritis Rheum **12**(3): 282-313.
7. Bendszus, M., C. Wessig, A. Schutz, T. Horn, C. Kleinschnitz, C. Sommer, B. Misselwitz and G. Stoll (2005). "Assessment of nerve degeneration by gadofluorine M-enhanced magnetic resonance imaging." Ann Neurol **57**(3): 388-395.
8. Benninghoff, A. and D. Drenckhahn (2008). Anatomie: Zellen- und Gewebelehre, Entwicklungslehre, Skelett- und Muskelsystem, Atemsystem, Verdauungssystem, Harn- und Genitalsystem, Urban & Fischer, Elsevier.
9. Bernard, T. and J. Cassidy (1991). The sacroiliac joint syndrome:
10. Pathophysiology, diagnosis, and management. The Adult Spine: Principles and Practice. J. Frymoyer, Raven Press: 2107-2130.
11. Bierry, G., F. Jehl, N. Boehm, P. Robert, J. L. Dietemann and S. Kremer (2009). "Macrophage imaging by USPIO-enhanced MR for the differentiation of infectious osteomyelitis and aseptic vertebral inflammation." Eur Radiol **19**(7): 1604-1611.

12. Blaettner, T. and U. Thoden (1992). "[Pain and functional disturbances of the lumbar spine in lumbar herniated discs.]" Schmerz **6**(4): 251-254.
13. Bogduk, N. (2005). Clinical Anatomy of the Lumbar Spine and Sacrum, Elsevier Health Sciences.
14. Bogduk, N., A. S. Wilson and W. Tynan (1982). "The human lumbar dorsal rami." J Anat **134**(Pt 2): 383-397.
15. Bollow, M., J. Braun, J. Kannenberg, T. Biedermann, C. Schauer-Petrowskaja, S. Paris, S. Mutze and B. Hamm (1997). "Normal morphology of sacroiliac joints in children: magnetic resonance studies related to age and sex." Skeletal Radiol **26**(12): 697-704.
16. Bollow, M., J. Braun, M. Taupitz, J. Haberle, B. H. Reibhauer, S. Paris, S. Mutze, F. Seyrekbasan, K. J. Wolf and B. Hamm (1996). "CT-guided intraarticular corticosteroid injection into the sacroiliac joints in patients with spondyloarthropathy: indication and follow-up with contrast-enhanced MRI." J Comput Assist Tomogr **20**(4): 512-521.
17. Bowen, V. and J. D. Cassidy (1981). "Macroscopic and Microscopic Anatomy of the Sacroiliac Joint from Embryonic Life until the 8th Decade." Spine **6**(6): 620-628.
18. Brandstätter, S. (2004). "Diagnostik und Physikalische Therapie des vertebra-genen Schwindels." ÖZPMR, Österr Z Phys Med Rehabil **12**(2): 62-67.
19. Brisby, H. (2006). "Pathology and possible mechanisms of nervous system response to disc degeneration." J Bone Joint Surg Am **88 Suppl 2**: 68-71.
20. Brooke, R. (1924). "The Sacro-Iliac Joint." J Anat **58**(Pt 4): 299-305.
21. Brunner, C., R. Kissling and H. A. Jacob (1991). "The effects of morphology and histopathologic findings on the mobility of the sacroiliac joint." Spine (Phila Pa 1976) **16**(9): 1111-1117.
22. Bruns, J. and J. Steinhagen (2000). "Der Knorpelschaden als präarthrotische Deformität–Biologische Grundlagen." Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin **51**(2): 42-47.
23. Carter, M. E. and G. Loewi (1962). "Anatomical changes in normal sacroiliac joints during childhood and comparison with the changes in Still's disease." Ann Rheum Dis **21**: 121-134.

24. Cavanaugh, J. M., A. C. Ozaktay, H. T. Yamashita and A. I. King (1996). "Lumbar facet pain: biomechanics, neuroanatomy and neurophysiology." J Biomech **29**(9): 1117-1129.
25. Chhabra, A., L. Zhao, J. Carrino, E. Trueblood, S. Koceski, F. Shteriev, L. Lenkinski, C. Sinclair and G. Andreisek (2013). "Review Article MR Neurography: Advances." Radiology Research and Practice **2013**: 14.
26. Chiu, Y.-S., C.-P. Chou, J.-S. Huang, L.-R. Yeh and K.-H. Chen (2007). "Accessory Sacroiliac Joint : two case report." Chinese Journal of Radiology **32**: 157-161.
27. Cohen, S. P. (2005). "Sacroiliac joint pain: a comprehensive review of anatomy, diagnosis, and treatment." Anesth Analg **101**(5): 1440-1453.
28. Cohen, S. P. and S. Abdi (2003). "Lateral branch blocks as a treatment for sacroiliac joint pain: A pilot study." Reg Anesth Pain Med **28**(2): 113-119.
29. Cox, R. C. and J. D. Fortin (2014). "The anatomy of the lateral branches of the sacral dorsal rami: implications for radiofrequency ablation." Pain Physician **17**(5): 459-464.
30. Cunningham, D. J. and G. J. Romanes (1964). Cunningham's textbook of anatomy. London, New York,, Oxford University Press.
31. Demir, M., A. Mavi, E. Gumusburun, M. Bayram, S. Gursoy and H. Nishio (2007). "Anatomical variations with joint space measurements on CT." Kobe J Med Sci **53**(5): 209-217.
32. Diemer, W. and H. Burchert (2002). Gesundheitsberichterstattung des Bundes
Chronische Schmerzen –
Kopf- und Rückenschmerzen, Tumorschmerzen. Berlin Robert Koch-Institut in Zusammenarbeit mit den Statistischen Bundesamt. **Heft 7**.
33. Dihlmann, W. (1978). Röntgendiagnostik der Sakroiliakalgelenke und ihrer nahen Umgebung Stuttgart, Georg Thieme Verlag.
34. Dreyfuss, P., A. Cole and K. Pauza (1995). "Sacroiliac joint injection techniques." Physical Medicine & Rehabilitation Clinics of North America **6**: 785-813.
35. Dreyfuss, P., S. J. Dreyer, A. Cole and K. Mayo (2004). "Sacroiliac joint pain." J Am Acad Orthop Surg **12**(4): 255-265.

36. Dussault, R. G., P. A. Kaplan and M. W. Anderson (2000). "Fluoroscopy-guided sacroiliac joint injections." Radiology **214**(1): 273-277.
37. Dvořák, J., V. Dvořák, W. Schneider, H. Spring, T. Tritschler, H. Baumgartner, D. Bühler and B. Dejung (1997). Manuelle Medizin, Therapie. Stuttgart, Gerog Thieme Verlag
38. Ehara, S., G. Y. el-Khoury and R. A. Bergman (1988). "The accessory sacroiliac joint: a common anatomic variant." AJR Am J Roentgenol **150**(4): 857-859.
39. Eichenseer, P. H., D. R. Sybert and J. R. Cotton (2011). "A finite element analysis of sacroiliac joint ligaments in response to different loading conditions." Spine (Phila Pa 1976) **36**(22): E1446-1452.
40. Eickhoff, H. (2012). "Der aufrechte Gang. Die Bedeutung des Fußes für die Aufrichtung." Paragrana Internationale Zeitschrift für Historische Anthropologie **21**(1): 13-23.
41. Eppenberger, P., A. Chhabra and G. Andreisek (2012). "MR-Neurografie – Bildgebung des peripheren Nervensystems." Radiologie up2date **12** (04): 339-355.
42. Eubanks, J. D., M. J. Lee, E. Cassinelli and N. U. Ahn (2007). "Prevalence of lumbar facet arthrosis and its relationship to age, sex, and race: an anatomic study of cadaveric specimens." Spine (Phila Pa 1976) **32**(19): 2058-2062.
43. Fick, R. (1904). Handbuch der Anatomie und Mechanik der Gelenke unter Berücksichtigung der bewegenden Muskeln Anatomie der Gelenke. Jena, Gustav Fischer Verlag.
44. Forst, S. L., M. T. Wheeler, J. D. Fortin and J. A. Vilensky (2006). "The sacroiliac joint: anatomy, physiology and clinical significance." Pain Physician **9**(1): 61-67.
45. Fortin, J. D. and K. E. Ballard (2009). "The frequency of accessory sacroiliac joints." Clin Anat **22**(8): 876-877.
46. Fortin, J. D., R. O. Kissling, B. L. O'Connor and J. A. Vilensky (1999). "Sacroiliac joint innervation and pain." Am J Orthop (Belle Mead NJ) **28**(12): 687-690.

47. Freeman, M. and B. Wyke (1967). "The innervation of the knee joint. An anatomical and histological study in the cat." Journal of Anatomy **101** (Pt 3): 505-532.
48. Fujiwara, A., K. Tamai, H. Yoshida, A. Kurihashi, K. Saotome, H. S. An and T. H. Lim (2000). "Anatomy of the iliolumbar ligament." Clin Orthop Relat Res(380): 167-172.
49. Sachverständigenrat für die Konzentrierte Aktion im Gesundheitswesen (2002). Gutachten 2000/2001: Bedarfsgerechtigkeit und Wirtschaftlichkeit. Bd. III.: 3. Ausgewählte Erkrankungen: Rückenleiden, Krebserkrankungen und depressive Störungen; Bonn.
50. Glenister, T. W. (1976). "An embryological view of cartilage." J Anat **122**(Pt 2): 323-330.
51. Goode, A., E. J. Hegedus, P. Sizer, J. M. Brismee, A. Linberg and C. E. Cook (2008). "Three-dimensional movements of the sacroiliac joint: a systematic review of the literature and assessment of clinical utility." J Man Manip Ther **16**(1): 25-38.
52. Grob, K. R., W. L. Neuhuber and R. O. Kissling (1995). "[Innervation of the sacroiliac joint of the human]." Z Rheumatol **54**(2): 117-122.
53. Hadley, L. A. (1952). "Accessory sacro-iliac articulations." J Bone Joint Surg Am **34-A**(1): 149-155.
54. Hansen, H. C. and S. Helm, 2nd (2003). "Sacroiliac joint pain and dysfunction." Pain Physician **6**(2): 179-189.
55. Harms, J. (2014). "Kreuzschmerzen und das Iliosacralgelenk (ISG). Modul 1: ISG-bedingte Kreuzschmerzen: Ursachen und Diagnostik." Retrieved 11.05.2017, from https://www.my-cme.de/wp-content/uploads/arzt_isg_modul1_2014.pdf.
56. Haus, J., Z. Halata and H. J. Refior (1992). "[Proprioception in the anterior cruciate ligament of the human knee joint--morphological bases. A light, scanning and transmission electron microscopy study]." Z Orthop Ihre Grenzgeb **130**(6): 484-494.
57. Hilton, J. (1879). Rest and pain. New York, William Wood & Company.
58. Horwitz (1939). "The anatomy of (a) the lumbosacral nerve plexus - its relation to variation of the vertebral segmentation, an (b) the, posterior sacral nerve plexus " The anatomical record **74**(1): 91-107.

59. Horwitz, M. T. (1939). "The anatomy of (A) the lumbosacral nerve plexus—its relation to variations of vertebral segmentation, and (B), the posterior sacral nerve plexus." The anatomical record **74**: 91-107.
60. Ikeda, R. (1991). "[Innervation of the sacroiliac joint. Macroscopical and histological studies]." Nihon Ika Daigaku Zasshi **58**(5): 587-596.
61. Jansohn, M. and S. Rothhämel (2012). Gentechnische Methoden: Eine Sammlung von Arbeitsanleitungen für das molekularbiologische Labor, Spektrum Akademischer Verlag.
62. Jazuta, K. (1929). "Die Nebengelenkflächen an Kreuz-und Huftbein." Anatomischer Anzeiger **68**: 137-144.
63. Jerosch, J. and W. Steinleitner (2009). Minimal invasive Wirbelsäulen-Intervention: aufgebaut auf dem IGOST-IMPS-Kurssystem; mit 67 Tabellen. Köln, Deutscher Ärzteverlag. **2**.
64. Johnston, H. M. (1908). "The Cutaneous Branches of the Posterior Primary Divisions of the Spinal Nerves, and their Distribution in the Skin." J Anat Physiol **43**(Pt 1): 80-92 85.
65. Kang, J. D., H. I. Georgescu, L. McIntyre-Larkin, M. Stefanovic-Racic and C. H. Evans (1995). "Herniated cervical intervertebral discs spontaneously produce matrix metalloproteinases, nitric oxide, interleukin-6, and prostaglandin E2." Spine (Phila Pa 1976) **20**(22): 2373-2378.
66. Kayser, R. (2008). "Das Sakroiliakalgelenk und die sakroiliakale Dysfunktion
." Manuelle Medizin **46**(2): 69-72.
67. Kennedy, J. C., I. J. Alexander and K. C. Hayes (1982). "Nerve supply of the human knee and its functional importance." Am J Sports Med **10**(6): 329-335.
68. Kusswetter, W. and H. J. Refior (1985). "[Comparative light and scanning electron microscopy studies of the morphologic structure of ligament insertions into the bone]." Z Orthop Ihre Grenzgeb **123**(5): 876-879.
69. Le Goff, B., J. M. Berthelot and Y. Maugars (2011). "Ultrasound assessment of the posterior sacroiliac ligaments." Clin Exp Rheumatol **29**(6): 1014-1017.

70. Lewit, L., K. A and M. Lepšíková (2010). "Das tiefe stabilisierende System der Wirbelsäule - Seine Bedeutung für funktionelles Denken." Manuelle Medizin **48**: 440–446.
71. Luk, K. D., H. C. Ho and J. C. Leong (1986). "The iliolumbar ligament. A study of its anatomy, development and clinical significance." J Bone Joint Surg Br **68**(2): 197-200.
72. Lutz, A. M., D. Weishaupt, E. Persohn, K. Goepfert, J. Froehlich, B. Sasse, J. Gottschalk, B. Marincek and A. H. Kaim (2005). "Imaging of macrophages in soft-tissue infection in rats: relationship between ultrasmall superparamagnetic iron oxide dose and MR signal characteristics." Radiology **234**(3): 765-775.
73. Luukkainen, R., M. Nissila, E. Asikainen, M. Sanila, K. Lehtinen, A. Alanaatu and H. Kautiainen (1999). "Periarticular corticosteroid treatment of the sacroiliac joint in patients with seronegative spondylarthropathy." Clin Exp Rheumatol **17**(1): 88-90.
74. Luukkainen, R. K., P. V. Wennerstrand, H. H. Kautiainen, M. T. Sanila and E. L. Asikainen (2002). "Efficacy of periarticular corticosteroid treatment of the sacroiliac joint in non-spondylarthropathic patients with chronic low back pain in the region of the sacroiliac joint." Clin Exp Rheumatol **20**(1): 52-54.
75. Macdonald, G. R. (1952). "Sacro-iliac joints; observations of the gross and histological changes in the various age groups." Treat Serv Bull **7**(2): 54-70.
76. Martin, R. (1928). Lehrbuch der Anthropologie in systematischer Darstellung mit besonderer Berücksichtigung der anthropologischen Methoden für Studierende Ärzte und Forschungsreisende. Jena,, G. Fischer.
77. Maugars, Y., C. Mathis, P. Vilon and A. Prost (1992). "Corticosteroid injection of the sacroiliac joint in patients with seronegative spondylarthropathy." Arthritis Rheum **35**(5): 564-568.
78. Mayer, P. (1893). "über das Färben mit Hämatoxylin." Mittheilungen aus der Zoologischen Station zu Neapel: zugleich ein Repertorium für Mittelmeerkunde **10**(170).

79. McGrath, M. C. and M. Zhang (2005). "Lateral branches of dorsal sacral nerve plexus and the long posterior sacroiliac ligament." Surg Radiol Anat **27**(4): 327-330.
80. Mense, S. (2001). "[Pathophysiology of low back pain and the transition to the chronic state - experimental data and new concepts]." Schmerz **15**(6): 413-417.
81. Montandon, C., M. Bitencourt Costa, T. Nunes Carvalho, M. Eustáquio Montandon Júnior and K. Santos Teixeira (2007). "SACROILIITIS: IMAGING EVALUATION." Radiologia Brasileira **40**: 53-60.
82. Mooney, V. and J. Robertson (1976). "The facet syndrome." Clin Orthop Relat Res(115): 149-156.
83. Mow, V. C., M. H. Holmes and W. M. Lai (1984). "Fluid transport and mechanical properties of articular cartilage: a review." J Biomech **17**(5): 377-394.
84. Murata, Y., K. Takahashi, M. Yamagata, Y. Takahashi, Y. Shimada and H. Moriya (2001). "Origin and pathway of sensory nerve fibers to the ventral and dorsal sides of the sacroiliac joint in rats." J Orthop Res **19**(3): 379-383.
85. Nakagawa, T. (1966). "[Study on the distribution of nerve filaments over the iliosacral joint and its adjacent region in the Japanese]." Nihon Seikeigeka Gakkai Zasshi **40**(4): 419-430.
86. Ojala, R., R. Klemola, J. Karppinen, R. B. Sequeiros and O. Tervonen (2001). "Sacro-iliac joint arthrography in low back pain: feasibility of MRI guidance." Eur J Radiol **40**(3): 236-239.
87. Ombregt, L. (2013). A System of Orthopaedic Medicine, Churchill Livingstone.
88. Pedersen, H. E., C. F. Blunck and E. Gardner (1956). "The anatomy of lumbosacral posterior rami and meningeal branches of spinal nerve (sinu-vertebral nerves); with an experimental study of their functions." J Bone Joint Surg Am **38-A**(2): 377-391.
89. Petersen, O. U. (1905). "Articulationslachen an der Hinterflache des Os Sacrum." Anatomischer Anzeiger **26**: 51-254.
90. Petersen, W. and B. Tillmann (2000). "Anatomie des hinteren Kreuzbandes." Arthroskopie **13**(1): 3-10.

