

Aus dem Centrum für Muskuloskeletale Chirurgie (CMSC)
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

Epidemiologische, postmortale Computertomographie-
morphologische und biomechanische Analyse der Effekte
nicht-invasiver externer Beckenstabilisatoren
bei realen instabilen Beckenverletzungen

zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor medicinae (Dr. med.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Mirja Mareike Fechner

aus Bad Honnef/Rhein

Datum der Promotion: 16.06.2018

Abkürzungsverzeichnis

AIS	Abbreviated Injury Scale
AO	Arbeitsgemeinschaft Osteosynthese
a.-p.	anterior-posterior
ATLS [®]	Advanced Trauma Life Support
BGA	Blutgasanalyse
BIG [®]	Bone Injection Gun
BWK/BWS	Brustwirbelkörper/ Brustwirbelsäule
Cm	Zentimeter
Cm ²	Quadratzenimeter
Cm ³	Kubikzentimeter
CT	Computertomographie
DGU [®]	Deutsche Gesellschaft für Unfallchirurgie
ERC [®]	European Resuscitation Council
ETC [®]	European Trauma Course
Evtl.	eventuell
FAST	Focused Assessment with Sonography for Trauma
FFP	Fresh Frozen Plasma
GCS	Glasgow Coma Scale
HAES	Hydroxyethylstärke
HWK/HWS	Halswirbelkörper/ Halswirbelsäule
INR	International Normalized Ratio
i.o.	intraossär
i.v.	intravenös
ISG	Iliosakralgelenk
ISS	Injury Severity Score
ITLS [®]	International Trauma Life Support
LWK/LWS	Lendenwirbelkörper/ Lendenwirbelsäule
mmHg	Millimeter Quecksilbersäule
N	Newton
NEF	Notarzteinsatzfahrzeug
OP-Saal	Operationssaal

pHTLS [®]	prehospital Trauma Life Support
PKW	Personenkraftwagen
PPSB	Prothrombinkonzentrat
PTT	Partielle Thromboplastinzeit
RTH	Rettungstransporthubschrauber
RTW	Rettungstransportwagen
SHT	Schädel-Hirn-Trauma
SWK	Sakralwirbelkörper
T-POD [®]	Trauma Pelvic Orthotic Device
USA	United States of America
ZNS	Zentrales Nervensystem

Inhaltsverzeichnis

0. Zusammenfassungen	1
0.1 Zusammenfassung Deutsch.....	1
0.2 Abstract Englisch	3
1. Einleitung	5
1.1 Epidemiologie und sozioökonomische Aspekte der Versorgung traumatologischer Patienten.....	5
1.2 Trauma und Polytrauma - Definition	6
1.3 Epidemiologie und klinische Relevanz der Beckenringverletzung.....	7
1.4 Überblick über die Anatomie und Evolution des Beckens	8
1.5 Klassifikation und Definition von Beckenringverletzungen	10
1.6 Klinische Detektion instabiler Beckenringverletzungen.....	18
1.7 Präklinisches Management instabiler Beckenringverletzungen.....	20
1.8 Klinisches Management instabiler Beckenringverletzungen	24
1.9 Einfluss nicht-/ invasiver Beckenstabilisatoren auf die Reduktion des pelvinen Volumens, Hämodynamik, Transfusionsbedarf und Dauer des Klinikaufenthalts	29
1.10 Fragestellungen	32
2. Material und Methoden	34
2.1 Epidemiologische Datenerhebung.....	34
2.1.1 Alter und Geschlecht.....	34
2.1.2 Unfallmechanismus	34
2.1.3 Präklinische Maßnahmen	35
2.1.3.1 Reanimation	35
2.1.3.2 Intubation	35
2.1.3.3 Anlage intravenöser oder intraossärer Zugänge.....	35
2.1.3.4 Entlastung des Thorax mittels Punktion oder Thoraxdrainage	35
2.1.3.5 Externe, nicht-invasive Beckenstabilisierung	35
2.1.4 Todesort.....	36
2.1.5 Hauptblutungsquelle.....	36
2.1.6 Verletzungsmuster.....	36
2.1.7 Todesursache laut Obduktion.....	37
2.1.7.1 Polytrauma	38
2.1.7.2 Verbluten (Exsanguination)	38
2.1.7.3 SHT	38
2.1.7.4 Thoraxtrauma	38
2.1.8 Klassifikation der Beckenringverletzungen	39
2.1.9 Inzidenz zusätzlich vorhandener proximaler Femurfrakturen	39
2.2 Prospektive Interventionsstudie zur Analyse externer, nicht-invasiver Beckenstabilisatoren	39
2.2.1 Untersuchungszeitraum.....	39
2.2.2 Ein- und Ausschlusskriterien	40
2.2.3 Verwendete externe, nicht-invasive Beckenstabilisatoren.....	40
2.2.3.1 Pneumatische Beckenschlinge VBM®	40
2.2.3.2 T-POD®	41
2.2.3.3 Tuchschnge	41
2.2.3.4 SAM Sling®	41
2.2.4 Studienprotokoll.....	42
2.2.5 Biomechanische Kraftmessungen der wirkenden Zugkräfte nach Beckenschlingenanlage	43

2.2.6 CT-Gerät.....	45
2.2.7 Software/OsiriX®	45
2.2.8 Erhobene Daten	46
2.2.8.1 Volumetrie des Beckens	46
2.2.8.2 Fläche der Beckeneingangsebene.....	47
2.2.8.3 Symphysenweite.....	47
2.2.8.4 Hüftkopfabstand	48
2.2.8.5 Abstand zwischen den Köhler'schen-Tränenfiguren	48
2.2.8.6 Abstand zwischen den Iliosakralgelenken ventral und dorsal	48
2.3 Datenverarbeitung und statistische Auswertung	49
3. Ergebnisse	50
3.1 Studienpopulation.....	50
3.1.1 Alter und Geschlecht	50
3.1.2 Unfallmechanismus	50
3.1.3 Präklinische medizinische Maßnahmen	51
3.1.3.1 Reanimation	52
3.1.3.2 Intubation	52
3.1.3.3 Anlage intravenöser oder intraossärer Zugänge.....	52
3.1.3.4 Entlastung des Thorax mittels Punktion oder Thoraxdrainage	52
3.1.3.5 Externe, nicht-invasive Beckenstabilisierung	52
3.1.4 Todesort.....	53
3.1.5 Hauptblutungsquellen.....	53
3.1.6 Verletzungsmuster.....	54
3.1.7 Todesursache laut Obduktion.....	56
3.1.8 Klassifikation der Beckenringverletzungen	57
3.1.9 Inzidenz zusätzlich vorhandener proximaler Femurfrakturen	59
3.2 CT-gestützte Messungen nicht-invasive, externe Beckenstabilisatoren	60
3.2.1 Reduktion des intrapelvinen Volumens	60
3.2.2 Reduktion der Fläche in der Beckeneingangsebene.....	64
3.2.3 Reduktion der Symphysenweite.....	68
3.2.4 Reduktion des Hüftkopfabstands	71
3.2.5 Reduktion des Abstands zwischen den Köhler'schen Tränenfiguren	74
3.2.6 Reduktion des ISG-Abstands	77
3.3 Biomechanische Kraftmessung der wirkenden Zugkräfte nach Beckenstabilisatorenanlage	81
3.3.1 Pneumatische Beckenschlinge VBM®	82
3.3.2 T-POD®	87
3.3.3 Tuchschnur	89
3.3.4 SAM Sling®	91
3.3.5 Mittelwerte aller Beckenschlingen im Vergleich.....	92
4. Diskussion.....	94
4.1 Charakteristika der Studienpopulation und der Archivfälle.....	94
4.1.1 Alter und Geschlecht	94
4.1.2 Unfallmechanismus	94
4.1.3 Präklinische Maßnahmen	96
4.1.3.1 Reanimation	96
4.1.3.2 Intubation	97
4.1.3.3 Anlage intravenöser und intraossärer Zugänge.....	98
4.1.3.4 Entlastung des Thorax mittels Punktion oder Thoraxdrainage	100
4.1.3.5 Externe, nicht-invasive Beckenstabilisierung	100

4.1.4 Todesort.....	103
4.1.5 Hauptblutungsquelle.....	104
4.1.6 Verletzungsmuster.....	105
4.1.7 Todesursache laut Obduktion.....	107
4.1.8 Klassifikation der Beckenringverletzungen	108
4.1.9 Inzidenz zusätzlich vorhandener proximaler Femurfrakturen	109
4.2 CT-gestützte Messungen nicht-invasive externe Beckenstabilisatoren und biomechanische Kraftmessungen.....	110
4.2.1 Beeinflussung des vorderen und hinteren Beckenrings nach Anlage nicht-invasiver externer Beckenstabilisatoren	111
4.2.2 Unterschiede zwischen den Nativ Scans	113
4.2.3 Pneumatische Beckenschlinge VBM®	114
4.2.4 T-POD®	118
4.2.5 Tuchschnge	121
4.2.6 SAM Sling®	122
4.3 Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse	124
4.4 Zusammenfassende Beantwortung der initialen Fragestellungen	125
4.5 Limitationen	127
5. Literaturverzeichnis.....	129
6. Eidesstattliche Versicherung.....	140
7. Lebenslauf	141
8. Danksagung.....	142

