

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

Die chirurgische Therapie instabiler Läsionen des Zervikothorakalen Übergangs der
Wirbelsäule

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

Vorgelegt von

Linda Köhne Langner
aus Halle an der Saale

Mainz, 2025

Wissenschaftlicher Vorstand: Univ.-Prof. Dr. med. Philipp Drees

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr. F. Ringel

2. Gutachter: Univ.-Prof. Dr. M. Brockmann

Tag der Promotion: 31. Juli 2026

Nachnutzungslizenz: Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC-BY-4.0)

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	VI
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	VIII
1 Einleitung.....	1
2 Literaturdiskussion	2
2.1 Der Zervikothorakale Übergang	2
2.1.1 Anatomie und Biomechanik.....	2
2.1.2 Bildgebung am Zervikothorakalen Übergang	3
2.2 Pathologische Prozesse und Instabilitäten am Zervikothorakalen Übergang	3
2.2.1 Spondylodiszitis	4
2.2.2 Degenerative zervikale Spondylose	5
2.2.3 Wirbelsäulenmetastasen	5
2.2.4 Trauma der subaxialen HWS.....	6
2.3 Operationsverfahren bei Instabilität am Zervikothorakalen Übergang	7
2.3.1 Einführung	7
2.3.2 Dorsale Stabilisierungsverfahren.....	8
2.3.3 Ventrale Stabilisierungsverfahren.....	9
2.3.4 360° Stabilisierung.....	9
2.3.5 Posterolateraler Zugangsweg.....	10
2.4 Postoperative Komplikationen	10
2.5 Fragestellung	11
3 Material und Methoden.....	12
3.1 Patientenkollektiv.....	12
3.2 Datenerhebung.....	13
3.3 Statistische Methoden	16
4 Ergebnisse	17
4.1 Studienpopulation und Demographie	17
4.2 Diagnosespezifische Datenerhebung.....	19
4.2.1 Spondylodiszitis	19
4.2.2 Degenerative Wirbelsäulenerkrankungen.....	19
4.2.3 Tumore	20
4.2.4 Traumata	20
4.3 Operationsmethoden	21
4.3.1 Allgemein	21
4.3.2 Subgruppenbezogene OP-Verfahren	21
4.4 Prä- und postoperative Morbiditätsmerkmale	23

4.5	Chirurgische Hauptindikationen.....	23
4.6	Neurologisches Outcome	24
4.7	Postoperative Komplikationen	25
4.7.1	Allgemeines	25
4.7.2	Wundheilungsstörungen.....	26
4.7.3	Postoperative Hämatome	26
4.7.4	Implantatfehlage	27
4.7.5	Implantatversagen	27
4.8	Komplikationen: Pathologiespezifische Subgruppenanalyse	28
4.8.1	Infektionen	28
4.8.2	Tumore	28
4.8.3	Degenerative Erkrankungen.....	28
4.8.4	Traumata:	28
4.9	Pedikelschrauben	30
4.10	Massa Lateralis-Schrauben.....	32
4.11	Statistische Analysen	34
4.11.1	Zusammensetzung der Regressionskohorte.....	34
4.11.2	Einfluss der OP-Art auf das Implantatversagen.....	35
4.11.3	Einfluss der Operationsdauer auf das Implantatversagen.....	35
4.11.4	Einfluss des Karnofsky Performance Score auf das Implantatversagen.....	35
4.11.5	Einfluss der Schraubenwinkel auf das Implantatversagen	35
4.11.6	Weitere Einflussgrößen auf das Implantatversagen	37
5	Diskussion	39
5.1	Einführung	39
5.2	Methodik und Datenerhebung	39
5.3	Allgemeine Patientencharakteristika	40
5.3.1	Geschlechterverteilung und Alter.....	40
5.4	Klinische Parameter	41
5.4.1	Neurologisches Outcome	41
5.4.2	Andere prognostische Morbiditätsmarker	41
5.5	Pathologien am ZTÜ.....	42
5.6	Schraubenarten	45
5.7	Postoperative Komplikationen	46
5.7.1	Allgemeines	46
5.7.2	Implantatversagen	46
5.8	Limitationen und Stärken der Studie	49
6	Ausblick	50
7	Zusammenfassung.....	51
8	Literaturverzeichnis	53
9	Anhang	57

9.1	Prolo Functional Score	57
9.2	Karnofsky Performance Score.....	58
9.3	American Society of Anesthesiologists classification	58
9.4	American Spinal Injury Association Classification	59
9.5	Boxplot zu Wundinfektionen	59
10	Danksagung	60

Abkürzungsverzeichnis

A.	Arteria
ACDF	Anteriore Zervikale Dekompression und Fusion
ASA	American Society of Anesthesiologists
ASIA	American Spinal Injury Association
BWS	Brustwirbelsäule
C	Zervikalwirbel
CRP	C-reaktives Protein
CT	Computertomographie
HWS	Halswirbelsäule
KPS	Karnofsky Performance Score
MRT	Magnetresonanztomographie
N.	Nervus
OP	Operation
PFS	Prolo Functional Score
RCT	Randomisiert kontrollierte Studie
SINS	Spinal Instability Neoplastic Score
SKS	Spinalkanalstenose
T	Thorakalwirbel
VAC	Vakuum
ZTÜ	Zervikothorakaler Übergang

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: eingebrachte Massa-Lateralis Schrauben	14
Abbildung 2: Axiale Winkelmessung der Pedikelschrauben.....	15
Abbildung 3: Sagittale Winkelmessung der Pedikelschrauben	15
Abbildung 4: Altersgruppenverteilung zum Zeitpunkt der Operation unter Berücksichtigung des Geschlechts.....	17
Abbildung 5: Zugrunde liegende Pathologien innerhalb der Studienpopulation.....	18
Abbildung 6: Angewandte chirurgische Verfahren	21
Abbildung 7: Hauptindikationen.....	24
Abbildung 8: Ansprechen der neurologischen Symptome nach OP.....	24
Abbildung 9: ASIA prä- und postoperativ vor OP	25
Abbildung 10: Operationsbedingte Komplikationen.....	29
Abbildung 11: Krankenhaussterblichkeit bezogen auf die Subgruppenpathologien..	29
Abbildung 12: Wundinfektionen in Abhängigkeit von der Schnitt-Naht-Zeit	59

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Weitere demographische Daten zur Studienpopulation	19
Tabelle 2: OP-Verfahren bei Spondylodiszitis	22
Tabelle 3: OP-Verfahren bei Degenerationen	22
Tabelle 4: OP-Verfahren bei Tumoren	22
Tabelle 5: OP-Verfahren bei Traumapatienten.....	23
Tabelle 6: Komplikationen und Sterblichkeitsrate	25
Tabelle 7: Implantatversagen	27
Tabelle 8: Verteilung der Pedikelschrauben.....	30
Tabelle 9: Lockerungsrate der Pedikelschrauben	30
Tabelle 10: Pedikelschrauben Lockerungsangaben in Bezug zu unterschiedlichen Kategorien	31
Tabelle 11: Massa Lateralis Verteilung	32
Tabelle 12: Verteilung der Massa lateralis-Schrauben.....	33
Tabelle 13: Verteilung der Lockerungen in %.....	33
Tabelle 14: Lockerung in Bezug zu instrumentiertem Wirbel und Art der Schraubenimplantation.....	34
Tabelle 15: Ergebnisse der Regressionsanalyse	38
Tabelle 16: Prolo Functional Score für postoperative zervikale Radikulopathie.....	57
Tabelle 17: Karnofsky Index	58
Tabelle 18: ASA-Klassifikation	58
Tabelle 19: ASIA Score	59

1 Einleitung

Der Zervikothorakale Übergang (ZTÜ) bezeichnet den Bereich zwischen dem siebten Zervikalwirbel (C7) und dem zweiten Thorakalwirbel (T2) und stellt eine anatomische und biomechanische Grenze zwischen der beweglichen Halswirbelsäule (HWS) und der rigiden Brustwirbelsäule (BWS) dar. Durch seine einzigartigen biomechanischen Eigenschaften resultieren unterschiedliche Anforderungen an Stabilität und Mobilität für die Region des ZTÜs (Wang und Chou, 2007). Insbesondere bei Pathologien, die zu Instabilität und neurologischen Defiziten führen können, birgt diese Schnittstelle zwischen C7 und T2 große Gefahren und eine besondere Herausforderung. Zu diesen Pathologien zählen ein breites Spektrum, darunter infektbedingte Prozesse, Tumorerkrankungen, degenerative Prozesse und traumatische Verletzungen.

Aufgrund der komplexen Anatomie und der besonderen biomechanischen Belastung sind chirurgische Verfahren am ZTÜ äußerst anspruchsvoll und erfordern eine hohe Expertise. Ein tiefgreifendes anatomisches Verständnis, sowie eine präzise Planung und Durchführung sind für den Operateur unabdingbar, da Fehlpositionierungen von Implantaten oder andere Komplikationen schwerwiegende Folgen haben können. Besonders bei Pathologien wie Tumoren oder infektiösen Prozessen im Bereich der HWS und des ZTÜs zeigen Studien eine vergleichsweise hohe Komplikationsrate im Vergleich zu anderen Wirbelsäulenabschnitten (Okamoto et al., 2021, Goyal et al., 2019, Hubertus et al., 2021).

Obwohl Operationen (OPs) am ZTÜ regelmäßig durchgeführt werden und zunehmend Fortschritte in den chirurgischen Techniken erzielt wurden, existieren nur wenige evidenzbasierte Studien zu den langfristigen Ergebnissen, Komplikationsraten und optimalen Behandlungsstrategien. Der Bedarf an wissenschaftlicher Evidenz zur Optimierung der chirurgischen Versorgung in diesem sensiblen Bereich ist daher weiterhin groß.

Ziel dieser Dissertation ist es, die Pathologien des ZTÜs, die angewandten chirurgischen Behandlungsstrategien sowie deren Ergebnisse und Komplikationen systematisch zu analysieren und zu bewerten. Dazu wurde eine retrospektive Analyse aller Patienten durchgeführt, die zwischen 2010 und 2020 in der neurochirurgischen Klinik mittels stabilisierender OP am ZTÜ behandelt wurden. Die Arbeit soll dazu beitragen, ein besseres Verständnis für die Herausforderungen und potenziellen

Verbesserungsansätze bei der chirurgischen Versorgung in diesem anatomisch und biomechanisch anspruchsvollen Bereich zu schaffen.

Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Evaluierung der Komplikationsraten, insbesondere im Zusammenhang mit unterschiedlichen chirurgischen Zugangswegen und Implantatstrategien. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Analyse möglicher Risikofaktoren, die mit einem Implantatversagen oder anderen postoperativen Komplikationen assoziiert sind. Ziel ist es, durch die gewonnenen Erkenntnisse konkrete Empfehlungen für die chirurgische Praxis abzuleiten und somit zur Verbesserung von Behandlungsergebnissen beizutragen.

2 Literaturdiskussion

2.1 Der Zervikothorakale Übergang

2.1.1 Anatomie und Biomechanik

Der ZTÜ stellt eine anatomische Besonderheit dar: Biomechanisch handelt es sich um einen Übergang, an dem die mobile, lordotische HWS in die starre, kyphotische BWS übergeht (Goyal et al., 2019). Die HWS weist im Vergleich zur BWS einen größeren Bewegungsradius in Flexion, Extension und Lateralflexion auf, da die BWS mit dem Brustkorb gelenkig verbunden ist. In der Literatur finden sich variable Angaben über den Umfang des ZTÜ. In jedem Fall umfasst der ZTÜ die Wirbel C7 und T1. Bei der Instrumentierung des ZTÜ werden allerdings in vielen chirurgischen Konstrukten die angrenzenden Wirbel T2 und T3 mit einbezogen. In unserer Arbeit wurde der ZTÜ einheitlich als Region von C7 bis T2 definiert. Der Übergang von der Lordose zur Kyphose führt sowohl im statischen als auch im dynamischen Zustand zu einer erheblichen Belastung dieser Wirbelsäulenregion. Die dadurch erhöhte Vulnerabilität dieses Gebietes wird durch Pathologien wie degenerative Veränderungen, Traumata, Infektionen oder Tumoren sowie durch OPs in angrenzenden Segmenten weiter erhöht (Huang et al., 2019, Kennamer et al., 2019, Steinmetz et al., 2006, Wang and Chou, 2007).

Auch die allgemeinen anatomischen Aspekte variieren innerhalb der Wirbelsäule und am Übergang von der HWS zur BWS. So sind beispielsweise die hinteren Teile der Wirbelsäule, zu denen die Pedikel, die Facettengelenke und die Wirbelbögen gehören,

in der Lage, größeren Belastungen standzuhalten als die vorderen Teile der Wirbelsäule, zu denen die Wirbelkörper gehören. Dies ist im Aufbau der Wirbel begründet. Die Wirbelkörper bestehen aus spongiösem Knochen, während die hintere Säule aus kompaktem Knochen besteht. Um der zunehmenden Belastung durch das Körpergewicht standhalten zu können, werden die Wirbelkörper von kranial nach kaudal hin größer (Bayoumi et al., 2018, Le et al., 2003, Holck, 2010, Schünke et al., 2018).

2.1.2 Bildgebung am Zervikothorakalen Übergang

Die bildgebende Diagnostik des ZTÜs mittels Magnetresonanztomographie (MRT) oder Computertomographie (CT) stellt den Goldstandard in der radiologischen Diagnostik dar. Die konventionelle Röntgendiagnostik ist in ihrer Aussagekraft am ZTÜ limitiert, da Überlagerungseffekte des Sternums und des Schultergürtels die Bildqualität in der Regel beeinträchtigen. Bei der CT- Diagnostik ist zu beachten, dass eine Untersuchung der HWS bis zum Thoraxbereich T6 notwendig ist. Besteht der Verdacht auf Vorliegen einer weichteiligen Pathologie, ist eine MRT- Diagnostik unerlässlich. Die Sicherheit der Instrumentierung des ZTÜ wurde durch die Einführung der CT-gestützten Navigation maßgeblich verbessert. Komplikations- und Mortalitätsraten konnten so bei komplexen Eingriffen gesenkt werden (Lenoir et al., 2006, Wang and Chou, 2007, Große-Leege and Winker, 2001).

2.2 Pathologische Prozesse und Instabilitäten am Zervikothorakalen Übergang

Am Übergang der HWS zur BWS treten häufig Erkrankungen auf, die allein oder in Kombination mit biomechanischen Veränderungen die Stabilität dieser Region erheblich beeinträchtigen. Zu diesen Pathologien zählen infektiöse Veränderungen, Neoplasien, degenerative Prozesse und traumatische Verletzungen. Läsionen im Bereich des ZTÜs gehen häufig mit neurologischen Ausfällen einher, die auf eine Verengung des Spinalkanals, eine vaskuläre Insuffizienz des Rückenmarks oder eine Kombination beider Faktoren zurückzuführen sein können (Ramieri et al., 2011).

Bei Läsionen des Rückenmarks wird zwischen traumatischen und nicht traumatischen Rückenmarksläsionen unterschieden. Verschiedene Studien identifizieren Wirbelsäulentumore, insbesondere spinale Metastasen, als häufigste Ursache nicht

traumatischer Rückenmarksläsionen (NTRL). In den meisten Untersuchungen sind hiervon Männer häufiger betroffen als Frauen (Gupta et al., 2009, Devivo, 2012).

Pathologische Prozesse der Wirbelsäule können zu einer fortschreitenden Instabilität führen, die eine Kyphosierung und Kompression des Rückenmarks nach sich zieht. Mehrere Autoren berichten zudem über eine Zunahme der Deformität nach Voroperationen wie Laminektomien. Auch Spondylodesen, die auf Höhe C7 enden, können zur Instabilität beitragen (Le et al., 2003).

2.2.1 Spondylodiszitis

Die Spondylodiszitis ist eine seltene, aber schwerwiegende Infektion der Wirbelsäule, bei der die Bandscheibe und der angrenzende Wirbelkörper betroffen sind. Bei älteren Menschen zählt sie zu den häufigsten Formen der Osteomyelitis, mit einer Inzidenz von 2,2–6,5 Fällen pro 100.000 Personen und Jahr (Herren et al., 2020, Kramer et al., 2023). Am häufigsten ist die Lendenwirbelsäule (LWS) betroffen, gefolgt von BWS und HWS. Mehrsegmentbefall tritt in bis zu 50 % der Fälle auf (Pingel, 2021). Häufigste Erreger sind *Staphylococcus aureus* und *Escherichia coli*. Der Infektionsweg ist meist hämatogen, kann aber auch iatrogen, lymphogen oder direkt erfolgen.

Unspezifische Symptome erschweren die frühzeitige Diagnose. Die MRT gilt als Methode der Wahl, CT und Röntgen liefern zusätzliche Informationen für die Operationsplanung. Eine Biopsie mit histologischer und mikrobiologischer Untersuchung dient der Erregeridentifikation (Braun et al., 2023).

Therapeutisch steht die gezielte Antibiotikatherapie im Vordergrund. Bei *S. aureus* wird eine zweiwöchige intravenöse, gefolgt von einer zehnwöchigen oralen Behandlung empfohlen. Operative Maßnahmen sind insbesondere bei Sepsis, neurologischer Verschlechterung oder Instabilität angezeigt, mit dem Ziel der Infektionssanierung, Dekompression und Stabilisierung. Befindet sich die Infektion im Bereich des ZTÜs, ergeben sich aufgrund der komplexen lokalen Anatomie und der hohen biomechanischen Belastung besondere Herausforderungen. Aufgrund der großen biomechanischen Belastung führen selbst moderate Destruktionen rasch zu Instabilität, die eine chirurgische Stabilisierung erforderlich macht, um die Wirbelsäulenstatik zu erhalten und neurologische Folgeschäden zu vermeiden (Neuhoff et al., 2024, Pingel, 2021, Özkan et al., 2014, Braun et al., 2023, Herren and von der Höh, 2021).

2.2.2 Degenerative zervikale Spondylose

Die degenerative zervikale Spondylose beschreibt einen fortschreitenden Verschleißprozess, der Bandscheiben, Bänder, Facettengelenke und Wirbelkörper betrifft. Sie zählt weltweit zu den häufigsten Ursachen für Rückenmarkskompression und tritt besonders häufig im höheren Lebensalter auf (Mansfield et al., 2020). Degenerative Veränderungen finden sich meist in der subaxialen HWS, können jedoch auch den ZTÜ betreffen.

Pathophysiologisch steht zu Beginn eine Austrocknung der Bandscheibe, die eine erhöhte mechanische Belastung und Einrisse im Anulus fibrosus nach sich zieht. Dies führt zu Bandscheibenprotrusionen, Osteophytenbildung, Facettengelenksarthrose sowie zu ossifizierenden Veränderungen an Ligamenten (Bsp. *Ligamentum flavum*, *Ligamentum longitudinale posterius*). Solche Strukturen können den Spinalkanal einengen, zu Myelopathie führen und die sagittale Ausrichtung der Wirbelsäule verändern. (Nouri et al., 2015, Meyer et al., 2008).

Da die Regenerationsfähigkeit der Bandscheibe begrenzt ist, sind alle degenerativen Prozesse mehr oder weniger irreversibel. (Nouri et al., 2015, Theodore, 2020, Kuschayev et al., 2018). Am ZTÜ treffen die hohe Beweglichkeit der HWS und die strukturelle Steifigkeit der BWS aufeinander. Dadurch wirken besondere Scher- und Rotationskräfte, die bei degenerativen Veränderungen das Risiko einer segmentalen Instabilität deutlich erhöhen.

