

Aus der  
Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie  
Klinikum der Ludwig-Maximilians-Universität München  
Direktor: Prof. Dr. med. Wolfgang Böcker



## **Flexible Osteosynthesen an der Symphyse**

—

### **eine biomechanische Versuchsreihe**

Dissertation

zum Erwerb des Doktorgrades der Medizin  
an der Medizinischen Fakultät der  
Ludwig-Maximilians-Universität München

vorgelegt von

Fanny Emma Schwaabe

aus

München

Jahr

2024

---

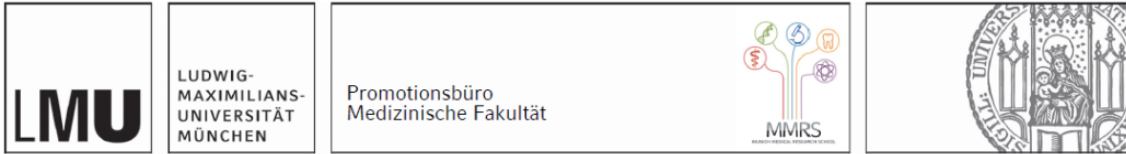
Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der  
Ludwig-Maximilians-Universität zu München

Erstes Gutachten: Prof. Dr. Wolfgang Böcker  
Zweites Gutachten: Prof. Dr. Christian Kammerlander  
Drittes Gutachten: Prof. Dr. Steffen Peldschus

Promovierter Mitbetreuer: PD Dr. Christian Kleber  
Dekan: Prof. Dr. med. Thomas Gudermann

Tag der mündlichen Prüfung: 13.05.2024

## Affidavit



### Eidesstattliche Versicherung

Schwaabe, Fanny Emma

Name, Vorname

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Titel:

### **Flexible Osteosynthesen an der Symphyse**

–

### **eine biomechanische Versuchsreihe**

selbständig verfasst, mich außer der angegebenen keiner weiteren Hilfsmittel bedient und alle Erkenntnisse, die aus dem Schrifttum ganz oder annähernd übernommen sind, als solche kenntlich gemacht und nach ihrer Herkunft unter Bezeichnung der Fundstelle einzeln nachgewiesen habe.

Ich erkläre des Weiteren, dass die hier vorgelegte Dissertation nicht in gleicher oder in ähnlicher Form bei einer anderen Stelle zur Erlangung eines akademischen Grades eingereicht wurde.

München, 25.05.24

Ort, Datum

Fanny Emma Schwaabe

Unterschrift Doktorandin

# Inhaltsverzeichnis

<b>Affidavit .....</b>	<b>3</b>
<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>4</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>5</b>
<b>Publikationsliste .....</b>	<b>6</b>
<b>1. Beitrag zu den Veröffentlichungen .....</b>	<b>8</b>
1.1 Beitrag zu Paper I.....	8
1.2 Beitrag zu Paper II.....	9
1.3 Beitrag zu Paper III.....	10
<b>2. Einleitung .....</b>	<b>11</b>
2.1 Hintergrund, Problematik und übergreifende Zielsetzung .....	11
2.2 Zielsetzung und Fragestellung Paper I.....	16
2.3 Zielsetzung und Fragestellung Paper II.....	17
2.4 Zielsetzung und Fragestellung Paper III.....	18
<b>3. Zusammenfassung.....</b>	<b>19</b>
<b>4. Abstract (English): .....</b>	<b>26</b>
<b>5. Paper I .....</b>	<b>31</b>
<b>6. Paper II .....</b>	<b>32</b>
<b>7. Paper III .....</b>	<b>33</b>
<b>8. Literaturverzeichnis .....</b>	<b>34</b>
<b>Danksagung .....</b>	<b>37</b>

## Abkürzungsverzeichnis

Abb.: Abbildung

AO: Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen

APC: Anterior Posterior Compression

BMD: Bone mineral density

DC: Dynamic compression

FFP: Fragility fractures of the pelvic ring

LC: Lateral Compression

ORIF: Offene Reposition und interne Fixation

OTA: Orthopaedic Trauma Association

QCT: Quantitative Computertomographie

VKB: Vorderes Kreuzband

VS: Vertical Shear Verletzung

### Hinweis:

Die in dieser Doktorarbeit verwendeten Personenbezeichnungen wie beispielweise „Patienten“ beziehen sich immer gleichermaßen auf alle Geschlechter. Auf eine geschlechtsneutrale Differenzierung wird zugunsten einer besseren Lesbarkeit verzichtet.

## Publikationsliste

Folgende Publikationen sind Bestandteil dieser kumulativen Dissertation:

***“Novel minimally invasive tape suture osteosynthesis for instabilities of the pubic symphysis: A biomechanical study.”***

Adrian Cavalcanti Kußmaul, Fanny Schwaabe, Manuel Kistler, Clara Gennen, Sebastian Andreß, Christopher A Becker, Wolfgang Böcker, Axel Greiner.

Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery (2021),

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/emedien.ub.uni-muenchen.de/34052913/>

***“How relevant is lumbar bone mineral density for the stability of symphyseal implants? A biomechanical cadaver study”***

Fanny Schwaabe, Johannes Gleich, Christoph Linhart, Alexander Martin Keppler, Matthias Woiscinski, Christian Kammerlander, Axel Greiner, Wolfgang Böcker, Adrian Cavalcanti Kußmaul

European Journal of Trauma and Emergency Surgery (2021),

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34881391/>

***“Tape suture constructs for instabilities of the pubic symphysis: is the idea of motion preservation a suitable treatment option? A cadaver study”***

Adrian Cavalcanti Kußmaul, Fanny Schwaabe, Manuel Kistler, Maximilian Jörgens, Korbinian F Schreyer, Axel Greiner, Wolfgang Böcker, Christopher A Becker

Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery (2022),

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/emedien.ub.uni-muenchen.de/35831608/>

**Weitere Publikationen (nicht Bestandteil der Dissertation):**

***“Does augmentation increase the pull-out force of symphyseal screws? A biomechanical cadaver study”***

Adrian Cavalcanti Kußmaul, Fanny Schwaabe, Christopher A Becker, Christian Kleber, Christoph Linhart, Christoph Thorwächter, Bianka Rubenbauer, Wolfgang Böcker, Axel Greiner

European Journal of Trauma & Emergency Surgery (2022),

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/emedien.ub.uni-muenchen.de/35364692/>

**Kongressbeiträge:**

***“Tape suture constructs for instabilities of the pubic symphysis: is the idea of motion preservation a suitable treatment option? A cadaver study”***

Adrian Cavalcanti Kußmaul, Fanny Schwaabe, Manuel Kistler, Maximilian Jörgens, Korbinian F Schreyer, Axel Greiner, Wolfgang Böcker, Christopher A Becker  
Deutscher Kongress für Orthopädie und Unfallchirurgie (2022)

***“Does augmentation increase the pull-out force of symphyseal screws? A biomechanical cadaver study”***

Adrian Cavalcanti Kußmaul, Fanny Schwaabe, Christopher A Becker, Christian Kleber, Christoph Linhart, Christoph Thorwächter, Bianka Rubenbauer, Wolfgang Böcker, Axel Greiner  
Deutscher Kongress für Orthopädie und Unfallchirurgie (2022)

***“Novel minimally invasive tape suture osteosynthesis for instabilities of the pubic symphysis: A biomechanical study.”***

A. Cavalcanti Kußmaul, F. Schwaabe, C. Gennen, C. Linhart, A. Greiner, M. Kistler, W. Böcker, C. Becker  
69. Jahrestagung der VSOU e.V. (2021)

# 1. Beitrag zu den Veröffentlichungen

## 1.1 Beitrag zu Paper I

*“Novel minimally invasive tape suture osteosynthesis for instabilities of the pubic symphysis: a biomechanical study.” [1]*

Grundlegend erarbeitete ich zunächst gemeinsam mit Dr. med. Adrian Cavalcanti Kußmaul anhand einer ausführlichen Literaturrecherche die wissenschaftliche Problematik, die dieser Dissertation zugrunde liegt. Anschließend formulierten wir die konkreten Fragestellungen und die damit einhergehende Zielsetzung hinsichtlich dieses Forschungsprojektes. Nach erfolgreicher Vorstellung des Projektes an Prof. Dr. Böcker und Prof. Dr. Kammerlander erfolgte eine erneute, ausführliche Literaturrecherche zur chirurgischen Versorgung von Instabilitäten der menschlichen Symphyse sowie eine Recherche zur Testung verschiedener Osteosyntheseverfahren. Anschließend fertigte ich dahingehend die ersten Skizzen für den Versuchsaufbau an. Diese Vorschläge wurden in Rücksprache mit Dr. med. Adrian Cavalcanti Kußmaul und Christoph Thorwächter M. Eng., Ingenieur des biomechanischen Labors der LMU, optimiert und finalisiert.

Nach Instruktion durch Dr. med. Adrian Cavalcanti Kußmaul wurden die synthetischen Knochenmodelle (Model: Full Pelvis 1301, Sawbone<sup>®</sup>; Pacific Research Laboratories, Vashon, WA, USA) durch mich für die Versuche vorbereitet. Diese Vorbereitungen bestanden aus der Isolierung des vorderen Beckenringes, gefolgt von der Frakturierung der Modelle entsprechend des Versuchsprotokolls und zuletzt der Versorgung mittels der zu testenden Osteosynthesen.

Anschließend wurde ich detailliert in die Bedienung der Testmaschinen durch Manuel Kistler M. Eng, ebenfalls Ingenieur des biomechanischen Labors der LMU München, eingewiesen und konnte folglich eigenständig mit gelegentlichen Rücksprachen die Testungen der synthetischen Beckenmodelle durchführen.

Die generierten Daten wurden nach Abschluss der Versuchsreihe mit dem Programm Microsoft<sup>®</sup> Excel (für Mac Version 16.66) erfasst. Die statistische Auswertung erfolgte gemeinsam mit den Kollegen der Arbeitsgruppe für Becken- und Wirbelsäulenchirurgie der LMU München mit dem Programm IBM SPSS Statistics (Windows, Version 26.0, IBM Corp., Armonk, NY, USA). Anschließend nahm ich eine erste Interpretation der Daten vor, welche dann ebenfalls mit den Kollegen der Arbeitsgruppe für Becken- und Wirbelsäulenchirurgie, insbesondere gemeinsam mit Dr. med. Adrian Cavalcanti Kußmaul, besprochen wurden.



Zuletzt verfasste ich einen ersten Entwurf des Manuskriptes, welcher dann durch die Koautoren überarbeitet und angepasst wurde. Nach Einreichung und als Teil des Review-Verfahrens verbesserte ich die entsprechend geforderten Änderungen im Austausch mit den anderen Autoren.

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um eine Ko-Autorenschaft.