0. Zusammenfassungen

0.1 Zusammenfassung Deutsch

Epidemiologische, postmortale Computertomographie-morphologische und biomechanische Analyse der Effekte nicht-invasiver externer Beckenstabilisatoren bei realen instabilen Beckenverletzungen

Einleitung

Die instabile Beckenverletzung stellt eine seltene Verletzung (3-8% aller Frakturen) dar, die jedoch mit einer hohen Mortalität (bis zu 30%) einhergeht. Die einzige effektive Möglichkeit venöse und spongiöse Blutungsquellen präklinisch zu minimieren, besteht in der Reduktion des intrapelvinen Volumens mit annähernder Reposition der Frakturenden und Schluss des vorderen/hinteren Beckenrings mittels externer, nicht-invasiver Beckenstabilisatoren. Während instabile Beckenverletzungen trotz überwiegend gravierender Begleitverletzungen häufig im Rahmen des Bodychecks durch den Notarzt erkannt werden, wird eine präklinische Beckenstabilisierung unregelmäßig durchgeführt. Bis dato konnten wenige Kadaverstudien und Einzelfallberichte zeigen, dass die Anlage von Beckenstabilisatoren zu einer effektiven pelvinen Volumenreduktion führt, es mangelt jedoch an wissenschaftlich belastbaren Daten bezüglich des zu applizierenden Drucks.

Methodik

Im Untersuchungszeitraum März 2012 bis September 2013 konnten 30 Patienten in unsere Studie eingeschlossen werden (Einschlusskriterien: instabiler Beckenbefund in der äußeren Leichenschau, Mindestalter 18 Jahre, erhaltene Integrität der peripelvinen Weichteile, keine osteosynthetische Versorgung). Neben einer epidemiologischen Datenerhebung erfolgten mehrere CT-Scans zur Quantifizierung der reduktiven Effekte nach Anlage verschiedener externer, nicht-invasiver Beckenstabilisatoren (pneumatische Beckenschlinge VBM[®] mit 100 und 200mmHg, T-POD[®], Tuchschnur). An weiteren fünf Patienten erfolgte in einem zweiten Untersuchungszeitraum (September bis Dezember 2014, identische Einschlusskriterien) zusätzlich die Anlage der SAM Sling[®] sowie biomechanische Messungen der an den applizierten Beckenstabilisatoren wirkenden Zugkräfte.

Ergebnisse

Das Patientenkollektiv mit instabilen Beckenverletzungen wies zusätzlich sehr hohe Inzidenzen an Verletzungen am oder im Thorax (96%), peripelvine Weichteilverletzungen (86%) sowie Schädel-Hirn-Traumata (84%) auf. Die instabile Beckenverletzung zeigte sich jedoch nur in 19% als führende Blutungsquelle, als Hauptblutungsquelle in unserem Kollektiv zeigten sich thorakale Verletzungen (25%).

Alle externen, nicht-invasiven Beckenstabilisatoren erzielten eine Reduktion des intrapelvinen Volumens, dem T-POD[®] gelang diese durchschnittlich am besten ($333 \pm 234\text{cm}^3$) bei jedoch höherer, durchschnittlicher Spitzenzugkraft (110N). Die Reduktionsergebnisse der pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] zeigten bei appliziertem Druck von 200mmHg durchweg signifikant bessere Ergebnisse als bei 100mmHg bei vernachlässigbaren Zugkraftunterschieden (Spitzenzugkraft 82 vs. 73N). Alle Beckenstabilisatoren wiesen die höchste Spitzenzugkraft kurz nach Anlage auf, mit rascher Abnahme der Zugkräfte im zeitlichen Verlauf (zwei Minuten). Dies zeigte sich am deutlichsten bei SAM Sling[®] und Tuschlinge.

Schlussfolgerung

Instabile Beckenverletzungen müssen überwiegend als Indikator für gravierende, v.a. thorakale und abdominelle Begleitverletzungen gesehen werden. Dies hat unmittelbaren Einfluss auf das klinische Management und die Priorisierung der operativen Versorgung.

Die Stabilisierung instabiler Beckenverletzungen sollte bereits präklinisch mittels spezifischen Beckenstabilisatoren wie T-POD[®] oder pneumatischer Beckenschlinge VBM[®] erfolgen. Nur bei fehlender Vorhaltung sollte eine Tuschlinge verwendet werden. Zum Erzielen der optimalen Reduktionsergebnisse mittels pneumatischer Beckenschlinge VBM[®] befürworten wir eine Anpassung der empfohlenen Druckapplikation auf 200mmHg. Inwieweit es einer regelmäßigen Nachadjustierung der Beckenstabilisatoren bedarf, muss in zukünftigen Studien weiter untersucht werden.

0.2 Abstract English

Epidemiological, postmortal CT-morphological and biomechanical analysis of effects of non-invasive external pelvic circumferential compression devices in non-artificial instable pelvic fractures

Introduction

Mechanically instable pelvic fractures are rare (3-8% of all fractures), but with high mortality (up to 30%). To minimize pre-hospital blood loss from venous vessels or cancellous bone fragments the only existing effective method is intrapelvine volume reduction through external, non-invasive pelvic circumferential compression devices (PCCDs). While emergency physicians often detect instable pelvic fractures in severely injured patients, stabilization of the pelvic ring is nevertheless still performed infrequently. Up to this day there are only a handful of cadaveric studies and case reports proving the effectiveness of intrapelvine volume reduction through application of PCCDs. Also, there is no reliable scientific data regarding the level of pressure to be applied with these devices.

Methods

30 patients were enrolled in the study during the time period of March, 2012 till September, 2013 (inclusion criteria: instable pelvis in external examination of the corpse, minimum age 18 years, retained integrity of the peripelvic soft tissue, no osteosynthesis). An analysis of the epidemiologic data was performed as well as multiple CT-scans to quantify the effects of applied PCCDs (pneumatic pelvic sling VBM[®] with 100 and 200mmHg, T-POD[®], sheet). Six additional patients (same inclusion criteria) were included in a second time period of September, 2014 till December, 2014: Additively, application of the SAM Sling[®] was performed as well as a biomechanical assessment of tractive forces on all of the applied PCCDs.

Results

In all enrolled patients with unstable pelvic fractures we also saw high incidences of thoracical trauma (96%), peripelvic soft tissue damage (86%) as well as craniocerebral injury (84%). The unstable pelvic fracture only appeared to be the main site of bleeding in 19% with highest rates for thoracic injuries as the main site of bleeding (25%). All applied PCCDs managed to reduce the intrapelvic volume with T-POD[®] attaining the best results ($333 \pm 234\text{cm}^3$). Throughout, the

pneumatic pelvic sling VBM[®] could attain significantly greater results with application of 200mmHg compared to 100mmHg. All applied PCCDs appeared to be achieving maximum tractive forces directly after application with rapid decline of measured forces within two minutes. SAM Sling[®] as well as the conventional sheet revealed the greatest loss of tractive forces in all tested PCCDs.

Conclusion

Our study shows that instable pelvic fractures have to be seen as indicators of serious accompanying injuries in trauma patients, especially thoracic and abdominal injuries. These injuries decisively dictate the management in the emergency room as well as the priority of operative interventions.

Stabilization of the fractured pelvic ring through PCCDs like T-POD[®] or pneumatic pelvic sling VBM[®] should already be performed at the accident site. A conventional sheet should only be used when specific PCCDs are not available. Because of significantly greater results in intrapelvine volume reduction we advocate adjusting the recommended pressure application to 200mmHg in pneumatic pelvic sling VBM[®]. Further studies have to show if and to which extent readjustment of the applied pressure of the PCCDs has to be executed.

1. Einleitung

1.1 Epidemiologie und sozioökonomische Aspekte der Versorgung traumatologischer Patienten

Das Trauma stellt in den westlichen Nationen die führende Todesursache in der Altersgruppe bis 40 Jahre dar und belegt damit den dritten Platz der Todesursachenstatistik (1–8).