91. Pool-Goudzwaard, A., G. Hoek van Dijke, P. Mulder, C. Spoor, C. Snijders and R. Stoeckart (2003). "The iliolumbar ligament: its influence on stability of the sacroiliac joint." Clin Biomech (Bristol, Avon) **18**(2): 99-105.
92. Pool-Goudzwaard, A. L., G. J. Kleinrensink, C. J. Snijders, C. Entius and R. Stoeckart (2001). "The sacroiliac part of the iliolumbar ligament." J Anat **199**(Pt 4): 457-463.
93. Prassopoulos, P. K., C. P. Fafila, A. E. Voloudaki and N. C. Gourtsoyiannis (1999). "Sacroiliac joints: anatomical variants on CT." J Comput Assist Tomogr **23**(2): 323-327.
94. Putz, R. and M. Muller-Gerbl (1992). "[Anatomic characteristics of the pelvic girdle]." Unfallchirurg **95**(4): 164-167.
95. Raspe, H. (2012). Rückenschmerzen. Gesundheitsberichterstattung des Bundes. RKI. Berlin, Robert Koch-Institut **53**.
96. Rehart, S. and H. Lehnert (2008). "Aktuelle Aspekte zur Arthrose." Zeitschrift für Rheumatologie **67**(4): 305-314.
97. Reid, S. (2016). "Zervikogener Schwindel—ein Überblick zu Diagnose und evidenzbasierter Therapie." manuelletherapie **20**(03): 116-121.
98. Resnick, D., G. Niwayama and T. G. Goergen (1975). "Degenerative disease of the sacroiliac joint." Invest Radiol **10**(6): 608-621.
99. Robert-Koch-Institut. (2006). "Gesundheit in Deutschland. Gesundheitsbericht des Bundes " Retrieved 11.05.2017, from <http://www.gbe-bund.de/pdf/GESBER2006.pdf>.
100. Rosa Neto, N. S., L. F. Vitule, C. R. Goncalves and C. Goldenstein-Schainberg (2009). "An accessory sacroiliac joint." Scand J Rheumatol **38**(6): 496.
101. Rosenberg, J. M., T. J. Quint and A. M. de Rosayro (2000). "Computerized tomographic localization of clinically-guided sacroiliac joint injections." Clin J Pain **16**(1): 18-21.
102. Sakamoto, N., T. Yamashita, T. Takebayashi, M. Sekine and S. Ishii (2001). "An Electrophysiologic Study of Mechanoreceptors in the Sacroiliac Joint and Adjacent Tissues." SPINE **26**(20): E468–E471.

103. Schunke, G. B. (1938). "Schunke GB (1938) The anatomy and development of the sacro- iliac joint in man." The Anatomical Record(72): 313-331.
104. Seligmann, S. B. (1935). "Articulatio sacro-iliaca accessoria." Anat Anz **79**(22): 225-241.
105. Shealy, C. N. (1976). "Facet denervation in the management of back and sciatic pain." Clin Orthop Relat Res(115): 157-164.
106. Snijdelaar, D. G., R. Dirksen, R. Slappendel and B. J. Crul (2000). "Substance P." Eur J Pain **4**(2): 121-135.
107. Snijders, C. J., A. Vleeming and R. Stoeckart (1993). "Transfer of lumbosacral load to iliac bones and legs Part 1: Biomechanics of self-bracing of the sacroiliac joints and its significance for treatment and exercise." Clin Biomech (Bristol, Avon) **8**(6): 285-294.
108. Snijders, C. J., A. Vleeming and R. Stoeckart (1993). "Transfer of lumbosacral load to iliac bones and legs Part 2: Loading of the sacroiliac joints when lifting in a stooped posture." Clin Biomech (Bristol, Avon) **8**(6): 295-301.
109. Solonen, K. A. (1957). "The sacroiliac joint in the light of anatomical, roentgenological and clinical studies." Acta orthopaedica scandinavica(27): 1-125.
110. Standring, S. (2015). Gray's Anatomy: The Anatomical Basis of Clinical Practice, Elsevier Health Sciences. **41**.
111. Stewart, T. D. (1984). "Pathologic changes in aging sacroiliac joints. A study of dissecting-room skeletons." Clin Orthop Relat Res(183): 188-196.
112. Stofft, E. (2011). Funktionelle Anatomie und Physiologie der Lendenwirbelsäule und physiologische Alterungsprozesse. Praxis LWS-Erkrankungen: Diagnose und Therapie A. Eckhardt, Springer Berlin Heidelberg.
113. Szadek, K. M., P. V. Hoogland, W. W. Zuurmond, J. J. de Lange and R. S. Perez (2008). "Nociceptive nerve fibers in the sacroiliac joint in humans." Reg Anesth Pain Med **33**(1): 36-43.

114. Tesarz, J., U. Hoheisel, B. Wiedenhofer and S. Mense (2011). "Sensory innervation of the thoracolumbar fascia in rats and humans." Neuroscience **194**: 302-308.
115. Triano, J. J. and M. W. Luttges (1982). "Nerve irritation: a possible model of sciatic neuritis." Spine (Phila Pa 1976) **7**(2): 129-136.
116. Trotter, M. (1937). "Accessory sacroiliac articulation." American Journal of Physical Anthropology **22**: 247-261.
117. Trotter, M. (1940). "A common anatomical variation in the sacroiliac region." Bone Joint Surg Am **22**(2): 293-299.
118. Trotter, M. (1964). "Accessory Sacroiliac Articulations in East African Skeletons." Am J Phys Anthropol **22**: 137-141.
119. Valojerdy, M. R. and D. A. Hogg (1990). "Anatomical Note: The Occurrence of Accessory Sacroiliac Joints in Man." Clinical Anatomy **3**: 257-260.
120. Van den Berg, F. and J. Cabri (2003). *Angewandte Physiologie: Band 1: Das Bindegewebe des Bewegungsapparates verstehen und beeinflussen.* F. Van den Berg. Stuttgart, Georg Thieme Verlag. **2**.
121. van Rossum, D., U. K. Hanisch and R. Quirion (1997). "Neuroanatomical localization, pharmacological characterization and functions of CGRP, related peptides and their receptors." Neurosci Biobehav Rev **21**(5): 649-678.
122. Varga, E., B. Dudas and M. Tile (2008). "Putative proprioceptive function of the pelvic ligaments: biomechanical and histological studies." Injury **39**(8): 858-864.
123. Vilensky, J. A., B. L. O'Connor, J. D. Fortin, G. J. Merkel, A. M. Jimenez, B. A. Scofield and J. B. Kleiner (2002). "Histologic analysis of neural elements in the human sacroiliac joint." Spine (Phila Pa 1976) **27**(11): 1202-1207.
124. Vleeming, A. (2006). "Bedeutung des Beckengürtels als Verbindung
125. von Wirbelsäule und Beinen." Manuelle Therapie **10**: 176-185, 225- 235.
126. Vleeming, A., A. L. Pool-Goudzwaard, D. Hammudoghlu, R. Stoeckart, C. J. Snijders and J. M. Mens (1996). "The function of the long

- dorsal sacroiliac ligament: its implication for understanding low back pain." Spine (Phila Pa 1976) **21**(5): 556-562.
127. Vleeming, A., J. P. Van Wingerden, P. F. Dijkstra, R. Stoeckart, C. J. Snijders and T. Stijnen (1992). "Mobility in the sacroiliac joints in the elderly: a kinematic and radiological study." Clin Biomech (Bristol, Avon) **7**(3): 170-176.
128. von Luschka, H. (1864). Die Anatomie des menschlichen Beckens. Tübingen, H. Laupp'sche Buchhandlung.
129. Walker, J. M. (1986). "Age-related differences in the human sacroiliac joint: a histological study; - implications for therapy." J Orthop Sports Phys Ther **7**(6): 325-334.
130. Willard, F. H., J. E. Carreiro and W. Manko (1998). "The long posterior interosseous ligament and the sacrococcygeal plexus." Third interdisciplinary world congress on low back and pelvic pain: 207-209.
131. Yin, W., F. Willard, J. Carreiro and P. Dreyfuss (2003). "Sensory Stimulation-Guided Sacroiliac Joint Radiofrequency Neurotomy: Technique Based on Neuroanatomy of the Dorsal Sacral Plexus." Spine (Phila Pa 1976) **28**(20): 2419-2425.
132. Yin, W., F. Willard, J. Carreiro and P. Dreyfuss (2003). "Sensory stimulation-guided sacroiliac joint radiofrequency neurotomy: technique based on neuroanatomy of the dorsal sacral plexus." Spine (Phila Pa 1976) **28**(20): 2419-2425.
133. Zhang, S. S., W. Wu, J. M. Yang and C. H. Wang (2017). "Abnormal Spontaneous Brain Activity in Acute Low-Back Pain Revealed by Resting-State Functional MRI." Am J Phys Med Rehabil **96**(4): 253-259.

5.1 Bildquellennachweise

1. Paulsen, Waschke, Sobotta Atlas der Anatomie, 24. Auflage 2017 © Elsevier GmbH, Urban & Fischer, München.
(Mit freundlicher Genehmigung von Frau Dr. Cathrin Korz, Elsevier GmbH).

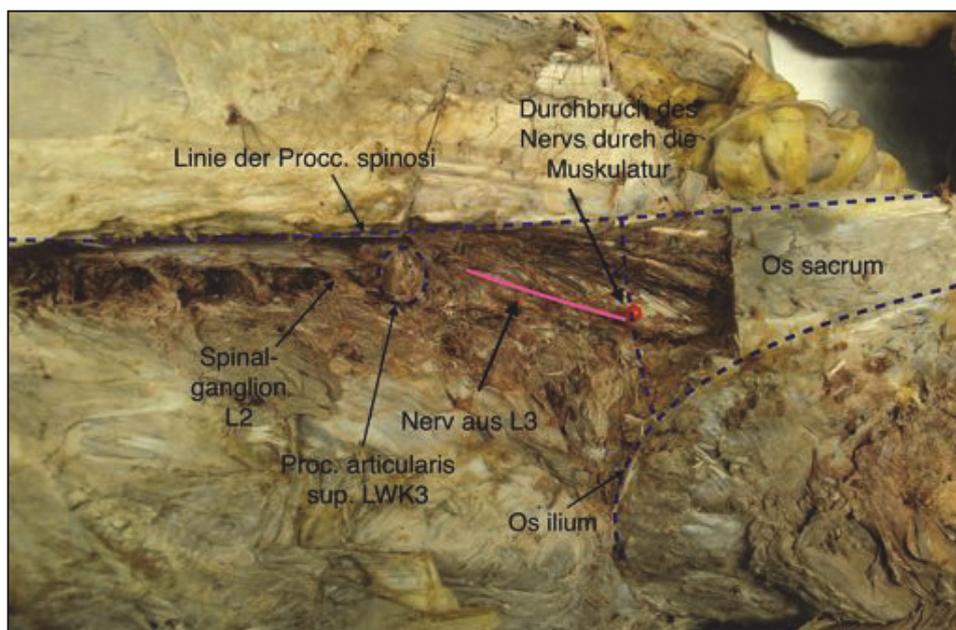
6. Anhang I: Beschreibung der Körperspenden einzeln

6.1 Körperspender 03/13

Nach Präparation der lumbalen Wirbelsäule zeigte sich ein dorsaler Nerv aus dem Spinalganglion L3, der zunächst nach kranial zog, um dann in einem Bogen über das Periost des Processus articularis superior des dritten Lendenwirbels zog und anschließend nach kaudal zum Kreuzbein zog (siehe den genauen Verlauf auch in Kap. 3.1.3. sowie Abb. 32-33).



a

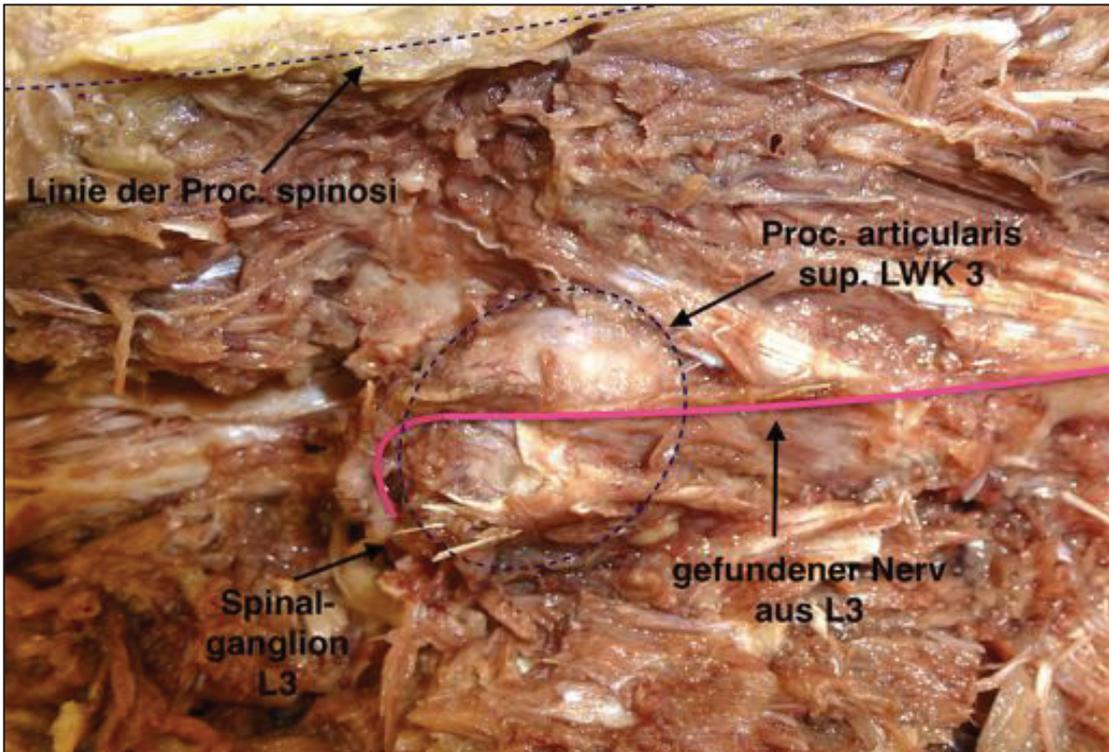


b

Abb. 32: Übersicht des lumbosakralen Präparationsgebiets des Körperspenders. a: Nicht bearbeitetes Bild. Lediglich eine rote Stecknadel markiert den Durchtritt des 1mm dicken Nerven aus L3 durch die Muskulatur. **b:** Bearbeitetes Bild mit Nachzeichnung anatomischer Leitstrukturen. Der gefundene Nerv ist pink nachgezeichnet.



a



b

Abb. 33: Nerv aus L3 bei seinem Überzug über das Periost des Proc. articularis superior des LWK 3. a: Nicht bearbeitetes Foto. b: Bearbeitetes Bild mit Nachzeichnung anatomischer Leitstrukturen. Der gefundene Nerv ist pink nachgezeichnet.