## 1.2 Beitrag zu Paper II

*“Tape suture constructs for instabilities of the pubic symphysis: is the idea of motion preservation a suitable treatment option? A cadaver study” [2]*

Nach erfolgreichem Abschluss der Versuche hinsichtlich der Evaluation von flexiblen Osteosynthesen an synthetischen Knochenmodellen sollte darauf aufbauend in dieser Veröffentlichung die Durchführbarkeit dieser Methode an Leichenpräparaten getestet werden.

Hierzu wurde zunächst der vorherige Versuchsaufbau durch Dr. med. Adrian Cavalcanti Kußmaul, die Ingenieure des biomechanischen Instituts der LMU, hier insbesondere durch PD Dr. Dipl.-Ing. (FH) Matthias Woiczinski und Manuel Kistler M. Eng., und durch mich angepasst und optimiert.

Nach Genehmigung des Ethikantrages (Nr. 210-16) durch das Ethikkomitee der LMU München und der entsprechenden Einwilligung der Angehörigen wurden die Leichenpräparate vom rechtsmedizinischen Institut bereitgestellt.

Anschließend führte ich die Versuche mit vereinzelt technischer Unterstützung von Manuel Kistler durch. Die Auswertung der durch die Versuche generierten Daten erfolgte erneut durch mich mit dem Programm Microsoft® Excel (für Mac Version 16.66). Die statistische Auswertung wurde wieder mit dem Programm IBM SPSS Statistics (Windows, Version 26.0, IBM Corp., Armonk, NY, USA) in Kooperation mit den Mitgliedern der Arbeitsgruppe für Becken- und Wirbelsäulenchirurgie durchgeführt.

Nach Verfassen eines ersten Manuskriptentwurfs durch mich schloss sich eine Überarbeitung durch Dr. med. Adrian Cavalcanti Kußmaul an. Die finale Version und letztlich die Umsetzung geforderter Überarbeitungen nach ursprünglicher Einreichung wurde unter Mitwirkung und in enger Rücksprache mit den Koautoren angefertigt und umgesetzt.

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich ebenfalls um eine Ko-Autorenschaft.

### 1.3 Beitrag zu Paper III

*“How relevant is lumbar bone mineral density for the stability of symphyseal implants? A biomechanical cadaver study.” [3]*

Nach eingehender Recherche zu in der Literatur beschriebenen Ausriss-Versuchen erarbeitete ich auch hier zunächst die wissenschaftliche Grundlage meiner Erstautorenschaft und leitete die daraus entstehende Fragestellung ab. Es folgte die Besprechung und Konkretisierung dieser Versuchsreihe in der Arbeitsgruppe für Becken- und Wirbelsäulenchirurgie. Nach erfolgreicher Rücksprache mit Prof. Dr. Böcker und Prof. Dr. Kammerlander plante ich, basierend auf meinem angeeigneten biomechanischen Wissen aus den Vorversuchen, gemeinsam mit den Ingenieuren des biomechanischen Labors der LMU den entsprechenden Versuchsaufbau. Zuletzt wurde dieser durch Testdurchläufe angepasst und optimiert.

Nach Genehmigung des Ethikantrages (Nr. 210-16) durch das Ethikkomitee der LMU München und der entsprechenden Einwilligung der Angehörigen wurden die Leichenpräparate vom rechtsmedizinischen Institut bereitgestellt. Anschließend begann ich mit der selbstständigen Testung der Präparate.

Im Anschluss wurden die generierten Datensätze durch mich und Dr. med. Johannes Gleich mit dem Programm Microsoft® Excel (für Mac Version 16.66) ausgewertet, und anhand des Programmes IBM SPSS Statistics (Windows, Version 26.0, IBM Corp., Armonk, NY, USA) statistisch analysiert. Das Manuskript wurde anschließend gemeinsam von uns als Erstautoren verfasst und durch die Ko-Autoren überarbeitet. Nach Einreichung implementierten wir gemeinsam die gewünschten Änderungen.

Bei dieser Veröffentlichung liegt eine geteilte Erstautorenschaft mit Dr. med. Johannes Gleich vor. Dr. med. Johannes Gleich konnte durch seine Kenntnisse über osteoporotische Frakturen maßgeblich zu diesem Manuskript beitragen.

## 2. Einleitung

### 2.1 Hintergrund, Problematik und übergreifende Zielsetzung

Beckenringverletzungen stellen mit 3-8% einen vergleichsweise geringen Anteil aller Frakturen dar, sind jedoch nicht zuletzt wegen ihrer hohen Letalitätsrate von erheblicher Relevanz [4–8]. Die Letalität von komplexen Beckenfrakturen beträgt laut Literatur um die 20%, während der tödliche Verlauf dabei häufig nicht auf die Beckenfraktur selbst, sondern auf die Begleitverletzungen zurückzuführen ist [5]. Diese beinhalten beispielsweise vaskuläre, neuronale, intestinale oder urogenitale Verletzungsmuster, welche die Komplexität solcher Frakturen maßgeblich beeinflussen [5, 9]. Bei polytraumatisierten Patienten steigt die Häufigkeit von Beckenringverletzungen zudem auf 20-25 % an [10–12].

Epidemiologisch kommen Beckenringfrakturen im jungen Erwachsenenalter vorwiegend bei Männern vor, während im höheren Alter jedoch häufiger Frauen betroffen sind [12–14]. Zusätzlich zeigt sich in der Altersverteilung bei Beckenringfrakturen ein zweigipfliger Verlauf mit unterschiedlichen Traumamechanismen: Während im zweiten bis dritten Lebensjahrzehnt Beckenringfrakturen meist als Folge von Hochrasanztraumata zu beobachten sind, kommen diese im siebten Lebensjahrzehnt meist nach Niedrigrasanztraumata, wie beispielweise nach häuslichen Stürzen, vor [6, 14].

Diese „low-impact“ Beckenfrakturen in Folge eines einfachen Sturzes aus dem Stehen oder Sitzen gehören zu den sogenannten osteoporoseassoziierten Fragilitätsfrakturen (Fragility fractures of the pelvic ring (FFPs)) [14, 15]. Aufgrund der derzeitigen Altersstruktur der Bevölkerung sowie des demographischen Wandels ist aktuell zudem ein starker Anstieg dieser Frakturform zu beobachten [14, 16–20]. Demzufolge ergibt sich hieraus eine große Herausforderung für das heutige Gesundheitssystem [21].

Beckenringfrakturen werden im Allgemeinen nach der Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen und der Orthopaedic Trauma Association (AO/OTA)-Klassifikation eingeteilt und mit der Ziffer 61 beschrieben [22]. Die Komplexität der Beckenfraktur wird außerdem in Typ A, Typ B und Typ C unterteilt und hängt von der Stabilität des Beckenrings sowie der Beteiligung des hinteren Beckenrings ab [23, 24]. Kennzeichnend für Typ A Frakturen ist der intakte hintere Beckenring und eine dementsprechend erhaltene rotatorische und vertikale Stabilität [23, 24]. Bei Typ B Frakturen ist der hintere Beckenring partiell unterbrochen und das Becken somit rotatorisch instabil, jedoch vertikal stabil [23, 24]. Bei Typ C Frakturen ist der hintere Beckenring komplett unterbrochen, was in einer rotatorischen und vertikalen Instabilität resultiert [23–25].

Die Klassifikation nach Young-Burgess bezieht zudem den Verletzungsmechanismus im Sinne der Krafteinwirkung mit ein und differenziert zwischen einer Anterior Posterior Compression (APC), Lateral Compression (LC) und Vertical Shear Verletzung (VS) [26].

Für FFPs wurde eine gesonderte Klassifikation implementiert, da sich die Frakturmuster und die Beteiligung der ligamentären Strukturen im Rahmen von Beckenringfrakturen bei jungen und älteren Patienten zum Teil deutlich unterscheiden [27]. Aufgrund verschiedener ursächlicher Traumamechanismen und maßgeblichen Unterschieden in der Knochenfragilität beziehungsweise der Knochenstruktur eignen sich die gängigen Klassifikationen daher häufig nicht, um das Frakturmuster eindeutig zu klassifizieren [27].

Eine spezielle Unterform der Beckenringfrakturen stellen die Open Book Frakturen dar, bei denen durch eine Symphysensprengung das Becken wie ein „offenes Buch“ aufklappt [24, 28].

Die klassische Open Book Fraktur ohne relevante Begleitverletzungen des hinteren Beckenringes wird nach AO als Typ 61 B1.2 klassifiziert [22]. Je nach Beteiligung ligamentärer und ossärer Strukturen des hinteren Beckenringes kann weiter differenziert werden in AO Typ 61 B2.1 bis C3.3 [22].

Die Open Book Fraktur tritt meist als Folge einer anterior-posterioren Kompression auf, wie beispielsweise bei Motorradfahrern nach Frontalaufprall [29, 30].

Die operative Versorgung einer Open Book Fraktur durch offene Reposition und interne Fixierung (ORIF) mittels Plattenosteosynthese stellt aktuell den Goldstandard dar [30–32]. Oberstes Ziel dabei ist es, den Beckenring zu stabilisieren und die Mobilität des Patienten so schnell wie möglich wiederzuerlangen [33].

Die Behandlung mittels Plattenosteosynthese birgt jedoch verschiedene Komplikationen, wie beispielsweise Infektionen, Hämatome oder Serome, heterotrope Ossifikation sowie Implantatlockerungen bis hin zum Implantatversagen [29]. Letzteres stellt die führende Ursache für die Notwendigkeit eines Revisionseingriffes dar [29]. Die Häufigkeit des Implantatversagens wird in der Literatur je nach Definition mit 30,9-43% angegeben [32, 34]. Die Häufigkeit einer radiologischen Schraubenlockerung liegt derzeit sogar bei 81% [29].

Dementsprechend befasst sich die aktuelle Forschung in diversen Ansätzen mit der Problematik der Implantatlockerung beziehungsweise des Implantatversagens mit dem Ziel, die bestmögliche Versorgungstechnik zu finden [1, 3]. Diese Forschungsansätze sind vielfältig und reichen von der Optimierung des Plattendesigns bis hin zur Etablierung neuer Osteosyntheseverfahren [33, 35–39]. Eine Studie untersuchte zum Beispiel Zwei-Loch-Platten, die zum einen die verletzte Symphyse stabilisieren und zum anderen einen

Teil der physiologischen Bewegung der Symphyse während des Heilungsprozesses zulassen sollen [35]. Eine weitere Studie kam zu dem Schluss, dass winkelstabile Systeme an der Symphyse keinen Vorteil gegenüber nicht-winkelstabilen Systemen zu haben scheinen [36]. Eine andere Versuchsreihe verglich die Stabilität einer Kombination aus einer 6-Loch Platte von superior und einer zusätzlichen 4-Loch Platte von anterior mit einer einzelnen 6-Loch Platte und konnte keinen signifikanten Unterschied zeigen [37]. Meißner et al. untersuchten zudem im multidirektionalen dynamischem Versuchsaufbau DC-Platten (dynamic compression) und Rekonstruktionsplatten mit Überbrückungs-Zuggurten und PDS-Bandings miteinander [33]. Eine Untersuchung von Kiskaddon et al. an Leichenbecken zeigte, dass eine „suture button fixation“, die von dorsal an der Symphyse befestigt wurde, biomechanisch vergleichbar stabil war wie eine Plattenosteosynthese [38]. Eine weitere aktuelle Versuchsreihe testete schließlich den Einsatz von „cable clamp“ Implantaten und konnte zeigen, dass diese eine vergleichbare Stabilität zu Symphysenplatten zeigten [39].

