

Aus der Abteilung
Klinik und Poliklinik für Unfallchirurgie
Prof. Dr. Dr. Volker Alt
der Fakultät für Medizin
der Universität Regensburg

Klinische Bedeutung von Sternumfrakturen bei thorakalen Wirbelsäulentraumata –
Eine retrospektive Analyse der vierten Säule der Wirbelsäule

Inaugural – Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin

der
Fakultät für Medizin
der Universität Regensburg

vorgelegt von
Fabian Katzhammer

Aus der Abteilung
Klinik und Poliklinik für Unfallchirurgie
Prof. Dr. Dr. Volker Alt
der Fakultät für Medizin
der Universität Regensburg

Klinische Bedeutung von Sternumfrakturen bei thorakalen Wirbelsäulentraumata –
Eine retrospektive Analyse der vierten Säule der Wirbelsäule

Inaugural – Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin

der
Fakultät für Medizin
der Universität Regensburg

vorgelegt von
Fabian Katzhammer

Dekan: Prof. Dr. Dirk Hellwig

1. Berichterstatter: Prof. Dr. Daniel Popp

2. Berichterstatter: PD Dr. Konstantin Drexler

Tag der mündlichen Prüfung: 6. August 2026

<u>1.</u>	<u>EINLEITUNG.....</u>	<u>4</u>
	1.1 HINTERGRUND UND KLINISCHE RELEVANZ	4
	1.2 ZIELSETZUNG UND FORSCHUNGSFRAGE	5
	1.3 AUFBAU DER ARBEIT	6
<u>2.</u>	<u>THEORETISCHER HINTERGRUND</u>	<u>7</u>
	2.1 DEFINITION UND KLASSEFİKATION DES POLYTRAUMAS.....	7
	2.2 EPIDEMIOLOGIE UND MORTALITÄT BEIM POLYTRAUMA	8
	2.3 AKTUELLE KONZEPTE DER POLYTRAUMAVERSORGUNG	10
	2.4 UNFALLMECHANISMEN UND RISIKOFAKTOREN.....	12
	2.5 BEDEUTUNG THORAKALER VERLETZUNGEN BEIM POLYTRAUMA.....	13
	2.6 STERNUMFRAKTUREN UND ASSOZIIERTE VERLETZUNGEN.....	13
	2.7 KOMBINIERTE STERNUM- UND THORAKALE WIRBELSÄULENFRAKTUREN	14
	2.8 DEFINITION DER „VIERTEN SÄULE-FRAKTUR“ (4SF).....	16
<u>3.</u>	<u>PATIENTEN UND METHODEN</u>	<u>17</u>
	3.1 STUDIENDESIGN UND PATIENTENKOLLEKTIV	17
	3.2 DATENERHEBUNG UND VARIABLEN	17
	3.3 STATISTISCHE AUSWERTUNG	20
	3.4 ETHIK UND DATENSCHUTZ	21
<u>4.</u>	<u>ERGEBNISSE.....</u>	<u>22</u>
	4.1 DEMOGRAPHISCHE DATEN	22
	4.2 VERLETZUNGSCHARAKTERISTIKA.....	23
	4.2.1 UNFALLMECHANISMUS.....	23
	4.2.2 FRAKTURHÖHE DER WIRBELSÄULE.....	23
	4.2.3 MORPHOLOGIE DER WIRBELSÄULENFRAKTUREN	23
	4.2.4 RÜCKENMARKSVERLETZUNGEN.....	24
	4.3 BEGLEITVERLETZUNGEN	25
	4.4 KLINISCHES ERGEBNIS	26
	4.5 OPERATIVES MANAGEMENT UND ERGEBNIS	28
	4.6 RISIKOFAKTOREN FÜR MORTALITÄT	30
	4.7 REGRESSIONSANALYSE FÜR UNABHÄNGIGE FAKTOREN	32
<u>5.</u>	<u>DISKUSSION</u>	<u>35</u>
	5.1 ZENTRALE ERGEBNISSE DIESER STUDIE	35
	5.2 DEMOGRAPHIE.....	35
	5.3 UNFALLMECHANISMEN UND FRAKTURMUSTER	36
	5.4 BEGLEITVERLETZUNGEN BEI 4SF	37
	5.5 KLINISCHER VERLAUF UND OPERATIVES MANAGEMENT	38
	5.6 RISIKOFAKTOREN FÜR MORTALITÄT BEI 4SF	39
	5.7 MULTIVARIATE RISIKOFAKTORENANALYSE	40

5.8 LIMITATIONEN DER STUDIE	43
<u>6. ZUSAMMENFASSUNG.....</u>	<u>44</u>
<u>7. LITERATURVERZEICHNIS</u>	<u>46</u>
<u>8. DANKSAGUNG</u>	

Im Text verwendete Abkürzungen:

4SF	Vierte-Säule-Fraktur (kombinierte Sternum- und Brustwirbelsäulenfraktur)
BWF	Brustwirbelsäulenfraktur (ohne begleitende Sternumfraktur)
BWS	Brustwirbelsäule
ISS	Injury Severity Score
AIS	Abbreviated Injury Scale
GCS	Glasgow Coma Scale
AO	Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen
DCO	Damage Control Orthopedics Surgery
ASIA	American Spinal Injury Association - Classification
SHT	Schädel-Hirn-Trauma
CT	Computertomographie
OP	Operation
aOR	adjusted Odds Ratio
vs.	versus
PKW	Personenkraftwagen

Zur besseren Lesbarkeit wird in dieser Dissertation das generische Maskulinum verwendet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten - sofern nicht ausdrücklich anders angegeben - gleichermaßen für alle Geschlechter.

1. Einleitung

1.1 Hintergrund und klinische Relevanz

Schwerverletzte Patienten stellen im klinischen Alltag eine besondere Herausforderung dar, sowohl hinsichtlich ihrer akuten Versorgung als auch in Bezug auf die interdisziplinäre Nachbehandlung (1). Die steigende Komplexität moderner Traumatologie verlangt nach immer präziserer Diagnostik und differenzierter Interpretation von Verletzungsmustern, um Therapieentscheidungen möglichst schnell und zielgerichtet treffen zu können (2). Insbesondere in der initialen Schockraumversorgung ist Zeit ein kritischer Faktor. Die frühzeitige Erkennung potenziell instabiler Verletzungen und lebensbedrohlicher Begleittraumata ist essenziell, um Mortalität und Morbidität bei Polytraumapatienten zu senken (3).

In diesem Kontext rücken zunehmend spezielle Frakturkonstellationen in den Fokus, die über ihre rein strukturelle Relevanz hinaus auch diagnostisch und prognostisch von Bedeutung sein könnten (4,5). Eine solche Kombination ist das gleichzeitige Auftreten von Sternumfrakturen und thorakalen Wirbelsäulenfrakturen, die typischerweise durch hochenergetische Traumata entstehen (6). Breitenbach et al. zeigten, dass diese Frakturen häufig gemeinsam auftreten und mit einem erhöhten Risiko für respiratorische Komplikationen einhergehen (6). Bisher liegen nur wenige systematische Untersuchungen zu dieser Fragestellung vor, weshalb weitere Auswertungen, die auch Faktoren wie Mortalität, Risikofaktoren oder klinisches Outcome berücksichtigen, erforderlich sind (6,7).

Über die epidemiologische und prognostische Betrachtung hinaus lässt sich die klinische Relevanz der kombinierten Sternum- und thorakalen Wirbelsäulenfraktur auch aus biomechanischer Sicht begründen. Der Thorax stellt eine funktionelle Einheit dar, in der Brustbein, Rippen und Brustwirbelsäule gemeinsam zur Stabilität des knöchernen Thorax beitragen (8). Insbesondere das Sternum übernimmt dabei eine zentrale ventrale Stützfunktion, indem es über die Rippen eine mechanische Kopplung zur thorakalen Wirbelsäule herstellt (8). Hochenergetische Krafteinwirkungen auf den vorderen Thorax können somit nicht nur zu isolierten Verletzungen einzelner Strukturen führen, sondern eine Energieübertragung auf den gesamten Thoraxring bewirken (8). Vor diesem Hintergrund erscheint das gleichzeitige

Auftreten von Sternum- und thorakalen Wirbelsäulenfrakturen weniger als zufällige Koinzidenz, sondern vielmehr als Ausdruck einer relevanten strukturellen Belastung des Thoraxskeletts (8). Diese Überlegungen legen nahe, dass bestimmte Frakturkombinationen als Ausdruck komplexer Traumamechanismen interpretiert werden können und somit eine besondere diagnostische Aufmerksamkeit verdienen.

1.2 Zielsetzung und Forschungsfrage

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, das Verletzungsmuster bei Polytraumapatienten mit thorakalen Wirbelsäulenfrakturen genauer zu untersuchen. Im Fokus steht dabei die Analyse des Einflusses einer gleichzeitig bestehenden Sternumfraktur auf die Häufigkeit und Art begleitender Verletzungen sowie auf klinische Komplikationen während des stationären Aufenthalts. Durch den Vergleich zweier Patientengruppen, jeweils mit und ohne begleitende Sternumfraktur, sollen signifikante Unterschiede identifiziert werden, die Rückschlüsse auf diagnostische und therapeutische Konsequenzen zulassen. Die Forschungsfrage lautet daher: Welche Bedeutung hat das gleichzeitige Auftreten von Sternum- und thorakalen Wirbelsäulenfrakturen bei Polytraumapatienten in Bezug auf begleitende Verletzungen und den klinischen Verlauf?

In der Erstversorgung schwerverletzter Patienten kann bereits die visuelle Identifikation eines bestimmten Frakturmusters in der initialen CT-Diagnostik Hinweise auf weitere potenziell lebensbedrohliche Verletzungen liefern. Vor diesem Hintergrund gewinnt die gezielte Untersuchung klinisch relevanter Verletzungsmuster an Bedeutung, um die Versorgung schwerverletzter Patienten weiter zu verbessern (5,9).

Ergänzend untersucht die Arbeit klinische und demografische Einflussfaktoren, die mit einer erhöhten Mortalität oder einem komplizierten klinischen Verlauf assoziiert sein könnten. Ziel ist es, Parameter zu identifizieren, die eine bessere Einschätzung des individuellen Risikos ermöglichen und so zur Optimierung der Akutversorgung und intensivmedizinischen Betreuung schwerverletzter Patienten beitragen können.

1.3 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der Arbeit gliedert sich wie folgt: Nach der thematischen Hinführung mit Darstellung aktueller wissenschaftlicher Erkenntnisse zum Thema Polytrauma, sowie speziell thorakales Trauma, folgt ein Abschnitt zur Methodik der Datengewinnung und -auswertung. Im Anschluss werden die Ergebnisse der Datenanalyse strukturiert dargestellt und interpretiert. Zusätzlich werden in diesem Teil Risikofaktoren für Mortalität und weitere klinische Endpunkte analysiert. Der Diskussionsteil ordnet die Ergebnisse in den aktuellen Forschungsstand ein, zeigt klinische Relevanz und Limitationen auf und leitet mögliche praktische Konsequenzen ab. Den Abschluss bildet eine Zusammenfassung der zentralen Ergebnisse und deren Bedeutung für Diagnostik und klinisches Management, mit besonderem Fokus auf die gewonnenen Erkenntnisse über das Zusammenspiel von Wirbelsäulen- und Sternumfrakturen.

2. Theoretischer Hintergrund

2.1 Definition und Klassifikation des Polytraumas

Der Begriff Polytrauma wird häufig in der Medizin verwendet, um schwer verletzte Patienten zu beschreiben (10). Eine genaue Definition entwickelte sich allerdings erst über die Jahre (11). Zunächst wurde eine allgemeine Begriffsbestimmung geschaffen. Demnach beschreibt der Begriff Polytrauma die Verletzung mehrerer Körperregionen oder Organsysteme, bei denen mindestens eine oder die Kombination der Verletzungen potenziell lebensbedrohlich ist (12,13). Diese klassischen Definitionen haben das Verständnis des Begriffs geprägt, sind aber durch ihre unklare Formulierung nur begrenzt für eine genaue klinische Einstufung geeignet (14).

Aus diesem Grund wurde ein neues Scoring-System eingeführt, das die Schwere der Verletzungen genauer beschreibt, der sogenannte *Injury Severity Score* (ISS) (15).

Der ISS ist ein anatomiebasierter Scoring-Index zur quantitativen Einschätzung des Schweregrads von Mehrfachverletzungen (16). Er wurde ursprünglich von Baker et al. entwickelt und später durch Copes et al. validiert (15,16). Der ISS basiert auf der *Abbreviated Injury Scale* (AIS), bei der jeder Verletzung eine Schweregrad-Skala von 1 (geringfügig) bis 6 (nicht überlebensfähig) zugeordnet wird (16). Für die Berechnung des ISS werden die jeweils höchsten AIS-Werte aus den drei am schwersten verletzten Körperregionen quadriert und aufsummiert (16):

$$ISS = (AIS_1)^2 + (AIS_2)^2 + (AIS_3)^2$$

Der ISS kann somit Werte von 1 bis maximal 75 erreichen (16).

Zur Definition eines Polytraumas wurde ein $ISS > 15$ festgelegt (17). Dieser Schwellenwert geht auf eine Studie aus dem Jahr 1987 zurück, in der ab diesem Wert eine Mortalität von über 10 % beschrieben wurde (17). Diese Definition wurde allerdings nicht einheitlich von Unfallchirurgen akzeptiert und variierte so von subjektiven Einschätzungen zwischen Kollegen und Institutionen (18–20).

Im Bestreben die Diagnose eines Polytraumas zu vereinheitlichen, wurden diese Kriterien 2014 durch die sogenannte *Berlin Definition* präzisiert (21). Ein Polytrauma liegt demnach vor, wenn

in mindestens zwei Körperregionen jeweils eine Verletzung mit einem AIS Score ≥ 3 besteht und zusätzlich mindestens eines der folgenden physiologischen Kriterien erfüllt ist (21):

- Systolischer Blutdruck ≤ 90 mmHg
- Glasgow Coma Scale ≤ 8
- Base Excess ≤ -6 mmol/L
- INR $\geq 1,4$
- PTT ≥ 40 s
- Alter ≥ 70 Jahre

Die Berlin Definition erhöht die Genauigkeit, Patienten mit hohem Ressourcenaufwand sowie erhöhter Mortalität zu identifizieren und weist somit eine verbesserte prädiktive Aussagekraft auf (22,23). Dennoch wird der ISS in der internationalen Traumaforschung weiterhin bevorzugt verwendet (24,25). Eine mögliche Erklärung hierfür könnte in der einfacheren Erhebbarkeit, der weiten Verbreitung und der besseren Vergleichbarkeit mit bestehenden Studien und Traumaregisterdaten liegen. Aus diesen Gründen wurde auch in der vorliegenden Arbeit der ISS als Indikator der Verletzungsschwere herangezogen.

2.2 Epidemiologie und Mortalität beim Polytrauma

Traumatische Verletzungen zählen nach wie vor zu den acht führenden Todesursachen über alle Altersstufen hinweg (26). In der Altersgruppe der 5- bis 29-Jährigen stellen traumatische Verletzungen sogar die dritthäufigste Todesursache dar (26). Weltweit sterben jährlich 4,4 Millionen Menschen an unbeabsichtigten oder durch Gewalt verursachten Verletzungen, was rund 8 % der gesamten Todesursachen ausmacht (26).

Am häufigsten führen Verletzungen des zentralen Nervensystems (ZNS) zum Tod der Patienten, gefolgt von Verbluten infolge kombinierter Verletzungen von Thorax, Abdomen, Becken und Extremitäten (27). Bei älteren Patienten mit multiplen eher leichtgradigen Verletzungen führt dagegen Multiorganversagen besonders häufig zum Tod (28).

Die zeitliche Verteilung der Todesfälle nach einem Trauma wurde 1983 von Donald Trunkey als trimodales Mortalitätsmuster beschrieben (29). Diese Theorie unterscheidet drei

charakteristische Spitzen der Mortalität, die jeweils mit unterschiedlichen pathophysiologischen Ursachen und Interventionsmöglichkeiten verbunden sind (29).

Die erste Mortalitätsspitze tritt unmittelbar nach dem traumatischen Ereignis auf, häufig noch am Unfallort oder auf dem Weg ins Krankenhaus. Die Todesursachen in dieser Phase sind meist schwerwiegende, nicht überlebensfähige Verletzungen, wie etwa hochgradige Hirntraumen, Aortenrupturen oder massive Herz- und Lungenverletzungen. Hier besteht kaum eine Möglichkeit zur medizinischen Intervention (29).

Die zweite Mortalitätsspitze folgt in der Regel innerhalb der ersten Stunden nach Eintreffen in der Klinik. In dieser Phase überleben viele Patienten das initiale Trauma, sterben jedoch an potenziell behandelbaren Ursachen wie inneren Blutungen, Spannungspneumothorax oder Kompartmentsyndrom. Genau in diesem Zeitfenster entfaltet sich die klinische Relevanz des Konzepts der „*Golden Hour*“: Die erste Stunde nach dem Trauma wird als entscheidend für das Überleben des Patienten betrachtet. Schnelles und koordiniertes Handeln, insbesondere durch eine strukturierte präklinische Versorgung, eine frühzeitige Diagnostik und gezielte Notfallchirurgie, kann in dieser kritischen Phase lebensrettend sein (29).

Die dritte Mortalitätsspitze tritt typischerweise einige Tage bis zu einer Woche nach dem Trauma auf. Die Todesursachen liegen nun meist in den Folgen des initialen Traumas und der therapeutischen Maßnahmen, insbesondere im Auftreten von Multiorganversagen, Sepsis oder Komplikationen im Rahmen eines systemischen inflammatorischen Syndroms (SIRS) (29).

Während die Theorie des trimodalen Mortalitätsmusters von mehreren Quellen bestätigt wird (28,30–32), schlagen andere Arbeiten eine bimodale Aufteilung in präklinische und klinische Todeszeitpunkte vor (33–37). Dabei zeigen sich ein früher, überwiegend präklinischer Mortalitätsgipfel sowie ein zweiter, früh-klinischer Gipfel in den ersten Stunden bis Tagen nach dem Trauma (33,34,36,37). Ein spätes Mortalitätsmaximum, wie es im trimodalen Modell beschrieben wird, findet sich in diesen Arbeiten nicht (33,34,36,37). Als Ursache für die Beobachtung dieser unterschiedlichen Ergebnisse wird die Verbesserung der Versorgung von polytraumatisierten Patienten über die Jahre diskutiert (28,38).