2.2.3 Wirbelsäulenmetastasen

Wirbelsäulenmetastasen entstehen durch hämatogene Absiedelung maligner Tumorzellen und betreffen überwiegend die BWS, seltener die HWS. Häufige Primärtumoren sind Mammakarzinome, Prostatakarzinome, Lungenkarzinome und das Multiple Myelom. Radiologisch werden osteolytische, osteoblastische und gemischte Läsionen unterschieden, die unterschiedliche Auswirkungen auf die Knochenstabilität haben. Besonders osteolytische Metastasen erhöhen das Risiko pathologischer Frakturen und führen häufig zu Instabilität (Kathmann, 2019, Eicker and Mohme, 2022, Coleman et al., 2020),

Klinisch stehen Schmerzen, pathologische Frakturen und neurologische Defizite durch Rückenmarkskompression im Vordergrund, die in bis zu 20 % der Fälle auftreten

können. Da am ZTÜ die hohe Beweglichkeit der HWS auf die Steifigkeit der BWS trifft, wirken zusätzliche Belastungskräfte auf den bereits geschwächten Knochen. Metastasen in dieser Region begünstigen daher rasch eine strukturelle Instabilität mit der Gefahr neurologischer Komplikationen, was den ZTÜ zu einer besonders vulnerablen Lokalisation macht.

Die Diagnostik stützt sich auf bildgebende Verfahren wie CT, MRT und Positronen Emissions Tomographie (PET-CT). Standarddiagnostiken wie Röntgen sind aufgrund von Überlagerungen durch benachbarte Strukturen oft unzureichend, besonders im ZTÜ. Der „Spinal Instability Neoplastic Score“ (SINS) bietet eine nützliche Orientierung zur Beurteilung der Stabilität der Wirbelsäule und kann Entscheidungen hinsichtlich der Notwendigkeit einer operativen Stabilisierung erleichtern.

Die Behandlung umfasst systemische Verfahren wie Chemotherapie, Immuntherapie und Strahlentherapie, ergänzt durch knochenstabilisierende Medikamente wie Bisphosphonate oder Denosumab. Bei instabilen Läsionen oder neurologischen Komplikationen ist jedoch die OP ein wesentlicher Bestandteil der Therapie. Am ZTÜ stellen die besondere Biomechanik und die eingeschränkten Möglichkeiten rein dorsaler oder ventraler Fixationen häufig eine Indikation für kombinierte 360°-Eingriffe dar. Diese ermöglichen sowohl eine Dekompression des Rückenmarks als auch eine suffiziente Stabilisierung. Ziel ist die Wiederherstellung der Stabilität, die Linderung neurologischer Defizite und die Verbesserung der Lebensqualität. Der Eingriff erfordert ein hohes Maß an chirurgischer Expertise sowie eine enge interdisziplinäre Zusammenarbeit. Da spinale Metastasen mit hoher Morbidität einhergehen, besteht weiterhin erheblicher Forschungsbedarf zur Optimierung der operativen Strategien, insbesondere im Hinblick auf Stabilität und Komplikationsreduktion (Hubertus et al., 2021, Coleman et al., 2020).

2.2.4 Trauma der subaxialen HWS

Verletzungen der subaxialen HWS betreffen die Wirbel C3 bis C7. Das Verletzungsmuster reicht von Muskelzerrungen über Luxationen und Frakturen bis hin zu Rückenmarksläsionen. Die subaxiale HWS ist aufgrund ihrer Mobilität und der Hebelwirkung des Kopfes besonders verletzungsanfällig (Beeharry et al., 2021, Leitlinienkommission der Deutschen Gesellschaft für Unfallchirurgie e.V. (DGU), 2017). Instabile Läsionen der subaxialen HWS wirken sich erheblich auf die biomechanische Funktion des ZTÜ

aus. Die Untersuchung dieser Verletzungen liefert essenzielle Erkenntnisse für die Optimierung der Behandlung von Instabilitäten im ZTÜ, einem zentralen Ziel dieser Dissertation.

Verletzungen der HWS resultieren in den meisten Fällen aus indirekten Traumata, beispielsweise im Rahmen von Verkehrsunfällen (41 %) oder Stürzen (27 %) durch axiale Kompression, Flexion, Extension, Translation oder Rotation. Direkte Traumata hingegen sind selten die Ursache. Degenerative Erkrankungen, Osteoporose oder Tumore können als prädisponierende Faktoren wirken. Typische Verletzungsmuster betreffen sowohl die vordere als auch die hintere Säule der Wirbelsäule (Scholz et al., 2015).

Die AO-Spine-Klassifikation teilt Verletzungen morphologisch in A-, B- und C-Typen ein und berücksichtigt Facettengelenksverletzungen sowie neurologische Defizite (Scholz et al., 2015, Schleicher et al., 2020, Vaccaro et al., 2016). Die Therapie richtet sich nach dem Verletzungstyp und reicht von konservativen Maßnahmen (Schmerztherapie, Physiotherapie) bis zu operativen Eingriffen. Ziel der OP ist die Dekompression des Rückenmarks, Schmerzfreiheit und die Wiederherstellung der Stabilität. Generell erfordern Verletzungen an der HWS überwiegend eine operative Therapie. Instabile Läsionen (A3-, A4-, B- und C-Typen) sowie akute neurologische Defizite gelten als absolute Operationsindikationen. Bei stabilisierenden Eingriffen ist die Einschränkung der Beweglichkeit und Lebensqualität zu berücksichtigen, weshalb nur notwendige Segmente versteift werden sollten (Scholz et al., 2015, Reinhold et al., 2017). Besonders kritisch sind instabile Verletzungen am ZTÜ, da in dieser Translationszone hohe Hebelkräfte wirken. Hyperextensions- und Flexionsverletzungen führen hier rasch zu Instabilitäten, die das Risiko neurologischer Verschlechterungen erheblich steigern.

2.3 Operationsverfahren bei Instabilität am Zervikothorakalen Übergang

2.3.1 Einführung

Die Wahl einer spezifischen Operationstechnik hängt maßgeblich von der Erfahrung und den individuellen Präferenzen der behandelnden Chirurgin oder des Chirurgen ab. Der ZTÜ stellt dabei eine besonders komplexe und einzigartige Region dar, sodass in der Literatur eine Vielzahl unterschiedlicher Operationsverfahren und Zugangswege beschrieben wird. Zudem werden kontinuierlich neue Verfahren entwickelt und

Materialien verbessert. Häufig diskutiert werden ventrale, dorsale sowie kombinierte ventrodorsale Stabilisationsverfahren.

Zentrale Behandlungsziele sind eine suffiziente Dekompression des Myelons, die Primärstabilisierung der Wirbelsäule mit möglichst geringer Rate an Implantatversagen oder Revisionsoperationen, sowie der Erhalt eines physiologischen Alignments unter Einsatz verschiedener Implantate und Instrumentierungstechniken (Schaser et al., 2007, Scholz et al., 2018, Große-Leege and Winker, 2001).

Begrifflich sollte zwischen *Stabilisierung* und *Spondylodese* differenziert werden. Stabilisierung bezeichnet die Fixierung beweglicher Segmente durch Implantate wie Schrauben oder Platten. Von einer Spondylodese spricht man, wenn zusätzlich Gelenke eröffnet und Knochentransplantate eingebracht werden. Das angestrebte Endziel einer Spondylodese ist die knöcherne Fusion, also die dauerhafte Überbrückung der behandelten Segmente. Abhängig von der zugrunde liegenden Pathologie – beispielsweise bei komplexen Tumoren – kann dieses Ziel jedoch nur eingeschränkt erreichbar sein.

Eine vollständige Darstellung aller Operationsverfahren würde den Rahmen dieser Arbeit überschreiten. Im Folgenden werden daher diejenigen Verfahren beschrieben, die im untersuchten Patientenkollektiv Anwendung fanden.

2.3.2 Dorsale Stabilisierungsverfahren

Der Zugang zum ZTÜ erfolgt in der Regel über einen dorsalen Mittellinienschnitt. Hierbei können unterschiedliche Instrumentierungstechniken zur Stabilisierung eingesetzt werden, zumeist Stab-Schrauben-Konstrukte im Sinne eines Fixateurs interne. Als Standardverfahren bei der Instrumentierung der subaxialen HWS hat sich die Implantation von Massa-Lateralis-Schrauben etabliert. In C7 und in die oberen thorakalen Wirbelkörper, wie T1 und T2, werden regelhaft Pedikelschrauben eingebracht (An et al., 1994), da diese biomechanisch am stabilsten sind und die Massae Laterales hier schmächtiger werden, was die korrekte Implantation von Schrauben konsequenterweise erschwert (Große-Leege and Winker, 2001).

Zur Dekompression neuraler Strukturen, insbesondere des Myelons, kann zusätzlich eine Laminektomie durchgeführt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass eine isolierte Laminektomie ohne zusätzliche Stabilisierung, aufgrund der durch die

Unterbrechung der dorsalen ligamentären und knöchernen Zuggurtung bedingten Instabilitätsgefahr, nicht empfohlen wird (An et al., 1994, Schaser et al., 2007).

2.3.3 Ventrale Stabilisierungsverfahren

Der ventrale Zugang zum ZTÜ ist eine besondere Herausforderung hinsichtlich der Operationstechnik, da Strukturen wie das Sternum oder die Clavicula anatomische Hindernisse darstellen. Relevante anatomische Strukturen wie Nerven (*N. laryngeus recurrens*, *Truncus sympathicus*), große Arterien (z.B. *A. carotis*) und Halsweichteile, wie die Trachea oder der Ösophagus, bergen ein erhebliches Komplikationspotential. Es existieren verschiedene anteriore Zugangswege wie z.B. tief zervikal, supraklavikulär, transsternal, transaxillär, transthorakal oder auch Kombinationen dieser Varianten. Je nach angestrebter Höhe müssen beispielhaft bei Pathologien unter T2 Niveau eventuell Teile des Sternums entfernt werden oder gar eine Thorakotomie durchgeführt werden oder bei höher zervikal gelegenen Pathologien beispielsweise Teile der Clavicula, um einen Zugang zu ermöglichen. Zu berücksichtigen gilt immer die Risiko Nutzen Abwägung für Morbidität und Mortalität je nach Invasivität des Zugangsweiges. Über den anterioren Zugang ist eine Dekompression nervaler Strukturen (z.B. bei Bandscheibenvorfall, Spinalkanalstenose (SKS), Stenose des Neuroforamens) mittels Diskektomie und zusätzlicher Resektion von osteophytären Strukturen oder ossifizierten Bändern möglich. Eine Instrumentierung ins Bandscheibenfach ist mittels konventionellen Polyetheretherketon (PEEK) -, Titan- oder Carbon-Cages möglich. Darüber hinaus können auch Wirbelkörper größtenteils entfernt und mit entsprechenden Implantaten ersetzt werden. Eine erhöhte Stabilität des Cages wird dadurch erreicht, dass zusätzlich homo- oder autologe Spongiosa in den Cage eingebracht werden kann. Zur zusätzlichen Stabilisierung kann ein winkelstabiles Plattensystem von ventral eingebracht werden (An et al., 1994, Schaser et al., 2007).

2.3.4 360° Stabilisierung

Die 360° Stabilisierung beschreibt Verfahren, die ventrale und dorsale Operationsverfahren kombinieren. Hierbei werden die oben aufgeführten ventralen Verfahren mit einer dorsalen Stabilisierung in einem ein- oder zweizeitigen Verfahren kombiniert. Ventrodorsale Verfahren sind insbesondere bei hochgradig instabilen Läsionen an junktionalen Zonen, wie beispielsweise dem ZTÜ, empfohlen (Schaser et al., 2007, An et al., 1994, Große-Leege and Winker, 2001).

2.3.5 Posterolateraler Zugangsweg

Eine weitere Möglichkeit der kombinierten Versorgung der vorderen und hinteren Wirbelsäule besteht im posterolateralen Zugang über eine Kostotransversektomie. Die Hautinzision erfolgt dorsomedian, und je nach Ausmaß der Resektion von Rippenanteilen, Pedikel, Lamina und/oder Facettengelenken kann der Arbeitswinkel zur vorderen Säule erweitert werden, sodass verschiedene Anteile des Wirbelkörpers erreicht werden können. Anschließend ist eine (sub-)totale Korporektomie mit Entfernung der angrenzenden Bandscheibenfächer und Ersatz möglich. Vorteile dieses Zugangs sind die Möglichkeit einer simultanen dorsoventralen Exposition und Stabilisierung. Dadurch stellt er insbesondere bei Kontraindikationen für eine Thorakotomie eine Alternative dar. Limitationen bestehen in der eingeschränkten Einsicht auf ventrale, kontralateral zum transpedikulären Zugang gelegene Wirbelkörperanteile sowie in der erschwerten Erreichbarkeit der oberen thorakalen Segmente aufgrund der Skapula (An et al., 1994, Schaser et al., 2007).

2.4 Postoperative Komplikationen

Zum Thema postoperative Komplikationen am ZTÜ fehlen bislang größere klinische Studien, die eine verlässliche Aussage über deren Inzidenz erlauben. Die bislang verfügbaren Fallberichte und kleineren Serien dokumentieren die Häufigkeit nur unzureichend. Die Auseinandersetzung mit Komplikationsraten ist jedoch von zentraler Bedeutung, da deren Vermeidung wesentlich zur Verbesserung von Behandlungsergebnissen beiträgt.

Fountas et al. untersuchten Komplikationsraten bei der anterioren zervikalen Diskektomie und Fusion (ACDF) und beschreiben sowohl allgemeine Komplikationen wie Nerven-, Gefäß-, und Organschäden (z.B. Schäden an der A. vertebralis oder des N. laryngeus recurrens) und kardiopulmonale Komplikationen. Darüber hinaus werden chirurgische Komplikationen wie Wundinfektionen oder Wundheilungsstörungen, Hämatome und implantat-assoziierte Komplikationen mit daraus resultierender zervikaler Instabilität beschrieben (Fountas et al., 2007).

Im Rahmen dorsaler Operationsverfahren stellt die Fehlplatzierung von Pedikelschrauben eine der häufigsten Komplikationen dar, mit Raten von bis zu 40 %. Ursache ist die schmale Morphologie einzelner Pedikel in der oberen BWS sowie die

eingeschränkte Möglichkeit der intraoperativen Röntgenbildgebung. In seltenen, aber potenziell schwerwiegenden Fällen können daraus Nervenverletzungen durch Pedikelperforationen oder Stabilitätsverluste des Implantatkonstrukts resultieren (Große-Leege and Winker, 2001).

Moderne Navigationsverfahren zeigen jedoch eine signifikante Reduktion der Fehlplatzierungsrate von Pedikelschrauben, insbesondere im zervikalen und thorakalen Bereich. Eine systematische Übersichtsarbeit von Gelalis et al. bestätigt, dass spinale Navigationssystem-gestütztes Schraubensetzen im Vergleich zur freien Handtechnik deutlich präzisere Ergebnisse erzielt (Gelalis et al., 2012).

Einigkeit besteht darüber, dass der ZTÜ aufgrund seiner biomechanischen Eigenheiten besonders anfällig für Implantatversagen und Instabilität ist. Risikofaktoren wie höheres Alter, Rauchen, ungünstige sagittale Ausrichtung oder Voroperationen können diese Fragilität weiter verstärken (Wang and Chou, 2007, Huang et al., 2019).

2.5 Fragestellung

Ziel der Dissertation ist die Evaluation der Ergebnisse chirurgischer Therapien bei unterschiedlichen Pathologien des ZTÜs. Besonderes Augenmerk liegt hierbei auf der Untersuchung von Komplikationsraten und möglicher Einflussfaktoren. Als primärer Outcomeparameter wurde das revisionsbedürftige Implantatversagen definiert, da dieses die Stabilität der Wirbelsäule und den Langzeiterfolg der operativen Therapie maßgeblich beeinflusst. Als sekundärer Outcomeparameter wurden allgemein chirurgische Komplikationen wie beispielsweise chronische Wundheilungsstörungen und Infektionen, postoperative Hämatome sowie Krankenhaussterblichkeit festgelegt. Die Arbeit soll zum einen ein umfassendes Bild der operativen Risiken und Herausforderungen am ZTÜ vermitteln. Zum anderen verfolgt sie das Ziel, evidenzbasierte Therapieansätze für diese komplexe Region weiterzuentwickeln und Entscheidungsprozesse durch fundierte Daten zu unterstützen. Auf diese Weise soll ein Beitrag zur Optimierung der chirurgischen Versorgung bei Pathologien des ZTÜ geleistet und langfristig eine Verbesserung der Versorgungsqualität für betroffene Patientinnen und Patienten erreicht werden.

3 Material und Methoden

3.1 Patientenkollektiv

In einer monozentrischen, retrospektiven Analyse wurden, nach Genehmigung durch die Ethikkommission, die Daten von 93 Patienten ausgewertet. Zur Datenerhebung wurden die elektronischen Akten der Patienten aus dem kliniksinternen Datenverarbeitungsprogramm herangezogen. Patientenbezogene Daten wurden anonymisiert erfasst und gemäß den geltenden Datenschutzrichtlinien verarbeitet. Eingeschlossen wurden Patienten, welche an der Universitätsmedizin Mainz in der Neurochirurgischen Klinik zwischen 2010 und 2020, aufgrund von Läsionen im Bereich des ZTÜs (C7 bis T2) stabilisierend operiert wurden. In Arztbriefen und Operationsberichten wurden instabile Läsionen identifiziert und diese in vier Subgruppen klassifiziert:

1. Infektionen
2. Traumata
3. Tumore
4. Degenerative Erkrankungen der Wirbelsäule

Zur besseren Übersicht wurden die OPs nach Art und Technik näher klassifiziert. Die Einteilung nach Operationsart war wie folgt:

1. Dorsale Stabilisierung
2. Ventrale Stabilisierung
3. Ventrale Korporektomie plus 360° Stabilisierung und
4. Posterolaterale Korporektomie plus Stabilisierung

Die Operationstechniken wurden folgendermaßen kategorisiert:

1. Fusion
2. Dekompression und Fusion

Von der Datenerhebung ausgeschlossen waren Patienten, deren OP ohne Stabilisierung erfolgte. Genauso wurden Patienten ausgeschlossen deren betroffene Wirbel nicht den ZTÜ, also nur die Hals- oder BWS, betraf.

3.2 Datenerhebung

Die Datenerfassung erfolgte in tabellarischer Form in Microsoft® Excel für Mac. Für die Datenerhebung wurden Arztbriefe, Operationsberichte, radiologische Befunde sowie Verlaufsberichte aus der elektronischen Patientenakte des Kliniksystems der Universitätsmedizin Mainz genutzt. Eine darüber hinaus gehende aktive Datenerhebung war nicht vorgesehen.

Folgende Parameter wurden retrospektiv bei der Datenerhebung berücksichtigt:

- Allgemeine Patientencharakteristika: Geschlecht, Alter bei OP, Vitalstatus (tot, lebend, unbekannt) und gegebenenfalls Sterbedatum, Karnofsky Performance Score (KPS) vor OP, Relevante Vorerkrankungen, Raucherstatus
- Pathologiespezifische Daten:
 - Infektionen: Art des Infekts (z.B. Spondylodisitis, intraspinaler oder paraspinaler Abszess/Emphyem, extraspinaler Infektionsherd), Keimnachweis, Leukozytenzahl, Wert für C-reaktives Protein (CRP), epidurale Kompression
 - Traumata: Unfallhergang, AO-Spine Klassifikation, Osteoporose (ja/nein), OF-Klassifikation, Morbus Bechterew (ja/nein)
 - Tumore: Spezifizierung des Tumors, epidurale Kompression, SINS-Score, Salvage-OP (ja/nein), Radiotherapie vor und nach OP (ja/nein)
 - Degenerative Erkrankungen: Art der degenerativen Erkrankung (z.B. Bandscheibenvorfall, SKS, rheumatische Arthritis, Spondylolisthese), Myelopathie, Radikulopathie
- Klinische Parameter:
 - Neurologischer Status vor und nach OP (mittels American Spinal Injury Association (ASIA) - Score), American Society of Anesthesiologists (ASA) - Klassifikation vor OP, Dauer der Wirbelsäulen-assoziierten Symptome in Tagen, Prolo Functional Score nach OP, Dauer des stationären Aufenthalts, Hauptindikation zur OP, CT- und/oder MRT-Bild (ja/nein)
- Operationsdaten
 - Datum der OP, Art der OP, Operationstechnik, Anzahl der operierten Wirbelsäulensegmente, Schnitt-Naht-Zeit, Blutverlust in Milliliter

(sofern vorhanden im Protokoll), Komplikationen postoperativ, eingebrachte Schrauben (Pedikel/Massa Lateralis)

Um die Komplikationsraten näher zu beleuchten, wurden die radiologischen Befunde, sowie Verlaufsberichte sorgfältig untersucht. Erfasst wurden hierbei sowohl allgemeine Komplikationen als auch speziell chirurgische Komplikationen und die Mortalität im Krankenhaus. Unterteilt wurden diese wiederum in allgemein chirurgische Komplikationen z.B. Wundinfekte, Hämatome und operationsbedingte Komplikationen, die speziell mit der implantierten Hardware zusammenhängen.

