

Aus der Neurochirurgischen Klinik und Poliklinik
der Universitätsmedizin der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

**Die vergleichende Analyse minimal invasiver Osteosynthesetechniken der
Sakruminsuffizienzfraktur**

Inauguraldissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Medizin
der Universitätsmedizin der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz

vorgelegt von

Martin Naisan

aus Bagdad

Mainz, 2023

Wissenschaftlicher Vorstand:

Univ.-Prof. Dr. U. Förstermann

1. Gutachter:

Univ.-Prof. Dr. F. Ringel

2. Gutachter:

Uni-Prof. Dr. med. Marc Brockmann

Tag der Promotion:

24.09.2024

Inhaltsverzeichnis	
Abkürzungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	7
Abbildungsverzeichnis	7
1 Einleitung	9
2 Literaturdiskussion	11
2.1 Sakrumanatomie	11
2.1.1 Anatomische Verteilung der Knochendichte des Sakrums	12
2.1.2 Sakrumdysmorphie und der sichere Korridor	12
2.2 Ätiologie der Sakrumverletzungen:	13
2.3 Risikofaktoren für Sakruminsuffizienzfrakturen	13
2.4 Epidemiologie der Sakruminsuffizienzfrakturen	14
2.5 Folgen der Sakrumfrakturen	14
2.6 Symptomatik der Sakrumfrakturen	15
2.7 Diagnostik der Sakrumfrakturen	15
2.8 Klassifikation der Beckenfrakturen	16
2.9 Therapie von Sakruminsuffizienzfrakturen	17
2.9.1 Konservative Therapie	17
2.9.2 Operative Therapie von Sakrumfrakturen	18
2.9.2.1 Sakroplastie	18
2.9.2.2 Fixateur externe	18
2.9.2.3 Subkutaner ventraler Fixateur interne	18
2.9.2.4 Perkutane Schraubenosteosynthese des hinteren Beckenrings	19
2.9.2.5 Lumbopelvine Abstützung	20
2.9.2.6 Weitere Verfahren	20
3 Fragestellung	20
4 Material und Methoden	21
4.1 Ein- und Ausschlusskriterien	21

4.2	Untersuchte Parameter	22
4.2.1	Traumaanalyse	22
4.2.2	Schmerzstärke und Mobilität präoperativ	23
4.2.3	FFP-Klassifikation	23
4.2.4	Vordere Beckenringfrakturen	23
4.2.5	Trümmer- und H-Frakturen	23
4.2.6	Frakturlokalisierung im hinteren Beckenring nach Denis-Zonen	23
4.2.7	Knochendichte	23
4.2.8	Operationstechnik	24
4.2.8.1	Schraubenlokalisierung	24
4.2.8.2	Unterlegscheiben	24
4.2.9	Zusätzliche operative Maßnahmen	24
4.2.10	Navigationsdaten	25
4.2.11	Postoperative Aufenthaltsdauer	25
4.2.12	Mobilität bei Entlassung	25
4.3	Studiendesign	26
4.4	Zuweisung und Diagnostik	26
4.5	Gruppierung	26
4.6	Navigation	29
4.7	Operationstechnik der monoportalen perkutanen computernavigierten Schraubenosteosynthese des hinteren Beckenrings mittels zwei transsakraler Schrauben	31
4.8	Postoperative Phase	36
4.9	Statistische Analyse	37
5	Ergebnisse	37
5.1	Patientencharakteristik	37
5.2	Frakturätiologie	37
5.3	Frakturmorphologie	39

5.4	Frakturlokalisierung	40
5.5	Knochendichte	42
5.6	Schmerzstärke und Mobilität	43
5.7	Schraubenlänge und Lokalisation	43
5.8	Unterlegscheiben	44
5.9	Zusätzliche operative Eingriffe	45
5.10	Operationszeit	45
5.11	Intraoperatives CT	46
5.12	Aufenthaltsdauer	47
5.13	Mobilität bei Entlassung	47
5.14	Follow-Up	48
5.15	Schraubenlockerung	50
5.16	Statistische Analyse	52
6	Diskussion	54
6.1	Allgemeines zur Sakruminsuffizienzfraktur	54
6.2	Epidemiologische Aspekte	54
6.3	Operative Behandlungsmöglichkeiten	55
6.4	Vergleichende Analyse der angewandten Osteosynthesetechniken	56
6.5	Frakturmorphologie und –lokalisierung	56
6.6	Kombinierte Frakturen des hinteren und vorderen Beckenrings	58
6.7	Schraubenlockerungsraten und -fehlplatzierungen	58
6.8	Mögliche Ursachen der Schraubenlockerung	59
6.9	Operationsdauer	60
6.10	Postoperatives Outcome	61
6.11	Limitationen	61
7	Zusammenfassung	62
8	Literaturverzeichnis	64
9	Anhang	75

10	Danksagung	93
11	Lebenslauf	94

Abkürzungsverzeichnis

1L2K	Eine lange und zwei kurze Schrauben
2LS	Zwei lange Schrauben
4KS	Vier kurze Schrauben
AP	Anteroposterior
CT	Computertomographie
DXA	Dual X-ray Absorptiometry
FFP	Fragility Fractures of Pelvis
HBRF	Hintere Beckenringfraktur
HU	Hounsfield-Unit
ISG	Iliosakralgelenk
LAN	Local Area Network
LWK 5	Fünfter Lendenwirbelkörper
MRT	Magnetresonanztomographie
MTRA	Medizinisch-technischer Radiologieassistent
OP	Operation
SWK 1	Erster sakraler Wirbelkörper
SWK 2	Zweiter sakraler Wirbelkörper
TIRM	Turbo-Inversion Recovery-Magnitude
TVT	Tiefe Venenthrombose
USB	Universal Serial Bus
VAS	Visuelle Analogskala
VBRF	Vordere Beckenringfraktur
NRS	Numerische Rating-Skala

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einschluss- und Ausschlusskriterien für die untersuchten Sakralminisuffizienzfrakturen	22
Tabelle 2: Gesamtzahl der Patienten mit der Nachkontrolle, Zahl der gelockerten Schrauben und Revisionsrate, Odds-Ratio der Lockerungsraten in Bezug auf Technik 3.	53

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einteilung nach Denis	11
Abbildung 2: Prinzip der AO/OTA-Einteilung der Beckenfrakturen	16
Abbildung 3: FFP-Klassifikation.....	17
Abbildung 4: verschiedene Optionen für die Platzierung der 2 langen Schrauben. A: beide Schrauben im S1, B: 1 Schraube in S1 und 1 in S2	27
Abbildung 5: Verschiedene Optionen zur Platzierung der 1 langen und 2 kurzen Schrauben. A: alle 3 Schrauben in S1, B: die lange in S1 und 2 kurze in S2, C: 2 kurze im S1 und 1 lange im S2.....	28
Abbildung 6: 4 kurze Schrauben in S1	29
Abbildung 7: AIRO-CT, Transport des Patienten in den Operationssaal in die Rückenlage.....	30
Abbildung 8: Der Patient wurde in die Bauchlage gebracht. Drehen des Operationstisches um 90° und Durchführung des intraoperativen CTs	30
Abbildung 9: Zurückdrehen des Patienten, Einrichten des Navigationssystems (Monitor und Infrarotkamera)	31
Abbildung 10: Zirkumferentielle sterile Abdeckung in Bauchlage	32
Abbildung 11: Perkutane Fixierung der Navigationsklemme mittels zwei Schanzschrauben am Beckenkamm	32
Abbildung 12: Durchführung des intraoperativen CTs	33
Abbildung 13: Planung der Trajektorie mit der Offsettingstellung auf der Hautniveau.....	34
Abbildung 14: Planung der Schraubenlänge und Schraubenpositionierung transsakral	34
Abbildung 15: Perkutanes Einführen des Führungsdrahtes transsakral	35

Abbildung 16: Antero-Posteriores BV-Bild mit Implantation von zwei langen transsakralen Schrauben von rechts nach links mit Überbrückung der beiden Iliosakralgelenke.....	35
Abbildung 17: Laterales BV-Bild der zwei transsakral implantierten langen Schrauben in S1	36
Abbildung 18: Geschlechterverteilung der Patient*innen mit osteoporotischen Beckenfrakturen	38
Abbildung 19: Frakturätiologie	38
Abbildung 20: Einteilung der Frakturen nach der FFP-Klassifikation.....	39
Abbildung 21: Lokalisation der hinteren Beckenfrakturen.....	39
Abbildung 22: Vorhandensein und Lokalisation der vorderen Beckenringfrakturen..	40
Abbildung 23: Prozent der Beckeninsuffizienzfrakturen mit Trümmerzonen.....	41
Abbildung 24: Fraktуреinteilung nach betroffenem Sakrumdrittel	42
Abbildung 25: Prozentueller Anteil der H-Frakturen am Gesamtkollektiv	42
Abbildung 26: Einteilung nach der Operationstechnik	43
Abbildung 27: Schraubenlokalisation in S1 und S2	44
Abbildung 28: Verhältnis der Unterlegscheiben.....	45
Abbildung 29: Operationsdauer der drei Operationstechniken im Vergleich.....	46
Abbildung 30: Verwendung von AIRO-CT	47
Abbildung 31: Balkendiagramm, Mobilität der operierten Patienten bei der Entlassung	48
Abbildung 32: Prozent der Patienten, die zur geplanten Kontrolle erschienen	48
Abbildung 33: Schmerzstärke nach 3 Monaten postoperativ auf der visuellen Analogskala.....	49
Abbildung 34: Schmerzstärke nach 12 Monaten postoperativ auf der VAS	50
Abbildung 35: Lockerungsrate insgesamt.....	51
Abbildung 36: Lockerungsrate in Abhängigkeit der Operationstechnik.....	51
Abbildung 37: Anzahl der Patienten mit gelockerten schrauben, je nach Operationstechnik.....	52

1 Einleitung

Die Inzidenz von Sakrumfrakturen steigt v.a. in der geriatrischen Bevölkerungsgruppe deutlich an (1). Heutzutage stehen viele Versorgungsmöglichkeiten, u.a. minimalinvasive Maßnahmen zur Verfügung.

Der zur Fraktur führende Unfallmechanismus und die Knochenqualität von älteren und jüngeren Patient*innen unterscheiden sich deutlich, entsprechend stehen unterschiedliche Primärziele der Versorgung im Fokus. Da bei jüngeren Patient*innen mit einer Beckenringverletzung in der Regel ein Hochrasanztrauma zugrunde liegt, sind Begleitverletzungen des Skelettes insgesamt und der Beckenorgane mit teilweise schwerwiegendem Blutverlust nicht selten. Eine schnellstmögliche Notfallversorgung und operative Therapie stehen hier im Mittelpunkt (2).

Bei geriatrischen Patient*innen hingegen liegt der Verletzung in der Regel eine Osteoporose zugrunde. Es genügt ein Bagateltrauma, um eine Insuffizienzfraktur zu verursachen. Unter Umständen lässt sich auch kein stattgehabtes Trauma eruieren (1,3–6). Eine begleitende Blutung oder weitere Verletzungen stellen die Ausnahme dar (7). Das Hauptziel der Therapie ist die Wiederherstellung der Funktionalität zur Vermeidung der Immobilität. Zur Minimierung des allgemeinen Frakturrisikos ist es bei diesen Patienten obligat eine Osteoporosediagnostik und ggf. -therapie in die Wege zu leiten.

Zur Stabilisierung von Beckenfrakturen haben sich stetig neue Techniken und Verfahren entwickelt. Je nach Frakturmorphologie, Instabilitätsgrad und Becken-Anatomie kommen verschiedene Osteosyntheseverfahren zum Einsatz. Die Vorteile minimalinvasiver Techniken mit geringeren Operationszeiten und Weichteiltrauma kommen v.a. älteren Patienten zugute, weshalb die Verbreitung dieser Methoden zunimmt (7).

In der vorliegenden Studie wird hauptsächlich die perkutane computernavigierte Schraubenosteosynthese des hinteren aber auch des vorderen Beckenrings beleuchtet. Dieses Verfahren wird mittels intraoperativem CT und 3D-Navigationssystem durchgeführt, was eine präzise perkutane Platzierung der zu implantierenden Schrauben ermöglicht. Hierbei können entsprechend der interindividuell variablen Beckenanatomie sowie des Frakturverlaufs unterschiedliche

Osteosynthesetechniken angewandt werden. Es stehen prinzipiell mono- und biportale Techniken mit einer einseitigen bzw. beidseitigen Inzision im seitlichen Gesäßbereich zur Verfügung. In beiden Fällen ist eine bilaterale Schraubenosteosynthese durchführbar.

In der aktuellen Literatur stehen nur wenige Studien zur Untersuchung der Schraubenlockerungsrate zu Verfügung. Diese beziehen sich in der Regel auf Implantatlockerungen des Gesamtkonstrukts, ohne weitere Differenzierung im Hinblick auf die angewandte Osteosynthesetechnik.

Primäres Ziel der Arbeit ist es daher die verschiedenen zur Verfügung stehenden Osteosynthesetechniken hinsichtlich des Implantatversagens (Schraubenlockerung, -dislokation) und der sich daraus ergebenden Revisionsrate zu vergleichen. Im Rahmen der statistischen Analyse relevanter klinischer und radiologischer Parameter sollen in Frage kommende Risikofaktoren für ein Implantatversagen identifiziert werden. Darüber hinaus werden allgemeine operative Parameter sowie das funktionelle Outcome der Patienten analysiert.

2 Literaturdiskussion

2.1 Sakrumanatomie

Das Sakrum ist ein dreieckiger bzw. schildförmiger Knochen, der die Wirbelsäule mit dem Becken verbindet. Kranial ist seine Basis von der Bandscheibe LWK5/SWK1 begrenzt. Die Spitze ist nach kaudal hin zum Steißbein gerichtet. Die ventrale Seite ist konkav und die dorsale Seite konvex geformt. Das Sakrum besteht aus fünf miteinander verschmolzenen Wirbelkörpern. Lateral zu diesen Wirbelkörpern befinden sich die sakralen Neuroforamina. Wiederum lateral der Neuroforamina bildet die Massa lateralis Os sacri das Iliosakralgelenk (ISG) mit dem Os ilium (8).

Denis et al. unterteilten das Sakrum in drei Hauptzonen (Fig. 1) (9). Die Zone I besteht demnach aus der Massa lateralis, die Knochenmasse zwischen den Neuroforamina und den Iliosakralgelenken. Diese Zone stellt die häufigste Lokalisation von Sakruminsuffizienzfrakturen dar, die im Rahmen von Bagateltraumata bei osteoporotischer Knochenstruktur auftreten können. Die Zone II enthält die Neuroforamina und die Zone III die sakralen Wirbelkörper.

Der sakrale Spinalkanal erstreckt sich entlang des dorsalen Aspekts des Sakrums. Der Spinalkanal beinhaltet die Dura mater, die wiederum die Nervenwurzeln der Cauda equina beinhaltet und die auf Höhe des zweiten Sakralwirbelkörpers endet.

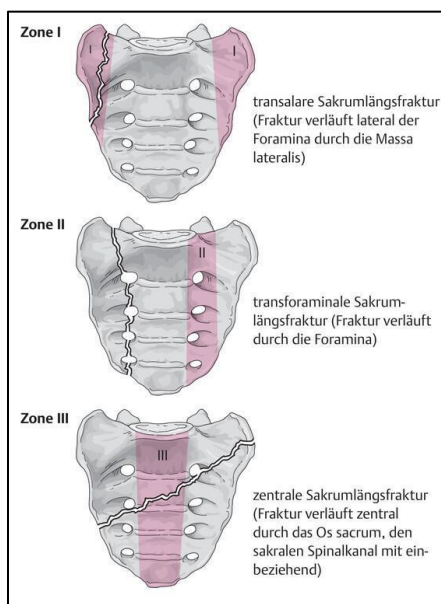


Abbildung 1: Einteilung nach Denis

Quelle: Praxis der Orthopädie und Unfallchirurgie, hrsg. Von C.J. Wirth, W. Mutschler, 2. Aufl. Thieme, Stuttgart 2009

2.1.1 Anatomische Verteilung der Knochendichte des Sakrums

Die Knochendichte variiert in den verschiedenen anatomischen Arealen des Sakrums deutlich. In ihrer Arbeit aus 2016 zeigten Wagner et al. eine unterschiedliche Verteilung der Knochenmasse. Die geringste Knochendichte fand sich in der paraforaminalen Region der Massae laterales auf Höhe S1 bis S3. Eine mittlere Dichte fand sich im Bereich der sakralen Wirbelkörper (10).

Die in der Regel dominierende vertikale Komponente der Insuffizienzfrakturen verläuft häufig bilateral durch die Massae laterales des Sakrums und weniger häufig durch dessen Zentrum, welches die axial wirkende Last der Wirbelsäule aufnimmt (11).

2.1.2 Sakrumdysmorphie und der sichere Korridor

Aufgrund seiner komplexen Anatomie stellt das Sakrum hohe Ansprüche an die Präzision der angewandten chirurgischen Technik. Eine individuelle präoperative Beurteilung der Sakrumanatomie mit Planung der passenden Versorgung ist unabdingbar. Für die minimalinvasive perkutane Schraubenosteosynthese ist der sogenannte sichere Korridor erforderlich. Dieser beschreibt den horizontalen knöchernen transsakralen Korridor, welcher zwischen der Kortikalis des Sakrums ventral und dorsal, der angrenzenden Bandscheibe kranial und den beiden Neuroforamina S1 für den ersten Sakrumwirbel (S1-Korridor) bzw. den S1-Neuroforamina kranial und den S2-Neuroforamina kaudal für den zweiten Sakrumwirbel (S2-Korridor) verläuft (12,13). Von einem sicheren Korridor ist die Rede, wenn eine 7,3 mm Schraube im gesamten Verlauf intraossär transsakral platziert werden kann (14). Sollte dieser sichere Korridor nicht vorliegen spricht man von einer Dysmorphie oder Dysplasie des Sakrums (12). Die Prävalenz der Sakrumdysmorphie liegt bei 12-35 %, wobei Frauen (19 %) häufiger betroffen sind als Männer (12 %) (12,13,15). Auch das durchschnittliche Volumen des Korridors zeigt sich bei Frauen signifikant kleiner als bei Männern (16,17). Weiterhin unterscheiden sich die S1- und S2-Korridore qualitativ voneinander. Im Vergleich besitzt der S2-Korridor eine geringere Knochenmasse als der S1-Korridor (18) mit einem Unterschied von 90 Hounsfield Units (HU) zugunsten des S1-Korridors (19).

2.2 Ätiologie der Sakrumverletzungen:

Es können zwei Altersgruppen von Patient*innen mit einer Sakrumverletzung unterschieden werden.

In der Gruppe der jüngeren Patient*innen ist eine Verletzung des Sakrums meist Folge eines Hochenergietraumas, wie z.B. im Rahmen von Verkehrsunfällen oder Stürzen aus großer Höhe. In der Gruppe der älteren Patient*innen mit einem Alter > 60 Jahre treten Beckenverletzungen häufig als Insuffizienzfrakturen auf. In diesem Fall entsteht die Fraktur durch ein Bagatelltrauma oder ohne stattgehabtes Trauma (1,3–6). Per Definition: Die Insuffizienzfraktur ist eine Fraktur, die durch eine Gewalteinwirkung verursacht wird, die nicht ausreicht, um normalen Knochen zu brechen, und die das Ergebnis einer verringerten Druck- und/oder Torsionsfestigkeit des Knochens ist (20).

Während Sakrumverletzungen, die als Folge eines Hochenergietraumas auftreten, mit einer erhöhten Blutungsgefahr und potentiell hämodynamischer Instabilität sowie mit zusätzlichen Verletzungen des Beckens und der Beckenorgane assoziiert sein kann (2), tritt ein solches Verletzungsmuster bei Sakruminsuffizienzfrakturen selten auf (7).

Das Hauptziel der Primärversorgung von Sakrumverletzungen bei jüngeren Patient*innen ist die Stabilisierung des hämodynamischen Zustandes nach den Prinzipien des Damage-Controls. Hierbei kommen unterschiedliche Verfahren zum Einsatz, wie z.B. der Beckengurt in der präklinischen Phase bis hin zur Beckenzange oder einem Fixateur externe in der innerklinischen Versorgung (2). Nach Stabilisierung der Vitalfunktionen ist die definitive operative Versorgung zu planen.

Bei der Gruppe der älteren Patient*innen besteht das Hauptziel in der Wiederherstellung der Frühmobilisation zur Vermeidung von Immobilitätskonsequenzen.

Ein weiterer Unterschied ist die Möglichkeit der Progression des Instabilitätsgrades der Insuffizienzfraktur bei älteren Patient*innen im Vergleich zu den traumatischen Frakturen bei jüngeren Patient*innen, bei denen die Frakturmorphologie von der Qualität und Quantität des Primärtraumas abhängt und unverändert bleibt (21).

2.3 Risikofaktoren für Sakruminsuffizienzfrakturen

Der Hauptrisikofaktor der Insuffizienzfrakturen ist die Osteoporose (22). Diese ist eine sehr häufige altersbedingte Krankheit mit Minderung der Knochendichte aufgrund von knöcherner Resorption (23). Zu den anderen Risikofaktoren zählt die stattgehabte

Radiatio des Sakrums, eine rheumatoide Arthritis, eine prolongierte Einnahme von Cortison, Niereninsuffizienzen sowie die lokalen mechanischen Änderungen nach Hüftgelenksoperationen (24–27). Das weibliche Geschlecht und höheres Alter sind weitere Risikofaktoren. Fast alle Patient*innen mit Sakruminsuffizienzfrakturen sind älter als 55 Jahre mit einem durchschnittlichen Alter von 70 bis 75 Jahren (28–31).

2.4 Epidemiologie der Sakruminsuffizienzfrakturen

Der demographische Wandel und die zunehmende Lebenserwartung führen zu einem Anstieg der Inzidenz osteoporotischer Frakturen, v.a. des Beckenrings (32). In Deutschland zeigt sich die Inzidenz der Beckenverletzungen bei Patient*innen, die älter als 60 Jahre sind, deutlich höher als die in der internationalen Literatur beschriebenen Zahlen (33).

Die gesammelten Daten aus den USA, Deutschland, Niederlanden und Finnland ergeben eine Zunahme der Inzidenzrate der Sakruminsuffizienzfrakturen, v.a. in der Bevölkerung über 80 Jahren (1,33–35).

Im Jahr 2019 zeigte sich eine Gesamtsumme der Sakruminsuffizienzfrakturen von 40.571 mit einer Inzidenz von 59,8/100000 Einwohner, was einem Anstieg von 39 % seit 2009 entspricht (36).

2.5 Folgen der Sakrumfrakturen

Sakrumfrakturen sind mit einer signifikant erhöhten Morbiditäts- und Mortalitätsrate assoziiert (6,37,38). Die 1-Jahres-Mortalität nach Beckenfrakturen liegt bei 8-27 % (33,39–41). Unbehandelt führen Beckenfrakturen zum Verlust der Selbstständigkeit (26), maßgeblich aufgrund der resultierenden Immobilität mit einhergehenden Sekundärerkrankungen wie z.B. tiefen Beinvenenthrombosen (29-61 %), Lungenembolien (2-12 %), Minderung der Muskelmasse, kardialen Dysfunktionen, Depression, Pneumonien, Dekubitus und einer fortschreitenden Knochendemineralisierung (42).

Die steigende Inzidenz dieser Verletzungen und der einhergehenden Sekundärerkrankungen resultieren in erhöhten Behandlungskosten mit einer deutlichen ökonomischen Mehrbelastung des Gesundheitssystem (43–46).

2.6 Symptomatik der Sakrumfrakturen

Patient*innen mit Beckeninsuffizienzfrakturen beklagen in der Regel unspezifische Rückenschmerzen. Diese können ins Gesäß, aber auch in die Leiste oder in die Hüfte ausstrahlen (29,47,48). Neurologische Symptome fallen in lediglich 5-6 % der Fälle auf, häufig einhergehend mit einer sakralen Radikulopathie (49). Ein einzelner Fall des Cauda-equina-Syndroms als Folge einer Beckeninsuffizienzfraktur wurde publiziert (50).

2.7 Diagnostik der Sakrumfrakturen

An erster Stelle der bildgebenden Diagnostik steht in der Regel die native Röntgenaufnahme, die in der Notaufnahme oder von den behandelnden Ärzten im ambulanten Sektor veranlasst wird. Die Insuffizienzfrakturen des Sakrums sind jedoch mittels konventioneller Röntgendiagnostik nur schwer darzustellen und bleiben oft okkult (51–53), weshalb davon auszugehen ist, dass Sakruminsuffizienzfrakturen tendenziell unterdiagnostiziert sind (52).

Die Schnittbildgebung ist maßgebend für die Diagnosestellung, wobei die Magnetresonanztomographie (MRT) die wesentliche bildgebende Modalität darstellt (54). Als weiteres bildgebendes Verfahren ermöglicht die Computertomographie (CT) die Visualisierung der Frakturlinien, was die Evaluation der biomechanischen Instabilität ermöglicht (55). Die MRT ist jedoch das bildgebende Verfahren der ersten Wahl bei Verdacht auf Sakruminsuffizienzfrakturen, wobei das gesamte Becken zum Ausschluss von Frakturen des Os pubis oder des Acetabulums dargestellt werden sollte (54). Während die CT eine Sensitivität von nur 66-83 % bietet (56,57), besitzt die MRT eine Sensitivität von bis zu 98,6 % (56). Hierdurch kann das Übersehen von Sakruminsuffizienzfrakturen und/oder zusätzlichen Frakturen der kontralateralen Massae laterales verringert werden (58). Eine folglich unzureichende osteosynthetische Versorgung durch eine monolaterale Osteosynthese kann hierdurch ebenfalls vermieden werden (59).

Sakruminsuffizienzfrakturen beziehen meistens die Massae laterales in der Zone I nach Denis ein (9). Die Fraktur kann mit vergleichbarer Häufigkeit sakral uni- oder bilateral vorliegen (49,60). Die Fraktur kann ebenso quer durch die sakralen Wirbelkörper verlaufen (61,62). In 88 % ist eine Koinzidenz von Frakturen des Os pubis zusätzlich zu Sakrumfrakturen zu sehen (60). Weitere Frakturen können aber auch im Azetabulum oder Os ilium auftreten (25,48).

2.8 Klassifikation der Beckenfrakturen

Für traumatische Beckenfrakturen, die in der Regel bei jungen Patienten auftreten, findet die AO-Klassifikation breite Anwendung. Bei der A-Verletzung bleibt der dorsale Beckenring intakt. Eine inkomplette Unterbrechung des dorsalen Beckenrings gilt als partiell instabil und ist bei begleitender Verletzung des ventralen Ringes als B-Verletzung zu betrachten. Die instabile C-Verletzung beinhaltet eine komplette Unterbrechung des dorsalen Beckenrings mit Verletzung des vorderen Ringes (63) (Abb. 2).