Generell wird in den letzten Jahrzehnten ein Rückgang der Sterblichkeit polytraumatisierter Patienten beobachtet (38–40). Eine Studie von Ruchholtz et al. zeigte für den Zeitraum von 1999 bis 2005 einen Rückgang der Mortalität von Polytraumapatienten von 22,8 % auf 18,7 % (38). Auch eine aktuellere Langzeitanalyse von Hardy et al. berichtet über einen weiteren Rückgang der Mortalität von 11,3 % auf 9,4 % in einem Zeitraum von 20 Jahren bis zum Jahr 2021 (40). Unterschiede zwischen den einzelnen Studien sind jedoch möglich. Diese

Entwicklung ist auf verschiedene Faktoren innerhalb der komplexen Versorgung zurückzuführen, beginnend bei der präklinischen Behandlung über den Schockraum und den Operationssaal bis hin zur intensivmedizinischen Betreuung (38). Konkret konnte eine Verkürzung des Zeitintervalls zwischen Ankunft im Schockraum und blutungsstillender Operation beziehungsweise Verlegung des Patienten auf die Intensivstation festgestellt werden (38).

Ein weiterer Einflussfaktor könnte der Rückgang der Verletzungsschwere bei Verkehrsunfällen sein (41), was vermutlich auf erhebliche Fortschritte in der Fahrzeugsicherheit und der Verkehrsinfrastruktur in den vergangenen Jahrzehnten zurückzuführen ist (42,43).

Auch die Einführung strukturierter Behandlungs- und Diagnostikkonzepte wird als möglicher Faktor für die Senkung der Mortalität gesehen. Dazu zählen die Integration des Advanced Trauma Life Support (ATLS)-Programms, das eine standardisierte und prioritätenorientierte Vorgehensweise in der initialen Traumaversorgung vorgibt, sowie die Einführung des *Damage Control Surgery* (DCS)-Konzepts, das bei lebensbedrohlichen Blutungen eine stufenweise operative Strategie mit zunächst lebensrettenden Sofortmaßnahmen und späterer definitiver Versorgung verfolgt (44–46).

Auch die weitverbreitete Verfügbarkeit der Multischicht-CT (MSCT)-Diagnostik trug wesentlich zur schnelleren Identifikation und Behandlung potenziell tödlicher Verletzungen bei (47).

2.3 Aktuelle Konzepte der Polytraumaversorgung

Das Prinzip der *Damage Control Surgery* (DCS) wurde in der Unfallchirurgie übernommen und zu einem eigenständigen Therapieansatz weiterentwickelt. In diesem Rahmen entstand das Konzept der *Damage Control Orthopedic Surgery* (DCO). Dieses überträgt die Strategie der stufenweisen, physiologisch orientierten Versorgung auf die Frakturbehandlung (48–51).

Im Rahmen des DCO-Konzepts haben lebensrettende Sofortmaßnahmen oberste Priorität. Hierzu zählen insbesondere temporäre minimalinvasive Frakturstabilisierungen mittels externem Fixateur sowie unterstützende Maßnahmen zur Kontrolle lebensbedrohlicher Blutungen (52). Ist eine Blutstillung durch externe Stabilisierung allein nicht erreichbar, kann diese, abhängig von Lokalisation und Ausmaß, durch Tamponade von Blutungsquellen, temporäre oder definitive Gefäßrekonstruktion, Ligatur verletzter Gefäße sowie in bestimmten Fällen durch die Resektion schwer geschädigter Organe erfolgen (49,53).

Diese initialen Eingriffe zielen nicht auf eine vollständige oder definitive chirurgische Versorgung ab, sondern verfolgen das primäre Ziel, Patienten in einem physiologisch instabilen Zustand möglichst zeitnah zu stabilisieren. Im Vordergrund steht dabei die Vermeidung zusätzlicher systemischer Belastungen durch ausgedehnte operative Eingriffe und Weichteilverletzungen, die als potenzieller „Second Hit“ wirken können (49,50).

Vor dem Hintergrund der First-Hit-/Second-Hit-Theorie wird dieses Konzept besonders relevant (53–55). Das initiale Trauma, der sogenannte „First Hit“, führt neben mechanischen, hypoxischen und hypovolämischen Gewebeschädigungen zu einer komplexen lokalen und systemischen Immunreaktion. Die daraus resultierende Freisetzung von Immunmediatoren induziert eine systemische Inflammationsreaktion (SIRS) und schafft eine Phase erhöhter Sensitivität gegenüber weiteren Belastungen (53–55). Ein zu früher oder ausgedehnter operativer Eingriff, etwa eine definitive Frakturversorgung, kann in diesem Kontext als „Second Hit“ wirken und die bestehende Entzündungsreaktion durch erneute Zytokinfreisetzung, Reperfusion von ischämiebetroffenem Gewebe und hämodynamische Belastungen erheblich verstärken (53–55). Da das Immunsystem durch den First Hit bereits aktiviert ist, kann dies zu einer überschießenden Immunantwort führen, die das Risiko für ein Multiorganversagen (MOF) und einen potenziell letalen Verlauf erheblich erhöht (53–55).

Das Konzept der DCO trägt diesem pathophysiologischen Zusammenhang Rechnung, indem es in der akuten Phase auf das absolut Notwendige beschränkt bleibt und eine definitive Versorgung erst nach hämodynamischer, respiratorischer und metabolischer Stabilisierung im Rahmen eines verzögerten Eingriffs erfolgt (52). So wird eine schrittweise, kontrollierte Versorgung ermöglicht, bei der das Risiko eines zusätzlichen Schadens durch einen Second Hit minimiert wird (51).

In den Folgejahren wurde jedoch zunehmend auch über potenzielle Nachteile des DCO-Ansatzes diskutiert (56–59). Kritisiert wurde unter anderem die Verlängerung der Gesamtbehandlungsdauer, die Notwendigkeit eines zweiten operativen Eingriffs mit erneuter Anästhesiebelastung sowie das Risiko infektionsbedingter Komplikationen infolge temporärer Stabilisierungsmethoden (52,58–61). Als Reaktion auf diese Problematik wurde das Konzept der „*Safe Definitive Surgery*“ (SDS) entwickelt, das eine individualisierte und risikoadaptierte Entscheidungsfindung betont (1,52,59–62). Die Wahl der Behandlungsstrategie erfolgt dabei in Abhängigkeit vom jeweiligen Risikoprofil und dem physiologischen Zustand des Patienten

(1,52,59–62). Erlaubt der Zustand des Patienten es, kann somit eine definitive Frakturversorgung bereits initial erfolgen.

Ein weiterer zentraler Aspekt in der Versorgung von Polytraumapatienten ist die frühzeitige Vermeidung der sogenannten tödlichen Trias, bestehend aus Azidose, Hypothermie und Koagulopathie (63,64). Diese pathophysiologischen Zustände bedingen sich gegenseitig, können rasch zu einer Verschlechterung des Gesamtzustands führen und sind mit einer erhöhten Letalität assoziiert (63,64). Daher ist es von entscheidender Bedeutung, im Rahmen des Schockraummanagements und der weiteren Behandlung gezielt Maßnahmen zu ergreifen, um diese Komplikationen zu verhindern oder schnellstmöglich zu korrigieren (45,51).

Trotz moderner Behandlungsstrategien bleibt das Polytrauma ein komplexes und potenziell letales Krankheitsbild (65). Weltweit zählen schwere Verletzungen weiterhin zu den führenden Todesursachen und betreffen häufig jüngere, männliche Patienten (26). Polytraumata machen dabei einen wesentlichen Anteil der schwerverletzten Patienten aus und stellen weltweit eine erhebliche gesundheitliche und sozioökonomische Belastung dar (26). Neben der primären Verletzung führen systemische Reaktionen wie hämodynamische Instabilität, Koagulopathie und inflammatorische Dysregulation häufig zu sekundären Organdysfunktionen (53,55). Der klinische Verlauf wird dabei wesentlich durch patientenbezogene Faktoren, die Art und Schwere des Traumas sowie spezifische Verletzungsmuster bestimmt (9,66,67). Entsprechend ist die Kenntnis typischer Unfallmechanismen und deren Begleitverletzungen entscheidend für eine zielgerichtete Diagnostik und Therapieplanung (68).

2.4 Unfallmechanismen und Risikofaktoren

Die häufigsten Ursachen für ein Polytrauma sind Verkehrsunfälle, gefolgt von Stürzen aus großer Höhe (>3 m), Stürzen aus geringer Höhe (<3 m) sowie penetrierenden Verletzungen (69,70).

Bei jüngeren Patienten tritt ein Polytrauma signifikant häufiger infolge von Verkehrsunfällen auf (53 % gegenüber 42 %), während bei älteren Personen Stürze aus geringer Höhe eine bedeutendere Rolle spielen (31 % gegenüber 8 %) (71). Diese Unterschiede lassen sich vermutlich auf altersabhängige Aktivitätsmuster und Mobilitätsverhalten zurückführen (71,72).

Abhängig vom Unfallmechanismus treten charakteristische Verletzungsmuster auf, die maßgeblich zur intrahospitalen Mortalität von Polytraumapatienten beitragen. Dabei stellen Verletzungen des zentralen Nervensystems (ZNS), exsanguinationsbedingter Blutverlust und Multiorganversagen (MODS) die häufigsten Todesursachen dar (28,39,73). Die frühzeitige Erkennung dieser Muster ist entscheidend, um kritische Verläufe zu antizipieren und gezielte therapeutische Maßnahmen einzuleiten (65).

Neben der Art des Unfallmechanismus beeinflussen jedoch auch individuelle Risikofaktoren maßgeblich den klinischen Verlauf und die Überlebenswahrscheinlichkeit von Polytraumapatienten (66). Hierzu zählen insbesondere Alter, Komorbiditäten und das Vorliegen bestimmter Verletzungen (74,75). So konnte in mehreren Studien ein erhöhtes Mortalitätsrisiko bei älteren Polytraumapatienten nachgewiesen werden (71,76,77). Als weiterer unabhängiger Risikofaktor gilt das Vorliegen eines Schädel-Hirn-Traumas (TBI) (78).

Über die patientenbezogenen Faktoren hinaus gewinnt die Analyse von Frakturlokalisationen und Verletzungskombinationen zunehmend an Bedeutung, da sie wichtige Informationen für die Prognose und den klinischen Verlauf liefert (79,80).

2.5 Bedeutung thorakaler Verletzungen beim Polytrauma

Der Thorax nimmt in diesem Kontext eine herausragende Stellung ein: Thorakale Verletzungen mit einem AIS > 3 sind bei 32 % bis 60 % aller Polytraumata nachweisbar (81–83). In vielen Studien gelten Thoraxverletzungen als unabhängiger Prädiktor für Mortalität und verlängerten Intensivaufenthalt (81,83,84). In Bezug auf Mortalität machen schwere Thoraxtraumata mitunter 25 % aller Polytrauma-Toten aus (85).

Die am häufigsten auftretende Verletzung im Thorax ist die Rippenfraktur, oft in Serie, gefolgt von Pneumothorax, Hemothorax, Lungenprellung, Gefäßverletzungen sowie auch Verletzungen am Herzen (81).

2.6 Sternumfrakturen und assoziierte Verletzungen

Die Vielzahl möglicher Verletzungsformen im Bereich des Thorax verdeutlicht dessen zentrale Rolle im Rahmen schwerer Mehrfachverletzungen. Neben den häufiger auftretenden Rippenserien, Pneumothoraces und Lungenkontusionen rücken jedoch zunehmend auch die

seltener beobachteten, aber klinisch besonders aussagekräftigen Verletzungen in den Fokus (86,87). Hierzu zählt insbesondere die Sternumfraktur, die nicht nur durch ihre unmittelbare anatomische Lage eine besondere Relevanz besitzt, sondern auch häufig mit weiteren schwerwiegenden Verletzungen verbunden wird (88).

Frakturen des Sternums treten typischerweise im Rahmen stumpfer Thoraxtraumata auf, wie sie am häufigsten bei hochenergetischen Verkehrsunfällen vorkommen (89). Die Krafteinwirkung erfolgt dabei in der Regel frontal und führt zu einer direkten Belastung des Brustbeins, etwa durch den Sicherheitsgurt (90). In der klinischen Praxis zeigt sich, dass Sternumfrakturen nur selten isoliert auftreten, sondern häufig Teil eines komplexen Verletzungsmusters sind (89). Zu den typischen assoziierten Verletzungen zählen Rippenfrakturen mit begleitender Lungenkontusion, geschlossene Pneumothoraces, thorakale oder lumbale Wirbelsäulenfrakturen, Schädel-Hirn-Traumata sowie stumpfe Herzverletzungen. Diese Kombinationen unterstreichen die Bedeutung der Sternumfraktur als Indikator für ein insgesamt schweres Traumaereignis (89).

2.7 Kombinierte Sternum- und thorakale Wirbelsäulenfrakturen

Von besonderem Interesse ist in diesem Zusammenhang die gleichzeitige Fraktur der thorakalen Wirbelsäule. Die anatomische Nähe und die funktionelle Verbindung zwischen Brustbein, Rippen und Brustwirbelsäule lassen bereits vermuten, dass eine Krafteinwirkung auf den vorderen Thorax auch strukturelle Schäden im Bereich der Wirbelsäule nach sich ziehen kann. Gemeinsam bilden diese Strukturen den sogenannten oberen „Thoraxkäfig“, der einerseits dem Schutz der intrathorakalen Organe dient, andererseits jedoch auch zur Stabilisierung der Brustwirbelsäule beiträgt (8,91). Über die Rippen erfolgt eine mechanische Kopplung zwischen Sternum und thorakaler Wirbelsäule, wodurch Energie, die auf den Thorax einwirkt, sowohl nach ventral als auch nach dorsal übertragen wird (92). Diese biomechanische Rolle des Brustbeins wird durch seine stabilisierende Funktion betont, weshalb es in der Literatur auch als „vierte Säule“ der Wirbelsäule bezeichnet wird (93).

Zur strukturierten Beurteilung thorakaler Wirbelsäulenverletzungen wird in der klinischen Praxis häufig die AO-Klassifikation nach Magerl verwendet, die auch der späteren AO-Spine-Klassifikation zugrunde liegt (94,95). Dieses etablierte System teilt Frakturen der

thorakolumbalen Wirbelsäule anhand des Verletzungsmechanismus in drei Haupttypen (A–C) ein und ermöglicht eine Einschätzung der mechanischen Stabilität (94).

Typ A Frakturen entstehen überwiegend durch axiale Kompressionskräfte und betreffen vor allem die ventralen Anteile des Wirbelkörpers bei erhaltener posteriorer Stabilität. Sie gelten in der Regel als stabil und können häufig konservativ behandelt werden (96). Typ B Frakturen sind durch Distraktionsmechanismen gekennzeichnet, die mit einer Verletzung der vorderen und/oder hinteren Band- und Knochenstrukturen einhergehen und zu einer relevanten Instabilität führen (94). Typ C Frakturen weisen zusätzlich Rotations- oder Translationskomponenten auf, gehen mit einer Schädigung aller tragenden Strukturen einher und stellen damit die instabilste Form dieser Verletzungen dar. Bei Frakturen der Typen B und C ist daher häufig eine operative Stabilisierung erforderlich (96).

Vor diesem Hintergrund ist die gleichzeitige Fraktur von Sternum und thorakaler Wirbelsäule nicht nur Ausdruck einer massiven Krafteinwirkung, sondern auch ein möglicher Hinweis auf eine komplexe Instabilität des Thoraxskeletts. Studien zeigen, dass bei dieser Verletzungskombination häufig instabile thorakale Wirbelsäulenfrakturen auftreten, insbesondere Verletzungen vom Typ B oder C gemäß der AO-Spine-Klassifikation (7).

Neben der strukturellen Instabilität zeigen betroffene Patienten im klinischen Verlauf auch vermehrt systemische Komplikationen. Besonders hervorzuheben sind respiratorische Einschränkungen, die sich unter anderem durch verlängerte Beatmungsdauer manifestieren können. In einer retrospektiven Analyse konnten Breitenbach et al. zeigen, dass Patienten mit kombinierter Sternum- und thorakaler Wirbelsäulenfraktur signifikant häufiger im Verlauf respiratorische Komplikationen aufwiesen als Patienten mit isolierten thorakalen Wirbelsäulenfrakturen (6). Dies legt nahe, dass diese Frakturkonstellation nicht nur strukturell bedeutsam ist, sondern auch prognostisch relevante Auswirkungen auf den weiteren klinischen Verlauf haben kann.

Unter diesem Aspekt stellt sich die Frage, ob das gleichzeitige Vorliegen von Sternum- und thorakalen Wirbelsäulenfrakturen als diagnostischer Marker für ein schweres Trauma und für das Auftreten weiterer relevanter Begleitverletzungen genutzt werden kann. Um diese Verletzungskonstellation für die vorliegende Arbeit klar abzugrenzen, wird sie im Folgenden als „Vierte-Säule-Fraktur“ (4SF) definiert.

2.8 Definition der „Vierten Säule-Fraktur“ (4SF)

Die „Vierte Säule-Fraktur“ (4SF) bezeichnet das gleichzeitige Vorliegen einer Sternumfraktur und einer thorakalen Wirbelsäulenfraktur. Sie basiert auf dem von Berg beschriebenen Konzept der „vierten Säule“ des Thorax, welches auf dem Drei-Säulen-Modell von Denis aufbaut (93,97). Nach diesem Modell wird die Wirbelsäule in eine vordere, mittlere und hintere Säule unterteilt. Frakturen, die mehrere dieser Säulen betreffen, werden als instabil eingestuft (97). Zur vorderen Säule zählen das vordere Längsband, der vordere Anulus fibrosus und der vordere Anteil des Wirbelkörpers (97). Die mittlere Säule beinhaltet das hintere Längsband, den hinteren Anulus fibrosus und die Hinterkante des Wirbelkörpers, während die hintere Säule den Wirbelbogen sowie den posterioren Bandapparat umfasst (97).

Das Vier-Säulen-Modell erweitert dieses um den Sternum-Rippen-Komplex als zusätzliche ventrale Stabilitätsstruktur des Thorax (93). Sternum und Rippen bilden dabei eine biomechanische Einheit, die zur Stabilisierung der Brustwirbelsäule beiträgt. Das gleichzeitige Vorliegen einer Sternum- und einer Brustwirbelsäulenfraktur weist somit auf eine relevante Instabilität des thorakalen Rings hin und wird als funktionelles Versagen dieser „vierten Säule“ gewertet (93).