Als weitere Beobachtungseinheit der deskriptiven Statistik dienten die vom Operateur eingebrachten Pedikel- und Massa Lateralis-Schrauben. Bei den Massa Lateralis-Schrauben wurde fallbasiert erfasst, ob diese mono- oder bikortikal eingebracht wurden. Außerdem wurde die Wirbelkörperhöhe sowie die Lockerungsrate der Massae Lateralis-Schrauben erfasst. Abbildung 1 zeigt beispielhaft eingebrachte Massa Lateralis-Schrauben im Wirbelkörper C5. Alle Abbildungen in dieser Arbeit wurden vom Verfasser der Dissertation selbst erstellt.



Abbildung 1: eingebrachte Massa-Lateralis Schrauben

Bei den Pedikelschrauben wurde gemessen, in welchem Winkel die Schrauben in die Pedikel eingebracht wurden. Für jede Pedikelschraube unabhängig wurde eine Winkelmessung in axialer und sagittaler Ausrichtung zur Wirbelsäule vorgenommen. Die Winkelmessung erfolgte mittels SECTRA®.

Die nachfolgende Abbildung 2 zeigt beispielhaft, wie die Winkelmessung in axialer Ausrichtung erfolgte:



Abbildung 2: Axiale Winkelmessung der Pedikelschrauben

Links in Abbildung 2 ist der Wirbelkörper C7 abgebildet, rechts ist der Wirbelkörper T2 dargestellt. Zunächst wurde eine horizontale Linie an der Unterkante des Wirbelkörpers gezogen. Von dieser Linie ausgehend erfolgte die Messung eines 90° Winkels und es entstand hierdurch eine neue vertikale Bezugslinie, die zur finalen Winkelmessung der Schrauben dienen sollte. Im letzten Schritt wurde eine Linie mittig durch die Schraube gezogen. Ausgehend von der vertikalen Bezugslinie und der mittigen Schraubenlinie entstand der gemessene Schraubenwinkel.

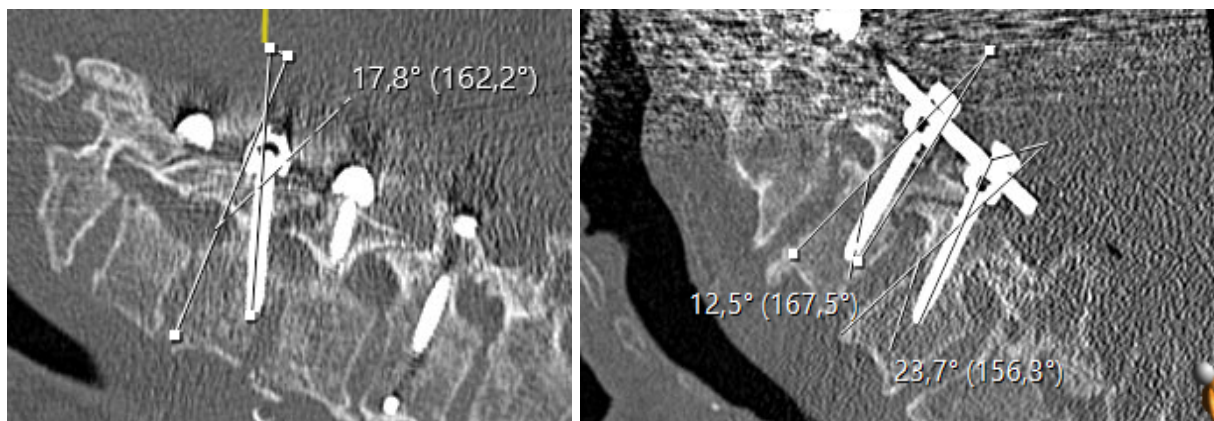


Abbildung 3: Sagittale Winkelmessung der Pedikelschrauben

Abbildung 3 zeigt die Winkelmessung in sagittaler Ausrichtung der Wirbelsäule. Links im Bild ist beispielhaft eine suboptimal gelegene Pedikelschraube in T1 dargestellt. Rechts im Bild erkennt man eingebrachte Pedikelschrauben in C7 und T1. Die Durchführung der Winkelmessung sah folgendermaßen aus:

Zunächst wurde eine horizontale Linie an der Oberkante des Wirbelkörpers gezogen. Diese stellte gleichzeitig die Bezugslinie für die Winkelmessung dar. Nachfolgend wurde eine Linie mittig durch die jeweils zu messende Schraube gelegt. Ausgehend von der Bezugslinie und der Schraubenlinie entstand die Winkelmessung für die Pedikelschraube.

Außer den o.g. Erhebungen wurden weitere Pedikelschraubencharakteristika wie Lockerung der Schrauben und Lage der Schrauben im Konstrukt (kraniales, kaudales Ende, Wirbelkörperhöhe) in der anonymisierten Datentabelle aufgetragen.

3.3 Statistische Methoden

Die statistische Auswertung erfolgte mit IBM® SPSS® Statistics 29. Mittels deskriptiver Statistik wurden relevante klinische Parameter wie Geschlecht, Alter, Diagnose, Hauptindikation zur OP, KPS, Neurologie vor und nach OP, Operationsbedingte Komplikationen, Mortalitätsrate und Operationsverfahren zusammengefasst, um ihren potenziellen Einfluss auf postoperative Komplikationen zu bewerten.

Die schließende Statistik erfolgte mittels binär logistischer Regression, wodurch der Zusammenhang zwischen der Zielgröße Implantatversagen und den Einflussgrößen Rauchen, Alter, Geschlecht, Diagnose, Operationstechnik, Operationsart, Anzahl der operierten Wirbelkörper, OP-Zeitdauer in Minuten und KPS getestet und berechnet wurde.

Um einen Zusammenhang zwischen der Winkelung der eingebrachten Schrauben als Einflussgröße auf das Implantatversagen zu untersuchen, erfolgte eine binär logistische Regressionsanalyse. Das Signifikanzniveau α wurde auf $p < 0,05$ festgelegt. Mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % wurden p-Werte unter 0,05 als signifikant eingestuft.

4 Ergebnisse

4.1 Studienpopulation und Demographie

Die Studienpopulation umfasste 93 Patienten (56 männlich, 37 weiblich) mit einem medianen Alter von 67 Jahren. In Abbildung 4 ist die Alters- und Geschlechterverteilung zum Zeitpunkt der OP dargestellt. Alle Patienten unterzogen sich zwischen 2010 und 2020 einer stabilisierenden OP aufgrund von Erkrankungen des ZTÜs. Die zugrunde liegenden Pathologien sind in Abbildung 5 aufgeführt. Die Verteilung war wie folgt:

1. Infektionen: 13 Patienten (14,0 %)
2. Degenerative Erkrankungen: 44 Patienten (44,3 %)
3. Tumoren: 24 Patienten (25,8 %)
4. Traumatische Verletzungen: zwölf Patienten (12,9 %)

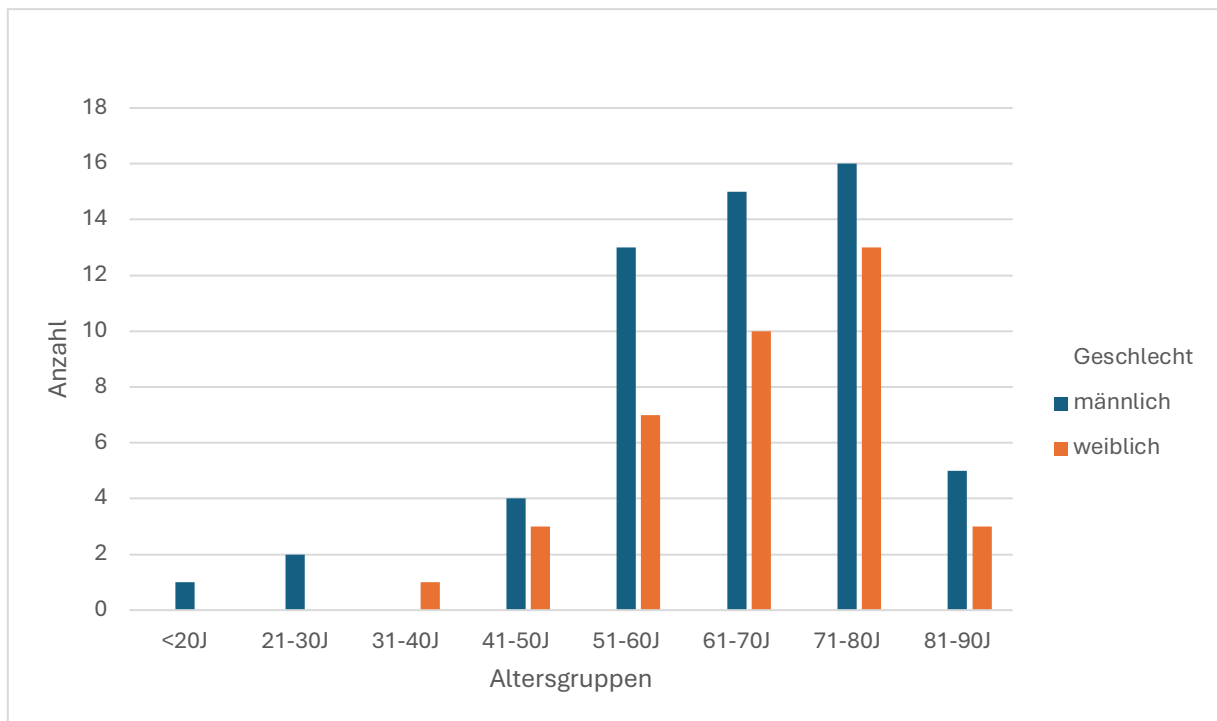


Abbildung 4: Altersgruppenverteilung zum Zeitpunkt der Operation unter Berücksichtigung des Geschlechts

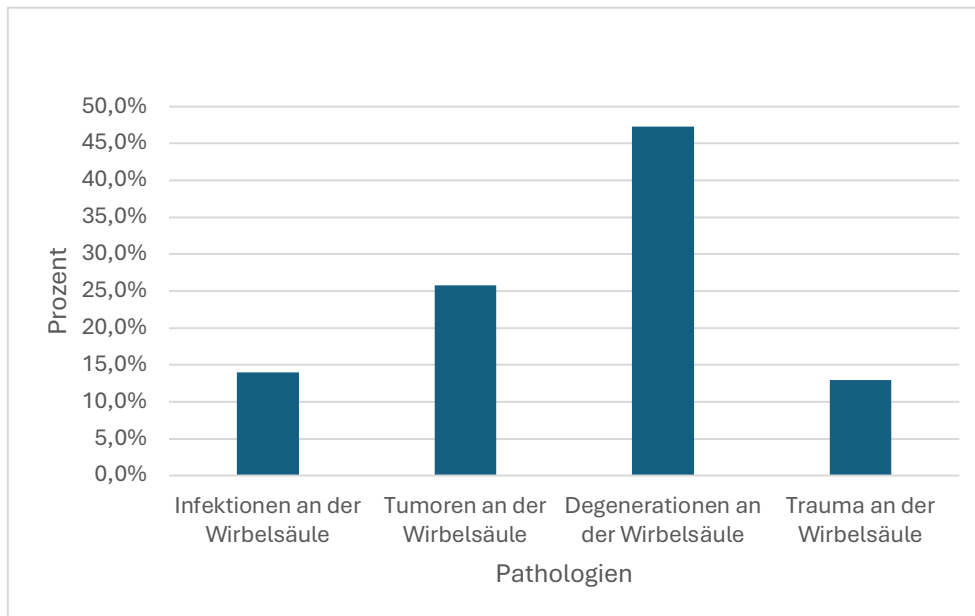


Abbildung 5: Zugrunde liegende Pathologien innerhalb der Studienpopulation

In Tabelle 1 wurden weitere relevante demographische Daten zur Studienpopulation erhoben:

Merkmal	Häufigkeit	Prozent in %
Raucherstatus		
Nichtraucher	50	53,8
Raucher	28	30,1
Ex-Raucher	15	16,1
Relevante Vorerkrankungen		
keine	36	38,7
≥1	57	61,3
Frühere OPs		
keine	64	68,8
≥1	29	31,2
KPS		
> 70 %	28	30,1
< 70 %	65	69,9
Erkrankte Wirbelkörperhöhe		
C7	48	51,6
C7/T1	29	31,2
T1/T2	16	17,2
ASA Klassifikation		

1	1	1,1
2	23	24,7
3	53	57,0
4	16	17,2
Symptomdauer		
> 30 Tage	56	60,2
< 30 Tage	37	39,8

Tabelle 1: Weitere demographische Daten zur Studienpopulation *Relevante Vorerkrankungen = insbesondere Osteoporose, Parkinson, M.Bechterew, Diabetes, SKS oder Spondylose; *frühere OPs = stabilisierende OPs am ZTÜ in der Vorgeschichte; *Symptomdauer = Dauer der Wirbelsäulenassoziierten Symptome

4.2 Diagnosespezifische Datenerhebung

4.2.1 Spondylodiszitis

Bei 13 Patienten war eine Spondylodiszitis die Ursache einer Läsion am ZTÜ. Infolge einer epiduralen Raumforderung bestand in elf dieser Fälle (84,6 %) eine Myelonbeteiligung. In sechs Fällen (46,1 %) war der Infektionsherd extraspinal lokalisiert. In acht Fällen (61,5 %) wurden intraoperativ Staphylokokken oder Streptokokken als Erreger nachgewiesen. In einem Fall (7,6 %) konnte eine Tuberkulose als Ursache für die Spondylodiszitis festgestellt werden. Bei allen Patienten wurde mindestens ein prädisponierender Risikofaktor nachgewiesen, beispielsweise Diabetes mellitus, die Nikotinanamnese, eine immunsuppressive Therapie oder ein extraspinaler Infekt. Laborchemisch zeigte sich in zwölf von 13 Fällen (92,3 %) eine präoperative CRP-Erhöhung, während in vier dieser Fälle (33,3 %) eine Leukozytose dokumentiert wurde. Bei neun von 13 Patienten (69,2 %) wurde eine MRT-Diagnostik durchgeführt. In 12 von 13 Fällen (92,3 %) erfolgte zur operativen Planung eine CT.

4.2.2 Degenerative Wirbelsäulenerkrankungen

In unserer Studie gab es 44 Patienten, die aufgrund eines degenerativen Geschehens am ZTÜ stabilisierend operiert wurden. Diese Gruppe stellte die Größte in unserem Kollektiv da. Alle Patienten bis auf einen aus der Gruppe entwickelten durch die degenerativen Prozesse eine SKS. 22 (50,0 %) Patienten waren von einem Bandscheibenvorfall betroffen. In 32 (72,7 %) Fällen kam es zu einer Rückenmarkskompression mit nachfolgender Myelopathie.

4.2.3 Tumore

Wie bereits unter 4.1 erwähnt gab es in unserer Kohorte 24 Tumorpatienten, deren Entitäten sich sehr unterschiedlich darstellten. Zu den Primären zählten am häufigsten das Adenokarzinom der Lunge mit sechs Fällen (25,0 %). Andere Primärtumoren, die jeweils mit zwei Fällen (8,3 %) vorkamen, waren das Maligne Melanom, das Plasmazellkarzinom, der Pancoast Tumor und das Meningeom. Weitere, jeweils mit einem Fall (4,1 %) vertreten, waren Metastasen eines Rektumkarzinoms, eines Mammakarzinoms, eines mediastinalen Adenokarzinoms, eines großzelligen B-Zell-Lymphoms, eines Adenokarzinoms des gastroösophagealen Übergangs, eines Ösophaguskarzinoms und eines Schilddrüsenkarzinoms. In zwei weiteren Fällen (8,3 %) blieb die Tumorentität unklar.

Bei allen Tumorpatienten wurde der SINS-Score mittels CT bestimmt, der bei der Aussage über die Stabilität der Fraktur hilfreich sein kann. Letztlich wird über das Scoring eine Endpunktzahl erreicht, welche die Frakturen in stabil, potenziell instabil und instabil klassifiziert. In unserer Studie wurde durch den SINS-Score keine Tumorfaktur als stabil (0-6 Punkte) gewertet, sechs Frakturen (25,0 %) wurden als potenziell instabil (7-12 Punkte) und der 18 Frakturen (75,0 %) als instabil (13-18 Punkte) klassifiziert. Im Anhang der Arbeit findet man eine Übersicht des SINS-Scoring Systems. Der mediane SINS-Score lag in der Tumorgruppe bei 14.

4.2.4 Traumata

In unserer Kohorte gab es zwölf Patienten, die sich durch ein Trauma eine instabile Läsion am ZTÜ zuzogen. Hiervon waren neun Ereignisse (75,0 %) durch ein Sturzgeschehen entstanden. In drei Fällen (25,0 %) kam das Trauma durch einen Verkehrsunfall zustande. Frakturen werden im Allgemeinen nach der AO- Klassifikation bestimmt: Sechs Fälle (50,0 %) in unserer Studiengruppe wurden unter B3 klassifiziert, drei weitere (25,0 %) galten als Typ C Fraktur. Weitere Frakturen in der Patientengruppe, je mit einem Fall (8,3 %) vertreten, waren eine Typ A4, eine Typ B1 und eine Typ B2 Fraktur.