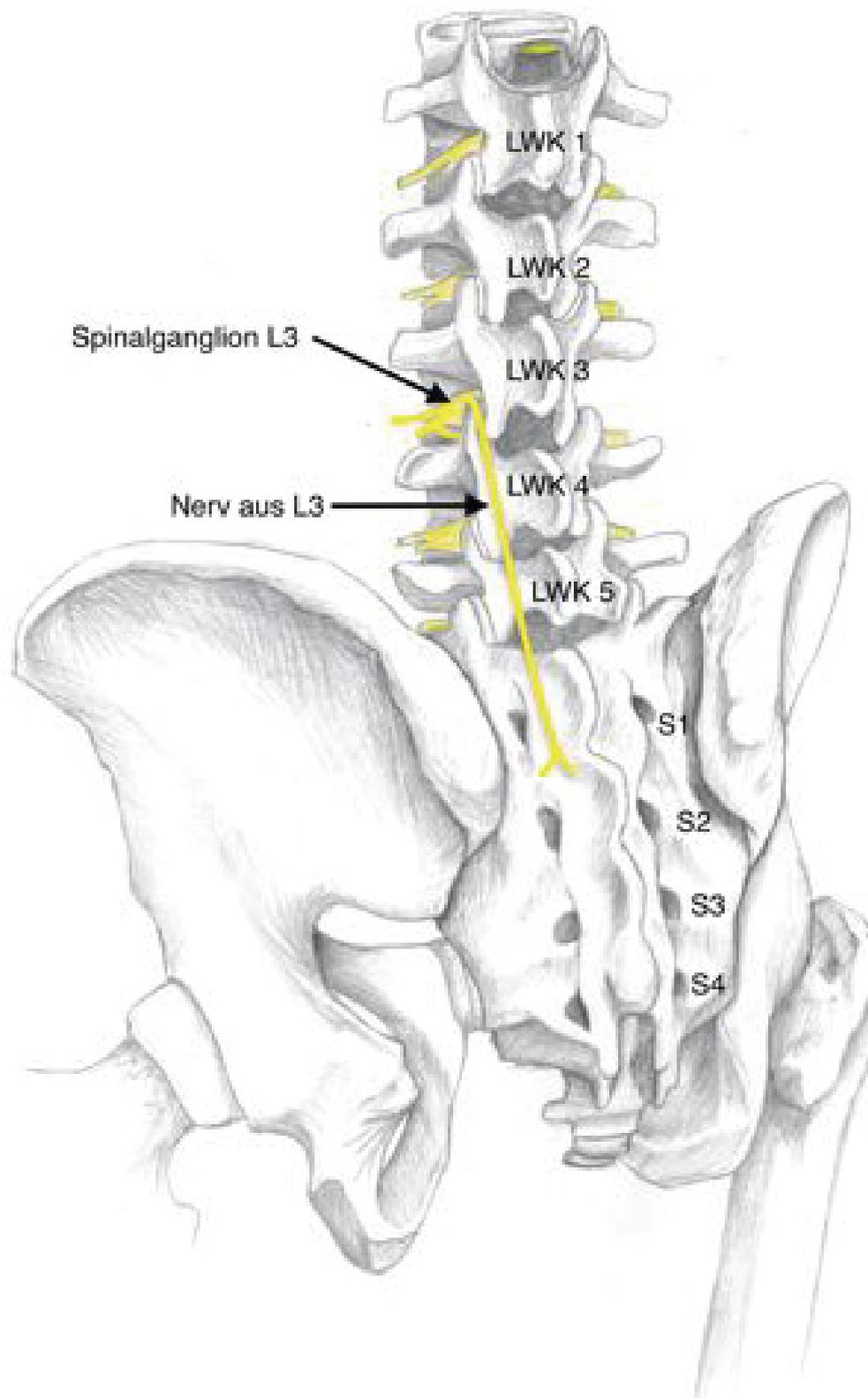


Abb. 34: Übersichtszzeichnung des gefundenen Nerven aus L3. Ansicht von dorsolateral. Schematische Zeichnung.

6.2 Körperspender 02/14

Durch die Präparation der Wirbelsäule, des Kreuzbeins und des SIG zeigte sich eine Versorgung des SIG aus den dorsalen Segmenten aus S3 auf der linken Seite und aus S1 und S2 auf der rechten Seite. Dabei bestand eine nervale Verbindung zwischen Ästen aus S1 und S2 (siehe hierzu Abb. 20-22).

Aus L5 zeigte sich auf der rechten Seite ein Ast, der jedoch nicht zum SIG zog, sondern zum medialen Kreuzbein verlief mit dem dazugehörigen Bandapparat (siehe hierzu Abb. 35-37).

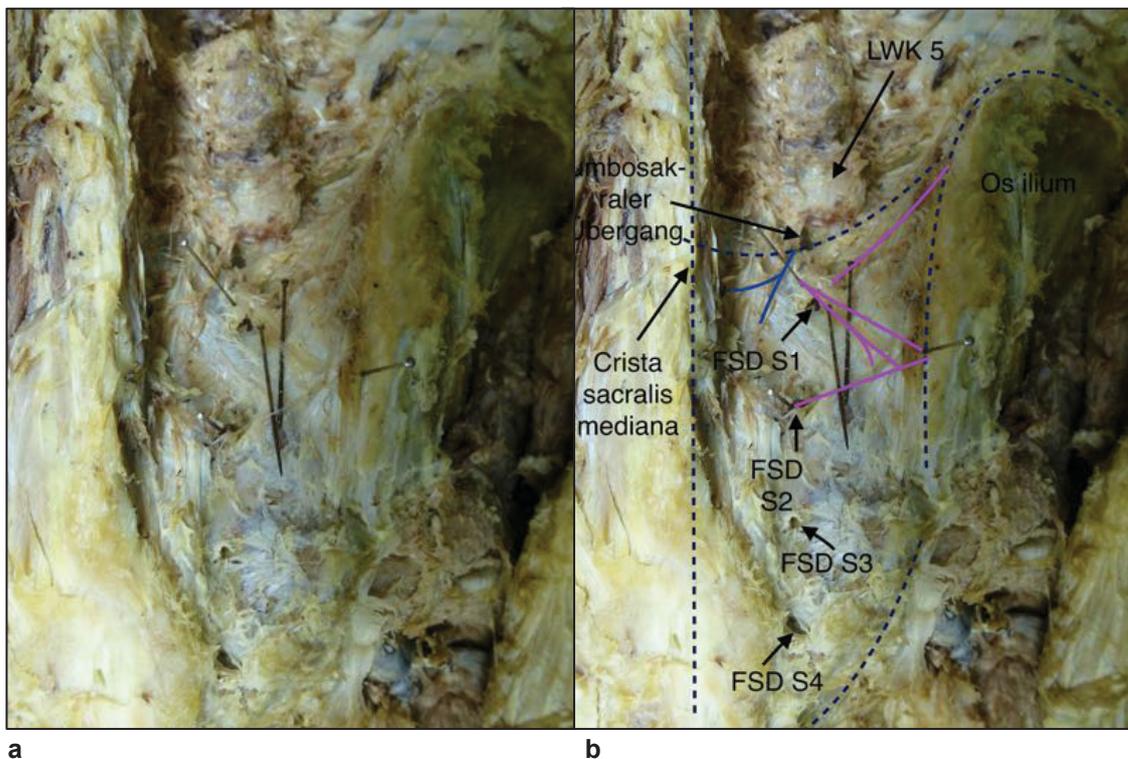
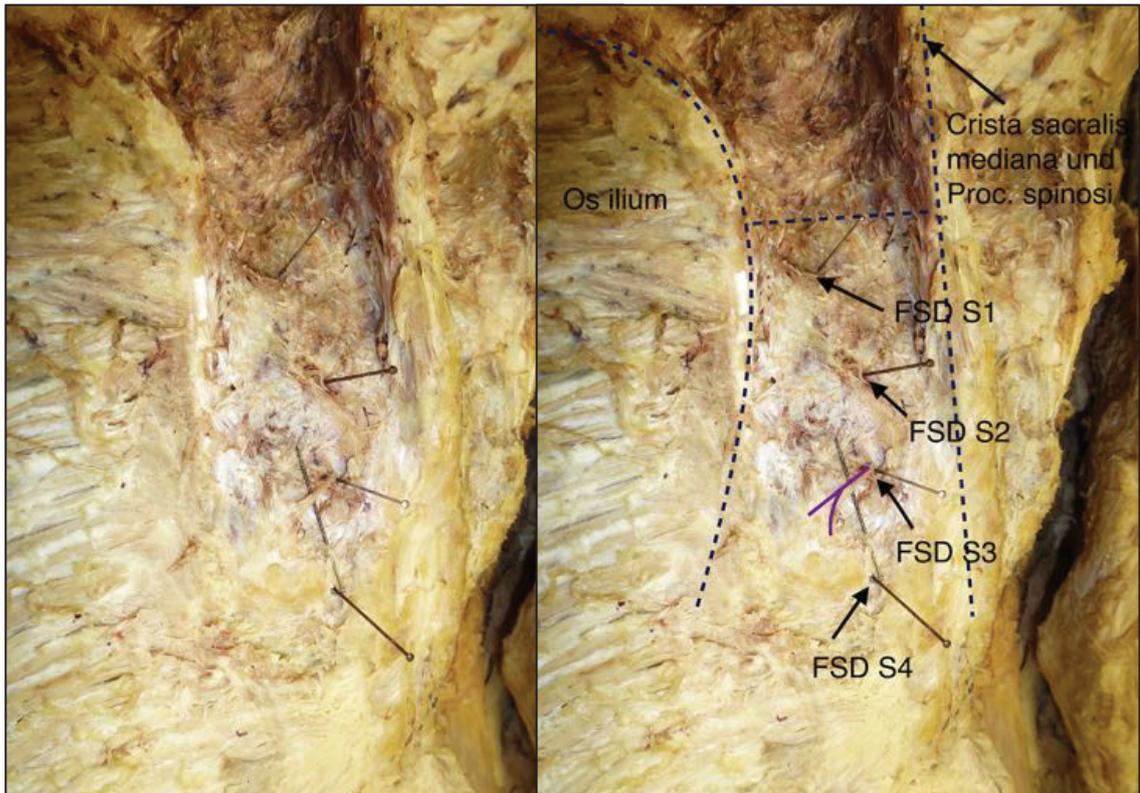


Abb. 35: Rechtes SIG mit den versorgenden Nerven aus den dorsalen Neuroforamina S1 und S2, die durch Stecknadeln markiert wurden. Eine weitere Stecknadel markiert den Eintritt der Nerven in den Gelenkspalt des SIG. Zusätzlich dienen zwei Stecknadeln der Hervorhebung der Nerven. **a:** Nicht bearbeitetes Foto. **b:** Bearbeitetes Foto. Anatomische Leitstrukturen wurden nachgezeichnet und beschriftet; die gefundenen Nerven aus S1 und S2 sind pink nachgezeichnet, der Fund aus L5 mittelblau. FSD: Foramina sacralia dorsales.



a

b

Abb. 36: Linkes SIG mit versorgendem Nerv aus dem dorsalen Neuroforamen S3. Die Neuroforamina S1 bis S4 sind durch Stecknadeln markiert; eine weitere Stecknadel dient dem Hervorheben des gefundenen Nerven. **a:** Nicht bearbeitetes Foto. **b:** Bearbeitetes Foto. Anatomische Leitstrukturen wurden nachgezeichnet und beschriftet; der gefundene Nerv wurde pink nachgezeichnet. FSD: Foramina sacralia dorsales.

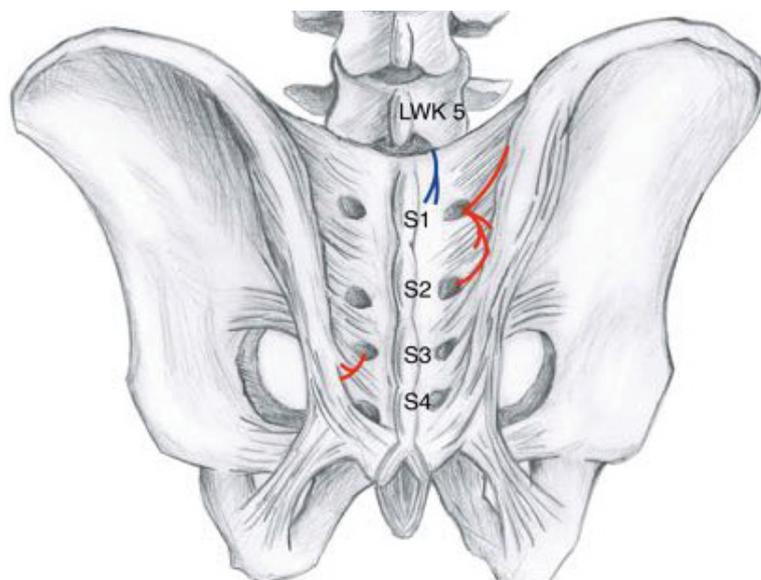


Abb. 37: Zeichnung der Innervation des SIG bei Körperspender 02/14. Die Zeichnung zeigt auf der linken Seite einen dorsalen Nerven aus S3, während rechts Nerven aus S1 und S2 an der Versorgung beteiligt sind und sogar teils miteinander verbunden sind. Die SIG-innervierenden Nerven wurden rot dargestellt; der blaue Nerv zeigt eine zusätzlich aufgefundene Innervation des Kreuzbeines und dort befindlichen Bindegewebes aus L5. Schematische Zeichnung.

6.3 Körperspender 33/12

Bei diesem Körperspender wurde auf der linken Körperhälfte ein Nerv aus dem Ganglion L3 gefunden. Nach Austritt aus dem Spinalganglion gelangte er zunächst nach kranial und zog um den Proc. art. sup. von LW3 von dorsal nach ventral herum, um dann wieder nach kaudal zu gelangen. Er verlief dabei direkt über das Periost des oberen Gelenkfortsatzes. Nach diesem Überziehen des Periosts gelangte er zwischen Muskelsträngen nach kaudal- lateral. Kurz vor seinem Eintritt in den Gelenkspalt teilte er sich in 2 Äste auf, die beide ins SIG eintraten (siehe hierzu Abb. 38-40).

Während der Präparation ist der Nerv gerissen; er wurde daraufhin mit Nahtmaterial wieder zusammengenäht (siehe Abb. 39).

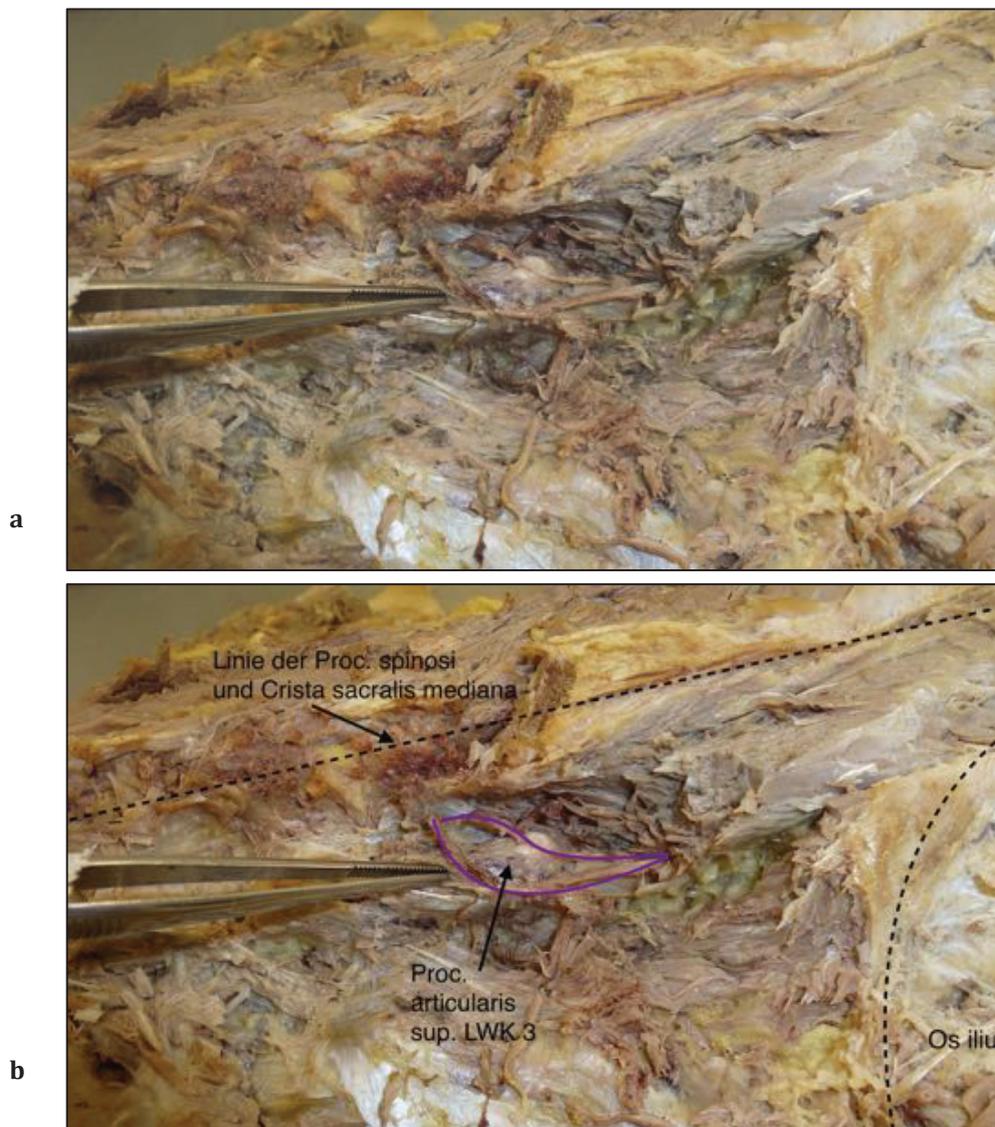
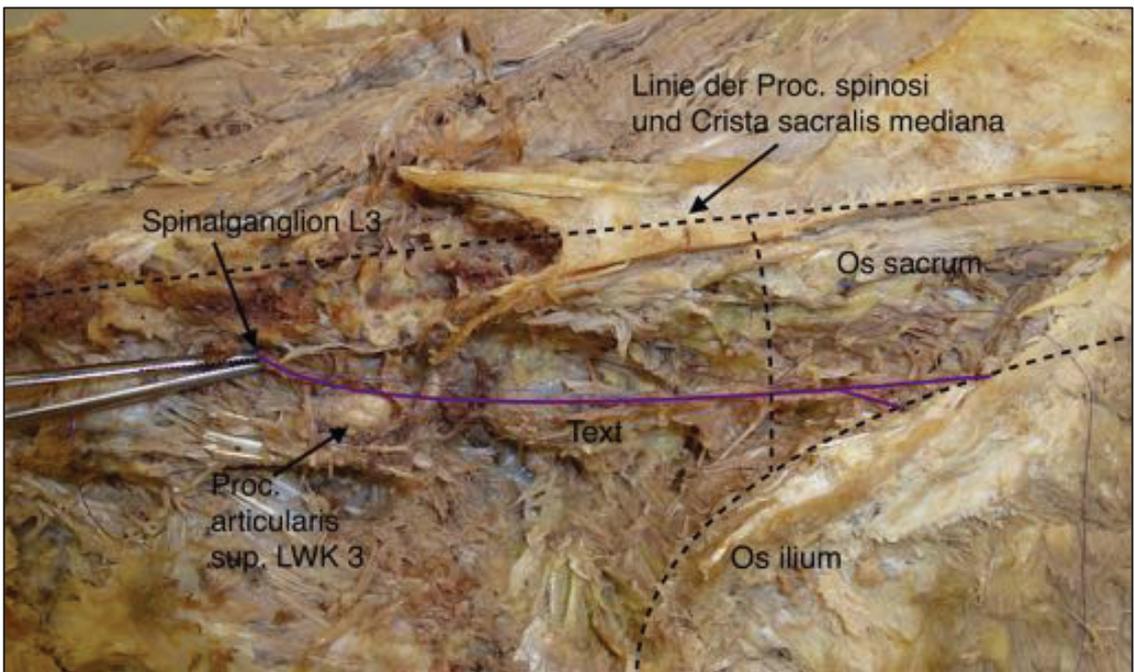