Aufgrund der oben aufgezeigten uneinheitlichen Datenlage und daraus resultierenden fehlenden einheitlichen Empfehlungen ist die vorherrschende Therapieform weiterhin die operative Versorgung mittels Plattenosteosynthese zur temporären Stabilisierung [1, 2]. Diese wird im Verlauf vor allem bei jungen Patienten frühzeitig entfernt, um einer Lockerung sowie einem Implantatversagen vorzubeugen [1, 29].

Betrachtet man mögliche Gründe für das Implantatversagen, so stellt die iatrogene Arthrodese durch die Plattenosteosynthese eine der führenden Ursachen dar, denn biomechanisch besteht bei den Anforderungen an die optimale Versorgung von Symphysensprengungen eine gewisse Diskrepanz zwischen Stabilität und Elastizität [1, 2]. Zum einen muss die verwendete Osteosynthese die Verletzung adäquat stabilisieren, um eine optimale Heilung zu gewährleisten, zum anderen sollte sie jedoch eine gewisse physiologische Mikromobilität der Symphyse beibehalten, um die Gefahr einer Implantatlockerung zu verringern [33]. Grundlegend handelt es sich bei der Schambeinfuge (Symphysis pubica) nämlich nicht um einen steifen Knochen, sondern um eine Synarthrose, also ein unechtes Gelenk [40]. Bei Synarthrosen wird die Beweglichkeit maßgeblich vom Füllmaterial bestimmt [40]. Im Symphysenspalt findet sich hier sowohl hyaliner als auch Faserknorpel, welcher für das Abfangen von Druckkräften und Schubbeanspruchungen verantwortlich ist [40].

Besonders problematisch bei der Plattenstabilisierung ist daher die iatrogene Arthrodese und damit die fast vollständige Einschränkung der physiologischen Mikrobewegungen der Symphyse [1], die in der Literatur in vertikaler Richtung mit bis zu 2 mm beschrieben werden [41].

Alternativ zur Plattenosteosynthese besteht bei der Versorgung mittels flexiblen Osteosyntheseverfahren hingegen die Möglichkeit, neben einer Stabilisierung der verletzten Strukturen auch eine gewisse Beweglichkeit beizubehalten, die einer iatrogenen Arthrodese vorbeugen soll [1, 2, 33]. Durch flexible Osteosynthesen soll die Verletzung sowohl geschient und damit folglich eine Heilung ermöglicht werden, bei gleichzeitiger Sicherstellung einer biomechanischen Stabilität [42]. Bereits bei Verletzungen an anderen Gelenken hat sich das FiberTape®/ Internal Bracing™ als alternative Versorgungsmethode etabliert, wie zum Beispiel bei partiellen VKB-Rupturen oder bei Verletzungen der vorderen Syndesmose des Sprunggelenkes [42, 43].

In einer biomechanischen Studie zur Stabilisierung des hinteren Beckenrings bei AO Typ B2.1 zeigte das FiberTape® eine adäquate Stabilität, und war in Hinblick auf Dislokation und Steifigkeit der iliosakralen (SI) Schraube nicht unterlegen [44].

Neben der Einschränkung der Beweglichkeit und einer daraus resultierenden Lockerung des Implantates können für die Festigkeit von Implantaten wie beispielsweise Plattenosteosynthesen weitere Faktoren eine Rolle spielen [3]. Ein wichtiger Faktor ist eine insuffiziente Knochenstruktur- und Qualität, zum Beispiel im Rahmen einer Osteopenie oder Osteoporose [45]. Klassischerweise wird die Knochendichte bei Patienten mittels Dual-Röntgen-Absorptiometrie (DXA) oder quantitativer Computertomographie (QCT) an der Lendenwirbelsäule bestimmt [46, 47]. Biomechanisch gibt es hinreichende Daten dafür, dass eine lokale Osteoporose die Verankerung von Implantaten beeinträchtigen und somit ein Implantatversagen begünstigen kann [45]. Die Wirbelsäule und das proximale Femur sind Beispiele, bei denen eine lokale Osteoporose die Festigkeit von Implantaten einschränken kann [48, 49]. Für diese Problematik gibt es bereits Lösungsansätze:

Bredow et al. zeigten, dass die Bestimmung der Knochendichte via CT das Risiko einer Lockerung von Pedikelschrauben vorhersagen und eine präoperative Knochendichtebestimmung somit eine Entscheidungsgrundlage für den Einsatz einer Zementaugmentation bieten kann [48]. Auch in der Behandlung proximaler Femurfrakturen zeigte sich in einer Studie die präoperative Bestimmung der lokalen Knochendichte mittels CT an der kontralateralen Hüfte als hilfreich bezüglich der Implantatwahl und im Hinblick auf eine mögliche Augmentation [49].

Übergreifendes Ziel dieser Dissertation stellt somit die Evaluation zwei der wichtigsten Risikofaktoren hinsichtlich aktuell hoher Raten an Implantatlockerungen nach Plattenosteosynthesen an der Symphyse dar: Die iatrogene Arthrodese und das damit einhergehende „Arbeiten“ der Plattenosteosynthese gegen eine physiologische Mikromobilität sowie eine kompromittierte Knochendichte [1–3]. Dahingehend wurde der Einsatz flexibler Osteosynthesen für die Versorgung von Symphysensprengungen sowie die Relevanz

von lumbal bestimmter Knochendichte für die Ausrissfestigkeit von Schrauben in der Symphysenregion untersucht [1–3].

Zusammenfassend besteht das Ziel des Einsatzes flexibler Osteosynthesen an der Symphyse für die Versorgung von AO Typ B 1.2 Frakturen darin, eine ausreichende biomechanische Stabilität für eine adäquate Heilung zu gewährleisten bei gleichzeitigem Erhalt der physiologischen Mikromobilität [1, 2]. So soll einem Implantatversagen vorgebeugt und das Outcome der Patienten verbessert werden [1, 2].

Gleichzeitig soll untersucht werden, ob eine lumbal gemessene Knochendichte einen prädiktiven Wert hinsichtlich der Festigkeit symphysärer Implantate bietet, und ob eine kompromittierte Knochendichte eine Relevanz hinsichtlich der Stabilität dieser Implantate hat [3].

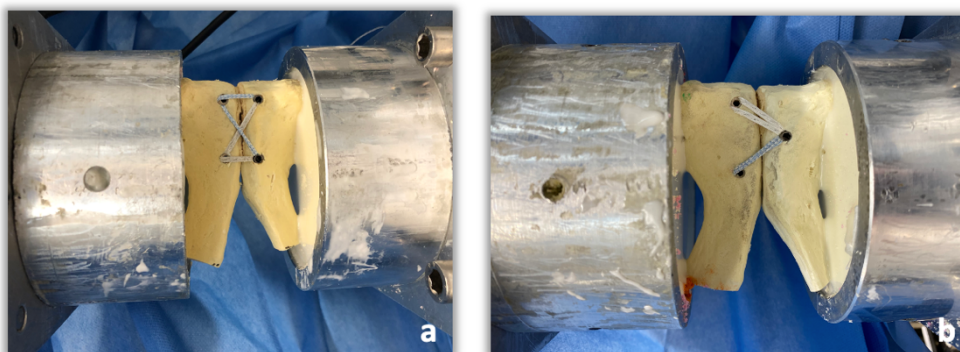
## 2.2 Zielsetzung und Fragestellung Paper I

*“Novel minimally invasive tape suture osteosynthesis for instabilities of the pubic symphysis: a biomechanical study.” [1]*

Die Versorgung einer Open Book Fraktur mittels offener Reposition und interner Fixation stellt aktuell den operativen Goldstandard dar [31, 32]. Der wichtigste Grund für eine Revisionsoperation nach initialer Plattenstabilisierung ist jedoch das Implantatversagen [29]. Die nahezu vollständige Aufhebung der physiologischen Beweglichkeit der Symphyse durch die Plattenosteosynthese stellt mit einen der wichtigsten Gründe für eine Implantatlockerung und folglich ein Implantatversagen dar [1, 2]. Um den Ansprüchen einer optimalen Versorgung an der Schambeinfuge, welche sowohl Stabilität als auch Flexibilität beinhalten sollte, gerecht zu werden, wurde in dieser Studie eine flexible Osteosynthese Technik im Vergleich zu einer Plattenosteosynthese für die Versorgung einer AO 61 Typ B2.1 Fraktur getestet [1].

In dieser Studie wurde an isolierten vorderen Beckenringen die Symphyse durchtrennt und somit eine Open Book Fraktur im Sinne einer AO 61 B2.1 Fraktur erzeugt [1]. Diese Fraktur wurde anschließend mit einer Plattenosteosynthese und zwei unterschiedlich konfigurierten flexiblen Osteosynthesen (vgl. Abb. 1) versorgt und in einem multidimensionalen, zyklischen Belastungsversuch in Hinblick auf ihre Beweglichkeit (mm) und Steifigkeit (N/mm) untersucht [1].

Das Ziel dieser Versuchsreihe bestand darin, die generelle Durchführbarkeit der Versorgung einer am Knochenmodell simulierten Open Book Fraktur an der Symphyse mit einer flexiblen Osteosynthese zu testen und mit einer konventionellen Plattenosteosynthese zu vergleichen [1].



**Abbildung 1:** a: “Criss-cross” Technik; b: “Triangle” Technik [1]



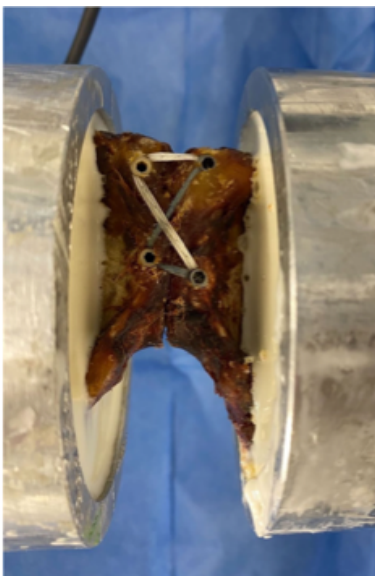
### 2.3 Zielsetzung und Fragestellung Paper II

*“Tape suture constructs for instabilities of the pubic symphysis: is the idea of motion preservation a suitable treatment option? A cadaver study” [2].*

Aufgrund vielversprechender biomechanischer Ergebnisse hinsichtlich des Einsatzes von flexiblen Osteosynthesen zur Versorgung von Open Book Frakturen an der Symphyse am synthetischen Knochenmodell und mangelnder Daten in der Literatur zur Anwendung an Leichenpräparaten wurde das neuartige Konstrukt in dieser Folgestudie nun an Leichenpräparaten getestet [2].