4.3 Operationsmethoden

4.3.1 Allgemein

Die angewandten chirurgischen Verfahren und Zugangswege werden in Abbildung 6 illustriert und zeigten folgende Verteilung:

1. 51 Patienten wurden von dorsal stabilisiert (54,8 %)
2. 5 Patienten erhielten eine reine ventrale Stabilisierung (5,4 %)
3. 28 Patienten wurden mittels ventraler Korporektomie und additiver dorsaler Instrumentierung im Sinne einer 360° Stabilisierung operiert (30,1 %)
4. 9 Patienten wurden von dorsal stabilisiert, einschließlich einer Korporektomie über einen posterolateralen Zugangsweg (9,7 %)

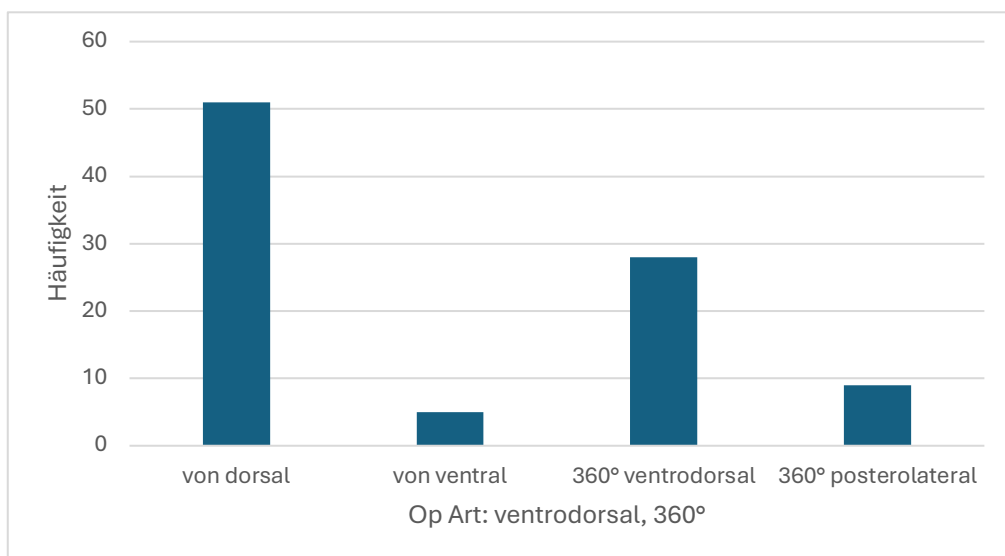


Abbildung 6: Angewandte chirurgische Verfahren

4.3.2 Subgruppenbezogene OP-Verfahren

In der Gruppe der Spondylodiszitiden wurde in sechs Fällen (46,1 %) von rein dorsal und in einem Fall (7,7 %) von rein ventral stabilisiert. In fünf Fällen (38,5 %) wurde eine 360° Stabilisierung durchgeführt und in einem Fall (7,7 %) wurde eine posterolaterale 360° Stabilisierung vorgenommen. Nachfolgend findet man hierzu die Darstellung in Tabelle 2:

		Häufigkeit	Prozent	Gültige Prozente
	von dorsal	6	46,2	46,2
	von ventral	1	7,7	7,7
	360° ventrodorsal	5	38,5	38,5
	360° posterolateral	1	7,7	7,7
	Gesamt	13	100,0	100,0

Tabelle 2: OP-Verfahren bei Spondylodiszitis

In der degenerativen Gruppe wurde kein Patient von posterolateral operiert. Mit 33 Fällen (75,0 %) wurden die Patienten am häufigsten einer dorsalen Stabilisierung unterzogen. Lediglich drei weitere Patienten (6,8 %) wurden in dieser Subgruppe von ventral und acht weitere (18,2 %) von ventrodorsal operiert. Anbei die Tabelle 3 zur Übersicht:

		Häufigkeit	Prozent	Gültige Prozente
Gültig	von dorsal	33	75,0	75,0
	von ventral	3	6,8	6,8
	360° ventrodorsal	8	18,2	18,2
	Gesamt	44	100,0	100,0

Tabelle 3: OP-Verfahren bei Degenerationen

Bei Tumorpatienten war die Auswahl der OP-Verfahren auf drei von vier Verfahren beschränkt, sodass keiner der 24 Patienten allein von ventral operiert wurde. Die Verteilung der übrigen drei Verfahren gestaltete sich sehr homogen. Hierbei wurden acht Patienten (33,3 %) von dorsal, neun Patienten (37,5 %) von ventrodorsal 360° und sieben Patienten (29,2 %) von posterolateral 360° stabilisiert.

		Häufigkeit	Prozent	Gültige Prozente
Gültig	von dorsal	8	33,3	33,3
	360° ventrodorsal	9	37,5	37,5
	360° posterolateral	7	29,2	29,2
	Gesamt	24	100,0	100,0

Tabelle 4: OP-Verfahren bei Tumoren

Abschließend wurde in der Traumagruppe jeweils einmal (8,3 %) von ventral und posterolateral operiert. Es wurde bei vier Fällen (33,3 %) eine dorsale Stabilisierung durchgeführt. Bei sechs weiteren Fällen (50,0 %) kam es zur ventrodorsalen Stabilisierung.

		Häufigkeit	Prozent	Gültige Prozente
Gültig	von dorsal	4	33,3	33,3
	von ventral	1	8,3	8,3
	360° ventrodorsal	6	50,0	50,0
	360° posterolateral	1	8,3	8,3
	Gesamt	12	100,0	100,0

Tabelle 5: OP-Verfahren bei Traumapatienten

4.4 Prä- und postoperative Morbiditätsmerkmale

Zur Erfassung der präoperativen Morbidität der Studienpopulation wurden der KPS und die ASA - Klassifikation herangezogen. Der mittlere präoperative KPS betrug 50 %. Der mediane ASA-Score lag bei 3 (siehe Tabelle 1). Neurologische Defizite jeder Art lagen bei 82 Patienten (88,2 %) präoperativ vor. Um die postoperative Funktionalität und Mobilität der Patienten zu erfassen, wurde der modifizierte Prolo Functional Score (PFS) nach Davis bestimmt. Im Median ergab der PFS einen Wert von 3. Im Anhang werden die genannten Scoringssysteme zur Übersicht dargestellt.

4.5 Chirurgische Hauptindikationen

Die chirurgische Indikationsstellung war häufig multifaktoriell. Die Hauptindikation für die OP ließ sich jedoch in vier Subgruppen unterteilen, welche in Abbildung 7 aufgetragen sind:

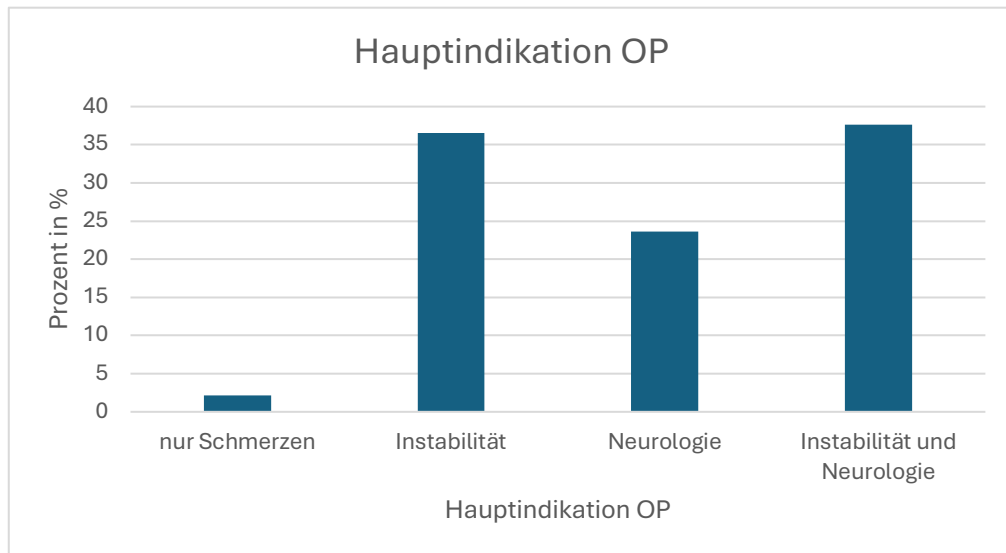


Abbildung 7: Hauptindikationen Wirbelsäuleninstabilität in 34 Fällen (36,6 %), Neurologisches Defizit in 22 Fällen (23,7 %), Axiale Schmerzen in 2 Fällen (2,2 %), Kombination aus Instabilität und Neurologie in 35 Fällen (37,6 %)

4.6 Neurologisches Outcome

Von den 82 Patienten (88,2 %) mit präoperativen neurologischen Defiziten zeigten 53 Patienten (64,6 %) eine teilweise Verbesserung, acht Patienten (9,8 %) eine vollständige neurologische Erholung. Abbildung 8 illustriert diese Ergebnisse:

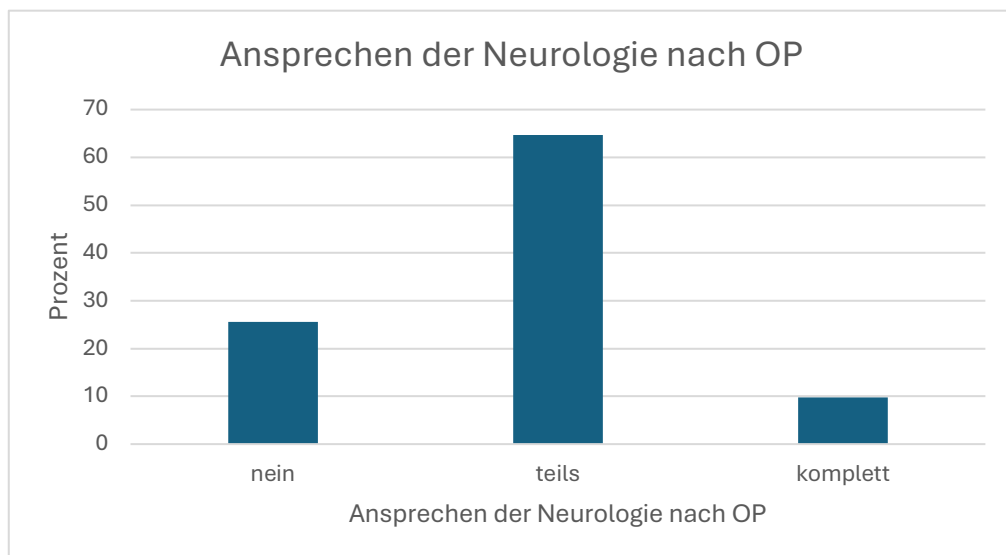


Abbildung 8: Ansprechen der neurologischen Symptome nach OP

Um neurologische Defizite zu quantifizieren wurde der ASIA-Score prä- und postoperativ erhoben. Abbildung 9 veranschaulicht diesen prä- und postoperativen Vergleich:

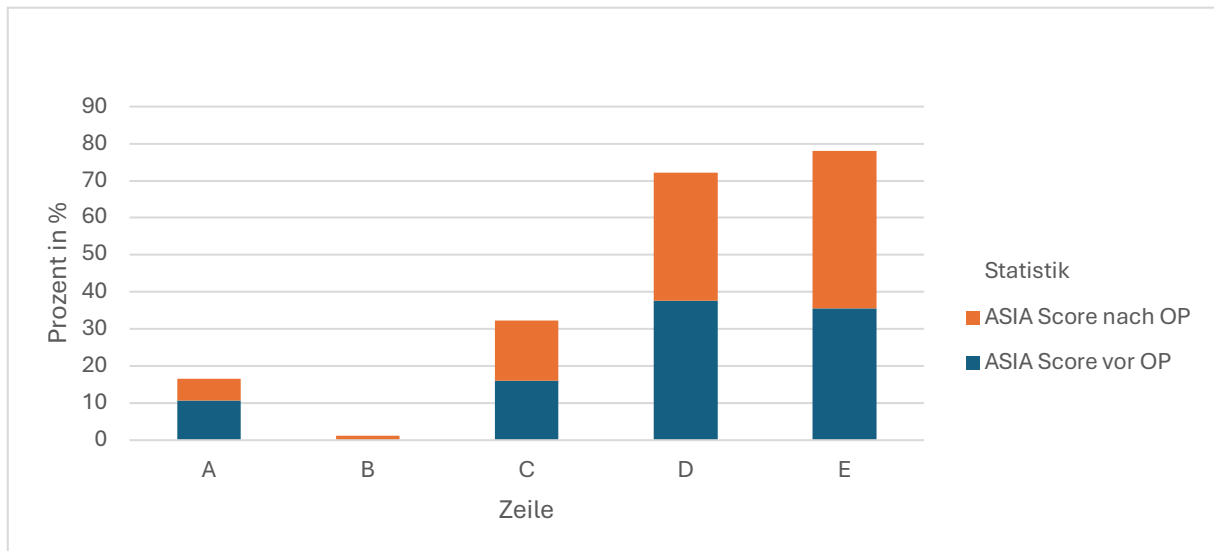


Abbildung 9: ASIA prä- und postoperativ vor OP: A = 10,8 %, C = 16,1 %, D = 37,6 %, E = 35,5 %, *Grad B ist nicht vertreten; nach OP: A = 5,7 %, B = 1,1 %, C = 16,1 %, D = 34,5 %, E = 42,5 %

4.7 Postoperative Komplikationen

4.7.1 Allgemeines

Bei 29 Patienten (31,2 %) kam es während des Krankenhausaufenthaltes zu Komplikationen, welche eine Revisionsoperation erforderlich machten. Innerhalb der Komplikationsgruppe wurden in 14 Fällen (48,3 %) allgemeine und in 15 Fällen (51,7 %) Implantat-assoziierte Komplikationen beobachtet. Die Sterblichkeitsrate im Krankenhaus war bezogen auf die Gesamtpopulation mit zehn Fällen (10,8 %) zu verzeichnen (Tabelle 6):

Komplikationen und Sterblichkeitsrate	Fälle (n)	Prozent in %
Allgemeine Komplikationen	14	15,0
Wundheilungsstörungen	11	11,8
Postoperative Hämatome	2	2,2
Paravertebraler Infekt	1	1,1
Implantat assoziierte Komplikationen	15	16,1
Fehlpositionierungen	6	6,5
Hardwareversagen	9	9,7
Krankenhaussterblichkeit	10	10,8

Tabelle 6: Komplikationen und Sterblichkeitsrate bezogen auf die Gesamtpopulation

4.7.2 Wundheilungsstörungen

Revisionsbedürftige Wundheilungsstörungen gehörten mit 11 von 29 Fällen (37,93 %) zu den häufigsten postoperativen Komplikationen bezogen auf die Gesamtkomplikationsrate. In drei von elf Fällen (27,3 %) war eine Vakuum-Therapie (VAC-Therapie) notwendig. Die genaue Verteilung stellt sich wie folgt dar:

- In der Gruppe der Spondylodiszitiden musste eine Person (8,3 %) aufgrund eines Seroms im Zugangsbereich mehrfach punktiert werden.
- In der Tumorgruppe gab es fünf Fälle (41,6 %) mit Wundheilungsstörungen. Hiervon erhielt eine Person eine dreimalige Wundrevision mit Debridement und VAC-Therapie. Die Wunde konnte nach etwa einem Monat verschlossen werden. Vier weitere Personen erhielten jeweils eine einmalige Wundrevision ohne VAC-Therapie.
- In der degenerativen Gruppe traten bei drei Personen (25,0 %) Wundheilungsstörungen auf. Hiervon erhielt eine Person eine zweimalige Wundrevision mit anschließender VAC-Therapie und die Wunde konnte nach etwa 30 Tagen verschlossen werden. Bei zwei weiteren Personen kam es zu einer Liquorleckage mit jeweils einmaliger Wundrevision.
- Unter den Traumafällen kam es in zwei Fällen (18,2 %) zu Wundheilungsstörungen. In einem Fall kam es zu einer zweimaligen Revision aufgrund einer Liquorfistel, im zweiten Fall zu einer einmaligen Wundrevision mit anschließender VAC-Therapie. Auch hier konnte die Wunde etwa nach einem Monat verschlossen werden.

4.7.3 Postoperative Hämatome

In zwei von 93 Fällen (2,2 %) kam es zu Revisionen aufgrund von Hämatomen. In einem Fall aus der Tumorgruppe musste das Hämatom noch am Operationstag ausgeräumt werden. In einem weiteren Fall aus dem degenerativen Kollektiv kam es drei Tage später zu einer Kraftgradminderung, die zur Identifikation und der anschließenden Evakuierung des Hämatoms führten.

4.7.4 Implantatfehlage

In unserem Patientenkollektiv kam es in sechs Fällen (6,5 %) zu Fehlpositionierungen des implantierten Materials. In allen sechs Fällen konnte die Korrektur nach einmaliger Revision erreicht werden. In fünf Fällen waren Pedikelschrauben, die nicht navigiert eingebracht wurden, von der Fehllage betroffen. In einem Fall war eine Massa Lateralis-Schraube betroffen. Bezüglich der Diagnosen waren zwei Tumorpatienten, drei Patienten mit Degenerationen an der Wirbelsäule und ein Patient mit einer Spondylodiszitis von der Fehlpositionierung betroffen.

4.7.5 Implantatversagen

Implantatversagen machte ein Drittel der gesamten Komplikationen aus und wurde in neun Fällen (31,0 %) dokumentiert. Als Implantatversagen wurden in dieser Arbeit Lockerungen oder Dislokationen des Materials, Schraubenausrisse bzw. -brüche sowie Cageeinbrüche gewertet. Die Verteilung der verschiedenen Formen des Implantatversagens ist in der folgenden Tabelle dargestellt:

Indikation	OP-Art	Implantatrevision (n)	Zusätzliche Besonderheiten zuzuglich zur Implantatrevision
Nr 12: Spondylodiszitis	Dorsale Stabilisierung	2	
Nr. 20, Tumor	360° Stabilisierung	1	chronische WHST, persistierende Liquorfistel, mehrfache Wundrevisionen und VAC-Therapie
Nr. 23, Tumor	Dorsale Stabilisierung	1	chronische WHST, mehrfache Wundrevisionen und VAC-Therapie, außerdem 1x Korrektur bei Schraubenfehlage
Nr. 30, Tumor	360° Stabilisierung	2	Im 2. Eingriff intraoperativ Pus, anschließend mehrfache Wundrevisionen notwendig
Nr. 38, Degeneration	Dorsale Stabilisierung	1	Einmalige Wundrevision bei Liquorfistel
Nr. 41, Degeneration	360° Stabilisierung	2	
Nr. 46, Degeneration	Dorsale Stabilisierung	1	
Nr. 71, Degeneration	Dorsale Stabilisierung	2	6-malige Wundrevision aufgrund WHST
Nr. 73, Degeneration	Dorsale Stabilisierung	1	Einmalige Wundrevision aufgrund WHST

Tabelle 7: Implantatversagen Implantatrevision (n) bezieht sich nur auf Implantatversagen, *WHST = Wundheilungsstörungen

4.8 Komplikationen: Pathologiespezifische Subgruppenanalyse

4.8.1 Infektionen

Bei den 13 Patienten, die aufgrund einer spinalen Infektion behandelt wurden, lag die Krankenhaussterblichkeit bei zwei Fällen (15,4 %). Komplikationen traten in vier Fällen (30,8 %) auf. Davon entfielen jeweils zwei Fälle (15,4 %) auf Implantat-assoziierte Komplikationen und zwei Fälle (15,4 %) auf allgemeine Komplikationen.

4.8.2 Tumore

In der Gruppe der tumorbedingten Erkrankungen traten Komplikationen in elf Fällen (45,8 %) auf. Hierbei entfielen sechs Fälle (25,0 %) auf allgemeine und fünf Fälle (20,8 %) auf Implantat-assoziierte Komplikationen. Die Krankenhaussterblichkeit lag bei drei Fällen (12,5 %).

4.8.3 Degenerative Erkrankungen

Die Komplikationsrate bei degenerativen Erkrankungen lag bei zwölf Fällen (27,3 %), darunter kam es in vier Fällen (9,1 %) zu allgemeinen und in acht Fällen (18,2 %) zu Implantat-assoziierten Komplikationen. Die Mortalität im Krankenhaus lag bei drei Fällen (6,7 %).

4.8.4 Traumata:

Unter den Traumapatienten kam es in zwei Fällen (16,7 %) zu postoperativen Wundinfektionen. Die Krankenhaussterblichkeit in der Subgruppe lag bei zwei Fällen (16,7 %). Es kam in keinem Fall zu Implantat-assoziierten Komplikationen.