Abb. 38: Kranialer Anteil des Nerven aus L3. Hier noch 2 Nerven sichtbar, von dem im Bild kranial liegende Nerv zum SIG zog. **a:** Nicht bearbeitetes Foto. **b:** Bearbeitetes Foto.



a



b

Abb. 39: Nerv aus L3, der zum SIG zog. Da während der Präparation ein Teil des Nerven ausgerissen war, wurde der Nerv mit blauem Nahtmaterial wieder zusammengenäht **a:** Nicht bearbeitetes Foto. **b:** Bearbeitetes Foto; anatomische Leitstrukturen wurden zur besseren Orientierung nachgezeichnet und beschriftet; die gefundenen Nerven wurde pink nachgezeichnet.

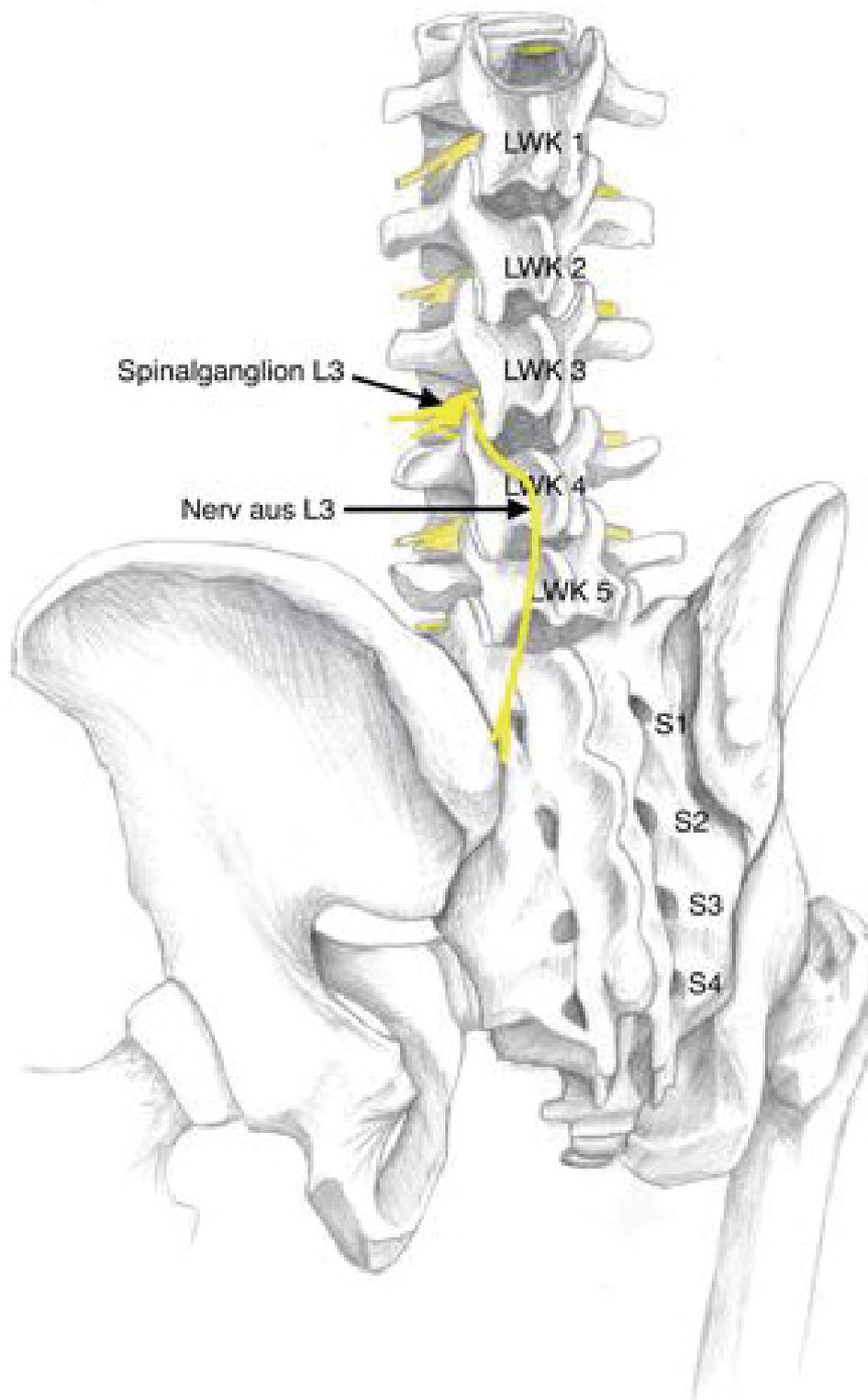


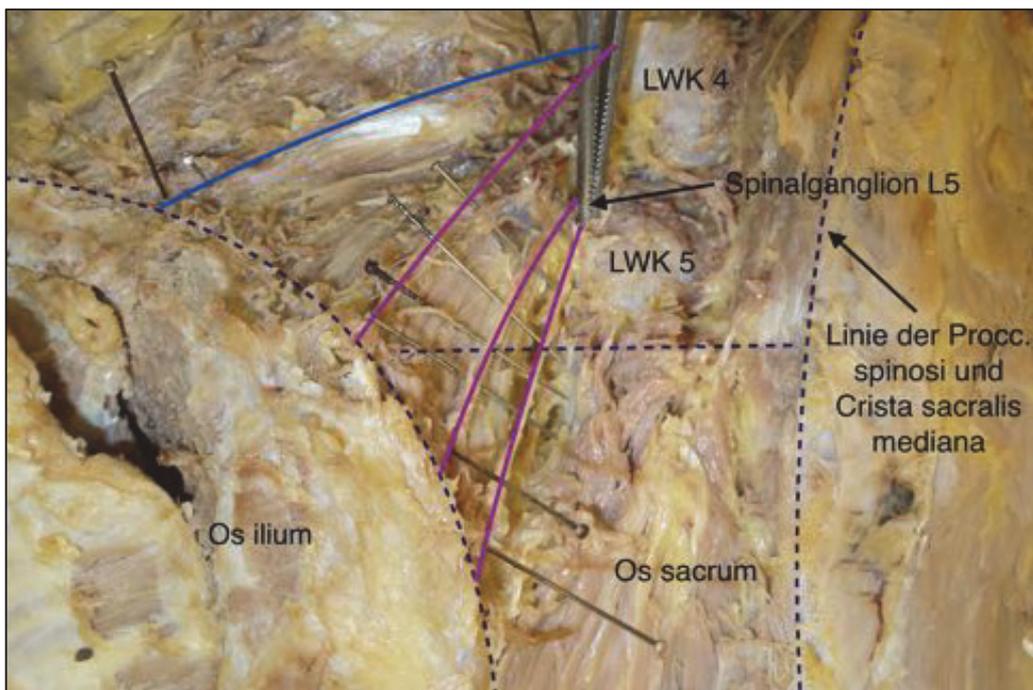
Abb. 40: Übersichtszzeichnung des gefundenen Nerven aus L3. Ansicht von dorsolateral.
Schematische Zeichnung.

6.4 Körperspender 55/12

Bei diesem Körperspender zeigten sich auf der linken Seite jeweils ein Nerv aus dem 4. und 5. lumbalen, dorsalen Segment. Die Nerven zogen dabei auf direktem Weg von ihren Spinalganglien zum Gelenkspalt des SIG. Ein weiterer Nerv aus L4 zog zum Os ilium (siehe hierzu Abb. 41-42).



a



b

Abb. 41: Versorgung des SIG aus L4 und L5. a: Nicht bearbeitetes Foto. **b:** Bearbeitetes Foto, anatomische Leitstrukturen wurden zur besseren Orientierung nachgezeichnet und beschriftet; die gefundenen Nerven wurden pink nachgezeichnet. Der Nerv aus L4 zum Os ilium wurde blau dargestellt.

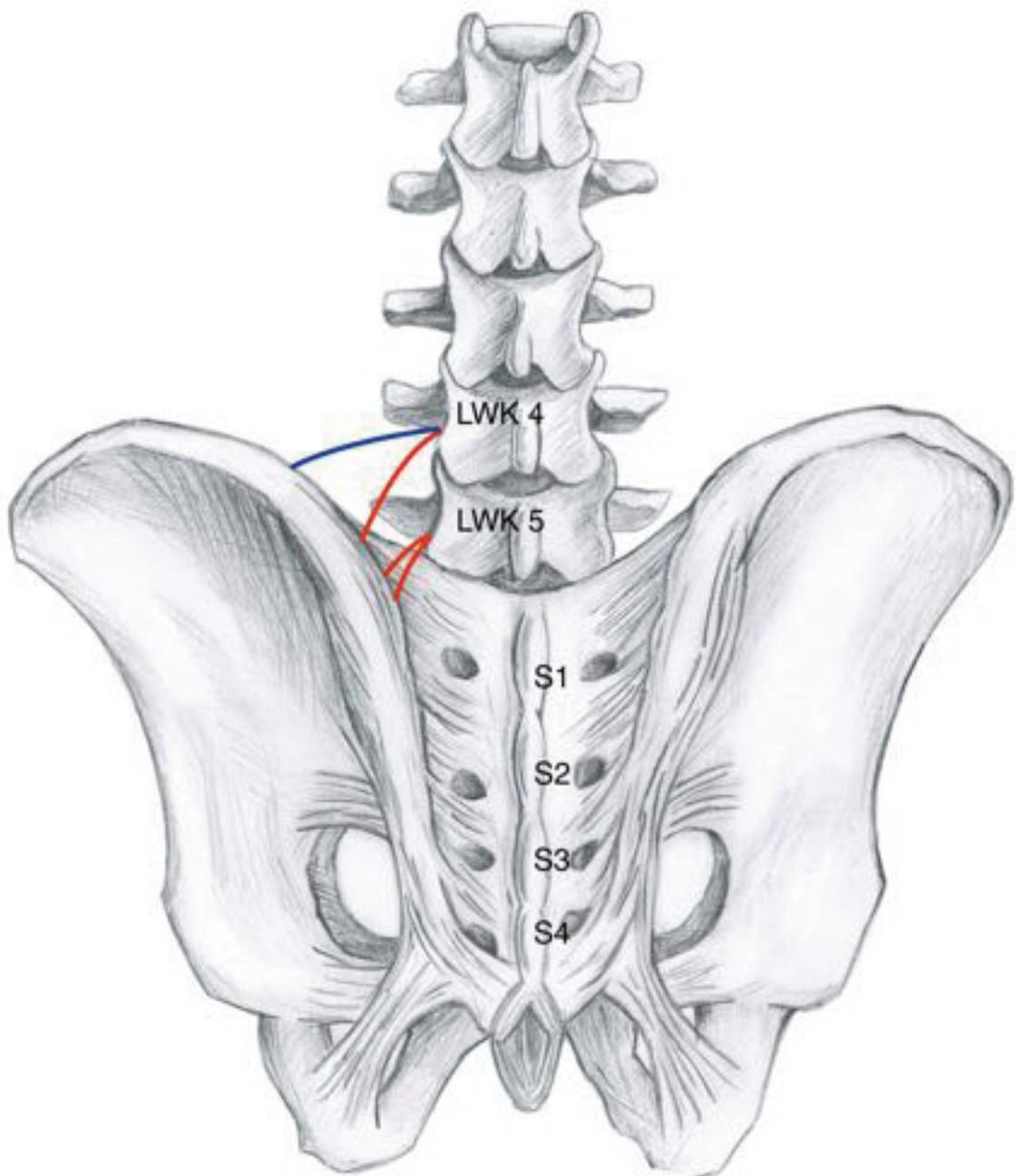


Abb. 42: Zeichnung der Innervation des SIG aus L4 und L5. Die Zeichnung zeigt auf der linken Seite eine Innervation des SIG aus dorsalen Nerven der lumbalen Segmente L4 und L5 (rot). Zusätzlich wurde ein Nerv aus L4 (blau) gefunden, der in den Bereich der Crista iliaca zog. Schematische Zeichnung.

6.5 Körperspender 01/13

Bei diesem Körperspender zeigte sich auf der rechten Seite eine Versorgung des SIG aus einem dorsalen Ast aus S3. Dabei gab er auch Äste an das umliegende Bindegewebe ab.

Der Körperspender wies eine leichte Skoliose im Bereich der Brust- und Lendenwirbelsäule auf (siehe hierzu Abb. 43-44).

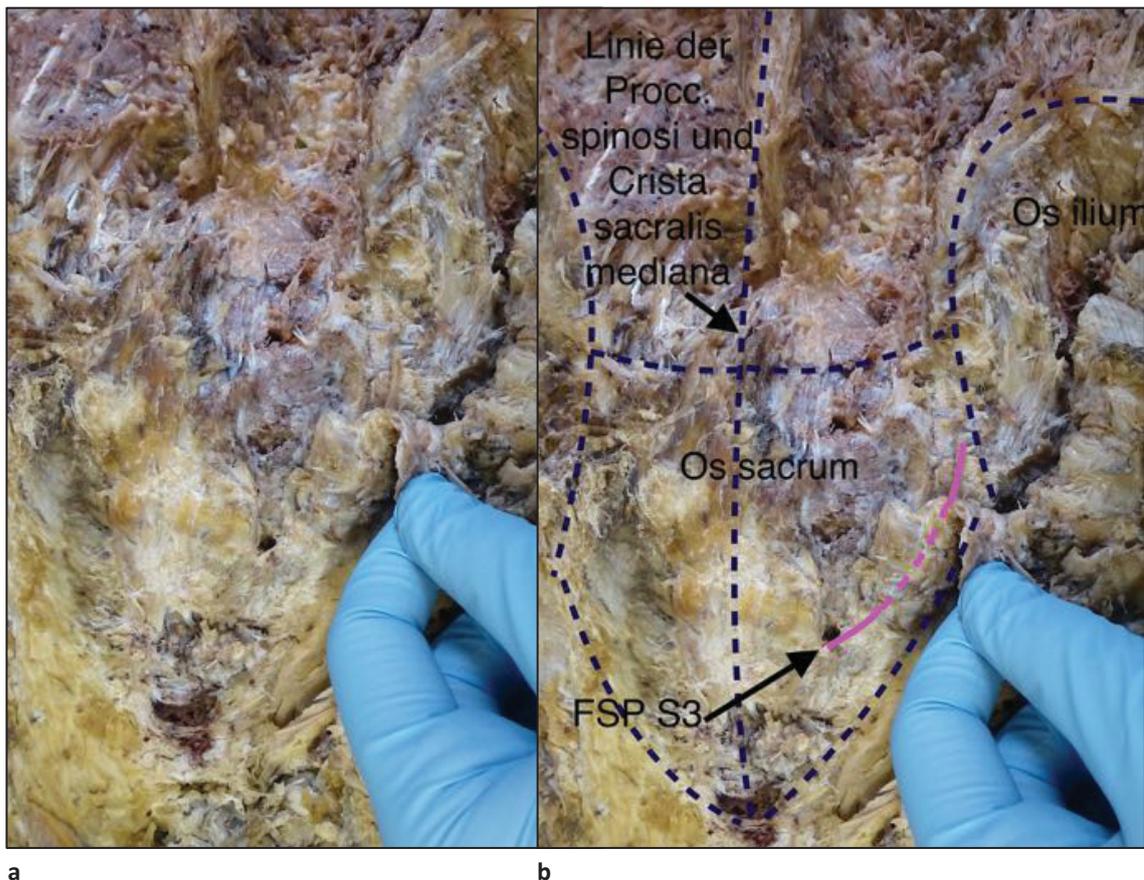


Abb. 43: Ansicht auf das rechte SIG mit Versorgung eines dorsalen Astes aus S3. a: Nicht bearbeitetes Foto. **b:** Bearbeitetes Foto. Anatomische Leitstrukturen wurden zur besseren Orientierung nachgezeichnet und beschriftet; der gefundene Nerv wurde pink nachgezeichnet. Im Bereich der Schraffur war der Nerv von Bindegewebe überzogen und somit auf diesem Foto nicht sichtbar. FSP: Foramen sacralis posterius.