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, Begleitverletzungen bei Patienten mit thorakalen Wirbelsäulenfrakturen systematisch zu erfassen und zu analysieren. Insbesondere soll untersucht werden, inwiefern sich Begleitverletzungen und der klinische Verlauf bei Patienten mit zusätzlicher Sternumfraktur von jenen mit isolierter thorakaler Wirbelsäulenfraktur unterscheiden. Durch die Identifikation charakteristischer Muster soll ein Beitrag zur Verbesserung der frühzeitigen Diagnosestellung und zur Optimierung der Behandlungsstrategie bei schwerverletzten Patienten geleistet werden.

3. Patienten und Methoden

3.1 Studiendesign und Patientenkollektiv

Für die vorliegende retrospektive Beobachtungsstudie wurden Patienten aus den Jahren 2006 bis 2022 eingeschlossen, die im Schockraum unseres Level-1-Traumazentrums aufgenommen und behandelt wurden. Die Identifikation der Patienten erfolgte durch eine systematische Auswertung der klinikeigenen Traumadatenbank. Einschlusskriterium war das Vorliegen einer radiologisch bestätigten Fraktur der Brustwirbelsäule.

Die eingeschlossenen Patienten wurden anschließend in zwei Gruppen eingeteilt: Patienten mit Brustwirbelsäulenfraktur und zusätzlicher Sternumfraktur (4SF) sowie eine Vergleichsgruppe mit Brustwirbelsäulenfraktur ohne Sternumfraktur (BWF).

Der Untersuchungszeitraum wurde bewusst weit gefasst (2006–2022), um eine ausreichende Fallzahl sicherzustellen und die Aussagekraft der Ergebnisse zu erhöhen.

Aus der Analyse ausgeschlossen wurden Patienten, die außerhalb dieses Zeitraums behandelt wurden, solche mit unvollständigen Datensätzen sowie Patienten, bei denen retrospektiv keine radiologisch bestätigte Fraktur der Brustwirbelsäule nachweisbar war oder ausschließlich Frakturen außerhalb der Brustwirbelsäule vorlagen. Ebenfalls ausgeschlossen wurden pädiatrische Patienten (<18 Jahre).

3.2 Datenerhebung und Variablen

Die definierten Gruppen wurden hinsichtlich verschiedener Variablen analysiert und miteinander verglichen. Demographische Daten wurden zum Alter sowie zum Geschlecht erhoben. Zudem erfolgte eine Subgruppenanalyse für Patienten > 64 Jahre. Zur Erfassung der allgemeinen Verletzungsschwere wurde der Injury Severity Score (ISS) herangezogen.

Die Charakteristika der Verletzung wurden differenziert nach Unfallmechanismus, Höhe der Wirbelsäulenfraktur, Frakturmorphologie gemäß der AO-Spine-Klassifikation (Typ A–C) und Vorliegen einer Rückenmarksverletzung. Assoziierte Verletzungen wurden als traumatische Hirnverletzungen, thorakale und/oder abdominelle Verletzungen, instabile Beckenringverletzungen nach AO/Tile-Klassifikation (Typ B/ C) sowie Frakturen der oberen oder unteren Extremität erfasst. Thorakale und abdominelle Begleitverletzungen wurden weiter

spezifiziert in Rippen-, Clavikula- und Skapulafrakturen, der Anlage einer Thoraxdrainage bei Krankenhausaufnahme, Aortenruptur, Leberlazeration und Milzruptur.

Als klinische Behandlungsvariablen wurden Daten zur Durchführung einer Operation, zum operativen Zugangsweg an der Wirbelsäule, zur Anzahl fusionierter Wirbelsäulensegmente, zu durchgeführter Laminektomie oder Vertebroplastie sowie zur Dauer der postoperativen Intubation erhoben.

Zur Beurteilung des klinischen Gesamtzustandes der Patienten wurden darüber hinaus Variablen wie *Glasgow Coma Scale* (GCS) in der Notaufnahme, die Gesamtdauer der Intubation, die gesamte Krankenhausaufenthaltsdauer, eine Aufnahme auf die Intensivstation, Tage auf der Intensivstation, die stationäre Mortalität sowie zusätzliche Verletzungen des Patienten berücksichtigt.

Für die Auswertung der chirurgischen Behandlung und Ergebnisse wurden außerdem die Durchführung einer Operation, die Durchführung einer Operation an der Wirbelsäule, Zugang zur Wirbelsäule, die Anzahl fusionierter Wirbelsäulensegmente, die Instrumentationslänge, Wirbelsäulenoperationen wie Laminektomie oder Vertebroplastie und die Intubationsdauer nach der Operation erfasst. Dabei wurde die Instrumentationslänge in Kurzsegment- und Langsegmentinstrumentationen unterteilt, wobei eine Langsegmentinstrumentation als Instrumentation von ≥ 3 Wirbeln definiert ist.

Alle erhobenen Variablen sind in Tabelle 1 systematisch zusammengefasst.

Kategorie	Variable
Allgemein	Patientenanzahl
Demographie	Alter
	Alter ≥ 65 Jahre
	Geschlecht – männlich
	Geschlecht – weiblich
	Injury Severity Score (ISS)
Verletzungscharakteristika	Unfallmechanismus – PKW
	Unfallmechanismus – Motorrad
	Unfallmechanismus – Fahrrad
	Unfallmechanismus – Fußgänger
	Unfallmechanismus – sonstiger Verkehr (Zug, Schiff etc.)
	Unfallmechanismus – Sturz ≥ 3 m
	Unfallmechanismus – Sturz < 3 m
	Unfallmechanismus – Schlagverletzung
	Unfallmechanismus – Stichverletzung

	Unfallmechanismus – sonstig
	Höhe der BWS – Th1–Th7
	Höhe der BWS – Th8–Th12
	Höhe der BWS – beide Abschnitte
	AO Spine Typ A
	AO Spine Typ B
	AO Spine Typ C
	Rückenmarksverletzung – vorhanden
	Rückenmarksverletzung – abwesend
Begleitverletzungen	Schädel-Hirn-Trauma (SHT)
	Thorax/Abdominalverletzung
	Begleitende Thoraxfraktur (exkl. Sternum)
	Rippenfraktur
	Clavikulafraktur
	Skapulafraktur
	Thoraxdrainagenanlage
	Aortenruptur
	Leberlazeration
	Milzlazeration
	Instabile Beckenringfraktur Typ B/ C
	Fraktur obere Extremität
	Fraktur untere Extremität
Klinischer Zustand / Outcome	GCS bei Aufnahme
	Krankenhausaufenthaltsdauer in Tagen
	Intubationsdauer in Tagen
	Intensivstationsaufenthalt
	Tage auf Intensivstation
	Innerklinische Mortalität
	Zusätzliche Verletzungen
Operatives Management	Operative Stabilisierung – insgesamt
	Operative Stabilisierung – Wirbelsäule
	Zugang dorsal
	Zugang ventral
	Zugang dorsoventral
	Anzahl fusionierter Wirbelsäulensegmente
	Instrumentationslänge – Kurzsegment
	Instrumentationslänge – Langsegment
	Laminektomie
	Vertebroplastie
	Intubationsdauer postoperativ

Tabelle 1. Untersuchte Variablen.

Zusätzlich wurden Analysen durchgeführt, um Risikofaktoren für eine erhöhte innerklinische Mortalität bei Patienten mit 4SF zu identifizieren.

Hierzu wurden alle Patienten mit 4SF ausgewählt und hinsichtlich potenzieller Einflussgrößen auf die Mortalität als klinischen Endpunkt untersucht.

Zur Identifikation unabhängiger Risikofaktoren wurden multivariate Regressionsanalysen durchgeführt. Für die einzelnen klinischen Endpunkte, darunter innerklinische Mortalität, Intubationsdauer, gesamte Krankenhausaufenthaltsdauer, operative Wirbelsäulenstabilisierung, Langsegment-Instrumentation und Sternumfraktur, wurden separate multivariate Regressionsmodelle erstellt, um unabhängige Einflussfaktoren zu identifizieren. Ziel war es, jene Faktoren zu bestimmen, die das Risiko für das Auftreten der jeweiligen abhängigen Variable signifikant beeinflussen. Auf diese Weise sollten relevante Risikokonstellationen innerhalb dieser spezifischen Patientengruppe identifiziert werden.

3.3 Statistische Auswertung

Für die statistische Auswertung wurde IBM SPSS Statistics für Macintosh, Version 29.0.2.0 (IBM Corp., Armonk, N.Y., USA) verwendet. Deskriptive Statistiken wurden für die Merkmale der thorakalen Wirbelsäulenverletzungen berechnet. Metrische Variablen wurden in Mittelwert $\pm$ Standardabweichung angegeben, kategoriale Variablen als Anzahl (n) und Prozentwerte (%) dargestellt. Vergleichende statistische Analysen wurden zu den Gruppen mit 4SF beziehungsweise BWF durchgeführt. Kategoriale Variablen wurden mithilfe des *Pearson Chi-Quadrat-Tests*, metrische Variablen mit dem *Student's t-Test* berechnet. Um die Unterschiede zwischen den beiden Gruppen grafisch darzustellen, wurden Kaplan-Meier-Überlebensanalysen zur Krankenhausaufenthaltsdauer, innerklinischen Mortalität sowie Intubationsdauer postoperativ erstellt. Als Signifikanzniveau für alle Analysen wurde $p < 0,05$ festgelegt.

Multivariate logistische und lineare Regressionsanalysen wurden eingesetzt, um unabhängige Einflussfaktoren für die untersuchten klinischen Endpunkte zu ermitteln. Ergebnisse der logistischen Regressionsanalysen wurden als adjustierte Odds Ratios (aOR) angegeben, während lineare Regressionsanalysen durch Regressionskoeffizienten (β) beschrieben wurden. Kovariaten wurden auf Grundlage klinischer Plausibilität sowie signifikanter Ergebnisse aus den vorhergehenden univariaten Analysen in die multivariaten Modelle einbezogen.

In allen Tabellen wurden Zeilenprozente verwendet. Diese Darstellungsweise erlaubt es, die relative Häufigkeit einer Sternumfraktur innerhalb einzelner Kategorien direkt mit der Gesamtprävalenz der 4SF zu vergleichen.

3.4 Ethik und Datenschutz

Ethikvotum:

Für diese Studie liegt ein positives Ethikvotum der institutionellen Ethikkommission (25-4321-104) vor und die Studie wurde in Übereinstimmung mit der Deklaration von Helsinki durchgeführt.

Datenschutz und Anonymisierung:

Alle Daten wurden retrospektiv aus dem klinikeigenen Traumaregister erhoben. Die Datenauswertung erfolgte anonymisiert, jedem Patienten wurde eine fallbezogene Identifikationsnummer zugewiesen, sodass keine Rückschlüsse auf die Identität einzelner Personen möglich waren.

4. Ergebnisse

Insgesamt erfüllten 366 Patienten die Einschlusskriterien für diese Studie. Bei 311 dieser Patienten konnte eine thorakale Wirbelsäulenfraktur diagnostiziert werden, während in 55 Fällen eine Kombination aus thorakaler Wirbelsäulenfraktur und gleichzeitig vorliegender Sternumfraktur (4SF) beobachtet wurde. Die Prävalenz einer Vierte-Säule-Fraktur betrug damit 15,0 %.

4.1 Demographische Daten

Das Durchschnittsalter der Gesamtkohorte lag bei 48,7 Jahren. Insgesamt waren 91 Patienten älter als 64 Jahre. Die Kohorte umfasste 279 männliche und 87 weibliche Patienten. Der mittlere ISS lag in der Gesamtkohorte bei 32,6.

In der Gruppe mit 4SF betrug das Durchschnittsalter 51,9 Jahre ($\pm 21,8$). Hiervon waren 17 Patienten älter als 64 Jahre. Der überwiegende Anteil der Patienten in dieser Gruppe war männlich (43 Patienten), während 12 Patientinnen weiblich waren. Der mittlere ISS lag mit $35,3 \pm 14,5$ geringfügig über dem der Gesamtkohorte.

In der Gruppe BWF lag das mittlere Alter bei 48,1 Jahren ($\pm 20,2$). Hierbei waren 74 Patienten älter als 64 Jahre. In Bezug auf das Geschlecht zählte man 236 Patienten zu den Männern, während 75 Patientinnen weiblich waren. Der mittlere ISS lag bei $32,1 \pm 13,7$.

In Bezug auf Alter ($p = 0,210$), Anteil der Patienten ≥ 65 Jahre ($p = 0,260$), Geschlecht ($p = 0,712$) und ISS ($p = 0,112$) zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen Patienten mit und ohne 4SF (siehe Tabelle 2).

	gesamt	mit Sternumfraktur	ohne Sternumfraktur	p-Wert
Anzahl (n)	366	55	311	
Alter, Jahre ($\bar{x}$ /sd)	48,7	51,9/ 21,8	48,1/ 20,2	0,210
Alter ≥ 65 Jahre (n/%)	91	17/ 18,7	74/ 81,3	0,260
Männlich (n/%)	279	43/ 15,4	236/ 84,6	0,712
Weiblich (n/%)	87	12/ 13,8	75/ 86,2	0,712
ISS ($\bar{x}$ /sd)	32,6	35,3/ 14,5	32,1/ 13,7	0,112

Tabelle 2. Demographische Daten.

4.2 Verletzungscharakteristika

4.2.1 Unfallmechanismus

Unter den 366 eingeschlossenen Patienten stellten Verkehrsunfälle mit PKW (motor vehicle accident, MVA) mit insgesamt 97 Fällen die häufigste Unfallursache dar. In 21 dieser Fälle traten 4SF auf. An zweiter Stelle folgten Motorradunfälle (motorcycle crashes, MCC) mit 81 Fällen insgesamt, darunter 11 Patienten mit 4SF. Stürze aus einer Höhe von ≥ 3 Metern traten in 74 Fällen auf, in 9 dieser Fälle war eine 4SF vorhanden. Stürze aus einer Höhe < 3 Metern lagen bei 47 Patienten vor, mit 7 Fällen von 4SF. Bei Fahrradunfällen wurden 25 Fälle erfasst, von denen 5 Patienten eine 4SF aufwiesen. Fußgängerunfälle traten mit insgesamt 11 Fällen seltener auf, wobei lediglich 1 Patient von einer 4SF betroffen war. Auch bei den sonstigen, nicht näher spezifizierten Unfällen wurden insgesamt 13 Fälle erfasst, darunter 1 Fall mit 4SF. In weiteren seltenen Unfallkonstellationen, wie Gewalteinwirkung durch Schläge mit 11 Fällen, speziellen Verkehrsunfällen wie Bahn- oder Schiffsunfällen mit 6 Fällen sowie bei 1 Stichverletzung, wurde keine 4SF beobachtet.

Insgesamt unterschied sich die Prävalenz einer 4SF zwischen den verschiedenen Unfallmechanismen nicht signifikant ($p = 0,558$) (siehe Tabelle 3).

4.2.2 Frakturhöhe der Wirbelsäule

Von den 366 Patienten mit Brustwirbelsäulenfrakturen lagen die Verletzungen mit 162 Fällen am häufigsten im oberen und mittleren Brustwirbelsäulenbereich (Th1–Th7). In 28 dieser Fälle wurde gleichzeitig eine 4SF festgestellt. Im unteren Brustwirbelsäulenbereich (Th8–Th12) wurden 118 Frakturen dokumentiert, wobei in 9 Fällen eine Kombination mit 4SF bestand. Bei 86 Patienten traten Frakturen in beiden Brustwirbelsäulenabschnitten auf, in 18 dieser Fälle war ebenfalls eine 4SF nachweisbar. Die Häufigkeit einer 4SF war signifikant von der Frakturhöhe abhängig ($p = 0,018$) (siehe Tabelle 3).

4.2.3 Morphologie der Wirbelsäulenfrakturen

Von den 289 Patienten mit Berstungs- oder Kompressionsfrakturen (AO Spine Typ A) wiesen 40 eine 4SF auf. Unter den 41 Patienten mit Chance- oder Distraktionsfrakturen (AO Spine Typ B) waren 3 Fälle mit 4SF assoziiert. Luxationsfrakturen (AO Spine Typ C) lagen bei insgesamt

36 Patienten vor, davon wiesen insgesamt 12 Patienten eine 4SF auf. Die Verteilung der 4SF unterschied sich signifikant zwischen den Frakturmorphologien ($p = 0,003$) (siehe Tabelle 3).

4.2.4 Rückenmarksverletzungen

Insgesamt konnten 25 Patienten mit Rückenmarksverletzung identifiziert werden. Davon waren 6 Patienten in der 4SF-Gruppe und 19 Patienten in der BWF-Gruppe. Unter den 341 Patienten ohne Rückenmarksverletzung fanden sich 49 Patienten mit 4SF und 292 Patienten mit BWF. Das Vorliegen einer Rückenmarksverletzung unterschied sich zwischen den Gruppen nicht signifikant ($p = 0,193$) (siehe Tabelle 3).

	gesamt	mit Sternumfraktur	ohne Sternumfraktur	p-Wert
Unfallmechanismus (n/%)				0,558
Verkehrsunfall mit PKW	97	21/ 21,7	76/ 78,3	
Motorradunfall	81	11/ 13,6	70/ 86,4	
Fahrradunfall	25	5/ 20,0	20/ 80,0	
Fußgängerunfall	11	1/ 9,1	10/ 90,9	
Sonstiger Verkehr (Zug, Schiff, ...)	6	0/ 0,0	6/ 100,0	
Sturz aus ≥ 3 m Höhe	74	9/ 12,2	65/ 87,8	
Sturz aus < 3 m Höhe	47	7/ 14,9	40/ 85,1	
Schlagverletzung (stumpf)	11	0/ 0,0	11/ 100,0	
Stichverletzung (penetrierend)	1	0/ 0,0	1/ 100,0	
Sonstige	13	1/ 7,7	12/ 92,3	
Höhe der Brustwirbelsäulenfraktur (n/%)				0,018
obere/ mittlere BWS (Th1–Th7)	162	28/ 17,3	134/ 82,7	
untere BWS (Th8–Th12)	118	9/ 7,6	109/ 92,4	
beide Abschnitte BWS	86	18/ 20,9	68/ 79,1	
Frakturmorphologie (n/%)				0,003
AO Spine Typ A	289	40/ 13,8	249/ 86,2	
AO Spine Typ B	41	3/ 7,3	38/ 92,7	
AO Spine Typ C	36	12/ 33,3	24/ 66,7	
Rückenmarksverletzung (n/%)				0,193
vorhanden	25	6/ 24,0	19/ 76,0	
abwesend	341	49/ 14,4	292/ 85,6	

Tabelle 3. Verletzungscharakteristika.