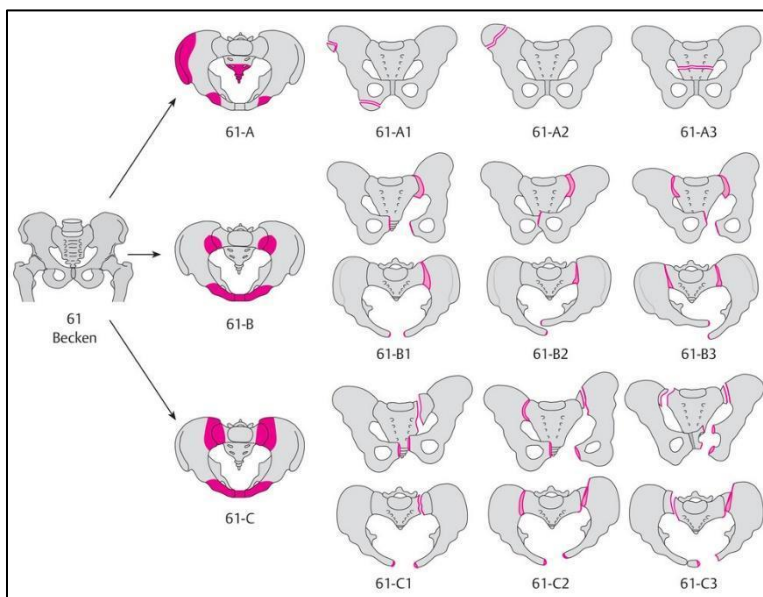


Abbildung 2: Prinzip der AO/OTA-Einteilung der Beckenfrakturen

Quelle: Finkenzeller G, Baierlein S. AO/OTA-Klassifikation. In: Baierlein S, Hrsg. Frakturklassifikationen. 1. Auflage. Stuttgart: Thieme; 2011. Doi:10.1055/b-002-41857

In Anbetracht der Unterschiede zu Hochrasanzverletzungen ist eine eigenständige Klassifikation der Insuffizienzfrakturen unerlässlich. Für die Insuffizienzfrakturen haben Rommens und Hofmann 2013 die FFP-Klassifikation vorgeschlagen, die die Frakturen in vier Hauptgruppen unterteilt. Als FFP I werden die Frakturen des vorderen Beckenrings beschrieben. Die FFP-II-Gruppe umfasst die nicht dislozierten uni- oder bilateralen hinteren Beckenringfrakturen, mit oder ohne Beteiligung des vorderen Beckenrings. Unilateral dislozierte Frakturen sind in der FFP-III-Gruppe zu finden. Die FFP-IV-Gruppe beschreibt bilaterale hintere dislozierte Beckenringfrakturen (21) (Abb. 3).

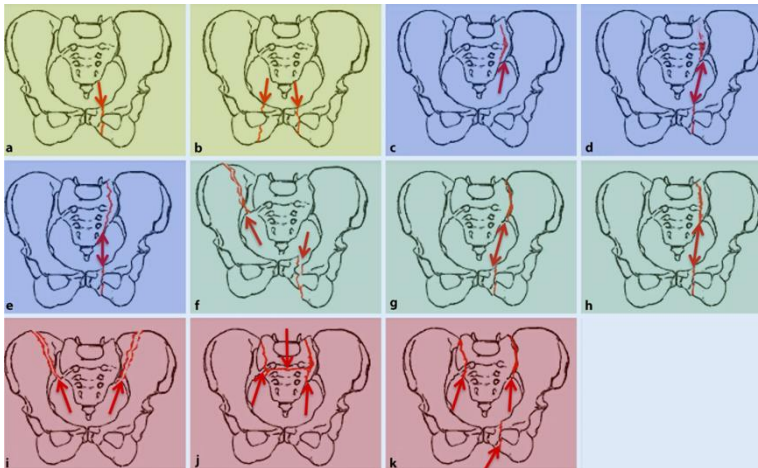


Abbildung 3: FFP-Klassifikation

Quelle: Grieser T. (2020) Radiologische Diagnostik von Beckenfrakturen. Radiologie 60:226-246.

Eine Schwachstelle dieser Klassifikation ist ihre Komplexität. Die nicht eindeutige Definition einer dislozierten Fraktur in FFP-III und einer nicht dislozierten Fraktur in FFP-II macht selbst für erfahrene Untersucher eine präzise Zuordnung schwierig. Zudem wird die Rolle der MRT in der Diagnostik und Klassifikation vernachlässigt (64).

2.9 Therapie von Sakruminsuffizienzfrakturen

2.9.1 Konservative Therapie

Die konservative Therapie galt lange Zeit als Goldstandard bei der Behandlung von Becken- bzw. Sakruminsuffizienzfrakturen. Einige Autoren empfehlen strenge Bettruhe mit schmerzadaptierter Analgesie (27,48,49), während andere die Mobilisation an Unterarmgehstützen oder Gehbock unter entsprechender Analgesie (30) oder eine frühe physikalische Rehabilitation befürworten (42,47). Die Ergebnisse der konservativen Therapie sind jedoch oft nicht zufriedenstellend. Die Behandlungsdauer ist verlängert und variiert stark. Bei vielen Patientinnen verbessern sich die Symptome nach etwa 12 Monaten, mit einer Spanne von 6 bis 15 Monaten (7,29,42,47–49). Trotz konservativer Behandlung persistieren die Symptome bei einem erheblichen Anteil der Patientinnen, und das Risiko für eine sekundäre Morbidität steigt durch die verlängerte Bettruhe signifikant (42). In der Folge verschlechtert sich der allgemeine Gesundheitszustand bei 50 % der konservativ behandelten Patient*innen dauerhaft. Die Gesamtsterblichkeit liegt bei 14,3 % (26).

2.9.2 Operative Therapie von Sakrumfrakturen

2.9.2.1 Sakroplastie

Die Sakroplastie ist ein minimalinvasives Verfahren, das schnelle Schmerzlinderung und frühere Mobilisation ermöglicht, mit einer Reduktion der Analgetikaeinnahme und Verringerung immobilitätsassoziierter Komplikationen. Bei der Sakroplastie wird Polymethylmethacrylat (PMMA), ähnlich wie bei der Kyphoplastie, unter fluoroskopischer Kontrolle über perkutane Trokare in das Sakrum injiziert (28,65–68). Einige Autoren betrachten die Sakroplastie als sicheres und effektives Verfahren zur Schmerzbehandlung (28,66,68,69). Als typische, aber nicht ungefährliche Komplikation kann es zu einem Austritt des applizierten Zements kommen. Zementaustritte aus der Frakturzone werden in bis zu 27 % beschrieben, in bis zu 3 % sind die Neuroforamina betroffen. Die meisten Zementaustritte sind jedoch lokal begrenzt und bleiben asymptomatisch (70).

2.9.2.2 Fixateur externe

Die perkutane Stabilisierung mittels Fixateurs externe ist eine minimalinvasive und schnelle Methode zur Stabilisierung von Beckenfrakturen, vor allem im Bereich des vorderen Beckenrings. Dieses Verfahren kann isoliert als definitive Therapie oder in Kombination mit der Osteosynthese des hinteren Beckenrings angewandt werden. Eine ausreichende mechanische Stabilität des hinteren Beckenrings wird jedoch nicht erreicht (71). Für den vorderen Beckenring werden zwei Schanzschrauben supraacetabulär eingebracht und mittels ein bis zwei Carbonstangen verbunden (72,73). Die Vorteile sind die relativ schnelle Durchführung der Stabilisierung mit Schonung der Weichteile, vor allem bei Polytraumapatienten mit schwerer Weichteilverletzung. Im Vergleich zur internen Fixation des hinteren Beckenrings zeigt die externe Fixation jedoch etwa 20-30 % weniger Stabilität (7). Als definitive Versorgung eignet sich der supraacetabuläre Fixateur externe für die Typ-B-Verletzungen, bei Typ-C-Verletzungen nur in Kombination mit einer zusätzlichen dorsalen Stabilisierung (74). Bei geriatrischen Patient*innen mit Insuffizienzfrakturen kommt das Verfahren nur selten zum Einsatz.

2.9.2.3 Subkutaner ventraler Fixateur interne

Als Alternative zum Fixateur externe wurde der Fixateur interne entwickelt. Hier werden statt der Schanzschrauben Pedikelschrauben supraacetabulär eingesetzt, die mit einem subkutan eingeschobenen Stab verbunden werden (75). Dieses Verfahren

wurde erstmals 2009 von Küttner et al. beschrieben. Durch die vollständige interne Fixierung entfällt die hygienische Pflege des Osteosynthesematerials an den Insertionsstellen der Pins. Somit ist die Infektionsgefahr eines Fixateur interne deutlich geringer als die eines Fixateur externe (76,77). Weiterhin konnte eine höhere Patientenzufriedenheit bei Verwendung eines Fixateur interne gezeigt werden (78). In einer klinischen Studie mit 19 Patient*innen zeigten 31,6 % ausgezeichnete bis gute, 63,2 % mäßige und 5,3 % unzufriedenstellende Ergebnisse (75). Im Falle einer nicht zu stillenden retroperitonealen Blutung ist eine Erweiterung der Operation durch einen ventralen retroperitonealen Zugang in Rückenlage möglich (79). Das Risiko einer Verletzung des N. cutaneus femoralis lateralis durch den Fixateur interne liegt bei 48 % und beim Fixateur extern bei 0-7 % (80).

2.9.2.4 Perkutane Schraubenosteosynthese des hinteren Beckenrings

Die perkutane Stabilisierung des hinteren Beckenrings mittels Schraubenosteosynthese ist eine häufig angewandte Technik, die in der konventionellen Form jedoch hohe Ansprüche an den Operateur stellt. Die transiliosakrale Schraubenosteosynthese existiert seit 1934 und wurde erstmals von Lehmann offen durchgeführt (81). Die minimalinvasive Technik wurde erstmals von Ebraheim und Duwelius beschrieben (82,83). Durch die zunehmende Entwicklung der intraoperativen Bildgebungsmöglichkeiten gewann diese Technik zunehmend an Bedeutung.

Die Positionierung der Schrauben kann offen ohne Bildgebung, aber auch mit Hilfe von konventionellen Bildwandlern, 3D-Bildwandlern oder Navigationssystemen durchgeführt werden. Das Risiko einer Fehlpositionierung der Schrauben ist bei Verwendung eines Navigationssystems geringer und mit weniger Bestrahlung im Vergleich zur konventionellen Technik verbunden (84).

Es herrscht Uneinigkeit über die Anzahl und Lokalisation der zu implantierenden Schrauben (85–90). In biomechanischen Studien zeigten zwei Schrauben in S1 oder eine Schraube in S1 und die zweite in S2 die größtmögliche Implantatstabilität (86,89,90). Je nach Frakturlokalisierung können die Schrauben beidseitig iliosakral oder von einer Seite transsakral implantiert werden. Dies hängt von der Erfahrung des Operateurs, aber auch von der zur Verfügung stehenden Bildgebungstechnik und der Sakrumanatomie ab.

2.9.2.5 Lumbopelvine Abstützung

Die lumbopelvine Abstützung bezweckt die Kraftübertragung von der Wirbelsäule auf das Becken unter Umgehung des Sakrums. Dieses Verfahren wurde 1994 von Käch und Trentz als erstes Distraktionsosteosynthesensystem entwickelt (91). Die Reposition der Fraktur in der Vertikalebene kann über die interne Fixation gesichert werden. Die Horizontalebene lässt sich durch eine zusätzliche transiliosakrale Verschraubung im Sinne einer triangulären lumbopelvinen Abstützung stabilisieren (92). Dies bietet eine zusätzliche Rotationsstabilität und ermöglicht die postoperative Vollbelastbarkeit.

2.9.2.6 Weitere Verfahren

Weitere zur Verfügung stehende Verfahren umfassen die Beckenzwinge für Notfälle, Plattenosteosynthesen des hinteren und vorderen Beckens sowie Schraube-in-Schraube-Systeme und transalare Fixateure.

3 Fragestellung

Mit fortschreitender Entwicklung technischer Hilfsmittel entstehen kontinuierlich neue Verfahren in der chirurgischen Praxis. Ein spezielles Interessensgebiet stellt hierbei der Vergleich zwischen monoportalen transsakralen und biportalen iliosakralen Schraubenosteosynthesen bei Sakruminsuffizienzfrakturen dar. In der aktuellen Literatur existieren jedoch nur wenige Studien, die sich detailliert mit diesem Vergleich befassen. Angesichts dieser Forschungslücke verfolgt die vorliegende Studie das Ziel, ein umfassenderes Verständnis über den Therapieerfolg und die möglichen Komplikationen der verschiedenen minimal-invasiven Techniken zu gewinnen.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurden die Patient*innen entsprechend der bei ihnen angewandten Operationstechnik in verschiedene Untergruppen eingeteilt. Die Sammlung und Analyse relevanter klinischer und radiologischer Daten bildeten die Grundlage dieser Studie, um nicht nur die unterschiedlichen Operationstechniken zu vergleichen, sondern auch deren spezifische Auswirkungen auf den Therapieerfolg zu untersuchen.

4 Material und Methoden

Es wurden die Daten aller Patient*innen, die zwischen 2018 und 2022 im Wirbelsäulenzentrum des St. Josefs-Hospitals Wiesbaden aufgrund einer Sakrumfraktur behandelt wurden, retrospektiv ausgewertet. Jährlich werden in diesem Zentrum etwa 40 Beckenverletzungen, vorwiegend osteoporotische Frakturen geriatrischer Patient*innen, mittels perkutaner Schraubenosteosynthese operativ versorgt.

Im Untersuchungszeitraum wurden 133 Beckenverletzungen operativ behandelt, davon waren 122 osteoporotische Frakturen, zwei tumorbedingte Frakturen und neun traumatische Fälle.

Retrospektiv wurden folgende Daten erhoben: Alter, Geschlecht, Vorhandensein eines Traumas, Schmerzstärke, neurologischer Status, Allgemeinzustand der Patient*innen, Operationsdauer und die stationäre Aufenthaltsdauer nach der Operation. Außerdem erfolgte die Klassifizierung der Frakturen nach der FFP-Klassifikation, unter Berücksichtigung der Frakturmorphologie sowie der Sakrumanatomie.

4.1 Ein- und Ausschlusskriterien

In dieser Studie wurden ausschließlich geriatrische Patient*innen mit Sakruminsuffizienzfrakturen, die mittels perkutaner Osteosynthese minimalinvasiv behandelt wurden, untersucht.

Zur Beurteilung der Schmerzstärke kam die numerische Ratingskala (NRS) zum Einsatz. Hierbei wird die Schmerzstärke der Patient*innen auf einer Skala von 0 bis 10 bewertet. Zudem wurde der Allgemeinzustand der Patient*innen nach dem ASA-Score beurteilt.

Patient*innen mit starken Schmerzen (NRS > 5) und schmerzbedingter Immobilität trotz konservativer Therapie wurden operativ behandelt.

Ausgeschlossen wurden jüngere Patient*innen, Patient*innen mit Hochrasanztrauma oder pathologischen Sakrumfrakturen aufgrund von Metastasen oder Zustand nach Radiotherapie. Ebenfalls ausgeschlossen wurden Patient*innen, die erfolgreich konservativ behandelt werden konnten, operationsunfähig waren oder die operative Versorgung ablehnten. Des Weiteren wurden Patient*innen ausgeschlossen, die mittels anderer Verfahren, wie etwa der lumbopelvinen Abstützung, behandelt wurden.

Eingeschlossen waren auch Patient*innen mit minimalinvasiver iliosakraler Schraubenosteosynthese, auch in Kombination mit anderen operativen Eingriffen in anderen Wirbelsäulenabschnitten außerhalb des Beckens (z.B. zusätzliche Dekompression, Kyphoplastie oder Spondylodese). Jedoch wurden diese Fälle in der Statistik für die Operationszeit nicht berücksichtigt. Einen Überblick über die Ein- und Ausschlusskriterien bietet Tabelle 1.

Einschlusskriterien	Ausschlusskriterien
Alter > 60	Alter < 60
Insuffizienzfrakturen spontan oder nach Bagatelltrauma	Hochrasanztrauma
Osteoporotische Frakturen	Traumatische und pathologische Frakturen
Operativ versorgte Sakrumfrakturen	Konservativ behandelte Sakrumfrakturen, Operationsunfähige Patient*innen
Operative Versorgung mittels minimalinvasiver Schraubenosteosynthese	Operative Versorgung der Sakrumfrakturen mittels anderer Verfahren (z.B. lumbopelvine Abstützung, Sakroplastie oder interne/externe Fixateuren).

Tabelle 1: Einschluss- und Ausschlusskriterien für die untersuchten Sakruminsuffizienzfrakturen

4.2 Untersuchte Parameter

4.2.1 Traumaanalyse

Es wurden ausschließlich osteoporotische Frakturen betrachtet, bei denen in der Regel ein Bagatelltrauma, wie der Sturz aus dem Stand oder vom Stuhl die Ursache für die Fraktur ist. Ein relevanter Teil der Frakturen tritt jedoch auch spontan ohne stattgehabtes Trauma auf, sodass zur Analyse des Pathomechanismus zwischen Bagatellverletzungen und atraumatischen Situationen unterschieden wurde.

4.2.2 Schmerzstärke und Mobilität präoperativ

Die Schmerzstärke wurde auf der numerischen Ratingskala (NRS) eingeschätzt, wobei entsprechend der Einschlusskriterien dieser Studie und als Voraussetzung zur operativen Therapie präoperativ ausschließlich Werte > 5 erhoben wurden. Präoperativ waren alle Patient*innen per Einschlusskriterium schmerzbedingt immobil trotz ausreichender analgetischer Therapie über mehrere Tage.

4.2.3 FFP-Klassifikation

Alle Frakturen wurden gemäß der FFP-Klassifikation nach Rommens klassifiziert.

4.2.4 Vordere Beckenringfrakturen

Das Vorhandensein von Frakturen des vorderen Beckenrings kann die Stabilität zusätzlich beeinflussen. Diese wurden, sofern technisch durchführbar, mittels retrograder Schraubenosteosynthese des Os pubis stabilisiert. Symphysennahe oder multifragmentäre Frakturen wurden nicht behandelt.

4.2.5 Trümmer- und H-Frakturen

Innerhalb der FFP-Klassifikation werden sowohl dislozierte als auch undislozierte Frakturen unterschieden. Allerdings fehlt in dieser Klassifikation eine klare Definition für Dislokationen. Zusätzlich zur Einteilung der Frakturen gemäß der FFP-Klassifikation erfolgte daher in dieser Studie eine weitere Kategorisierung, je nachdem, ob eine Trümmerzone oder eine H-Fraktur vorlag. Dies ermöglichte eine eigenständige Risikoanalyse für diese Variablen, die in der FFP-Klassifikation nicht berücksichtigt wurden. In dieser Arbeit werden mehrfragmentäre Sakrumfrakturen als Trümmerfrakturen bezeichnet. H-Frakturen kennzeichnen sich durch vertikale Bruchlinien durch beide Massae laterales und eine horizontale Komponente zentral durch die Denis Zone 3, den Wirbelkörper.

4.2.6 Frakturlokalisierung im hinteren Beckenring nach Denis-Zonen

Zur präzisen anatomischen Kategorisierung der Frakturlokalisierung wurde die Klassifikation nach Denis herangezogen und sämtliche behandelten Frakturen entsprechend präoperativ eingeteilt.

4.2.7 Knochendichte

Im Rahmen der Diagnostik und Therapie wird bei den osteoporotischen Frakturen die Knochenqualität routinemäßig untersucht und eine medikamentöse Therapie, falls noch nicht bestehend, eingeleitet. Eine DXA-Messung erfolgte im Rahmen des

stationären Aufenthalts bei 55 Patienten. T-Werte $< -2,5$ wurden als Osteoporose-definierend betrachtet. Zur weiteren Objektivierung der präoperativen Knochendichte wurde der Mittelwert der Hounsfield-Einheiten (HU) des LWK 5 (axiale zentrale Ebene) anhand der präoperativen CTs berechnet. Hierbei deuten Werte von 54,7 bis zu 130 auf eine Osteoporose hin, 78,8 bis 146 auf eine Osteopenie, und von 120,8 bis 230 auf eine normale Knochenqualität (93).

4.2.8 Operationstechnik

Abhängig von der Länge der verwendeten Schrauben wurden drei Techniken differenziert, die entsprechend als Technik 1-3 definiert wurden (s. 3.6 Gruppierung).

4.2.8.1 Schraubenlokalisation

Um potentielle Risikofaktoren für eine Implantatlockerung zu identifizieren, erfolgte die weitere Differenzierung der drei Gruppen in Abhängigkeit der Schraubenlokalisation innerhalb des Sakrums in sieben Subgruppen:

1. Zwei lange Schrauben in S1
2. Eine lange Schraube in S1 und eine lange in S2
3. Zwei lange Schrauben in S2
4. Eine lange Schraube in S1 und zwei kurze Schrauben in S1
5. Eine lange Schraube in S2 und zwei kurze Schrauben in S1
6. Eine lange Schraube in S1 und zwei kurze Schrauben in S2
7. Vier kurze Schrauben in S1

4.2.8.2 Unterlegscheiben

Alle Iliosakralschrauben wurden mit Unterlegscheiben implantiert, um ein Einbrechen der Schraubenköpfe in das Becken zu vermeiden. Abhängig von der Breite des sicheren knöchernen Korridors kam es nach Implantation von zwei Schrauben teilweise zum Überlappen der Unterlegscheiben. Zur Analyse, ob dies eine Schraubenlockerung im Verlauf begünstigt, wurde dieser Parameter anhand der postoperativ durchgeführten seitlichen Röntgenbilder erfasst.

4.2.9 Zusätzliche operative Maßnahmen

Zusätzliche Verletzungen der angrenzenden Lendenwirbelsäule sind bei Sakruminsuffizienzfrakturen nicht selten. In der vorliegenden Arbeit wurden auch Fälle berücksichtigt, bei denen neben der iliosakralen Schraubenosteosynthesen weitere

Prozeduren (z.B. Kyphoplastie, Spondylodese oder Spinalkanaldekompensation) durchgeführt wurden. Diese Fälle wurden bei der Berechnung der mittleren Operationszeit ausgeschlossen.

4.2.10 Navigationsdaten

Für die intraoperative Navigation stehen zwei Methoden der 3D-Datensatzgewinnung zur Verfügung. Die intraoperative Akquisition mittels CT oder 3D C-Bogens sowie die Oberflächenregistrierung der Sakrumanatomie zum Abgleich mit einem präoperativ angefertigten 3D-Datensatz. Der entscheidende Vorteil der intraoperativen Akquisition des 3D-Datensatzes ist, dass der Patient oder die Patientin sich während der Datenerfassung in der Operationsposition (Bauchlage) befindet. Dies maximiert die Präzision der Navigation. Zudem wird bei dieser Methode die Navigationsreferenzklemme perkutan am Beckenkamm befestigt, was ein minimales Gewebetrauma mit sich bringt.

Die Oberflächenregistrierung basiert auf einem präoperativ erstellten 3D-CT-Datensatz. Um die notwendigen Registrierungspunkte zu gewinnen, wird das Sakrum während der Operation knöchern freigelegt, wofür ein medianer Zugang benötigt wird. Die Navigationsreferenzklemme wird am Dornfortsatz des ersten Sakralwirbelkörpers (SWK 1) befestigt. Ein signifikanter Nachteil dieser Methode ist der erforderliche Mittellinienzugang, der ein zusätzliches Weichteiltrauma verursacht, welches bei der intraoperativen Akquisition des 3D-Datensatzes nicht anfällt.

Aufgrund dieses operationstechnischen Unterschieds, der mit grundsätzlich unterschiedlichen Operationszeiten einhergeht, wurden die Auswertungen für diese beiden Methoden separat durchgeführt.

4.2.11 Postoperative Aufenthaltsdauer

Die in der vorliegenden Arbeit berücksichtigte stationäre Aufenthaltsdauer bezieht sich auf den postoperativen Verlauf, um die Vergleichbarkeit zwischen den untersuchten Techniken zu gewährleisten und nicht beeinflussbare Faktoren im präoperativen Verlauf (z.B. MRT-Diagnostik, Pausieren einer Antikoagulation etc.) auszuklammern.

4.2.12 Mobilität bei Entlassung

Als wesentlicher Faktor zur Beurteilung des Operationsoutcomes wurde die Mobilität bei Entlassung erhoben und eingeteilt in (i) selbstständig mobil, (ii) mobil mit Unterstützung (Rollator oder Unterarmgehstützen) und (iii) immobil.

4.3 Studiendesign

Es handelt sich um eine retrospektive Single-Center-Kohortenstudie.

4.4 Zuweisung und Diagnostik

Die Erstvorstellung der Patient*innen erfolgte über die zentrale Notaufnahme, über die ambulante Sprechstunde oder konsiliarisch durch interne und externe Abteilungen.

Zur Primärdiagnostik wurde regelhaft eine Röntgenaufnahme als Beckenübersicht und die seitliche Projektion des Sakrums, wenn möglich stehend, angefertigt. Bei klinischem oder radiologischem Verdacht auf Vorliegen einer Sakrumfraktur folgte dann die MRT-Untersuchung des thorakolumbalen Übergangs, der Lendenwirbelsäule sowie des Sakrums mit TIRM-Sequenzen und paracoronarer Rekonstruktion des Sakrums. Bei MR-graphischem Nachweis einer Sakrumfraktur und bei Kontraindikationen für eine MRT (Vorhandensein eines nicht MR-fähigen Schrittmachers, ausgeprägte Klaustrophobie) wurde eine ergänzende CT-Untersuchung zur Beurteilung der Frakturmorphologie veranlasst. Betrachtet wurde hier insbesondere das Vorhandensein von Trümmerzonen, Dislokationen, H-Fraktur oder vorderer Beckenringfrakturen. Die CT-Untersuchung erfolgte in einer 1 mm Dünnschichttechnik zur Verwendung der spinalen Navigation. Im Falle einer operativen Therapie wurde der CT-Datensatz dann über das klinikinterne Datennetzwerk oder via USB-Stick zur Planung der Computernavigation transportiert.

4.5 Gruppierung

Je nach verwendeter Operationstechnik wurden die Patient*innen einer der folgenden drei Gruppen zugeordnet: Gruppe 1 (2LS): Implantation von zwei langen transsakralen Schrauben, die monoportal von einer Seite durch das Sakrum und durch die beiden Iliosakralgelenke bis zur Gegenseite minimalinvasiv perkutan implantiert wurden. Die zwei Schrauben können entweder beide in S1, beide in S2 oder eine in S1 und eine in S2 implantiert werden, abhängig von der Sakrumanatomie und dem Vorhandensein des Safe-Korridors.