Bezüglich der Traumaletalität galt langjährig das von Trunkey entwickelte trimodale Konzept als Referenz: Dies besagte, dass 45% der Traumatoten unmittelbar versterben (am Unfallort bzw. innerhalb der ersten Stunde nach Unfall), 24% eine frühe Letalität mit Todeseintritt zwischen einer und vier Stunden nach Trauma zeigen und 20% nach mehr als einer Woche versterben (9,10). Für den deutschsprachigen Raum konnte unsere Arbeitsgruppe 2010 eine bimodale Verteilung zeigen: Fast 60% der Traumapatienten versterben in der Präklinik, rund 17% innerhalb von 4-48h (1). Ein erneuter Peak nach mehr als einer Woche konnte nicht festgestellt werden (1). Insgesamt liegt die Klinikletalität polytraumatisierter Patienten 2013 in Deutschland bei rund 9% (11).

Da es sich bei polytraumatisierten Patienten überwiegend um junge, im Berufsleben stehende Männer handelt, rücken sozioökonomische Aspekte der Traumaletalität zunehmend in den Vordergrund: Zum einen bedingen traumatologische Erkrankungen den größten Verlust an Lebens- und Arbeitsjahren (2,5,12,13). Zum anderen bietet die komplexe, medizinische Versorgung polytraumatisierter Patienten die Möglichkeit diesen Verlust an Arbeitsjahren einzugrenzen (13).

Der Kostenfaktor pro Krankenhausaufenthalt eines polytraumatisierten Patienten beläuft sich im deutschsprachigen Raum auf durchschnittlich 32.700-56.800 Euro (2). Mehr als 50% der Kosten fallen in den intensivmedizinischen Bereich (13). Die operative Therapie schlägt mit durchschnittlich 25% Kostenanteil zu Buche (13). Grotz et al. verglichen die Behandlungskosten mit der Höhe der Vergütung anhand von Daten aus dem Traumaregister der DGU[®] der Jahre 2000 und 2001: Im Durchschnitt fiel die Vergütung durch die Krankenkassen um 12.893 Euro geringer aus als die tatsächlichen Behandlungskosten (12). Auch Willenberg et al. schlussfolgerten, dass die Behandlungskosten von Traumapatienten mit durchschnittlichen 22.448 Dollar wesentlich höher liegen als bei anderen Hospitalisierungsgründen (14). Trotz des hohen sozioökonomischen und gesellschaftlichen Stellenwertes der Wiederherstellung und

Reintegration der vorwiegend jungen Männer in das Berufsleben, stellt die Versorgung dieser Patienten eine enorme finanzielle Belastung für die behandelnden Kliniken dar (2,5,12).

1.2 Trauma und Polytrauma - Definition

Unter einem Trauma versteht man jegliche stumpfe oder penetrierende Krafteinwirkung auf den menschlichen Körper, die zu einer reversiblen oder irreversiblen Schädigung anatomischer Strukturen führt (15). Diese kann von einfachen Läsionen der Haut im Sinne einer Schürfwunde oder oberflächlichen Stichverletzung über komplexe Verletzungen mehrerer Organe oder Organsysteme wie beispielsweise eine Leberzerreiung reichen (15,16).

Das Polytrauma beschreibt nach Tscherne einen Zustand des Körpers mit gleichzeitig vorliegenden Mehrfachverletzungen, bei der mindestens eine Verletzung oder die Gesamtheit der Verletzungen lebensbedrohlichen Charakter hat (17,18). Hauptursache des Polytraumas sind in der westlichen Welt im überwiegenden Fall Verkehrsunfälle (2,5).

Mangels weltweit gültiger und einheitlicher Definition des Begriffes „Polytrauma“ wurde in einem dreijährigen internationalen Konsensusprozess eine neue Definition entwickelt und 2014 publiziert (19,20): Basierend auf einer Literaturrecherche und Auswertungen des Traumaregisters der DGU[®] konnten fünf physiologische Grenzwerte definiert und in Verbindung mit dem Punktwert des AIS (Abbreviated Injury Score) kombiniert werden (20). Folgende fünf Grenzwerte, die als indirektes Maß für die Verletzungsschwere zu werten sind, werden berücksichtigt (20):

- Alter >70 Jahre
- Hypotension mit systolischem Blutdruck <90mmHg
- Bewusstlosigkeit am Unfallort mit einem GCS ≤ 8
- Azidose mit einem Base Excess ≤ -6
- Koagulopathie mit einer PTT ≥ 40 bzw. einem INR $\geq 1,4$

Zusätzlich fließt der AIS in die Definition mit ein: Der AIS stellt eine vereinfachte Skala zur Darstellung der Verletzungsschwere dar, die auf Expertenmeinungen einer Amerikanischen Vereinigung für Verkehrs- und Automobilsicherheit (Association for the Advancement of Automotive Medicine) basiert (21). Es werden die Verletzungen des polytraumatisierten Patienten in Einzelverletzungen aufgeteilt und jede Einzelverletzung in ihrer Schwere beurteilt. Die Einteilung reicht von geringfügigen Verletzungen mit dem Punktwert 1 zu nicht mehr

behandelbaren/tödlichen Maximalverletzungen mit dem Punktwert 6. Ein AIS mit dem Punktwert 3 beschreibt beispielsweise eine schwere Verletzung (21).

Die neue „Berlin-Definition“ des Polytraumas lässt sich damit zusammenfassen als Verletzung von mindestens zwei Körperregionen mit einem AIS ≥ 3 und mindestens einer pathologischen Abweichung im Sinne der fünf oben beschriebenen physiologischen Parameter (20).

Fortschrittlich an dieser neuen Definition ist, dass sie nicht nur eine reine Beschreibung anatomischer Verletzungen darstellt, sondern ebenso physiologische Parameter berücksichtigt. Damit gelingt erstmals die Erhebung eines Scores, der als Kombination aus anatomischen und physiologischen Komponenten im erheblichen Maß evidenzbasierte und Outcome-relevante Faktoren vereint (20,22).

1.3 Epidemiologie und klinische Relevanz der Beckenringverletzung

Zu den schwerwiegenden Verletzungen eines polytraumatisierten Patienten zählt beispielsweise auch eine instabile Beckenfraktur. Obwohl es sich um eine seltene Verletzung handelt, weisen etwa bis zu 27% der Polytraumen Frakturen des Beckenrings auf (23–26).

Die Angaben bezüglich der Inzidenz von instabilen Beckenringverletzungen variieren teilweise stark. Im deutschsprachigen Raum fallen 3-8% aller Frakturen auf Beckenringfrakturen – mechanisch stabile sowie instabile (23,24,27).

Das entspricht einer geschätzten, absoluten Inzidenz von 19-37/100.000 Einwohner/Jahr in den Industrienationen (25,28).

Ursächlich für Beckenringverletzungen sind meist Hochrasanztraumen – an erster Stelle stehen Verkehrsunfälle und Stürze aus großer Höhe (25). Nicht zuletzt aufgrund des Traumamechanismus weisen Patienten mit Beckenringverletzungen sehr häufig (66%) weitere Verletzungen auf, in 20% sind sie polytraumatisiert (29).

Der relativ niedrigen Inzidenz steht jedoch eine hohe Letalitätsrate gegenüber (30–32):

Bis zu 29% der instabilen Beckenverletzungen enden letal (33). Häufig ist die hohe Mortalitätsrate nicht in der Beckenfraktur selbst begründet, sondern durch relevante Begleitverletzungen – insbesondere der im Beckenbereich verlaufenden Gefäße, des Urogenitaltrakts und des peripelvinen Weichteilmantels (23). Durch Beteiligung dieser zu den

Beckenknochen topographisch eng lokalisierten Strukturen und Organen sind die Patienten durch ein enormes Blutungsrisiko gefährdet (25). Daran zeigt sich die Relevanz einer schnellstmöglichen Diagnose und sofortigen Einleitung einer adäquaten Therapie (26,34). Die hohe Letalität ist dabei überwiegend schweren Blutungen aus venösen Plexusläsionen oder den Frakturrenden selbst geschuldet: Häufige Blutungsquellen stellen der präsakrale sowie retrovesikale Venenplexus dar. Arterielle Blutungen zeigen sich bei 2-25% der Beckenringfrakturen und stellen damit die Minderheit dar (23,26,33,35–37). Bei Verletzungen am dorsalen Beckenring entspringen arterielle Blutungen meist dem Stromgebiet der A. iliaca interna, bei Verletzungen des ventralen Beckenrings häufig dem Stromgebiet der A. iliaca externa (23). Noch differenzierter betrachtet, stammen arterielle Blutungen in absteigender Häufigkeit aus folgenden Gefäßen (23,38):

- A. pudenda
- A. glutea superior sowie inferior
- A. sacralis lateralis
- A. iliolumbalis
- A. iliaca communis, externa sowie interna.