4.3 Begleitverletzungen

Von den 366 Patienten erlitten 211 ein traumatisches Schädel-Hirn-Trauma (SHT), darunter 27 Patienten mit begleitender 4SF, ohne signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen ($p = 0,163$). Thorakale und/oder abdominelle Begleitverletzungen traten insgesamt bei 295 Patienten auf und waren in der Gruppe mit 4SF signifikant häufiger vertreten ($p < 0,001$).

Auch für einzelne Begleitverletzungen des Thorax zeigten sich signifikante Unterschiede. Bei Vorliegen von Rippenfrakturen (224 Patienten) wurde signifikant häufiger eine 4SF beobachtet (18,3 %, $p = 0,028$). Auch bei Clavikulafrakturen (38 Patienten) war eine 4SF signifikant häufiger nachweisbar (26,3 %; $p = 0,040$). Instabile Beckenringfrakturen (Typ B/ C) wurden bei 52 Patienten dokumentiert und traten signifikant seltener bei Patienten mit 4SF auf ($p = 0,015$).

Für weitere untersuchte Verletzungskategorien zeigte sich kein signifikanter Zusammenhang mit dem Vorliegen einer 4SF. Begleitende Thoraxfrakturen im Sinne zusätzlicher knöcherner Brustkorbverletzungen, exklusive der Sternumfraktur, wurden bei 238 Patienten festgestellt, darunter 42 Patienten mit 4SF ($p = 0,059$). Skapulafrakturen wurden bei 36 Patienten diagnostiziert und waren somit nicht signifikant mit dem Vorliegen einer 4SF assoziiert ($p = 0,840$). Eine Thoraxdrainage wurde bei 31,4 % der Patienten in der Notaufnahme angelegt, darunter 23 Patienten mit 4SF, und zeigte keinen signifikanten Zusammenhang mit dem Auftreten einer 4SF ($p = 0,072$). Aortenrupturen (9 Fälle; $p = 0,541$), Leberlazerationen (44 Fälle; $p = 0,240$) und Milzrupturen (52 Fälle; $p = 0,182$) waren insgesamt selten und ebenfalls nicht signifikant mit einer 4SF assoziiert. Gleiches galt für Frakturen der oberen Extremität ($n = 83$) mit einem 4SF-Anteil von 16,9 % ($p = 0,594$) sowie der unteren Extremität ($n = 106$) mit einem 4SF-Anteil von 17,0 % ($p = 0,504$) (siehe Tabelle 4).

	gesamt	mit Sternumfraktur	ohne Sternumfraktur	p-Wert
SHT (n/%)	211	27/ 12,8	184/ 87,2	0,163
Thorax/ Abdominalverletzung (n/%)	295	54/ 18,3	241/ 81,7	<0,001
Begleitende Thoraxfraktur (n/%)	238	42/ 17,6	196/ 82,4	0,059
Rippenfraktur (n/%)	224	41/ 18,3	183/ 81,7	0,028
Clavikulafraktur (n/%)	38	10/ 26,3	28/ 73,7	0,040
Skapulafraktur (n/%)	36	5/ 13,9	31/ 86,1	0,840
Thoraxdrainagenanlage (n/%)	115	23/ 20,0	92/ 80,0	0,072
Aortenruptur (n/%)	9	2/ 22,2	7/ 77,8	0,541

Ergebnisse

Leberlazeration (n/%)	44	4/ 9,1	40/ 90,9	0,240
Milzlazeration (n/%)	52	11/ 21,2	41/ 78,8	0,182
Instabile (Typ B/ C) Beckenring- fraktur (n/%)	52	2/ 3,8	50/ 96,2	0,015
Fraktur obere Extremität (n/%)	83	14/ 16,9	69/ 83,1	0,594
Fraktur untere Extremität (n/%)	106	18/ 17,0	88/ 83,0	0,504

Tabelle 4. Begleitverletzungen.

4.4 Klinisches Ergebnis

Der mittlere Glasgow Coma Scale (GCS) bei Aufnahme betrug in der Gesamtkohorte $8,3 \pm 5,7$ Punkte und unterschied sich nicht signifikant zwischen Patienten mit 4SF und BWF ($8,5 \pm 5,7$ vs. $8,3 \pm 5,7$; $p = 0,792$).

Auch die Krankenhausaufenthaltsdauer war in der 4SF-Gruppe nicht signifikant verlängert ($22,6 \pm 16,3$ Tage vs. $20,9 \pm 18,3$ Tage; $p = 0,526$). Die Aufenthaltsverläufe wurden ergänzend in einer Kaplan-Meier-Kurve dargestellt (siehe Abbildung 1).

Die Intubationsdauer war bei Patienten mit 4SF signifikant verlängert im Vergleich zu Patienten mit BWF ($10,7 \pm 11,7$ Tage vs. $7,2 \pm 9,9$ Tage; $p = 0,018$). Ebenso war die Aufenthaltsdauer auf der Intensivstation bei Patienten mit 4SF signifikant länger ($16,9 \pm 14,1$ Tage vs. $12,0 \pm 12,1$ Tage; $p = 0,008$). Der Anteil an Patienten mit 4SF war unter intensivpflichtigen Patienten geringfügig höher als in der Gesamtkohorte (15,9 % vs. 15,0 %), ohne jedoch statistisch signifikant zu sein ($p = 0,053$).

Die innerklinische Mortalität lag bei insgesamt 61 Patienten, darunter 11 Todesfälle in der 4SF-Gruppe und 50 Todesfälle in der BWF-Gruppe, ohne signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen ($p = 0,472$). Diese Ergebnisse wurden ebenfalls grafisch in einer Kaplan-Meier-Kurve dargestellt (siehe Abbildung 2).

Zusätzliche Verletzungen wurden bei 361 Patienten dokumentiert. 55 dieser Patienten hatten eine 4SF, wobei kein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen bestand ($p = 0,397$) (siehe Tabelle 5).

Ergebnisse

	gesamt	mit Sternumfraktur	ohne Sternumfraktur	p-Wert
GCS (Ø/sd)	8,3	8,5/ 5,7	8,3/ 5,7	0,792
Krankenhausaufenthaltsdauer in Tagen (Ø/sd)	21	22,6/ 16,3	20,9/ 18,3	0,526
Intubationsdauer in Tagen (Ø/sd)	7,7	10,7/ 11,7	7,2/ 9,9	0,018
Intensivstationsaufenthalt (n/%)	346	55/ 15,9	291/ 84,1	0,053
Tage auf Intensivstation (Ø/sd)	12,7	16,9/ 14,1	12,0/ 12,1	0,008
Innerklinische Mortalität (n/%)	61	11/ 18,0	50/ 82,0	0,472
Zusätzliche Verletzungen (n/%)	361	55/15,2	306/ 84,8	0,397

Tabelle 5. Klinisches Ergebnis.

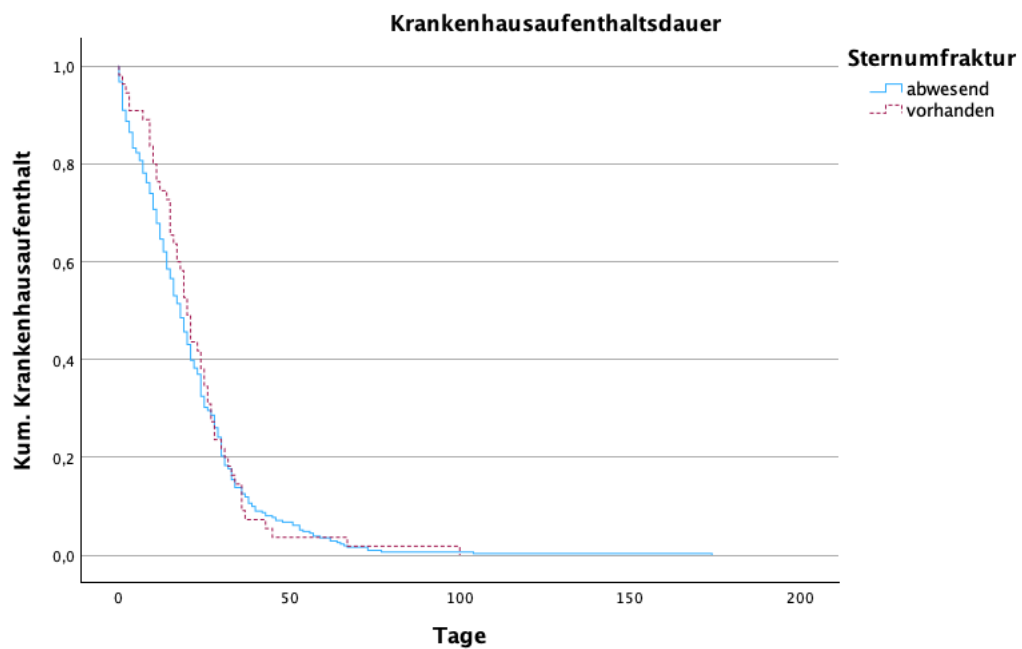


Abbildung 1. Kaplan-Meier-Kurve zur gesamten Krankenhausaufenthaltsdauer zwischen Patienten mit vorhandener und abwesender begleitender Sternumfraktur

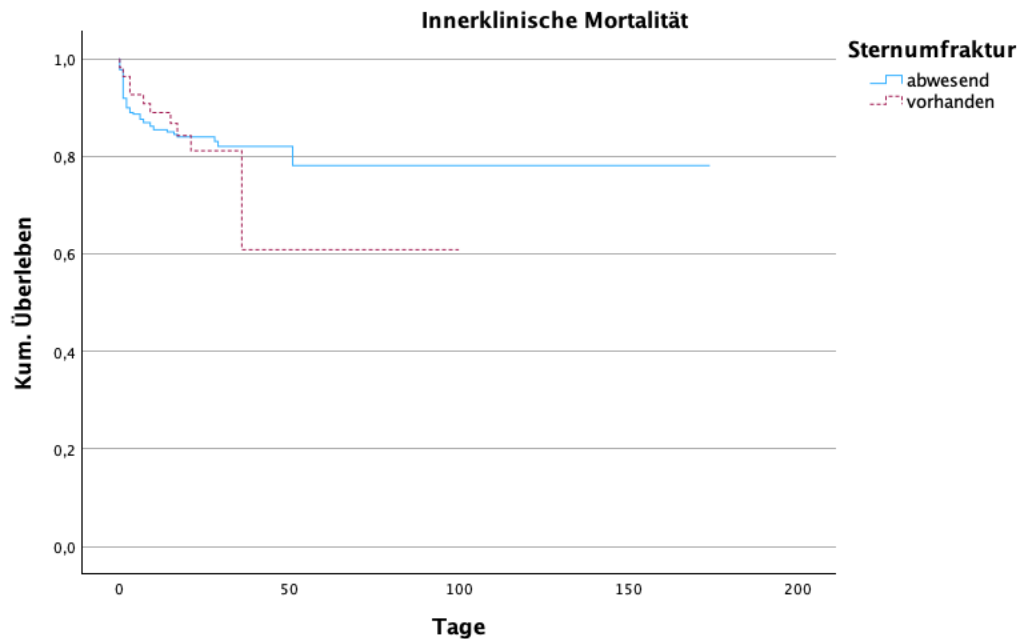


Abbildung 2. Kaplan-Meier-Kurve zur innerklinischen Mortalität zwischen Patienten mit vorhandener und abwesender begleitender Sternumfraktur.

4.5 Operatives Management und Ergebnis

Insgesamt wurden 261 Patienten mittels einer initialen operativen Stabilisierung im Sinne eines Damage-Control-Management versorgt. Patienten mit 4SF erhielten signifikant häufiger eine initiale operative Stabilisierung im Vergleich zur BWF-Gruppe ($p = 0,012$).

Eine operative Stabilisierung der Wirbelsäule wurde bei 129 Patienten durchgeführt. Auch dieser operative Eingriff erfolgte bei Patienten mit 4SF signifikant häufiger ($p = 0,020$).

Der operative Zugangsweg zur Wirbelsäule war in 123 Fällen dorsal, davon 27 Fälle mit 4SF. In 2 Fällen wurde ein ventraler und in 4 Fällen ein dorsoventraler Zugang gewählt, in diesen Gruppen trat keine 4SF auf. Die Wahl des operativen Zugangsweges unterschied sich nicht signifikant zwischen Patienten mit und ohne 4SF ($p = 0,055$).

Auch die Anzahl der fusionierten Wirbelsäulensegmente unterschied sich nicht signifikant bei Patienten mit 4SF im Vergleich zu Patienten mit BWF ($4,6 \pm 2,2$ vs. $4,1 \pm 1,9$; $p = 0,248$).

Von den insgesamt 129 operativ stabilisierten Patienten erhielten 27 eine Kurzsegment- und 102 eine Langsegmentinstrumentation. Unter den Kurzsegmentinstrumentationen befanden sich 5 Patienten mit 4SF und 22 Patienten mit BWF. Bei den Langsegmentinstrumentationen lag in 22 Fällen eine 4SF vor, während 80 Patienten eine BWF aufwiesen. Die Instrumentationslänge war nicht signifikant mit dem Vorliegen einer 4SF assoziiert ($p = 0,729$).

Ergebnisse

Weitere wirbelsäulenbezogene Eingriffe wurden in 8 Fällen als Laminektomie und in 3 Fällen als Vertebroplastie durchgeführt und unterschieden sich nicht signifikant zwischen Patienten mit und ohne 4SF ($p = 0,561$).

Die postoperative Intubationsdauer war in der 4SF-Gruppe gegenüber der BWF-Vergleichsgruppe signifikant verlängert ($10,9 \pm 11,0$ Tage vs. $5,1 \pm 7,9$ Tage; $p = 0,002$) (siehe Tabelle 6) und wurde in einer Kaplan-Meier-Kurve dargestellt (siehe Abbildung 3).

	gesamt	mit Sternumfraktur	ohne Sternumfraktur	p-Wert
Operative Stabilisation (n/%)	261	47/ 18,0	214/ 82,0	0,012
Operative Stabilisation Wirbelsäule (n/%)	129	27/ 20,9	102/ 79,1	0,020
Zugangsweg Wirbelsäule (n/%)				0,055
dorsal	123	27/ 22,0	96/ 78,0	
ventral	2	0/ 0,0	2/ 100,0	
dorsoventral	4	0/ 0,0	4/ 100,0	
Fusionierte Segmente (Ø/sd)	4,2	4,6/ 2,2	4,1/ 1,9	0,248
Instrumentationslänge (n/%)				0,729
Kurzsegment	27	5/ 18,5	22/ 81,5	
Langsegment	102	22/ 21,6	80/ 78,4	
Operatives Verfahren Wirbelsäule (n/%)				0,561
Laminektomie	8	2/ 25,0	6/ 75,0	
Vertebroplastie	3	0/ 0,0	3/ 100,0	
Intubationstage postoperativ (Ø/sd)	6,3	10,9/ 11,0	5,1/ 7,9	0,002

Tabelle 6. Operatives Management und Ergebnis.

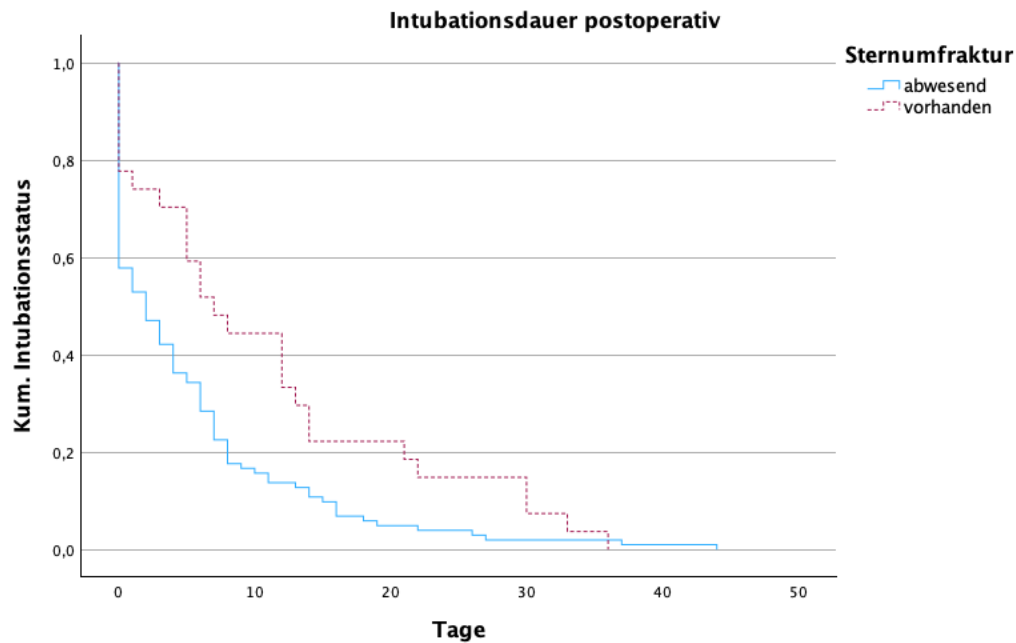


Abbildung 3: Kaplan-Meier-Kurve zur postoperativen Intubationsdauer bei Patienten mit thorakaler Wirbelsäulenfraktur und vorhandener bzw. abwesender begleitender Sternumfraktur.

4.6 Risikofaktoren für Mortalität

In der 4SF-Subgruppe wurden verschiedene potenzielle Risikofaktoren in Bezug auf die Mortalität untersucht. Mehrere Variablen waren signifikant mit einem erhöhten Sterberisiko assoziiert. Patienten über 64 Jahre wiesen eine signifikant erhöhte Mortalitätsrate von 47,1 % auf ($p < 0,001$). Ebenso waren thorakale und/oder abdominelle Begleitverletzungen mit einer signifikant höheren Mortalität assoziiert ($p = 0,044$). Darüber hinaus zeigte die Dauer der postoperativen Intubation eine signifikante Assoziation mit der Mortalität. Verstorbene Patienten waren im Mittel 24,8 Tage intubiert, während die durchschnittliche Intubationsdauer bei 4SF-Patienten insgesamt 10,9 Tage betrug ($p = 0,024$).