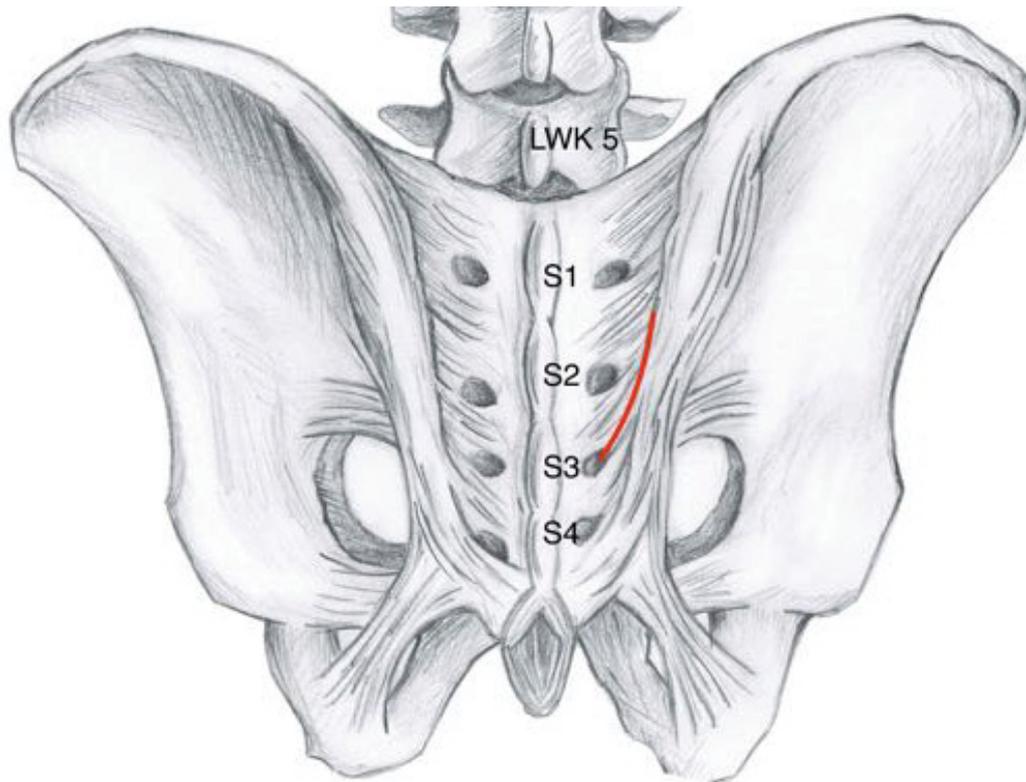


Abb. 44: Zeichnung der Innervation des SIG aus S3. Die Abbildung zeigt auf der rechten Seite einen rot dargestellten Nerven aus S3, der zum SIG zieht. Schematische Zeichnung.

6.6 Körperspender 87/13

Bei diesem Körperspender zeigte sich auf der linken Körperhälfte eine dorsale Versorgung des SIG aus L5, während auf der rechten Seite dorsale Äste aus S1 bis S3 zum SIG gefunden wurden (siehe hierzu Abb. 45-47).

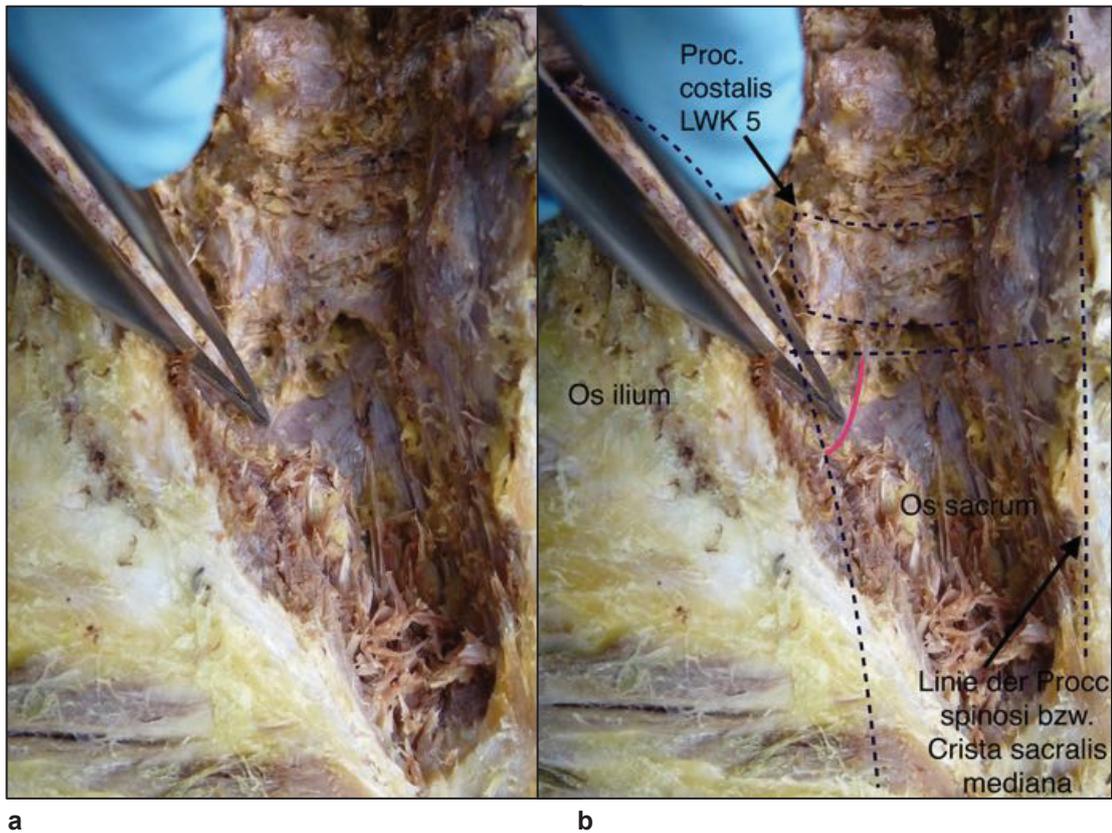
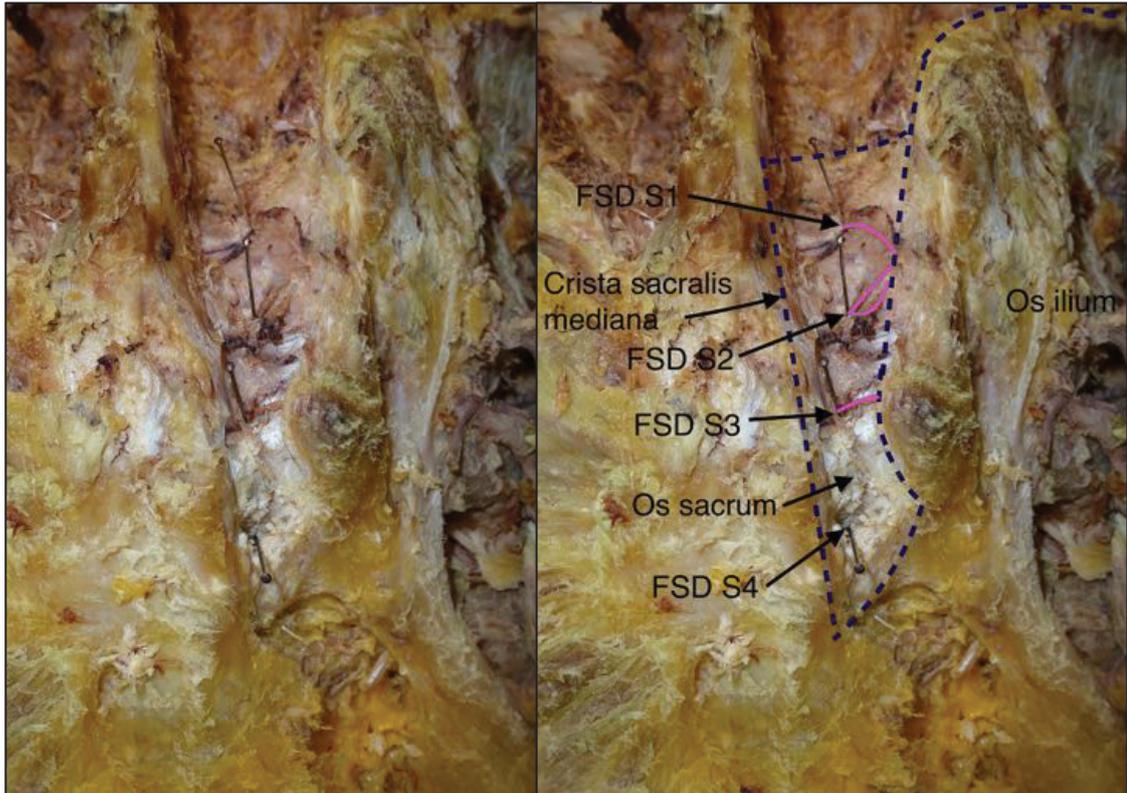


Abb. 45: Versorgung des linken SIG aus L5. a: Nicht bearbeitetes Foto. **b:** Bearbeitetes Foto. Anatomische Leitstrukturen wurden zur besseren Orientierung nachgezeichnet und beschriftet; der gefundene Nerv wurde pink nachgezeichnet. Zusätzlich zeigt die Pinzette auf den gefundenen Nerv aus L5.



a **b**
Abb. 46: Innervation des rechten SIG durch S1 bis S3. **a:** Nicht bearbeitetes Foto. **b:** Bearbeitetes Foto. Die Stecknadeln markieren dabei die dorsalen Neuroforamina (FSD). Anatomische Leitstrukturen wurden zur besseren Orientierung nachgezeichnet und beschriftet; die gefundenen Nerven wurde pink nachgezeichnet.

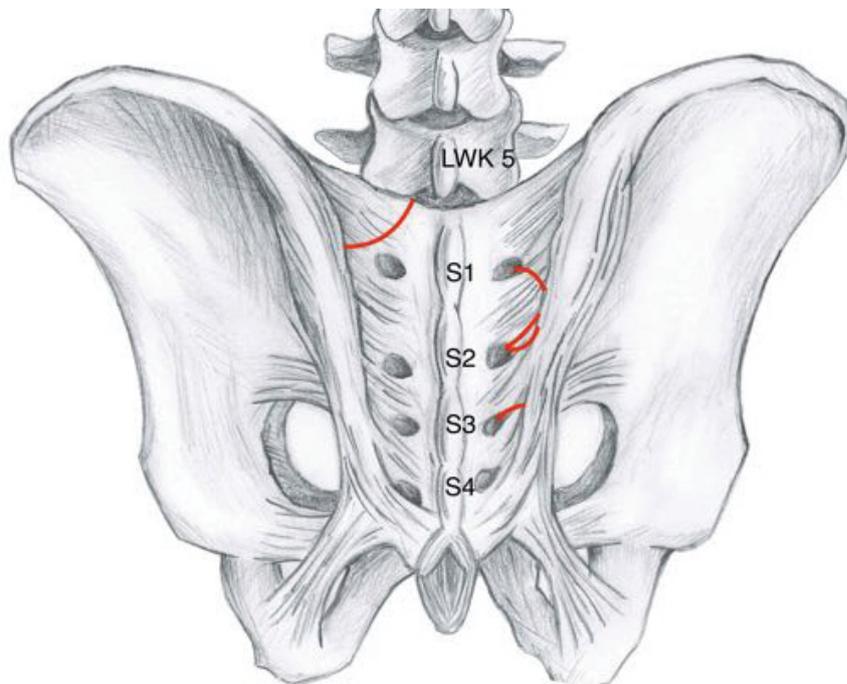
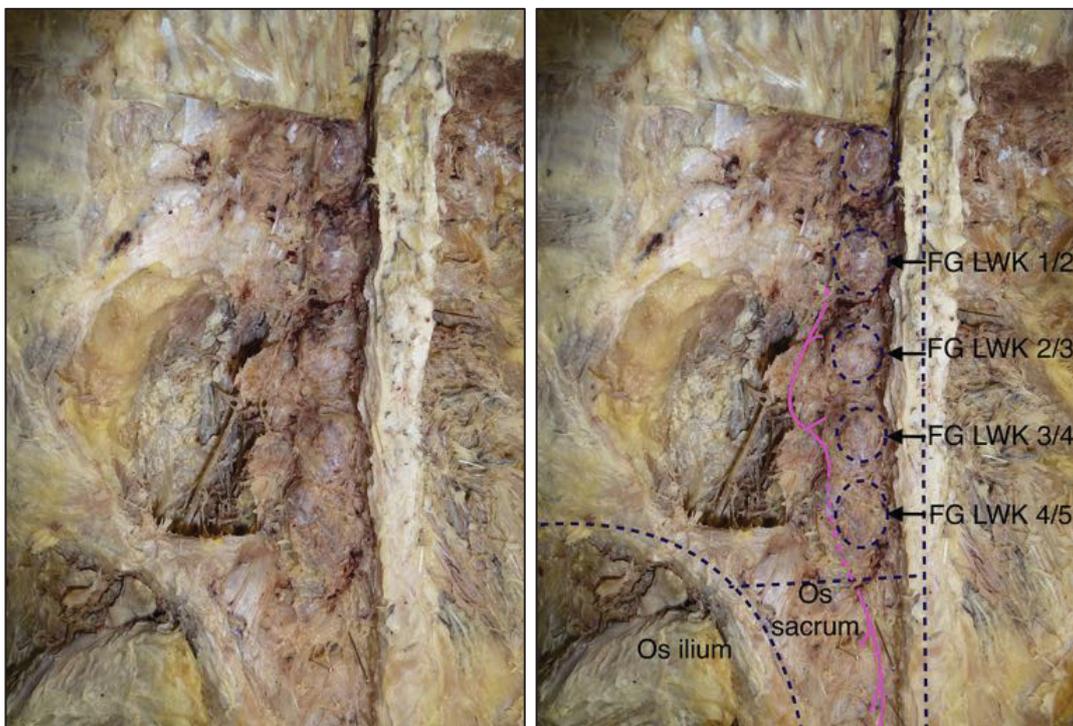


Abb. 47: Innervation des SIG bei Körperspender 87/13. Auf der linken Seite zeigt sich ein Nerv (rot) aus L5 zum SIG, während rechts Nerven (rot) aus S1 bis S3 sichtbar sind. Schematische Zeichnung.

6.7 Körperspender 81/12

Im Rahmen dieser Untersuchung zeigte sich bei einem Körperspender auf der linken Seite ein ca. 1 mm dicker Ramus medialis oder intermedialis, der aus dem zweiten, lumbalen Spinalganglion austrat. Er zog über die Hinterfläche der Processus costales der nachfolgenden Wirbel nach kaudal zum Kreuzbein. Dabei nahm der Nerv in seinem Verlauf aus jedem kaudal liegenden Segment bis S2 weitere Nervenfasern auf, sodass ein Nervengeflecht von L2 bis S2 gebildet wurde. Äste dieses Nervengeflechtes zogen in die dorsalen Neuroforamina S1 und S2, aus denen Nerven direkt in den Gelenkspalt des SIG verliefen. An die umliegende Muskulatur wurden keine Fasern abgegeben.