Blutungen jeglicher Art können über einen erheblichen Blutverlust zügig zur hämodynamischen Instabilität führen. Diese Komplikation zeigt sich bei mechanisch instabilen Beckenringfrakturen mit 18-63% wesentlich häufiger als bei mechanisch stabilen Frakturen (33). Mechanisch instabile Beckenringverletzungen führen mit 33% die Ursachenstatistik des hämorrhagischen Schocks bei Traumapatienten an (35,39). Vor allem Patienten mit komplexen Beckenfrakturen weisen eine unverändert hohe Letalität auf: Das Verbluten steht hier mit 39% an der ersten Stelle der Todesursachenstatistik (25,33). Gleichzeitig führt der Verlust von Blutvolumen zu einer Sauerstoffminderversorgung der Organe (27). Dies wird durch die hämodynamische Instabilität im Sinne einer gravierenden Hypotension und konsekutiven Minderperfusion der Mikrozirkulation und Endorgane weiter verstärkt (27). Beide Aspekte werden für Sekundärschäden an Organen im Rahmen eines traumatischen Ereignisses mit der Folge des Organversagens verantwortlich gemacht (27).

1.4 Überblick über die Anatomie und Evolution des Beckens

Die profunde Kenntnis der Beckenanatomie stellt die Grundlage des Verständnisses und Managements von Beckenringverletzungen dar.

Das Becken stellt einen von den Ossa coxae und Os sacrum gebildeten, federnden Ring dar, welcher funktionell – vor allem beim Laufen und Springen - Belastungen und Erschütterungen abfedert und die Kraftübertragung vom Körperstamm auf beide Beine vermittelt (40). Der Kraftfluss verläuft unter statischen Bedingungen vom Körperstamm über die Ossa coxae und das Os sacrum zum Azetabulum und weiter zu den Ossa femoris (40).

Die Ossa coxae als massive achtförmige Konstruktionen setzen sich aus drei bis zum frühen Erwachsenenalter unverschmolzenen Knochen zusammen: Dem Os ilium, dem Os pubis und Os ischii (40). Alle drei Knochen sind an der Bildung des Azetabulums beteiligt und dienen als Ansatz- und Ursprungsorte für die kräftige Beckenboden-, Gesäß- und Beinmuskulatur, die nicht zuletzt seit dem aufrechten Gang im Rahmen der menschlichen Evolution eine entscheidende Rolle des Laufprozesses inne hat (40). Insbesondere die beiden Ossa ilii sind auch für den Schutz der inneren Organe von immenser Bedeutung (40).

Die knöchernen Anteile des Beckenrings sind nicht starr miteinander verbunden, vielmehr bestehen dorsal straffe Gelenke – die Iliosakralgelenke - während die ventral lokalisierte Symphyse einer Synchondrose entspricht: Sie erlauben Nutationsbewegungen (40). Zusammengefasst besteht die Funktion der Iliosakralgelenke und der Symphyse - neben einer möglichen Erweiterung und Verformung des Beckenrings während einer Schwangerschaft – vor allem in der Pufferung aller auf das Becken und die in ihm geschützt liegenden, inneren Organe einwirkenden Kräfte und Erschütterungen (40).

Die Symphyse verbindet die beiden Ossa pubes über eine Faserknorpelscheibe und zusätzliche, überkreuzende Bandstrukturen miteinander (40). Funktionell kann sie vor allem starken Scher- und Zugspannungen sowie Schub- und Rotationsbewegungen widerstehen, die bei statischen Tätigkeiten wie dem Sitzen oder Stehen oder dynamischen Bewegungen wie dem Laufen oder dem Wechsel vom Zweibein- in den Einbeinstand auftreten (40).

Die Iliosakralgelenke sind von einer straff gespannten Gelenkkapsel umgeben. Zusätzlich besteht eine Vielzahl von Verstärkungsbändern, die ein Auseinanderweichen der Beckenhälften bei Belastung wirksam verhindern: Von besonderem Interesse sind die vorderen und hinteren Bandzüge (Ligg. Sacroiliaca ventralia und dorsalia) sowie die zwischen den Gelenkpartien lokalisierten Zwischenknochenbänder (Ligg. Sacroiliaca interossea) (40). Ergänzt werden die hinteren Bandzüge durch weitere, unterstützende Bänder mit Ansatzpunkten im Bereich der Ossa ischii (Lig. Sacrotuberale und Sacrospinale) (40). Alle diese Bänder vergrößern die Übertragungsfläche der vom Rumpf auf die unteren Extremitäten weiterzugehenden Last.

Vereinfacht ausgedrückt erfüllt der hintere Beckenring funktionell vor allem Aufgaben der Kraftübertragung, während der ventrale Beckenring vorwiegend eine Pufferfunktion besitzt (37,41,42).

Die anatomische Kenntnis insbesondere der dorsalen Bandstrukturen stellt die Grundlage zur klinischen Klassifikation der Beckenringverletzungen dar (siehe 1.5).

Den Abschluss des Beckens nach kaudal gewährleistet die kräftige Beckenbodenmuskulatur – bestehend aus dem M. levator ani, M. transversus perinei profundus und superficialis, M. sphincter ani externus, M. bulbocavernosus und M. ischiocavernosus (40). Funktionell dient der Beckenboden neben dem Verschluss der durch ihn durchtretenden Organe Mastdarm und Harnröhre im Wesentlichen als Stütze für die inneren Organe und ist im Zusammenspiel mit dem Zwerchfell und der Bauchmuskulatur auch maßgeblich an der Bauchpresse beteiligt (40). Desweiteren verlaufen durch die verschiedenen Durchtrittspforten der Beckenbodenmuskulatur ebenfalls bedeutende neurovaskuläre Strukturen des Beckenbereichs: Hervorzuheben sind hier der Plexus lumbosacralis mit somatischen sowie autonomen Nerven und die internen und externen Iliakalgefäße mit ihren Ästen (37,41,42).

1.5 Klassifikation und Definition von Beckenringverletzungen

Unter einer Beckenringverletzung wird eine traumatische Unterbrechung des knöchernen Beckengerüsts im Sinne einer Fraktur verstanden (41). Das Becken lässt sich als Ringgerüst verstehen, welches eine optimale Übertragung der Körperlast vom Körperstamm auf beide Beine ermöglichen soll. Anatomisch und funktionell werden am Beckenring ein ventraler und ein dorsaler Anteil unterschieden. Analog spricht man bei ventraler und/oder dorsaler Verletzung bzw. Unterbrechung der Integrität des knöchernen Beckenrings von einer Beckenringverletzung. Dem dorsalen Bereich kommt als dem biomechanisch relevanten und lasttragenden Anteil eine hohe Bedeutung zu. Insbesondere Frakturen des dorsalen Beckenrings führen daher zu einer Schwächung des beschriebenen Ringsystems im Sinne einer gravierenden, mechanischen Instabilität (34,37).

Anhand bildgebender Diagnostik lassen sich knöcherne Beckenringverletzungen näher klassifizieren. Im Schockraum bietet die a.-p.-Röntgen-Beckenübersichtsaufnahme eine zügige Möglichkeit zur Abschätzung des Verletzungsausmaßes des Beckenbereichs (28,34). Zusätzlich können durch die Inlet-Aufnahme (Pennal I) bei einer Beckenfraktur Fragmentdislokationen in kraniokaudaler Richtung detektiert werden, die Outlet-Aufnahme (Pennal II) dient der

Bestimmung von Fragmentdislokationen in ventrodorsaler Richtung (29,43). Während die Röntgenstrahlen bei der a.-p.-Beckenübersichtsaufnahme senkrecht zum liegenden Becken verlaufen, ist der Zentralstrahl bei der Inlet-Aufnahme um 45°-60° nach kaudal geneigt und bei der Outlet-Aufnahme um 45° in kranialer Richtung (29,43). Zur Detektion von Verletzungen im Bereich des Azetabulums können Ala- und Obturatoraufnahmen herangezogen werden: Dabei handelt es sich um Schrägaufnahmen des Hüftgelenks, die eine Beurteilung beispielsweise von vorderer und hinterer Pfannenrandkontur ermöglichen (28,29,34,43).

Die radiologische Eingruppierung der Beckenfraktur bestimmt im Wesentlichen die weitere medizinische Therapie der Verletzung. Im Bereich des Beckenrings lassen sich transsymphysäre, -pubische, -azetabuläre, -iliakale, -iliosakrale sowie transsakrale Instabilitäten unterteilen (34).

Weltweit hat sich die in Anlehnung an Pennal und Tile et al. entstandene Klassifikation der Arbeitsgemeinschaft Osteosynthese nach dem ABC-Schema durchgesetzt (34,37). Diese Klassifikation verknüpft die auf den Unfallmechanismus fokussierende Klassifikation nach Pennal mit der auf den Grad der Instabilität fokussierenden Klassifikation nach Tile (34,37).