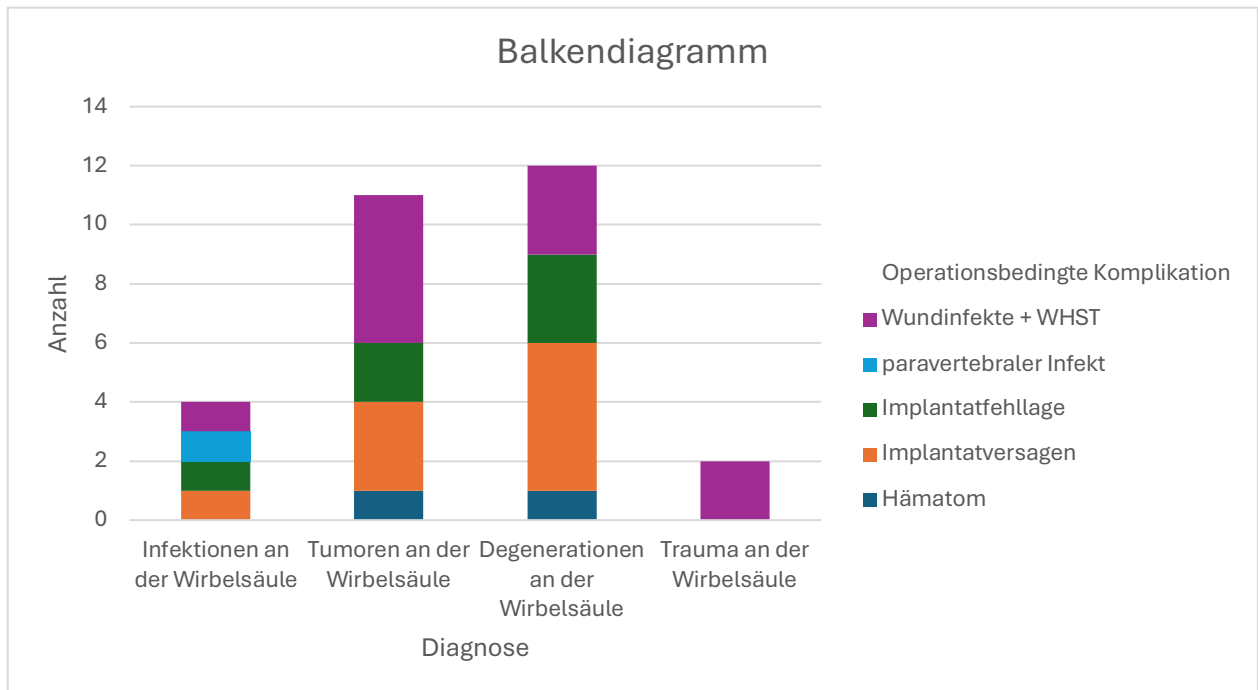


Abbildung 10: Operationsbedingte Komplikationen

In Abbildung 10 wird die Verteilung der Komplikationen bezogen auf die Subgruppen dargestellt. Abbildung 11 zeigt die Krankenhaussterblichkeit in Bezug auf die Subgruppen.

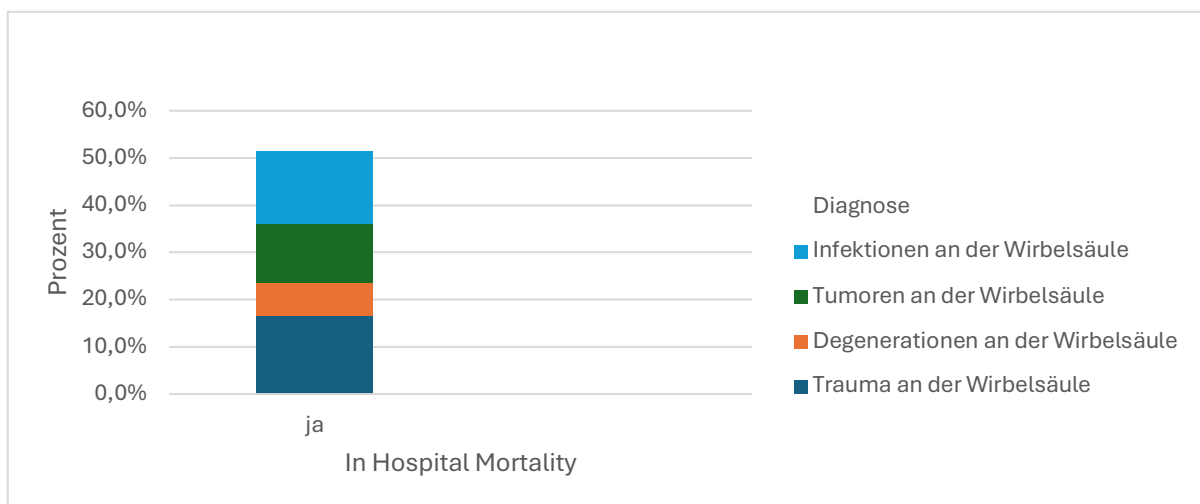


Abbildung 11: Krankenhaussterblichkeit bezogen auf die Subgruppenpathologien Mortalität bei: Infektionen 15,4 %, Tumoren 12,5 %, Degenerationen: 6,8 %, Traumata: 16,7 %

4.9 Pedikelschrauben

In der Studienpopulation wurden insgesamt 376 Pedikelschrauben in den Höhen C5 bis T6 implantiert. Tabelle 8 gibt hierzu einen Überblick:

Wirbelkörper	Pedikelschrauben (n)	In Prozent %
C5	2	0,5
C6	4	1,1
C7	103	27,4
T1	146	38,8
T2	45	12,0
T3	36	9,6
T4	20	5,3
T5	14	3,7
T6	6	1,6
Gesamt	376	100,0

Tabelle 8: Verteilung der Pedikelschrauben in Bezug zu instrumentiertem Wirbel

Bei 16 Schrauben (4,3 %) wurde eine Lockerung beobachtet, wobei die höchste Lockerungsrate mit sechs Schrauben (37,5 %) T1 betraf. In Tabelle 9 werden die Lockerungen wie folgt dargestellt:

Wirbelkörper	Lockerung nein	Lockerung ja	Gesamt
C5	2	0	2
C6	4	0	4
C7	100	3	103
T1	140	6	146
T2	43	2	45
T3	34	2	36
T4	18	2	20
T5	13	1	14
T6	6	0	6
Gesamt	360	16	376

Tabelle 9: Lockerung der Pedikelschrauben in Bezug zu instrumentiertem Wirbel

Schrauben in eingebrachten sagittalen Winkeln von 0° – 15° und in axialen Winkeln von 15° – 30° wiesen die höchste Lockerungsrate mit jeweils zehn Fällen auf (62,5 %). Tabelle 10 zeigt Lockerungscharakteristika der eingebrachten Pedikelschrauben:

Kategorie	Keine Lockerung (n)	Lockerung (n)
Sagittale Winkel		
Kleiner als -15°	18	0
-15° - 0°	100	5
0° - 15°	203	10
15° - 30°	36	1
Über 30°	3	0
Axiale Winkel		
0° - 15°	35	3
15 - 30	212	10
30° - 45°	104	3
Größer als 45°	7	0
Wirbelkörper		
C5	2	0
C6	4	0
C7	100	3
T1	140	6
T2	43	2
T3	34	2
T4	18	2
T5	13	1
Rechter Pedikel	184	8
Linker Pedikel	176	8

Tabelle 10: Pedikelschrauben Lockerungsangaben in Bezug zu unterschiedlichen Kategorien

4.10 Massa Lateralis-Schrauben

Von den 93 in die Studie eingeschlossenen Patienten erhielten 69 Patienten im Rahmen ihrer Stabilisierungsmaßnahmen Massa Lateralis-Schrauben. Hierbei wurden die Schrauben in 15 Fällen (21,7 %) monokortikal und in 49 Fällen (71,0 %) bikortikal eingebracht. Bei fünf weiteren Fällen (7,2 %) wurden die Schrauben sowohl mono- als auch bikortikal eingebracht. In 24 Fällen wurden keine Massa Lateralis-Schrauben verwendet. Insgesamt wurden 318 Massa Lateralis-Schrauben implantiert. Hiervon wurden 72 (22,6 %) Schrauben monokortikal und 246 (77,4 %) bikortikal implantiert. Tabelle 11 zeigt die Schraubenverteilung genauer:

Wirbelkörper	Monokortikal	Bikortikal	Gesamt
C1	0	2	2
C2	2	4	6
C3	14	42	56
C4	18	56	74
C5	22	83	105
C6	16	55	71
C7	0	4	4
Gesamt	72	246	318

Tabelle 11: Massa Lateralis-Schrauben Verteilung in Bezug zu instrumentiertem Wirbel und Art der Schraubenimplantation (mono- oder bikortikal)

In sechs von 69 Fällen (8,7 %) traten Lockerungen von Massa Lateralis-Schrauben auf. Diese Schrauben wurden in vier Fällen bikortikal und in zwei Fällen monokortikal eingebracht. Außerdem betrafen die Lockerungen überwiegend das kraniale Ende des Stabilisierungskonstrukts. Bei 20 von insgesamt 318 (6,3 %) implantierten Massa Lateralis-Schrauben wurden Lockerungen festgestellt. Bei einer (0,3 %) Schraube kam es zu einem Bruch, der revisionsbedürftig war. In Tabelle 12 sieht man die Verteilung der Massa Lateralis-Schrauben in Bezug auf die Wirbelhöhe inklusive der Lockerungsverteilung.

Wirbelkörper	Häufigkeit	Prozent in %	Gelockerte Schrauben
C1	2	0,6	0
C2	6	1,9	2
C3	56	17,6	2
C4	74	23,3	4
C5	105	33,0	8
C6	71	22,3	4
C7	4	1,3	0
Gesamt	318	100,0	20

Tabelle 12: Verteilung der Massa Lateralis-Schrauben und Lockerungen in Bezug zu instrumentiertem Wirbel

In Tabelle 13 wird die prozentuale Verteilung der gelockerten Schrauben nach Wirbelkörperhöhen dargestellt. Mit acht gelockerten Schrauben (40,0 %) war C5 am häufigsten von einer Lockerung betroffen, gefolgt von C4 und C6 mit je vier (20,0 %) Lockerungen. Auf den Höhen C2 und C3 traten jeweils zwei (10,0 %) Lockerungen auf. In C1 und C7 wurden keine Lockerungen beobachtet.

Wirbelkörper	Gelockerte Schrauben	Anteil an allen Lockerungen %
C1	0	0,0
C2	2	10,0
C3	2	10,0
C4	4	20,0
C5	8	40,0
C6	4	20,0
C7	0	0,0
Gesamt	20	100,0

Tabelle 13: Verteilung der Lockerungen in % in Bezug zu instrumentiertem Wirbel

In Tabelle 14 wird der Ort der Lockerung in Bezug zur mono- oder bikortikalen Implantation dargestellt:

Ort der Lockerung	Monokortikal	Bikortikal	Gesamt
C2	0	2	2
C3	0	2	2
C4	2	2	4
C5	4	4	8
C6	2	2	4
Gesamt	8	12	20

Tabelle 14: Lockerung in Bezug zu instrumentiertem Wirbel und Art der Schraubenimplantation (mono- oder bikortikal)

4.11 Statistische Analysen

4.11.1 Zusammensetzung der Regressionskohorte

Für die statistische Analyse wurde das Auftreten eines Implantatversagen als Zielgröße definiert, während die in 3.3. beschriebenen Einflussfaktoren als unabhängige Variablen in die Analyse einbezogen wurden. Mithilfe einer binär logistischen Regressionsanalyse wurde der Zusammenhang zwischen diesen Einflussgrößen und dem Auftreten eines Implantatversagen untersucht. Bei den kategorialen Variablen wurde jeweils automatisch eine Referenzkategorie von SPSS (je nach Einstellung die erste oder letzte Ausprägung) definiert, gegen die die Effekte der übrigen Kategorien berechnet wurden. Bei mehr als zwei Ausprägungen in einer Gruppe wird die Referenzkategorie in der Tabelle mit aufgeführt. Alle weiteren Variablen wurden metrisch in die Analyse einbezogen. In die Regressionsanalyse gingen alle 93 Patienten ein, die zwischen 2010 und 2020 aufgrund diverser Pathologien am ZTÜ eine stabilisierende OP erhielten. Die Gesamtpopulation wurde in einer gemeinsamen Analyse betrachtet, eine differenzierte Auswertung nach Subgruppen (z.B. nach Pathologien) erfolgte nicht.

4.11.2 Einfluss der OP-Art auf das Implantatversagen

In der binär logistischen Regressionsanalyse ließ sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen Implantatversagen und Operationsart feststellen ($p = 0,028$). Hierbei wurde die dorsale Stabilisierung als Referenzgruppe herangezogen, sodass die Effekte der anderen Operationsarten im Vergleich zu dieser Referenz berechnet wurden. Der wesentliche Befund dieser Regressionsanalyse war, dass Patienten, welche eine zweistufige Operationsstrategie mit ventraler Korporektomie und anschließender 360° Stabilisierung des ZTÜ erhielten, im Vergleich zur alleinigen dorsalen Stabilisierung ein signifikant geringeres Risiko für das Auftreten von Implantatversagen zeigten ($OR = 0,019$). Dieser zentrale Punkt der statistischen Analyse deutet darauf hin, dass die kombinierte ventrodorsale Operationsstrategie hinsichtlich Implantatstabilität und Materialermüdung als vorteilhaft zu werten ist.

4.11.3 Einfluss der Operationsdauer auf das Implantatversagen

Weiterhin lag ein signifikant erhöhtes Risiko für Implantatversagen bei längerer Operationsdauer vor ($p = 0,004$). Für die Operationsdauer wurde die Schnitt-Naht-Zeit betrachtet. Die Operationszeiten in der Kohorte reichten von 70 bis 805 Minuten. So steigt das Risiko für Implantatversagen um 1,9 % mit jeder Minute Operationsdauer (Odds Ratio 1,019).

4.11.4 Einfluss des Karnofsky Performance Score auf das Implantatversagen

Ein höherer KPS war interessanterweise signifikant mit einer erhöhten Wahrscheinlichkeit für Implantatversagen assoziiert ($p = 0,036$). Pro Einheit (je 10-Prozentwert) des KPS steigt das Risiko für Implantatversagen um 9,1 % (Odds-Ratio 1,091).

4.11.5 Einfluss der Schraubenwinkel auf das Implantatversagen

In einer weiteren binär logistischen Regressionsanalyse wurde der Zusammenhang zwischen der Winkelung der eingebrachten Schrauben als Einflussgröße auf das Implantatversagen untersucht. Wie bereits unter 3.2. beschrieben wurde für jede Pedikelschraube unabhängig eine Winkelmessung in axialer und sagittaler Ausrichtung zur Wirbelsäule vorgenommen. Für die statistische Analyse wurden axiale und sagittale Winkelgruppen einbezogen, die beispielsweise in Tabelle 10 oder nachfolgend in

Tabelle 15 dargestellt sind. Entsprechend des kategorialen Skalenniveaus wurde für die Winkelgruppen ebenfalls eine Referenzkategorie von SPSS definiert, gegen die die Effekte der übrigen Kategorien berechnet wurden. Wie bereits unter 4.9. erwähnt, wiesen Pedikelschrauben in eingebrachten sagittalen Winkeln von 0° – 15° und in axialen Winkeln von 15° – 30° die höchste Lockerungsrate auf (jeweils 10 Fälle, 62,5 %). Trotz dieser deskriptiven Beobachtung konnte kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Winkelung und dem Auftreten von Implantatversagen festgestellt werden ($p = >0,05$). In Tabelle 15 sind die Ergebnisse der Regressionsanalyse bezogen auf die Schraubenwinkelungen dargestellt.

Variablen	Sig.	Exp(B)	95%-KI Unterer Wert	95%-KI Oberer Wert
Sagittale Winkel				
Kleiner als -15°	1,0	1,0	0,000	-
-15° - 0°	0,999	80.772.979,14849392	0,000	-
0° - 15°	0,177	79.579.289,80147168	0,000	-
15° - 30°	0,181	44.873.877,30471886	0,000	-
Referenz: Über 30°	0,999			-
Axiale Winkel				
0° - 15°	0,999	138.468.087,37054715	0,000	-
15° – 30°	0,999	76.200.991,47750226	0,000	-
30° - 45°	0,999	46.599.837,095857196	0,000	-
Referenz: Größer als 45°	0,640			

Tabelle 15: Regressionsanalyse zum Einfluss von Schraubenwinkelungen auf das Auftreten von Implantatversagen

4.11.6 Weitere Einflussgrößen auf das Implantatversagen

Es ergab sich kein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Implantatversagen und den folgenden Variablen: Rauchen, Alter, Geschlecht, Diagnose, Operationstechnik (Fusion und/oder Dekompression), Anzahl der operierten Wirbelkörper. Die Referenzkategorien der kategorialen Variablen wurden von SPSS folgendermaßen festgelegt:

- Für die Variable Rauchen wurde die Referenzkategorie Ex-Raucher definiert.
- Für die Variable Geschlecht wurde die Referenzkategorie Männlich definiert.
- Für die Variable Diagnose wurde die Referenzkategorie Trauma definiert.
- Für die Variable Operationstechnik wurde die Referenzkategorie Fusion definiert.

Tabelle 16 zeigt die Ergebnisse der Regressionsanalyse für alle übrigen Variablen. Für die Referenzkategorien werden keine Odds Ratios oder Konfidenzintervalle angegeben, da sie als Vergleichsbasis dienen. Der jeweils dargestellte p-Wert bezieht sich auf die kategoriale Variable als Ganzes (z.B. Diagnose) und zeigt an, ob diese signifikant mit dem Auftreten von Implantatversagen assoziiert ist.

Variablen	Sig.	Exp(B)	95 %-KI Unterer Wert	95 %-KI Oberer Wert
OP-Zeitdauer in min: Schnitt/Naht	0,004	1,019	1,006	1,032
KPS in %	0,036	1,091	1,006	1,184
Anzahl der operierten Wirbelkörper	0,177	0,600	0,286	0,1260
Referenz OP-Art: dorsale Stabilisierung	0,181			
OP-Art: ventral Stabilisierung	0,999	0,000	0,000	-
OP-Art 360° und ventrale Korporektomie	0,028	0,019	0,001	0,646

OP-Art: 360° und posterolaterale Korporektomie	0,197	0,097	0,003	3,348
Alter	0,284	1,058	0,954	1,174
Geschlecht	0,908	0,883	0,107	7,319
Referenzdiagnose Trauma	0,861			
Infektionen	0,998	439.904.294,2877509	0,000	-
Tumore	0,998	140.517.547,4070774	0,000	-
Degenerative Erkrankungen	0,998	371.400.855,83427507	0,000	-
Referenz Ex-Raucher	0,590			
Nichtraucher	0,725	0,653	0,61	7,024
Raucher	0,523	2,215	0,193	25,426
Operationstechnik (Fusion und oder Dekompression)	0,998	168.427.526,9096456	,000	-

Tabelle 16: Ergebnisse der Regressionsanalyse zur Untersuchung weiterer Einflussfaktoren auf das Auftreten von Implantatversagen

5 Diskussion

5.1 Einführung

Die operative Behandlung von Läsionen am ZTÜ ist ein anspruchsvolles Gebiet in der Wirbelsäulenchirurgie. Die komplexe Anatomie, die Biomechanik, sowie eine Vielzahl möglicher Ätiologien, die häufig zu Instabilitäten führen, sind ursächlich dafür. Trotz der klinischen Relevanz besteht bislang kein Konsens über die optimale Therapie oder die Auswahl geeigneter Operationsstrategien. Die Vielfalt an Operationstechniken und Zugängen erhöht zusätzlich die Komplexität der chirurgischen Behandlung am ZTÜ.

Die aktuelle Studienlage zu diesem Thema ist begrenzt. In der Datenbank PubMed finden sich wenige Metaanalysen, die sich mit der Überbrückung des ZTÜ bei langstreckigen zervikalen Arthrodesen beschäftigen. Diese Arbeiten sind folglich nur eingeschränkt relevant für die aktuelle Forschungsfrage. Vorliegende randomisiert kontrollierte Studien (RCT) fokussieren sich in erster Linie auf konservative Behandlungsansätze oder biomechanische Laboruntersuchungen. Diese Punkte verweisen auf den hohen Forschungsbedarf hinsichtlich hochwertiger Studien mit höherer Evidenz.

Vor dem Hintergrund einer klinisch beobachteten erhöhten postoperativen Komplikationsrate nach Stabilisierungsverfahren am ZTÜ wurde in der vorliegenden retrospektiven Arbeit untersucht, wie sich postoperative Komplikationen, insbesondere Implantatversagen, in Abhängigkeit von diversen Pathologien und Operationstechniken darstellen. Das Ziel der Arbeit bestand in der Identifikation signifikanter Einflussfaktoren für Implantatversagen sowie der differenzierten Analyse potenzieller Korrelationen. Die Auswertung basierte grundlegend auf klinischen Daten von 93 Patienten, die zwischen 2010 und 2020 in der Neurochirurgischen Klinik der Universitätsmedizin Mainz operiert wurden. Die resultierenden Erkenntnisse aus der retrospektiven Analyse sollen im Folgenden diskutiert werden.