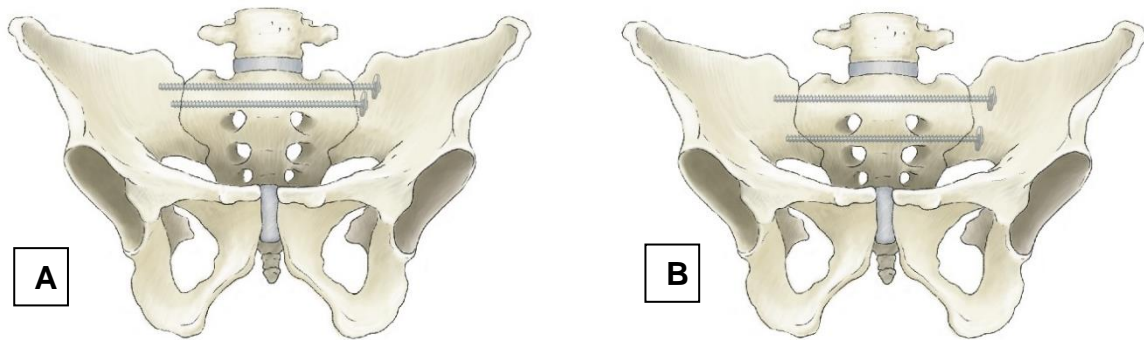


Abbildung 4: Optionen für die Platzierung der zwei langen Schrauben. A: Beide Schrauben im S1, B: Eine Schraube in S1 und eine in S2

Gruppe 2 (1L2K): Die Implantation einer langen transsakralen Schraube in Kombination mit zwei kurzen iliosakralen Schrauben (eine Schraube je Seite) erfordert eine Inzision auf beiden Seiten. Die lange transsakrale Schraube sowie eine der kurzen iliosakralen Schrauben können von einer Seite über eine einzelne Inzision implantiert werden, während eine zusätzliche Inzision auf der Gegenseite für die Implantation der zweiten kurzen Schraube erforderlich ist. Verschiedene Kombinationen dieser Variante sind möglich, abhängig von der Lokalisation der Schrauben. Die transsakrale und die beiden iliosakralen Schrauben können alle in S1 implantiert werden (A), eine transsakrale in S1 und beide iliosakralen Schrauben in S2 (B) oder eine transsakrale in S2 und zwei kurze in S1 (C) Abb. 5.

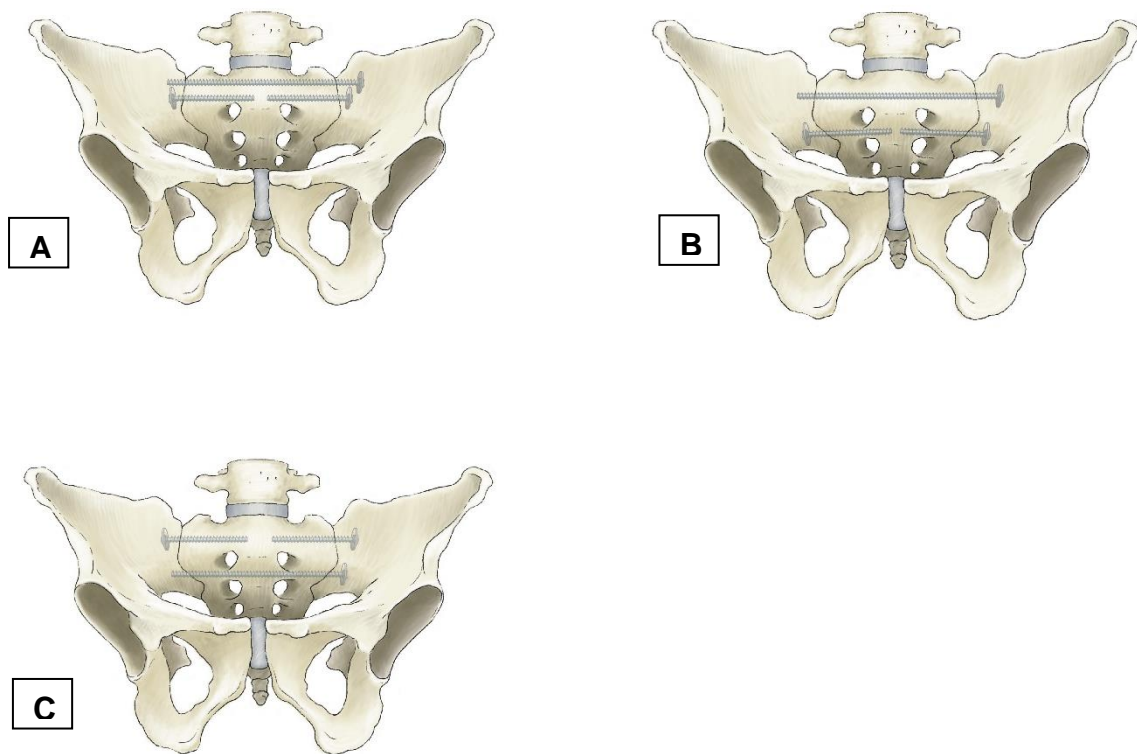


Abbildung 5: Verschiedene Optionen zur Platzierung einer langen in Kombination mit zwei kurzen Schrauben. A: Alle drei Schrauben in S1, B: Die lange Schraube in S1 und zwei kurze in S2, C: Zwei kurze Schrauben in S1 und eine lange in S2

Gruppe 3 (4KS): Die Implantation von vier kurzen iliosakralen Schrauben erfolgt, indem je zwei kurze Schrauben pro Inzision und Seite perkutan minimalinvasiv implantiert werden. Der Vorteil dieser Technik ist die flexible Schraubenlokalisierung und -winkelung unabhängig vom sakralen Korridor, auch bei dysmorphischen Becken. Alle vier Schrauben wurden in der Regel in den SWK1 implantiert. In einem Fall wurden je zwei Schrauben in den SWK 1 und SWK 2 implantiert Abb. 6.

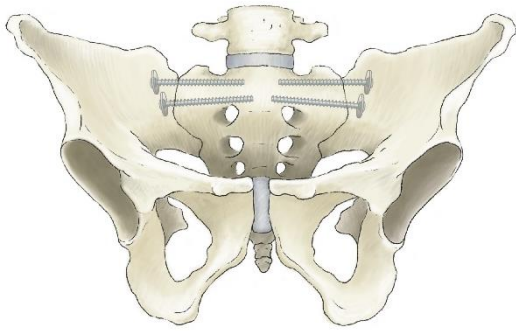


Abbildung 6: Vier kurze Schrauben in S1

4.6 Navigation

Die Implantation der Schrauben erfolgt perkutan minimalinvasiv mittels Computernavigation (Fa Brainlab AG, München, Deutschland) über eine Inzision von ca. 2 bis 3 cm Länge. Eine Dünnschicht-CT ($\leq 1\text{mm}$ Schichtdicke) ist Voraussetzung für die Computernavigation. Diese 3D-CT kann präoperativ durchgeführt und mittels eines Speicherlaufwerks (USB) oder via Datenserver auf das Navigationssystem übertragen werden. Bei Verwendung der präoperativen CT erfolgt intraoperativ eine anatomische Oberflächenregistrierung zur Referenzierung des 3D-CT-Datensatzes. Hierfür ist eine zusätzliche Inzision dorsal mittig mit Freilegen der Lamina des LWK 5 oder des SWK 1 zum Abgreifen der Referenzpunkte erforderlich.

Alternativ erfolgt die Akquisition des 3D-CT-Datensatzes intraoperativ in Bauchlage der Patientinnen mithilfe eines mobilen Computertomographen (AIRO CT Fa Stryker, USA). Hierbei entfällt die anatomische Oberflächenregistrierung und der 3D-Datensatz kann zur automatischen Referenzierung der Navigation verwendet werden. Die Befestigung der Referenzklemme erfolgt mittels zweier Schanzschrauben, die über Stichinzisionen an die Crista iliaca posterior superior des Beckens angebracht werden. Die Vorteile der intraoperativen CT sind eine höhere Präzision der Navigation und das Vermeiden eines zusätzlichen Weichteiltraumas zur anatomischen Oberflächenregistrierung. Die reibungslose Implementierung der intraoperativen CT erfordert eine Lernkurve des OP-Personals (Chirurgen, Anästhesisten, MTRA und Operationspflege) sowie eine angepasste Form der sterilen Abdeckung der Patient*innen. Ein hauseigenes Protokoll wurde hierfür entwickelt (s. Abb. 7 bis 9).

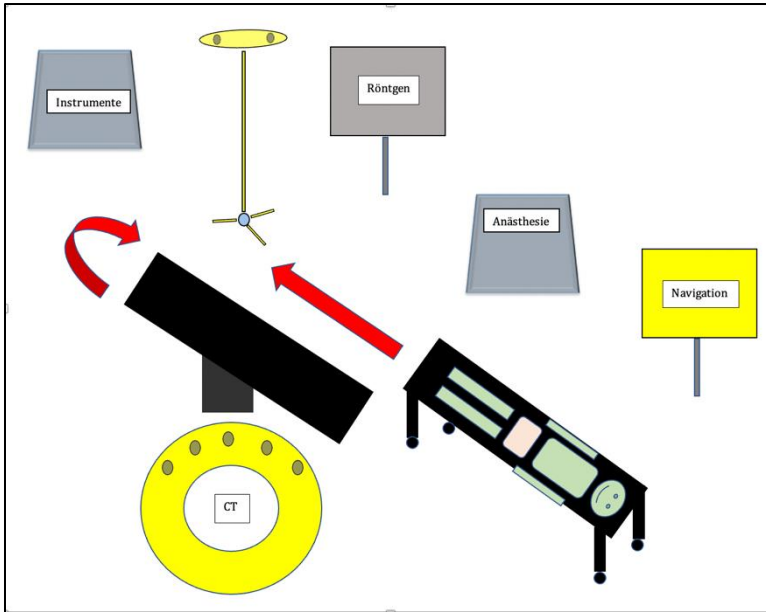


Abbildung 7: AIRO-CT, Transport des Patienten in den Operationsaal in die Rückenlage

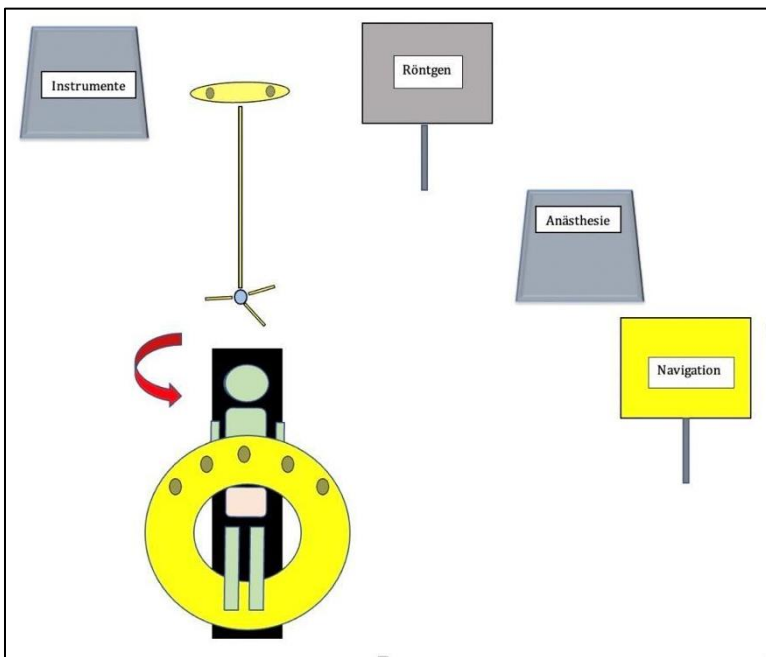


Abbildung 8: Der Patient wurde in die Bauchlage gebracht. Drehen des Operationstisches um 90° und Durchführung des intraoperativen CTs

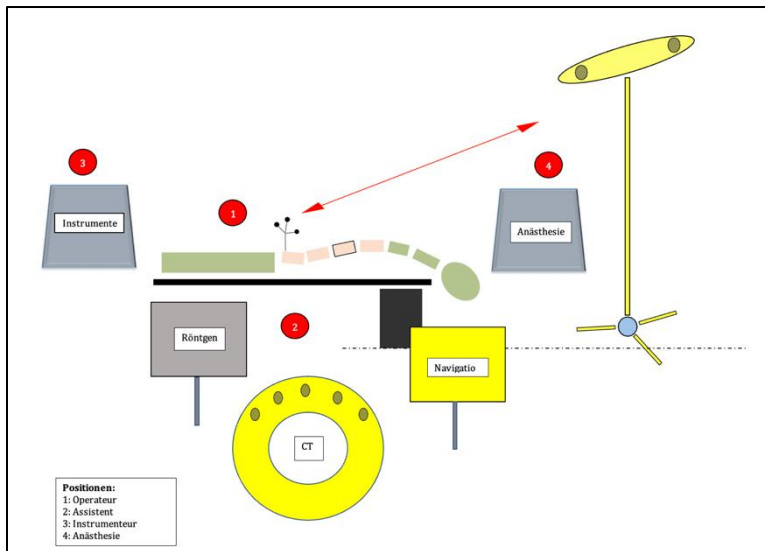


Abbildung 9: Zurückdrehen des Patienten, Positionierung des Navigationssystems (Monitor und Infrarotkamera)

4.7 Operationstechnik der monoportalen perkutanen computernavigierten Schraubenosteosynthese des hinteren Beckenrings mittels zwei transsakraler Schrauben

Unter Allgemeinanästhesie wird die/der Patient*in in die Bauchlage auf dem Lagerungsblock nach Kluger gelagert. Die Arme werden mit 90° Abduktion der Schultergelenke und 90° Flexion der Ellenbogen nach kranial gelagert. Die Desinfektion erfolgt über dem gesamten Becken dorsal und weit nach ventral. Die sterile Abdeckung wird zirkumferentiell durchgeführt (s. Abb. 7). Zuerst werden vier Tücher nach kaudal, an den Seiten und nach kranial angebracht. Weitere drei Tücher werden um den Operationstisch gewickelt. Nach dem zweiten Tuch wird der Operationstisch maximal fußwärts gefahren und das dritte Tuch wird kranial um die

Tischsäule geknotet. Hierdurch wird eine 360° Sterilität bis zur Operationstischsäule erreicht.



Abbildung 10: Zirkumferentielle sterile Abdeckung in Bauchlage

Über Stichinzisionen werden zwei Fixationspins an der Crista iliaca posterior superior fixiert, wobei darauf geachtet wird, dass die Pins nicht im Weg der zu implantierenden Schrauben liegen. Nun wird die Navigationsreferenzklemme an beiden Pins fixiert (s. Abb. 11).



Abbildung 11: Perkutane Fixierung der Navigationsklemme mittels zwei Schanzschrauben am Beckenkamm

Patient*in und Operationstisch werden nun kopfwärts gefahren, um 90° gedreht und durch das CT geschoben. Hierbei bleiben die Abdeckungstücher weiterhin steril.



Abbildung 12: Durchführung des intraoperativen CTs

Zunächst wird ein CT-AP-Scout durchgeführt und nach Bestimmung des benötigten Operationsfelds das intraoperative CT unter temporärer Apnoe angefertigt. Die zum Boden gerichtete sterile Abdeckung wird mit einem neuen sterilen Tuch überdeckt und ein Handschuhwechsel vorgenommen. Die Genauigkeit der virtuellen Realität der Computernavigation wird an den Fixationspins geprüft. Nun wird mit Hilfe der Offsetting und der Projektion der zu implantierenden Schrauben auf das Hautniveau die Höhe der Hautinzision bestimmt (s. Abb 13).



Abbildung 13: Planung der Trajektorie mit der Offseteinstellung auf das Hautniveau

Es folgt die stumpfe Präparation bis auf die Außenseite des Os ilium. Nach Registrierung der navigierbaren Instrumente wird die navigierte Bohrhülse durch die Inzision bis auf das Os ilium eingeführt und anschließend die zu implantierende Schraube virtuell geplant. Abb. 14 zeigt die Planung einer Schraube transsakral durch den Korridor oberhalb der S1-Foramina zur Gegenseite mit Überbrückung des kontralateralen Iliosakralgelenks.

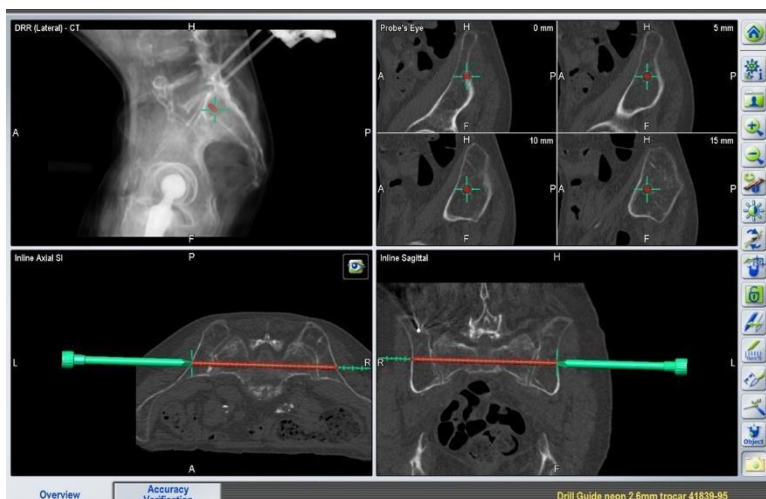


Abbildung 14: Planung der Schraubenlänge und Schraubenpositionierung transsakral

Durch die navigierte Bohrhülse wird ein navigierter 2,6 mm Bohrdraht entsprechend der Planung eingebracht.

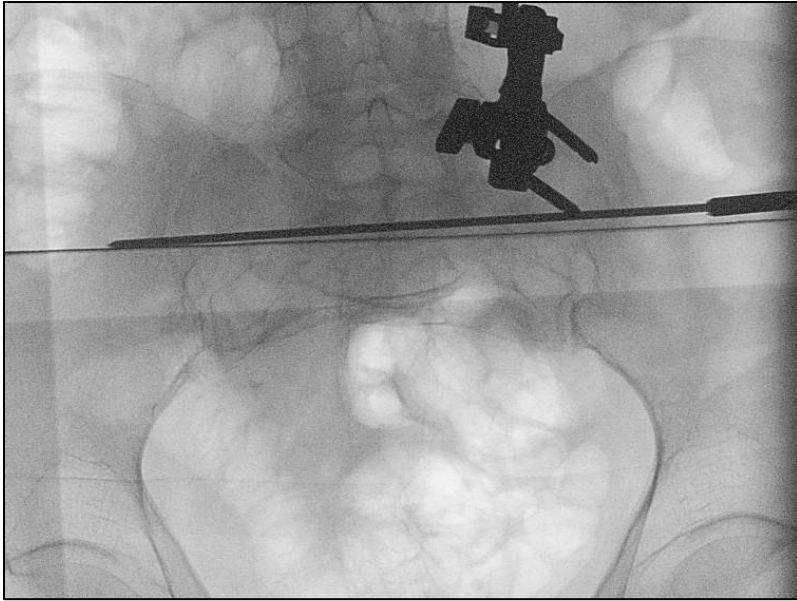


Abbildung 15: Perkutanes Einführen des Führungsdrahtes transsakral

Über diesen Draht wird eine Großfragment-Vollgewindeschraube entsprechender Länge mit 7,5 mm Durchmesser mit einer Unterlegscheibe implantiert. Je nach Frakturlokalisation und je nach Weite des S1-Korridors wird eine zweite Schraube im analogen Vorgehen kaudal der ersten Schraube ebenfalls in S1 oder durch den Korridor zwischen S1- und S2-Foramina in S2 implantiert.

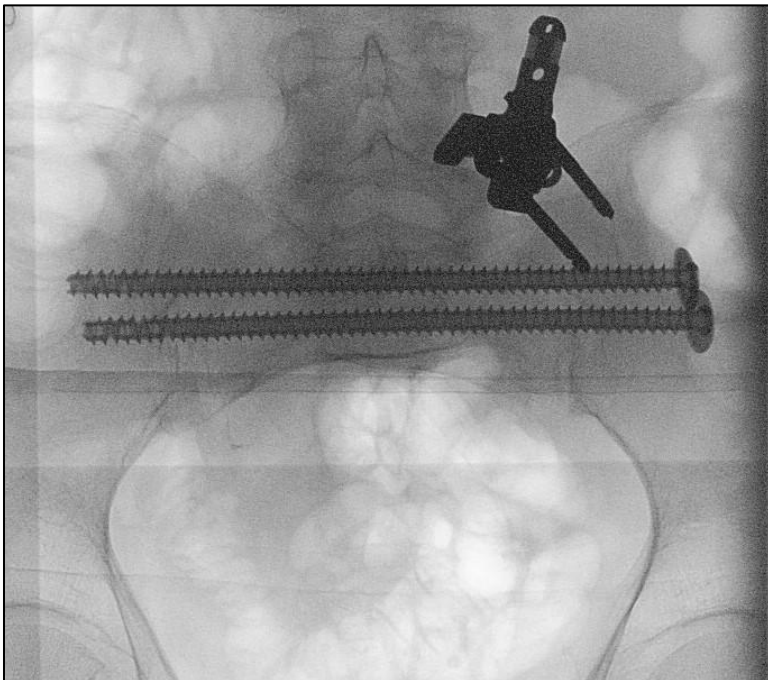


Abbildung 16: Antero-posteriores BV-Bild mit Implantation von zwei langen transsakralen Schrauben von rechts nach links mit Überbrückung der beiden Iliosakralgelenke

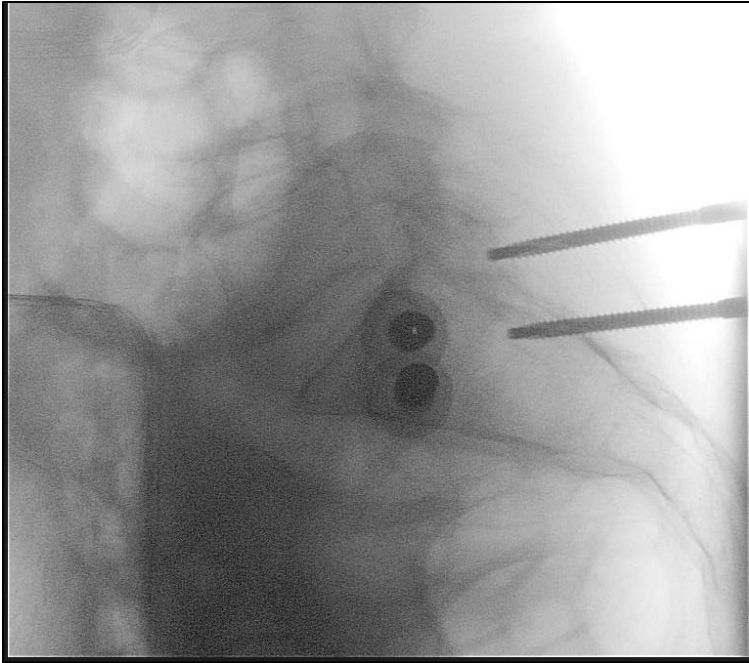


Abbildung 17: Laterales BV-Bild der zwei transsakral implantierten langen Schrauben in S1

Nun wird die Schraubenlage mit dem Bildwandler in der AP, Inlet- und Outlet-Aufnahmen sowie lateral dokumentiert. Der Wundverschluss erfolgt mit Subcutan- und Hautnaht. Die Pininsertionsstellen werden mit zwei Einzelknopfnähten verschlossen.

4.8 Postoperative Phase

Alle Patient*innen wurden unmittelbar postoperativ oder am ersten Folgetag unter physiotherapeutischer Begleitung mit beidseitiger schmerzadaptierter Belastung am Rollator mobilisiert. Da es sich hauptsächlich um ältere Patient*innen handelt, erfolgte die Entlassung routinemäßig in die geriatrische Anschlussbehandlung. Patient*innen aus Pflegeeinrichtungen oder diejenigen, die zu Hause von Angehörigen adäquat versorgt werden konnten, wurden zurück in die vorherige Wohnsituation entlassen.

Die erste ambulante Wiedervorstellung zur klinischen und radiologischen Kontrolle erfolgte nach drei, die zweite Wiedervorstellung nach zwölf Monaten postoperativ. Es wurden jeweils Röntgenkontrollen in zwei Ebenen zur Beurteilung der Schraubenlage durchgeführt. Bei V.a. Implantatlockerungen folgte die ergänzende CT und ggf. MRT-Untersuchung. Das klinische Outcome der Patient*innen wurde anhand des COMI (Core Outcome Measures Index) erfasst und dokumentiert.

4.9 Statistische Analyse

Zur statistischen Analyse der Daten wurde IBM SPSS Statistics (IBM, USA, Version 27) verwendet.

Bei der Auswahl von Kovariaten für das multivariable logistische Regressionsmodell (Likelihood-Quotienten-Test) wurden Multikollinearitätsprobleme vermieden, indem die paarweisen Zusammenhänge zwischen potenziellen Kovariaten mit Hilfe des Pearson-Koeffizienten analysiert wurden. Kovariaten mit starken paarweisen Zusammenhängen wurden nicht in das Modell aufgenommen, um Interpretationsschwierigkeiten ihrer Parameterabschätzungen zu vermeiden.

5 Ergebnisse

Insgesamt erfüllten im Untersuchungszeitraum 122 Patient*innen die Einschlusskriterien und konnten somit in der vorliegenden Studie berücksichtigt werden.

5.1 Patientencharakteristik

Das mediane Alter betrug 81 Jahre ($\sigma = 7,576$), 102 waren weiblich (83,6 %) und 20 männlich (16,4 %) (Abb. 18).

5.2 Frakturätiologie

Untersucht wurden ausschließlich Sakruminsuffizienzfrakturen, die per Definition spontan oder im Rahmen eines Bagatelltraumas auftraten. Hier erlitten 66,4 % ein Bagatelltrauma und bei 33,6 % war kein Trauma in der Anamnese zu erheben (Abb. 19).