Zusätzlich werden Beckenfrakturen, die gleichzeitig mit einer offenen Fraktur oder Verletzung von intrapelvinen Organen, Nerven, Gefäßen oder den ableitenden Harnwegen einhergehen unter dem Begriff der komplexen Beckenfraktur zusammengefasst (36,37,44). Die Mortalität der komplexen Beckenfraktur liegt bei bis zu 33% (37,45,46). Die gravierendste Variante der komplexen Beckenfraktur beschreibt die traumatische Hemipelvektomie: Durch massive, direkte Gewalteinwirkung kommt es zu einer inneren Amputation mit Abtrennung einer Beckenhälfte inklusive unterer Extremität vom Körperstamm begleitet von einer Dissoziation der neurovaskulären Strukturen und des peripelvinen Weichteilmantels (37,41,44). Aufgrund der Schwere der Verletzung wird die traumatische Hemipelvektomie nur selten überlebt, die Letalität wird in der Literatur mit bis zu 60% angegeben (37,41,45,46).

In der nachfolgenden Beschreibung der Klassifikation steht der Begriff „Stabilität/Instabilität“ stets für die mechanische, nicht hämodynamische Komponente der Beckenringverletzungen.

Typ A: Stabile Verletzungen des Beckenrings

Typ A-Verletzungen zeichnen sich durch Läsionen im Bereich des ventralen Beckenrings aus. Da die osteoligamentäre Integrität des hinteren Beckenrings vollständig erhalten bleibt, gilt sie als mechanisch stabil. Frakturen des vorderen Beckenrings, eine Abrissfraktur der Spina iliaca,

Randabrissfrakturen des Os ileum oder tiefe, sakrale Querfrakturen fallen in diese Kategorie (23,34,37).

Die Typ-A-Frakturen können anhand der Frakturlokalisierung weiter unterteilt werden. Die nächste Unterteilung erfolgt in Frakturgruppen bei Vorliegen einer Abrissfraktur (Gruppe 1), bei direktem Anprall als Mechanismus (Gruppe 2) oder Sakrumquerfraktur bzw. Steißbeinverletzung (Gruppe 3).

Typ A: Verletzung ohne Beteiligung (oder ohne Dislokation) dorsaler Beckenring

Frakturtyp A, Frakturgruppe 1 (Abrissfraktur) , Fraktursubgruppe 1–3, Frakturuntergruppe 1–3			
Frakturtyp	61 - A	61 - A	61 - A
Frakturgruppe	61 - A 1	61 - A 1	61 - A 1
Fraktursubgruppe	61 - A 1.1 (Spina iliaca)	61 - A 1.2 (Beckenkamm)	61 - A 1.3 (Tuber ischiadicum)
Frakturuntergruppe	61 - A 1.1.1 (anterior superior) 61 - A 1.1.2 (anterior inferior) 61 - A 1.1.3 ("pubic spine")	keine	keine



Abb. 1: AO-Klassifikation der Beckenringfrakturen: Übersicht über Typ-A-Beckenfrakturen der Frakturgruppe 1 (aus: AO-Manual of Fracture Management)

Die Fraktursubgruppe unterteilt Typ-A-Frakturen in Frakturen mit Beteiligung der Spina iliaca (Subgruppe 1), des Beckenkamms (Subgruppe 2) oder des Tuber ischiadicums (Subgruppe 3).

Zuletzt beschreibt die Frakturuntergruppe die exakte Lokalisation der Fraktur. Beispielhaft sei eine mehrfragmentäre Fraktur der Beckenschaufel genannt: Die Fraktursubgruppe beschreibt dabei die Lokalisation der Fraktur in der Beckenschaufel während die Frakturuntergruppe die zusätzliche Information gibt, dass es sich um eine mehrfragmentäre Fraktur handelt.

Frakturtyp A, Frakturgruppe 2 (direkter Anprall) , Fraktursubgruppe 1–3, Frakturuntergruppe 1–2			
Frakturtyp	61 - A	61 - A	61 - A
Frakturgruppe	61 - A 2	61 - A 2	61 - A 2
Fraktursubgruppe	61 - A 2.1 (Beckenschaufel)	61 - A 2.2 (unilateral ventral)	61 - A 2.3 (bifokal ventral)
Frakturuntergruppe	61 - A 2.1.1 (1 Fragment) 61 - A 2.1.2 (> 1 Fragment)	61 - A 2.2.1 (durch "pubic rami") 61 - A 2.2.2 (durch "pubic rami" + Symphysenbeteiligung)	61 - A 2.3.1 (bilateral "pubic rami") 61 - A 2.3.2 (unilateral "pubic rami" + Symphysenbeteiligung)



Abb. 2: AO-Klassifikation der Beckenringfrakturen: Übersicht über Typ-A-Beckenfrakturen der Frakturgruppe 2 (aus: AO-Manual of Fracture Management)

Beispielsweise sei hier eine Typ-A-Fraktur genannt, bei der es durch direkten Anprall (Frakturgruppe 2) zu einer Fraktur der Beckenschaufel (Fraktursubgruppe 1) mit mehr als einem Fragment (Frakturuntergruppe 2) gekommen ist – folglich besteht eine Beckenfraktur des Typs A2.1.2.

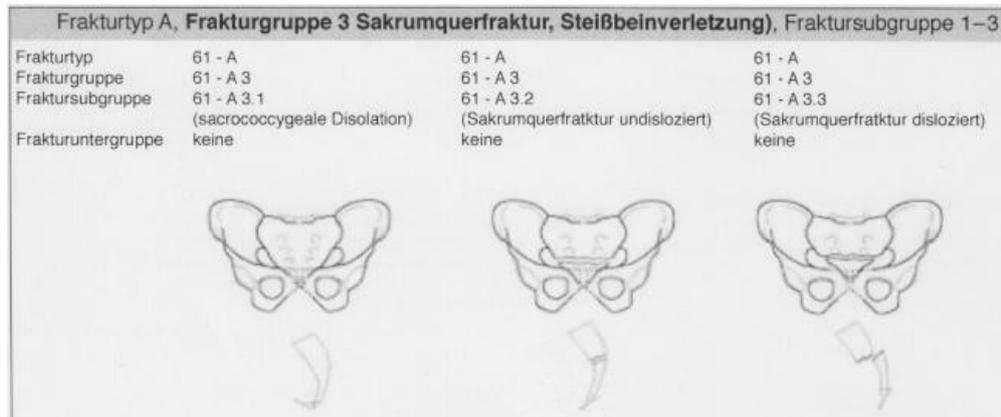


Abb. 3: AO-Klassifikation der Beckenringfrakturen: Übersicht über Typ-A-Beckenfrakturen der Frakturgruppe 3 (aus: AO-Manual of Fracture Management)

Typ B: Partiiell instabile Verletzungen des Beckenrings

Bei dieser Art der Verletzung kommt es zu einer inkompletten Unterbrechung der osteoligamentären Strukturen des dorsalen Beckenrings, die zur sogenannten Rotationsinstabilität führt. Meist sind nur die ventralen sakroiliakalen Bandstrukturen betroffen. Beispiele dieser Kategorie stellen die Open-book-Fraktur sowie die Kompressions- bzw. Innenrotationsfraktur dar. Bei der Open-book-Fraktur kommt es zu einer Symphysensprengung in Kombination mit einer unilateralen Außenrotation einer Beckenhälfte und Verletzung der ventralen sakroiliakalen Bandstrukturen. Konsekutiv lässt sich das Becken wie ein Buch aufklappen (47). Bei der Innenrotationsfraktur verhaken sich die Schambeinäste bei Innenrotation einer Beckenhälfte ineinander (47). Bei beiden Frakturtypen gewährleisten die erhaltenen, dorsalen sakroiliakalen Bandstrukturen noch eine gewisse Reststabilität im Sinne einer Translationsstabilität (34).

Analog zu den Typ-A-Frakturen, lassen sich auch die Typ-B-Frakturen durch Frakturgruppen, -subgruppen und -untergruppen ausführlicher beschreiben.

Bei den Frakturgruppen wird zwischen Frakturen mit Außenrotation (Gruppe 1), Innenrotation (Gruppe 2) und bilateralen posterioren Verletzungen (Gruppe 3) unterschieden. Die Subgruppen fokussieren sich erneut auf die geschädigte Struktur selbst, beispielsweise das Os sacrum oder das ISG.

Auch die Frakturuntergruppe beschreibt – analog zu den Typ A Frakturen – die genaue Lokalisation der Beckenringverletzung: Bei der Open-book-Fraktur (=Frakturgruppe) mit Schädigung des ISG (=Fraktursubgruppe) kann die Aufklappbarkeit des Beckens durch eine ipsilaterale, kontralaterale oder transsymphysäre Verletzung (=Frakturuntergruppe) bedingt sein.