Hierfür wurde erneut an neun vorderen Beckenringen, diesmal von menschlichen Kaderbecken, eine Open Book Fraktur nach AO 61 B1.2 erzeugt [2]. Diese Frakturen wurden anschließend zunächst mit einer flexiblen Osteosynthese in der criss-cross Technik versorgt und daraufhin sowohl einem Kurzzeitbelastungstest als auch einem Langzeitbelastungstest unterzogen [2]. Bei beiden Tests wurden die Präparate in horizontaler und in vertikaler Richtung zyklisch belastet [2]. Anschließend wurden die Dislokationen (mm) und die entsprechenden Steifigkeiten (N/mm) der criss-cross Technik im Kurzzeit- und im Langzeitversuch miteinander verglichen [2].

Ziel dieser Studie war es, die Anwendbarkeit und biomechanischen Eigenschaften der zuvor vielversprechenden criss-cross Technik der flexiblen Osteosynthese an Open Book Frakturen im Leichenpräparat zu testen (vgl. Abb. 2) [2]. Außerdem sollte durch den Dauerbelastungsversuch eine Annäherung an eine längerfristige Belastbarkeit der Implantate erfolgen, um so letztlich die Langzeitstabilität der flexiblen Implantate evaluieren zu können [2].



**Abbildung 2:** Eingebettetes Leichenpräparat nach Versorgung durch Tape-suture [2]

## 2.4 Zielsetzung und Fragestellung Paper III

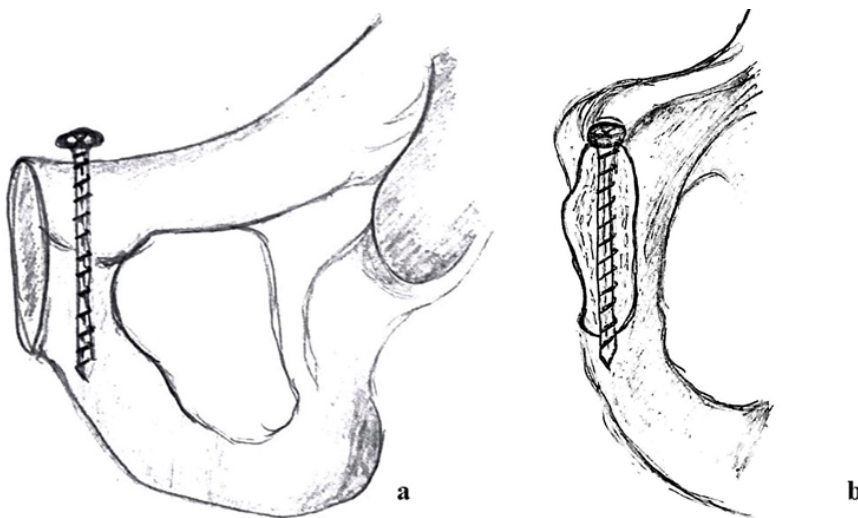
*“How relevant is lumbar bone mineral density for the stability of symphyseal implants? A biomechanical cadaver study.” [3]*

Eine mit 81,3% besonders häufig beobachtete Komplikation bei der osteosynthetischen Versorgung von Symphysensprengungen mittels Plattenosteosynthese ist die Schraubenlockerung [29]. Ein Grund für das Implantatversagen könnte demnach nicht nur in der iatrogenen Arthrodese, sondern auch in einer pathologisch veränderten Knochendichte liegen [3, 45].

Bisher existieren jedoch keine eindeutigen Daten bezüglich des prädiktiven Wertes einer lumbalen Bestimmung der Knochendichte im Hinblick auf die Festigkeit von Implantaten in der Symphysenregion [3]. Daher wurde in dieser Studie ein potentieller Zusammenhang von lumbal bestimmter Knochendichte und Ausrissfestigkeit von symphyseären Schrauben untersucht [3].

Zunächst wurde die Knochendichte der hier verwendeten Leichenpräparate mittels QCT an der Lendenwirbelsäule bestimmt [3]. Anschließend erfolgte an jedem Leichenpräparat ein axialer Ausrissversuch einer Schraube, die die mediale Schraube in einer mittels Plattenosteosynthese versorgten Open Book Fraktur repräsentiert [3](vgl. Abb. 3).

Ziel dieser Studie war dahingehend der Vergleich der Ausrisskräfte von Schrauben aus Präparaten mit zuvor lumbal bestimmter Knochendichte [3]. Bei Korrelation von lumbaler BMD und Ausrisskraft von Schrauben in der Symphysenregion könnte dies als prädiktiver Marker für eine Schraubenlockerung genutzt und Risikopatienten für ein Implantatversagen somit früh identifiziert werden [3].



**Abbildung 3:** Skizze der Schraubenplatzierung a) von anterior und b) von medial [3]

### 3. Zusammenfassung

Symphysäre Verletzungen im Sinne einer AO Typ 61 B2.1 Fraktur werden als eigentlich ligamentäre Verletzungen weiterhin gemäß aktuellem Goldstandard mittels Plattenosteosynthese versorgt [31, 32]. Damit werden sie trotz einer physiologischen Mikromobilität weitestgehend iatrogen versteift [1].

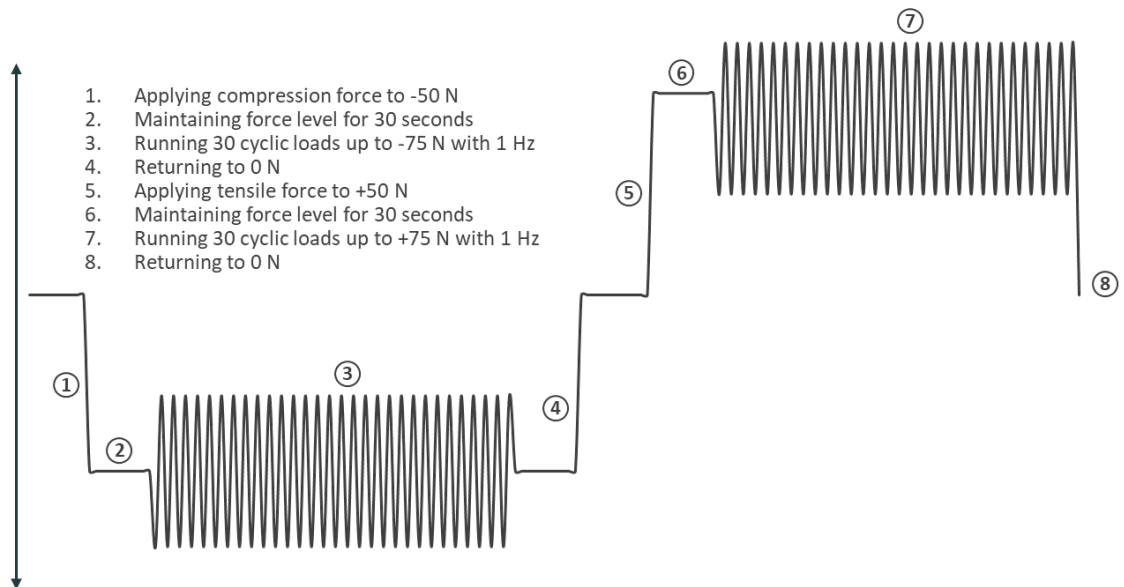
Der häufigste Grund für eine Revisionsoperation nach plattenosteosynthetischer Versorgung von Symphysensprengungen ist dahingehend das Implantatversagen [29].

Aufgrund der physiologischen Mikromobilität der Symphyse von bis zu 2 mm [41] und der damit verbundenen nahezu vollständigen Aufhebung dieser Beweglichkeit durch die Plattenosteosynthese entsteht eine gewisse Diskrepanz zwischen Stabilität und Flexibilität [1, 2].

Um einer iatrogenen Arthrodeese vorzubeugen, bietet sich beispielsweise der Einsatz flexibler Osteosynthesen an. Ein Vertreter hierfür sind flexible Osteosynthesen, welche bereits an anderen Gelenken zur Behandlung ligamentärer Verletzungen erfolgreich eingesetzt werden, wie unter anderem am Kniegelenk oder an der vorderen Syndesmose des Sprunggelenkes [42, 43]. Diese Versorgungstechnik basiert auf einer „Schienung“ der verletzten Ligamente bei gleichzeitiger Sicherstellung der Stabilität [42]. Dementsprechend erscheint ein Einsatz bei Instabilitäten und Rupturen an der Symphyse aufgrund der oben genannten Problematik von Plattenosteosynthesen und den vielversprechenden Eigenschaften von flexiblen Osteosynthesen sinnvoll [1, 2]. Aufgrund mangelnder Daten zur Anwendbarkeit dieser flexiblen Osteosynthesen an der Symphyse ist die Testung dieser Versorgungsalternative Gegenstand dieser Versuchsreihe.

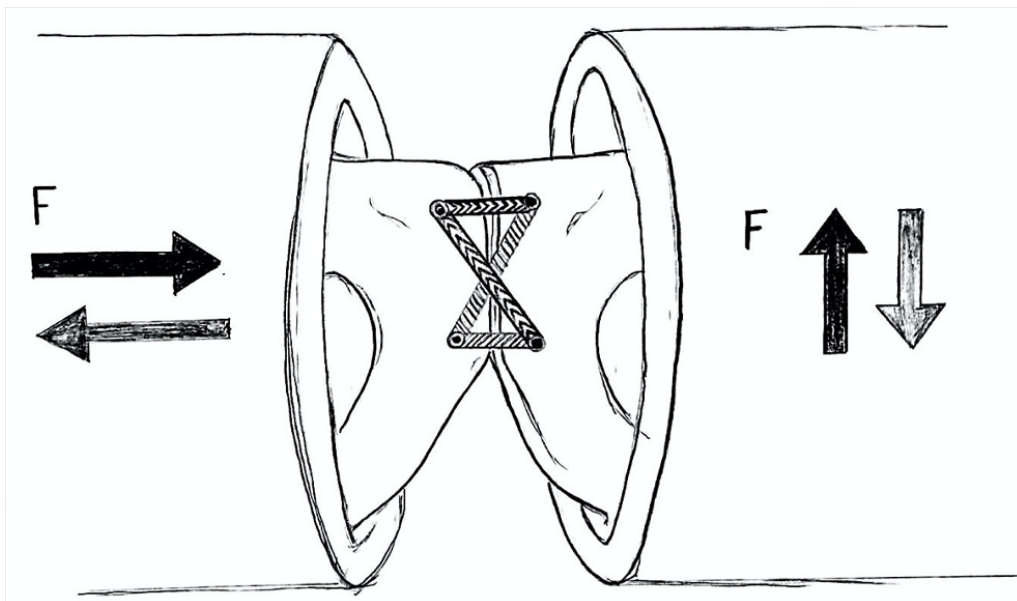
In der Veröffentlichung „*Novel minimally invasive tape suture osteosynthesis for instabilities of the pubic symphysis: a biomechanical study*“ wurde die generelle Durchführbarkeit der operativen Versorgung einer Open Book Fraktur mittels flexibler Osteosynthesen am synthetischen Knochenmodell getestet [1].