Für eine Vielzahl weiterer untersuchter Faktoren konnte hingegen kein statistisch signifikanter Zusammenhang mit der Mortalität nachgewiesen werden. Zwischen männlichen (18,6 %) und weiblichen (25,0 %) Patienten bestand kein signifikanter Unterschied in der Mortalität ($p = 0,624$). Auch die Frakturhöhe der Wirbelsäule zeigte keinen signifikanten Einfluss. Patienten mit Frakturen im oberen bzw. mittleren Brustwirbelsäulenabschnitt (Th1–Th7) wiesen die höchste Mortalität auf (28,6 %), gefolgt von Patienten mit kombinierten Frakturen in beiden thorakalen Abschnitten (16,7 %), während in der Gruppe mit ausschließlich unteren

Brustwirbelsäulenfrakturen (Th8–Th12) kein Todesfall auftrat. Diese Unterschiede erreichten jedoch keine statistische Signifikanz ($p = 0,160$).

Auch die Frakturmorphologie nach AO-Spine-Klassifikation war nicht signifikant mit der Mortalität assoziiert ($p = 0,326$). Patienten mit Luxationsverletzungen (Typ C) zeigten die höchste Mortalität (33,3 %), gefolgt von Patienten mit Kompressionsfrakturen (Typ A; 17,5 %), während bei Distraktionsverletzungen (Typ B) keine Todesfälle auftraten. Aber auch diese Unterschiede waren statistisch nicht signifikant.

Weder das Vorliegen eines Schädel-Hirn-Traumas ($p = 0,686$) noch begleitende Thoraxfrakturen ($p = 0,204$) waren mit einer signifikant erhöhten Mortalität verbunden. Ebenfalls ohne signifikanten Einfluss blieben weitere Verletzungen wie Rippenfrakturen ($p = 0,536$), Clavikulafrakturen ($p = 1,0$), Skapulafrakturen ($p = 1,0$), Frakturen der oberen Extremitäten ($p = 0,877$) oder der unteren Extremitäten ($p = 0,666$). Gleiches galt für interventions- oder komplikationsbezogene Variablen wie die Anlage einer Thoraxdrainage ($p = 0,682$), Aortenrupturen ($p = 0,471$), Leberlazerationen ($p = 0,299$), Milzlazerationen ($p = 0,866$) sowie instabile Beckenringfrakturen ($p = 0,471$).

Auch Parameter des stationären Verlaufs zeigten keinen signifikanten Zusammenhang mit der Mortalität innerhalb der 4SF-Gruppe. Patienten verbrachten im Durchschnitt 22,6 Tage im Krankenhaus, verstorbene Patienten hingegen 13,5 Tage ($p = 0,255$). Die Aufenthaltsdauer auf der Intensivstation betrug bei allen Patienten durchschnittlich 16,9 Tage und bei Patienten mit tödlichem Verlauf 14,1 Tage, wobei kein signifikanter Unterschied bestand ($p = 0,504$).

Zusammenfassend erwiesen sich höheres Alter ($p < 0,001$), das Vorliegen thorakaler und/oder abdomineller Begleitverletzungen ($p = 0,044$) sowie eine verlängerte postoperative Intubationsdauer ($p = 0,024$) als wesentliche Risikofaktoren für die Mortalität bei Patienten mit kombinierter 4SF. Die übrigen untersuchten Variablen zeigten keinen signifikanten Einfluss auf die Mortalität (siehe Tabelle 7).

	gesamt	Mortalität	p-Wert
Alter ≥ 65 Jahre (n/%)	17	8/ 47,1	$<0,001$
Geschlecht (n/%)			0,624
Männlich	43	8/ 18,6	
Weiblich	12	3/ 25,0	
Höhe der Brustwirbelsäulenfraktur (n/%)			0,160
obere/ mittlere BWS (Th1–Th7)	28	8/ 28,6	
untere BWS (Th8–Th12)	9	0/ 0,0	

beide Abschnitte BWS	18	3/ 16,7	
Frakturmorphologie (n/%)			0,326
AO Spine Typ A	40	7/ 17,5	
AO Spine Typ B	3	0/ 0,0	
AO Spine Typ C	12	4/ 33,3	
SHT (n/%)	27	6/ 22,2	0,686
Thorax/ Abdominalverletzung (n/%)	54	10/ 18,5	0,044
Begleitende Thoraxfraktur (n/%)	42	10/ 23,8	0,204
Rippenfraktur (n/%)	41	9/ 22,0	0,536
Clavikulafraktur (n/%)	10	2/ 20,0	1,0
Skapulafraktur (n/%)	5	1/ 20,0	1,0
Thoraxdrainagenanlage (n/%)	23	4/ 17,4	0,682
Aortenruptur (n/%)	2	0/ 0,0	0,471
Leberlazeration (n/%)	4	0/ 0,0	0,299
Milzlazeration (n/%)	11	2/ 18,2	0,866
Instabile (Typ B/ C) Beckenringfraktur(n/%)	2	0/ 0,0	0,471
Fraktur obere Extremität (n/%)	14	3/ 21,4	0,877
Fraktur untere Extremität (n/%)	18	3/ 16,7	0,666
Krankenhausaufenthaltsdauer in Tagen (Ø/sd)	22,6	13,5/ 13,1	0,255
Tage auf Intensivstation (Ø/sd)	16,9	14,1/ 14,0	0,504
Intubationstage postoperativ (Ø/sd)	10,9	24,8/ 10,5	0,024

Tabelle 7. Risikofaktoren für Mortalität bei zusätzlicher Sternumfraktur.

4.7 Regressionsanalyse für unabhängige Faktoren

In der multivariaten logistischen Regressionsanalyse war das Vorliegen einer Sternumfraktur nicht mit einer erhöhten innerklinischen Mortalität assoziiert (aOR = 1,0; $p = 0,976$). Die innerklinische Mortalität war hingegen unabhängig mit einem Alter ≥ 65 Jahre (aOR = 8,7; $p < 0,001$) sowie einem erhöhten ISS (aOR = 1,1; $p < 0,001$) assoziiert. Eine Rückenmarksverletzung (aOR = 2,2; $p = 0,288$) hatte ebenfalls keinen signifikanten Einfluss. Bezüglich der Intubationsdauer waren ein Alter ≥ 65 Jahre ($\beta +2,5$ Tage; $p = 0,037$), die Schwere der nach AO-Spine-Klassifikation eingestuften Frakturmorphologie ($\beta +1,7$ Tage; $p = 0,033$), das Vorliegen einer Thorax- und/oder Abdominalverletzung ($\beta +3,4$ Tage; $p = 0,014$) sowie eine Milzlazeration ($\beta +3,7$ Tage; $p = 0,024$) signifikant mit einer längeren Intubationsdauer assoziiert. Assoziationen mit einem SHT ($\beta +2,0$ Tage; $p = 0,058$) oder dem ISS ($\beta +0,1$ Tage pro Punkt; $p = 0,093$) erreichten keine statistische Signifikanz. Andere

Verletzungen wie Aortenruptur, Leberlazeration, Sternumfraktur sowie instabile (Typ B/ C) Beckenringfraktur zeigten keine signifikanten Zusammenhänge ($p > 0,05$).

Die Krankenhausaufenthaltsdauer wurde signifikant durch Aortenrupturen ($\beta +21,6$ Tage; $p < 0,001$), Leberlazerationen ($\beta +10,4$ Tage; $p < 0,001$) sowie instabile (Typ B/ C) Beckenringfrakturen ($\beta +6,8$ Tage; $p = 0,012$) verlängert. Der ISS war nicht mit der Dauer des Krankenhausaufenthalts ($\beta -0,1$ Tage pro Punkt; $p = 0,109$) assoziiert und Sternumfrakturen zeigten keinen signifikanten Effekt ($\beta +3,2$ Tage; $p = 0,221$).

Die Wahrscheinlichkeit einer Wirbelsäulenstabilisierung war bei einem Alter ≥ 65 Jahre (aOR = 0,5; $p = 0,016$) sowie insbesondere bei Vorliegen einer Rückenmarksverletzung (aOR = 0,2; $p < 0,001$) signifikant reduziert. Der ISS zeigte zwar einen signifikanten Einfluss ($p = 0,003$), veränderte die Wahrscheinlichkeit einer Stabilisierung jedoch nicht maßgeblich (aOR $\approx 1,0$).

Im Gegensatz dazu bestand bei Sternumfrakturen ein Trend zu erhöhter Wahrscheinlichkeit einer Wirbelsäulenstabilisierung (aOR = 1,9), der jedoch keine statistische Signifikanz erreichte ($p = 0,065$).

Weder Frakturmorphologie, Sternumfraktur, Alter, ISS noch das Vorliegen einer Rückenmarksverletzung hatten einen signifikanten Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit einer Langsegment-Instrumentation ($p > 0,05$).

Zuletzt war das Vorliegen einer Sternumfraktur nicht signifikant mit einem Alter ≥ 65 Jahre, dem ISS, einer Aortenruptur oder einer Leberlazeration assoziiert (alle $p > 0,05$). Dagegen bestand eine signifikant positive Assoziation mit Thorax- und/oder Abdominalverletzungen (aOR = 16,6; $p = 0,006$), während instabile (Typ B/ C) Beckenringfrakturen eine inverse Assoziation aufwiesen (aOR = 0,2; $p = 0,013$) (siehe Tabelle 8).

Ergebnis	Prädiktor	aOR/ β	p-Wert
Innerklinische Mortalität	Alter ≥ 65 Jahre	8,7	<0,001
	ISS	1,1	<0,001
	Rückenmarksverletzung	2,2	0,288
	Sternumfraktur	1,0	0,976
Intubationsdauer	Alter ≥ 65 Jahre	2,5	0,037
	ISS	0,1	0,093
	Frakturmorphologie	1,7	0,033
	SHT	2,0	0,058
	Thorax/ Abdominalverletzung	3,4	0,014
	Aortenruptur	5,1	0,134
	Milzlazeration	3,7	0,024

Ergebnisse

	Leberlazeration	2,3	0,183
	Sternumfraktur	2,1	0,150
	Instabile (Typ B/ C)	0,3	0,841
	Beckenringfraktur		
Krankenhausaufenthaltsdauer	Aortenruptur	21,6	<0,001
	Leberlazeration	10,4	<0,001
	Instabile (Typ B/ C)	6,8	0,012
	Beckenringfraktur		
Wirbelsäulenstabilisierung	ISS	-0,1	0,109
	Sternumfraktur	3,2	0,221
	Alter ≥ 65 Jahre	0,5	0,016
	ISS	1,0	0,003
Langsegment-Instrumentation	Sternumfraktur	1,9	0,065
	Rückenmarksverletzung	0,2	<0,001
	Frakturmorphologie	1,6	0,148
	Sternumfraktur	1,1	0,927
Sternumfraktur	Alter ≥ 65 Jahre	1,0	0,983
	ISS	1,0	0,958
	Rückenmarksverletzung	0,7	0,604
	Alter ≥ 65 Jahre	1,4	0,314
	ISS	1,0	0,153
	Thorax/ Abdominalverletzung	16,6	0,006
	Aortenruptur	3,1	0,217
	Leberlazeration	0,4	0,089
	Instabile (Typ B/ C)	0,2	0,013
	Beckenringfraktur		

Tabelle 8. Multivariable logistische Regression für unabhängige Faktoren.

5. Diskussion

5.1 Zentrale Ergebnisse dieser Studie

Frakturen der vierten Säule bei thorakalen Wirbelsäulentraumata (4SF) deuten auf hochenergetische Unfallmechanismen hin. Sie stehen in enger Assoziation mit AO Spine Typ C Verletzungen der Wirbelsäule mit verlängerter Intubationsdauer sowie längerem Intensivaufenthalt. Zudem treten 4SF häufig im Zusammenhang mit thorako-abdominellen Begleitverletzungen auf. Diese Verletzungsmuster gehen mit einer erhöhten Morbidität und Mortalität einher, insbesondere bei älteren Patienten, und unterstreichen somit die Notwendigkeit einer besonders aufmerksamen, interdisziplinären Versorgung.

5.2 Demographie

Die Literatur zu 4SF ist bislang sehr begrenzt. Nur wenige Arbeiten haben diese spezielle Verletzungskonstellation systematisch untersucht (98). Lediglich einzelne Studien, wie die von Breitenbach et al. und Morgenstern et al., analysierten zusätzlich die damit assoziierten Begleitverletzungen sowie das klinische Behandlungsergebnis (6,7). Auf Grundlage dieser Arbeiten lassen sich die vorliegenden Ergebnisse gut in den bestehenden Forschungskontext einordnen.

Die von Breitenbach et al. analysierte Kohorte umfasste 107 Patienten und zeigte somit eine kleinere Kohorte als die vorliegende Untersuchung (6). Dennoch zeigen sich hinsichtlich bestimmter demographischer Merkmale deutliche Übereinstimmungen. So lag der Anteil begleitender Sternumfrakturen mit 18,7 % in einem ähnlichen Bereich wie in unserer Kohorte mit 15,0 % (6). Auch das durchschnittliche Alter der Patienten zeigte mit 48,7 Jahren in der vorliegenden Studie eine gute Vergleichbarkeit mit dem von Breitenbach et al. berichteten Mittelwert von 53,2 Jahren (6). Auffällig war, dass mit 76,2 % in unserer Kohorte überwiegend männliche Patienten betroffen waren. Dieses Ergebnis stimmt ebenfalls mit den von Breitenbach et al. berichteten 67,3 % überein (6). Ein erhöhtes Auftreten von Polytraumata bei männlichen Patienten wurde auch in bisherigen Studien beschrieben und bestätigt somit die vorliegende Beobachtung (6,7,99). Insgesamt lassen sich die vorliegenden demographischen Merkmale somit gut mit den bisher publizierten Daten in Einklang bringen.

Aufbauend auf diesem Vergleich wurde in der vorliegenden Kohorte die Altersgruppe über 64 Jahre gesondert analysiert. In der Auswertung konnte hierbei jedoch keine statistische Signifikanz für das Vorliegen einer 4SF in dieser Altersgruppe nachgewiesen werden ($p = 0,260$).

5.3 Unfallmechanismen und Frakturmuster

In Übereinstimmung mit der Literatur stellten die häufigsten Unfallmechanismen Verkehrsunfälle, gefolgt von Stürzen aus großer Höhe, in beiden unserer Gruppen dar (6,88,100–102).

Über die Ergebnisse der demografischen Analyse hinaus zeigte sich, dass die Höhe des Frakturniveaus eine bedeutende Rolle für das Auftreten einer 4SF darstellt. Patienten mit oberen bzw. mittleren (Th1–Th7) oder panthorakalen Wirbelsäulenfrakturen wiesen deutlich häufiger zusätzliche 4SF auf als solche mit isolierten unteren thorakalen Frakturen (Th8 –Th12) ($p = 0,018$). Dieses Ergebnis entspricht den Beobachtungen aus der Studie von Breitenbach et al. (6). Eine mögliche Erklärung liegt in der direkten anatomischen Verbindung des oberen Sternums über die Rippen mit der oberen Brustwirbelsäule (Th1–Th7), wodurch die beim Trauma einwirkende Energie entlang dieser Strukturen übertragen wird (8). Diese Befunde untermauern das Konzept der „vierten Säule“ des Thorax nach Berg, bei dem Sternum und Rippen als ventrale Stabilitätsstrukturen die Brustwirbelsäule biomechanisch unterstützen und Frakturen des Sternums auf ein funktionelles Versagen des thorakalen Rings hinweisen (93,103).

Auch die Frakturmorphologie zeigte eine statistisch signifikante Assoziation. Etwa ein Drittel der Patienten mit einer AO Spine Typ C Fraktur wiesen gleichzeitig eine 4SF auf. Diese Assoziation kann leitend in der klinischen Diagnostik als Hinweis für das Vorliegen einer Sternumfraktur sein und darüber hinaus auf eine erhebliche Krafteinwirkung auf den Thorax schließen lassen (88). Eine weiterführende Untersuchung der sich im Thorax befindlichen Strukturen und Organe auf zusätzliche Verletzungen erscheint daher sinnvoll (89,102).

In unserem Kollektiv zeigten sich Sternumfrakturen nur selten in Kombination mit AO Spine Typ B Verletzungen der Brustwirbelsäule. Vor dem Hintergrund, dass die meisten Verletzungen im Rahmen von Verkehrsunfällen entstanden und gurtbedingte Traumata sowohl Flexions-Distraktionsverletzungen der Wirbelsäule als auch Sternumfrakturen verursachen können, wäre eigentlich eine höhere Rate begleitender Sternumfrakturen zu erwarten (90,104,105). AO Spine Typ B Verletzungen treten jedoch typischerweise im Bereich der

thorakolumbalen Übergangsregion (Th11–L2) auf. Dies wird durch die kohortenbasierte Analyse von Rao et al. gestützt, in der 13 von 17 Flexions-Distraktionsverletzungen in diesem Abschnitt der Wirbelsäule lokalisiert waren. (104). In diesem Bereich besteht keine direkte anatomische Verbindung zum Sternum, da die 11. und 12. Rippe als sogenannte „fliegende“ Rippen nicht mit dem Sternum artikulieren. Diese anatomische Konstellation könnte die in unserer Kohorte beobachtete niedrigere Inzidenz begleitender Sternumfrakturen bei AO Spine Typ-B-Verletzungen erklären.

Obwohl Rückenmarksverletzungen numerisch häufiger bei Patienten mit 4SF beobachtet wurden (24 % vs. 14,4 %), zeigte sich kein statistisch signifikanter Unterschied ($p = 0,193$).

5.4 Begleitverletzungen bei 4SF

Die Analyse der Begleitverletzungen ergab hingegen eine sehr hohe ($p < 0,001$) Assoziation zu thorakalen und/oder abdominellen Verletzungen. Dieses Ergebnis steht im Einklang mit den Beobachtungen von Scheyerer et al., die zeigen konnten, dass Sternumfrakturen in der Regel Ausdruck einer hochenergetischen Traumamechanik sind und häufig mit weiteren Verletzungen im Thorax- und/oder Abdominalbereich einhergehen (106). Ergänzend dazu konnten HersHKovitz et al. zeigen, dass thorakale Wirbelsäulenfrakturen ebenfalls ein signifikanter Prädiktor für das Vorliegen von Abdominalverletzungen sind (107).