Typ B: inkomplette Verletzung dorsaler Beckenring, partiell stabil

Frakturtyp B, Frakturgruppe 1 (Außenrotation, "open book"), Fraktursubgruppe 1–2, Frakturuntergruppe 1–3

Frakturtyp	61 - B	61 - B
Frakturgruppe	61 - B 1	61 - B 1
Fraktursubgruppe	61 - B 1.1 (SI-Gelenk)	61 - B 1.2 (Sakrum)
Frakturuntergruppe	61 - B 1.1.1 (ipsilateral) (contralateral) (transsymphysär)	keine

Modifikator C ja ja

Modifikator C (anteriore Verletzung):
 1: unilateral, transpubisch, ipsilateral
 2: unilateral, transpubisch, contralateral
 3: bilateral, transpubisch
 4: Symphysensprengung < 2,5 cm
 5: Symphysensprengung > 2,5 cm
 6: Symphysensprengung, überlappend
 7: Symphysensprengung + transpubisch ipsilateral
 8: Symphysensprengung + transpubisch contralateral
 9: Symphysensprengung + transpubisch bilateral
 10: keine anteriore Verletzung

Frakturtyp B, Frakturgruppe 2 (Innenrotation, "lateral compression injury"), Fraktursubgruppe 1–3, Frakturuntergruppe 1–3

Frakturtyp	61 - B	61 - B	61 - B
Frakturgruppe	61 - B 2	61 - B 2	61 - B 2
Fraktursubgruppe	61 - B 2.1 (Sakrum anterior)	61 - B 2.2 (SI-Gelenk, Lux.-Fx)	61 - B 2.3 (Ilium, inkomplett)
Frakturuntergruppe	61 - B 2.1.1 (anterior ipsilateral) 61 - B 2.1.2 (anterior contralateral "bucket handle")	61 - B 2.2.1 (anterior ipsilateral) 61 - B 2.2.2 (anterior contralateral "bucket handle")	61 - B 2.3.1 (anterior ipsilateral) 61 - B 2.3.2 (anterior contralateral "bucket handle")

Modifikator C ja ja ja

Modifikator C (anteriore Verletzung):
 1: unilateral, transpubisch, ipsilateral
 2: unilateral, transpubisch, contralateral
 3: bilateral, transpubisch
 4: Symphysensprengung < 2,5 cm
 5: Symphysensprengung > 2,5 cm
 6: Symphysensprengung, überlappend
 7: Symphysensprengung + transpubisch ipsilateral
 8: Symphysensprengung + transpubisch contralateral
 9: Symphysensprengung + transpubisch bilateral
 10: keine anteriore Verletzung

Abb. 4: AO-Klassifikation der Beckenringfrakturen: Übersicht über Typ-B-Beckenfrakturen der Frakturgruppen 1 und 2 (aus: AO-Manual of Fracture Management)

Frakturtyp B, Frakturgruppe 3 (bilaterale posteriore Verletzung), Fraktursubgruppe 1–3, Frakturuntergruppe 1–3			
Frakturtyp	61 - B	61 - B	61 - B
Frakturgruppe	61 - B 3	61 - B 3	61 - B 3
Fraktursubgruppe	61 - B 3.1 (bilateral B1)	61 - B 3.2 (B1 und B2)	61 - B 3.3 (bilateral B2)
Frakturuntergruppe	61 - B 3.1.1 (bilateral SI-Gelenk) 61 - B 3.1.2 (bilateral Sakrum) 61 - B 3.1.3 (SI-Gelenk + Sakrum)	keine	keine
Modifikator C	ja	ja	ja
Modifikator B	nein	ja	ja
Modifikator A	nein	ja	ja

<p>Modifikator A (ipsilaterale dorsale Verletzung):</p> <ol style="list-style-type: none"> 1: ventrale SI-Gelenksöffnung 2: Sakrumfraktur 3: anteriore Kompressionsfraktur Sakrum 4: partielle Luxationsfraktur SI-Gelenk 5: inkomplette, posteriore Iliumfraktur <p>Modifikator B (kontralaterale dorsale Verletzung):</p> <ol style="list-style-type: none"> 1: ventrale SI-Gelenksöffnung 2: Sakrumfraktur 3: anteriore Kompressionsfraktur Sakrum 4: partielle Luxationsfraktur SI-Gelenk 5: inkomplette, posteriore Iliumfraktur 	<p>Modifikator C (anteriore Verletzung):</p> <ol style="list-style-type: none"> 1: unilateral, transpubisch, ipsilateral 2: unilateral, transpubisch, contralateral 3: bilateral, transpubisch 4: Symphysensprengung < 2,5 cm 5: Symphysensprengung > 2,5 cm 6: Symphysensprengung, überlappend 7: Symphysensprengung + transpubisch ipsilateral 8: Symphysensprengung + transpubisch contralateral 9: Symphysensprengung + transpubisch bilateral 10: keine anteriore Verletzung
---	--

Abb. 5: Fortsetzung der AO-Klassifikation der Beckenringfrakturen: Übersicht über Typ-B-Beckenfrakturen der Frakturgruppe 3 (aus: AO-Manual of Fracture Management)

Zusätzlich wurde die Klassifikation der Typ-B-Frakturen um Modifikatoren erweitert: In der Frakturgruppe 3 werden beispielsweise zwischen den Modifikatoren A-C unterschieden: Modifikator A spezifiziert eine ipsilaterale, dorsale Verletzung und Modifikator B eine kontralaterale, dorsale Verletzung. Vom Modifikator C wird – in allen 3 Frakturgruppen – Gebrauch gemacht zur detaillierten Beschreibung einer anterioren Verletzung.

Zur Veranschaulichung sei auch hier ein Beispiel genannt: Eine B1.1.1 Modifikator C5 beschreibt eine Unterform der Open-book-Fraktur. Es handelt sich um eine Typ-B-Fraktur mit Außenrotation. Im Bereich des dorsalen Beckenrings imponiert eine partiell stabile Verletzung des ipsilateralen ISG. Im ventralen Beckenring zeigt sich eine Symphysensprengung, die in ihrem Ausmaß mehr als 2,5cm erreicht.

Typ C: Instabile Verletzungen des Beckenrings

Verletzungen dieser Kategorie zeichnen stets durch hohe Gewalteinwirkungen aus (37). Es besteht eine Translationsinstabilität: Das Becken ist durch die komplette Disruption der dorsalen osteoligamentären Strukturen höchstgradig instabil und lässt sich in allen drei Raumebenen – in Frontal-, Sagittal- und Transversalebene - dislozieren (34).

Wie bereits bei den Typ-A- und Typ-B-Beckenfrakturen, gibt es auch eine detaillierte Klassifikation mit Frakturgruppen, -subgruppen, -untergruppen und Modifikatoren für die Typ-C-Fraktur.

Da es sich klassischerweise bei den Typ-C-Frakturen um mechanisch komplett instabile Frakturen handelt, sind die Frakturgruppen unterteilt in Frakturen mit nur unilateral bestehender Instabilität (Gruppe 1), mit ipsilateral komplett und kontralateral inkomplett bestehender Instabilität (Gruppe 2) sowie Frakturen, die eine komplette Instabilität bilateral aufweisen (Gruppe 3).

Typ C: komplette Verletzung dorsaler Beckenring, instabil

Frakturtyp C, Frakturgruppe 1 (nur unilateral), Fraktursubgruppe 1–3, Frakturuntergruppe 1–3			
Frakturtyp	61 - C	61 - C	61 - C
Frakturgruppe	61 - C 1	61 - C 1	61 - C 1
Fraktursubgruppe	61 - C 1.1 (Ilium)	61 - C 1.2 (SI-Gelenk)	61 - C 1.3 (Sakrum)
Frakturuntergruppe	61 - C 1.1.1 keine	61 - C 1.2.1 (transiliakale Lux. Fx) 61 - C 1.2.2 (reine SI-Sprengung) 61 - C 1.2.3 (transsakrale Lux. Fx)	61 - C 1.3.1 (transalar) 61 - C 1.3.2 (transforaminal) 61 - C 1.3.3 (zentral)
Modifikator C	ja	ja	ja
			
Modifikator C (anteriore Verletzung):	<ul style="list-style-type: none"> 1: unilateral, transpubisch, ipsilateral 2: unilateral, transpubisch, contralateral 3: bilateral, transpubisch 4: Symphysensprengung < 2,5 cm 5: Symphysensprengung > 2,5 cm 6: Symphysensprengung, überlappend 7: Symphysensprengung + transpubisch ipsilateral 8: Symphysensprengung + transpubisch contralateral 9: Symphysensprengung + transpubisch bilateral 10: keine anteriore Verletzung 		