Hierfür wurde zunächst von neun synthetischen Beckenmodellen der vordere Beckenring isoliert, die Schambeinfuge durchtrennt und somit eine Open Book Fraktur im Sinne einer AO Typ 61 B1.2 Fraktur erzeugt [1]. Anschließend wurden alle Modelle mit einer Plattenosteosynthese (DePuySynthes 3.5; four hole, dynamic compression plate) versorgt [1]. Nach Einbettung und Montage in das biomechanische Testgerät (Instron Electro-Puls™, E10000 Linear-Torion, Norwood, MA, USA) wurden die Modelle einem biomechanischen, zyklischen Belastungsprotokoll unterzogen, bei dem sie sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung mit Druck und Zug belastet wurden [1] (vgl. Abb. 4).



**Abbildung 4: Testprotokoll mit Testschritten und grafische Darstellung der Kräfte [2]**

Diese Kraftvektoren hatten das Ziel, die Belastungen der Symphyse im Sitzen, Stehen und während des Laufens zu simulieren [1] (vgl. Abb. 5).



**Abbildung 5: Skizze der Kraftvektoren [1]**

Anschließend wurden die Modelle nacheinander mit zwei verschiedenen Techniken des neuartigen flexiblen Osteosynthese Konstruktes versorgt [1]. Bei dieser Versorgungstechnik handelt es sich um zwei Knochenanker (Peek SwiveLock®, Arthrex, Naples, FL, USA), die circa 2-3 cm untereinander von anterior im rechten Os pubis parallel zum Symphysenspalt (1 cm lateral des Symphysenspaltes) platziert und mit zwei Fiber Tapes® auf der kontralateralen Seite entweder in überkreuzter Technik (criss cross) mit

zwei Cork screws® (vgl. Abb. 1a), oder mit einer Cork screw® in einer dreieckigen Technik (triangle) fixiert wurden [1] (vgl. Abb. 1b). Welche Technik zuerst angebracht und getestet wurde, wurde randomisiert zugeteilt [1].

Gemessen wurden sowohl die Dislokation (mm), definiert als der Durchschnitt aus den maximalen Dislokationen während der zyklischen Belastungsphasen, als auch die korrespondierende Kraft (N) [1]. Die Steifigkeit (N/mm) wurde definiert als die einwirkende Kraft (N) geteilt durch die maximale Dislokation (mm) [1].

Betrachtet man die durchschnittliche Dislokation und durchschnittliche Steifigkeit, zeigte die Plattenosteosynthese die geringste Dislokation und die größte Steifigkeit in allen Bewegungsebenen [1].

Bei Zugbelastung in horizontaler Richtung ließ die Plattenosteosynthese ( $0.08 \pm 0.01$  mm) signifikant weniger Bewegung zu als beide flexible Osteosynthesen ( $p < 0.01$ ) (criss cross Technik:  $0.23 \pm 0.05$  mm; triangle Technik:  $0.27 \pm 0.07$  mm) [1].

Zudem zeigte die Plattenosteosynthese jeweils im direkten Vergleich mit den einzelnen flexiblen Osteosynthesen eine signifikant höhere Steifigkeit bei horizontaler Zugbelastung (beide  $p \leq 0.01$ ) [1].

Bei horizontaler Kompression und in den vertikalen Belastungen auf Druck und Zug wurde kein signifikanter Unterschied in der Beweglichkeit zwischen den drei Versorgungstechniken gefunden [1].

Der Vergleich der criss cross und die triangle Technik erwies sich in allen Bewegungsrichtungen sowohl hinsichtlich Dislokation als auch Steifigkeit als nicht signifikant ( $p > 0.05$ ) [1].

Aufgrund der gezeigten Bewegungsausmaße der Osteosynthesetechniken, welche stets innerhalb des physiologischen Bewegungsausmaßes von bis zu 2mm lagen, konnte in dieser Versuchsreihe gezeigt werden, dass die Versorgung mittels flexibler Osteosynthese am Knochenmodell eine adäquate biomechanische Stabilität bietet bei gleichzeitigem Erhalt einer physiologischen Mikromobilität [1]. Zudem kam es bei keinem Präparat zu einem Implantatversagen [1].

Auch ließ die Plattenosteosynthese in vertikaler Richtung bis zu dreimal mehr Bewegung zu als in der horizontalen Belastungsrichtung [1]. Diese Diskrepanz stellt einen möglichen begünstigenden Faktor für eine Auslockerung der Plattenosteosynthese und folglich ein Implantatversagen dar [1].

Nach vielversprechenden Ergebnissen am synthetischen Knochenmodell und mangelnden biomechanischen Daten zum Einsatz dieser flexiblen Osteosynthesen an humanen Symphysen untersuchte die zweite Studie (*“Tape suture constructs for instabilities of the*

*pubic symphysis: is the idea of motion preservation a suitable treatment option? A cadaver study*“) die Übertragbarkeit und Anwendbarkeit der flexiblen Osteosynthesen an Leichenpräparaten [2]. Zusätzlich wurde in dieser zweiten Studie eine biomechanische Langzeitbelastung durchgeführt, um dahingehend die Langzeitstabilität der Implantate zu evaluieren [2].

Für diese Studie wurde an neun Leichenpräparaten erneut eine Open Book Fraktur im Sinne einer AO Typ 61 B2.1 Fraktur erzeugt und diese anschließend mit einer flexiblen Osteosynthese in criss-cross Technik versorgt [2]. Im ersten Teil des Versuches wurden die Präparate, wie zuvor bereits die synthetischen Modelle, einem zyklischen Belastungsprotokoll unterzogen (Versuchsprotokoll vgl. Abb. 4) und hierbei ihre Dislokation (mm) bei entsprechender Krafteinwirkung (N) gemessen [2]. Der erste Teil des Versuches mit jeweils 30 Belastungszyklen hatte das Ziel, die auftretenden Kräfte im Sitzen, Stehen und Laufen zu simulieren [50]. Abschließend wurden die Präparate einer Dauerbelastung unterzogen, um die flexible Osteosynthese hinsichtlich ihrer Stabilität im Langzeitversuch zu evaluieren und ein potentielles Implantatversagen zu provozieren [2]. Hierfür wurden die Präparate innerhalb eines Kraftspektrums von -75N bis +75 N (vgl. Abb. 4) über 1000 Zyklen in jeweils horizontaler und vertikaler Richtung auf Druck und Zug belastet [2].

Die Dislokation (mm), einwirkende Kraft (N) und Steifigkeit (N/mm) wurden analog zum ersten Versuch gemessen und berechnet [2]. Zusätzlich wurden für die Auswertung die letzten 30 Zyklen des Dauerbelastungsversuches extrahiert und nach oben genannter Methode ebenfalls die durchschnittlich zugelassene Bewegung berechnet [2].

Bei horizontaler Zugbelastung unterschied sich die Dislokation der flexiblen Osteosynthese im Kurzzeitversuch (0.29 mm) nicht signifikant von der Dislokation im Langzeitversuch (0.30 mm) ( $p > 0.05$ ) [2].

Bei vertikaler Testung konnten bei den Dislokationen im Kurzzeit- und Langzeitversuch jeweils signifikante Unterschiede gefunden werden: Die Dislokationen im Langzeitversuch waren sogar etwas geringer als die der Kurzzeitversuche [2].

Auch in der vertikalen Richtung überschritt die Dislokation nicht die physiologische Beweglichkeit von 2 mm, und es trat bei keinem der Konstrukte ein Implantatversagen auf [2].

Diese Ergebnisse verdeutlichen nicht nur die Stabilität der flexiblen Osteosynthesen im Langzeitversuch, sondern bestätigen auch die Ermöglichung des Erhalts der Mikromobilität innerhalb der physiologischen Beweglichkeit von 2 mm [2]. Ein Erklärungsansatz für die Zunahme der Stabilität im Langzeitversuch ist die möglicherweise gleichmäßigere

Kräfteverteilung zwischen den Tapes und ihren vier Ankerpunkten im Knochen, die sich erst im Verlauf durch die regelmäßige Belastung einstellt [2].

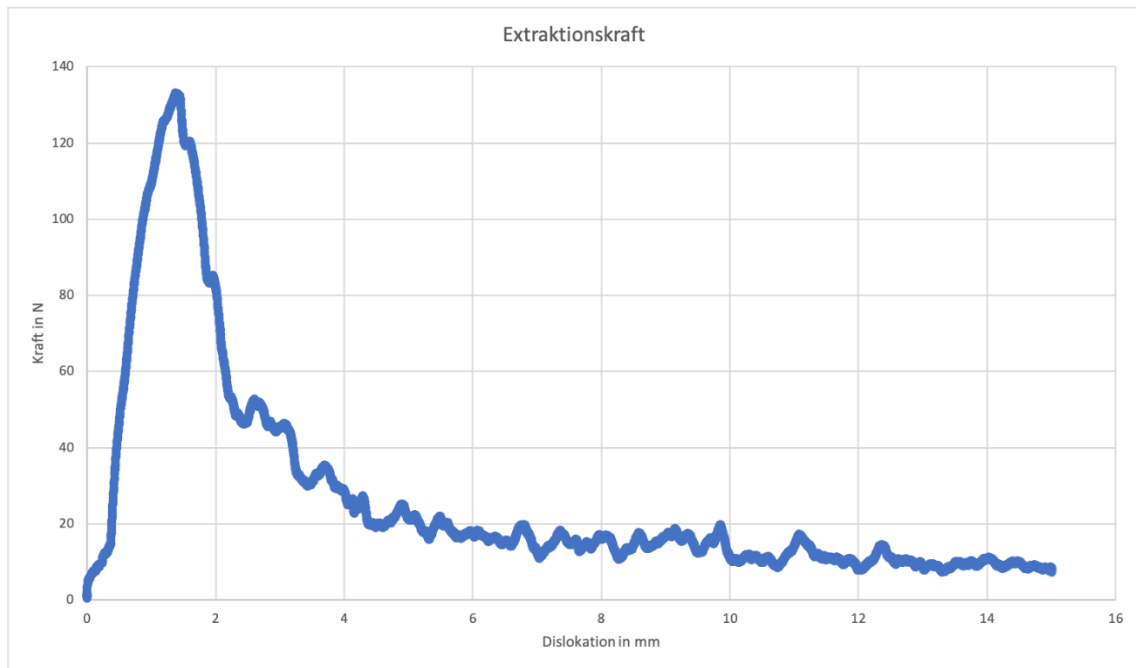
Zusammenfassend bestätigten diese Ergebnisse die ausreichende biomechanische Stabilität bei gleichzeitigem Erhalt der Mikromobilität der flexiblen Osteosynthese bei der Versorgung einer Open Book Fraktur AO Typ 61 B2.1 am Leichenpräparat, auch im Hinblick auf ihre Langzeitstabilität [2].