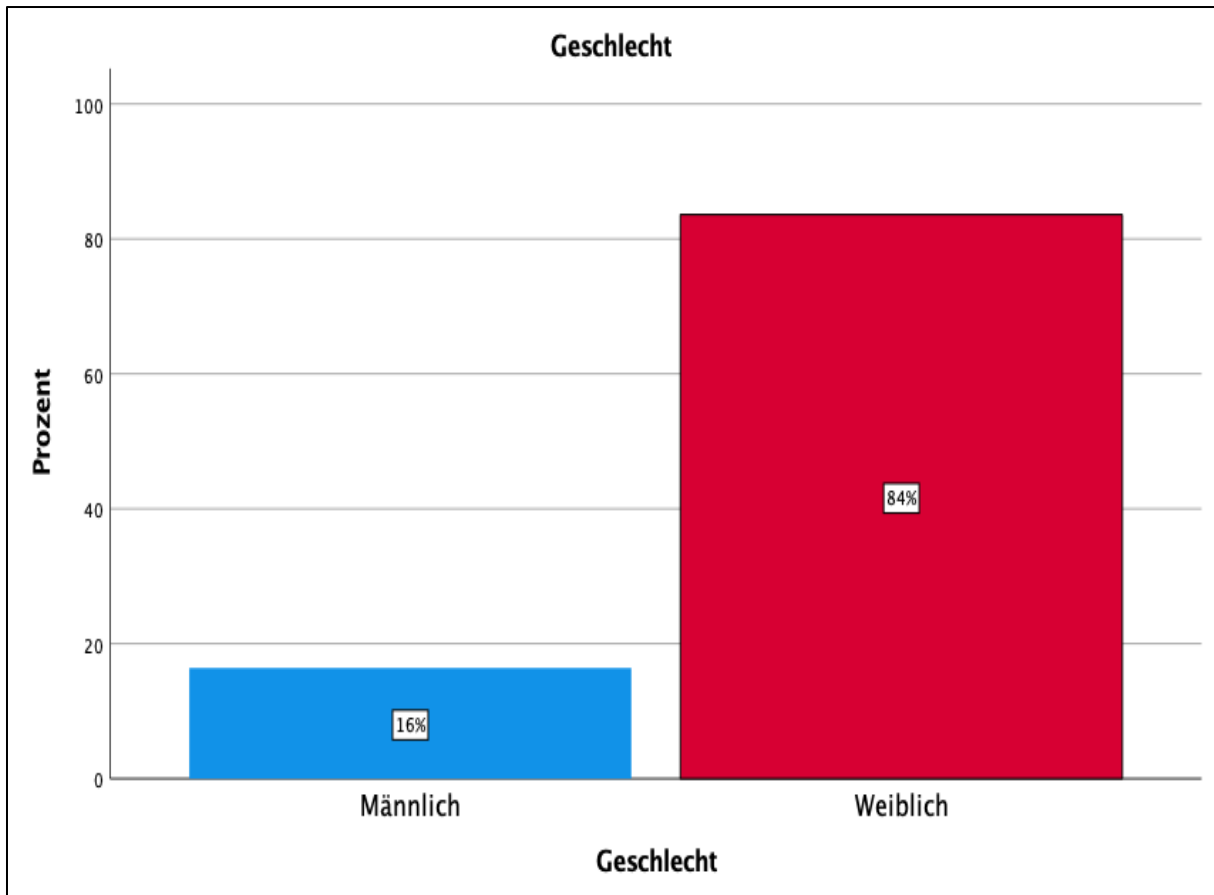


Abbildung 18: Geschlechterverteilung der Patient*innen mit osteoporotischen Beckenfrakturen

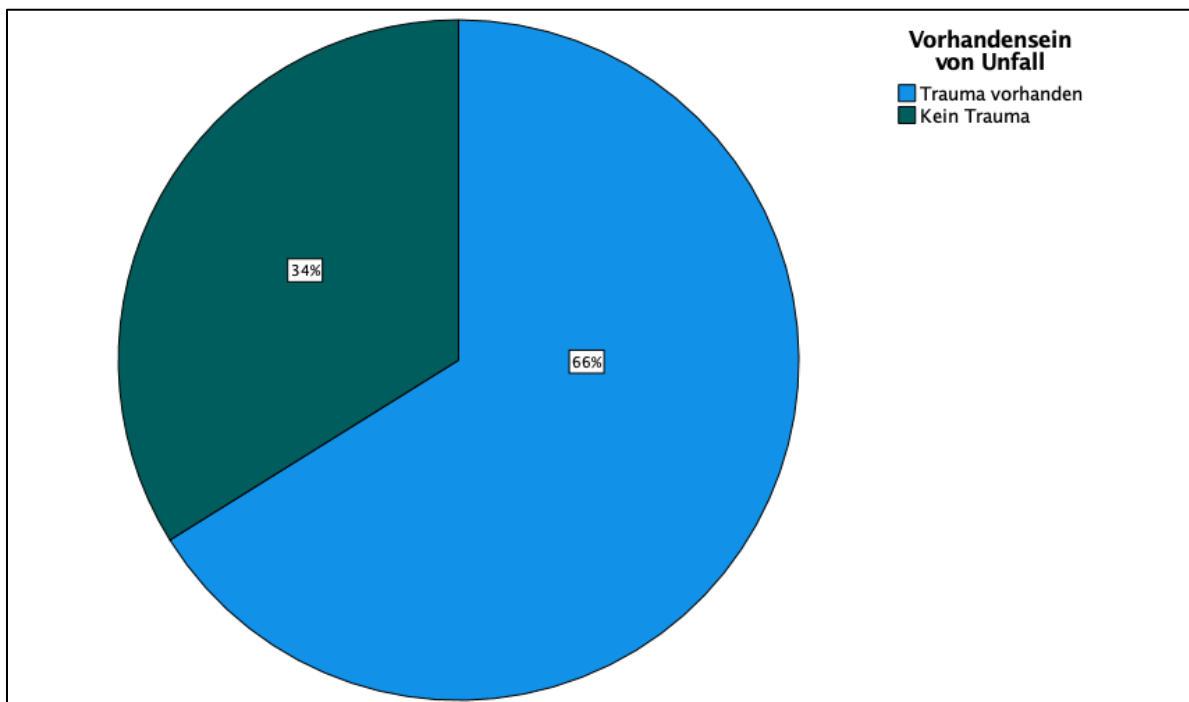


Abbildung 19: Frakturätiologie

5.3 Frakturmorphologie

In 58 Fällen (47,5 %) zeigte sich eine FFP II Fraktur, in 15 Fällen (12,3 %) eine FFP III und in 49 Fällen (40,2 %) eine FFP IV Fraktur (Abb. 17). In 46 Fällen (37,7 %) war die Fraktur CT-graphisch einseitig und in 76 Fällen (62,3 %) beidseitig zu sehen.

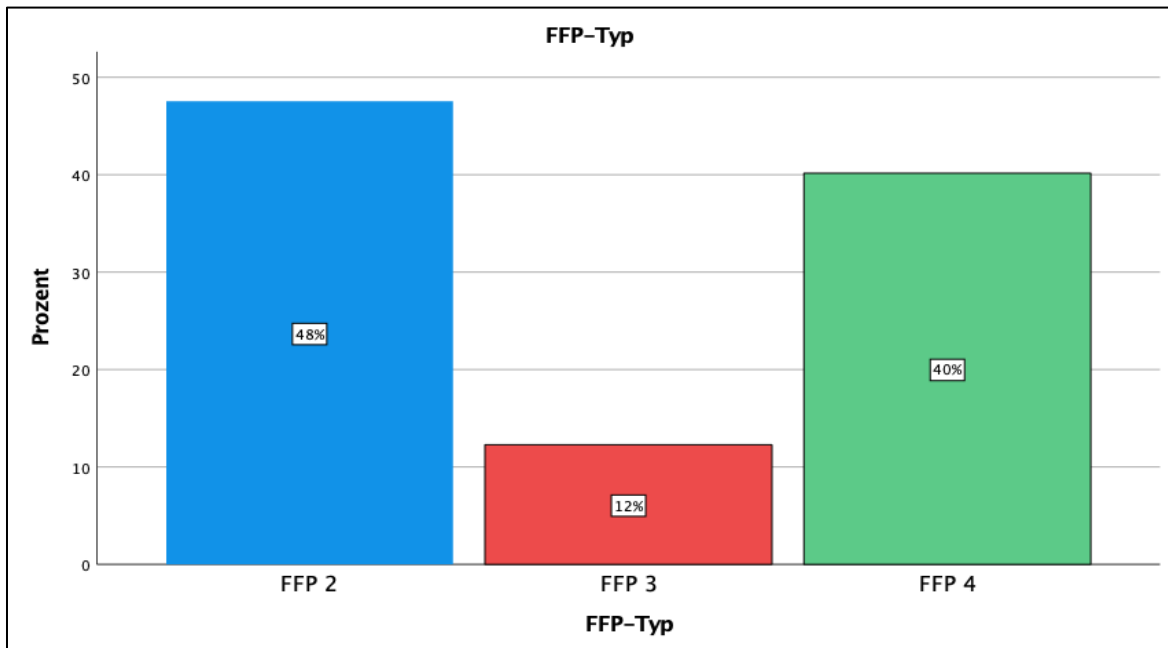


Abbildung 20: Einteilung der Frakturen nach der FFP-Klassifikation

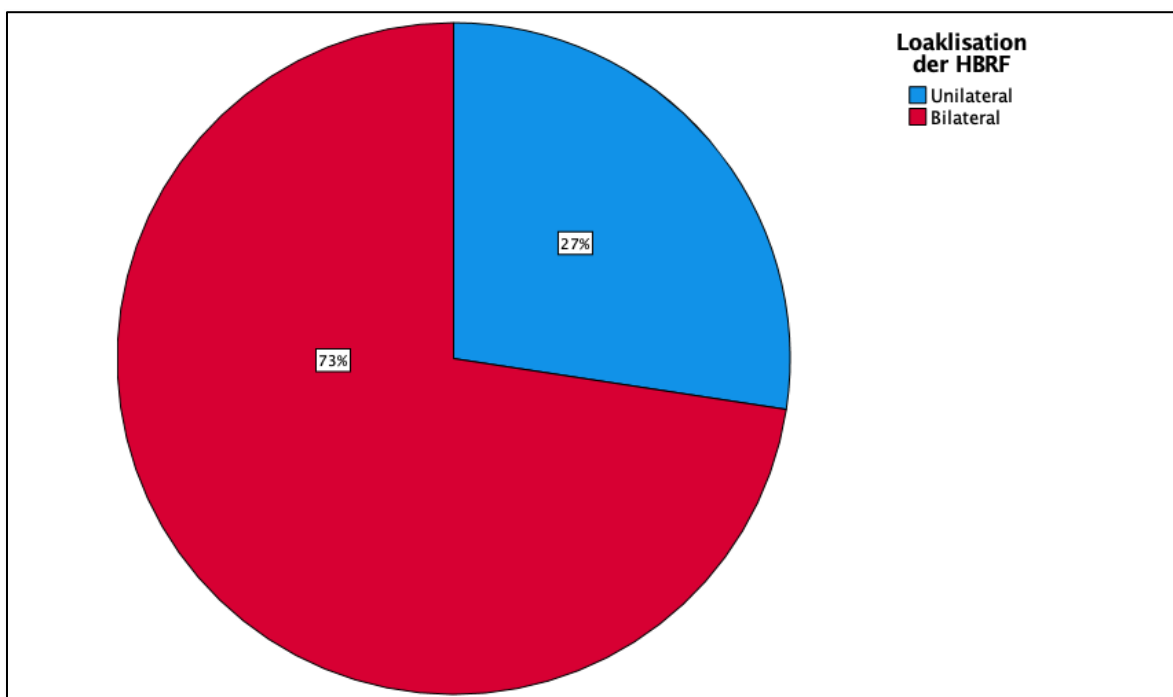


Abbildung 21: Lokalisation der hinteren Beckenfrakturen

5.4 Frakturlokalisierung

In 45 Fällen (36,9 %) fanden sich isolierte hintere Beckenringfrakturen (HBRF), in 65 Fällen (53,3 %) eine begleitende vordere Beckenfraktur einseitig ipsilateral, in fünf Fällen (4,1 %) einseitig kontralateral und in sieben Fällen (5,7 %) fand sich eine bilaterale vordere Beckenringfraktur (VBRF) zusätzlich zur hinteren Beckenringfraktur (Abb. 19). In zwölf Fällen (9,8 %) wurde die vordere Beckenringfraktur durch Implantation einer Teilgewindeschraube in das Os pubis durch den Ramus ossis pubis versorgt. In 80 Fällen (65,6 %) fand sich CT-graphisch eine Trümmerzone, in 42 Fällen (34,4 %) lag eine solche nicht vor (Abb. 23).

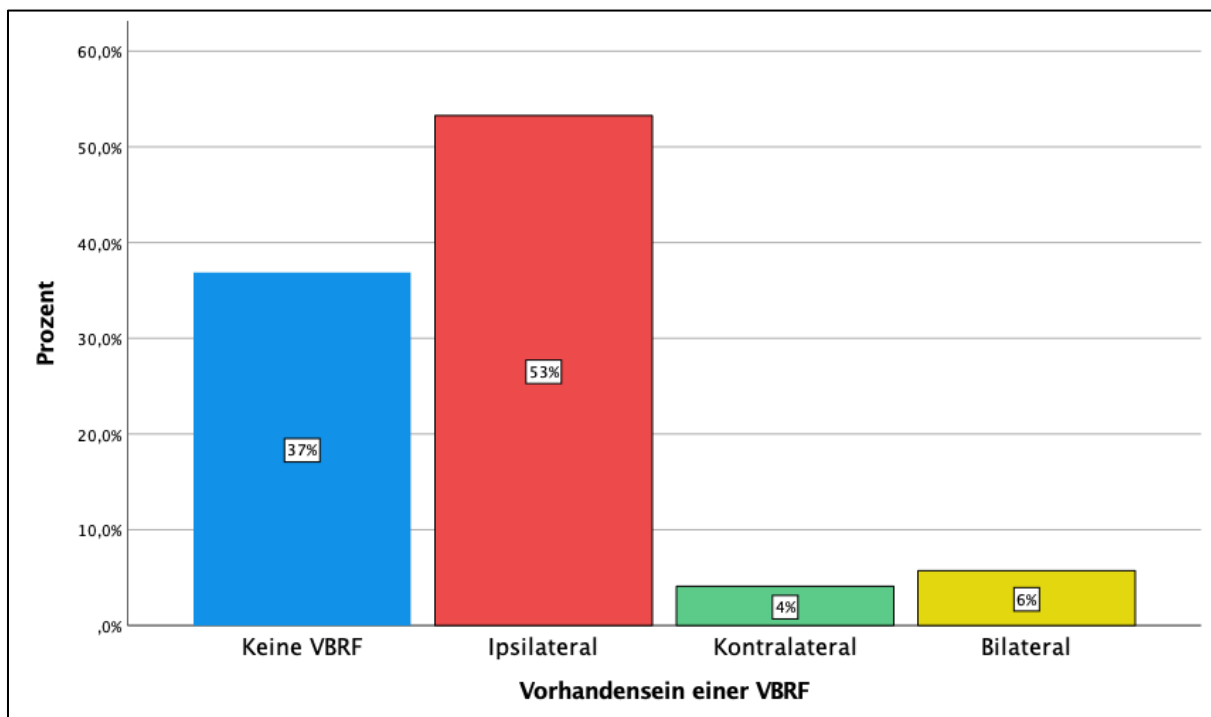


Abbildung 22: Vorhandensein und Lokalisation der vorderen Beckenringfrakturen

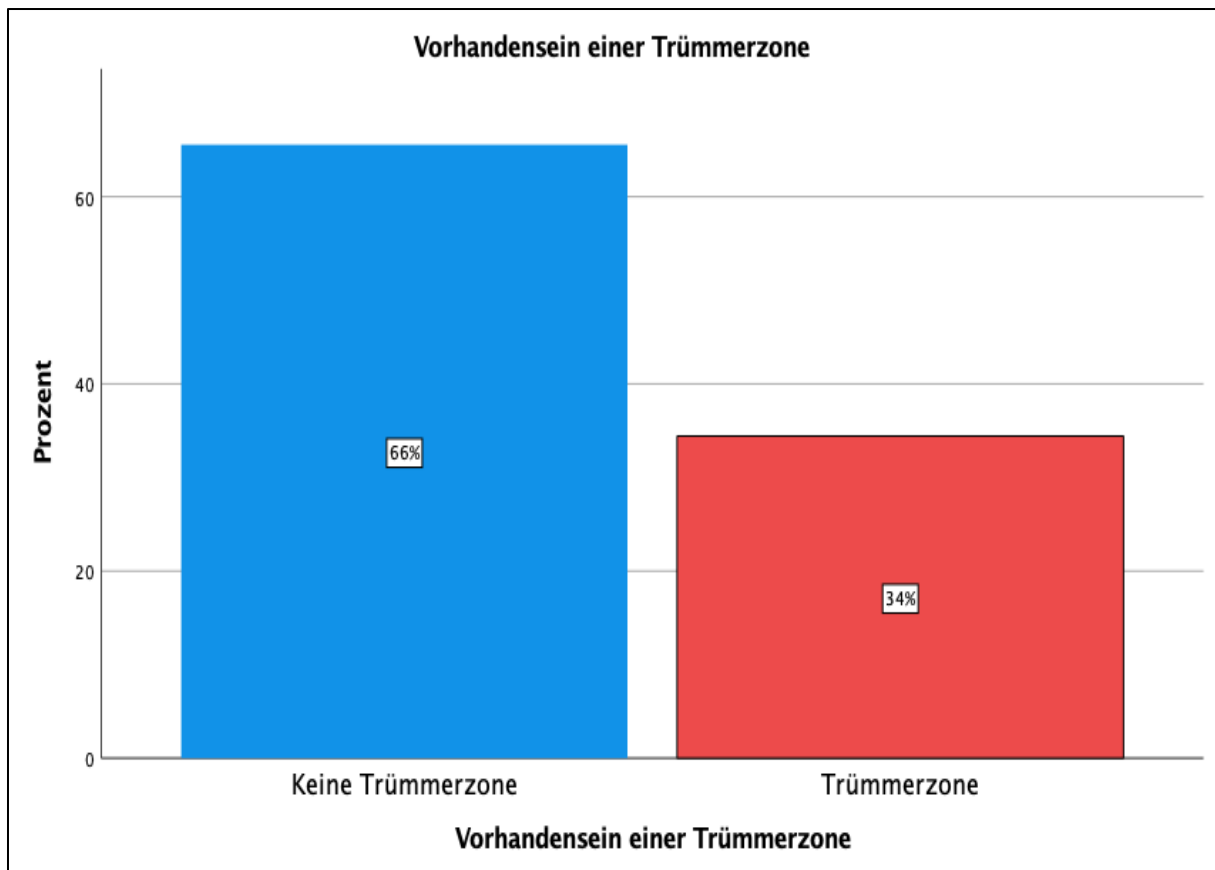


Abbildung 23: Prozent der Beckeninsuffizienzfrakturen mit Trümmerzonen

Des Weiteren wurde die Frakturlokalisierung im Sakrum differenziert. In 82 Fällen (67,2 %) lag die Fraktur in der Zone 1 (laterales Sakrumdrittel), in drei Fälle (2,5 %) in Zone 2 (transforaminal) und in 37 Fällen (30,3 %) zeigte sich ein gemischtes Muster (Abb. 24). Eine H-Fraktur war in 35 Fällen (28,7 %) zu sehen (Abb. 25).

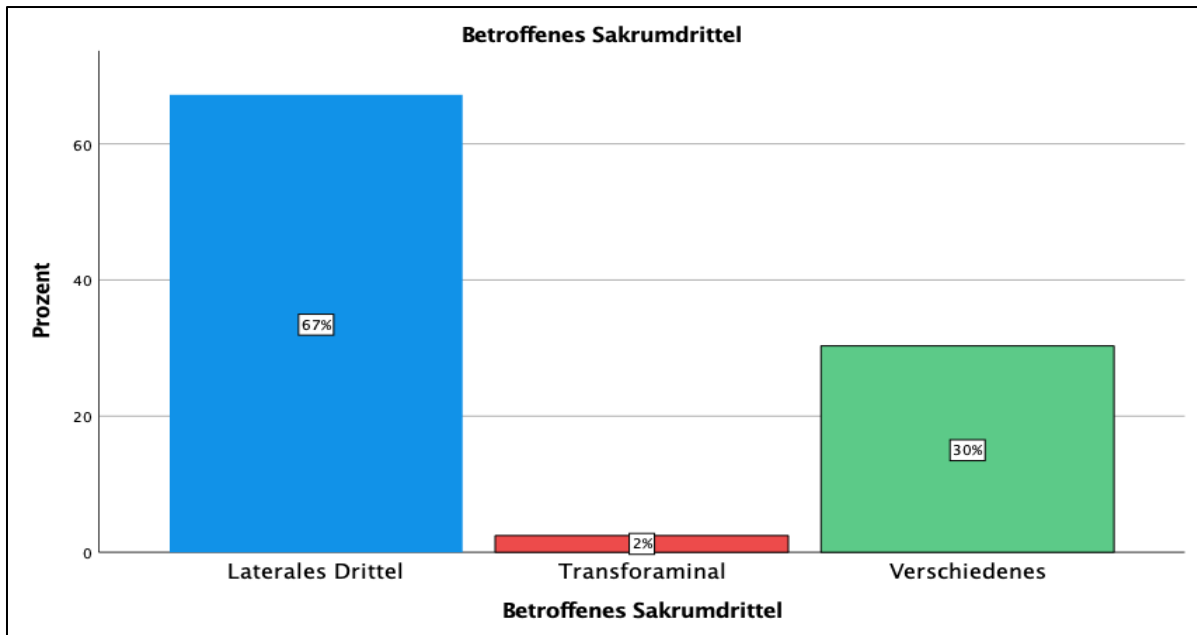


Abbildung 24: Fraktуреinteilung nach betroffenem Sakrumdrittel

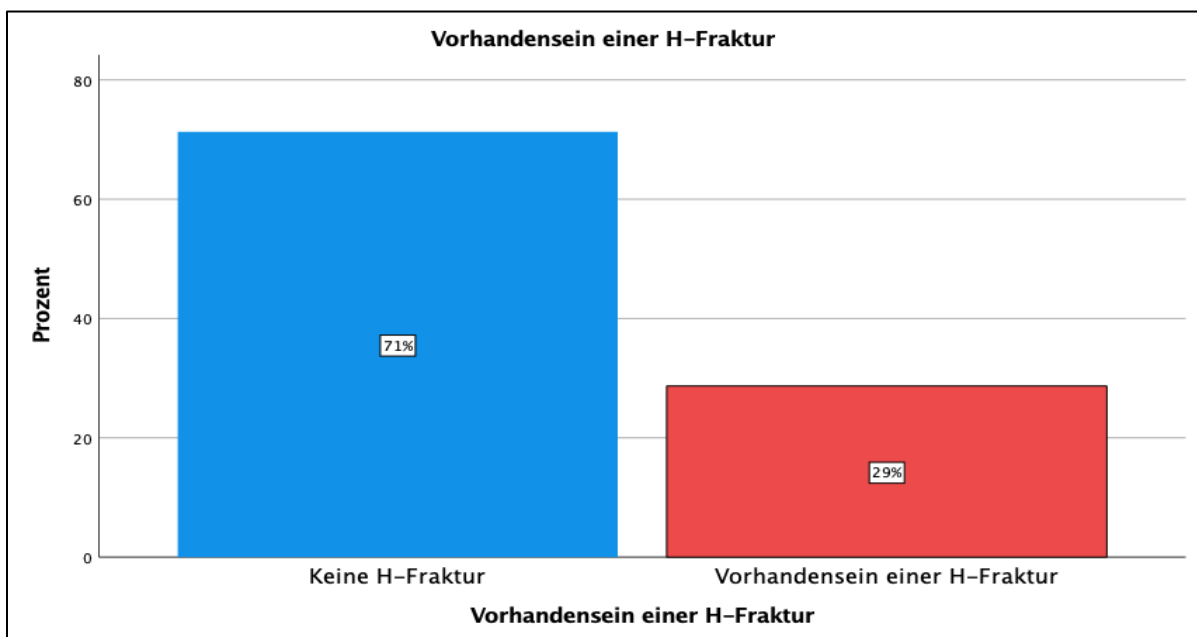


Abbildung 25: Prozentueller Anteil der H-Frakturen am Gesamtkollektiv

5.5 Knochendichte

Bei insgesamt 55 Patient*innen erfolgte eine Knochendichtemessung mittels DXA (Dual X-ray Absorptiometry) im Rahmen des stationären Aufenthalts. Hierbei zeigte sich ein Mittelwert des maximalen T-Wertes von -2,5 ($\sigma = 1,05$). Als weiterer Surrogatparameter für die Einschätzung der Knochenqualität erfolgte die Messung der

Hounsfield-Units des LWK5 in dem präoperativ angefertigten CTs. Hier zeigte sich ein Mittelwert von 68,8 ($\sigma = 38,8$).

5.6 Schmerzstärke und Mobilität

Entsprechend der Einschlusskriterien litten alle Patient*innen unter immobilisierenden Schmerzen im Bereich des Sakrums mit einer Schmerzstärke > 5 nach NRS.

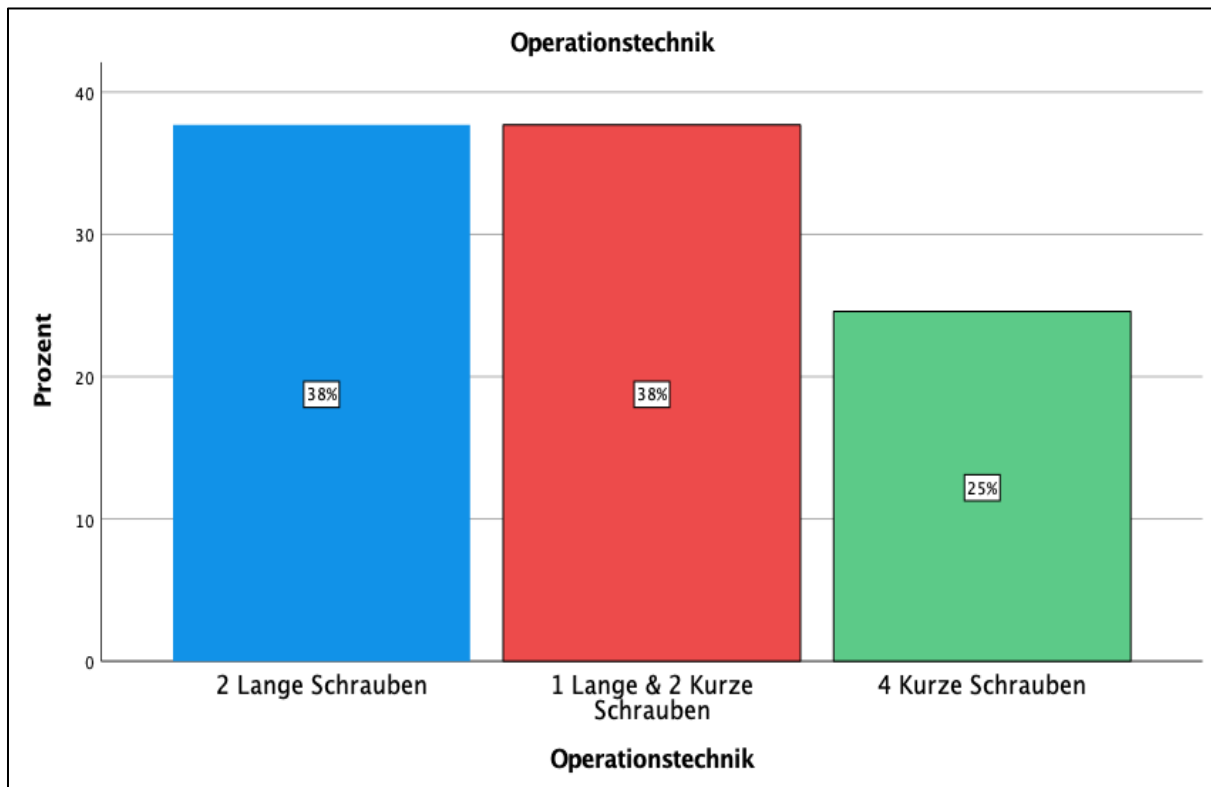


Abbildung 26: Einteilung nach der Operationstechnik

5.7 Schraubenlänge und Lokalisation

In die Gruppe 1 wurden 46 Patient*innen (37,7 %) kategorisiert (Abb. 23). In 16 Fällen (13 %) wurden die beiden langen Schrauben in S1, in zwei Fällen (1,6 %) in S2 und in 28 Fällen (23 %) eine lange in S1 und eine lange in S2 transsakral implantiert (Abb. 27).

In 46 Fällen (37,7 %) kam eine einzelne lange Schraube in Kombination mit zwei kurzen iliosakralen Schrauben zum Einsatz (Abb. 26). In 33 Fällen (27 %) wurden eine lange und zwei kurzen Schrauben in S1 und in 13 Fällen (10,7 %) eine lange in S2 und zwei kurze Schrauben in S1 implantiert (Abb. 27).