Abb. 6: AO-Klassifikation der Beckenringfrakturen: Übersicht über Typ-C-Beckenfrakturen der Frakturgruppe 1 (aus: AO-Manual of Fracture Management)

Frakturtyp C, Frakturgruppe 2 (ipsilateral komplett, kontralateral inkomplett), Fraktursubgruppe 1–3, Frakturuntergruppe 1–2			
Frakturtyp	61 - C	61 - C	61 - C
Frakturgruppe	61 - C 2	61 - C 2	61 - C 2
Fraktursubgruppe	61 - C 2.1 (Ilium)	61 - C 2.2 (SI-Gelenk)	61 - C 2.3 (Sakrum)
Frakturuntergruppe	61 - C 2.1.1	61 - C 2.2.1 (transiliakale Lux. Fx)	61 - C 2.3.1 (transalar)
	keine	61 - C 2.2.2 (reine SI-Sprengung)	61 - C 2.3.2 (transforaminal)
		61 - C 2.2.3 (transsakrale Lux. Fx)	61 - C 2.3.3 (zentral)
Modifikator C	ja	ja	ja
Modifikator B	ja	ja	ja
			
Modifikator B (kontralaterale dorsale Verletzung):	Modifikator C (anteriore Verletzung):		
1.1: Außenrotation, SI-Gelenk	1: unilateral, transpubisch, ipsilateral		
1.2: Sakrumfraktur	2: unilateral, transpubisch, kontralateral		
2.1: anteriore Kompressionsfraktur Sakrum	3: bilateral, transpubisch		
2.2: partielle Luxationsfraktur SI-Gelenk	4: Symphysensprengung <= 2,5 cm		
2.3: inkomplette, posteriore Iliumfraktur	5: Symphysensprengung > 2,5 cm		
	6: Symphysensprengung, überlappend		
	7: Symphysensprengung + transpubisch ipsilateral		
	8: Symphysensprengung + transpubisch kontralateral		
	9: Symphysensprengung + transpubisch bilateral		
	10: keine anteriore Verletzung		

Frakturtyp C, Frakturgruppe 3 (bilateral komplett), Fraktursubgruppe 1–3, Frakturuntergruppe 1–6			
Frakturtyp	61 - C	61 - C	61 - C
Frakturgruppe	61 - C 3	61 - C 3	61 - C 3
Fraktursubgruppe	61 - C 3.1 (extrasakral bds)	61 - C 3.2 (sakral+extrasakral)	61 - C 3.3 (sakral bds)
Frakturuntergruppe	61 - C 3.1.1 (Ilium)	61 - C 3.2.1 (transalar)	61 - C 3.3.1 (transalar bds)
	61 - C 3.1.2 (transiliakale Lux. Fx)	61 - C 3.2.2 (transforaminal)	61 - C 3.3.2 (transalar + transforaminal)
	61 - C 3.1.3 (transsakrale Lux. Fx)	61 - C 3.2.3 (zentral)	61 - C 3.3.3 (transalar + zentral)
	61 - C 3.1.4 (Sprengung SI-Gelenk)		61 - C 3.3.4 (transforaminal bds)
			61 - C 3.3.5 (transforaminal+ zentral)
			61 - C 3.3.6 (zentral bds)
Modifikator C	ja	ja	ja
Modifikator B	ja	ja	nein
			
Modifikator B (kontralaterale dorsale Verletzung):	Modifikator C (anteriore Verletzung):		
1: Ilium	s. C 2-Verletzung		
2: transiliakale Luxationsfraktur			
3: transsakrale Luxationsfraktur			
4: reine SI-Gelenk-Sprengung, komplett			

Abb. 7: Fortsetzung der AO-Klassifikation der Beckenringfrakturen: Übersicht über Typ-C-Beckenfrakturen der Frakturgruppen 2 und 3 (aus: AO-Manual of Fracture Management)

Die Modifikatoren A-C dienen der detaillierten Beschreibung ipsilateraler dorsaler, kontralateraler dorsaler oder anteriorer Verletzung – ähnlich der Modifikatoren der Typ-B-Frakturen.

Beispielsweise beschreibt eine C1.2.1-Fraktur eine unilateral komplett instabile Fraktur durch eine bestehende transiliakale Luxationsfraktur im Bereich des Sakroiliakalgelenks. Als Zusatz würde der Modifikator C4 eine zusätzliche Symphysensprengung beschreiben, die in ihrem Ausmaß kleiner als 2,5cm beträgt.

1.6 Klinische Detektion instabiler Beckenringverletzungen

Die Prognose polytraumatisierter Patienten wird im Wesentlichen auch davon beeinflusst, wie zügig lebensbedrohliche Verletzungen erkannt und daher auch einer adäquaten Therapie zugeführt werden können. Aus diesem Grund hat die Detektion einer instabilen Beckenringverletzung einen hohen Stellenwert im Rahmen des Polytrauma-Managements (26).

Ein begründeter Verdacht auf eine instabile Beckenverletzung kann sich bereits anhand des Unfallhergangs bzw. Traumamechanismus – vor allem Hochrasanztraumen – ergeben (41). Weiterhin sind Verkehrsunfälle sowie Stürze aus großer Höhe – auch in suizidaler Absicht- zu nennen (34).

Zu Beginn der Diagnostik von Beckenringverletzungen steht die körperliche Untersuchung – insbesondere die Inspektion und Palpation der Beckenregion, aber auch die Funktionsprüfung angrenzender Gelenke sowie die digital-rektale Untersuchung (37,41). Im Rahmen der körperlichen Untersuchung sollte besonderes Augenmerk auf etwaige Weichteilschwellungen, Hämatome sowie Schürfungen in der Beckenregion gerichtet werden, die als Hinweis auf eine stattgehabte Gewalteinwirkung zu werten sind (41). Der Blutaustritt aus Vagina, Urethra oder Rektum deutet auf eine Verletzung intrapelviner Organe und Zerreißung des Beckenbodens hin und sollte eine weiterführende, fachspezifische Diagnostik nach sich ziehen (26,34,37). Bei übersehender Begleitverletzung der genannten Organe und Strukturen drohen dem Patienten septische Komplikation, die selbstredend erheblich die Gesamtprognose beeinflussen (23).

Die mechanische Stabilitätsprüfung des Beckens im Rahmen der körperlichen Untersuchung bietet eine wichtige Möglichkeit eine instabile Beckenfraktur – insbesondere bereits präklinisch - zu detektieren (26). Dabei wird eine beidseitige manuelle Kompression auf Höhe der Beckenschaufeln ausgeübt, die in seitlicher und ventrodorsaler Richtung ausgeführt werden soll (26,37). Die Beweglichkeit des Beckens soll für alle drei Raumebenen (Frontal-, Sagittal- und Transversalebene) getestet werden. Hierfür werden die Daumen auf die Spina iliaca anterior superior gelegt, die restlichen Finger greifen dorsal an den Beckenschaufeln an und ein dosierter Druck wird entsprechend der jeweilig zu testenden Beweglichkeit in einer der drei Raumebenen appliziert (26,37,27,48).

In der aktuellen S3-Leitlinie von 2011 zur Polytrauma-/Schwerverletztenbehandlung der DGU wird die Stabilitätsprüfung des Beckens im Rahmen der körperlichen Untersuchung direkt nach Ankunft im Schockraum empfohlen (36). Angaben zur Sensitivität der mechanischen

Stabilitätsprüfung fallen weltweit sehr unterschiedlich aus (37,49–51). Die Detektion von Beckenverletzungen durch eine klinische Untersuchung und Stabilitätsprüfung beim wachen Patienten hat laut Gonzalez et al. eine Sensitivität von 93% im Vergleich zur Beckenübersichtsaufnahme mit 87% (49). Ähnliche Angaben machten auch Sauerland et al. und stellten damit die Notwendigkeit der a.-p.-Beckenübersicht bei diesem Patientengut infrage (50). Im Gegensatz dazu erbrachte eine prospektive, klinische Studie aus dem Jahr 2003 mit einem hohen Anteil an beatmeten Patienten für die Detektion instabiler Beckenverletzungen in der körperlichen Untersuchung durch den jeweils diensthabenden Unfallchirurgen eine wesentlich niedrigere Sensitivität von rund 44%. Pehle et al. wiesen auf die Schwierigkeiten der körperlichen Untersuchung bei diesem Patientengut hin: Fehlende Abwehrspannung, ausbleibende Abwehrmechanismen auf Schmerzreize und die mangelnde Möglichkeit zur Detektion begleitender neurologischer Pathologien erschweren die Diagnose der Beckenringverletzung bei stark bewusstseinsgetrübtten bzw. intubierten – und daher narkotisierten – Patienten erheblich. Die Autoren argumentierten daher für eine Beibehaltung der Beckenübersichtsaufnahme im Schockraum (51).