Ein weiterer wichtiger Grund für ein Implantatversagen ist eine reduzierte Knochendichte und kompromittierte Knochenqualität im Sinne einer Osteopenie oder Osteoporose [3, 45]. Hinsichtlich der Quantifizierung der Knochendichte kann an Skelettbereichen wie der Wirbelsäule und dem proximalen Femur eine präoperative Bestimmung der Knochendichte somit wichtige therapeutische Konsequenzen in Hinblick auf die richtige Implantatwahl oder eine mögliche Zementaugmentation haben [48, 49].

Bisher existieren keine eindeutigen Daten hinsichtlich der Möglichkeit eines Rückschlusses bezüglich der lumbalen Bestimmung der Knochendichte auf die Festigkeit von Implantaten an der Symphyse [3]. Bei bestehender Korrelation von lumbaler BMD und Ausrisskraft von Schrauben in der Symphysenregion könnte dies als prädiktiver Marker für eine Schraubenlockerung genutzt und Risikopatienten für ein Implantatversagen somit früh identifiziert werden [3].

Zuletzt sollte deshalb in der Veröffentlichung *“How relevant is lumbar bone mineral density for the stability of symphyseal implants? A biomechanical cadaver study“* die Aussagekraft der lumbal bestimmten Knochendichte im Hinblick auf die Fixationsfestigkeit von Schrauben in der Schambeinfugenregion geprüft werden [3].

Hierfür wurde die Knochendichte an Lendenwirbelkörpern 4 und 5 via QCT von zehn Leichenpräparaten bestimmt [3]. Die Leichenpräparate wurden anhand ihres BMD (bone mineral density) Wertes mittels eines Cut-off-Wertes von 120 mg Ca-Ha/mL in zwei Gruppen eingeteilt [3]. Um die Fixationsfestigkeit von Schrauben in der Symphysenregion zu testen, wurde in diesem Versuch jeweils eine Schraube parallel zur Schambeinfuge monokortikal in das Leichenpräparat, repräsentativ für die mediale Schraube einer Plattenosteosynthese, eingebracht und diese dann axial ausgerissen [3]. Die Geschwindigkeit des Ausrisses betrug konstant 10 mm/min und die benötigte Kraft (N), sowie der axiale Dislokationsweg (mm) der Schraube wurden von der biomechanischen Testmaschine registriert [3]. Ähnlich zu anderen Ausrissstudien [51, 52] definierten wir ein Schraubenversagen in unserer Versuchsreihe als den Punkt in der Kraft-Weg Kurve, in der die Kraft ihr Maximum erreicht hatte und abfiel [3] (vgl. Abb. 6).



**Abbildung 6: Exemplarische Ausrisskurve [3]**

Trotz eines signifikanten Unterschiedes in Bezug auf die Knochendichte der zwei Gruppen unterschieden sich die Ausrisskräfte nicht signifikant (durchschnittliche Ausrisskraft Gruppe 1:  $238.67 \pm 52.60$  N; Gruppe 2:  $313.39 \pm 234.46$  N; ( $p= 0.481$ )) [3]. Der Median der Gruppen betrug  $231.88$  N für Gruppe 1 und  $228.08$  N für Gruppe 2 [3].

Diese Ergebnisse zeigen, dass eine Knochendichtebestimmung an der Wirbelsäule in unserer Studie keine relevante Aussagekraft hinsichtlich der Ausrissfestigkeit von Schrauben in der Schambeinfugenregion hatte [3]. Dies liegt möglicherweise in der unterschiedlichen Knochenzusammensetzung an Wirbelkörpern und dem vorderen Beckenring begründet [3]: Während Wirbelkörper zum größeren Teil aus trabekulärem Knochen bestehen, besteht das Schambein (Os Pubis) größtenteils aus Kompakta [53]. Dieses größere Maß an kompaktem Knochen bietet der Schraube eine dementsprechend vergrößerte Kontaktfläche und kann somit ein Grund für eine hohe Ausrisskraft sein, unbeeinflusst von der lumbalen Knochendichte [3]. Des Weiteren ist die verschiedene Ausprägung des osteoporotischen Umbaus in verschiedenen Skelettbereichen als weiterer Grund für dieses Ergebnis denkbar [3, 53]. Dies erklärt möglicherweise den fast identischen Median der Ausrisskräfte, während sich die Gruppen in ihrer Knochendichte signifikant unterschieden [3].

Sinnvoll erscheint daher die Evaluation der Ausprägung der Osteoporose am vorderen Beckenring mittels ortsspezifischer Knochendichtemessung [3]. Hierfür sollte in weiteren Versuchen evaluiert werden, ob eine regionsspezifische BMD-Bestimmung in dieser Fragestellung tatsächlich überlegen ist.



Zusammenfassend zeigte sich die flexible Osteosynthese sowohl am synthetischen Knochenmodell als auch am Leichenpräparat als vielversprechende minimalinvasive Osteosynthese für die operative Versorgung von Symphysensprengungen im Sinne einer AO Typ B 1.2 Fraktur [1, 2].

Zusätzlich konnte gezeigt werden, dass die lumbal mittels QCT bestimmte Knochendichte keine relevanten Rückschlüsse auf die Ausrissfestigkeit von Schrauben in der Symphysenregion erlaubt [3].

Trotz der vielversprechenden Ergebnisse sind weitere biomechanische und klinische Studien nötig, um die klinische Übertragbarkeit dieser Ergebnisse zu prüfen.

## 4. Abstract (English):

Symphyseal injuries in the form of an AO type 61 B2.1 fracture continue to be treated with plate osteosynthesis according to the current gold standard [31, 32]. As a result, the symphysis is iatrogenically stiffened despite its actual physiological micromobility [1].

The foremost reason for requiring revision surgery after plate osteosynthesis of symphyseal disruption is implant failure [29].

Due to the physiologically given micromobility of the symphysis of up to 2 mm [41] and the almost complete suppression of this mobility by plate osteosynthesis, a certain discrepancy between stability and flexibility arises [1, 2].

In order to prevent iatrogenic arthrodesis, the use of flexible osteosyntheses which have already been used successfully in other joints, for example for the treatment of ligamentous injuries, such as the knee joint or the anterior syndesmosis of the ankle joint could be an option [42, 43].

This treatment technique is based on "splinting" the injured ligaments while at the same time ensuring stability [42]. Accordingly, due to the above-mentioned problems of plate osteosyntheses and the promising properties of flexible osteosyntheses, their use in cases of instability and rupture of the symphysis appears to be reasonable [1, 2]. Due to lacking data on the applicability of tape suture constructs to the symphysis, the testing of this alternative and novel treatment option is the subject of this study.

In the publication "*Novel minimally invasive tape suture osteosynthesis for instabilities of the pubic symphysis: a biomechanical study*", the general feasibility of surgical treatment of an open book fracture using tape sutures was tested on a synthetic bone model [1].

To simulate an open book fracture in the sense of an AO type 61 B1.2 fracture, the anterior pelvic ring of nine synthetic pelvic models was first isolated and then the pubic symphysis was dissected [1]. Subsequently, all bone models were treated with a plate osteosynthesis (DePuySynthes 3.5; four hole, dynamic compression plate) [1]. After embedding and mounting in the biomechanical testing device (Instron Electro-Puls™, E10000 Linear-Torion, Norwood, MA, USA), the bone models were subjected to a biomechanical, cyclic testing protocol, in which they were loaded with compressive and tensile forces in both horizontal and vertical directions [1] (see Fig. 4).

These force vectors aimed to simulate the loads on the symphyseal joint during sitting, standing and walking [1] (see Fig. 5).

Subsequently, the models were treated successively with two different techniques of the novel tape suture construct [1]. This technique involves two bone anchors (Peek Swive-Lock®, Arthrex, Naples, FL, USA), which were placed approximately 2-3 cm apart from each other anteriorly in the right os pubis parallel to the symphyseal gap (1 cm lateral to the symphyseal gap) and fixed with two Fiber Tapes® on the contralateral side either in a criss-cross technique with two Cork screws® (see Fig. 1a), or with one Cork screw® in a triangular technique [1] (see Fig. 1b). Which technique was applied and tested first was randomly assigned [1].

Both the dislocation (mm), defined as the average maximum dislocations during the cyclic loading phases, and the corresponding force (N) were measured [1]. Stiffness (N/mm) was defined as the applied force (N) divided by the maximum dislocation (mm) [1].

Considering the average dislocation and average stiffness, plate osteosynthesis showed the lowest dislocation and the highest stiffness in all directions of motion [1].

With tensile loading in the horizontal direction, plate osteosynthesis ( $0.08 \pm 0.01$  mm) allowed significantly less movement than both flexible osteosyntheses ( $p < 0.01$ ) (criss cross technique:  $0.23 \pm 0.05$  mm; triangle technique:  $0.27 \pm 0.07$  mm) [1].

In addition, plate osteosynthesis showed significantly higher stiffness under horizontal tensile loading in direct comparison with each of the tape suture techniques (both  $p \leq 0.01$ ) [1].

In horizontal compression and in the vertical loads on compression and traction, no significant difference in mobility was found between the plate osteosynthesis and the different tape suture techniques [1].

The comparison of the criss-cross and the triangle technique was found to be non-significant in all directions of motion with respect to dislocation as well as stiffness ( $p > 0.05$ ) [1].

Due to the permitted displacement of the osteosynthesis techniques, which did not exceed the physiological range of motion of up to 2 mm, this study shows that the treatment of a simulated open book fracture using tape suture constructs on synthetic bone models provides adequate biomechanical stability, while maintaining physiological micromobility [1]. In addition, no implant failure was observed during the tests [1].

The plate osteosynthesis also allowed up to three times more movement in the vertical direction than in the horizontal direction [1]. This discrepancy is a possible contributing factor for loosening of the plate osteosynthesis and could consequently lead to implant failure [1].

After promising results on the synthetic bone model and lacking biomechanical data for the use of tape suture constructs on human symphyses, the second study ("*Tape suture constructs for instabilities of the pubic symphysis: is the idea of motion preservation a suitable treatment option? A cadaver study*") evaluated the transferability and applicability of tape suture constructs on cadaver specimens [2]. In addition, a biomechanical long-term loading was performed in this second study to evaluate the long-term stability of the implants [2].

For this study, again an open book fracture in the sense of an AO type 61 B2.1 fracture was created on nine cadaveric specimens and was subsequently treated with a tape suture construct in the criss-cross technique [2]. In the first part of the test, the specimens were subjected to a cyclic loading protocol (see Fig. 4 for the test protocol) and their dislocation (mm) was measured with the corresponding force application (N) [2]. The first part of the test, with 30 load cycles each, had the aim of simulating the forces that occur while sitting, standing and walking [2]. Afterwards, the specimens were subjected to continuous loading in order to evaluate the long-term stability of the construct and to potentially provoke an implant failure [2]. This continuous loading protocol included compression and traction within a force spectrum of -75 N to +75 N (see Fig. 4) for 1000 cycles in both horizontal and vertical direction [2].