In den restlichen 30 Fällen (24,6 %) erfolgte die Versorgung mittels vier kurzer iliosakraler Schrauben (Abb. 26). In 29 Fällen wurden alle vier Schrauben in S1 transiliosakral implantiert und in einem einzelnen Fall wurden zwei kurze Schrauben transiliosakral in S1 und S2 implantiert.

5.8 Unterlegscheiben

In 25 Fällen (27 %) lagen die Unterlegscheiben aufeinander, in 68 Fällen war dies nicht der Fall (73 %) (Abb. 28).

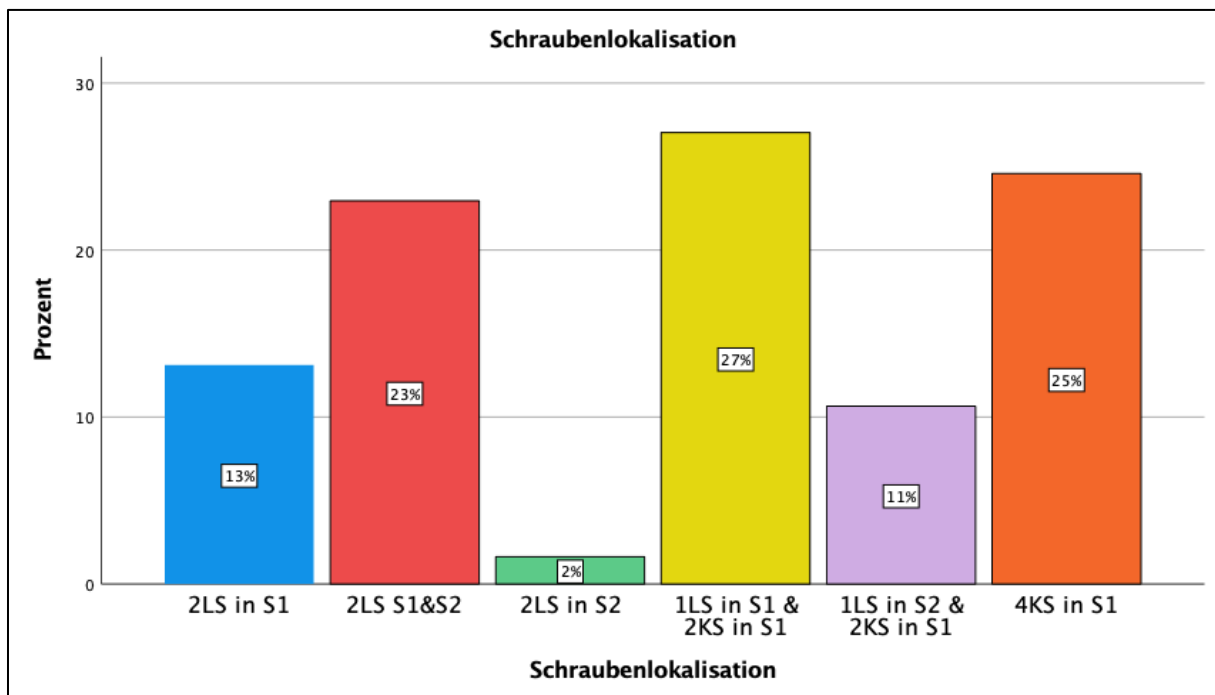


Abbildung 27: Schraubenlokalisation in S1 und S2

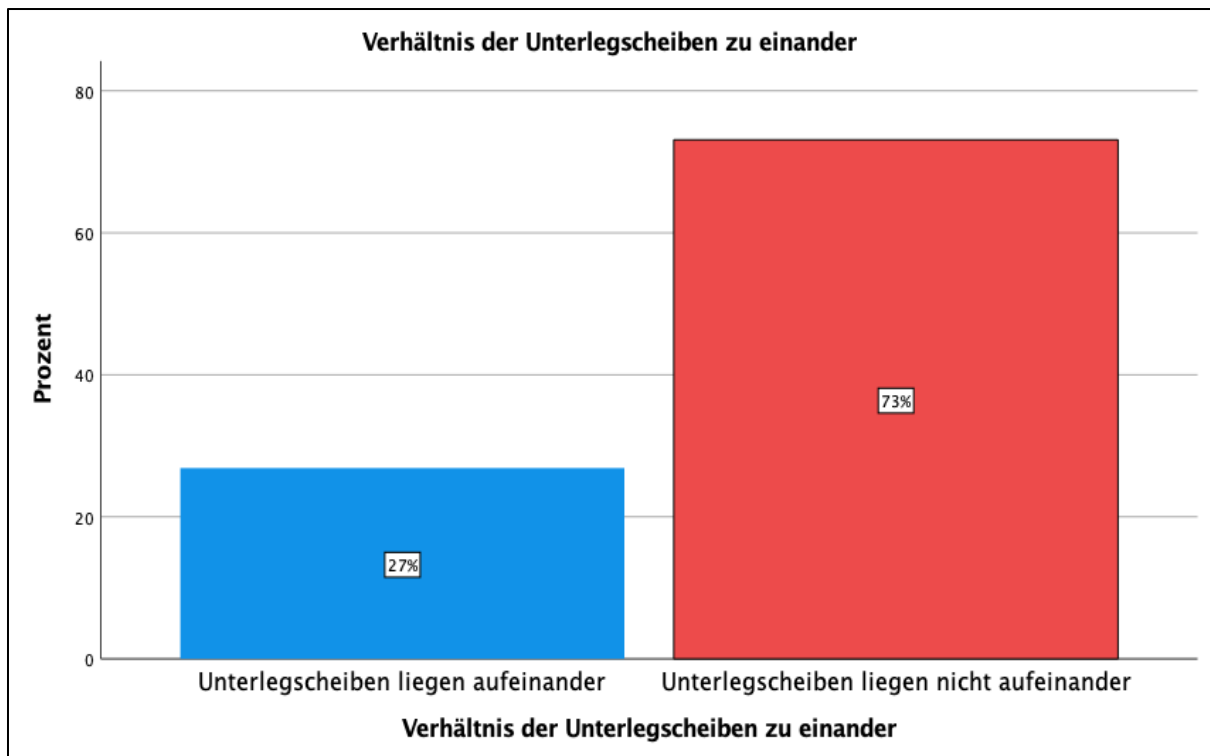


Abbildung 28: Verhältnis der Unterlegscheiben

5.9 Zusätzliche operative Eingriffe

In 100 Fällen (82 %) erfolgte eine reine Schraubenosteosynthese des hinteren Beckenrings. In zwölf Fällen (9,8 %) wurde eine vordere Beckenringfraktur zusätzlich mit einer Stellschraube des Os pubis versorgt und in zehn Fällen (8,2 %) wurden zusätzliche operative Maßnahmen an der Wirbelsäule außerhalb des Beckens (z.B. Kyphoplastie, Spinalkanaldekompensation oder Spondylodese) vorgenommen.

5.10 Operationszeit

Die mittlere allgemeine Operationszeit betrug 63,57 Minuten ($\sigma = 22,947$). Die mittlere Zeit in Gruppe 1 (2LS) bei einer reinen Schraubenosteosynthese des hinteren Beckenrings mit intraoperativem CT betrug 52,60 Minuten ($\sigma = 13,057$), in Gruppe 2 61,8 Minuten ($\sigma = 18,108$). In Gruppe 3 wurde ein Teil der Operation mittels Oberflächenregistrierung durchgeführt. Hier betrug die mittlere Operationsdauer allgemein 83,35 Minuten ($\sigma = 29,509$). Bei alleiniger automatischer Registrierung nach intraoperativer CT betrug die mittlere Operationsdauer 72 Min ($\sigma = 31,006$). bei Verwendung der Region-Matching-Technik lag der Mittelwert bei 93,75 Min ($\sigma = 24,915$).

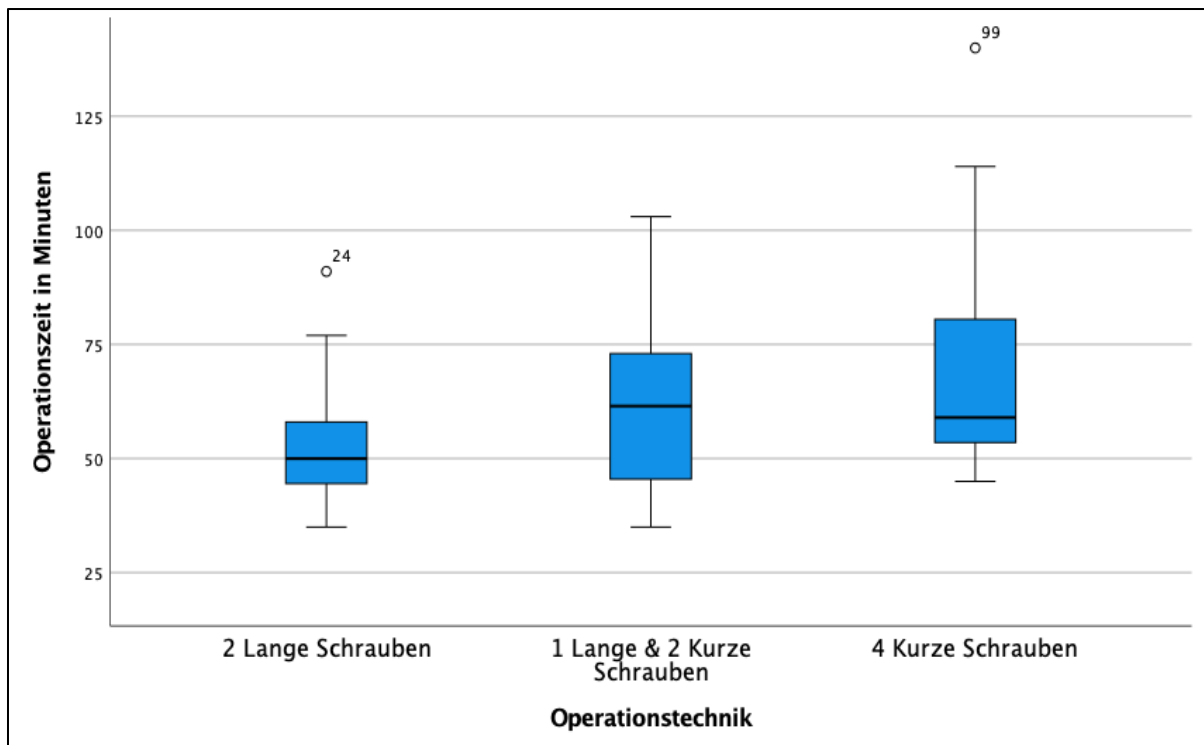


Abbildung 29: Operationsdauer der drei Operationstechniken im Vergleich

5.11 Intraoperatives CT

In 107 Fällen (87,7 %) wurde ein intraoperatives CT mit automatischer Registrierung der Computernavigation verwendet und in 15 Fällen (12,3 %) erfolgte eine Oberflächenregistrierung über eine mediane zusätzliche Inzision (Abb. 30).

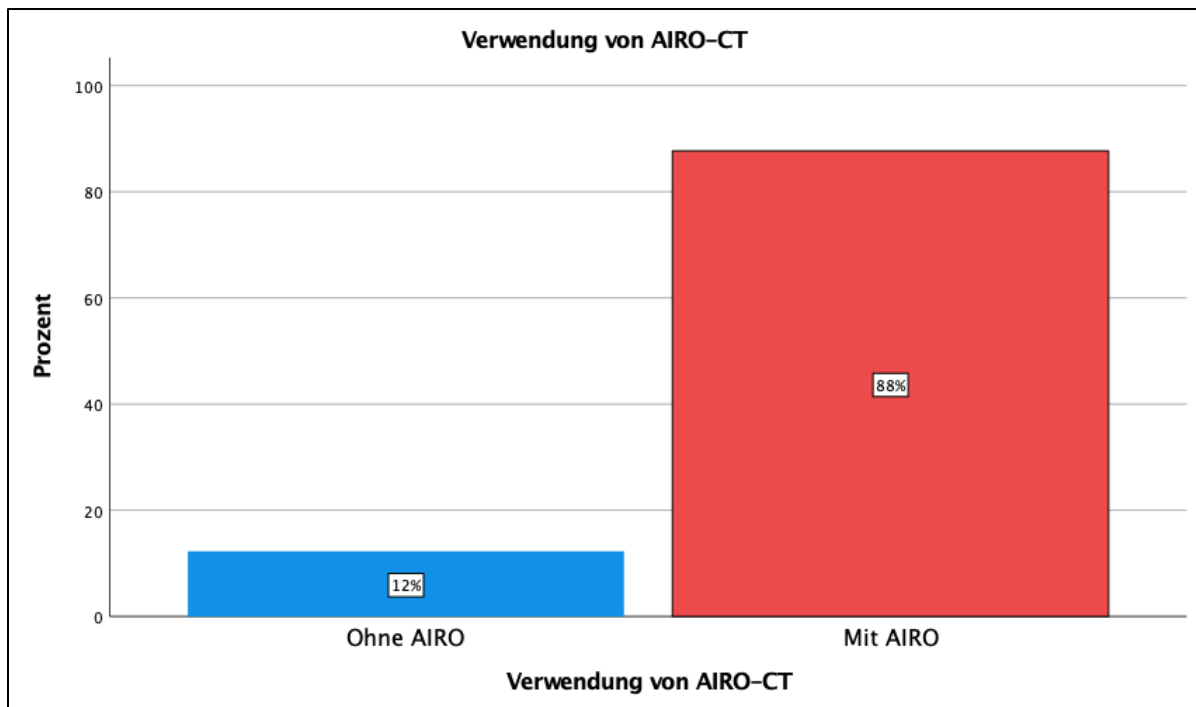


Abbildung 30: Verwendung von AIRO-CT

5.12 Aufenthaltsdauer

Der mittlere postoperative stationäre Aufenthalt zeigte sich unabhängig von der Operationstechnik und betrug 8,43 Tage ($\sigma = 4,717$).

5.13 Mobilität bei Entlassung

Die Patient*innen wurden mit physiotherapeutischer Hilfe und unter schmerzadaptierter Analgesie mobilisiert. Hierbei konnten 31 Patient*innen (25,4 %) an Unterarmgehstützen, 86 Patient*innen (70,5 %) mit Hilfe eines Rollators und vier Patient*innen (3,3 %) an die Bettkante mobilisiert werden. Eine Patientin (0,8 %) verblieb postoperativ schmerzbedingt immobil (Abb. 31).

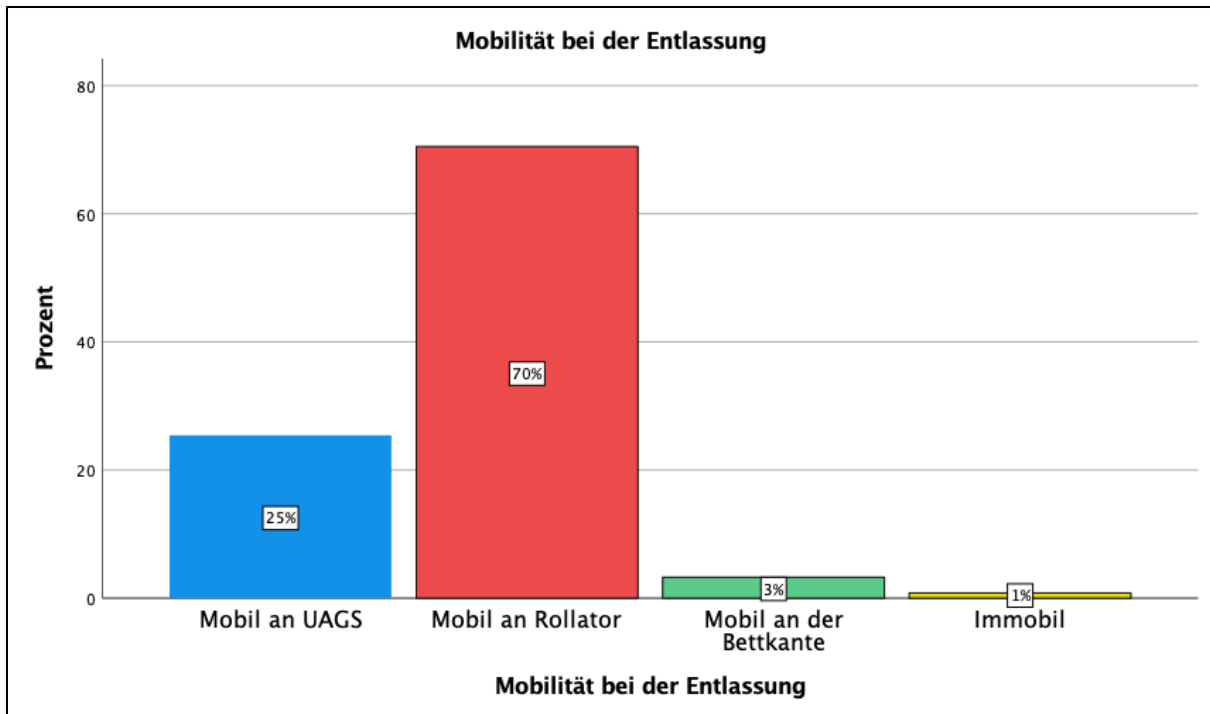


Abbildung 31: Balkendiagramm, Mobilität der operierten Patienten bei der Entlassung

5.14 Follow-Up

Von den 122 Patient*innen erschienen 93 zur geplanten klinischen und radiologischen Kontrolle nach drei und zwölf Monaten (Abb. 30), was einer Follow-Up-Rate von 76,2 % entspricht.

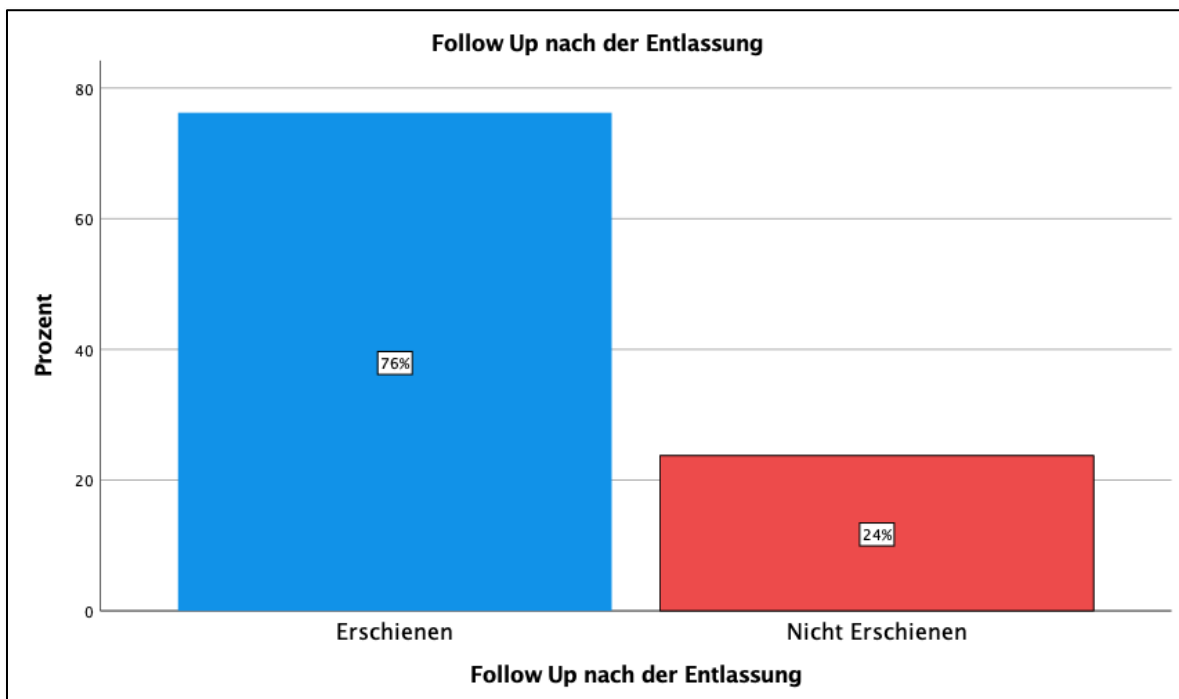


Abbildung 32: Prozent der Patienten, die zur geplanten Kontrolle erschienen

Schmerzfreiheit (Score = 0 auf der NRS) wurde drei Monate postoperativ von 23 Patient*innen (38 %) und zwölf Monate postoperativ von zwölf (50 %) der Patient*innen angegeben. Moderate Schmerzen (Score > 4 – 6 auf der NRS) wurden von sieben Patient*innen (12 %) nach drei Monaten und von zwei Patient*innen (8 %) nach zwölf Monaten postoperativ berichtet (Abb. 33 und 34).

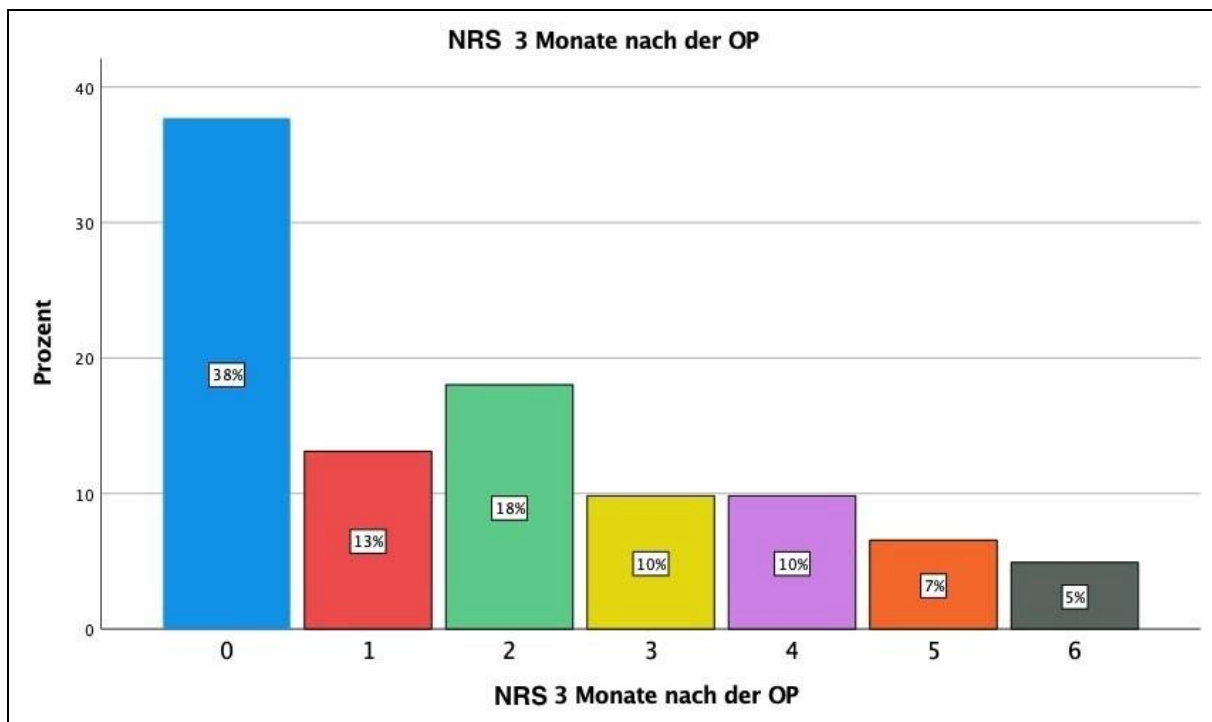


Abbildung 33: Schmerzstärke nach drei Monaten postoperativ auf der NRS

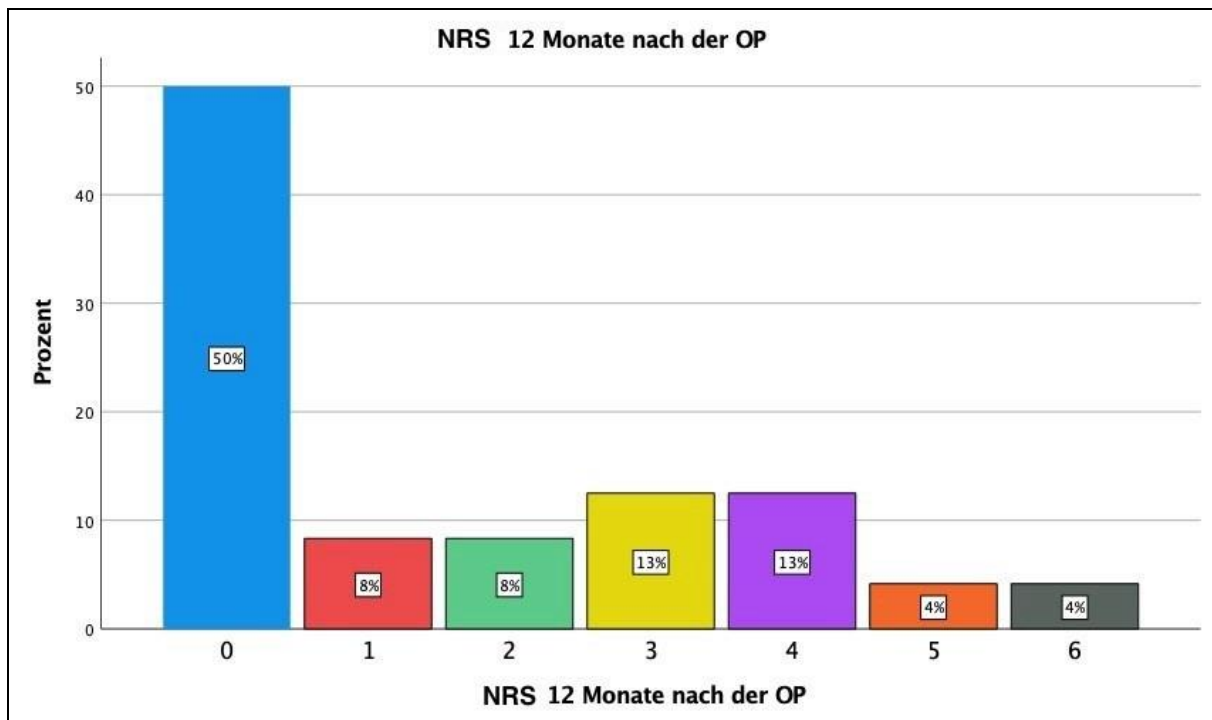


Abbildung 34: Schmerzstärke nach zwölf Monaten postoperativ auf der NRS

5.15 Schraubenlockerung

Elf der 93 zur Kontrolluntersuchung erschienen Patient*innen (11 %) wiesen radiologische Anzeichen einer Schraubenlockerung auf (siehe Abb. 35). Diese Lockerungsanzeichen traten zwischen drei Wochen und sechs Monaten nach der Operation auf.

In Gruppe 1 zeigten sich bei sieben Fällen Lockerungserscheinungen. Bei drei dieser Fälle handelte es sich um ein "Backing out" von einigen Millimetern, welches jedoch asymptomatisch blieb. Bei zwei weiteren Fällen genügte aufgrund des lokalen Druckschmerzes die Entfernung des Implantats. Bei den übrigen Fällen aus dieser Gruppe war eine zusätzliche Stabilisierung notwendig. In Gruppe 2 benötigten beide Fälle eine Revision, bei der eine zusätzliche Stabilisierung mittels lumbopelviner Abstützung durchgeführt wurde. Der einzige Fall aus Gruppe 3 erforderte die Entfernung des Implantats und eine erneute Instrumentierung mit einer dickeren, beschichteten Schraube (SI Loc, Globus Medical). Entsprechend betragen die auf die

Schraubenlockerungen bezogenen Revisionsraten in Gruppe 1 44 % und in Gruppe 2 und Gruppe 3 jeweils 100 % (Tabelle 2).