Ebenfalls konnte eine signifikante Assoziation von 4SF mit erhöhtem Auftreten von Rippenfrakturen ($p = 0,028$) sowie Clavikulafrakturen ($p = 0,040$) festgestellt werden. Diese Befunde unterstützen die Annahme, dass Sternumfrakturen typischerweise im Kontext hochenergetischer stumpfer Thoraxtraumata auftreten (87,89). Etwa bei Verkehrsunfällen wird die vordere Brustwand einer erheblichen Krafteinwirkung ausgesetzt, häufig durch den Sicherheitsgurt oder den Aufprall auf das Lenkrad (90,105). Zudem stützen diese Ergebnisse erneut die von Berg beschriebene Theorie der Vier-Säulen-Struktur des Thorax, und betonen noch einmal die enge Verbundenheit der sich im Thorax befindlichen Strukturen und die Umverteilung von Polytrauma-Kräften unter diesen (93).

Begleitende thorakale Frakturen ($p = 0,059$) sowie die Anlage von Thoraxdrainagen ($p = 0,072$) zeigten keine statistische Signifikanz bei Patienten mit 4SF. Dennoch könnten sie auf eine klinisch relevante Verletzungsschwere hinweisen und sollten in Studien mit größeren Fallzahlen weiter untersucht werden.

Interessanterweise bestand eine inverse Assoziation zwischen dem Vorliegen einer 4SF und einer instabilen Beckenringfraktur (aOR = 0,2; $p = 0,015$). Obwohl Verkehrsunfälle und Stürze aus großer Höhe die häufigsten Ursachen für beide dieser Verletzungstypen darstellen, könnten Unterschiede in der Aufprallrichtung und der Verteilung der Krafteinwirkung die begrenzte Überschneidung in unserer Studienpopulation erklären (6,108,109). Frontale Verkehrskollisionen gehen häufig mit einer vorwiegend horizontalen Krafteinwirkung auf den Thorax einher und begünstigen dadurch das Auftreten von Sternumfrakturen (110). Stürze aus der Höhe sind hingegen in der Regel durch vertikale Dezelerationskräfte gekennzeichnet, die insbesondere mit Beckenringverletzungen assoziiert sind (111). Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass Hochenergie-Traumata zwar typischerweise bestimmte Körperregionen betreffen, weitere Verletzungen jedoch ebenfalls auftreten können. (4).

5.5 Klinischer Verlauf und operatives Management

Die Analyse des klinischen Gesamtzustands zeigte, dass Patienten mit 4SF im Vergleich zu Personen mit isolierten Wirbelsäulenfrakturen einen höheren Bedarf an intensivmedizinischer Versorgung aufwiesen. Obwohl sich der Glasgow Coma Scale (GCS) bei Aufnahme und die Mortalitätsraten zwischen den Gruppen nicht signifikant unterschieden, benötigten Patienten mit 4SF signifikant längere Intubationszeiten ($p = 0,018$) sowie längere Aufenthalte auf der Intensivstation ($p = 0,008$). Diese Ergebnisse spiegeln die erhöhte klinische Komplexität und die Schwere der Thoraxtraumata in dieser Kohorte wider (7,99).

Die postoperative Intubationszeit stellte einen zusätzlichen prognostischen Faktor dar, da verstorbene Patienten im Mittel deutlich länger intubiert waren als überlebende Patienten der Gesamtgruppe mit 4SF (24,8 vs. 10,9 Tage; $p = 0,024$). Dieser Zusammenhang veranschaulicht, dass eine verlängerte Beatmungsdauer nach Operation nicht nur die Schwere der initialen Verletzung widerspiegelt. Vielmehr kann sie auch auf das Auftreten sekundärer Komplikationen wie respiratorisches Versagen oder Multiorganversagen hinweisen (112,113). Obwohl die Dauer auf Intensivstation verlängert war, verlängerte sich die gesamte Krankenhausaufenthaltsdauer nicht signifikant ($p = 0,526$). Somit lässt sich der längere Aufenthalt auf der Intensivstation vor allem durch den erhöhten postoperativen Überwachungs- und Behandlungsbedarf erklären, ohne dass sich dadurch zwangsläufig der gesamte Krankenhausaufenthalt verlängert.

Ebenso zeigte sich bei der Rate der Intensivaufnahmen eine höhere Häufigkeit in der Gruppe mit 4SF ($p = 0,053$), die jedoch keine statistische Signifikanz erreichte.

Bei der Auswertung des operativen Managements und der klinischen Ergebnisse zeigten Patienten mit kombinierter 4SF einen deutlich komplexeren postoperativen Verlauf im Vergleich zu Personen mit BWF. Besonders auffällig war die signifikant längere Intubationsdauer nach der Operation in der Gruppe mit 4SF (10,9 vs. 5,1 Tage; $p = 0,002$), was auf eine erhöhte postoperative respiratorische Beeinträchtigung oder thorakale Instabilität hinweist, vermutlich bedingt durch die zusätzliche Schädigung der vorderen Brustwandstrukturen (114,115).

Des Weiteren erfolgten bei Patienten mit 4SF signifikant häufiger operative Stabilisierungseingriffe im Sinne des Damage-Control-Managements ($p = 0,012$), darunter auch Wirbelsäulenstabilisierungen ($p = 0,020$), was auf ausgedehntere oder instabilere Frakturkonfigurationen hindeutet (7,87).

Bemerkenswerterweise nähert sich die insgesamt erreichte Intubationsdauer nach Operation von 6,3 Tagen, den 5,3 Tagen von Breitenbach et al. berichtet, an (6). Dies zeigt die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und betont die Notwendigkeit und erhöhte Aufmerksamkeit bei der respiratorischen Unterstützung von Patienten mit 4SF und BWF.

Auffällig ist, dass der operative Zugangsweg bei allen Patienten mit 4SF ausschließlich dorsal gewählt wurde. Dies könnte sowohl anatomische als auch klinische Gründe haben, da die langstreckige dorsale Instrumentierung als etablierte operative Therapieoption für diese Verletzungskonstellationen gilt (116,117).

Insgesamt verdeutlichen diese Ergebnisse, dass das Vorliegen einer Sternumfraktur nicht nur eine größere Verletzungsschwere widerspiegelt, sondern auch mit einer erhöhten postoperativen Behandlungsbelastung einhergeht, insbesondere im Hinblick auf die respiratorische Unterstützung und die chirurgische Komplexität (6,7).

5.6 Risikofaktoren für Mortalität bei 4SF

Zur Beurteilung des Mortalitätsrisikos von Patienten mit 4SF erwies sich ein höheres Lebensalter als der wichtigste Prädiktor. Beinahe die Hälfte (47,1 %) der über 64-jährigen Patienten verstarb während des Krankenhausaufenthalts. Dieses Ergebnis steht im Einklang mit bisherigen Erkenntnissen der Traumaforschung (81). Eine derartig ausgeprägte Mortalität wurde jedoch für Patienten mit 4SF in dieser Altersgruppe bislang nicht beschrieben. Eine Sterblichkeit von 47,1 % bei Patienten in dieser Altersgruppe veranschaulicht das deutlich

erhöhte Risiko speziell bei Patienten mit 4SF. Die Ergebnisse unterstreichen die klinische Relevanz von 4SF und ihrer zugehörigen Begleitverletzungen als Indikatoren erhöhter Komplexität und Verwundbarkeit (6,81).

Entsprechend bleibt bei Polytraumapatienten fortgeschrittenes Alter ein wesentlicher Risikofaktor für ungünstige Verläufe, bedingt durch eine erhöhte Frailty, bestehende Komorbiditäten und eine erhöhte Anfälligkeit für Komplikationen (71,75,77,118).

Darüber hinaus war das Vorliegen begleitender thorakaler und/oder abdomineller Verletzungen signifikant mit einer erhöhten Mortalität assoziiert ($p = 0,044$), was zusätzlich das letale Potenzial eines Polytraumas hervorhebt (81,119).

Andere Parameter, wie Geschlecht ($p = 0,624$), Frakturniveau ($p = 0,160$), Frakturmorphologie ($p = 0,326$), das Vorliegen eines Schädel-Hirn-Traumas ($p = 0,686$) oder weiterer Begleitfrakturen, zeigten in dieser Kohorte keine signifikante Assoziation mit der Mortalität. Bei Patienten mit oberen oder mittleren thorakalen Frakturen und AO Spine Typ C Verletzungen, zeigte sich ebenfalls keine statistische Signifikanz für eine erhöhte Mortalität. Bemerkenswerterweise trat kein Todesfall bei Patienten mit unteren thorakalen Frakturen ($p = 0,160$), AO Spine Typ B Verletzungen ($p = 0,326$), instabilen Beckenringverletzungen ($p = 0,471$), Aortenrupturen ($p = 0,471$) oder Leberlazerationen ($p = 0,299$) auf.

Insgesamt deuten diese Ergebnisse darauf hin, dass in dieser Patientenkohorte mit 4SF insbesondere höheres Alter, zusätzliche intrathorakale und/oder intraabdominelle Verletzungen sowie eine verlängerte postoperative Intubationsdauer die entscheidenden Risikofaktoren für einen Todesfall während des Krankenhausaufenthalts darstellen. Für die klinische Praxis ergibt sich daraus die Notwendigkeit einer individualisierten und risikoadaptierten Therapieplanung sowie einer darauf abgestimmten chirurgischen Strategie bei Polytraumapatienten mit 4SF (7,120).

5.7 Multivariate Risikofaktorenanalyse

Ziel der multivariaten Regressionsanalyse war es, Confounder zu kontrollieren und unabhängige Prädiktoren für Mortalität, Intubationsdauer, Krankenhausaufenthalt, das Erfordernis einer Wirbelsäulenstabilisierung, die Durchführung einer Langsegmentinstrumentation und das Vorliegen einer Sternumfraktur zu ermitteln.

Das Alter ≥ 65 Jahre erwies sich als signifikanter Risikofaktor für die innerklinische Mortalität (aOR 8,7; $p < 0,001$). Dieses Ergebnis unterstreicht die bereits in der Analyse der

Risikofaktoren beobachtete Assoziation zwischen höherem Lebensalter und innerklinischer Sterblichkeit. Patienten im Alter von 65 Jahren oder älter weisen demnach etwa 8,7-fach höhere Odds auf, während des Krankenhausaufenthalts zu versterben, verglichen mit jüngeren Patienten. Auch dieses Resultat steht im Einklang mit bisherigen Studien, die eine erhöhte Letalität älterer, multimorbider Traumapatienten aufzeigen (71,77). Neben der höheren Komorbiditätsrate spielt dabei vermutlich auch die reduzierte physiologische Reserve eine wesentliche Rolle (75,118).

Der ISS war ebenfalls ein unabhängiger Prädiktor für Mortalität (aOR 1,1; $p < 0,001$) und spiegelt die bekannte Assoziation zwischen Gesamtverletzungsschwere und Sterberisiko wider (15,121). Weder das Vorliegen einer Rückenmarksverletzung ($p = 0,288$) noch einer Sternumfraktur ($p = 0,976$) zeigte einen signifikanten Einfluss auf die Mortalität. Somit kann aus unserer Analyse vermutet werden, dass Rückenmarksverletzungen und Sternumfrakturen bei Polytraumapatienten nicht direkt die Mortalität bestimmen, sondern ihre Bedeutung im Rahmen des gesamten Verletzungsmusters und assoziierter Komplikationen liegt (122,123).

Hinsichtlich der Intubationsdauer zeigten sich mehrere signifikante Einflussgrößen. Ältere Patienten (≥ 65 Jahre) wurden im Mittel 2,5 Tage länger beatmet als jüngere Patienten ($\beta +2,5$; $p = 0,037$), was auf eine altersabhängige Reduktion der pulmonalen Reserve und eine verlangsamte Regenerationsfähigkeit hindeutet (124,125). Zudem waren Frakturen mit komplexer Morphologie entsprechend der AO Spine Klassifikation Typ B oder C ($\beta +1,7$; $p = 0,033$), Thorax- und/oder Abdominalverletzungen ($\beta +3,4$; $p = 0,014$) sowie Milzlacerationen ($\beta +3,7$; $p = 0,024$) signifikant mit einer verlängerten Intubationsdauer assoziiert. Für thorakale Verletzungen ist dieser Zusammenhang in der Literatur gut beschrieben (126,127). Für abdominelle Verletzungen hingegen liegen bislang nur wenige Daten vor, die eine vergleichbare Assoziation belegen. Die Ergebnisse könnten somit wegweisend sein, Polytraumapatienten mit 4SF-Verletzungskonstellation nicht nur hinsichtlich thorakaler, sondern auch gezielt hinsichtlich abdomineller Begleitverletzungen zu screenen.

Eine deutlich verlängerte Krankenhausaufenthaltsdauer zeigte sich bei Patienten mit zusätzlich rund 22 Tagen bei Aortenrupturen ($\beta +21,6$; $p < 0,001$), 10 Tagen bei Leberlacerationen ($\beta +10,4$; $p < 0,001$) sowie 7 Tagen bei instabilen Beckenringfrakturen ($\beta +6,8$; $p = 0,012$). Diese Verletzungen sind typischerweise mit komplexen chirurgischen Eingriffen und hohem Komplikationsrisiko verbunden, was die prolongierte Hospitalisierung erklärt (108,128,129).

Das Erfordernis einer operativen Wirbelsäulenstabilisierung war signifikant mit dem ISS (aOR 1,0; $p = 0,003$) assoziiert. Der daraus resultierende Effekt war jedoch klinisch, mit einer adjustierten Odds Ratio (aOR) von 1,0, nicht relevant. Ältere Patienten erhielten hingegen signifikant seltener eine Stabilisierung (aOR 0,5; $p = 0,016$). Dies ist möglicherweise auf ein erhöhtes perioperatives Risiko zurückzuführen, das im Rahmen einer sorgfältigen Nutzen-Risiko-Abwägung häufiger zu konservativen Behandlungsentscheidungen führte (130,131).

Eine Rückenmarksverletzung war in unserer Analyse ebenfalls mit einer geringeren Wahrscheinlichkeit einer operativen Stabilisierung verknüpft (aOR 0,2; $p < 0,001$).

Obwohl operative Stabilisierung und Dekompression bei Rückenmarksverletzungen grundsätzlich als wichtige Therapieziele gelten, um neurologische Defizite zu begrenzen und das langfristige Outcome zu verbessern, spiegelt dieses Ergebnis vermutlich vor allem die klinischen Rahmenbedingungen im Polytraumakontext wider (132). Thorakale Rückenmarksverletzungen treten häufig gemeinsam mit schwerem Thoraxtrauma, hämodynamischer Instabilität und erhöhtem perioperativem Risiko auf. In solchen Situationen wird zunächst die Wiederherstellung der hämodynamischen und respiratorischen Stabilität priorisiert, wodurch operative Eingriffe verzögert oder initial zurückgestellt werden können (133). Leitlinien empfehlen zudem in der Akutphase eine Anhebung des mittleren arteriellen Drucks ($\text{MAP} \geq 75\text{--}80 \text{ mmHg}$), um den Perfusionsdruck im Spinalkanal zu optimieren und ischämiebedingte neurologische Defizite zu verringern (134). Während der konkrete Nutzen dieses Ansatzes weiterhin diskutiert wird, könnte er die zeitnahe operative Versorgung zusätzlich verzögern (135).

Der beobachtete Zusammenhang könnte daher durch selektive Behandlungsentscheidungen im Rahmen komplexer klinischer Situationen erklärt werden, bei denen perioperative Risiken und konkurrierende Therapieprioritäten den Zeitpunkt und die Art der operativen Versorgung beeinflussen (133).

Für die Indikation zur Langsegment-Instrumentation zeigten sich keine signifikanten Prädiktoren. Weder die Frakturmorphologie ($p = 0,148$), ein Alter ≥ 65 Jahre ($p = 0,983$), der ISS ($p = 0,958$) noch das Vorliegen einer Sternum- oder Rückenmarksverletzung ($p = 0,927$ bzw. $p = 0,604$) hatten einen signifikanten Einfluss auf die Entscheidungsfindung.

Das Auftreten einer Sternumfraktur war wiederum hochsignifikant mit dem Vorliegen thorakoabdomineller Verletzungen assoziiert (aOR 16,6; $p = 0,006$). Diese Assoziation spiegelt vor allem die enge anatomische und biomechanische Verknüpfung zwischen Sternumfraktur

und thorakalen Begleitverletzungen wider (87,106). Klinische Serien zeigen zudem, dass in einem kleineren, aber relevanten Anteil der Fälle auch abdominale Verletzungen auftreten, sodass eine gezielte Abdominaldiagnostik bei betroffenen Patienten sinnvoll erscheint (106,136).

Eine instabile Beckenringfraktur war dagegen mit einem deutlich reduzierten Risiko für Sternumfrakturen verbunden (aOR 0,2; $p = 0,013$), was vermutlich auf unterschiedliche Unfallmechanismen zurückzuführen ist, etwa frontaler versus vertikaler Aufprallrichtung und Kraftverteilung (108,137).

Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass Sternumfrakturen eigenständige Hochenergie-Traumamuster widerspiegeln, anstatt auf spezifische Verletzungen wie Beckenringfrakturen hinzuweisen. Das Erkennen dieser Zusammenhänge kann die frühe Diagnosestellung, die Risikoeinschätzung und das gezielte Management bei Polytraumapatienten verbessern.

5.8 Limitationen der Studie

Diese Studie weist mehrere Limitationen auf. Als retrospektive, monozentrische Analyse von Patienten, die über den Schockraum eines universitären Maximalversorgers in Deutschland aufgenommen wurden, besteht eine potenzielle Selektionsverzerrung. Die Ergebnisse sind daher nur eingeschränkt auf andere klinische Einrichtungen oder Patientengruppen übertragbar. Aufgrund des retrospektiven Studiendesigns war der Umfang der erhobenen Variablen begrenzt und Subgruppenanalysen waren durch teilweise geringe Fallzahlen eingeschränkt, was die statistische Aussagekraft einzelner Vergleiche reduziert. Rückenmarkverletzungen wurden ausschließlich als vorhanden oder nicht vorhanden erfasst, ohne weitere Differenzierung nach dem Schweregrad gemäß der ASIA-Klassifikation. Darüber hinaus waren weder genaue Informationen zum Todeszeitpunkt im Krankenhaus noch zu langfristigen klinischen Verläufen nach Entlassung verfügbar. Präklinische Einflussfaktoren wurden in dieser Analyse nicht berücksichtigt, könnten jedoch den weiteren klinischen Verlauf beeinflusst haben. Trotz sorgfältiger statistischer multivariabler Anpassung lässt sich nicht ausschließen, dass unbeachtete Einflussgrößen die Ergebnisse, vor allem hinsichtlich der Sternumfrakturen, beeinflusst haben.