5.2 Methodik und Datenerhebung

Die vorliegende Arbeit basiert auf der retrospektiven Analyse von 93 Patientenfällen aus dem Zeitraum von 2010 bis 2020. Das Studiendesign orientiert sich am methodischen Aufbau vergleichbarer Studien (Huang et al., 2019, Hubertus et al., 2021). Randomisiert kontrollierte Studien (RCT) gelten zwar als Goldstandard, jedoch ist deren

Umsetzung im chirurgischen Kontext aufgrund ethischer und praktischer Aspekte schwer umsetzbar. Eine prospektive Datenerhebung war in diesem Fall nicht möglich. Dennoch ermöglicht der zehnjährige Beobachtungszeitraum die Analyse seltener Pathologien, insbesondere am ZTÜ. Die Fallzahl liegt, im Vergleich zu anderen Studien, mit 93 eingeschlossenen Patienten im oberen Bereich (Lenoir et al., 2006, Le et al., 2003, Ramieri et al., 2011, Placantonakis et al., 2008). Prospektive Studien zu Erkrankungen am ZTÜ sind selten. Die chirurgischen Therapiestrategien sind gegenwärtig nicht standardisiert und basieren in vielen Fällen auf Einzelfallentscheidungen und klinischen Erfahrungswerten.

5.3 Allgemeine Patientencharakteristika

5.3.1 Geschlechterverteilung und Alter

In der vorliegenden Patientenpopulation ($n = 93$) waren Männer ($n = 56$) häufiger vertreten als Frauen ($n = 37$). In anderen Studien überwiegt das männliche Geschlecht ebenfalls (Placantonakis et al., 2008, Goyal et al., 2019, MacLean et al., 2022). Des Weiteren berichten Publikationen von einem ungünstigen Outcome bei männlichen Patienten hinsichtlich der Komplikationsrate und dem Gesamtüberleben nach Wirbelsäuleneingriffen (MacLean et al., 2022). Mauvais-Jarvis et al., 2020 und Westergaard et al., 2019 betonen die wachsende wissenschaftliche Anerkennung von geschlechtsspezifischen Unterschieden in Diagnose, Prognose und Inzidenzen zwischen Männern und Frauen.

Das mediane Alter des Patientenkollektivs lag bei 67 Jahren, was die Bedeutung dieser Pathologien im höheren Lebensalter unterstreicht. Einerseits bedingt der demografische Wandel eine zunehmend alternde Bevölkerung, andererseits treten viele Erkrankungen erst im höheren Alter auf. Außerdem steigt mit zunehmendem Alter die Auftretenswahrscheinlichkeit für viele Erkrankungen. Wie bereits dargelegt, gewinnt die chirurgische Versorgung des ZTÜ zunehmend an Bedeutung, sodass angesichts des demografischen Wandels und der steigenden Lebenserwartung künftig mit einer Zunahme solcher Eingriffe zu rechnen ist.

5.4 Klinische Parameter

5.4.1 Neurologisches Outcome

In unserer Kohorte zeigten 88 % der Patienten präoperative neurologische Defizite. Diese hohe Rate neurologischer Folgeschäden entspricht den Beobachtungen von An et al. (1994). Die vaskuläre Versorgung des Spinalkanals ist im Bereich des ZTÜ aufgrund der segmentalen Gefäßgrenzen besonders vulnerabel. Zudem weist dieser Übergangsbereich einen besonders engen Spinalkanal auf. Die Kombination aus schmalem Spinalkanal und suboptimaler Gefäßversorgung könnte erklären, warum pathologische Veränderungen am ZTÜ häufig mit neurologischen Ausfällen einhergehen (An et al., 1994). Finkelstein et al., 2003 beschreiben eine 20 % höhere Mortalitätsrate bei Patienten mit präoperativen neurologischen Ausfällen (Finkelstein et al., 2003). In unserem Kollektiv kam es in 64 % der Fälle zu einer partiellen und in 9 % zu einer vollständigen Verbesserung des postoperativen neurologischen Outcomes infolge der chirurgischen Intervention. Auch Schaser et al. (2007) beschreiben vergleichbare Ergebnisse (Schaser et al., 2007). Die Bedeutung einer frühzeitigen operativen Versorgung wird durch eine aktuelle Metaanalyse von Sattari et al., (2024) unterstrichen. Diese zeigt, dass ein früher Operationszeitpunkt mit einer deutlichen Verbesserung der Motorik, einer geringeren Komplikationsrate sowie kürzeren Krankenhausaufenthalten einhergeht (Sattari et al., 2024). Da unsere retrospektiven Daten keine kausalen Aussagen liefern können, sind künftige prospektiven Analysen erforderlich, um diese Aspekte weiter zu untersuchen.

5.4.2 Andere prognostische Morbiditätsmarker

Der postoperative Mobilität wird eine hohe prognostische Relevanz für das Überleben zugeschrieben (Hirabayashi et al., 2003). In unserer Kohorte wurde der PFS zur Bewertung der postoperativen Mobilität herangezogen. Auch in anderen Studien mit vergleichbaren Patientenkollektiven wurde dieser Score eingesetzt (Ramieri et al., 2011). Unser Patientenkollektiv zeigte mit einem medianen KPS von 50 % und einem medianen ASA-Score von 3 ein deutlich erhöhtes präoperatives Morbiditätsprofil. Eine aktuelle Studie von Lenschow et al. (2024) stimmt mit unseren Beobachtungen überein und belegt den Zusammenhang zwischen einem erniedrigten KPS und einer erhöhten Komplikationsrate sowie einer schlechteren Gesamtprognose. Sie beschreiben außerdem einen Wert von 50 % im KPS als entscheidenden Cut-Off Wert für ein ungünstiges

Outcome (Lenschow et al., 2024). Ein ASA-Score von III oder IV wird in einer groß angelegten Kohortenstudie von Somani et al. (2017) in Übereinstimmung mit unseren Daten als Risikofaktor für postoperative Komplikationen und eine erhöhte Mortalität nach komplexen Wirbelsäuleneingriffen gewertet. In der Analyse stieg mit jedem ASA-Grad das Risiko hierfür signifikant an (Somani et al., 2017). Die erhobenen Befunde unterstreichen zum einen die erhebliche funktionelle Einschränkung unserer Patienten und zum anderen die Notwendigkeit der individualisierten Therapieplanung.

5.5 Pathologien am ZTÜ

Unsere Kohorte beinhaltete zu 44,3 % degenerative Fälle, zu 14 % infektiöse Fälle, zu 12,9 % traumatische Fälle und zu 25,8 % neoplastische Fälle. Dies verdeutlicht das vielseitige Spektrum an Pathologien auf, welche zu Instabilitäten am ZTÜ führen können. Viele Publikationen belegen die Relevanz verschiedenster Entitäten als Auslösefaktoren für Instabilität am ZTÜ (Goyal et al., 2019, An et al., 1994, Wang and Chou, 2007).

Hauptindikationen implizieren, dass es sich bei Indikationen um multifaktorielle Ursachen handeln und es keine alleinige Entscheidungsgrundlage für eine OP gibt. Diese Erkenntnis teilen auch andere Autoren in ihren Studien (Placantonakis et al., 2008). In mehr als einem Drittel der Fälle war Instabilität der Wirbelsäule die Hauptindikation für den chirurgischen Eingriff. Am häufigsten lag eine Kombination aus neurologischem Defizit und Instabilität der Wirbelsäule als Hauptindikation vor. Der Befund stimmt mit anderen Publikationen überein und unterstreicht die Relevanz einer stabilisierenden OP des ZTÜs im Falle einer Instabilität (Beeharry et al., 2021).

Die dorsale transpedikuläre Stabilisierung war die häufigste Operationsstrategie in unserer Kohorte, eine Beobachtung, die sich auch in der Literatur widerspiegelt (Große-Leege and Winker, 2001), und auch den ZTÜ betrifft. Die zweithäufigste Technik in unserem Patientenkollektiv war das kombiniert ventrodorsale Verfahren. Biomechanische und klinische Empfehlungen bewerten eine alleinige dorsale Stabilisierung bei komplexen Wirbelsäulenschäden als unzureichend (Beeharry et al., 2021, Wang and Chou, 2007), sodass in Übereinstimmung mit der Literatur bei komplexeren Läsionen ein Trend zu kombinierten ventrodorsalen Verfahren zu beobachten ist (Hubertus et al., 2021). Rein anteriore Verfahren kamen in unserer Kohorte nur selten (n=5) zum

Einsatz, vermutlich aufgrund einer höheren Komorbidität sowie der Komplexität der Läsionen. Wang et al. (2007) empfehlen den, bei geriatrischen Patienten mit höherer Morbidität verbundenen anterioren Zugangsweg, wenn möglich zu vermeiden.

In unserer Kohorte traten insgesamt 13 Fälle von Spondylodiszitis auf. In Übereinstimmung mit der Literatur war *Staphylococcus aureus* der am häufigsten nachgewiesene Erreger (Schimmer et al., 2002). Frühere Studien berichten von einer 80–98 %igen Wahrscheinlichkeit einer CRP-Erhöhung, die nicht zwingend mit einer Leukozytose einhergeht. Unsere Ergebnisse bestätigen diese Beobachtung: In 12 von 13 Fällen zeigte sich eine präoperative CRP-Erhöhung, während lediglich in 4 von 13 Fällen eine Leukozytose dokumentiert wurde.

Berichte über Spondylodiszitis am ZTÜ sind bislang selten. Motov et al. (2024) weisen darauf hin, dass zervikale Infektionen im Vergleich zu thorakolumbalen Verläufen mit einem höheren Risiko für schwerwiegende Krankheitsverläufe und persistierende neurologische Defizite einhergehen. Zudem wird von einer erhöhten Notwendigkeit chirurgischer Interventionen bei zervikalen Spondylodiszitiden ausgegangen (Motov et al., 2024). Die besondere Bedeutung einer frühzeitigen und präzisen Diagnosestellung für den Bereich des ZTÜ wird auch von anderen Autorinnen und Autoren hervorgehoben (Braun et al., 2023, Pingel, 2021).

Bezüglich der Operationsverfahren wird häufig ein primär ventraler Zugang gewählt, da die Infektion überwiegend die vordere Säule der Wirbelsäule betrifft. Zur definitiven Stabilisierung kommen jedoch in vielen Fällen kombinierte offene ventrodorsale Verfahren oder – in den letzten Jahren zunehmend – additive minimal-invasive Instrumentierungen zur Anwendung (Segbedji et al., 2025). Entsprechend der komplexen Läsionen fanden in Übereinstimmung mit der publizierten Literatur hauptsächlich posteriore oder kombinierte Verfahren im untersuchten Kollektiv Anwendung (Rutges et al., 2016).

Die posteriore Dekompression und Fusion gilt als eine der am häufigsten angewandten Techniken in der Wirbelsäulenchirurgie (Huang et al., 2019). In Übereinstimmung mit der Literatur ab drei benachbarten Wirbelsäulensegmenten auf ein stabileres Verfahren zurückzugreifen, fand in unserem degenerativen Kollektiv diese Technik die häufigste Anwendung, gefolgt von der kombinierten 360° Versorgung. Die Empfehlung gilt

auch wenn diese umfangreicher und damit mit einer erhöhten Morbidität verbunden sind (Meyer et al., 2008).

Auch Tumore des ZTÜ stellen eine wichtige Entität dar. In unserem Patientenkollektiv mit neoplastischen Veränderungen war das Adenokarzinom der Lunge die häufigste Primärentität. Coleman et al. (2020) beschreiben eine Häufung von ossären Metastasen bei dieser Tumorart, was sich in unserer Beobachtung zeigt. Nach der SINS-basierten Empfehlung wurden alle unsere Patienten mit instabilen neoplastischen Läsionen stabilisierend chirurgisch versorgt. Die Literaturdaten von Hubertus et al. (2021) bestätigen, dass instabile Tumorfrakturen die höchste Komplikationsrate zeigen und betonen die therapeutische Herausforderung, was auch unsere Daten unterstreichen (Hubertus et al., 2021, Coleman et al., 2020).

Traumatische HWS-verletzungen weisen die höchste Sterblichkeitsrate auf und wurden daher in unserer Analyse berücksichtigt. Rund 20 % der traumatischen Frakturen betreffen C7, was die besondere Bedeutung des ZTÜ in diesem Kontext verdeutlicht. In unserer Kohorte sind zwei Altersgipfel zu beobachten. Devivo, (2012) teilt diese Auffassung und beschreibt einen im jungen Erwachsenenalter und einen im höheren Alter (Devivo, 2012). Die Autoren berichten außerdem von einer zwei-bis dreifach erhöhten Inzidenz beim männlichen Geschlecht, was sich auch in unserem Kollektiv widerspiegelt. In unserer Kohorte waren 25 % der traumatischen Läsionen auf Verkehrsunfälle zurückzuführen. Diese Verteilung findet Konsens in der Literatur (Beeharry et al., 2021). Der Anteil der männlichen Patienten überwiegt in der Gruppe der Traumapatienten. Die Literatur erklärt die Geschlechterverteilung und den jüngeren Altersgipfel mit einer höheren Risikoexposition und riskanteren Verhaltensmustern (Singh et al., 2014). In Übereinstimmung einer großen Übersichtsarbeit von Verlaan et al. (2004) wurden bei hauptsächlich vorliegenden Typ B und C Frakturen primär dorsale oder ventrodorsale 360° Stabilisierungstechniken angewendet. Nur ein Patient, bei dem keine Hinterkantenbeteiligung vorlag, wurde von ventral versorgt. Nach Empfehlung der Autoren ist der anteriore Zugang hauptsächlich Typ A Frakturen vorbehalten (Verlaan et al., 2004). Bei keinem der Traumapatienten kam es zum postoperativen Implantatversagen. Mögliche Ursachen sind das jüngere Durchschnittsalter sowie damit einhergehend eine geringere Komorbiditätslast. Eine Arbeit von Lee et al. (2024) liefert ein passendes Profil mit jüngeren, weniger komorbiden Patienten als Niedrigrisikogruppe hinsichtlich Implantatversagen (Lee et al., 2024).

5.6 Schraubenarten

In unserem Kollektiv wurden an der subaxialen HWS bevorzugt Massa Lateralis-Schrauben verwendet. An C7 und in der BWS wurden regelhaft Pedikelschrauben implantiert. Bayoumi et al. (2018) gehen davon aus, dass Pedikelschrauben eine deutlich höhere biomechanische Stabilität sowie axiale Belastungsfähigkeit im Vergleich zu Massa Lateralis-Schrauben aufweisen. Gleichzeitig wird die Massa Lateralis an der HWS im kaudalen Bereich schmaler, sodass die Positionierung zunehmend erschwert ist. Der Wirbelkörper C7 birgt generell eine höhere Gefahr für Implantatversagen durch den geringeren knöchernen Halt. Zahlreiche Autoren favorisieren aus den genannten Gründen die konsequente Implantation von Pedikelschrauben auch im zervikalen Bereich, obwohl Pedikelschrauben das Risiko für Vertebralis- oder Nervenwurzelverletzungen bergen (Schmidt et al., 2003, Abumi et al., 2000). Das Risiko kann durch Verwendung von intraoperativen Navigationssystemen deutlich reduziert werden (Hubertus et al., 2021). Trotz des wissenschaftlichen Konsenses über die Überlegenheit von Pedikelschrauben im zervikalen Bereich werden Massa Lateralis-Schrauben im klinischen Alltag aus Gründen der Sicherheit, insbesondere bei fehlender Navigationstechnik, routinemäßig eingesetzt (Zhang et al., 2017).

In unserer Studie wurden insgesamt 318 Massa Lateralis-Schrauben implantiert. Hier-von wurden 72 mono- und 246 bikortikal verankert. Im Vergleich war die Lockerungsrate bei bikortikaler Platzierung geringer als bei monokortikaler Platzierung (4,8 % vs. 11 %). Laut Bayoumi et al. weist die bikortikale Platzierung den Vorteil der erhöhten Ausrissfestigkeit auf, wohingegen monokortikal eingebrachte Schrauben das Risiko einer möglichen Nervenwurzelverletzung minimieren. Die Annahme eines möglichen Stabilitätsvorteil der bikortikalen Verankerung wird in der Literatur kritisch diskutiert und konnte bislang nicht konsistent belegt werden. Faktoren wie Knochendichte, Schraubendesign und Zementaugmentation beeinflussen die Stabilität viel stärker, wie auch Hubertus et al. (2021) in ihrer Arbeit bestätigen. An dieser Stelle handelt es sich um deskriptive Daten. Daher sollten die Schlussfolgerungen mit Vorsicht gezogen werden (Bayoumi et al., 2018).

5.7 Postoperative Komplikationen

5.7.1 Allgemeines

Mit einer postoperativen Komplikationsrate von 31,2 % liegen unsere Werte im Bereich anderer Publikationen (Hubertus et al., 2021, Kennamer et al., 2019). Unsere Studie unterstreicht somit die Herausforderung und die Komplexität von chirurgischen Eingriffen am ZTÜ. Die Krankenhaussterblichkeit lag mit 10,8 % im oberen Bereich vergleichbarer Untersuchungen (Hubertus et al., 2021, Poorman et al., 2018). Dies unterstreicht die Vulnerabilität der Patienten und die Schwere der zugrunde liegenden Pathologien am ZTÜ. Die präoperative Morbiditätslast war bei einem medianen ASA-Score von III und einem medianen KPS von 50 % hoch und beeinflusste das postoperative Outcome negativ. Zudem erhöhte sie das Risiko für Infektionen und Wundheilungsstörungen. Auch präoperative neurologische Defizite gelten in der Literatur als unabhängiger Risikofaktor für eine erhöhte Komplikationsrate. Diese Risikofaktoren spiegeln sich in unserer hochbetagten Kohorte wider, die durch schwerwiegende Grunderkrankungen und bestehende neurologische Defizite gekennzeichnet war (Schaser et al., 2007).

5.7.2 Implantatversagen

5.7.2.1 *Relevante Vorerkrankungen und Risikofaktoren*

In der Literatur werden verschiedene Risikofaktoren und Vorerkrankungen, wie Rauchen oder Voroperationen, mit einem erhöhten Risiko für Implantatversagen am ZTÜ in Verbindung gebracht (Steinmetz et al., 2006). In unserer Kohorte waren 50 Personen (53,8 %) Nichtraucher, während 43 (46,2 %) aktive oder ehemalige Raucher waren. Deskriptiv zeigte sich bei Rauchern im Vergleich zu Nichtrauchern eine leicht erhöhte Rate von Implantatversagen (5 vs. 4 Fälle). In der binär logistischen Regression konnte jedoch kein signifikantes Ergebnis für einen Zusammenhang zwischen Rauchen und Implantatversagen nachgewiesen werden. Eine mögliche Erklärung hierfür ist die ungleiche Verteilung von Rauchern und Nichtrauchern, wodurch das Ergebnis potenziell verzerrt sein könnte. In unserem Kollektiv war die Mehrheit der Patienten nicht am ZTÜ voroperiert. Angesichts der ungleichen Gruppenverteilung konnte erwartungsgemäß ein signifikanter Zusammenhang zwischen Voroperation und Implantatversagen nicht festgestellt werden. Insbesondere Laminektomien ohne Instrumentierung werden als Risikofaktor für Implantatversagen in der Literatur beschrieben

(Okamoto et al., 2021). Insbesondere Osteoporose, Diabetes mellitus oder Morbus Bechterew werden in der Literatur als Risikofaktoren für das Auftreten von Implantatversagen beschrieben. In unseren Ergebnissen zeigte sich kein Unterschied in der Häufigkeit von Implantatversagen zwischen Patienten mit und ohne Vorerkrankungen (4 vs. 5 Fälle). Die kleine Fallzahl schränkt die Aussagekraft der Analyse erheblich ein. Patienten mit Vorerkrankungen wiesen ausschließlich degenerative Pathologien auf, während die andere Gruppe überwiegend Tumor- oder Spondylodiszitis Fälle umfasste. Diese Heterogenität erschwert die Zuordnung zwischen Implantatversagen und grundlegender Diagnose oder Vorerkrankung. Die Literatur geht davon aus, dass Tumorerkrankungen und Spondylodiszitiden, unabhängig von zusätzlichen Vorerkrankungen, mit einem erhöhten Risiko für Instabilität und Implantatversagen assoziiert sind (Steinmetz et al., 2006, Ramieri et al., 2011). Im Umkehrschluss erscheint ein erhöhter Einfluss von Vorerkrankungen speziell bei degenerativen Erkrankungen plausibel. Zur Überprüfung dieser Hypothesen sind größere Studien mit einer höheren Fallzahl erforderlich.