The dislocation (mm), force (N) and stiffness (N/mm) were measured and calculated accordingly to the first study [2]. In addition, the data of the last 30 cycles of the long-term test were extracted to compare the mobility and stiffness with the results of the short-term loading. [2].

With horizontal tensile loading, the dislocation of the flexible osteosynthesis in the short-term test (0.29 mm) did not differ significantly from the dislocation in the long-term test (0.30 mm) ( $p > 0.05$ ) [2].

In vertical testing, significant differences were found in the dislocations in the short-term and long-term tests: The dislocations in the long-term test were even slightly lower than those in the short-term tests [2].

Also in the vertical direction, the dislocation did not exceed the physiological mobility of 2 mm, and no implant failure occurred in any of the constructs [2].

These results not only illustrated the stability of the flexible osteosyntheses in long-term testing, but also confirmed that it is possible to maintain micromobility within the physiological mobility of 2 mm [2]. One explanation for the increase in stability in the long-term test is the possibly more even distribution of forces between the tapes and their four anchor points in the bone, which develops over the course of the exposure to constant load [2].

In summary, these results confirmed the sufficient biomechanical stability with simultaneous preservation of the micromobility of the tape suture constructs in the treatment of an open book fracture AO type 61 B2.1 on the cadaveric specimen, also with regard to its long-term stability [2].

Another important reason for implant failure is reduced bone density and compromised bone quality in the sense of osteopenia or osteoporosis [3, 45]. With regard to the quantification of bone density, in skeletal regions such as the spine and proximal femur, a preoperative determination of bone mineral density can thus have important therapeutic consequences with regard to the correct choice of implant or a possible cement augmentation [48, 49].

Due to the lack of data regarding the informative value of lumbar determined bone mineral density for the stability of implants in the symphyseal region, the publication "*How relevant is lumbar bone mineral density for the stability of symphyseal implants? A biomechanical cadaver study*" examines the fixation strength of screws in the symphyseal region in relation to their previously lumbar determined bone density [3].

In the case of an existing correlation between lumbar BMD and the tear-out force of screws in this region, this information could be used as a predictive marker for screw loosening. Therefore, patients at-risk for implant failure could thus be identified earlier [3].

For this purpose, the bone density of lumbar vertebrae 4 and 5 was determined via QCT of ten cadaveric specimens [3]. The specimens were divided into two groups based on their BMD value using a cut-off value of 120 mg Ca-Ha/mL [3]. In order to test the fixation strength of screws in the symphyseal region, a screw was inserted monocortically, parallel to the pubic symphysis, representative of the medial screw of a plate osteosynthesis, and was then torn out axially [3]. The steady tear-out speed was 10 mm/min and the required force (N), as well as the axial displacement (mm) of the screw, were registered by the testing machine [3]. Similar to other studies [51, 52] we defined a screw failure in our series of tests as the point in the force-displacement curve at which the force reached its maximum and dropped off [3] (see Fig. 6).

Despite a significant difference in bone density between the two groups, the pull-out forces did not differ significantly (mean pull-out force group 1:  $238.67 \pm 52.60$  N; group 2:  $313.39 \pm 234.46$  N; ( $p= 0.481$ )) [3]. The median of the groups was 231.88 N for group 1 and 228.08 N for group 2 [3].

These results indicate that bone density determination at the lumbar spine had no relevant informative value for the tear-out strength of screws in the pubic symphysis region [3]. This may be due to the different bone composition of the vertebral bodies and the

anterior pelvic ring [3]: Whereas vertebral bodies mostly consist of trabecular bone, the pubic bone mainly consists of compact bone [53]. This greater amount of compact bone potentially provides the screw with a correspondingly increased contact surface and can thus be a reason for a high pull-out force, uninfluenced by lumbar bone density [3]. Furthermore, the different expression of osteoporotic remodeling in different skeletal regions is conceivable as a further reason for this result [3, 53]. This may explain the almost identical median of the avulsion forces, while the groups differed significantly in terms of their BMD values [3].

Therefore, it seems reasonable to perform site-specific bone density measurement for the evaluation of BMD at the anterior pelvic ring [3]. Further studies should be conducted to evaluate whether site-specific BMD measurement is actually superior in this context.

In summary, tape suture constructs showed to be a promising minimally invasive osteosynthesis for the surgical treatment of symphyseal ruptures in the sense of an AO type B 1.2 fracture, both in the synthetic bone model and in the cadaveric specimen [1, 2].

Additionally, lumbar bone density determined by QCT did not allow any relevant conclusions about the pull-out strength of screws in the symphyseal region [3].

Despite the promising results, further biomechanical and clinical studies are needed to test the clinical transferability of these findings.

## 5. Paper I

### **Novel minimally invasive tape suture osteosynthesis for instabilities of the pubic symphysis: a biomechanical study**

Adrian Cavalcanti Kußmaul<sup>1</sup>, Fanny Schwaabe<sup>1</sup>, Manuel Kistler<sup>2</sup>, Clara Gennen<sup>3</sup>, Sebastian Andreß<sup>1</sup>, Christopher A Becker<sup>1</sup>, Wolfgang Böcker<sup>1</sup>, Axel Greiner<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of General Trauma and Reconstructive Surgery, University Hospital LMU Munich, Munich, Germany.

<sup>2</sup> Department of Orthopedics, Physical Medicine and Rehabilitation, University Hospital LMU Munich, Munich, Germany.

<sup>3</sup> Department of Obstetrics and Gynecology, University Hospital LMU Munich, Munich, Germany.

**Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery**

**Volume 142, pages 2235–2243, (2022)**

Published online: 29 May 2021

DOI: <https://doi.org/10.1007/s00402-021-03968-z>

## 6. Paper II

**Tape suture constructs for instabilities of the pubic symphysis: is the idea of motion preservation a suitable treatment option? A cadaver study**

Adrian Cavalcanti Kußmaul<sup>1</sup>, Fanny Schwaabe<sup>1</sup>, Manuel Kistler<sup>1</sup>, Maximilian Jörgens<sup>1</sup>, Korbinian F Schreyer<sup>1</sup>, Axel Greiner<sup>1</sup>, Wolfgang Böcker<sup>1</sup>, Christopher A Becker<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Orthopaedics and Trauma Surgery, Musculoskeletal University Center Munich (MUM), University Hospital, LMU Munich, Munich, Germany.

**Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery**

**Volume 143, pages 3111–3117, (2023)**

Published online: 13 July 2022

DOI: <https://doi.org/10.1007/s00402-022-04547-6>



## 7. Paper III

### **How relevant is lumbar bone mineral density for the stability of symphyseal implants? A biomechanical cadaver study**

Fanny Schwaabe<sup>#1</sup>, Johannes Gleich<sup>#1</sup>, Christoph Linhart<sup>1</sup>, Alexander Martin Keppler<sup>1</sup>, Matthias Woiscinski<sup>1</sup>, Christian Kammerlander<sup>2</sup>, Axel Greiner<sup>1</sup>, Wolfgang Böcker<sup>1</sup>, Adrian Cavalcanti Kußmaul<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Orthopaedics and Trauma Surgery, Musculoskeletal University Center Munich (MUM), University Hospital, LMU Munich, Marchioninistr. 15, 81377, Munich, Germany.

<sup>2</sup> AUVA Traumahospital Styria, Graz, Austria.

<sup>#</sup> Contributed equally.

**European Journal of Trauma and Emergency Surgery**

**Volume 48, pages 3101–3108, (2022)**

Published online: 08 December 2021

DOI: <https://doi.org/10.1007/s00068-021-01850-6>

## 8. Literaturverzeichnis

1. Cavalcanti Kußmaul A, Schwaabe F, Kistler M, et al (2022) Novel minimally invasive tape suture osteosynthesis for instabilities of the pubic symphysis: a biomechanical study. *Arch Orthop Trauma Surg* 142:2235–2243. <https://doi.org/10.1007/s00402-021-03968-z>
2. Cavalcanti Kußmaul A, Schwaabe F, Kistler M, et al (2022) Tape suture constructs for instabilities of the pubic symphysis: is the idea of motion preservation a suitable treatment option? A cadaver study. *Arch Orthop Trauma Surg*. <https://doi.org/10.1007/s00402-022-04547-6>
3. Schwaabe F, Gleich J, Linhart C, et al (2022) How relevant is lumbar bone mineral density for the stability of symphyseal implants? A biomechanical cadaver study. *Eur J trauma Emerg Surg Off Publ Eur Trauma Soc* 48:3101–3108. <https://doi.org/10.1007/s00068-021-01850-6>
4. Pohlemann T, Tscherne H, Baumgärtel F, et al (1996) [Pelvic fractures: epidemiology, therapy and long-term outcome. Overview of the multicenter study of the Pelvis Study Group]. *Unfallchirurg* 99:160–167
5. Hauschild O, Strohm PC, Culemann U, et al (2008) Mortality in patients with pelvic fractures: results from the German pelvic injury register. *J Trauma* 64:449–455. <https://doi.org/10.1097/TA.0b013e31815982b1>
6. Culemann U, Oestern HJ, Pohlemann T (2014) [Current treatment of pelvic ring fractures]. *Unfallchirurg* 117:141–145. <https://doi.org/10.1007/s00113-014-2558-7>
7. Grotz MRW, Allami MK, Harwood P, et al (2005) Open pelvic fractures: epidemiology, current concepts of management and outcome. *Injury* 36:1–13. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2004.05.029>
8. Holstein JH, Culemann U, Pohlemann T (2012) What are predictors of mortality in patients with pelvic fractures? *Clin Orthop Relat Res* 470:2090–2097. <https://doi.org/10.1007/s11999-012-2276-9>
9. Bosch U, Pohlemann T, Haas N, Tscherne H (1992) [Classification and management of complex pelvic trauma]. *Unfallchirurg* 95:189–196
10. Gänsslen A, Pohlemann T, Paul C, et al (1996) Epidemiology of pelvic ring injuries. *Injury* 27 Suppl 1:S-A13-20
11. Rommens PM, Heinermann M, Hessmann MH (2004) Notfallmanagement instabiler Beckenverletzungen. *Notfall & Rettungsmedizin* 7:151–160. <https://doi.org/10.1007/s10049-004-0646-x>
12. Fuchs T, Rottbeck U, Hofbauer V, et al (2011) Beckenringfrakturen im Alter. *Unfallchirurg* 114:663–670. <https://doi.org/10.1007/s00113-011-2020-z>
13. Hu S, Guo J, Zhu B, et al (2022) Epidemiology and burden of pelvic fractures: Results from the Global Burden of Disease Study 2019. *Injury*. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2022.12.007>
14. Dodge G, Brison R (2010) Low-impact pelvic fractures in the emergency department. *CJEM* 12:509–513. <https://doi.org/10.1017/s1481803500012732>
15. Oberkircher L, Ruchholtz S, Rommens PM, et al (2018) Osteoporoseassoziierte Fragilitätsfrakturen des Beckenrings. *Dtsch Arztebl Int* 115:70–80
16. Kannus P, Palvanen M, Niemi S, et al (2000) Epidemiology of osteoporotic pelvic fractures in elderly people in Finland: sharp increase in 1970-1997 and alarming projections for the new millennium. *Osteoporos Int a J Establ as result Coop between Eur Found Osteoporos Natl Osteoporos Found USA* 11:443–448. <https://doi.org/10.1007/s001980070112>
17. Kannus P, Palvanen M, Parkkari J, et al (2005) Osteoporotic pelvic fractures in elderly women. *Osteoporos. Int. a J. Establ. as result Coop. between Eur. Found. Osteoporos. Natl. Osteoporos. Found. USA* 16:1304–1305