Diese Einschränkungen verdeutlichen, dass prospektive, multizentrische Studien erforderlich sind, um die hier dargestellten Ergebnisse zu validieren und weiterführend zu untersuchen.

6. Zusammenfassung

Sternumfrakturen bei thorakalen Wirbelsäulentraumata (Vierte-Säule-Frakturen, 4SF) sind Indikatoren hochenergetischer Unfallmechanismen und hoher klinischer Komplexität. Sie treten häufig im Zusammenhang mit AO Spine Typ C Verletzungen, thorakoabdominellen Begleitverletzungen und einem erhöhten intensivmedizinischen Behandlungsbedarf auf. Besonders ältere Patienten zeigen eine deutlich erhöhte Mortalität.

Epidemiologisch dominieren männliche Patienten, häufig nach Verkehrsunfällen oder Stürzen aus großer Höhe. Frakturen im oberen und mittleren Brustwirbelsäulenbereich (Th1–Th7) sind signifikant häufiger mit 4SF assoziiert als Frakturen der unteren Abschnitte. Diese Beobachtung unterstützt die biomechanische Vier-Säulen Theorie des Thorax, wonach Energie entlang des Sternums, der Rippen und der Brustwirbelsäule übertragen wird (93). Eine AO-Spine-Typ-C-Frakturenmorphologie geht häufig mit 4SF einher und kann als klinischer Hinweis auf massive Krafteinwirkung dienen.

Die Analyse der Begleitverletzungen zeigt eine enge Korrelation zwischen 4SF und thorakoabdominellen Verletzungen sowie mit Rippen- und Clavikulafrakturen. Eine inverse Beziehung zu instabilen Beckenringfrakturen deutet auf unterschiedliche Unfallmechanismen hin. Patienten mit 4SF benötigen längere Intubationszeiten und Intensivaufenthalte, was die höhere Verletzungsschwere widerspiegelt, auch wenn die Krankenhausaufenthaltsdauer insgesamt nicht signifikant verlängert ist.

Patienten mit 4SF benötigten signifikant häufiger operative Eingriffe, insbesondere Wirbelsäulenstabilisierungen und wiesen eine verlängerte postoperative Beatmungsdauer auf, was die erhöhte Komplexität der Verletzungen unterstreicht.

Die Mortalität war vor allem durch ein erhöhtes Lebensalter, das Vorliegen thorakoabdomineller Begleitverletzungen sowie eine verlängerte postoperative Intubationsdauer beeinflusst.

Die multivariaten Analysen bestätigten höheres Lebensalter (≥ 65 Jahre) und ein erhöhter ISS als unabhängige Mortalitätsprädiktoren. Das Vorliegen einer 4SF selbst zeigte keinen unabhängigen Einfluss auf die Mortalität, steht jedoch für ein komplexes, häufig potenziell lebensbedrohliches Traumamuster.

Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse, dass 4SF Kennzeichen schwerer Thoraxtraumata darstellen. Sie erfordern eine sorgfältige Diagnostik thorakoabdomineller Begleitverletzungen,

eine engmaschige respiratorische Überwachung und ein interdisziplinäres Management, insbesondere bei älteren Polytraumapatienten.

Darüber hinaus unterstreichen die Erkenntnisse den Bedarf an weiteren multizentrischen Studien, um prognostische Faktoren zu präzisieren und therapeutische Strategien zu optimieren.

7. Literaturverzeichnis

1. Giannoudis VP, Rodham P, Giannoudis PV, Kanakaris NK. Severely injured patients: modern management strategies. *EFORT Open Rev.* 2023 May 9;8(5):382-96.
2. Wohlgemut JM, Marsden MER, Stoner RS, Pisirir E, Kyrimi E, Grier G, et al. Diagnostic accuracy of clinical examination to identify life- and limb-threatening injuries in trauma patients. *Scand J Trauma Resusc Emerg Med.* 2023 Apr 7;31(1):18.
3. Krueger A, Frink M, Kiessling A, Ruchholtz S, Kühne CA. Schockraummanagement. *Chirurg.* 2013;84(5):437-50.
4. Feichtinger X, Kocijan R, Mittermayr R, Baierl A, Schanda J, Wakolbinger R, et al. Fracture patterns in patients with multiple fractures: the probability of multiple fractures and the most frequently associated regions. *Eur J Trauma Emerg Surg.* 2020 Oct;46(5):1151-8.
5. Calosevic S, Lovric Z. Prognostic significance of specific injury patterns in casualties of traffic-related accidents. *Injury.* 2015 Nov;46 Suppl 6:S27-30.
6. Breitenbach M, Phan A, Botros M, Paul D, Molinari R, Menga E, et al. The fourth column of the spine: prevalence of sternal fractures and concurrent thoracic spinal fractures. *Injury.* 2022 Mar;53(3):1062-7.
7. Morgenstern M, von Rüden C, Callsen H, Friederichs J, Hungerer S, Bühren V, et al. The unstable thoracic cage injury: the concomitant sternal fracture indicates a severe thoracic spine fracture. *Injury.* 2016 Nov;47(11):2465-72.
8. Labbe JL, Peres O, Leclair O, Goulon R, Scemama P, Jourdel F. Fractures of the upper transthoracic cage. *J Bone Joint Surg Br.* 2009 Jan;91-B(1):91-6.
9. Becker N, Hammen A, Bläsius F, Weber CD, Hildebrand F, Horst K. Effect of injury patterns on the development of complications and trauma-induced mortality in patients suffering multiple trauma. *J Clin Med.* 2023 Aug 3;12(15):5111.
10. Kroupa J. [Definition of "polytrauma" and "polytraumatism"]. *Acta Chir Orthop Traumatol Cech.* 1990 Jul;57(4):347-60.
11. Upadhyaya GK, Iyengar KP, Jain VK, Garg R. Evolving concepts and strategies in the management of polytrauma patients. *J Clin Orthop Trauma.* 2021 Jan;12(1):58-65.
12. Tscherne H. [The treatment of the seriously injured at an emergency station]. *Chirurg.* 1966 Jun;37(6):249-52.
13. Popp D, Zimmermann M, Kerschbaum M, Matzke M, Judemann K, Alt V. [Prehospital treatment of polytrauma: ongoing challenge in prehospital emergency services]. *Unfallchirurgie.* 2023 Dec;126(12):975-84.

14. Butcher NE, Balogh ZJ. Update on the definition of polytrauma. *Eur J Trauma Emerg Surg.* 2014 Apr;40(2):107-11.
15. Baker SP, O'Neill B, Haddon W, Long WB. The injury severity score: a method for describing patients with multiple injuries and evaluating emergency care. *J Trauma.* 1974 Mar;14(3):187-96.
16. Copes WS, Champion HR, Sacco WJ, Lawnick MM, Keast SL, Bain LW. The injury severity score revisited. *J Trauma.* 1988 Jan;28(1):69-77.
17. Boyd CR, Tolson MA, Copes WS. Evaluating trauma care: the TRISS method. Trauma score and the injury severity score. *J Trauma.* 1987 Apr;27(4):370-8.
18. Butcher NE, Enninghorst N, Sisak K, Balogh ZJ. The definition of polytrauma: variable interrater versus intrarater agreement-a prospective international study among trauma surgeons. *J Trauma Acute Care Surg.* 2013 Mar;74(3):884-9.
19. Palmer C. Major trauma and the injury severity score-where should we set the bar? *Annu Proc Assoc Adv Automot Med.* 2007;51:13-29.
20. van Ditschneider JC, Sewalt CA, Palmer CS, van Lieshout EMM, Verhofstad MHJ, Den Hartog D, et al. The definition of major trauma using different revisions of the abbreviated injury scale. *Scand J Trauma Resusc Emerg Med.* 2021 May 27;29(1):71.
21. Pape HC, Lefering R, Butcher N, Peitzman A, Leenen L, Marzi I, et al. The definition of polytrauma revisited: an international consensus process and proposal of the new "Berlin definition". *J Trauma Acute Care Surg.* 2014 Nov;77(5):780-6.
22. Rau CS, Wu SC, Kuo PJ, Chen YC, Chien PC, Hsieh HY, et al. Polytrauma defined by the new Berlin definition: a validation test based on propensity-score matching approach. *Int J Environ Res Public Health.* 2017 Sep;14(9):1045.
23. Driessen MLS, Sturms LM, van Zwet EW, Bloemers FW, Ten Duis HJ, Edwards MJR, et al. Evaluation of the Berlin polytrauma definition: a Dutch nationwide observational study. *J Trauma Acute Care Surg.* 2021 Apr 1;90(4):694-9.
24. Xu D, Shi YL, Luo P, Guo WJ. Application status of the definition of polytrauma in clinical research-a review of the past decade. *Signa Vitae.* 2021;17(3):42-6.
25. Thompson L, Hill M, Shaw G. Defining major trauma: a literature review. *Br Paramed J.* 2019 Jun 1;4(1):22-30.
26. World Health Organization. Injuries and violence [Internet]. Geneva: World Health Organization; 2024 [cited 2025 Jun 24]. Available from: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/injuries-and-violence>.
27. Trunkey DD, Lim RC. Analysis of 425 consecutive trauma fatalities: an autopsy study. *J Am Coll Emerg Physicians.* 1974 Nov;3(6):368-71.

28. Søreide K, Krüger AJ, Vårdal AL, Ellingsen CL, Søreide E, Lossius HM. Epidemiology and contemporary patterns of trauma deaths: changing place, similar pace, older face. *World J Surg.* 2007 Nov;31(11):2092-103.
29. Trunkey DD. Trauma. Accidental and intentional injuries account for more years of life lost in the U.S. than cancer and heart disease. Among the prescribed remedies are improved preventive efforts, speedier surgery and further research. *Sci Am.* 1983 Aug;249(2):28-35.
30. Demetriades D, Kimbrell B, Salim A, Velmahos G, Rhee P, Preston C, et al. Trauma deaths in a mature urban trauma system: is "trimodal" distribution a valid concept? *J Am Coll Surg.* 2005 Sep;201(3):343-8.
31. Demetriades D, Murray J, Sinz B, Myles D, Chan L, Sathyaragiswaran L, et al. Epidemiology of major trauma and trauma deaths in Los Angeles County. *J Am Coll Surg.* 1998 Oct;187(4):373-83.
32. Shackford SR. The epidemiology of traumatic death: a population-based analysis. *Arch Surg.* 1993 May 1;128(5):571-5.
33. Kleber C, Giesecke MT, Tsokos M, Haas NP, Schaser KD, Stefan P, et al. Overall distribution of trauma-related deaths in Berlin 2010: advancement or stagnation of German trauma management? *World J Surg.* 2012 Sep;36(9):2125-30.
34. Lefering R, Paffrath T, Bouamra O, Coats TJ, Woodford M, Jenks T, et al. Epidemiology of in-hospital trauma deaths. *Eur J Trauma Emerg Surg.* 2012 Feb;38(1):3-9.
35. Wyatt J, Beard D, Gray A, Busuttill A, Robertson C. The time of death after trauma. *BMJ.* 1995 Jun 10;310(6993):1502.
36. Gunst M, Ghaemmaghmi V, Gruszecki A, Urban J, Frankel H, Shafi S. Changing epidemiology of trauma deaths leads to a bimodal distribution. *Proc Bayl Univ Med Cent.* 2010 Oct;23(4):349-54.
37. Meislin H, Criss EA, Judkins D, Berger R, Conroy C, Parks B, et al. Fatal trauma: the modal distribution of time to death is a function of patient demographics and regional resources. *J Trauma.* 1997 Sep;43(3):433-40.
38. Ruchholtz S, Lefering R, Paffrath T, Oestern HJ, Neugebauer E, Nast-Kolb D, et al. Reduction in mortality of severely injured patients in Germany. *Dtsch Arztebl Int.* 2008 Mar 28;105(13):225-31.
39. van Breugel JMM, Niemeyer MJS, Houwert RM, Groenwold RHH, Leenen LPH, van Wessem KJP. Global changes in mortality rates in polytrauma patients admitted to the ICU-a systematic review. *World J Emerg Surg.* 2020 Dec;15(1):55.
40. Hardy BM, Enninghorst N, King KL, Balogh ZJ. The most critically injured polytrauma patient mortality: should it be a measurement of trauma system performance? *Eur J Trauma Emerg Surg.* 2024;50(1):115-9. doi:10.1007/s00068-022-02073-z.

41. Richter M, Pape HC, Otte D, Krettek C. Improvements in passive car safety led to decreased injury severity - a comparison between the 1970s and 1990s. *Injury*. 2005 Apr;36(4):484-8.
42. Campbell BJ. Safety belt injury reduction related to crash severity and front seated position. *J Trauma*. 1987 Jul;27(7):733-9.
43. Kuner EH, Schlickewei W, Oltmanns D. Injury reduction by the airbag in accidents. *Injury*. 1996 Apr;27(3):185-8.
44. Søreide K. Three decades (1978-2008) of Advanced Trauma Life Support (ATLS) practice revised and evidence revisited. *Scand J Trauma Resusc Emerg Med*. 2008 Dec 18;16:19.
45. Rotondo MF, Schwab CW, McGonigal MD, Phillips GR, Fruchterman TM, Kauder DR, et al. 'Damage control': an approach for improved survival in exsanguinating penetrating abdominal injury. *J Trauma*. 1993 Sep;35(3):375-83.
46. Schwab CW. Introduction: damage control at the start of 21st century. *Injury*. 2004 Jul;35(7):639-41.
47. Hilbert P, Zur Nieden K, Hofmann GO, Hoeller I, Koch R, Stuttmann R. New aspects in the emergency room management of critically injured patients: a multi-slice CT-oriented care algorithm. *Injury*. 2007 May;38(5):552-8.
48. Pape HC, Giannoudis P, Krettek C. The timing of fracture treatment in polytrauma patients: relevance of damage control orthopedic surgery. *Am J Surg*. 2002 Jun;183(6):622-9.
49. Giannoudis PV, Pape HC. Damage control orthopaedics in unstable pelvic ring injuries. *Injury*. 2004 Jul;35(7):671-7.
50. Giannoudis PV, Giannoudi M, Stavlas P. Damage control orthopaedics: lessons learned. *Injury*. 2009 Nov;40:S47-52.
51. Kalinterakis G, Koutras A, Syllaios A, Michalakeas N, Lytras D, Tsilikis I. The evolution and impact of the "damage control orthopedics" paradigm in combat surgery: a review. *Eur J Orthop Surg Traumatol*. 2019 Apr;29(3):501-8.
52. Volpin G, Pfeifer R, Saveski J, Hasani I, Cohen M, Pape HC. Damage control orthopaedics in polytraumatized patients-current concepts. *J Clin Orthop Trauma*. 2021 Jan;12(1):72-82.
53. Keel M, Trentz O. Pathophysiology of polytrauma. *Injury*. 2005 Jun;36(6):691-709.
54. Morris CFM, Tahir M, Arshid S, Castro MS, Fontes W. Reconciling the IPC and two-hit models: dissecting the underlying cellular and molecular mechanisms of two seemingly opposing frameworks. *J Immunol Res*. 2015;2015:1-11. doi:10.1155/2015/697193.
55. Lenz A, Franklin GA, Cheadle WG. Systemic inflammation after trauma. *Injury*. 2007 Dec;38(12):1336-45.

56. Charash WE, Fabian TC, Croce MA. Delayed surgical fixation of femur fractures is a risk factor for pulmonary failure independent of thoracic trauma. *J Trauma*. 1994 Oct;37(4):667-72.
57. Rixen D, Grass G, Sauerland S, Lefering R, Raum MR, Yücel N, et al. Evaluation of criteria for temporary external fixation in risk-adapted damage control orthopedic surgery of femur shaft fractures in multiple trauma patients: "evidence-based medicine" versus "reality" in the trauma registry of the German Trauma Society. *J Trauma Inj Infect Crit Care*. 2005 Dec;59(6):1375-95.
58. Nahm NJ, Como JJ, Wilber JH, Vallier HA. Early appropriate care: definitive stabilization of femoral fractures within 24 hours of injury is safe in most patients with multiple injuries. *J Trauma*. 2011 Jul;71(1):175-85.
59. Pape HC, Rixen D, Morley J, Husebye EE, Mueller M, Dumont C, et al. Impact of the method of initial stabilization for femoral shaft fractures in patients with multiple injuries at risk for complications (borderline patients). *Ann Surg*. 2007 Sep;246(3):491-9; discussion 499-501.
60. Pfeifer R, Pape HC. Diagnostik und Versorgungsstrategien beim polytraumatisierten Patienten. *Chirurg*. 2016 Feb;87(2):165-75.
61. Ding C, Jia M, Han X, Zhang J, Zhao X, Sang X. A China-based exploration of surgical timing for polytrauma with a focus on fracture reconstruction. *World J Emerg Surg*. 2025 Apr 16;20:33.
62. Dabetic U, Grupkovic J, Zagorac S, Aleksandric D, Bogosavljevic N, Tulic G. Advances in managing pelvic fractures in polytrauma: a comprehensive review. *J Clin Med*. 2025 Feb 23;14(5):1492.
63. Mikhail J. The trauma triad of death: hypothermia, acidosis, and coagulopathy. *AACN Clin Issues*. 1999 Feb;10(1):85-94.
64. De Waele JJ, Vermassen FEG. Coagulopathy, hypothermia and acidosis in trauma patients: the rationale for damage control surgery. *Acta Chir Belg*. 2002 Jan;102(5):313-6.
65. Iyengar KP, Venkatesan AS, Jain VK, Shashidhara MK, Elbana H, Botchu R. Risks in the management of polytrauma patients: clinical insights. *Orthop Res Rev*. 2023 Mar 21;15:27-38.
66. Brauckmann V, Enke SR, Dietrich AKIM, Neunaber C, Roth S, Wilhelmi M. Patterns of sex-specific outcomes and mortality in polytrauma: a demographic and epidemiologic analysis by injury severity score. *Eur J Trauma Emerg Surg*. 2025;51(1):250. doi:10.1007/s00068-025-02930-7.
67. Haider AH, Chang DC, Haut ER, Cornwell EE, Efron DT. Mechanism of injury predicts patient mortality and impairment after blunt trauma. *J Surg Res*. 2009 May 1;153(1):138-42.