Zwischen dem vierten Lumbalwirbel und dem Kreuzbein waren bei diesem Körperspender die Räume zwischen den Wirbelkörpern durch Osteophyten ausgefüllt. Der gefundene Nerv zog auf Höhe des Proc. costalis des vierten Lumbalwirbels in diese hinein. Knapp oberhalb des Eingangs in den Sakralkanal trat er wieder aus den Osteophyten heraus und verlief danach zwischen der Crista mediana sacralis und den Foramina sacralis posteriores nach kaudal (siehe zum genauen Verlauf auch Kap. 3.1 sowie Abb. 48-53).



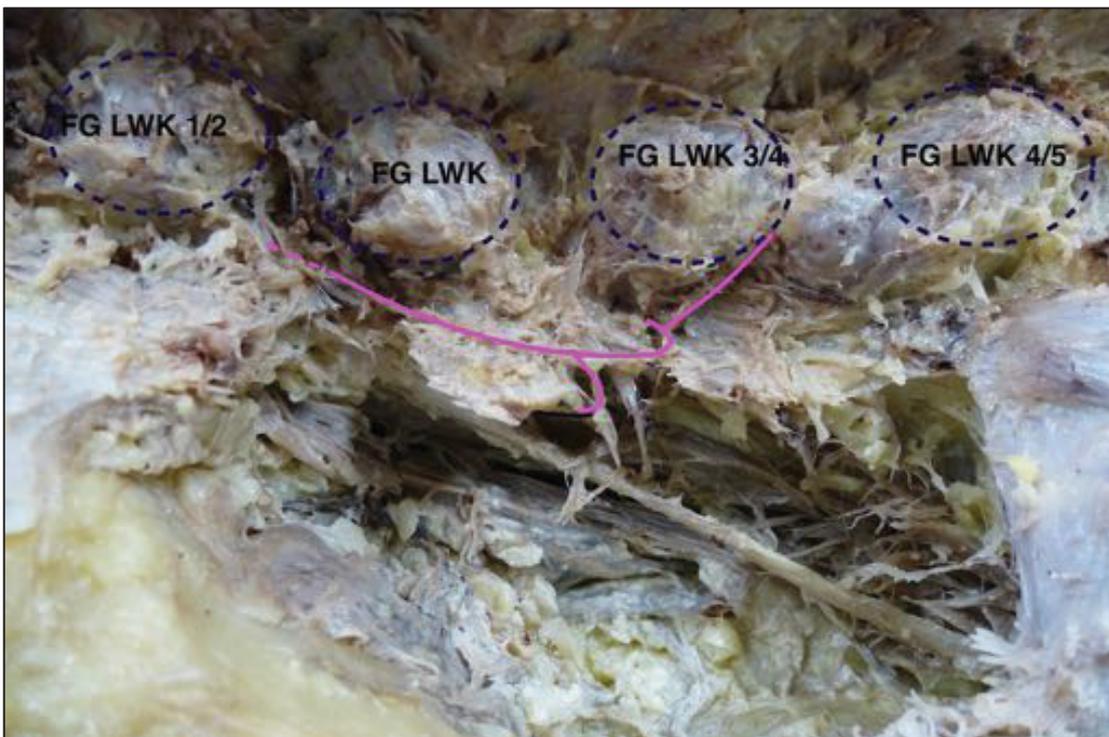
a:

b:

Abb. 48: Aufsicht auf die lumbale Wirbelsäule und lumbosakralen Übergang mit dem Nerv aus L2 bis S2. a: Nicht bearbeitetes Foto. b: bearbeitetes Foto. Anatomische Leitstrukturen wie bspw. die Facettengelenke (FG) wurden zur besseren Orientierung nachgezeichnet und beschriftet. Der gefundene Nerv wurde pink nachgezeichnet; die gestrichelte pinkfarbene Nachzeichnung des Nerven zeigt den Verlauf, der aus diesem Bild nicht sichtbar ist, jedoch aus anderen Fotos hervorging. Die Stecknadeln dienten der Markierung der SIG- versorgenden Nerven aus S1 bis S5.



a



b

Abb. 49: Seitliche Sicht auf die lumbale Wirbelsäule und lumbosakralen Übergang mit dem Nerv aus L2 bis S2. a: Unbearbeitetes Foto. b: Bearbeitetes Foto mit Nachzeichnung und Beschriftung anatomische Leitstrukturen wie bspw. die Facettengelenke (FG). Der gefundene Nerv wurde pink nachgezeichnet.

Im Bereich des Os sacrum zeigte sich neben der oben genannten Nervenverbindung aus L2 bis S2 eine Versorgung des SIG aus Ästen von S1 bis S5. Zusätzlich zeigte sich ein Ast aus einem kokzygealen Segment (Co1), der eine Verbindung mit einem Ast aus S5 aufwies (siehe hierzu Abb. 50).

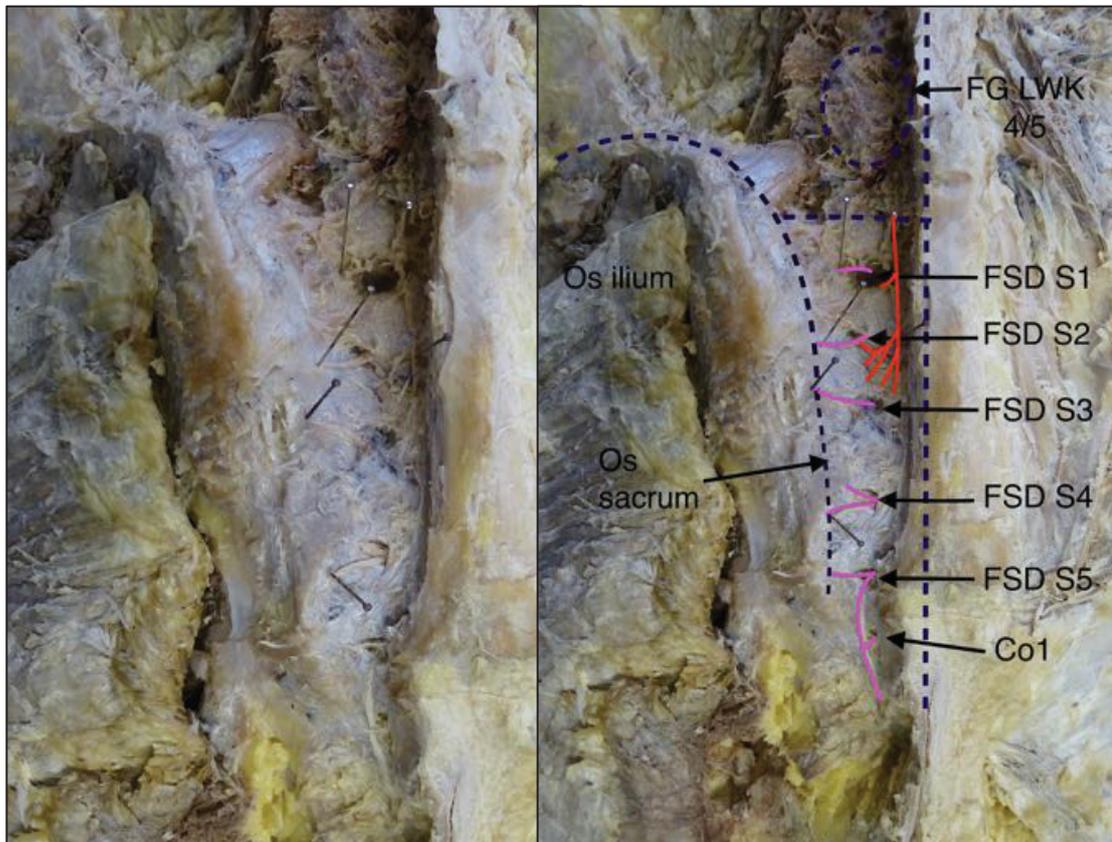
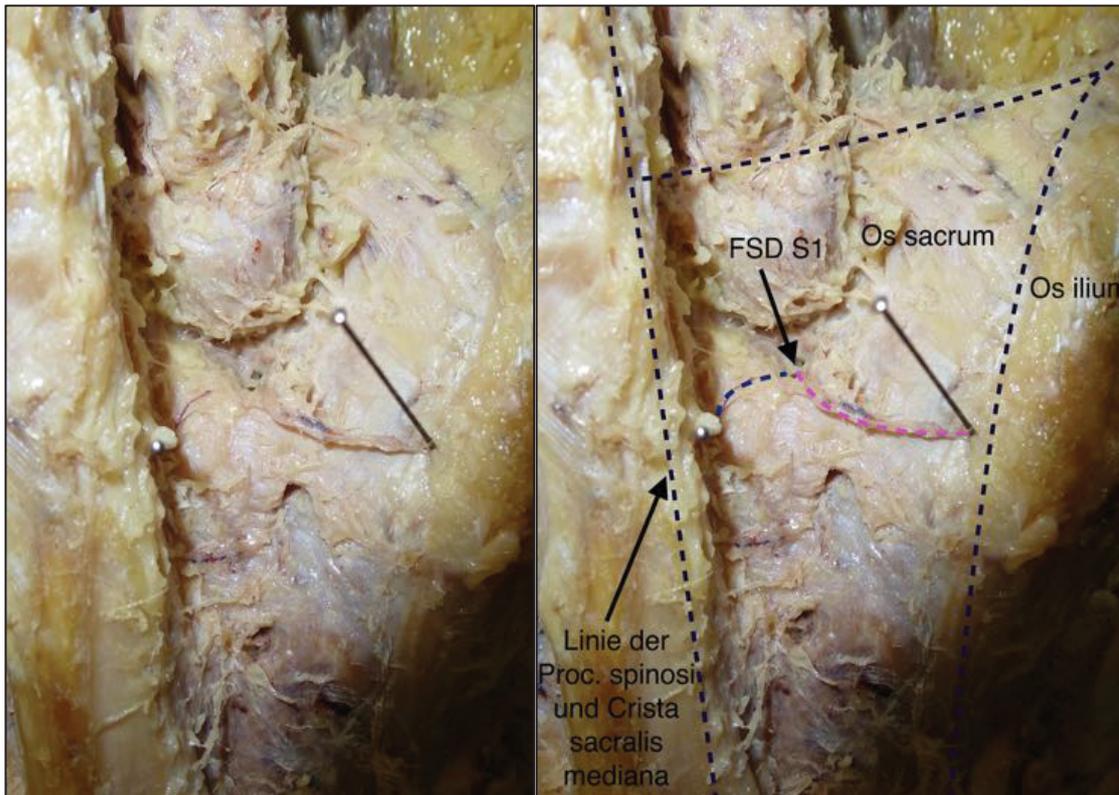


Abb. 50: Aufsicht auf das linke SIG mit dem Nerv aus L2 bis S2 sowie dorsalen Nervenästen aus S1 bis S5, die in den Gelenkspalt des SIG zogen. a: Nicht bearbeitetes Foto. **b:** Bearbeitetes Foto. Nachzeichnung und Beschriftung anatomische Leitstrukturen wie bspw. der Facettengelenke (FG). Die gefundenen Nerven, die das SIG aus S1 bis S5 versorgen, wurden pink nachgezeichnet. Zusätzlich wurde ein Nerv aus einem kokzygealen Segment (Co1) pink eingezeichnet, der mit einem Ast aus S5 verbunden war. Der Nerv aus L2 bis S2 ist rot nachgezeichnet, um diesen abzugrenzen. Die Stecknadeln dienten der Makierung der SIG-versorgenden Nerven aus S1 bis S5.
FSD: Foramina sacralia dorsales

Auf der rechten Körperhälfte zeigte sich ein dorsaler Nerv aus S1, der das SIG versorgte (siehe hierzu Abb. 51).



a

b

Abb. 51: Aufsicht auf das rechte SIG mit dem Nerv aus S1, der in den Gelenkspalt des SIG zog. a: Nicht bearbeitetes Foto. **b:** Bearbeitetes Foto. Nachzeichnung und Beschriftung anatomische Leitstrukturen wie bspw. der Facettengelenke (FG). Der gefundenen Nerven aus S1, der das SIG versorgte, wurde pink nachgezeichnet. Ein weiterer, nicht das SIG-versorgende Nerv wurde mittelblau dargestellt. Die verwendeten Stecknadeln dienten der Markierung der Nerven aus S1.

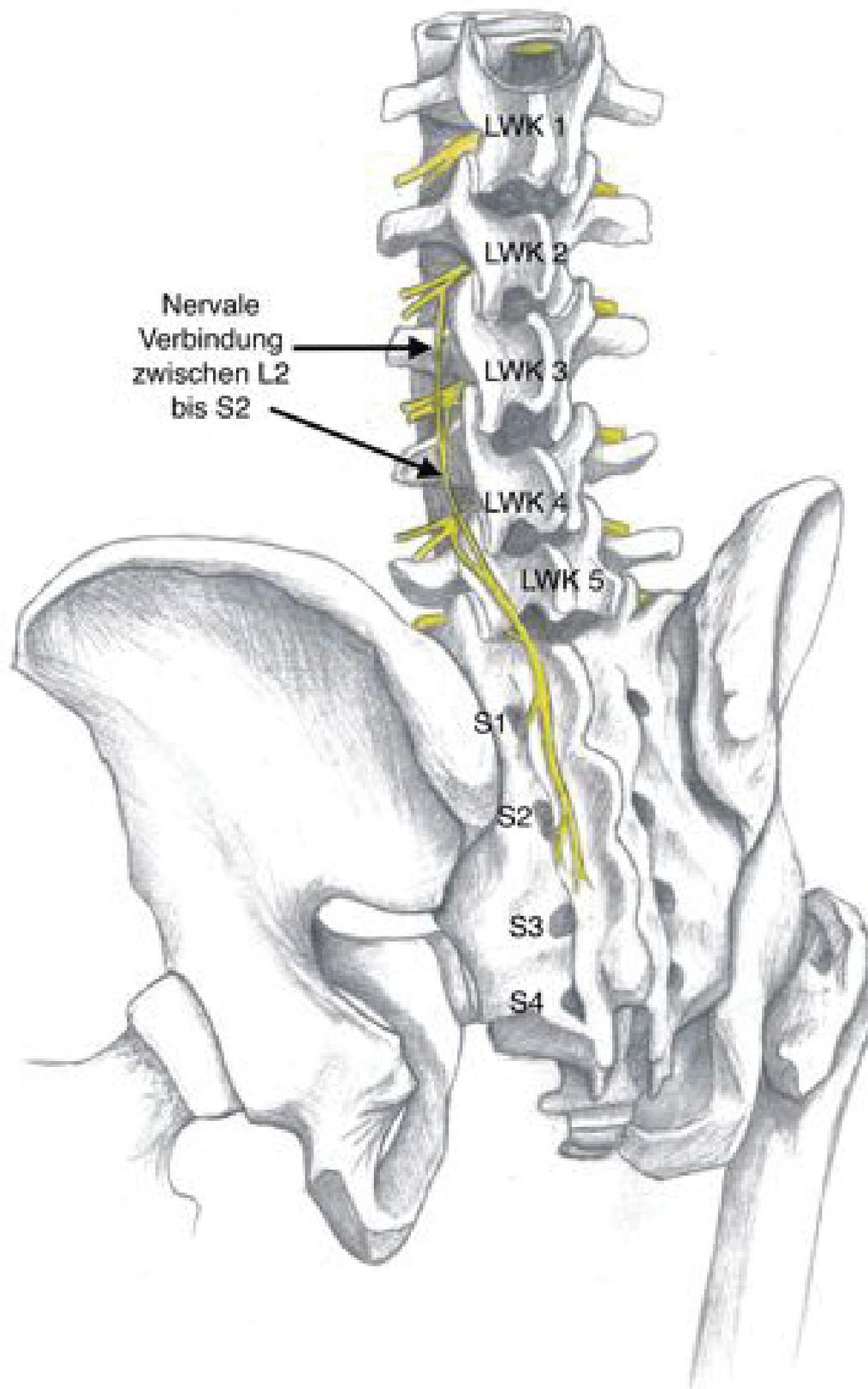


Abb. 52: Zeichnung der nervalen Verbindung von L2 bis S2. Ansicht von dorsolateral. Schematische Zeichnung.