18. Rommens PM, Ossendorf C, Paireon P, et al (2015) Clinical pathways for fragility fractures of the pelvic ring: personal experience and review of the literature. *J Orthop Sci Off J Japanese Orthop Assoc* 20:1–11. <https://doi.org/10.1007/s00776-014-0653-9>
19. Soles GLS, Ferguson TA (2012) Fragility fractures of the pelvis. *Curr Rev Musculoskelet Med* 5:222–228. <https://doi.org/10.1007/s12178-012-9128-9>
20. Böhme J, Höch A, Josten C (2012) Osteoporotische Frakturen des Beckens. *Der Chir* 83:875–881. <https://doi.org/10.1007/s00104-012-2339-1>
21. Boufous S, Finch C, Lord S, Close J (2005) The increasing burden of pelvic fractures in older people, New South Wales, Australia. *Injury* 36:1323–1329. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2005.02.008>
22. Meinberg EG, Agel J, Roberts CS, et al (2018) Fracture and Dislocation Classification Compendium—2018. *J Orthop Trauma* 32:
23. Pennal GF, Tile M, Waddell JP, Garside H (1980) Pelvic disruption: assessment and classification. *Clin Orthop Relat Res* 12–21
24. Grifka, Joachim: Orthopädie und Unfallchirurgie, 10., überarb. und erw. Aufl., Springer, 2021, S.445
25. Article R, From M, Centre TM, Conventional N (1988) Pelvic Fractures : They Be Fixed ? 70:
26. Young JW, Burgess AR, Brumback RJ, Poka A (1986) Pelvic fractures: value of plain radiography in early assessment and management. *Radiology* 160:445–451. <https://doi.org/10.1148/radiology.160.2.3726125>
27. Rommens PM, Hofmann A (2013) Comprehensive classification of fragility fractures of the pelvic ring: Recommendations for surgical treatment. *Injury* 44:1733–1744. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2013.06.023>
28. Müller-Mai C, Ekkernkamp A (2015) Frakturen auf einen Blick - Klassifikationen und Behandlungstypen
29. Jordan MC, Jäckle V, Scheidt S, et al (2020) [Outcome after plate stabilization of symphyseal diastasis]. *Unfallchirurg* 123:870–878. <https://doi.org/10.1007/s00113-020-00804-8>
30. Putnis SE, Pearce R, Wali UJ, et al (2011) Open reduction and internal fixation of a traumatic diastasis of the pubic symphysis: one-year radiological and functional outcomes. *J Bone Joint Surg Br* 93:78–84. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.93B1.23941>
31. Godinsky RJ, Vrabec GA, Guseila LM, et al (2018) Biomechanical comparison of locked versus non-locked symphyseal plating of unstable pelvic ring injuries. *Eur J trauma Emerg Surg Off Publ Eur Trauma Soc* 44:179–184. <https://doi.org/10.1007/s00068-016-0661-x>
32. Eastman JG, Krieg JC, Routt MLCJ (2016) Early failure of symphysis pubis plating. *Injury* 47:1707–1712. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2016.05.019>
33. Meissner A, Fell M, Wilk R, et al (1998) [Comparison of internal fixation methods for the symphysis in multi-directional dynamic gait simulation]. *Unfallchirurg* 101:18–25. <https://doi.org/10.1007/s001130050227>
34. Morris SAC, Loveridge J, Smart DKA, et al (2012) Is fixation failure after plate fixation of the symphysis pubis clinically important? *Clin Orthop Relat Res* 470:2154–2160. <https://doi.org/10.1007/s11999-012-2427-z>
35. Webb LX, Gristina AG, Wilson JR, et al (1988) Two-hole plate fixation for traumatic symphysis pubis diastasis. *J Trauma* 28:813–817. <https://doi.org/10.1097/00005373-198806000-00016>
36. Moed BR, O'Boynick CP, Bledsoe JG (2014) Locked versus standard unlocked plating of the symphysis pubis in a Type-C pelvic injury: a cadaver biomechanical study. *Injury* 45:748–751. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2013.11.017>
37. MacAvoy MC, McClellan RT, Goodman SB, et al (1997) Stability of open-book pelvic fractures using a new biomechanical model of single-limb stance. *J Orthop Trauma*

- 11:590–593. <https://doi.org/10.1097/00005131-199711000-00008>
38. Kiskaddon EM, Wright A, Meeks BD, et al (2018) A biomechanical cadaver comparison of suture button fixation to plate fixation for pubic symphysis diastasis. *Injury* 49:1993–1998. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2018.09.032>
39. Jordan MC, Bröer D, Fischer C, et al (2022) Development and preclinical evaluation of a cable-clamp fixation device for a disrupted pubic symphysis. *Commun Med* 2:164. <https://doi.org/10.1038/s43856-022-00227-z>
40. Waschke, J., Böckers, T.M., Paulsen, F. (2015) *Sobotta Anatomie - Das Lehrbuch*, 1. Auflage. Elsevier, S.23
41. Walheim G, Olerud S, Ribbe T (1984) Mobility of the pubic symphysis: Measurements by an electromechanical method. *Acta Orthop* 55:203–208. <https://doi.org/10.3109/17453678408992338>
42. Regauer M, Mackay G, Lange M, et al (2017) Syndesmotic InternalBrace(TM) for anatomic distal tibiofibular ligament augmentation. *World J Orthop* 8:301–309. <https://doi.org/10.5312/wjo.v8.i4.301>
43. Barnas M, Kentel M, Morasiewicz P, et al (2021) Clinical assessment and comparison of ACL reconstruction using synthetic graft (Neoligaments versus FiberTape). *Adv Clin Exp Med Off organ Wroclaw Med Univ* 30:491–498. <https://doi.org/10.17219/acem/132036>
44. Becker CA, Kussmaul AC, Suero EM, et al (2019) Tape suture for stabilization of incomplete posterior pelvic ring fractures-biomechanical analysis of a new minimally invasive treatment for incomplete lateral compression pelvic ring fractures. *J Orthop Surg Res* 14:465. <https://doi.org/10.1186/s13018-019-1509-y>
45. Goldhahn J, Suhm N, Goldhahn S, et al (2008) Influence of osteoporosis on fracture fixation—a systematic literature review. *Osteoporos Int a J Establ as result Coop between Eur Found Osteoporos Natl Osteoporos Found USA* 19:761–772. <https://doi.org/10.1007/s00198-007-0515-9>
46. Heuchemer L, Emmert D, Bender T, et al (2020) [Pain management in osteoporosis]. *Orthopade* 49:363–376. <https://doi.org/10.1007/s00132-020-03898-5>
47. Scheyerer MJ, Ullrich B, Osterhoff G, et al (2019) [Hounsfield units as a measure of bone density-applications in spine surgery]. *Unfallchirurg* 122:654–661
48. Bredow J, Boese CK, Werner CML, et al (2016) Predictive validity of preoperative CT scans and the risk of pedicle screw loosening in spinal surgery. *Arch Orthop Trauma Surg* 136:1063–1067. <https://doi.org/10.1007/s00402-016-2487-8>
49. Erhart S, Zegg M, Kralinger F, et al (2015) Fast and easy preoperative estimation of cancellous bone mineral density in patients with proximal femur fractures. *Arch Orthop Trauma Surg* 135:1683–1689. <https://doi.org/10.1007/s00402-015-2340-5>
50. Cavalcanti Kußmaul A, Schwaabe F, Kistler M, et al (2022) Tape suture constructs for instabilities of the pubic symphysis: is the idea of motion preservation a suitable treatment option? A cadaver study. *Arch Orthop Trauma Surg*. <https://doi.org/10.1007/s00402-022-04547-6>
51. Seebeck J, Goldhahn J, Städele H, et al (2004) Effect of cortical thickness and cancellous bone density on the holding strength of internal fixator screws. *J Orthop Res Off Publ Orthop Res Soc* 22:1237–1242. <https://doi.org/10.1016/j.orthres.2004.04.001>
52. Shih K-S, Hou S-M, Lin S-C (2017) Theoretical prediction of pullout strengths for dental and orthopaedic screws with conical profile and buttress threads. *Comput Methods Programs Biomed* 152:159–164. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2017.08.004>
53. Riggs BL, Wahner HW, Dunn WL, et al (1981) Differential changes in bone mineral density of the appendicular and axial skeleton with aging: relationship to spinal osteoporosis. *J Clin Invest* 67:328–335. <https://doi.org/10.1172/JCI110039>

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich die Gelegenheit nutzen, um all jenen zu danken, die mich während meiner gesamten Promotionszeit unterstützt haben.

An erster Stelle bedanke ich mich bei meinem Doktorvater Herrn Professor Dr. med. Böcker für die Ermöglichung meines Forschungsprojektes und die Betreuung meiner Promotion, sowie den weiteren Mitgliedern meines Promotions-Betreuungskomitees, bestehend aus Herrn Professor Dr. med. Kammerlander und Professor Dr. med. habil. Kleber.

Mein weiterer Dank gilt der Arbeitsgruppe für Becken- und Wirbelsäulenchirurgie der LMU, sowie den Ingenieuren des biomechanischen Labors der LMU Manuel Kistler, Christoph Thorwächter und PD Dr. Dipl.-Ing. (FH) Matthias Woiczinski für die Unterstützung und Hilfe bei der Planung und Durchführung meiner Experimente.

Insbesondere gebührt mein Dank meinem Betreuer Herrn Dr. med. Adrian Cavalcanti Kußmaul. Seine Unterstützung, Geduld und fachliche Kompetenz haben mich stets motiviert und inspiriert. Die wertvollen Ratschläge und konstruktive Kritik waren für mich unverzichtbar und haben maßgeblich zu dieser Arbeit beigetragen.

Mein Dank gilt auch Frau Dr. med. Clara Cavalcanti Kußmaul für ihre sowohl fachlich als auch persönlich wertvollen Beiträge und Anregungen.

Zu guter Letzt möchte ich meiner Familie, meinem Freund und meinen engsten Freundinnen und Freunden danken. Ihr Rückhalt und ihre Liebe waren für mich unentbehrlich und haben mich stets motiviert.

Ich widme diese Arbeit meiner Mutter, die mir meinen bisherigen Lebensweg ermöglicht und mich immer bedingungslos und liebevoll unterstützt und motiviert hat.