5.7.2.2 *Karnofsky Performance Score*

In der binär logistischen Regressionsanalyse war ein höherer KPS signifikant mit dem Auftreten von Implantatversagen assoziiert. Ein KPS ab 70 % entspricht einem guten präoperativen Allgemeinzustand, während ein KPS unter 70 % eine eingeschränkte Selbstständigkeit anzeigt. Patienten mit gutem Allgemeinzustand werden postoperativ in der Regel rascher und intensiver mobilisiert, wodurch eine stärkere mechanische Belastung auf spinale Implantate resultiert. Diese Beobachtungen stimmen mit Kumar et al. (2021) überein, die bei gesteigerter Mobilität eine erhöhte Implantatbelastung beschreiben. Zudem tolerieren Patienten mit einem präoperativ guten Gesundheitszustand komplexere und umfangreichere OPs besser, was die zusätzliche Belastung der Implantate mit erklären könnte. Die Literatur berichtet über komplexere und ausgehntere OPs bei fitteren Patienten, die mit einem gleichzeitig erhöhten Belastungsprofil von Implantaten und dem Risiko für frühes Implantatversagen einhergehen (Kumar et al., 2021).

5.7.2.3 Operative Verfahren

Die in der binär logistischen Regressionsanalyse berücksichtigte Operationstechnik war signifikant mit dem Auftreten von Implantatversagen assoziiert. Die Analyse zeigte insbesondere bei der zweizeitigen 360° Stabilisierung im Vergleich zur dorsalen Stabilisierung eine signifikant niedrigere Implantatversagensrate. Obwohl die posteriore Fixierung zwar als biomechanisch stabil gilt, empfehlen die Autoren den Einsatz kombinierter Verfahren bei komplexen instabilen Läsionen der Wirbelsäule (Beeharry et al., 2021, Hubertus et al., 2021, Wang and Chou, 2007, Ramieri et al., 2011). Le et al., (2003) verdeutlichen die höhere Revisionsrate bei rein anterioren Zugängen (Le et al., 2003). In unserer Untersuchung wurde in zwei von drei Fällen eine sekundäre dorsale Stabilisierung aufgrund von Implantatversagen erforderlich. Auch Steinmetz et al. (2006) bestätigen ein signifikant erhöhtes Risiko für Implantatversagen bei mehrstufigen anterioren Verfahren (Steinmetz et al., 2006). Bei kombiniert ventrodorsalen Stabilisierungsoperationen trat in dieser Studie hingegen kein Implantatversagen auf und die Autoren betonen den stabilisierenden Effekt einer zusätzlichen Instrumentierung. Unsere Befunde zeigen deutlich: Während bei rein dorsaler Stabilisierung in sechs Fällen (66,6 %) ein Implantatversagen beobachtet wurde, trat dieses bei der 360° Stabilisierung nur in drei Fällen (33,3 %) auf. Somit unterstreichen unsere Ergebnisse die von den Autoren beschriebenen Vorteile von kombinierten Stabilisierungsverfahren im Hinblick auf Implantatversagen.

5.7.2.4 Operationsdauer

In unserer Untersuchung wurde ein signifikanter Zusammenhang zwischen längerer Operationsdauer (Schnitt-Naht-Zeit in Minuten) und einem revisionsbedürftigen Implantatversagen beobachtet. Auch in der Literatur wird die Operationsdauer als unabhängiger Risikofaktor für Implantatversagen beschrieben (Okamoto et al., 2021, Hubertus et al., 2021). In anderen Arbeiten wird die Operationsdauer hingegen in Verbindung mit einem höheren Blutverlust und einem daraus resultierenden Risiko für Wundinfektionen gebracht (Huang et al., 2019). In unserer Regressionsanalyse waren weder Wundinfektionen noch Blutverluste signifikant mit Implantatversagen assoziiert. Für den Parameter Blutverlust war eine Auswertung aufgrund fehlender Daten nicht möglich.

5.8 Limitationen und Stärken der Studie

In der vorliegenden monozentrischen Studie ist die Aussagekraft der Ergebnisse durch teilweise unvollständige oder fehlende Daten eingeschränkt, beispielsweise wenn studienrelevante Informationen in den klinischen Dokumentationen nicht vollständig erfasst wurden. Dies betraf vor allem perioperative Angaben bei Notfalloperationen oder Behandlungen in anderen Kliniken, wodurch prä- oder postoperative Parameter wie neurologischer Status oder Mobilität nicht in allen Fällen lückenlos dokumentiert wurden.

Die monozentrische Datenerhebung an einer universitären Einrichtung spiegelt die spezifischen chirurgischen Strategien und Ressourcen dieses Zentrums wider, sodass die Generalisierbarkeit auf andere Versorgungskontexte, insbesondere Kliniken ohne spezialisierte Wirbelsäulenchirurgie, nur eingeschränkt möglich ist. Die chirurgische Entscheidungsfindung variierte zwischen den Operateuren und wurde individuell an den Patienten angepasst, was zu Unterschieden in der Wahl der Operationsstrategie führte, und die Vergleichbarkeit einschränkt.

Zudem war die Fallzahl insgesamt sowie in relevanten Subgruppen (z. B. Implantatversagen oder einzelne Pathologien) relativ klein, wodurch die statistische Aussagekraft insbesondere für seltene Ereignisse wie Implantatlockerungen begrenzt ist. Potenziell einflussreiche Faktoren wie Knochenqualität (z. B. Osteoporosegrad), genaue Implantatdetails oder der Einsatz von Navigation wurden nicht systematisch erfasst, obwohl sie teilweise klinisch angewendet wurden. Auch ein standardisiertes Langzeit-Follow-up fehlte in vielen Fällen, sodass Aussagen zu Spätkomplikationen oder zur langfristigen Stabilität der Implantate nur eingeschränkt möglich sind.

Die retrospektive Erhebung von Scores und Klassifikationen (z. B. ASIA-Score, ASA-Klassifikation) unterlag einer gewissen Inter-Observer-Variabilität, da sie durch unterschiedliche Untersucher dokumentiert oder im Nachhinein rekonstruiert wurden. Schließlich könnten technologische Entwicklungen und veränderte operative Techniken über den langen Beobachtungszeitraum von 2010 bis 2020 die Ergebnisse beeinflusst haben.

Trotz dieser Einschränkungen liefert die Arbeit wichtige Hinweise auf Risikofaktoren für Komplikationen und Implantatversagen bei OPs am ZTÜ, die als Grundlage für weiterführende prospektive, multizentrische Studien genutzt werden können.

6 Ausblick

Die vorliegende Arbeit beleuchtet die komplexen Herausforderungen, die mit der chirurgischen Stabilisierung instabiler Läsionen am ZTÜ verbunden sind, und liefert wesentliche Erkenntnisse zur Optimierung der operativen Entscheidungsfindung. Gleichwohl bleiben zahlreiche Fragestellungen unbeantwortet, die Gegenstand zukünftiger Forschung sein sollten. Prospektive, multizentrische Studien mit größeren Kohorten erscheinen dringend erforderlich, um die in unserer Untersuchung identifizierten Risikofaktoren für Komplikationen und Implantatversagen differenzierter zu validieren und evidenzbasierte Leitlinien für die optimale chirurgische Strategie zu entwickeln.

Besonderes Augenmerk sollten künftige Arbeiten auf die Analyse kombinierter ventrodorsaler Verfahren richten, die in unserer Kohorte mit einer signifikant niedrigeren Rate an Implantatversagen assoziiert waren. Ferner ist eine vertiefte Untersuchung des Einflusses innovativer Techniken, wie minimal-invasiver dorsaler Instrumentierungen, neuartiger Implantatdesigns sowie präziser intraoperativer Navigationssysteme, auf das klinische und funktionelle Outcome wünschenswert. Diese Entwicklungen bergen das Potenzial, die chirurgische Morbidität zu reduzieren und gleichzeitig die biomechanische Stabilität der Konstruktionen zu verbessern.

Zudem sollte der Fokus zukünftiger Studien auf der Erhebung langfristiger funktioneller Ergebnisse und der gesundheitsbezogenen Lebensqualität liegen, um die Nachhaltigkeit der verschiedenen Stabilisierungsverfahren fundiert beurteilen zu können. Eine standardisierte prä- und postoperative Erfassung klinischer Scores sowie eine strukturierte und langfristige Nachbeobachtung könnten darüber hinaus die Vergleichbarkeit zukünftiger Arbeiten erhöhen und eine Grundlage für konsentiertere klinische Behandlungspfade schaffen.

Die hier gewonnenen Erkenntnisse bieten somit nicht nur einen wertvollen Beitrag zur aktuellen Literatur, sondern stellen zugleich eine wesentliche Grundlage für die Weiterentwicklung spezialisierter und differenzierter Therapiekonzepte zur Versorgung komplexer Pathologien am ZTÜ dar.

7 Zusammenfassung

Instabile Läsionen am ZTÜ stellen aufgrund der komplexen Anatomie und Biomechanik dieser Region eine besondere Herausforderung in der Wirbelsäulenchirurgie dar. Trotz ihrer seltenen Inzidenz gehen diese Läsionen mit einer hohen Morbidität, Mortalität und einem erheblichen Risiko neurologischer Funktionsverluste einher, was ihre klinische Relevanz unterstreicht.

Ziel dieser Arbeit war es, anhand einer monozentrischen retrospektiven Analyse von 93 Patienten einen umfassenden Überblick über die zugrunde liegenden Pathologien, angewandten Operationsverfahren sowie das Auftreten allgemeiner und implantat-assoziierten Komplikationen zu geben. Besonders untersucht wurde der Einfluss verschiedener Faktoren auf das Risiko eines Implantatversagens.

Die Ergebnisse zeigen eine hohe Gesamtkomplikationsrate von über 30 % sowie eine signifikante Assoziation zwischen Implantatversagen und Operationsstrategie: Die zweizeitige 360°-Stabilisierung war mit einer deutlich geringeren Rate an Implantatversagen verbunden als die alleinige dorsale oder ventrale Stabilisierung. Zudem konnte ein signifikanter Zusammenhang zwischen längerer Operationsdauer und einem erhöhten Risiko für Implantatversagen festgestellt werden. Diese Befunde betonen die Bedeutung einer sorgfältigen Patienten- und Operationsplanung sowie den potenziellen Vorteil kombinierter Verfahren.

Die Analyse bestätigt die Notwendigkeit individualisierter Therapieentscheidungen, die sich an der Art und Morphologie der Läsion, der biomechanischen Stabilität und der Expertise des Operateurs orientieren sollten.

Die Limitationen der Arbeit, insbesondere das retrospektive Design, die monozentrische Datenerhebung und die heterogene Patientenpopulation, schränken die Generalisierbarkeit der Ergebnisse ein. Dennoch liefert die Studie wertvolle Hinweise für zukünftige Behandlungsstrategien bei ZTÜ-Läsionen.

Vor diesem Hintergrund wird die Durchführung prospektiver, multizentrischer Studien mit größeren Fallzahlen empfohlen, um die hier gewonnenen Erkenntnisse zu validieren und die Entwicklung innovativer, auch minimal-invasiver Stabilisierungsverfahren

voranzutreiben. Nur so lässt sich die Evidenzlage nachhaltig verbessern und die Versorgung dieser anspruchsvollen Patientengruppe optimieren.

Zur optimalen Versorgung dieses komplexen Patientenkollektives ist die individualisierte Therapieplanung in Kombination mit einer interdisziplinären Zusammenarbeit zwischen den Fachbereichen Neurochirurgie, Orthopädie und Onkologie unerlässlich. Die Ergebnisse dieser Dissertation sollen diese Aspekte verdeutlichen.

8 Literaturverzeichnis

- ABUMI, K., SHONO, Y., ITO, M., TANEICHI, H., KOTANI, Y. & KANEDA, K. 2000. Complications of pedicle screw fixation in reconstructive surgery of the cervical spine. *Spine (Phila Pa 1976)*, 25, 962-9.
- AN, H. S., VACCARO, A., COTLER, J. M. & LIN, S. 1994. Spinal disorders at the cervicothoracic junction. *Spine (Phila Pa 1976)*, 19, 2557-64.
- BAYOUMI, A. B., EFE, I. E., BERK, S., KASPER, E. M., TOKTAS, Z. O. & KONYA, D. 2018. Posterior Rigid Instrumentation of C7: Surgical Considerations and Biomechanics at the Cervicothoracic Junction. A Review of the Literature. *World Neurosurg*, 111, 216-226.
- BEEHARRY, M. W., MOQEEM, K. & ROHILLA, M. U. 2021. Management of Cervical Spine Fractures: A Literature Review. *Cureus*, 13, e14418.
- BRAUN, S., DIAREMES, P., SCHÖNNAGEL, L., CAFFARD, T., BRENNEIS, M. & MEURER, A. 2023. [Spondylodiscitis]. *Orthopädie (Heidelb)*, 52, 677-690.
- COLEMAN, R. E., CROUCHER, P. I., PADHANI, A. R., CLÉZARDIN, P., CHOW, E., FALLON, M., GUISE, T., COLANGELI, S., CAPANNA, R. & COSTA, L. 2020. Bone metastases. *Nat Rev Dis Primers*, 6, 83.
- DAVIS, R. A. 1996. A long-term outcome study of 170 surgically treated patients with compressive cervical radiculopathy. *Surg Neurol*, 46, 523-30; discussion 530-3.
- DEVIVO, M. J. 2012. Epidemiology of traumatic spinal cord injury: trends and future implications. *Spinal Cord*, 50, 365-72.
- EICKER, S. & MOHME, M. 2022. Operative Therapie spinaler Metastasen. *Der Onkologe*, 28, 371-380.
- FINKELSTEIN, J. A., ZAVERI, G., WAI, E., VIDMAR, M., KREDER, H. & CHOW, E. 2003. A population-based study of surgery for spinal metastases. Survival rates and complications. *J Bone Joint Surg Br*, 85, 1045-50.
- FOUNTAS, K. N., KAPSALAKI, E. Z., NIKOLAKAKOS, L. G., SMISSON, H. F., JOHNSTON, K. W., GRIGORIAN, A. A., LEE, G. P. & ROBINSON, J. S., JR. 2007. Anterior cervical discectomy and fusion associated complications. *Spine (Phila Pa 1976)*, 32, 2310-7.
- GELALIS, I. D., PASCHOS, N. K., PAKOS, E. E., POLITIS, A. N., ARNAOUTOGLU, C. M., KARAGEORGOS, A. C., PLOUMIS, A. & XENAKIS, T. A. 2012. Accuracy of pedicle screw placement: a systematic review of prospective in vivo studies comparing free hand, fluoroscopy guidance and navigation techniques. *Eur Spine J*, 21, 247-55.
- GOYAL, A., AKHRAS, A., WAHOOD, W., ALVI, M. A., NASSR, A. & BYDON, M. 2019. Should Multilevel Posterior Cervical Fusions Involving C7 Cross the Cervicothoracic Junction? A Systematic Review and Meta-Analysis. *World Neurosurg*, 127, 588-595.e5.
- GROSS-LEEGER, H. & WINKER, K. H. 2001. Operative Behandlung von Wirbelfrakturen-dorsale Instrumentierung. *OP-Journal*, 17, 156-160.
- GUPTA, A., TALY, A. B., SRIVASTAVA, A. & MURALI, T. 2009. Non-traumatic spinal cord lesions: epidemiology, complications, neurological and functional outcome of rehabilitation. *Spinal Cord*, 47, 307-11.
- HERREN, C., VON DER HOEH, N., DREIMANN, M., BOSTELMANN, R., BOTH, A., HENES, F., HUBBE, J. N., KOBBE, P., KORGE, A. & KÜHNE, C. 2020. Diagnostik und Therapie der Spondylodiszitis–S2k-Leitlinie. :.
- HERREN, C. & VON DER HÖH, N. 2021. Zusammenfassung der S2K-Leitlinie „Diagnostik und Therapie der Spondylodiszitis“ (Stand 08/2020). *Die Wirbelsäule*, 5, 18-20.
- HIRABAYASHI, H., EBARA, S., KINOSHITA, T., YUZAWA, Y., NAKAMURA, I., TAKAHASHI, J., KAMIMURA, M., OHTSUKA, K. & TAKAOKA, K. 2003. Clinical outcome and survival after palliative surgery for spinal metastases: palliative surgery in spinal metastases. *Cancer*, 97, 476-84.

- HOLCK, P. 2010. [Anatomy of the cervical spine]. *Tidsskr Nor Laegeforen*, 130, 29-32.
- HORVATH, B., KLOESEL, B., TODD, M. M., COLE, D. J. & PRIELIPP, R. C. 2021. The Evolution, Current Value, and Future of the American Society of Anesthesiologists Physical Status Classification System. *Anesthesiology*, 135, 904-919.
- HUANG, K. T., HARARY, M., ABD-EL-BARR, M. M. & CHI, J. H. 2019. Crossing the Cervicothoracic Junction in Posterior Cervical Decompression and Fusion: A Cohort Analysis. *World Neurosurg*, 131, e514-e520.
- HUBERTUS, V., GEMPT, J., MARIÑO, M., SOMMER, B., EICKER, S. O., STANGENBERG, M., DREIMANN, M., JANSSEN, I., WIPPLINGER, C., WAGNER, A., LANGE, N., JÖRGER, A. K., CZABANKA, M., ROHDE, V., SCHALLER, K., THOMÉ, C., VAJKOCZY, P., ONKEN, J. S. & MEYER, B. 2021. Surgical management of spinal metastases involving the cervicothoracic junction: results of a multicenter, European observational study. *Neurosurg Focus*, 50, E7.
- KATHMANN, W. 2019. Wirbelsäulenmetastasen—was zu beachten ist. *Orthopädie & Rheuma*, 22, 20-20.
- KENNAMER, B. T., ARGINTEANU, M. S., MOORE, F. M., STEINBERGER, A. A., YAO, K. C. & GOLOGORSKY, Y. 2019. Complications of Poor Cervical Alignment in Patients Undergoing Posterior Cervicothoracic Laminectomy and Fusion. *World Neurosurg*, 122, e408-e414.
- KERIC, N. & KRENZLIN, V. 2021. Frailty Indices. Mainz: Neurochirurgische Klinik und Poliklinik, Universitätsmedizin Mainz.
- KRAMER, A., THAVARAJASINGAM, S. G., NEUHOF, J., PONNIAH, H. S., RAMSAY, D. S. C., DEMETRIADES, A. K., DAVIES, B. M., SHIBAN, E. & RINGEL, F. 2023. Epidemiological trends of pyogenic spondylodiscitis in Germany: an EANS Spine Section Study. *Sci Rep*, 13, 20225.
- KUMAR, N., PATEL, R., TAN, J. H., SONG, J., PANDITA, N., HEY, D. H. W., LAU, L. L., LIU, G., THAMBIAH, J. & WONG, H. K. 2021. Symptomatic Construct Failure after Metastatic Spine Tumor Surgery. *Asian Spine J*, 15, 481-490.
- KUSHCHAYEV, S. V., GLUSHKO, T., JARRAYA, M., SCHULERI, K. H., PREUL, M. C., BROOKS, M. L. & TEYTELBOYM, O. M. 2018. ABCs of the degenerative spine. *Insights Imaging*, 9, 253-274.
- LE, H., BALABHADRA, R., PARK, J. & KIM, D. 2003. Surgical treatment of tumors involving the cervicothoracic junction. *Neurosurg Focus*, 15, E3.
- LEE, H. D., CHUNG, N. S., LEE, J. Y. & CHUNG, H. W. 2024. Risk factors for Implant Failure in Thoracolumbar Fractures Treated with Posterior Long-Segment Instrumentation. *Clin Orthop Surg*, 16, 863-870.
- LEITLINIENKOMMISSION DER DEUTSCHEN GESELLSCHAFT FÜR UNFALLCHIRURGIE E.V. (DGU) 2017. *Verletzungen der sububaxialen HWS, Letztes Bearbeitungsdatum: 15.12.2017*.
- LENOIR, T., HOFFMANN, E., THEVENIN-LEMOINE, C., LAVELLE, G., RILLARDON, L. & GUIGUI, P. 2006. Neurological and functional outcome after unstable cervicothoracic junction injury treated by posterior reduction and synthesis. *Spine J*, 6, 507-13.
- LENSCHOW, M., LENZ, M., TELENTSCHAK, S., VON SPRECKELSEN, N., SIRCAR, K., OIKONOMIDIS, S., KERNICH, N., WALTER, S. G., KNÖLL, P., PERRECH, M., GOLDBRUNNER, R., EYSEL, P. & NEUSCHMELTING, V. 2024. Preoperative Performance Status Threshold for Favorable Surgical Outcome in Metastatic Spine Disease. *Neurosurgery*, 95, 770-778.
- MACLEAN, M. A., TOUCHETTE, C. J., GEORGIOPOULOS, M., BRUNETTE-CLÉMENT, T., ABDULJABBAR, F. H., AMES, C. P., BETTEGOWDA, C., CHAREST-MORIN, R., DEA, N., FEHLINGS, M. G., GOKASLAN, Z. L., GOODWIN, C. R., LAUFER, I., NETZER, C., RHINES, L. D., SAHGAL, A., SHIN, J. H., SCIUBBA, D. M., STEPHENS, B. F., FOURNEY, D. R. & WEBER, M. H. 2022. Systemic considerations for the surgical treatment of spinal metastatic disease: a scoping literature review. *Lancet Oncol*, 23, e321-e333.
- MANSFIELD, M., SMITH, T., SPAHR, N. & THACKER, M. 2020. Cervical spine radiculopathy epidemiology: A systematic review. *Musculoskeletal Care*, 18, 555-567.