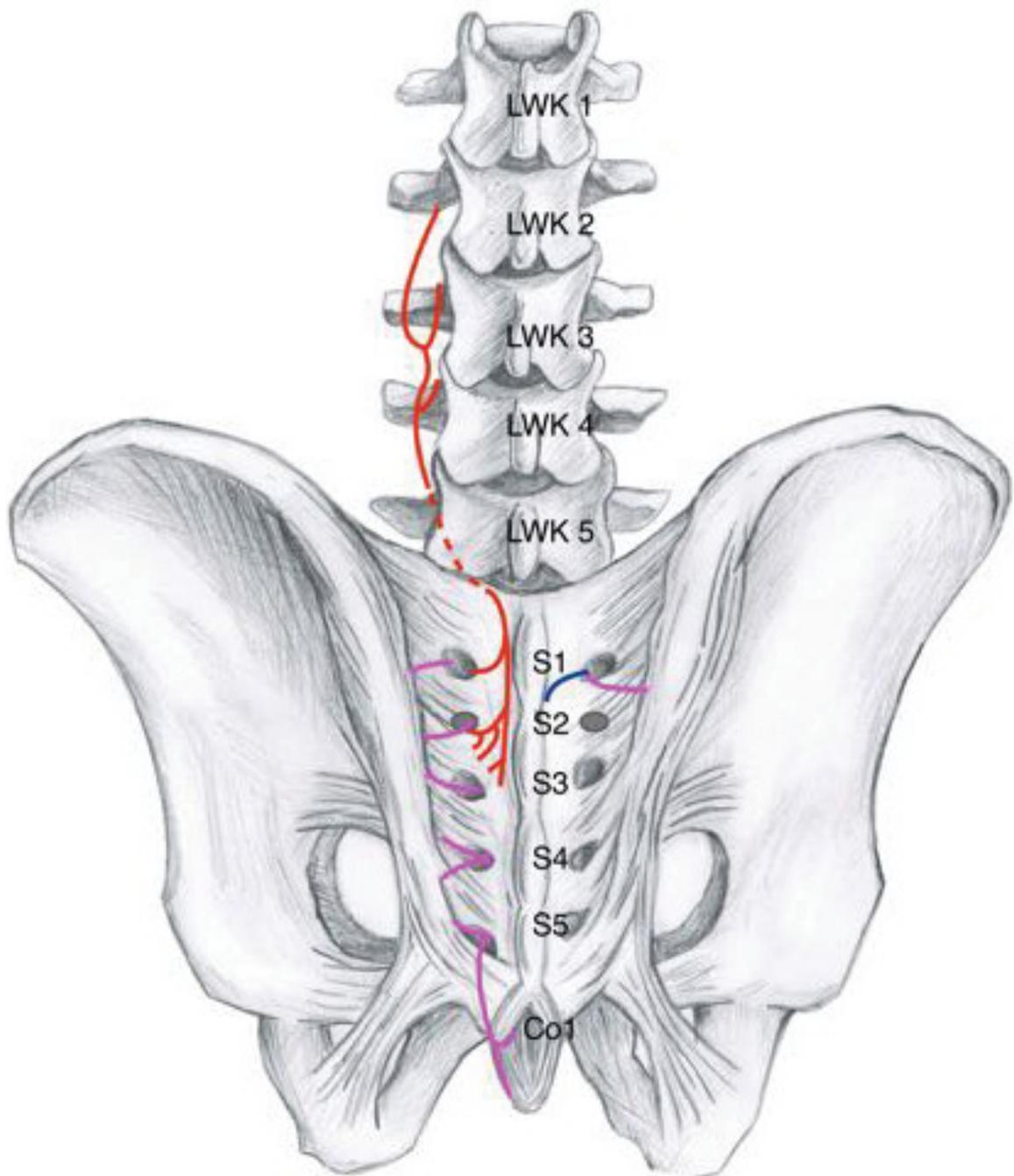


Abb. 53: Übersichtszzeichnung aller gefundenen Nerven des vorliegenden Körperspenders. Die nervale Verbindung zwischen den Segmenten L2 bis S2 wurde dabei rot hervorgehoben. Die Nerven aus den Segmenten S1 bis Co1 sind pink markiert, während auf der rechten Körperhälfte ein gefundener Nerv aus S1 zum Bandapparat des Kreuzbeines blau dargestellt wurde. Schematische Zeichnung.

6.8 Körperspender 09/13

Bei dem vorliegenden Körperspender zeigte sich auf der linken Seite eine dorsale Versorgung des SIG aus S1 bis S3, während auf der rechten Seite lediglich aus S1 ein dorsaler Nerv zum SIG gefunden werden konnte.

Der Nerv aus S1 auf der rechten Seite stellte dabei einen Nervus clunium medius dar, der nach Durchsetzen des Bandapparates sowie Abgabe kleiner Äste an Bänder und den Gelenkspalt des SIG die Ursprungssehnen des M. gluteus superior durchsetzte und in das subkutane Fettgewebe weiterzog (siehe hierzu Abb. 54-56).

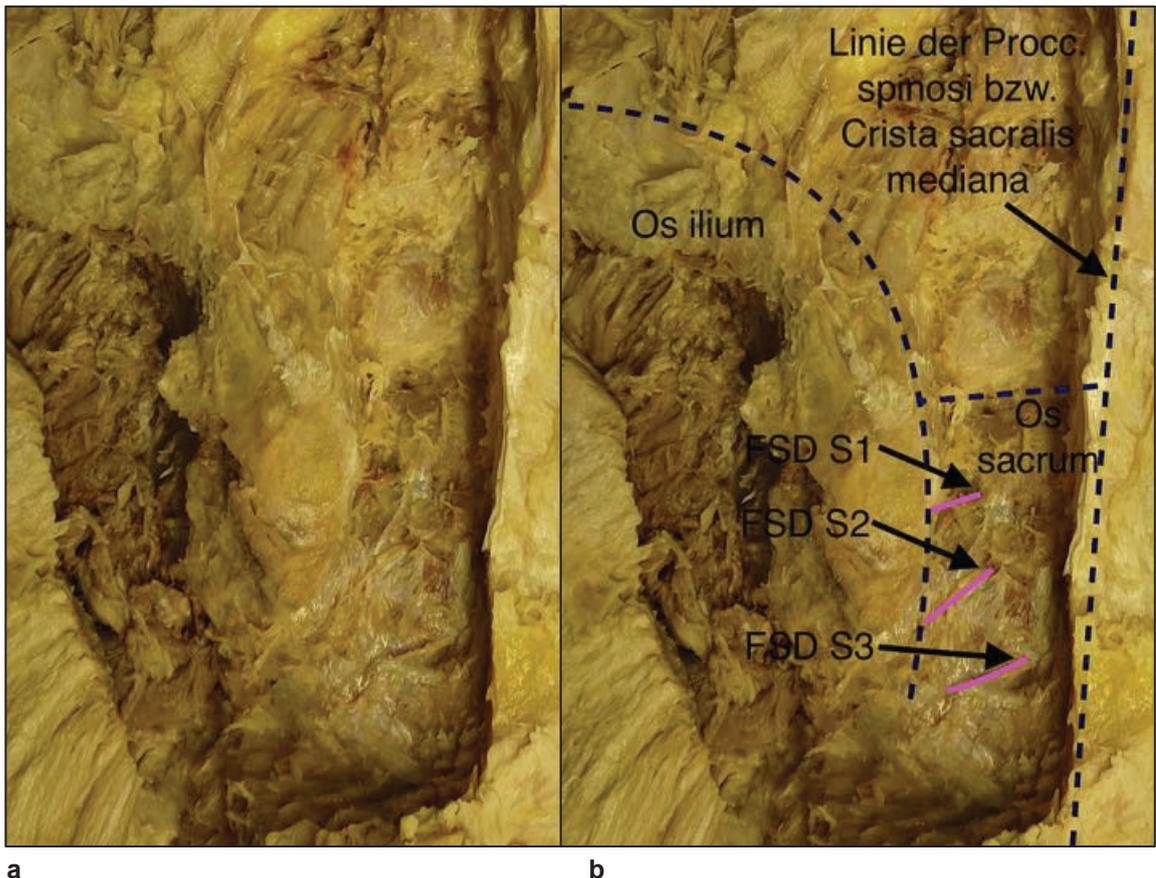


Abb. 54: Linkes SIG, das durch dorsalen Nerven aus S1 bis S3 versorgt wird. a: Nicht bearbeitetes Foto. **b:** Bearbeitetes Foto. Anatomische Leitstrukturen wurden zur besseren Orientierung nachgezeichnet und beschriftet; die gefundenen Nerven wurden pink nachgezeichnet. FSD :Foramina sacralia dorsales.

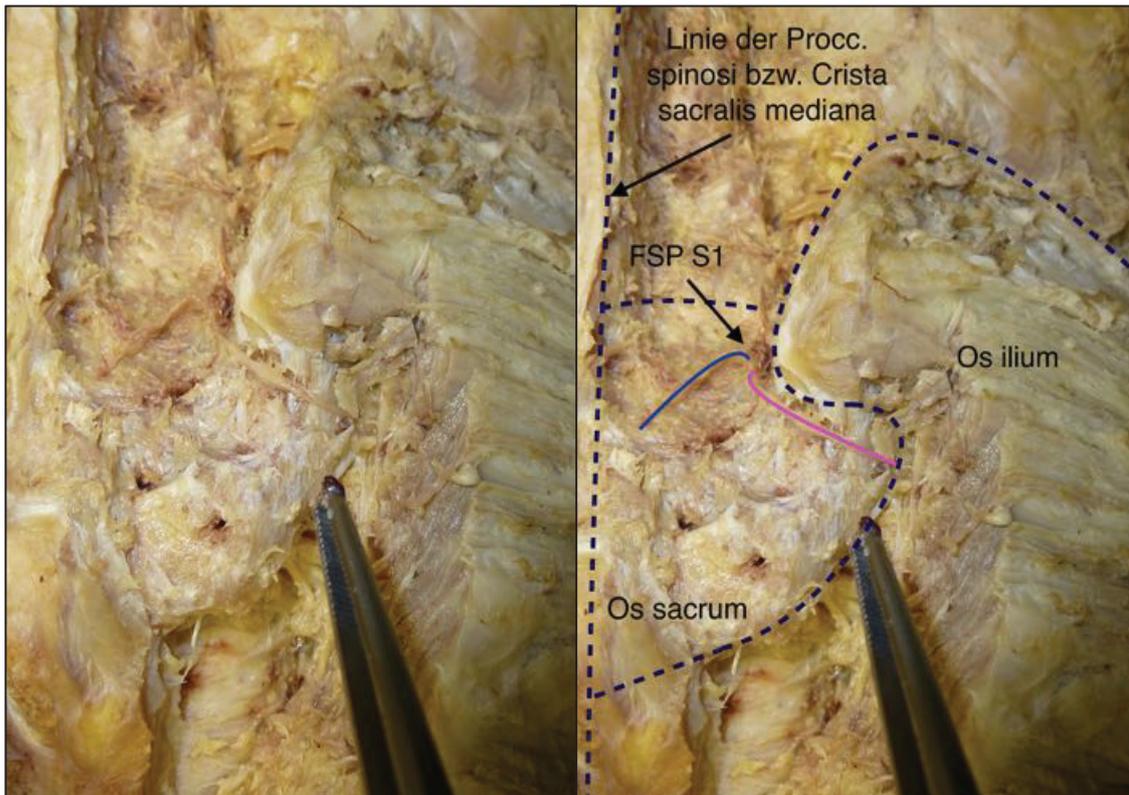


Abb. 55: Rechtes SIG mit versorgendem dorsalen Ast aus S1. a: Nicht bearbeitetes Foto. b: bearbeitetes Foto. Anatomische Leitstrukturen wurden zur besseren Orientierung nachgezeichnet und beschriftet; der gefundene Nerv wurde pink nachgezeichnet. Ein zweiter Nerv zur Versorgung des Bindegewebes ist mittelblau dargestellt. FSP: Foramen sacralis posterius.

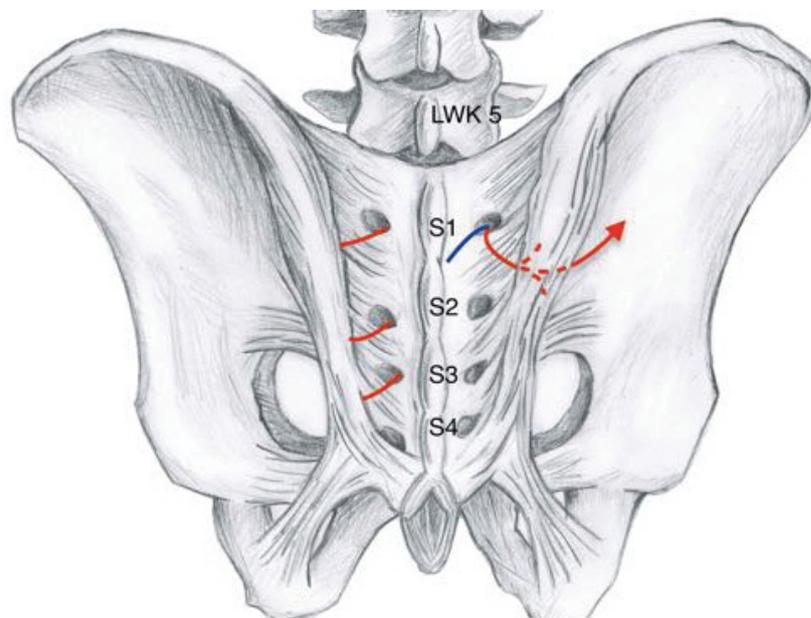


Abb. 56: Innervation des SIG des Körperpenders 09/13. Auf der linken Seite zeigt sich eine Versorgung des SIG aus S1 bis S3, während auf der rechten Seite in ein Nerv aus S1 mit einer Pfeilspitze abgebildet ist, der sich als Nervus clunium medius darstellt. Im dem Bereich, wo er das Lig. sacroiliacum dorsale longum durchzieht, wurde sein Verlauf gestrichelt eingezeichnet. In diesem Bereich gab er auch die ebenfalls gestrichelt dargestellten Abgänge an das SIG und den Bandapparat ab. Schematische Zeichnung.

6.9 Körperspender 77/11

Bei diesem Körperspender wurde eine lumbale Versorgung des SIG aus dem dritten Lumbalsegment gefunden. Der dorsale Nerv zog aus dem Ganglion L3 hinaus, gelangte in einem Bogen über das Periost des Proc. articularis. superior des dritten Lendenwirbels und zog anschließend nach kaudal zum Gelenkspalt des SIG (siehe den genauen Verlauf auch in Kap. 1.3.1. Versorgung aus L3 sowie Abb. 57-58).

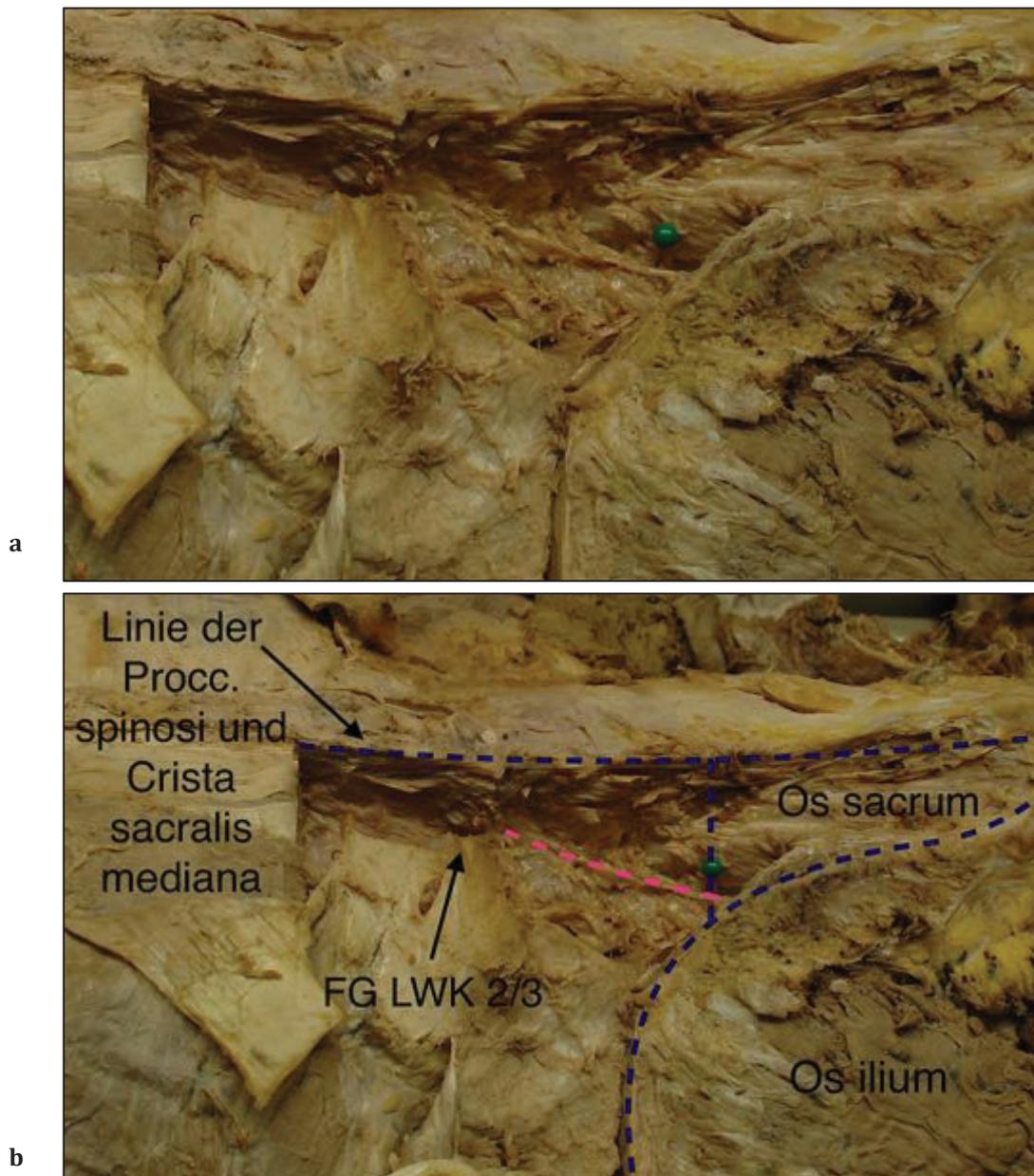


Abb. 57: Seitliche Sicht auf die lumbale Wirbelsäule und lumbosakralen Übergang mit dem Nerv aus L3. a: Unbearbeitetes Foto. b: Bearbeitetes Foto mit Nachzeichnung und Beschriftung anatomische Leitstrukturen wie bspw. die Facettengelenke (FG). Der gefundene Nerv wurde pink nachgezeichnet. Die grüne Stecknadel markiert das Promontorium des SIG. Schematische Zeichnung.