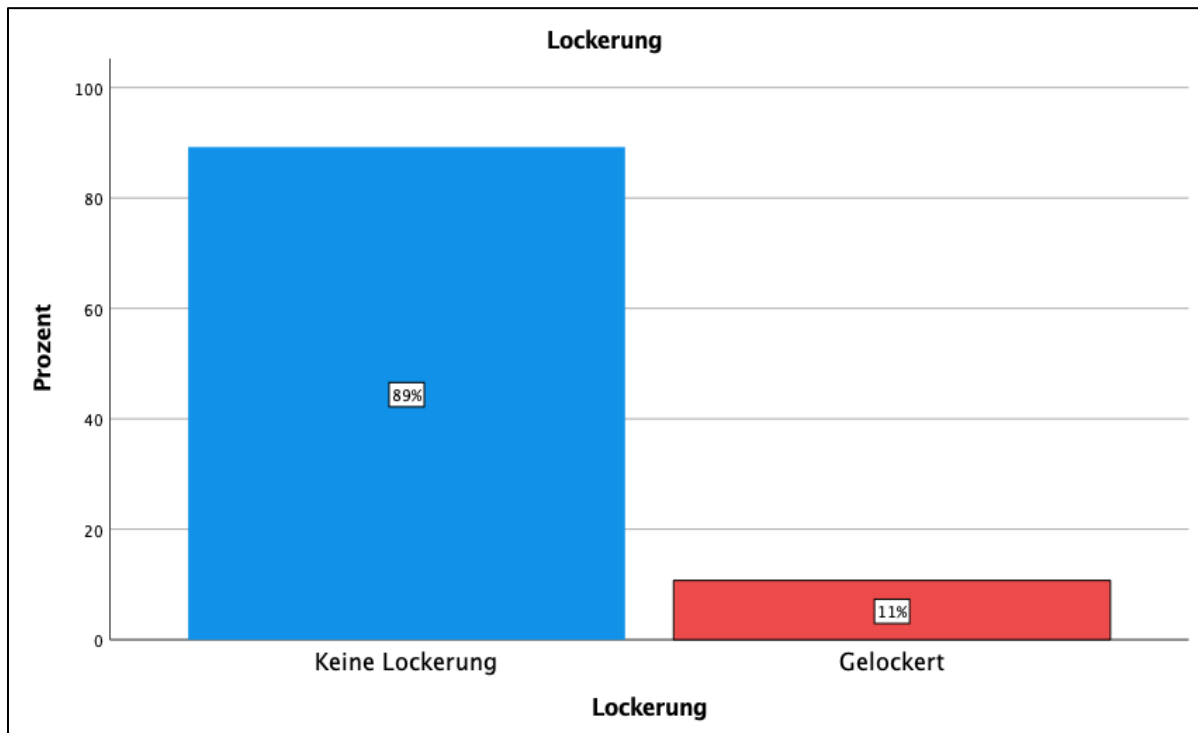


Abbildung 35: Lockerungsrate insgesamt

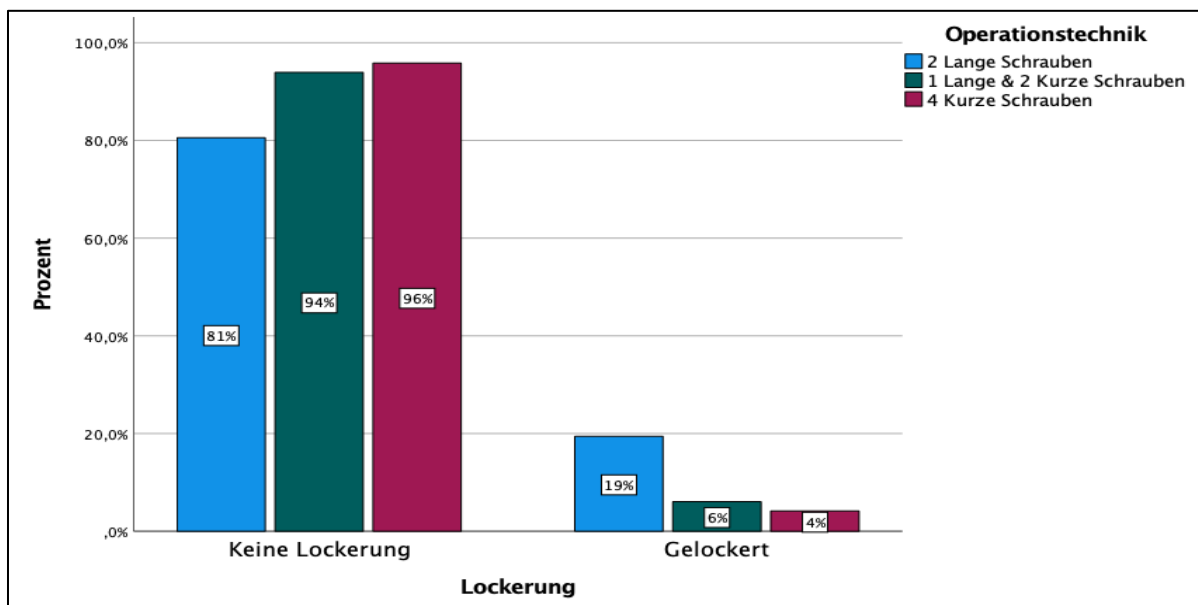


Abbildung 36: Lockerungsrate in Abhängigkeit der Operationstechnik

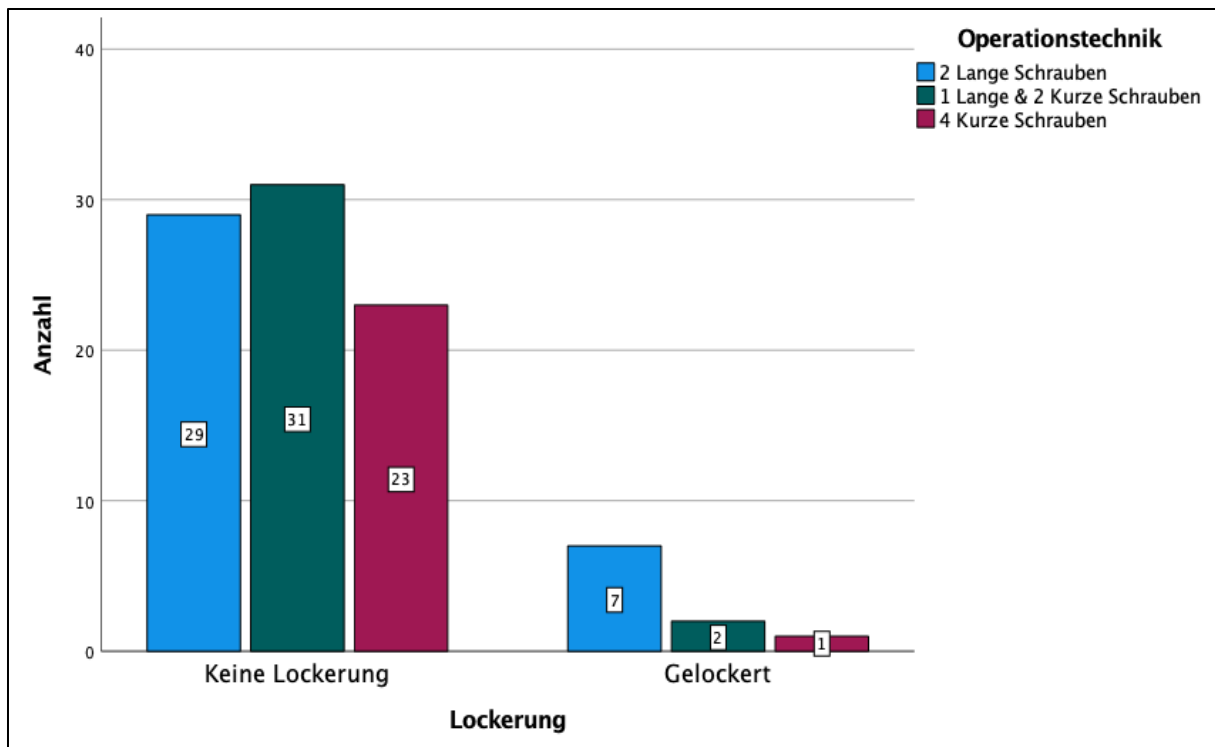


Abbildung 37: Anzahl der Patienten mit gelockerten Schrauben, je nach Operationstechnik

5.16 Statistische Analyse

Für die statistische Analyse der Ergebnisse wurde die Schraubenlockerung als abhängige Variable festgelegt, während die zuvor erwähnten Risikofaktoren als unabhängige Variablen dienten. Um eine Multikollinearität und damit eine Verzerrung der Ergebnisse auszuschließen, wurde die Unabhängigkeit der Variablen untereinander untersucht. Dabei zeigte sich eine starke Korrelation zwischen der Operationstechnik und der Schraubenlokalisierung, mit einem Pearson-Korrelationskoeffizienten von 0.981. Dies bedeutete, dass diese beiden Variablen nicht unabhängig voneinander waren. Folglich wurde die Schraubenlokalisierung aus der weiteren statistischen Auswertung ausgeschlossen, um eine klare Interpretation der Ergebnisse zu gewährleisten.

Von den 46 Patient*innen, die zwei lange Schrauben erhielten (2LS), kamen 36 Patient*innen zur Nachkontrolle. Hierbei zeigte sich in sieben Fällen eine Lockerung, was einer Lockerungsrate von 19 % entspricht. In Gruppe 2 (1L2K), zu der ebenfalls 46 Patient*innen gehörten, erschienen 33 zur Kontrolle. Bei diesen zeigten sich in zwei Fällen Schraubenlockerungen, was einer Rate von 6 % entspricht. Die Lockerungsrate in der dritten Gruppe (4KS) betrug 4 % (siehe Abb. 34 und 35, Tabelle 2).

Die multivariable Regressionsanalyse wurde mittels des Likelihood-Quotienten-Tests durchgeführt. Es ergab sich kein signifikanter Zusammenhang zwischen einer aufgetretenen Schraubenlockerung und den folgenden Variablen: überlappende Unterlegscheiben, FFP-Frakturtyp, Vorliegen einer H-Fraktur, Vorliegen einer Trümmerzone und das betroffene Sakrumdrittel.

Allerdings fand sich eine signifikante Korrelation zwischen aufgetretenen Schraubenlockerungen und der verwendeten Operationstechnik ($p = 0,04$). In Bezug auf Schraubenlockerung als Outcome erwies sich die Operationstechnik als signifikanter Einflussfaktor. Hierbei wurde die Technik 3 (4KS) als Referenzgruppe herangezogen. In der weiterführenden Analyse zeigte sich, dass Schraubenlockerungen signifikant häufiger in Gruppe 1 (OR = 0,091) und Gruppe 2 (OR = 0,599) auftraten im Vergleich zu Gruppe 3.

Gruppe	Patienten (n)	Follow-Up (n)	Gelockerte Schrauben (n)	Anteil der gelockerten Schrauben (%)	Odds-Ratio	Revision (%)
1 (2LS)	46	36	7	19	0,091	43
2 (1L2K)	46	33	2	6	0,599	100
3 (4K)	30	24	1	4	.	100

Tabelle 2: Gesamtzahl der Patienten mit der Nachkontrolle, Zahl der gelockerten Schrauben und Revisionsrate, Odds-Ratio der Lockerungsraten in Bezug auf Technik 3.

6 Diskussion

6.1 Allgemeines zur Sakruminsuffizienzfraktur

Sakruminsuffizienzfrakturen sind Verletzungen des höheren Lebensalters, deren Häufigkeit entsprechend der demografischen Entwicklung der westlichen Industrienationen zunimmt. Ursächlich liegt meist eine Osteoporose vor, bei der schon ein geringes Trauma zu einer Insuffizienzfraktur führen kann. Begleitende Verletzungen finden sich bei diesen Verletzungsmustern eher selten. Das Hauptziel der Behandlung der geriatrischen Patient*innen besteht darin, die Mobilität wiederherzustellen, um sekundäre Krankheitsfolgen zu vermeiden. Darüber hinaus ist die Behandlung der Osteoporose zur Vermeidung weiterer Frakturen unabdingbar.

In der operativen Behandlung von Sakrumfrakturen wurden verschiedene Techniken zur Stabilisierung entwickelt. Insbesondere bei älteren Patient*innen kommen die Vorteile minimalinvasiver Verfahren, wie kürzere Operationszeiten und ein geringeres Weichteiltrauma zur Geltung. Entsprechend findet ihre Anwendung zunehmende Verbreitung. Eine vielversprechende minimalinvasive Methode ist die perkutane computernavigierte Schraubenosteosynthese des hinteren und vorderen Beckenrings. Diese Technik ermöglicht eine präzise Platzierung der Schrauben unter Verwendung eines intraoperativen CTs und 3D-Navigationssystems, wodurch individuelle anatomische Unterschiede und der Verlauf der Fraktur berücksichtigt werden können.

Die vorliegende Studie zielte darauf ab, die verschiedenen Osteosynthesevarianten der computernavigierten Schraubenosteosynthese des hinteren und vorderen Beckenrings zu analysieren, wobei die Raten eines Implantatversagens, insbesondere der Schraubenlockerung und -dislokation, sowie die resultierende Revisionsrate verglichen werden sollten. Weiterhin wurden relevante klinische und radiologische Parameter analysiert, um potenzielle Risikofaktoren für das spätere Versagen der Implantate zu identifizieren. Neben den operativen Parametern wurden auch das funktionelle Outcome der Patient*innen und die allgemeine Wirksamkeit der angewendeten Verfahren analysiert.

6.2 Epidemiologische Aspekte

Das durchschnittliche Alter der in der vorgelegten Arbeit untersuchten Patient*innen betrug 81 Jahre, was bestätigt, dass es sich bei der Sakruminsuffizienzfraktur um eine

Verletzung der geriatrischen Population handelt. Der Anteil der geriatrischen Bevölkerung in Deutschland nimmt stetig zu. Derzeit beträgt der Anteil der Personen im Alter von ≥ 65 Jahren 20 %. Bis zum Jahr 2060 wird ein Anstieg auf bis zu 33 % erwartet, und eine Verdoppelung der Anzahl der über 80-Jährigen wird bis zum Jahr 2050 prognostiziert (94). Dies ist auf die gestiegene Lebenserwartung durch Fortschritte in der medizinischen Versorgung und den demographischen Wandel der Gesellschaft zurückzuführen. Beides führt voraussichtlich zu einem Anstieg der populationsbezogenen Inzidenz typisch geriatrischer Erkrankungen wie Osteoporose, wodurch auch die Inzidenz osteoporotischer Frakturen weiter ansteigen wird (95).

Mit 83,6 % weiblichen Patienten zeigte sich in unserem Kollektiv eine deutliche Ungleichverteilung zwischen den Geschlechtern, was mit publizierten Daten zur Osteoporose übereinstimmt. Die Prävalenz der Osteoporose in Deutschland beträgt für Frauen über 50 Jahre 24 %, während Männer derselben Altersgruppe eine Prävalenz von 6 % aufweisen (96). Zu berücksichtigen ist, dass schätzungsweise 80 % der von einer Osteoporose betroffenen Patient*innen nicht diagnostiziert werden und entsprechend keine spezifische antiosteoporotische Therapie erhalten (95).

6.3 Operative Behandlungsmöglichkeiten

Durch die Entwicklung technischer Hilfsmittel und der erwähnten Vorteile gewannen minimalinvasive operative Techniken wie die perkutane Schraubenosteosynthese der Sakruminsuffizienzfrakturen zunehmend an Bedeutung und etablierten sich vielerorts zum Goldstandard. Einer der relevantesten Faktoren, der bei der Wahl der Versorgungsstrategie berücksichtigt werden muss, ist die durch die i.d.R. bestehende Osteoporose bedingte verminderte Knochenqualität. Diese wird mit einer eingeschränkten knöchernen Integration der Implantate in Verbindung gebracht. In der Literatur werden Schraubenlockerungsraten von 14 bis 18 % beschrieben. (94–96)

Um eine stabilere Verankerung der Osteosyntheseschrauben zu gewährleisten, wurden mittels Knochenzements augmentierbare iliosakrale Schrauben entwickelt und implantiert. Hierbei fanden sich jedoch nicht zu vernachlässigende negative Aspekte, wie das Risiko eines Zementaustritts in den Spinalkanal bzw. die Neuroforamina des Sakrums mit resultierender Kompression der passierenden Nervenwurzeln. Weiterhin wird der intraossär applizierte Zement mit einer Störung der Frakturheilung in Verbindung gebracht (97).

Zur weiteren Optimierung der perkutanen Osteosynthesetechnik wurden längere transsakrale, beide Iliosakralgelenke überbrückende Schrauben entwickelt.

Aufgrund der knöchernen Integration von insgesamt vier Kortikalispunkten (Ossa ilia und Os sacrum beider Seiten) ist bei der Verwendung transsakraler Schrauben eine hohe Primärstabilität zu erwarten. Passend hierzu fanden Zhao et al. 2013 in einer Finite-Elemente-Analyse eine überlegene Stabilität und Bruchfestigkeit der längeren transsakralen Schrauben im Vergleich zu bidirektionalen kürzeren Schrauben. Auf Basis dieser Ergebnisse schlussfolgerte die Gruppe, dass, wenn möglich, die Implantation von zwei transsakralen Schrauben in S1 und S2 vorteilhaft sei. Sollte aus anatomischen Gründen die Implantation nur einer transsakralen Schraube möglich sein, sei aufgrund ihrer besseren Stabilität die S2-Schraube zu favorisieren (95).

6.4 Vergleichende Analyse der angewandten Osteosynthesetechniken

In unserer Arbeit verglichen wir die Techniken der kurzen iliosakralen Schrauben (beidseitig implantiert, zwei je pro Seite) gegen die Verwendung von zwei langen transsakralen Schrauben (einseitig implantiert) und gegen die Kombination von den beiden Techniken (eine lange transsakrale Schraube in Kombination mit einer kurzen iliosakralen Schrauben je Seite).

Im Gegensatz zur Finite-Element-Analyse von Zhao et al. zeigte die Anwendung der Technik mit zwei langen transsakralen Schrauben eine deutlich höhere Lockerungsrate von 19 %. Im Vergleich dazu wiesen die Verwendung von vier kurzen Schrauben lediglich eine Lockerungsrate von 4 % auf, während die Kombination einer langen transsakralen Schraube mit zwei kurzen Schrauben eine Lockerungsrate von 6 % zeigte. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Verwendung von zwei langen transsakralen Schrauben möglicherweise nicht die optimale Wahl ist, um eine effektive Stabilisierung zu gewährleisten und Lockerungen zu vermeiden. Es scheint, dass die Kombination aus kurzen und langen Schrauben eine vielversprechendere Option sein könnte, um die gewünschte Stabilität zu erreichen und das Risiko von Lockerungen zu verringern.

6.5 Frakturmorphologie und –lokalisierung

In der verfügbaren Literatur werden die FFP II Frakturen mit 66,7 % beziffert und stellen damit den am häufigsten vorkommenden Frakturtyp dar (98). In der vorliegenden Arbeit dominierten ebenfalls FFP II Frakturen mit 47,5 %, gefolgt von

FFP IV Frakturen mit 40,2 %. Alle drei vorgekommenen FFP-Typen (FFP II-IV) wurden entweder biportal (mit vier kurzen Schrauben oder mit einer langen transsakralen und zwei kurzen Schrauben) oder monoportal mit zwei langen transsakralen Schrauben versorgt. Riesner et al. empfahlen bei FFP IV-Frakturen aufgrund der zu befürchtenden hohen Schraubenlockerungsrate die trianguläre lumbopelvine Stabilisierung (94). In unserer Untersuchung hatte die Frakturkonfiguration, klassifiziert nach FFP-Typen, jedoch keinen signifikanten Einfluss auf die Lockerungsrate ($p = 0.2$). Dies deutet darauf hin, dass auch höhergradige FFP-Frakturen minimal-invasiv im Sinne der vorgestellten Techniken zuverlässig behandelt werden können.

Aufgrund der geringeren Knochendichte treten Insuffizienzfrakturen häufiger in der Massa lateralis des Os sacrum auf (9). In 67.2 % der Frakturen unserer Studienpopulation befand sich die Fraktur in dieser Zone. Die Zone 2 nach Denis (transforaminal) war mit 2,5 % deutlich seltener vertreten. Heterogene Frakturmorphologien mit Beteiligung von verschiedenen Zonen (unter anderem Zone 3) traten in 30,3 % der Fälle auf. Die Analyse der Frakturkonfigurationen nach Denis zeigte keinen signifikanten Unterschied bzgl. der Rate neu aufgetretener Schraubenlockerungen ($p = 0.75$).

In unserer Studie zeigte sich, dass beidseitige Sakrumfrakturen mit 62,3 % häufiger als einseitige Frakturen nachweisbar waren. Im Vergleich dazu wird in der Literatur von einem ausgeglichenen Verhältnis berichtet. (49,60). Bemerkenswert ist, dass es nach operativer Stabilisierung einseitiger Frakturen in ca. 6 % der Fälle zur zeitnahen Fraktur der Gegenseite kommt (94). Diese Beobachtung konnte in unserer Arbeit nicht überprüft werden, da die Versorgung standardmäßig nur beidseitig erfolgte, auch bei Vorliegen von einseitigen Frakturen.

Die Existenz von Trümmerzonen innerhalb von Sakrumfrakturen stellt eine potenzielle Gefahr für eine ausreichende Frakturheilung und Stabilität dar, weshalb in dieser Situation generell von einer höheren Implantatlockerungsrate ausgegangen wird (99). Die Schraubenlockerungsrate erwies sich in unserem Kollektiv bei Frakturen mit Trümmerzone zwar tendenziell höher, ein signifikanter Unterschied gegenüber Frakturen ohne Vorliegen einer Trümmerzone fand sich jedoch nicht ($p = 0,063$).

Bei Vorliegen einer sogenannten H-Fraktur mit sagittal verlaufender Fraktur beider Massae des Sakrums und einer quer verlaufenden Fraktur des Sakrumkörpers wird

von manchen Autoren die spinopelvine Stabilisierung empfohlen (94). Bei perkutan minimal-invasiver Versorgung der Patient*innen mit H-Frakturen unseres Kollektivs fand sich jedoch keine signifikant höhere Rate der Schraubenlockerung ($p = 0,426$).

6.6 Kombinierte Frakturen des hinteren und vorderen Beckenrings

Da neben einer Sakrumfraktur häufig eine zusätzliche Fraktur des vorderen Beckenrings auftritt, die zu einer weiteren Destabilisierung des Beckens um bis zu 30 % führen kann, wird in diesen Fällen generell eine kombinierte Stabilisierung des vorderen und hinteren Beckenrings empfohlen (100). In der vorliegenden Arbeit wurde in 77 Fällen (63,1 %) eine zusätzliche vordere Beckenringfraktur diagnostiziert. In zwölf Fällen wurden sie mittels Schraubenosteosynthese des Ramus superior des Os pubis versorgt, während in 110 Fällen (90 %) ausschließlich eine posteriore Osteosynthese erfolgte. Zur weiteren Beurteilung der Notwendigkeit einer zusätzlichen Versorgung der vorderen Beckenringfrakturen führten wir eine Analyse in einer Subgruppe der Patient*innen mit Frakturen beider Beckenringe durch. Hierbei zeigte die ventrale Versorgung keinen signifikanten Einfluss auf die Lockerungsrate der Iliosakralschrauben. Die ventralen Eingriffe wurden ausschließlich durch Schraubenosteosynthese des Os pubis durchgeführt; andere Stabilisierungsverfahren über ventrale Zugänge wurden nicht berücksichtigt.

Um beim Einbringen der Schrauben ein Einsinken des Schraubenkopfes in das Os ilium zu vermeiden, wurden routinemäßig Unterlegscheiben verwendet. In 25 Fällen (27 %) lagen die Unterlegscheiben aufgrund der durch den schmalen transsakralen Korridor bedingten räumlichen Nähe der Schrauben aufeinander. Es zeigte sich keine signifikante Korrelation der Schraubenlockerungsrate mit der Positionierung der Unterlegscheiben zueinander (übereinander vs. nebeneinander liegend) ($p = 0,642$).

6.7 Schraubenlockerungsraten und -fehlplatzierungen

Die generelle Lockerungsrate lag im untersuchten Studienkollektiv bei 11 % und damit etwas geringer verglichen mit einer von Eckardt et al 2017 und Kim JW et al 2016 publizierten Lockerungsrate von 17,3 % (101,102). Eine hohe Lockerungsrate fanden Eckardt et al. mit 18 % revisionsbedürftigen Implantatlockerungen (101), wobei eine Revision häufiger bei Verwendung der kurzen iliosakralen Schrauben im Vergleich zu den langen transsakralen Schrauben gefunden wurde. Dieser Unterschied zeigte sich jedoch in ihrer Arbeit als nicht signifikant (98).

Bei der Analyse der auf die Schraubenlokalisierung bezogenen Lockerungsraten fanden sich in der Gruppe 1 (2L) insgesamt bei sieben Patient*innen radiologische Zeichen der Schraubenlockerung. In drei Fällen handelte es sich um eine Kombination aus S1- und S2-transsakralen Schrauben. Bei zwei dieser drei Fälle waren beide Schrauben gelockert, in einem Fall zeigten sich die transsakrale S2-Schraube und zusätzlich die Os Pubis-Stellschraube gelockert. In einem weiteren Fall lockerten beide in S2 implantierten transsakralen Schrauben. In den restlichen drei Patient*innen der Gruppe 1, bei denen es zu Schraubenlockerungen kam, waren beiden transsakralen Schrauben in S1 implantiert, wobei sich kein einheitliches Muster fand. In einem Fall fand sich die kraniale, in einem Fall die kaudale und im dritten Fall beide Schrauben gelockert.

In zwei Fällen der Gruppe 2 mit Schraubenlockerungen befand sich die lange Schraube in S2 und die zwei kurzen Schrauben in S1. Hier kam es in einem Fall zu einem Backing-Out beider Schrauben, im anderen Fall zeigte sich eine sekundäre Frakturdislokation ohne Schrauben-Backing-Out.

In einem einzigen Fall mit Schraubenlockerung in der Gruppe 3 wurden alle Schrauben in S1 implantiert. Gelockert zeigte sich eine Schraube rechts kranial.

Bei der konventionellen Technik der Osteosynthese des Iliosakralgelenks mit 2D Bildverarbeiter kann es in einem beträchtlichen Anteil der Fälle zur Schraubenfehlplatzierung kommen. In der Literatur sind hier Raten von bis zu 26 % Fehllage und in 25 % resultierender Nervenläsionen beschrieben (104). In unserem Kollektiv, in dem die Schraubenplatzierung ausnahmslos 3D-computernavigiert erfolgte, traten demgegenüber keine Schraubenfehlplatzierungen oder Nervenwurzelverletzungen auf.