- MEYER, F., BÖRM, W. & THOMÉ, C. 2008. Degenerative cervical spinal stenosis: current strategies in diagnosis and treatment. *Dtsch Arztebl Int*, 105, 366-72.
- MOTOV, S., STEMMER, B., KRAUSS, P., BONK, M. N., WOLFERT, C., STEININGER, K., SHIBAN, E. & SOMMER, B. 2024. Clinical and surgical outcome in patients with cervical spondylodiscitis-a single-center retrospective case series of 24 patients. *Front Surg*, 11, 1292977.
- NEUHOF, J., KRAMER, A., THAVARAJASINGAM, S. G., SUTHERLAND, R. K., MCCAUGHAN, H., JOERGER, A. K., WOSTRACK, M., LYELL, B., BERKULIAN, O., PONNIAH, H. S., RAMSAY, D. S. C., MEYER, B., KANDZIORA, F., SHIBAN, E., DAVIES, B., DEMETRIADES, A. K. & RINGEL, F. 2024. Comparing Conservative and Early Surgical Treatments for Pyogenic Spondylodiskitis: An International Propensity Score-Matched Retrospective Outcome Analysis. *Neurosurgery*, 96, 1008-22.
- NOURI, A., TETREAULT, L., SINGH, A., KARADIMAS, S. K. & FEHLINGS, M. G. 2015. Degenerative Cervical Myelopathy: Epidemiology, Genetics, and Pathogenesis. *Spine (Phila Pa 1976)*, 40, E675-93.
- OKAMOTO, N., KATO, S., DOI, T., MATSUBAYASHI, Y., TANIGUCHI, Y., YOSHIDA, Y., KAWAMURA, N., NAKARAI, H., HIGASHIKAWA, A., TOZAWA, K., TAKESHITA, Y., YU, J., HARA, N., SASAKI, K., AZUMA, S., TANAKA, S. & OSHIMA, Y. 2021. Relative Risks and Benefits of Crossing the Cervicothoracic Junction During Multilevel Posterior Cervical Fusion: A Multicenter Cohort. *World Neurosurg*, 153, e265-e274.
- ÖZKAN, N., WREDE, K., ARDESHIRI, A., HAGEL, V., DAMMANN, P., RINGELSTEIN, A., SURE, U. & SANDALCIOGLU, I. E. 2014. Cervical spondylodiscitis--a clinical analysis of surgically treated patients and review of the literature. *Clin Neurol Neurosurg*, 117, 86-92.
- PINGEL, A. 2021. Spondylodiszitis. *Zeitschrift für Orthopädie und Unfallchirurgie*, 159, 687-703.
- PLACANTONAKIS, D. G., LAUFER, I., WANG, J. C., BERIA, J. S., BOLAND, P. & BILSKY, M. 2008. Posterior stabilization strategies following resection of cervicothoracic junction tumors: review of 90 consecutive cases. *J Neurosurg Spine*, 9, 111-9.
- POORMAN, G. W., MOON, J. Y., HORN, S. R., JALAI, C., ZHOU, P. L., BONO, O. & PASSIAS, P. G. 2018. Rates of Mortality in Cervical Spine Surgical Procedures and Factors Associated With Its Occurrence Over a 10-Year Period: A Study of 342 477 Patients on the Nationwide Inpatient Sample. *Int J Spine Surg*, 12, 276-284.
- RAMIERI, A., DOMENICUCCI, M., CIAPPETTA, P., CELLOCCO, P., RACO, A. & COSTANZO, G. 2011. Spine surgery in neurological lesions of the cervicothoracic junction: multicentric experience on 33 consecutive cases. *Eur Spine J*, 20 Suppl 1, S13-9.
- REINHOLD, M., EICKER, S.-O., SCHLEICHER, P. & SCHMIDT, O. I. 2017. Wirbelsäule kompakt : Der DWG-Pocketguide Griffbereit. Stuttgart.
- ROBERTS, T. T., LEONARD, G. R. & CEPELA, D. J. 2017. Classifications In Brief: American Spinal Injury Association (ASIA) Impairment Scale. *Clin Orthop Relat Res*, 475, 1499-1504.
- RUTGES, J. P., KEMPEN, D. H., VAN DIJK, M. & ONER, F. C. 2016. Outcome of conservative and surgical treatment of pyogenic spondylodiscitis: a systematic literature review. *Eur Spine J*, 25, 983-99.
- SATTARI, S. A., ANTAR, A., THEODORE, J. N., HERSH, A. M., AL-MISTAREHI, A. H., DAVIDAR, A. D., WEBER-LEVINE, C., AZAD, T. D., YANG, W., FEGHALI, J., XU, R., MANBACHI, A., LUBELSKI, D., BETTEGOWDA, C., CHANG, L., WITHAM, T., BELZBERG, A. & THEODORE, N. 2024. Early versus late surgical decompression for patients with acute traumatic central cord syndrome: a systematic review and meta-analysis. *Spine J*, 24, 435-445.
- SCHASER, K. D., MELCHER, I., MITTLMEIER, T., SCHULZ, A., SEEMANN, J. H., HAAS, N. P. & DISCH, A. C. 2007. [Surgical management of vertebral column metastatic disease]. *Unfallchirurg*, 110, 137-59; quiz 160-1.
- SCHIMMER, R. C., JEANNERET, C., NUNLEY, P. D. & JEANNERET, B. 2002. Osteomyelitis of the cervical spine: a potentially dramatic disease. *J Spinal Disord Tech*, 15, 110-7.

- SCHLEICHER, P., SCHOLZ, M., CASTEIN, J. & KANDZIORA, F. 2020. Leitliniengerechte Diagnostik bei Verletzungen der subaxialen Halswirbelsäule. *Der Unfallchirurg*, 123, 641-652.
- SCHMIDT, R., WILKE, H. J., CLAES, L., PUHL, W. & RICHTER, M. 2003. Pedicle screws enhance primary stability in multilevel cervical corpectomies: biomechanical in vitro comparison of different implants including constrained and nonconstrained posterior instrumentations. *Spine (Phila Pa 1976)*, 28, 1821-8.
- SCHOLZ, M., PINGEL, A., SCHLEICHER, P. & KANDZIORA, F. 2018. Verletzungen der Halswirbelsäule: ventrale Spondylodesetechniken. *OP-Journal*, 34, 138-150.
- SCHOLZ, M., SCHLEICHER, P. & KANDZIORA, F. 2015. Verletzungen der subaxialen Halswirbelsäule. *Orthopädie und Unfallchirurgie up2date*, 10, 429-450.
- SCHÜNKE, M., SCHULTE, E., SCHUMACHER, U., VOLL, M. & WESKER, K. 2018. *Prometheus : LernAtlas der Anatomie*, Stuttgart u.a., Georg Thieme Verlag.
- SEGBEDJI, F. K. K., MALLEREAU, C. H., DANNHOFF, G., DEMBOUR, V., CEBULA, H., GANAU, M., TODESCHI, J., CERASE, A., MUZII, V. F., ZALAFFI, A., CARANGELO, B. R., MORUZZI, F., SPATOLA, G., ZAED, I., CARDIA, A., ROMANO, A., CASTELLANI, P., TARANTINO, F. & CHIBBARO, S. 2025. Minimally invasive management of cervical spondylodiscitis. A multicenter experience. *Neurosurg Rev*, 48, 29.
- SINGH, A., TETREAULT, L., KALSI-RYAN, S., NOURI, A. & FEHLINGS, M. G. 2014. Global prevalence and incidence of traumatic spinal cord injury. *Clin Epidemiol*, 6, 309-31.
- SOMANI, S., CAPUA, J. D., KIM, J. S., PHAN, K., LEE, N. J., KOTHARI, P., KIM, J. H., DOWDELL, J. & CHO, S. K. 2017. ASA Classification as a Risk Stratification Tool in Adult Spinal Deformity Surgery: A Study of 5805 Patients. *Global Spine J*, 7, 719-726.
- STEINMETZ, M. P., MILLER, J., WARBEL, A., KRISHNANEY, A. A., BINGAMAN, W. & BENZEL, E. C. 2006. Regional instability following cervicothoracic junction surgery. *J Neurosurg Spine*, 4, 278-84.
- THEODORE, N. 2020. Degenerative Cervical Spondylosis. *N Engl J Med*, 383, 159-168.
- VACCARO, A. R., KOERNER, J. D., RADCLIFF, K. E., ONER, F. C., REINHOLD, M., SCHNAKE, K. J., KANDZIORA, F., FEHLINGS, M. G., DVORAK, M. F., AARABI, B., RAJASEKARAN, S., SCHROEDER, G. D., KEPLER, C. K. & VIALLE, L. R. 2016. AOSpine subaxial cervical spine injury classification system. *Eur Spine J*, 25, 2173-84.
- VERLAAN, J. J., DIEKERHOF, C. H., BUSKENS, E., VAN DER TWEEL, I., VERBOUT, A. J., DHERT, W. J. & ONER, F. C. 2004. Surgical treatment of traumatic fractures of the thoracic and lumbar spine: a systematic review of the literature on techniques, complications, and outcome. *Spine (Phila Pa 1976)*, 29, 803-14.
- WANG, V. Y. & CHOU, D. 2007. The cervicothoracic junction. *Neurosurg Clin N Am*, 18, 365-71.
- ZHANG, C., ZHOU, Q. & ARNOLD, P. M. 2017. Safety and efficacy of lateral mass screws at C7 in the treatment of cervical degenerative disease. *Surg Neurol Int*, 8, 218.

9 Anhang

9.1 Prolo Functional Score

Ökonomischer Status	Beschreibung
E1	Vollständige Invalidität
E2	Keine Erwerbstätigkeit möglich, einschließlich der Fähigkeit Hausarbeit, Schule, oder Ruhestandsaktivitäten zu verrichten
E3	Arbeitsfähig, aber nicht im bisherigen Beruf: fähig Hausarbeit, Schule und Ruhestandsaktivitäten zu verrichten
E4	Arbeit im bisherigen Beruf in Teilzeit oder mit eingeschränktem Status möglich
E5	In der Lage im bisherigen Beruf ohne Einschränkungen zu arbeiten
Funktioneller Status	
F1	vollständige Invalidität schlechter als vor der OP
F2	Anhaltende Nacken- und Armschmerzen, anhaltende Parästhesien, motorische Schwäche wie vor der OP (in der Lage, Aufgaben des täglichen Lebens auszuführen)
F3	Mäßige Nacken- und Armschmerzen, anhaltende Parästhesien, minimale motorische Schwäche
F4	Keine Nacken- und Armschmerzen, minimale Parästhesien in den Fingern, keine motorische Schwäche
F5	Keine Nacken- und Armschmerzen, keine Parästhesien, keine motorische Schwäche, vollständigen Genesung, in der Lage frühere sportliche Aktivitäten auszuüben

Tabelle 17: Prolo Functional Score für postoperative zervikale Radikulopathie in Anlehnung an (Davis, 1996)

9.2 Karnofsky Performance Score

100 %	Normalzustand, keine Beschwerden, keine manifeste Erkrankung
90 %	Normale Leistungsfähigkeit, minimale Krankheitssymptome
80 %	Normale Leistungsfähigkeit mit Anstrengung, geringe Krankheits-symptome
70 %	Eingeschränkte Leistungsfähigkeit, arbeitsunfähig, kann sich selbst versorgen
60 %	Eingeschränkte Leistungsfähigkeit, benötigt gelegentlich fremde Hilfe
50 %	Eingeschränkte Leistungsfähigkeit, braucht krankenschwägerische und ärztliche Betreuung, nicht dauernd bettlägerig
40 %	Bettlägerig, spezielle Pflege erforderlich
30 %	Schwer krank, Krankenhauspflege notwendig
20 %	Schwer krank, Krankenhauspflege Maßnahmen erforderlich
10 %	Moribund, Krankheit schreitet schnell fort
0 %	Tod

Tabelle 18: Karnofsky Index in Anlehnung an (Keric and Krenzlin, 2021)

9.3 American Society of Anesthesiologists classification

ASA I	Normal, gesund, ohne Vorerkrankungen
ASA II	Leichte systemische Erkrankung ohne wesentliche funktionelle Einschränkung z.B. Nikotinabusus, Schwangerschaft, arterielle Hypertonie, gut eingestellter Diabetes Mellitus
ASA III	Schwere systemische Erkrankung mit funktioneller Einschränkung z.B. COPD, BMI >40, Herzschrittmacher
ASA IV	Schwere systemische Erkrankung, die eine ständige Bedrohung für das Leben darstellen z.B. Sepsis, schweres Vitium, ARDS
ASA V	Sterbender Patient, kein Überleben ohne OP erwartbar z.B. massives Trauma, ICB mit Massenwirkung
ASA VI	Hirntod, zur Organentnahme für Spenderzwecke

Tabelle 19: ASA-Klassifikation in Anlehnung an (Horvath et al., 2021)

9.4 American Spinal Injury Association Classification

A	Komplett: keine sensible oder motorische Funktion ist enthalten
B	Inkomplett: sensible, aber keine motorische Funktion unterhalb des neurologischen Niveaus enthalten
C	Inkomplett: motorische Funktion ist unterhalb des neurologischen Niveaus erhalten und die Mehrzahl der Kennmuskeln unterhalb des neurologischen Niveaus haben einen Muskelkraftgrad von kleiner als 3
D	Inkomplett: motorische Funktion ist unterhalb des Schädigungsniveaus erhalten und die Mehrzahl der Kennmuskeln unterhalb des neurologischen Niveaus haben einen Muskelkraftgrad von größer oder gleich 3
E	Normal: Sensible und motorische Funktion ist normal

Tabelle 20: ASIA Score In Anlehnung an (Roberts et al., 2017)

9.5 Boxplot zu Wundinfektionen

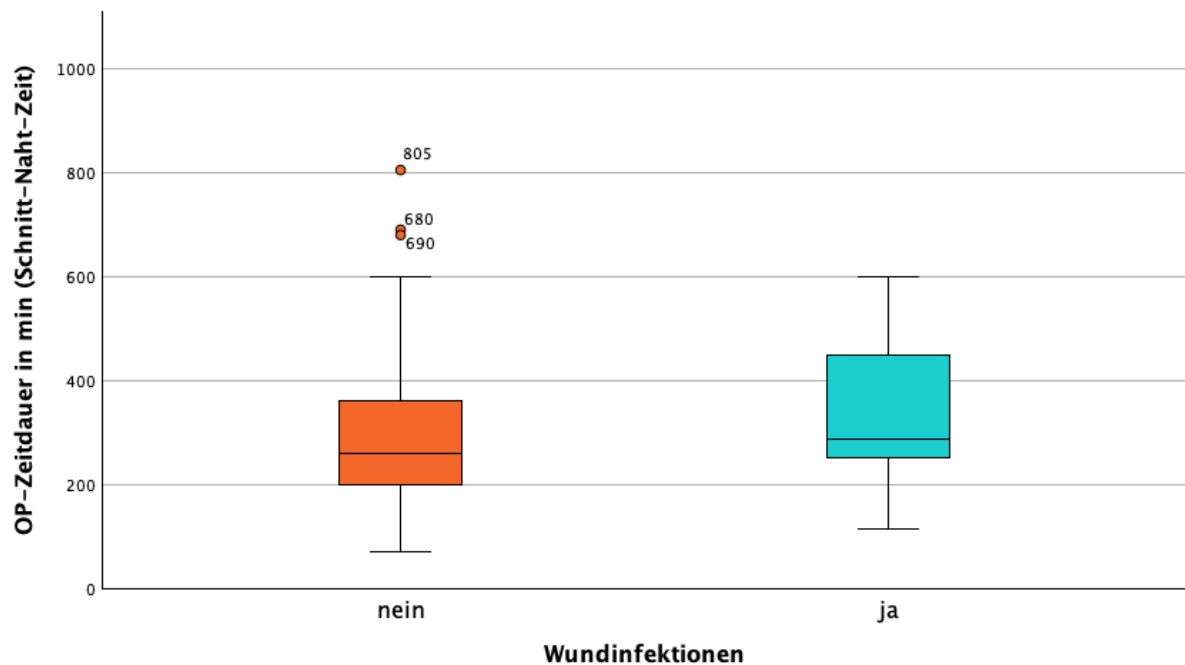


Abbildung 12: Wundinfektionen in Abhängigkeit von der Schnitt-Naht-Zeit

10 Danksagung

An erster Stelle möchte ich Herrn Prof. Dr. med. Florian Ringel für das Anvertrauen dieses interessanten Themas und für das Ermöglichen der Dissertationsschrift danken.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. med. Andreas Kramer für die mühevollen Unterstützung zu jedem Zeitpunkt der Erstellung dieser Dissertation. Ohne sein Vertrauen und ohne seine verständnisvolle Unterstützung wäre diese Arbeit nicht zustande gekommen.

Außerdem danke ich den Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen des IMBEI (Institut für medizinische Biometrie, Epidemiologie und Informatik) für die freundliche Unterstützung während der statistischen Auswertung.

Ein großes Dankeschön geht an meine Eltern, die mich in jedem Vorhaben vollkommen unterstützen und immer für mich da sind. Ohne sie wären das Studium und diese Arbeit niemals möglich gewesen.

Meinem Mann Sebastian Langner möchte ich sehr für seine ausgeprägten Ermutigungen, seine Geduld und für seine liebevolle und unermüdliche Unterstützung und Halt abseits des Berufes danken, die das Erstellen dieser Arbeit erst möglich machten. Auch in anstrengenden Zeiten hat er mir immer gut zugesprochen und war stets an meiner Seite.