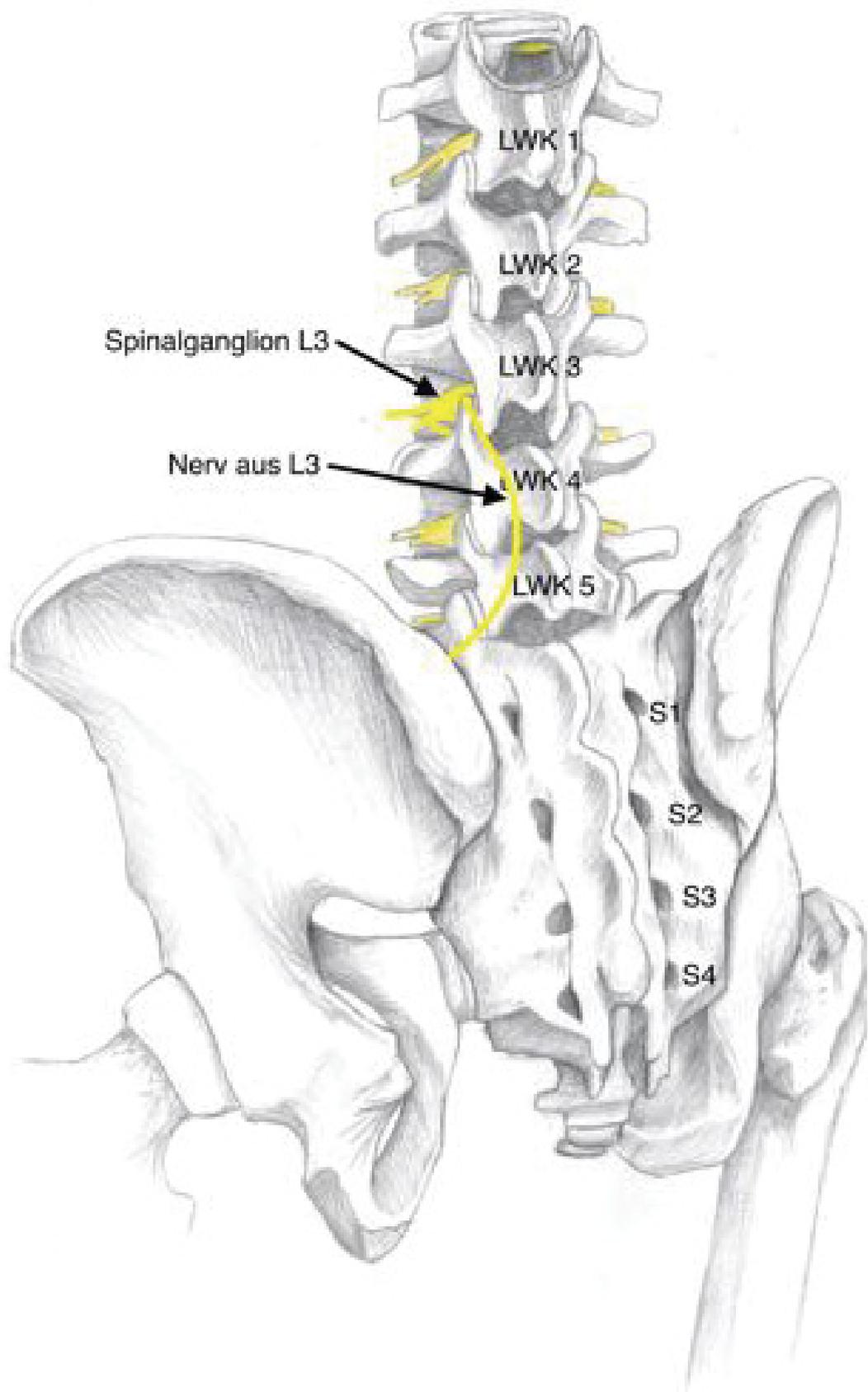
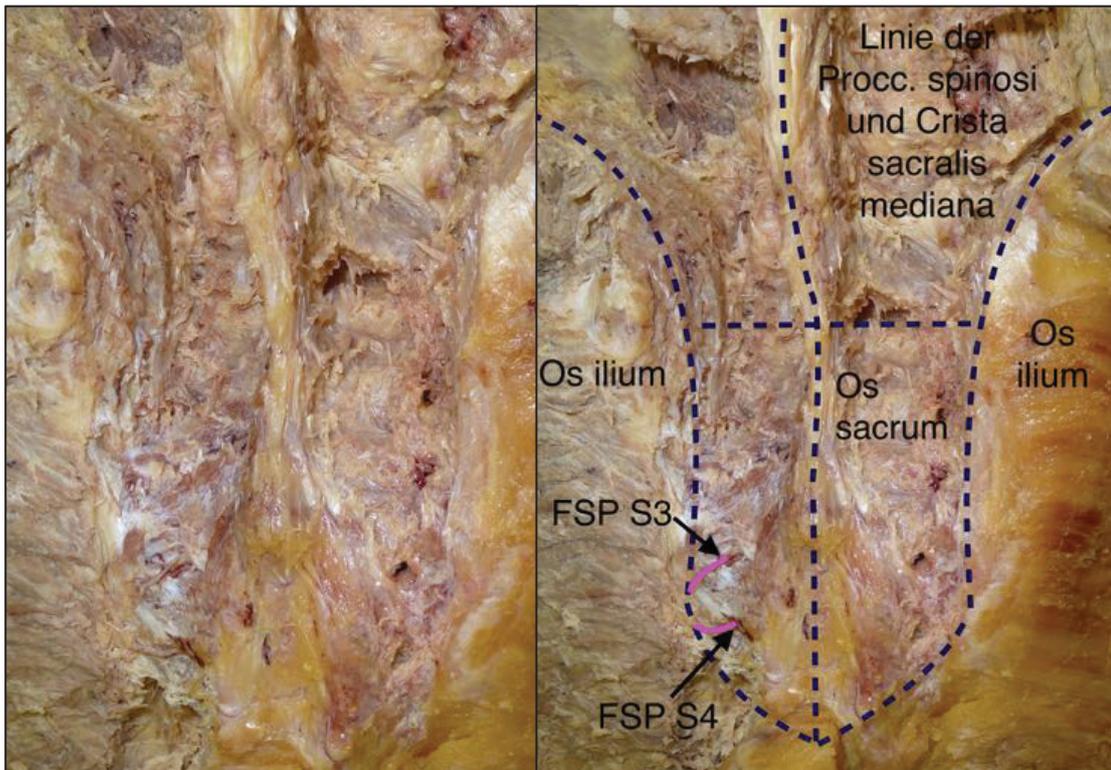


Abb. 58: Zeichnung des gefundenen Nervs aus L3 von dorsolateral. Schematische Zeichnung.

6.10 Körperspender 10/15

Bei diesem Körperspender könnte eine dorsale Innervation des SIG aus S3 und S4 gezeigt werden. Wie auf den dazugehörigen Abbildungen ersichtlich wies der Körperspender eine starke Skoliose im Bereich den Lendenwirbelsäule auf



(siehe hierzu Abb. 59-60).

a

b

Abb. 59: Aufsicht auf das dorsale Becken mit dargestellter dorsaler Innervation des SIG aus S3 und S4. a: Nicht bearbeitetes Foto. b: Bearbeitetes Foto; Nachzeichnung und Beschriftung anatomische Leitstrukturen wie der dorsalen Neuroforamina (FSP) Facettengelenke

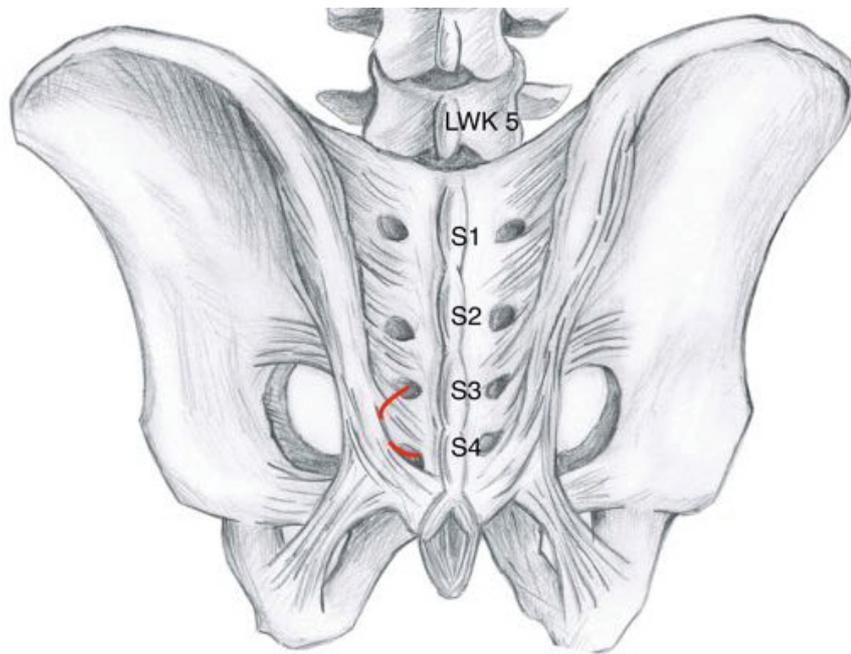


Abb. 60: Zeichnung der Innervation des SIG bei Körperspender 10/15. Es fand dabei eine Versorgung aus dorsalen Nerven (rot) aus S3 und S4 statt. Schematische Zeichnung.

7. Anhang II: Posterpräsentationen

7.1 Posterpräsentation auf dem 9th International Congress of Clinical and Applied Anatomy (ISCAA) in Innsbruck (2017)

Abstract ISCAA 2017

The Dorsal Innervation Of The Sacroiliac Joint

Purpose In spite of high prevalence of sacroiliac pain, the innervation of the Sacroiliac Joint (SIJ) is still marginally investigated. The present study focused on the nerve supply of its dorsal ligamentous structures as a major source of pain to reevaluate the common approaches for injection.

Methods 17 SIJ from formaldehyde-fixed adult human cadavers (aged 61 to 101 years, 3 females, 7 males) were dissected from the twelfth thoracic vertebra to the coccyx. Derivation and bony landmarks of traced dorsal nerves targeting the SIJ were identified.

Results Our investigation showed a dorsal SIJ innervation with a vast varying rate from the spinal segments L2 to S5. Moreover, no preparation showed a uniform innervation. Not only existed large interindividual differences, there have also been intraindividual side differences. The left side was more intense innervated as the right one. Additionally, in a few cadavers the nerves observed had to circumvent exostoses of lumbar facet joint.

Conclusion We showed for the first time an innervation of the SIJ from the upper lumbar segments beginning at L2 down to L4. In the scientific literature, we only found paper about a dorsal innervation from L5 to S4. By our observation, it is conceivable that an upper lumbar nerve irritation refers pain to the sacroiliac joint (nerve compression). Therefore, a higher lumbar course of SIJ innervation might be one possible reason for the large number of therapy failure rates.

Keywords Sacroiliac joint innervation, therapy-refractory SIJ-pain, balance, Rami dorsales

Literatur: Kampsen,C.,Frankewitsch,T.,Windolf,J.Filler,T.J.,„TheDorsal Innervation Of The Sacroiliac Joint“, Posterbeitrag, 9th International Congress of Clinical and Applied Anatomy (ISCAA), Innsbruck (Österreich), 09.–12.09.2017.

7.2 Posterpräsentation auf dem Deutschen Kongress für Orthopädie und Unfallchirurgie (DKOU) in Berlin (2017)

Abstract DKOU 2017

Die Innervation des ISG, kommt der Schmerz von oben?

Fragestellung Ergeben sich aus der dezidierten Untersuchung des Ursprunges der peripheren Nerven, welche das ISG versorgen, Erkenntnisse zu Schmerzsyndromen der unteren LWS? Die Innervation des ISG ist bisher nur marginal erforscht. Aufgrund der hohen Inzidenz von unspezifischen Beschwerden des ISG von bis zu 50% bei Frauen über 70 Jahre, sind Erkenntnisse über die Innervation langfristig therapierelevant.

Methodik An zehn formalinfixierten Körperspenden zwischen 61 und 101 Jahren (70% männlich, 30% weiblich) wurde die dorsale Innervation des ISG und seines Bandapparates untersucht. An den vorhandenen Wirbelsäulen wurde der Muskel- und Bandapparat vom ersten Lendenwirbel bis zum Os coccygis präpariert. Dabei gefundene Nerven wurden makroskopisch identifiziert, zu ihren Ursprungssegmenten zurückverfolgt und mit der Literatur abgeglichen. Drei aufgefundene Nerven und die von ihnen durchsetzten Gelenkbänder wurden zudem histologisch und immunhistochemisch untersucht.

Ergebnisse und Schlussfolgerung Bei keinem der untersuchten Präparate konnte eine gleichförmige nervale Versorgung des ISG festgestellt werden. Der Nervenverlauf zeigte nicht nur zwischen den einzelnen Präparaten sondern auch intraindivuell zwischen linkem und rechtem ISG erhebliche Varianzen. Die dargestellten Nerven konnten in unterschiedlicher Häufigkeit einer Versorgungsinnervation von L2 bis S5 zugeordnet werden. Die Innervation des ISG konnte aus bis zu 9 Segmenten erfolgen. Es fand sich vor allem eine Häufung aus den lumbalen und sakralen Wirbelsegmenten

der linken Seite und aus den sakralen Segmenten der rechten Seite. Die Versorgung aus der mittleren und oberen LWS ist bis dato nicht bekannt gewesen. Bisher wurde in der Literatur die Innervation der dorsalen Nerven lediglich von L5 bis S4 postuliert. Somit weist die Innervation des ISG vermutlich die höchste Variabilität aller Gelenke auf. Diese Varianz kann die hohe Anzahl an therapieresistenten ISG-Schmerzsyndromen erklären. Aufgrund des Ursprunges in der oberen und mittleren LWS und dem daraus resultierenden Nervenverlauf können Pathologien in diesem Bereich zu Nervenreizsyndromen führen, welche dann im Sinne einer Projektion vom Patienten als ISG-Schmerz empfunden werden. Ebenso ist aufgrund der seitendifferenten Versorgung eine Präferenz der Gleichgewichts-Propriozeption zu vermuten, welche dem ISG somit eine Schlüsselrolle für das zweibeinige Gehen zuweist.

Aufgrund dieser Untersuchung zeigt erstmals eine hohe Varianz der ISG-Innervation mit bis dato unbekannter Häufung der Nervenursprünge aus der oberen und mittleren LWS. Somit ergeben sich neue Ansätze in der Therapie des ISG-Schmerzsyndromes. Bedingt durch die seitendifferente Nervenversorgung ist dem ISG eine wichtige Funktion in der Gleichgewichtspropriozeption des Zweibeiners zu zuordnen.

Literatur: Scholz,A.,Kampsen,C.,Frankewitsch,T.,Windolf,J.,Filler,T.J.,„Die Innervation des IS-Gelenks – kommt der Schmerz von oben?“, Posterbeitrag, Deutscher Kongress für Orthopädie und Unfallchirurgie (DKOU), Berlin (Deutschland), 24.-27.10.2017.