6.8 Mögliche Ursachen der Schraubenlockerung

In der vorliegenden Analyse konnte festgestellt werden, dass die Verwendung von zwei langen transsakralen Schrauben (2L) der einzige signifikante Risikofaktor für das Auftreten einer Schraubenlockerung war ($p = 0.04$). Die Lockerungsrate betrug in dieser Gruppe 19 % im Vergleich zu 6 % in Gruppe 2, in der eine lange und zwei kurze Schrauben (1L2K) verwendet wurden und 4 % in Gruppe 3, in der vier kurze Schrauben (4KS) verwendet wurden. Als potentielle Ursache der gesteigerten Lockerungsrate bei Verwendung von zwei transsakralen Schrauben ist die durch die

Anatomie des Sakrums vorgegebene parallele Ausrichtung der Schrauben zueinander zu diskutieren. Die parallel verlaufenden transsakralen Schrauben sind gleichermaßen den unter der Belastung der Mobilisierung auftretenden Kräften ausgesetzt. Die parallele Schraubenlage scheint im Hinblick auf die biomechanische Stabilität den in unterschiedlichen Winkelungen implantierten kürzeren iliosakralen Schrauben unterlegen zu sein. Kim JW et al. beschrieben 2016 eine signifikant höhere Lockerungsrate bei Implantation der Schrauben ins mittlere Sakrumdrittel, verglichen zur Implantation ins ventrale Drittel. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der zentrale Sakrumkörper hauptsächlich aus Spongiosa besteht. Die vertikal einwirkenden Kräfte können von der Spongiosa möglicherweise nicht komplett kompensiert werden, wodurch eine Rotationskraft um die Schraube entstehen kann, die wiederum das Herausdrehen der implantierten Schrauben zur Folge haben kann (105). Die langen transsakralen Schrauben laufen aufgrund der benötigten geradlinigen Trajektorie und aufgrund des schmalen knöchernen Korridors in der Regel durch das mittlere Drittel des Sakrumkörpers. Demgegenüber werden die kurzen iliosakralen Schrauben bei der Verwendung der Technik 2 und 3 in zueinander unterschiedlichen Winkeln implantiert, was einer oben beschriebenen Lockerungstendenz wie bei rein parallel eingebrachten Schrauben entgegenwirken könnte. Ein zusätzlicher Hinweis darauf ist die Tatsache, dass die geringste Lockerungsrate bei Verwendung von vier kurzen iliosakralen Schrauben mit entsprechend jeweils unterschiedlich zueinander ausgerichteter Winkelbeziehung gefunden wurde.

Eine weitere mögliche Ursache für die gesteigerte Lockerungsrate der transsakralen Schrauben könnte die Überbrückung beider Iliosakralgelenke darstellen. Bei Mobilisation kommt es in beiden Gelenken zu entgegengerichteten Kippbewegungen (Nutation und Gegenutation), wodurch eine ossäre Integration der Schrauben erschwert und die Schraubenlockerung begünstigt werden könnte.

6.9 Operationsdauer

Die erhöhte Lockerungsrate bei der Implantation von zwei transsakralen Schrauben wird durch den Vorteil eines einseitigen Vorgehens ausgeglichen. Dieses erfordert lediglich eine einmalige virtuelle Schraubenplanung und resultiert in einem geringeren Weichteiltrauma aufgrund eines einzigen, etwa 3 cm langen Hautschnitts. Zudem zeigte sich in dieser Gruppe eine tendenziell kürzere Operationszeit, mit einem

Durchschnittswert von 52,60 Minuten, verglichen mit 61,5 Minuten für Gruppe 2 und 59 Minuten für Gruppe 3, obwohl dieser Unterschied statistisch nicht signifikant war.

6.10 Postoperatives Outcome

Unabhängig von der gewählten Operationstechnik konnten nahezu alle (99,1 %) präoperativ immobilen Patient*innen gemäß den Einschlusskriterien im kurzfristigen postoperativen Verlauf mobilisiert werden. Eine Ausnahme bildete lediglich eine einzige Patientin mit ausgeprägten Komorbiditäten, die immobil blieb. Somit wurde das primäre Ziel der operativen Therapie – die Vermeidung einer längerfristigen Immobilisation – mit großer Zuverlässigkeit erreicht.

Mit einer durchschnittlichen Dauer von acht Tagen entsprach der postoperative akutstationäre Aufenthalt der Patient*innen den Erwartungen für ein geriatrisches Patient*innenkollektiv. Verlängerte Aufenthalte waren unter anderem auf Covid-19-bedingte Isolationsmaßnahmen und Behandlungen zurückzuführen. Die Mehrheit der Patient*innen wurde nach dem akutstationären Aufenthalt in eine weiterführende geriatrische Rehabilitation überführt, um den postoperativ verbesserten Mobilitätsgrad zu festigen. Dies entspricht dem üblichen postoperativen Management von geriatrischen Traumatpatient*innen.

Bei den Patient*innen mit gelockerten Schrauben blieben drei Fälle asymptomatisch und benötigten keine weiteren Interventionen. In zwei Fällen war aufgrund bereits eingetretener Frakturheilung lediglich die Entfernung des Metalls ausreichend. Bei zwei Patient*innen wurden die gelockerten Schrauben gegen dickere Schrauben (SI-Lok, Fa. Globus Medical) ausgetauscht, und in drei Fällen war eine Uminstrumentierung im Sinne einer spinopelvinen Abstützung notwendig.

6.11 Limitationen

Bei der retrospektiven klinischen Datenerhebung zur Analyse der vorliegenden Arbeit zur Schraubenlockerungsrate bei minimal invasiver Versorgung der Sakruminsuffizienzfraktur sind bestimmte Limitationen zu beachten. Die Studie basiert auf vorhandenen Daten, die unvollständig oder fehlerhaft sein könnten. Die Genauigkeit der Aufzeichnungen und die Sorgfalt der Dokumentation beeinflussen die Qualität und Verfügbarkeit der Daten (z.B. fehlende präoperative Daten zur Knochendichte, Follow-Up Untersuchungen). Es besteht die Möglichkeit, dass bestimmte relevante Informationen nicht erfasst wurden, was zu einem Mangel an

Daten zu bestimmten Variablen geführt haben könnte und die Interpretation der Ergebnisse einschränkt. Zudem besteht das Risiko eines Selektionsbias, der durch die ausschließliche Nutzung bereits vorhandener Daten bedingt ist. Dies schränkt die Möglichkeit einer systematischen Auswahl und Kontrolle der einbezogenen Fälle sowie der angewandten Operationstechniken ein. Die Studie könnte daher bestimmte Patient*innengruppen oder spezifische Behandlungsmethoden bevorzugen oder vernachlässigen, was die Repräsentativität und Verallgemeinerbarkeit der Ergebnisse potenziell beeinträchtigt. Besonders hervorzuheben ist hier die operative Versorgung ggf. zusätzlich vorhandener vorderer Beckenringfrakturen, die, wie oben erwähnt, im untersuchten Kollektiv nur bei technischer Durchführbarkeit einer ventralen Schraubenosteosynthese operativ behandelt wurden.

Das Gesamtkomplikationsprofil im untersuchten Kollektiv war sehr gering, es traten keine Fälle von Verletzungen von Nervenwurzeln oder Blutgefäßen auf. Eine Generalisierbarkeit dieser Ergebnisse ist jedoch aufgrund des monozentrischen Charakters und der untersuchten Fallzahl nur eingeschränkt möglich.

In der vorliegenden Arbeit wurden minimalinvasive Osteosynthesetechniken zur Behandlung von Sakruminsuffizienzfrakturen analysiert. Die Auswertung der postoperativen Mobilität und Schmerzreduktion als Outcomeparameter legt nahe, dass diese Behandlungsansätze sehr effektiv sind. Es ist jedoch anzumerken, dass in der Fachliteratur auch andere minimalinvasive Therapiemethoden, wie die Ballon-Sakroplastie, die Radiofrequenz-Sakroplastie und die Zement-Sakroplastie, als wirksame Behandlungsoptionen aufgeführt werden. (106–109).

7 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden unterschiedliche Techniken der minimal-invasiven, perkutanen, computernavigierten Schraubenosteosynthese des Sakrums hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit und ihres klinischen sowie radiologischen Outcomes evaluiert. Der Einsatz von intraoperativem CT und Computernavigation gewährleistete eine präzise und sichere Schraubenplatzierung in allen Fällen. Besonders hervorzuheben ist die monoportale transsakrale Schraubenosteosynthese des hinteren Beckenrings,

die sich durch die kürzeste Operations- und Narkosedauer sowie ein minimales Gewebetrauma auszeichnete und eine effektive postoperative Mobilisierung der Patient*innen ermöglichte.

Trotz dieser Vorteile wies diese Technik im Vergleich zu biportalen Techniken, die entweder eine Kombination aus transsakralen und iliosakralen Schrauben oder ausschließlich kürzere iliosakrale Schrauben nutzten, eine erhöhte Lockerungsrate auf. Diese Erkenntnis deutet darauf hin, dass die biportalen Techniken in Bezug auf die langfristige Implantatstabilität überlegen sind.

Kurze Operationszeiten und ein geringes Gewebetrauma sind wesentliche Vorteile der monoportalen Technik, von denen insbesondere geriatrische Patient*innen profitieren. Jedoch wird diese Überlegenheit durch eine höhere Revisionsrate aufgrund unterlegener Implantatstabilität teilweise konterkariert. Daher sollte trotz der genannten Vorzüge der monoportalen Technik eine Weiterentwicklung derselben sowie der verwendeten Implantatsysteme in Betracht gezogen werden, um die langfristige Stabilität und Sicherheit zu verbessern.

8 Literaturverzeichnis

1. Nanninga GL, de Leur K, Panneman MJM, van der Elst M, Hartholt KA. Increasing rates of pelvic fractures among older adults: The Netherlands, 1986–2011. *Age Ageing*. 2014;43(5):648–53.
2. Rommens PM, Hofmann A, Hessmann MH. Management of acute hemorrhage in pelvic trauma: an overview. *European Journal of Trauma and Emergency Surgery*. 2010;36(2):91–9.
3. Benzinger P, Becker C, Kerse N, Bleibler F, Büchele G, Icks A, et al. Pelvic fracture rates in community-living people with and without disability and in residents of nursing homes. *J Am Med Dir Assoc*. 2013;14(9):673–8.
4. Kelsey JL, Prill MM, Keegan THM, Quesenberry Jr CP, Sidney S. Risk factors for pelvis fracture in older persons. *Am J Epidemiol*. 2005;162(9):879–86.
5. Kannus P, Palvanen M, Niemi S, Parkkari J, Järvinen M. Epidemiology of osteoporotic pelvic fractures in elderly people in Finland: sharp increase in 1970–1997 and alarming projections for the new millennium. *Osteoporosis international*. 2000;11(5):443–8.
6. Balogh Z, King KL, Mackay P, McDougall D, Mackenzie S, Evans JA, et al. The epidemiology of pelvic ring fractures: a population-based study. *Journal of Trauma and Acute Care Surgery*. 2007;63(5):1066–73.
7. Rommens PM, Wagner D, Hofmann A. Minimal invasive surgical treatment of fragility fractures of the pelvis. *Chirurgia (Bucur)*. 2017;112(5):524–37.
8. Stein G, Eysel P, Scheyerer MJ. *Expertise Orthopädie und Unfallchirurgie Wirbelsäule*. Georg Thieme Verlag; 2019.
9. Denis F, Davis S, Comfort T. Sacral fractures: an important problem. Retrospective analysis of 236 cases. *Clin Orthop Relat Res*. 1988;227:67–81.
10. Wagner D, Kamer L, Sawaguchi T, Richards RG, Noser H, Rommens PM. Sacral bone mass distribution assessed by averaged three-dimensional CT models:

- implications for pathogenesis and treatment of fragility fractures of the sacrum. *JBJS*. 2016;98(7):584–90.
11. Linstrom NJ, Heiserman JE, Kortman KE, Crawford NR, Baek S, Anderson RL, et al. Anatomical and biomechanical analyses of the unique and consistent locations of sacral insufficiency fractures. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2009;34(4):309.
 12. Mendel T, Noser H, Wohlrab D, Stock K, Radetzki F. The lateral sacral triangle—a decision support for secure transverse sacroiliac screw insertion. *Injury*. 2011;42(10):1164–70.
 13. Radetzki F, Wohlrab D, Goehre F, Noser H, Delank KS, Mendel T. Anatomical conditions of the posterior pelvic ring regarding bisegmental transverse sacroiliac screw fixation: a 3D morphometric study of 125 pelvic CT datasets. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2014;134(8):1115–20.
 14. Gras F, Gottschling H, Schröder M, Marintschev I, Hofmann GO, Burgkart R. Transsacral osseous corridor anatomy is more amenable to screw insertion in males: a biomorphometric analysis of 280 pelves. *Clin Orthop Relat Res*. 2016;474(10):2304–11.
 15. Hasenboehler EA, Stahel PF, Williams A, Smith WR, Newman JT, Symonds DL, et al. Prevalence of sacral dysmorphism in a prospective trauma population: Implications for a "safe" surgical corridor for sacro-iliac screw placement. *Patient Saf Surg*. 2011;5(1):1–7.
 16. König MA, Sundaram RO, Saville P, Jehan S, Boszczyk BM. Anatomical considerations for percutaneous trans ilio-sacroiliac S1 and S2 screw placement. *European Spine Journal*. 2016;25(6):1800–5.
 17. Mendel T, Radetzki F, Wohlrab D, Stock K, Hofmann GO, Noser H. CT-based 3-D visualisation of secure bone corridors and optimal trajectories for sacroiliac screws. *Injury*. 2013;44(7):957–63.
 18. Wagner D, Kamer L, Sawaguchi T, Geoff Richards R, Noser H, Uesugi M, et al. Critical dimensions of trans- sacral corridors assessed by 3D CT models:

- relevance for implant positioning in fractures of the sacrum. *Journal of Orthopaedic Research*. 2017;35(11):2577–84.
19. Salazar D, Lannon S, Pasternak O, Schiff A, Lomasney L, Mitchell E, et al. Investigation of bone quality of the first and second sacral segments amongst trauma patients: concerns about iliosacral screw fixation. *Journal of Orthopaedics and Traumatology*. 2015;16(4):301–8.
 20. Organization WH. Guidelines for preclinical evaluation and clinical trials in osteoporosis. World Health Organization; 1998.
 21. Rommens PM, Hofmann A. Focus on fragility fractures of the pelvis. Springer; 2021.
 22. Lyders EM, Whitlow CT, Baker MD, Morris PP. Imaging and treatment of sacral insufficiency fractures. *American journal of neuroradiology*. 2010;31(2):201–10.
 23. Svedbom A, Hernlund E, Ivergård M, Compston J, Cooper C, Stenmark J, et al. Osteoporosis in the European Union: a compendium of country-specific reports. *Arch Osteoporos*. 2013;8(1):1–218.
 24. Schapira D, Militeanu D, Israel O, Scharf Y. Insufficiency fractures of the pubic ramus. In: *Seminars in arthritis and rheumatism*. Elsevier; 1996. p. 373–82.
 25. Grangier C, Garcia J, Howarth NR, May M, Rossier P. Role of MRI in the diagnosis of insufficiency fractures of the sacrum and acetabular roof. *Skeletal Radiol*. 1997;26(9):517–24.
 26. Taillandier J, Langue F, Alemanni M, Taillandier-Heriché E. Mortality and functional outcomes of pelvic insufficiency fractures in older patients. *Joint Bone Spine*. 2003;70(4):287–9.
 27. Wild A, Jaeger M, Haak H, Mehdián S. Sacral insufficiency fracture, an unsuspected cause of low-back pain in elderly women. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2002;122(1):58–60.
 28. Frey ME, DePalma MJ, Cifu DX, Bhagia SM, Carne W, Daitch JS. Percutaneous sacroplasty for osteoporotic sacral insufficiency fractures: a prospective, multicenter, observational pilot study. *The Spine Journal*. 2008;8(2):367–73.

29. Rawlings III CE, Wilkins RH, Martinez S, Wilkinson Jr RH. Osteoporotic sacral fractures: a clinical study. *Neurosurgery*. 1988;22(1):72–6.
30. Newhouse KE, El-Khoury GY, Buckwalter JA. Occult sacral fractures in osteopenic patients. *J Bone Joint Surg Am*. 1992;74(10):1472–7.
31. Finiels H, Finiels PJ, Jacquot JM, Strubel D. Fractures of the sacrum caused by bone insufficiency. Meta-analysis of 508 cases. *Presse Med*. 1997;26(33):1568–73.
32. Stuby FM, Schäffler A, Haas T, König B, Stöckle U, Freude T. Insuffizienzfrakturen des Beckenrings. *Unfallchirurg*. 2013;116(4):351–66.
33. Andrich S, Haastert B, Neuhaus E, Neidert K, Arend W, Ohmann C, et al. Epidemiology of pelvic fractures in Germany: considerably high incidence rates among older people. *PLoS One*. 2015;10(9):e0139078.
34. Kannus P, Parkkari J, Niemi S, Sievänen H. Low-trauma pelvic fractures in elderly Finns in 1970–2013. *Calcif Tissue Int*. 2015;97(6):577–80.
35. Buller LT, Best MJ, Quinnan SM. A nationwide analysis of pelvic ring fractures: incidence and trends in treatment, length of stay, and mortality. *Geriatr Orthop Surg Rehabil*. 2016;7(1):9–17.
36. Rupp M, Walter N, Pfeifer C, Lang S, Kerschbaum M, Krutsch W, et al. The incidence of fractures among the adult population of Germany: an analysis from 2009 through 2019. *Dtsch Arztebl Int*. 2021;118(40):665.
37. Breuil V, Roux CH, Testa J, Albert C, Chassang M, Brocq O, et al. Outcome of osteoporotic pelvic fractures: an underestimated severity. Survey of 60 cases. *Joint Bone Spine*. 2008;75(5):585–8.
38. Morris RO, Sonibare A, Green DJ, Masud T. Closed pelvic fractures: characteristics and outcomes in older patients admitted to medical and geriatric wards. *Postgrad Med J*. 2000;76(900):646–50.
39. Deakin DE, Boulton C, Moran CG. Mortality and causes of death among patients with isolated limb and pelvic fractures. *Injury*. 2007;38(3):312–7.

40. Krappinger D, Kammerlander C, Hak DJ, Blauth M. Low-energy osteoporotic pelvic fractures. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2010;130(9):1167–75.
41. Prieto-Alhambra D, Aviles FF, Judge A, Van Staa T, Nogués X, Arden NK, et al. Burden of pelvis fracture: a population-based study of incidence, hospitalisation and mortality. *Osteoporosis international.* 2012;23(12):2797–803.
42. Babayev M, Lachmann E, Nagler W. The controversy surrounding sacral insufficiency fractures: to ambulate or not to ambulate? *Am J Phys Med Rehabil.* 2000;79(4):404–9.
43. Bleibler F, Konnopka A, Benzinger P, Rapp K, König HH. The health burden and costs of incident fractures attributable to osteoporosis from 2010 to 2050 in Germany—a demographic simulation model. *Osteoporosis international.* 2013;24(3):835–47.
44. Cummings SR, Melton LJ. Epidemiology and outcomes of osteoporotic fractures. *The Lancet.* 2002;359(9319):1761–7.
45. King AB, Tosteson ANA, Wong JB, Solomon DH, Burge RT, Dawson- Hughes B. Interstate variation in the burden of fragility fractures. *Journal of Bone and Mineral Research.* 2009;24(4):681–92.
46. Pike C, Birnbaum HG, Schiller M, Sharma H, Burge R, Edgell ET. Direct and indirect costs of non-vertebral fracture patients with osteoporosis in the US. *Pharmacoeconomics.* 2010;28(5):395–409.
47. Lin J, Lachmann E, Nagler W. Sacral insufficiency fractures: a report of two cases and a review of the literature. *J Womens Health Gend Based Med.* 2001;10(7):699–705.
48. Peh WC, Khong PL, Yin Y, Ho WY, Evans NS, Gilula LA, et al. Imaging of pelvic insufficiency fractures. *Radiographics.* 1996;16(2):335–48.
49. Gotis-Graham I, McGuigan L, Diamond T, Portek I, Quinn R, Sturgess A, et al. Sacral insufficiency fractures in the elderly. *J Bone Joint Surg Br.* 1994;76(6):882–6.

50. Muthukumar T, Butt SH, Cassar-Pullicino VN, McCall IW. Cauda equina syndrome presentation of sacral insufficiency fractures. *Skeletal Radiol.* 2007;36(4):309–13.
51. Rizzo PF, Gould ES, Lyden JP, Asnis SE. Diagnosis of occult fractures about the hip. Magnetic resonance imaging compared with bone-scanning. *J Bone Joint Surg Am.* 1993;75(3):395–401.
52. Blake SP, Connors AM. Sacral insufficiency fracture. *Br J Radiol.* 2004;77(922):891–6.
53. Bogost GA, Lizerbram EK, Crues 3rd J V. MR imaging in evaluation of suspected hip fracture: frequency of unsuspected bone and soft-tissue injury. *Radiology.* 1995;197(1):263–7.
54. Cabarrus MC, Ambekar A, Lu Y, Link TM. MRI and CT of insufficiency fractures of the pelvis and the proximal femur. *American Journal of Roentgenology.* 2008;191(4):995–1001.
55. White JH, Hague C, Nicolaou S, Gee R, Marchinkow LO, Munk PL. Imaging of sacral fractures. *Clin Radiol.* 2003;58(12):914–21.
56. Henes FO, Nüchtern J V, Groth M, Habermann CR, Regier M, Rueger JM, et al. Comparison of diagnostic accuracy of Magnetic Resonance Imaging and Multidetector Computed Tomography in the detection of pelvic fractures. *Eur J Radiol.* 2012;81(9):2337–42.
57. Nüchtern JV, Hartel MJ, Henes FO, Groth M, Jauch SY, Haegele J, et al. Significance of clinical examination, CT and MRI scan in the diagnosis of posterior pelvic ring fractures. *Injury.* 2015;46(2):315–9.
58. Mendel T, Ullrich BW, Hofmann GO, Schenk P, Goehre F, Schwan S, et al. Progressive instability of bilateral sacral fragility fractures in osteoporotic bone: a retrospective analysis of X-ray, CT, and MRI datasets from 78 cases. *European Journal of Trauma and Emergency Surgery.* 2021;47(1):11–9.
59. Lattauschke A, Klauke F, Ullrich BW, Hofmann GO, Mendel T. Behandlungsverlauf der operativen Versorgung einer Sakruminsuffizienzfraktur. *Unfallchirurg.* 2017;120(10):890–5.

60. De Smet AA, Neff JR. Pubic and sacral insufficiency fractures: clinical course and radiologic findings. *American Journal of Roentgenology*. 1985;145(3):601–6.
61. Kayanja M, Tsai E, Yamashita T, Milks R, Lieberman I. P26. The Biomechanics of Insufficiency Fractures and Augmentation of the Sacrum. *The Spine Journal*. 2006;6(5):96S.
62. Leroux JL, Denat B, Thomas E, Blotman F, Bonnel F. Sacral insufficiency fractures presenting as acute low-back pain. Biomechanical aspects. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1993;18(16):2502–6.
63. Baierlein SA. *Frakturklassifikationen*. Georg Thieme Verlag; 2010.
64. Walz M, Burger C, Kabir K, Welle K, Liener U, Goost H. Anwendungsverlässlichkeit der FFP-Klassifikation bei Beckenfrakturen. *Unfallchirurg*. 2021;1–9.
65. Garant M. Sacroplasty: a new treatment for sacral insufficiency fracture. *Journal of Vascular and Interventional Radiology*. 2002;13(12):1265–7.
66. Butler CL, Given CA, Michel SJ, Tibbs PA. Percutaneous sacroplasty for the treatment of sacral insufficiency fractures. *American Journal of Roentgenology*. 2005;184(6):1956–9.
67. Heron J, Connell DA, James SLJ. CT-guided sacroplasty for the treatment of sacral insufficiency fractures. *Clin Radiol*. 2007;62(11):1094–100.
68. Pommersheim W, Huang-Hellinger F, Baker M, Morris P. Sacroplasty: a treatment for sacral insufficiency fractures. *American Journal of Neuroradiology*. 2003;24(5):1003–7.
69. Frey ME, DePalma MJ, Cifu DX, Bhagia SM, Daitch JS. Efficacy and safety of percutaneous sacroplasty for painful osteoporotic sacral insufficiency fractures: a prospective, multicenter trial. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2007;32(15):1635–40.
70. Andresen JR, Radmer S, Prokop A, Wollny M, Nissen U, Schober HC, et al. Diagnostik und Behandlung von sacralen Insuffizienzfrakturen unter besonderer

- Berücksichtigung der Zementaugmentationsverfahren—eine Übersicht. *Osteologie*. 2021;30(02):163–72.
71. Pohlemann T, Krettek C, Hoffmann R, Culemann U, Gänsslen A. Biomechanischer Vergleich verschiedener Notfallstabilisierungsmaßnahmen am Beckenring. *Unfallchirurg*. 1994;97(10):503–10.
 72. Burkhardt M, Culemann U, Seekamp A, Pohlemann T. Operative Versorgungsstrategien beim Polytrauma mit Beckenfraktur. *Unfallchirurg*. 2005;108(10):812–20.
 73. Pape HC, Stalp M, Dahlweid M, Regel G, Tscherne H. Welche primäre Operationsdauer ist hinsichtlich eines Borderline-Zustandes polytraumatisierter Patienten vertretbar?: Eine prospektive Evaluation anhand des Traumaregisters der DGU. *Unfallchirurg*. 1999;102(11):861–9.
 74. Seekamp A. Externe Fixation am Beckenring. *Trauma Berufskrankh*. 2007;9(2):S149–53.
 75. Kuttner M, Klaiber A, Lorenz T, Füchtmeier B, Neugebauer R. Der subkutane ventrale Fixateur interne (SVFI) am Becken. *Unfallchirurg*. 2009;112(7):661–9.
 76. Gardner MJ, Mehta S, Mirza A, Ricci WM. Anterior pelvic reduction and fixation using a subcutaneous internal fixator. *J Orthop Trauma*. 2012;26(5):314–21.
 77. Cole PA, Gauger EM, Anavian J, Ly T V, Morgan RA, Heddings AA. Anterior pelvic external fixator versus subcutaneous internal fixator in the treatment of anterior ring pelvic fractures. *J Orthop Trauma*. 2012;26(5):269–77.
 78. Müller FJ, Stosiek W, Zellner M, Neugebauer R, Füchtmeier B. The anterior subcutaneous internal fixator (ASIF) for unstable pelvic ring fractures. Clinical and radiological mid-term results. *Int Orthop*. 2013;37(11):2239–45.
 79. Hiesterman TG, Hill BW, Cole PA. Surgical technique: a percutaneous method of subcutaneous fixation for the anterior pelvic ring: the pelvic bridge. *Clin Orthop Relat Res*. 2012;470(8):2116–23.
 80. Fang C, Alabdulrahman H, Pape HC. Complications after percutaneous internal fixator for anterior pelvic ring injuries. *Int Orthop*. 2017;41(9):1785–90.