68. Varma D, Brown P, Clements W. Importance of the mechanism of injury in trauma radiology decision-making. *Korean J Radiol.* 2023 Jun;24(6):522-8.
69. Weihs V, Frenzel S, Dedeyan M, Hruska F, Staats K, Hajdu S, et al. 25-year experience with adult polytraumatized patients in a European level 1 trauma center: polytrauma between 1995 and 2019. What has changed? A retrospective cohort study. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2023;143(5):2409-15.
70. de Vries R, Reininga IHF, Pieske O, Lefering R, El Moumni M, Wendt K. Injury mechanisms, patterns and outcomes of older polytrauma patients-an analysis of the Dutch Trauma Registry. *PLoS One.* 2018 Jan 5;13(1):e0190587.
71. Giannoudis PV, Harwood PJ, Court-Brown C, Pape HC. Severe and multiple trauma in older patients; incidence and mortality. *Injury.* 2009 Apr;40(4):362-7.
72. Kocuvan S, Brilej D, Stropnik D, Lefering R, Komadina R. Evaluation of major trauma in elderly patients - a single trauma center analysis. *Wien Klin Wochenschr.* 2016 Dec;128(S7):535-42.
73. Pfeifer R, Tarkin IS, Rocos B, Pape HC. Patterns of mortality and causes of death in polytrauma patients-has anything changed? *Injury.* 2009 Sep;40(9):907-11.
74. Fokkema AT, Johannesdottir BK, Wendt K, Haaverstad R, Reininga IHF, Geisner T. Comorbidities, injury severity and complications predict mortality in thoracic trauma. *Eur J Trauma Emerg Surg.* 2023;49(2):1131-43. doi:10.1007/s00068-022-02177-6.
75. Glynn R, Edwards F, Wullschlegel M, Gardiner B, Laupland KB. Major trauma and comorbidity: a scoping review. *Eur J Trauma Emerg Surg.* 2025;51(1):133. doi:10.1007/s00068-025-02805-x.
76. Aldrian S, Nau T, Koenig F, Vécsei V. Geriatric polytrauma. *Wien Klin Wochenschr.* 2005 Feb;117(4):145-9.
77. Rupprecht H, Heppner HJ, Wohlfart K, Türkoglu A. The geriatric polytrauma: risk profile and prognostic factors. *Ulus Travma Acil Cerrahi Derg.* 2017 Mar;23(2):156-62.
78. van Wessem KJP, Benders KEM, Leenen LPH, Hietbrink F. TBI related death has become the new epidemic in polytrauma: a 10-year prospective cohort analysis in severely injured patients. *Eur J Trauma Emerg Surg.* 2024;50(6):3083-94. doi:10.1007/s00068-024-02653-1.
79. Li S, Sun D, Wang C, Hu P, Jin F, Huang W. Fracture mapping in high-energy chest trauma. *J Clin Med.* 2024 Oct 14;13(20):6127.
80. Paul MM, Mieden HJ, Lefering R, Kupczyk EK, Jordan MC, Gilbert F, et al. Impact of a femoral fracture on outcome after traumatic brain injury-a matched-pair analysis of the TraumaRegister DGU®. *J Clin Med.* 2023 May 31;12(11):3802.

81. Lundin A, Akram SK, Berg L, Göransson KE, Enocson A. Thoracic injuries in trauma patients: epidemiology and its influence on mortality. *Scand J Trauma Resusc Emerg Med.* 2022 Dec 12;30(1):69.
82. Spering C, Lehmann W. Das schwere Thoraxtrauma: Indikationen und Kontraindikationen für operative und nicht operative Versorgungsstrategien. *Zentralbl Chir.* 2024 Aug;149(4):368-77.
83. Grubmüller M, Kerschbaum M, Diepold E, Angerpointner K, Nerlich M, Ernstberger A. Severe thoracic trauma - still an independent predictor for death in multiple injured patients? *Scand J Trauma Resusc Emerg Med.* 2018 Jan 8;26:6.
84. Timm A, Maegele M, Lefering R, Wendt K, Wyen H. Pre-hospital rescue times and actions in severe trauma. A comparison between two trauma systems: Germany and the Netherlands. *Injury.* 2014 Oct;45:S43-52.
85. Clark GC, Schechter WP, Trunkey DD. Variables affecting outcome in blunt chest trauma: flail chest vs. pulmonary contusion. *J Trauma.* 1988 Mar;28(3):298-304.
86. Dogrul BN, Kiliccalan I, Asci ES, Peker SC. Blunt trauma related chest wall and pulmonary injuries: an overview. *Chin J Traumatol.* 2020 Jun;23(3):125-38.
87. Şimşek S, Özmen CA, Onat S. Morbidity and mortality associated with fracture of the sternum due to blunt trauma, by fracture type and location. *Radiol Bras.* 2022 May;55(3):167-72.
88. Aamir J, Alade B, Caldwell R, Chapman J, Shah S, Karthikappallil D, et al. Sternal fractures and thoracic injury: an analysis of 288 sternal fractures attending a major trauma centre. *Eur J Orthop Surg Traumatol.* 2023;33(6):2619-24.
89. Oyetunji TA, Jackson HT, Obirieze AC, Moore D, Branche MJ, Greene WR, et al. Associated injuries in traumatic sternal fractures: a review of the National Trauma Data Bank. *Am Surg.* 2013 Jul;79(7):702-5.
90. Knobloch K, Wagner S, Haasper C, Probst C, Krettek C, Otte D, et al. Sternal fractures occur most often in old cars to seat-belted drivers without any airbag often with concomitant spinal injuries: clinical findings and technical collision variables among 42,055 crash victims. *Ann Thorac Surg.* 2006 Aug;82(2):444-50.
91. Oda I, Abumi K, Lü D, Shono Y, Kaneda K. Biomechanical role of the posterior elements, costovertebral joints, and rib cage in the stability of the thoracic spine. *Spine.* 1996 Jun;21(12):1423-9.
92. Huang Z, Chen F, Huang J, Jian G, Gong H, Xu T, et al. Treatment of middle-super thoracic fractures associated with the sternum fracture. *Int J Clin Exp Med.* 2015 Jun 15;8(6):9751-7.
93. Berg EE. The sternal-rib complex. A possible fourth column in thoracic spine fractures. *Spine.* 1993 Oct 1;18(13):1916-9.

94. Magerl F, Aebi M, Gertzbein SD, Harms J, Nazarian S. A comprehensive classification of thoracic and lumbar injuries. *Eur Spine J*. 1994;3(4):184-201.
95. Vaccaro AR, Oner C, Kepler CK, Dvorak M, Schnake K, Bellabarba C, et al. AOSpine thoracolumbar spine injury classification system: fracture description, neurological status, and key modifiers. *Spine*. 2013 Nov 1;38(23):2028-37.
96. Joaquim AF. Operative versus Non-Operative Management of Traumatic Thoracolumbar Injuries according to the AO Spine Thoracolumbar Spine Injury Classification System. *Arq Bras Neurocir*. 2020 Sep;39(03):181-8.
97. Denis F. The three column spine and its significance in the classification of acute thoracolumbar spinal injuries. *Spine*. 1983;8(8):817-31. doi:10.1097/00007632-198311000-00003.
98. Klei DS, Öner FC, Leenen LPH, van Wessem KJP. Current treatment and outcomes of traumatic sternovertebral fractures: a systematic review. *Eur J Trauma Emerg Surg*. 2021;47(4):991-1001. doi:10.1007/s00068-020-01505-y.
99. Zwingmann J, Hagelschuer P, Langenmair E, Bode G, Herget G, Südkamp NP, et al. Lower health-related quality of life in polytrauma patients: long-term follow-up after over 5 years. *Medicine (Baltimore)*. 2016 May;95(19):e3515.
100. Yakar S, Baykan N, Önal Ö, Durukan P. Retrospective analysis of patients with sternal fracture. *Turk J Emerg Med*. 2020 Dec 1;21(1):20-3.
101. Najdaghi S, Azizkhani R, Fatemi NAS, Nasr Isfahani M, Salamati P. The epidemiology of spinal fractures: a nationwide data-based study in Iran. *Qatar Med J*. 2024 Sep 16;2024(3):42.
102. von Garrel T, Ince A, Junge A, Schnabel M, Bahrs C. The sternal fracture: radiographic analysis of 200 fractures with special reference to concomitant injuries. *J Trauma Inj Infect Crit Care*. 2004 Oct;57(4):837-44.
103. Vioreanu MH, Quinlan JF, Robertson I, O'Byrne JM. Vertebral fractures and concomitant fractures of the sternum. *Int Orthop*. 2005 Dec;29(6):339-42.
104. Rao RD, Berry CA, Yoganandan N, Agarwal A. Occupant and crash characteristics in thoracic and lumbar spine injuries resulting from motor vehicle collisions. *Spine J*. 2014 Oct;14(10):2355-65.
105. Schulz-Drost S, Oppel P, Grupp S, Taylor D, Krinner S, Langenbach A, et al. The oblique fracture of the manubrium sterni caused by a seatbelt-a rare injury? Treatment options based on the experiences gained in a level I trauma centre. *Int Orthop*. 2016 Apr;40(4):791-8.
106. Scheyerer MJ, Zimmermann SM, Bouaicha S, Simmen HP, Wanner GA, Werner CML. Location of sternal fractures as a possible marker for associated injuries. *Emerg Med Int*. 2013;2013:1-7. doi:10.1155/2013/407589.

107. HersHKovitz Y, Sheffer D, Peleg K, Kessel B, Dubose JJ, Jeroukhimov I, et al. Thoracic vertebrae fracture: Is it an indicator of abdominal injury? *Am J Emerg Med*. 2021 May;43:235-7.
108. Abdelrahman H, El-Menyar A, Keil H, Alhammoud A, Ghouri SI, Babikir E, et al. Patterns, management, and outcomes of traumatic pelvic fracture: insights from a multicenter study. *J Orthop Surg Res*. 2020 Dec;15(1):249.
109. Stahel PF, Ziran N. The pathophysiology of pelvic ring injuries: a review. *Patient Saf Surg*. 2024 May 13;18(1):16.
110. Otremski I, Wilde BR, Marsh JL, McLardy Smith PD, Newman RJ. Fracture of the sternum in motor vehicle accidents and its association with mediastinal injury. *Injury*. 1990 Mar;21(2):81-3.
111. Ooi CK, Goh HK, Tay SY, Phua DH. Patients with pelvic fracture: what factors are associated with mortality? *Int J Emerg Med*. 2010 Dec 1;3(4):299-304.
112. van Wessem KJP, Leenen LPH. Incidence of acute respiratory distress syndrome and associated mortality in a polytrauma population. *Trauma Surg Acute Care Open*. 2018;3(1):e000232. doi:10.1136/tsaco-2018-000232.
113. Almahmoud K, Teuben M, Andruszkow H, Horst K, Lefering R, Hildebrand F, et al. Trends in intubation rates and durations in ventilated severely injured trauma patients: an analysis from the TraumaRegister DGU®. *Patient Saf Surg*. 2016 Dec;10(1):24.
114. Okabe Y. Risk factors for prolonged mechanical ventilation in patients with severe multiple injuries and blunt chest trauma: a single center retrospective case-control study. *Acute Med Surg*. 2018 Apr;5(2):166-72.
115. Horton WC, Kraiwattanapong C, Akamaru T, Minamide A, Park JS, Park MS, et al. The role of the sternum, costosternal articulations, intervertebral disc, and facets in thoracic sagittal plane biomechanics: a comparison of three different sequences of surgical release. *Spine*. 2005 Sep;30(18):2014-23.
116. Lopez AJ, Scheer JK, Smith ZA, Dahdaleh NS. Management of flexion distraction injuries to the thoracolumbar spine. *J Clin Neurosci*. 2015 Dec;22(12):1853-6.
117. Spiegl UJ, Osterhoff G, Bula P, Hartmann F, Scheyerer MJ, Schnake KJ, et al. Biomechanics and clinical outcome after posterior stabilization of mid-thoracic vertebral body fractures: a systematic literature review. *Eur J Trauma Emerg Surg*. 2021 Oct 1;47(5):1389-98.
118. Hildebrand F, Pape HC, Horst K, Andruszkow H, Kobbe P, Simon TP, et al. Impact of age on the clinical outcomes of major trauma. *Eur J Trauma Emerg Surg*. 2016 Jun;42(3):317-32.

119. Patel N, Harfouche M, Stonko DP, Elansary N, Scalea TM, Morrison JJ. Factors associated with increased mortality in severe abdominopelvic injury. *Shock*. 2022 Feb 1;57(2):175-80.
120. Alqazzaz A, Naseer Z, Beyer CA, Cannon JW, Khalsa A. Treatment approach for coexisting chest wall fractures and unstable thoracolumbar spine fractures in polytrauma patients requiring prone spine surgery. *Trauma Surg Acute Care Open*. 2024 Mar 22;9(1):e001196.
121. Hardy BM, Varghese A, Adams MJ, Enninghorst N, Balogh ZJ. The outcomes of the most severe polytrauma patients: a systematic review of the use of high ISS cutoffs for performance measurement. *Eur J Trauma Emerg Surg*. 2024;50(4):1305-12. doi:10.1007/s00068-023-02409-3.
122. Kara H, Bayir A, Degirmenci S, Yildiran H, Kafali ME, Ak A. Sternal fractures in blunt chest trauma: retrospective analysis of 330 cases. *J Coll Physicians Surg Pak*. 2022 Jun;32(6):799-803.
123. Lee HD, Jung K, Kang B, Chung NS, Jeon CH, Chung HW. Impact of spinal injury on mortality in patients with major trauma: a propensity-matched cohort study. *Medicine (Baltimore)*. 2023 Jun 23;102(25):e34090.
124. Yayan J, Schiffner R. Weaning failure in elderly patients: a systematic review and meta-analysis. *J Clin Med*. 2024 Oct 27;13(21):6429.
125. Freigang V, Müller K, Ernstberger A, Kaltenstadler M, Bode L, Pfeifer C, et al. Reduced recovery capacity after major trauma in the elderly: results of a prospective multicenter registry-based cohort study. *J Clin Med*. 2020 Jul 23;9(8):2356.
126. Dimopoulou I, Anthi A, Lignos M, Boukouvalas E, Evangelou E, Routsis C, et al. Prediction of prolonged ventilatory support in blunt thoracic trauma patients. *Intensive Care Med*. 2003 Jul;29(7):1101-5.
127. Bayer J, Lefering R, Reinhardt S, Kühle J, Zwingmann J, et al.; TraumaRegister DGU. Thoracic trauma severity contributes to differences in intensive care therapy and mortality of severely injured patients: analysis based on the TraumaRegister DGU®. *World J Emerg Surg*. 2017 Dec;12(1):43.
128. Alkhazendar AH, Awan M, Taha M, Ahmad S, Raza SMB, Aakash D. Management of blunt thoracic aortic injury in polytrauma patients: a review of clinical outcomes and intervention strategies. *Cureus*. 2025 Apr 16;17(4):e82400.
129. Alanezi T, Altoijry A, Alanazi A, Aljofan Z, Altuwaijri T, Iqbal K, et al. Management and outcomes of traumatic liver injury: a retrospective analysis from a tertiary care center experience. *Healthcare (Basel)*. 2024 Jan 6;12(2):131.
130. Sunder A, Chhabra HS, Aryal A. Geriatric spine fractures - demography, changing trends, challenges and special considerations: a narrative review. *J Clin Orthop Trauma*. 2023 Jun 29;43:102190.

131. Ismael Aguirre MF, Tsirikos AI, Clarke A. Spinal injuries in the elderly population. *Orthop Trauma*. 2020 Oct 1;34(5):272-7.
132. Fehlings MG, Tetreault LA, Hachem L, Evaniew N, Ganau M, McKenna SL, et al. An update of a clinical practice guideline for the management of patients with acute spinal cord injury: recommendations on the role and timing of decompressive surgery. *Glob Spine J*. 2024 Mar;14 Suppl 3:174S-186S.
133. Picetti E, Demetriades AK, Catena F, Aarabi B, Abu-Zidan FM, Alves OL, et al. Early management of adult traumatic spinal cord injury in patients with polytrauma: a consensus and clinical recommendations jointly developed by the World Society of Emergency Surgery (WSES) & the European Association of Neurosurgical Societies (EANS). *World J Emerg Surg*. 2024 Jan 18;19(1):4.
134. Ryken TC, Hurlbert RJ, Hadley MN, Aarabi B, Dhall SS, Gelb DE, et al. The acute cardiopulmonary management of patients with cervical spinal cord injuries. *Neurosurgery*. 2013 Mar;72 Suppl 2:84-92.
135. Kwon BK, Tetreault LA, Martin AR, Arnold PM, Marco RAW, Newcombe VFJ, et al. A clinical practice guideline for the management of patients with acute spinal cord injury: recommendations on hemodynamic management. *Glob Spine J*. 2024 Mar;14 Suppl 3:187S-211S.
136. Yuan SM. Sternal fractures due to blunt chest trauma. *J Coll Physicians Surg Pak*. 2022 Dec;32(12):1591-6.
137. Butler R, Donley C, Mohammed Z, Lepard J, Vess E, Andrews N, et al. Nonoperative management of isolated thoracolumbar flexion distraction injuries: a single-center study. *Int J Spine Surg*. 2024 Jul 15;18(4):383.

8. Danksagung

Ich danke allen, die mich während der Entstehung dieser Arbeit begleitet und unterstützt haben.

Besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. med. Daniel Popp, der mir das spannende Thema dieser Dissertation anvertraute und mich mit wertvollen Anregungen, fachlicher Expertise und stets offener Unterstützung inspiriert und begleitet hat.

Ebenso danke ich Frau Dr. med. Josina Straub für die engagierte Betreuung, die vielen hilfreichen Gespräche und die konstruktive Kritik, die den Fortschritt dieser Arbeit entscheidend beeinflusst haben.

Dem gesamten Team der Klinik und Poliklinik für Unfallchirurgie danke ich für die freundliche und lehrreiche Zusammenarbeit, die Unterstützung bei der Datenerhebung und die motivierende Arbeitsatmosphäre.

Ich danke meiner Familie für ihre Geduld, ihr Verständnis und ihre Unterstützung, die mir in dieser Zeit Rückhalt und Zuversicht gegeben haben.

Zur sprachlichen Optimierung einzelner Textpassagen wurde ChatGPT (OpenAI, GPT-5) in unterstützender Weise eingesetzt. Sämtliche wissenschaftlichen Inhalte, Analysen und Interpretationen stammen ausschließlich vom Autor.