81. Levine AM. Fixation of fractures of the sacrum. *Oper Tech Orthop.* 1997;7(3):221–31.
82. Ebraheim NA, Rusin JJ, Coombs RJ, Jackson WT, Holiday B. Percutaneous computed-tomography-stabilization of pelvic fractures: preliminary report. *J Orthop Trauma.* 1987;1(3):197–204.
83. Duwelius PJ, Van Allen M, Bray TJ, Nelson D. Computed tomography-guided fixation of unstable posterior pelvic ring disruptions. *J Orthop Trauma.* 1992;6(4):420–6.
84. Takao M, Nishii T, Sakai T, Sugano N. CT-3D-fluoroscopy matching navigation can reduce the malposition rate of iliosacral screw insertion for less-experienced surgeons. *J Orthop Trauma.* 2013;27(12):716–21.
85. Gorczyca JT, Varga E, Woodside T, Hearn T, Powell J, Tile M. The strength of iliosacral lag screws and transiliac bars in the fixation of vertically unstable pelvic injuries with sacral fractures. *Injury.* 1996;27(8):561–4.
86. Pohlemann T, Culemann U, Tscherne H. Comparative biomechanical studies of internal stabilization of trans-foraminal sacrum fractures. *Orthopade.* 1992;21(6):413–21.
87. Sagi HC, Ordway NR, DiPasquale T. Biomechanical analysis of fixation for vertically unstable sacroiliac dislocations with iliosacral screws and symphyseal plating. *J Orthop Trauma.* 2004;18(3):138–43.
88. Sar C, Kilicoglu Ö. S1 pediculoiliac screw fixation in instabilities of the sacroiliac complex: biomechanical study and report of two cases. *J Orthop Trauma.* 2003;17(4):262–70.
89. Van Zwienen CMA, Van den Bosch EW, Snijders CJ, Kleinrensink GJ, Van Vugt AB. Biomechanical comparison of sacroiliac screw techniques for unstable pelvic ring fractures. *J Orthop Trauma.* 2004;18(9):589–95.
90. Yinger K, Scalise J, Olson SA, Bay BK, Finkemeier CG. Biomechanical comparison of posterior pelvic ring fixation. *J Orthop Trauma.* 2003;17(7):481–7.

91. Schildhauer TA, Josten C, Muhr G. Triangular osteosynthesis of vertically unstable sacrum fractures: a new concept allowing early weight-bearing. *J Orthop Trauma*. 1998;12(5):307–14.
92. Tiemann AH, Hofmann GO. Trianguläre vertebropelvine Abstützung. *Trauma Berufskrankh*. 2008;10(2):123–30.
93. Pinto EM, Neves JR, Teixeira A, Frada R, Atilano P, Oliveira F, et al. Efficacy of Hounsfield units measured by lumbar computer tomography on bone density assessment: a systematic review. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2022;47(9):702–10.
94. Riesner HJ, Palm HG, Friemert B, Lang P, AG Becken D. Trianguläre minimal-invasive spinopelvine Stabilisierung bei Beckenfrakturen Typ C nach der Klassifikation der Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen (AO/OTA) und Typ IV nach den Fragilitätsfrakturen (FFP). *Unfallchirurg*. 2021;124(11):923–30.
95. Zhao Y, Zhang S, Sun T, Wang D, Lian W, Tan J, et al. Mechanical comparison between lengthened and short sacroiliac screws in sacral fracture fixation: a finite element analysis. *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research*. 2013;99(5):601–6.
96. Lodde MF, Katthagen JC, Riesenbeck O, Raschke MJ, Hartensuer R. Trends in der operativen Therapie von Frakturen des Beckenrings. *Unfallchirurg*. 2020;1–8.
97. Rommens PM, Ossendorf C, Pairen P, Dietz SO, Wagner D, Hofmann A. Clinical pathways for fragility fractures of the pelvic ring: personal experience and review of the literature. *Journal of Orthopaedic Science*. 2015;20:1–11.
98. Linhart C, Steiner E, Kußmaul CA, Böcker W, Neuerburg C, Gleich J. Hohe Prävalenz fehlender Informationen bezüglich der Knochengesundheit orthogeriatrischer Patienten mit Fragilitätsfrakturen des Beckens—eine institutionelle Registeranalyse. *Osteologie*. 2022;31(03):P-36.
99. Hoffmann MF, Dudda M, Schildhauer TA. Unilaterale trianguläre lumbopelvine Stabilisierung. *Unfallchirurg*. 2013;116(11):985–90.
100. Rommens PM, Arand C, Thomczyk S, Handrich K, Wagner D, Hofmann A. Fragilitätsfrakturen des Beckens. *Unfallchirurg*. 2019;122(6):469–82.

101. Eckardt H, Egger A, Hasler RM, Zech CJ, Vach W, Suhm N, et al. Good functional outcome in patients suffering fragility fractures of the pelvis treated with percutaneous screw stabilisation: assessment of complications and factors influencing failure. *Injury*. 2017;48(12):2717–23.
102. Kim JW, Oh CW, Oh JK, Kyung HS, Park KH, Yoon SD, et al. The incidence of and factors affecting iliosacral screw loosening in pelvic ring injury. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2016;136(7):921–7.
103. Wagner D, Hofmann A, Kamer L, Sawaguchi T, Richards RG, Noser H, et al. Fragility fractures of the sacrum occur in elderly patients with severe loss of sacral bone mass. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2018;138:971–7.
104. Mendel T, Appelt K, Kuhn P, Suhm N. Der sakroiliakale Knochenkorridor. *Unfallchirurg*. 2008;1(111):19–26.
105. Griffin DR, Starr AJ, Reinert CM, Jones AL, Whitlock S. Vertically unstable pelvic fractures fixed with percutaneous iliosacral screws: does posterior injury pattern predict fixation failure? *J Orthop Trauma*. 2006;20(1):S30–6.
106. Andresen R, Radmer S, Andresen JR, Wollny M, Nissen U, Schober HC. Clinical improvement and cost-effectiveness of CT-guided radiofrequency sacroplasty (RFS) and cement sacroplasty (CSP)—A prospective randomised comparison of methods. *Z Orthop Unfall*. 2019;157(05):524–33.
107. Andresen JR, Radmer S, Prokop A, Schröder G, Schober HC, Andresen R. Sacral fragility fractures: risk factors and outcomes after cement sacroplasty. *Orthopädie (Heidelberg, Germany)*. 2022;51(12):976–85.
108. Andresen R, Radmer S, Wollny M, Andresen JR, Nissen U, Schober HC. CT-guided cement sacroplasty (CSP) as pain therapy in non-dislocated insufficiency fractures. *European Journal of Orthopaedic Surgery & Traumatology*. 2017;27:1045–50.
109. Frey ME, DePalma MJ, Cifu DX, Bhagia SM, Daitch JS. Efficacy and safety of percutaneous sacroplasty for painful osteoporotic sacral insufficiency fractures: a prospective, multicenter trial. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2007;32(15):1635–40.

9 Anhang

NOMREG Lockerung (BASE=LAST ORDER=ASCENDING) BY FFP_Klass
Trümmerzone Sakrum_Drittel H_Fraktur

OP_Tech Unterlegscheibenzueinander

```
/CRITERIA CIN(95) DELTA(0) MXITER(100) MXSTEP(5) CHKSEP(20)  
LCONVERGE(0) PCONVERGE(0.000001)
```

```
SINGULAR(0.00000001)
```

```
/MODEL
```

```
/STEPWISE=PIN(.05) POUT(0.1) MINEFFECT(0) RULE(SINGLE)  
ENTRYMETHOD(LR) REMOVALMETHOD(LR)
```

```
/INTERCEPT=INCLUDE
```

```
/PRINT=PARAMETER SUMMARY LRT CPS STEP MFI.
```

Nominale Regression

Hinweise

Ausgabe erstellt		01-JUN-2023 16:31:43
Kommentare		
Eingabe	Aktiver Datensatz	DataSet1
	Filter	WV = 1 (FILTER)
	Gewichtung	<keine>
	Aufgeteilte Datei	<keine>
	Anzahl der Zeilen in der Arbeitsdatei	93
Behandlung fehlender Werte	Definition von Fehlend	Benutzerdefinierte fehlende Werte gelten als fehlend.

Verwendete Fälle	Die Statistik basiert auf allen Fällen mit gültigen Daten für alle Variablen im Modell.		
Syntax	<pre> NOMREG Lockerung (BASE=LAST ORDER=ASCENDING) BY FFP_Klass Trümmerzone Sakrum_Drittel H_Fraktur OP_Tech Unterlegscheibenzueinander /CRITERIA CIN(95) DELTA(0) MXITER(100) MXSTEP(5) CHKSEP(20) LCONVERGE(0) PCONVERGE(0.000001) SINGULAR(0.00000001) /MODEL /STEPWISE=PIN(.05) POUT(0.1) MINEFFECT(0) RULE(SINGLE) ENTRYMETHOD(LR) REMOVALMETHOD(LR) /INTERCEPT=INCLUDE /PRINT=PARAMETER SUMMARY LRT CPS STEP MFI. </pre>		
Ressourcen	<table border="1"> <tr> <td data-bbox="598 1626 995 1697">Prozessorzeit</td> <td data-bbox="995 1626 1402 1697">00:00:00,03</td> </tr> </table>	Prozessorzeit	00:00:00,03
Prozessorzeit	00:00:00,03		
	<table border="1"> <tr> <td data-bbox="598 1697 995 1762">Verstrichene Zeit</td> <td data-bbox="995 1697 1402 1762">00:00:00,00</td> </tr> </table>	Verstrichene Zeit	00:00:00,00
Verstrichene Zeit	00:00:00,00		

Warnungen

Die Hesse-Matrix enthält unerwartete Singularitäten. Dies bedeutet, daß entweder einige Einflußvariablen weggelassen oder einige Kategorien zusammengefügt werden sollten.

Die Prozedur NOMREG wird trotz obiger Warnungen fortgesetzt. Die nachfolgend angezeigten Ergebnisse basieren auf der letzte Iteration. Die Gültigkeit der Modellanpassung ist ungewiss.

Verarbeitete Fälle

		Anzahl	Rand-Prozentsatz
Lockerung	Keine Lockerung	83	89,2%
	Gelockert	10	10,8%
FFP-Typ	FFP 2	45	48,4%
	FFP 3	11	11,8%
	FFP 4	37	39,8%
Vorhandensein einer Trümmerzone	Keine Trümmerzone	62	66,7%
	Trümmerzone	31	33,3%
Betroffenes Sakrumdrittel	Laterales Drittel	62	66,7%
	Transforaminal	2	2,2%
	Verschiedenes	29	31,2%
Vorhandensein einer H-Fraktur	Keine H-Fraktur	67	72,0%
	Vorhandensein einer H-Fraktur	26	28,0%
Operationstechnik	2 Lange Schrauben	36	38,7%

	1 Lange & 2 Kurze Schrauben	33	35,5%
	4 Kurze Schrauben	24	25,8%
Verhältnis Unterlegscheiben einander	der Unterlegscheiben zu aufeinander liegen	25	26,9%
	Unterlegscheiben nicht aufeinander liegen	68	73,1%
Gültig		93	100,0%
Fehlend		0	
Gesamt		93	
Teilgesamtheit		35 ^a	

a. Die abhängige Variable hat nur einen in 29 (82,9%) Teilgesamtheiten beobachteten Wert.

Informationen zur Modellanpassung

Modell	Kriterien für die Modellanpassung -2 Log-Likelihood	Likelihood-Quotienten-Tests		
		Chi-Quadrat	Freiheitsgrade	Signifikanz
Nur konstanter Term	46,085			
Endgültig	27,745	18,340	9	,031

Pseudo-R-Quadrat

Cox and Snell	,179
Nagelkerke	,362
McFadden	,289

Likelihood-Quotienten-Tests

Effekt	Kriterien für die Modellanpassung	Likelihood-Quotienten-Tests		
		-2 Log-Likelihood für reduziertes Modell	Chi-Quadrat	Freiheitsgrade
Konstanter Term	27,745 ^a	,000	0	.
FFP-Typ	30,926	3,181	2	,204
Vorhandensein einer Trümmerzone	31,211	3,465	1	,063
Betroffenes Sakrumdrittel	28,310	,565	2	,754
Vorhandensein einer H-Fraktur	28,378	,633	1	,426
Operationstechnik	34,111	6,366	2	,041
Verhältnis der Unterlegscheiben zu einander	27,961	,216	1	,642

Die Chi-Quadrat-Statistik stellt die Differenz der -2 Log-Likelihoods zwischen dem endgültigen Modell und einem reduziertem Modell dar. Das reduzierte Modell wird berechnet, indem ein Effekt aus dem endgültigen Modell weggelassen wird. Hierbei liegt die Nullhypothese zugrunde, nach der alle Parameter dieses Effekts 0 betragen.

a. Dieses reduzierte Modell ist zum endgültigen Modell äquivalent, da das Weglassen des Effekts die Anzahl der Freiheitsgrade nicht erhöht.

Parameterschätzer

Lockerung ^a		B	Standard Fehler	Wald	Freiheitsgrade	Signifikanz
Keine Lockerung	Konstanter Term	1,912	1,271	2,262	1	,133
	[FFP-Typ=2]	-,339	2,060	,027	1	,869
	[FFP-Typ=3]	-2,440	1,917	1,621	1	,203
	[FFP-Typ=4]	0 ^b	.	.	0	.
	[Vorhandensein einer Trümmerzone=0]	2,527	1,608	2,469	1	,116
	[Vorhandensein einer Trümmerzone=1]	0 ^b	.	.	0	.
	[Betroffenes Sakrumdrittel=1]	,265	1,273	,043	1	,835
	[Betroffenes Sakrumdrittel=2]	18,303	,000	.	1	.
	[Betroffenes Sakrumdrittel=3]	0 ^b	.	.	0	.
	[Vorhandensein einer H-Fraktur=0]	1,016	1,328	,585	1	,444
	[Vorhandensein einer H-Fraktur=1]	0 ^b	.	.	0	.

[Operationstechnik =1]	-2,399	1,329	3,260	1	,071
[Operationstechnik =2]	-,513	1,415	,132	1	,717
[Operationstechnik =3]	0 ^b	.	.	0	.
[Verhältnis der Unterlegscheiben zu einander=1]	,445	,973	,209	1	,647
[Verhältnis der Unterlegscheiben zu einander=2]	0 ^b	.	.	0	.

Parameterschätzer

Lockerung ^a	Exp(B)	95% Konfidenzintervall für Exp(B)		
		Untergrenze	Obergrenze	
Keine Lockerung	Konstanter Term			
	[FFP-Typ=2]	,713	,013	40,428
	[FFP-Typ=3]	,087	,002	3,730
	[FFP-Typ=4]	.	.	.
	[Vorhandensein einer Trümmerzone=0]	12,514	,535	292,571
	[Vorhandensein einer Trümmerzone=1]	.	.	.
	[Betroffenes Sakrumdrittel=1]	1,303	,108	15,794
	[Betroffenes Sakrumdrittel=2]	88855238,126	88855238,126	88855238,126
	[Betroffenes Sakrumdrittel=3]	.	.	.

[Vorhandensein einer H-Fraktur=0]	2,762	,205	37,300
[Vorhandensein einer H-Fraktur=1]	.	.	.
[Operationstechnik=1]	,091	,007	1,228
[Operationstechnik=2]	,599	,037	9,577
[Operationstechnik=3]	.	.	.
[Verhältnis der Unterlegscheiben zu einander=1]	1,560	,232	10,496
[Verhältnis der Unterlegscheiben zu einander=2]	.	.	.

- a. Die Referenzkategorie lautet: Gelockert.
- b. Dieser Parameter wird auf Null gesetzt, weil er redundant ist.

CORRELATIONS

```
/VARIABLES=OP_Tech VBRF
```

```
/PRINT=TWOTAIL NOSIG FULL
```

```
/MISSING=PAIRWISE.
```

Korrelationen

Hinweise

Ausgabe erstellt		01-JUN-2023 16:35:15
Kommentare		
Eingabe	Aktiver Datensatz	DataSet1
	Filter	WV = 1 (FILTER)
	Gewichtung	<keine>
	Aufgeteilte Datei	<keine>
	Anzahl der Zeilen in der Arbeitsdatei	93
Behandlung fehlender Werte	Definition für "fehlend"	Benutzerdefinierte fehlende Werte gelten als fehlend.
	Verwendete Fälle	Die Statistik für jedes Variablenpaar basiert auf allen Fällen, die gültige Daten für dieses Paar aufweisen.
Syntax		CORRELATIONS /VARIABLES=OP_Tech VBRF /PRINT=TWOTAIL NOSIG FULL /MISSING=PAIRWISE.
Ressourcen	Prozessorzeit	00:00:00,01
	Verstrichene Zeit	00:00:00,00

Korrelationen

		Operationstech nik	Vorhandensein einer VBRF
Operationstechnik	Pearson-Korrelation	1	-,002
	Sig. (2-seitig)		,987
	N	93	93
Vorhandensein einer VBRF	Pearson-Korrelation	-,002	1
	Sig. (2-seitig)	,987	
	N	93	93

USE ALL.

COMPUTE filter_\$=(WV = 1 & VBRF = 1 | 2).

VARIABLE LABELS filter_\$ 'WV = 1 & VBRF = 1 | 2 (FILTER)'.
 VALUE LABELS filter_\$ 0 'Not Selected' 1 'Selected'.

FORMATS filter_\$ (f1.0).

FILTER BY filter_\$.

EXECUTE.

Nominale Regression

Hinweise

Ausgabe erstellt		01-JUN-2023 16:37:05
Kommentare		
Eingabe	Aktiver Datensatz	DataSet1
	Filter	WV = 1 & VBRF = 1 2 (FILTER)
	Gewichtung	<keine>
	Aufgeteilte Datei	<keine>
	Anzahl der Zeilen in der Arbeitsdatei	48
Behandlung fehlender Werte	Definition von Fehlend	Benutzerdefinierte fehlende Werte gelten als fehlend.
	Verwendete Fälle	Die Statistik basiert auf allen Fällen mit gültigen Daten für alle Variablen im Modell.

Syntax		<pre> NOMREG Lockerung (BASE=LAST ORDER=ASCENDING) BY FFP_Klass Trümmerzone Sakrum_Drittel H_Fraktur OP_Tech Unterlegscheibenzueinander VBRF /CRITERIA CIN(95) DELTA(0) MXITER(100) MXSTEP(5) CHKSEP(20) LCONVERGE(0) PCONVERGE(0.000001) SINGULAR(0.00000001) /MODEL /STEPWISE=PIN(.05) POUT(0.1) MINEFFECT(0) RULE(SINGLE) ENTRYMETHOD(LR) REMOVALMETHOD(LR) /INTERCEPT=INCLUDE /PRINT=PARAMETER SUMMARY LRT CPS STEP MFI. </pre>
Ressourcen	Prozessorzeit	00:00:00,03
	Verstrichene Zeit	00:00:00,00

Warnungen

Die Hesse-Matrix enthält unerwartete Singularitäten. Dies bedeutet, daß entweder einige Einflußvariablen weggelassen oder einige Kategorien zusammengefügt werden sollten.

Die Prozedur NOMREG wird trotz obiger Warnungen fortgesetzt. Die nachfolgend angezeigten Ergebnisse basieren auf der letzte Iteration. Die Gültigkeit der Modellanpassung ist ungewiss.

Verarbeitete Fälle

		Anzahl	Rand-Prozentsatz
Lockerung	Keine Lockerung	41	85,4%
	Gelockert	7	14,6%
FFP-Typ	FFP 2	20	41,7%
	FFP 3	7	14,6%
	FFP 4	21	43,8%
Vorhandensein einer Trümmerzone	Keine Trümmerzone	30	62,5%
	Trümmerzone	18	37,5%
Betroffenes Sakrumdrittel	Laterales Drittel	34	70,8%
	Transforaminal	1	2,1%
	Verschiedenes	13	27,1%
Vorhandensein einer H-Fraktur	Keine H-Fraktur	34	70,8%
	Vorhandensein einer H-Fraktur	14	29,2%
Operationstechnik	2 Lange Schrauben	27	56,3%
	1 Lange & 2 Kurze Schrauben	11	22,9%
	4 Kurze Schrauben	10	20,8%
	Unterlegscheiben liegen aufeinander	13	27,1%

Verhältnis Unterlegscheiben einander	der Unterlegscheiben zu nicht aufeinander liegen	35	72,9%
Vorhandensein einer VBRF	Ipsilateral	48	100,0%
Gültig		48	100,0%
Fehlend		0	
Gesamt		48	
Teilgesamtheit		22 ^a	

a. Die abhängige Variable hat nur einen in 17 (77,3%) Teilgesamtheiten beobachteten Wert.

Informationen zur Modellanpassung

Modell	Kriterien für die Modellanpassung		Likelihood-Quotienten-Tests		
	-2 Likelihood	Log-	Chi-Quadrat	Freiheitsgrade	Signifikanz
Nur konstanter Term	26,146				
Endgültig	12,479		13,666	9	,135

Pseudo-R-Quadrat

Cox and Snell	,248
Nagelkerke	,439
McFadden	,343

Likelihood-Quotienten-Tests

Effekt	Kriterien für die Modellanpassung		Likelihood-Quotienten-Tests		
	-2 Log-Likelihood für reduziertes Modell		Chi-Quadrat	Freiheitsgrade	Signifikanz
Konstanter Term	12,479 ^a		,000	0	.
FFP-Typ	15,731		3,252	2	,197
Vorhandensein einer Trümmerzone	15,339		2,860	1	,091
Betroffenes Sakrumdrittel	15,118		2,639	2	,267
Vorhandensein einer H-Fraktur	16,077		3,597	1	,058
Operationstechnik	14,198		1,719	2	,423
Verhältnis der Unterlegscheiben zu einander	12,480		,000	1	,986
Vorhandensein einer VBRF	12,479 ^a		,000	0	.

Die Chi-Quadrat-Statistik stellt die Differenz der -2 Log-Likelihoods zwischen dem endgültigen Modell und einem reduziertem Modell dar. Das reduzierte Modell wird berechnet, indem ein Effekt aus dem endgültigen Modell weggelassen wird. Hierbei liegt die Nullhypothese zugrunde, nach der alle Parameter dieses Effekts 0 betragen.

a. Dieses reduzierte Modell ist zum endgültigen Modell äquivalent, da das Weglassen des Effekts die Anzahl der Freiheitsgrade nicht erhöht.

Parameterschätzer

Lockerung ^a		B	Standard Fehler	Wald	Freiheitsgrade	Signifikanz
Keine Lockerung	Konstanter Term	16,863	3500,160	,000	1	,996
	[FFP-Typ=2]	- 48,501	7796,083	,000	1	,995
	[FFP-Typ=3]	- 49,517	7796,083	,000	1	,995
	[FFP-Typ=4]	0 ^c	.	.	0	.
	[Vorhandensein einer Trümmerzone=0]	33,944	6774,999	,000	1	,996
	[Vorhandensein einer Trümmerzone=1]	0 ^c	.	.	0	.
	[Betroffenes Sakrumdrittel=1]	- 17,328	4678,418	,000	1	,997
	[Betroffenes Sakrumdrittel=2]	18,595	,000	.	1	.
	[Betroffenes Sakrumdrittel=3]	0 ^c	.	.	0	.
	[Vorhandensein einer H-Fraktur=0]	34,125	6063,489	,000	1	,996
	[Vorhandensein einer H-Fraktur=1]	0 ^c	.	.	0	.
	[Operationstechnik =1]	- 16,485	3500,160	,000	1	,996
	[Operationstechnik =2]	- 16,438	3500,160	,000	1	,996
	[Operationstechnik =3]	0 ^c	.	.	0	.

[Verhältnis der Unterlegscheiben zu einander=1]	,021	1,240	,000	1	,986
[Verhältnis der Unterlegscheiben zu einander=2]	0 ^c	.	.	0	.
[Vorhandensein einer VBRF=1]	0 ^c	.	.	0	.

Parameterschätzer

Lockerung ^a		Exp(B)	95% Konfidenzintervall für Exp(B)	
			Untergrenze	Obergrenze
Keine Lockerung	Konstanter Term			
	[FFP-Typ=2]	8,639E-22	,000	. ^b
	[FFP-Typ=3]	3,126E-22	,000	. ^b
	[FFP-Typ=4]	.	.	.
	[Vorhandensein einer Trümmerzone=0]	5518426308 77336,200	,000	. ^b
	[Vorhandensein einer Trümmerzone=1]	.	.	.
	[Betroffenes Sakrumdrittel=1]	2,981E-8	,000	. ^b
	[Betroffenes Sakrumdrittel=2]	119055408,1 36	119055408,1 36	119055408,1 36
	[Betroffenes Sakrumdrittel=3]	.	.	.
	[Vorhandensein einer H-Fraktur=0]	6610166082 11736,100	,000	. ^b
[Vorhandensein einer H-Fraktur=1]	.	.	.	

[Operationstechnik=1]	6,927E-8	,000	. ^b
[Operationstechnik=2]	7,261E-8	,000	. ^b
[Operationstechnik=3]	.	.	.
[Verhältnis der Unterlegscheiben zu einander=1]	1,021	,090	11,594
[Verhältnis der Unterlegscheiben zu einander=2]	.	.	.
[Vorhandensein einer VBRF=1]	.	.	.

- a. Die Referenzkategorie lautet: Gelockert.
- b. Beim Berechnen dieser Statistik ist ein Gleitkommaüberlauf aufgetreten. Der Wert wird auf den systemdefinierten fehlenden Wert gesetzt.
- c. Dieser Parameter wird auf Null gesetzt, weil er redundant ist.

10 Danksagung

Hier möchte ich allen beteiligten Personen meinen großen Dank aussprechen, die mich bei der Anfertigung meiner Dissertation unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater für die ausgezeichnete Betreuung und enorme Unterstützung bei der Durchführung und Umsetzung der gesamten Arbeit.

Außerdem möchte ich mich bei meinen beiden Chefärzten und bei meinen Kollegen im Wirbelsäulenzentrum in St. Josefs-Hospital in Wiesbaden bedanken, die mich mit Anregungen und produktiven Gesprächen begleitet haben.

Meiner Ehefrau und meinen Eltern danke ich für ihre Geduld, Ermutigungen und Zusprüche während der Arbeit an dieser Dissertation.

11 Lebenslauf

Persönliche Informationen

Name: Martin Naisan
Geburtsdatum: 4. April 1985
Geburtsort: Bagdad, Irak

Akademische und schulische Ausbildung

Seit 02/2021 Oberarzt, Wirbelsäulenzentrum
St. Josefs-Hospital Wiesbaden

06/ 2019 – 02/2021 Facharzt, Wirbelsäulenzentrum
St. Josefs-Hospital Wiesbaden

09/ 2016 – 06/2019 Assistenzarzt, Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie
St. Josefs-Hospital Wiesbaden

03/ 2013 – 09/2016 Assistenzarzt, Allgemein- und Unfallchirurgie
St. Josefs-Krankenhaus in Rüdesheim

12/ 2012 Erhalt deutscher Approbation
10/2011 Einreise nach Deutschland
02/2010 – 07/2010 Rotationsweiterbildungsstelle: Kardiologie, Thoraxchirurgie
Ibn-Elnafees Hospital in Bagdad

2003 - 2009 Humanmedizin an der Medizinischen Fakultät der Universität
Bagdad/Irak, Studiensprache: Englisch, Abschluss mit (MB.Ch.B)
Zertifikat

1991 - 2003 Grund- und weiterführende Schule in Bagdad, Abschluss Bakkalaureat
(Hochschulreife)