Generell wird empfohlen, die mechanische Stabilitätsprüfung nur einmalig durchzuführen, da jede weitere Manipulation an einem instabilen Becken das Risiko für erhebliche Blutverluste oder sekundäre Verletzungen weiter steigert (34). Die Autoren des ATLS[®] Manuals empfehlen bereits bei Verdacht auf eine instabile Beckenfraktur von einer mechanischen Stabilitätsprüfung abzusehen und stattdessen direkt mit der bildgebenden Diagnostik fortzufahren (26,34,52). Wird der Patient bereits mit angelegter Beckenschlinge in den Schockraum eingeliefert, soll aufgrund zuvor genannter Risiken von einer erneuten Stabilitätsprüfung abgesehen werden (37). Auf diese Weise soll ein Wiederaufklappen der Beckenhälften mit erneuter Volumenzunahme und konsekutiver Blutungszunahme getreu des Prinzips „do no further harm“ vermieden werden (37).

Neben der klinischen Untersuchung stellen bildgebende Verfahren eine weitere, entscheidende Säule in der Diagnostik instabiler Beckenfrakturen dar. Federführend seien hier die Becken-Röntgenübersichtsaufnahme sowie die CT-Polytrauma-Spirale genannt. Bei rund 20% der instabilen Beckenfrakturen mit falsch-negativer mechanischer Stabilitätsprüfung zeigen sich deutliche Hinweise auf eine solche Verletzung anhand von Röntgendiagnostik (33). Dies schlägt sich auch in den aktuellen Empfehlungen des ATLS[®]-Algorithmus nieder, die eine Anfertigung einer Beckenübersicht weiterhin als wichtigen Bestandteil der Schockraumdiagnostik betrachten

(36,51). Laut aktueller S3-Leitlinie Polytrauma der DGU soll im Rahmen der Schockraumdiagnostik eine Beckenübersichtsaufnahme und/oder CT der Beckenregion erfolgen (36). Die Anwendung bildgebender Verfahren – insbesondere der CT-Diagnostik - ermöglicht zusätzlich die Klassifikation der Fraktur. Anhand dieser Kategorisierung entscheidet sich, welcher operative Therapiepfad beschritten werden muss (36). Führender Vorteil der CT-Diagnostik ist außerdem die Erfassung von Begleitverletzungen sowie der durch Kontrastmittelaustritt erbrachte Nachweis aktiver Blutungen (24,34,36,37). Letzteres hat – neben der Klassifikation der Fraktur – ebenfalls direkten Einfluss auf die Therapieplanung: Die Detektion der Blutungsquelle beeinflusst die Wahl der Methode zur Blutstillung. So kann die Indikation zur offen chirurgischen Blutstillung z.B. im Sinne eines pelvinen Packings oder zur interventionellen Blutstillung mittels Embolisation gestellt werden (23,34,35,37,53–55).

1.7 Präklinisches Management instabiler Beckenringverletzungen

In Deutschland fallen 0,5-1% aller Notarzteinsätze in den Bereich der Polytraumaversorgung (27). Traumatologische Patienten weisen dabei in 12% der Fälle Verletzungen des Beckenbereichs auf (41). Die Inzidenz von Beckenringverletzungen beim polytraumatisierten Patienten liegt mit 27% wesentlich höher (23–26). Die mechanisch instabile Beckenfraktur im Rettungsdienst stellt somit eine seltene Notfallsituation dar (26,30,37). Aus der Schwere der Verletzung und der Outcome-Relevanz einer bereits präklinisch begonnenden, zielgerichteten Therapie ergibt sich die Notwendigkeit einer standardisierten Ausbildung der beteiligten Rettungsdienstmitarbeiter im Bereich des präklinischen Traumamanagements. Im Rahmen von beispielsweise pHTLS®- oder ITLS®-Kursen ist daher auch eine adäquate Schulung in der Anlage der externen, nicht-invasiven Beckenstabilisatoren zu fordern (56).

Bei der präklinischen Versorgung einer mechanisch instabilen Beckenverletzung handelt es sich um einen zeitkritischen Einsatz (41). Da die mechanische Instabilität häufig mit einer hämodynamischen Instabilität im Sinne einer nicht bzw. schlecht kontrollierbaren, inneren Blutung einhergeht, widmet sich die präklinische Therapie vor allem diesem Aspekt (41). Ziel ist es, einen hämorrhagischen Schock zu verhindern bzw. vorzubeugen (41). Daher fußt die präklinische Therapie der instabilen Beckenringverletzung auf den folgenden Säulen (27,41):

- Erkennen der instabilen Beckenringverletzung
- Anlage eines externen, nicht-invasiven Beckenstabilisators
- Flüssigkeits- und Volumentherapie im Sinne der permissiven Hypotonie (bei fehlendem Hinweis auf ein Neurotrauma)

- Zügiger Transport in ein überregionales Traumazentrum oder eine geeignete Klinik zur definitiven chirurgischen/interventionellen Blutungskontrolle

Alle vier Säulen haben gemeinsam, dass es sich um Maßnahmen handelt, die weder zu einer mechanisch, noch hämodynamisch stabilen Situation im Sinne der Restitutio ad integrum führen können. Vielmehr handelt es sich dabei um temporäre Maßnahmen im Sinne der Aufrechterhaltung oder Wiederherstellung von Vitalfunktionen als notärztliche Kernaufgabe (36,41). Diese sollen es ermöglichen, den Patienten durch eine Blutungslimitierung soweit hämodynamisch zu stabilisieren, dass er einer definitiven, lebensrettenden, meist operativen Blutstillung zugeführt werden kann (41).

Die einzige präklinische Möglichkeit der Reduktion des Beckenvolumens bei instabiler Beckenfraktur und konsekutiver Limitierung innerer Blutungen stellt die Anlage eines externen nicht-invasiven Beckenstabilisators dar (27,41). Bei mechanisch instabilem Becken und kompromittierter Hämodynamik sollte eine mechanische Notfallstabilisierung in jedem Fall durchgeführt werden (26,36). Bei der Beckenschlinge handelt es sich um eine externe, nicht-invasive Vorrichtung, die um die Beckenregion appliziert wird (41). Anhand Kadaverstudien mit artifiziellen Beckenringverletzungen konnten optimale Reduktionsergebnisse bei Anlage auf Höhe der großen Trochanteren erzielt werden (57). Durch die Immobilisierung der Beckenhälften wird versucht, bestehende Blutungen zu minimieren (34). Die Fähigkeit von Gefäßen zur Intimaeinrollung und damit zur Blutungskontrolle ist bei aufgespanntem Gefäß mutmaßlich nicht gegeben (58). Bei vergrößertem, intrapelvinen Volumen ist daher mit einer wesentlich höheren Einblutungsrate zu rechnen.

Über den entstehenden Druck nach Anlage des Beckenstabilisators soll eine Annäherung der Frakturrenden mit konsekutiver Blutstillung erzielt und erneut eine annähernd korrekte Anatomie hergestellt werden. Köhler et al. konnten am Kadavermodell zeigen, dass sich der intraabdominelle und der retroperitoneal-pelvine Druck nach Applikation von jeweils 4l Flüssigkeit in Abhängigkeit von der Stabilität des Beckenrings signifikant unterschied: Mit zunehmender Instabilität wurden nach Infusion signifikant niedrigere Drücke in den oben genannten Kompartimenten gemessen (41,59). Dies ist als deutlicher Hinweis auf eine pelvine Volumenzunahme bei instabiler Beckenfraktur durch das „Aufklappen“ und „zur-Seite-weichen“ der Beckenschaufeln und Zerreißen des Beckenbodens zu werten (41,59). Die durch die Anlage eines externen, nicht-invasiven Beckenstabilisators bewirkte externe Kompression soll dem erhöhten Blutverlust durch Reduktion des intrapelvinen Volumens entgegenwirken (41). Dies hat

vor allem bei venösen Blutungen einen hohen Stellenwert während arterielle Blutungen aufgrund des höheren intravasalen Drucks davon meist unberührt bleiben. Problematisch ist, dass dieser Selbsttamponadeeffekt nicht immer erreicht werden kann oder temporär ist: Durch Zerstörung der anatomischen pelvinen Kompartimente und/oder bei Verletzungen von Gefäßen im Bereich des Retroperitoneums kann es zum sogenannten „Kamineffekt“ kommen: Bei retroperitonealer Blutungsquelle kann sich das Hämatom mangels anatomischer Begrenzung zügig nach kranial bis zum Zwerchfell ausbreiten, was zu restriktiven Ventilationsproblemen und im Maximalfall zum abdominellen Kompartimentsyndrom führen kann (23,60). Auch sekundär intraperitoneal freie Flüssigkeit bei Verletzung des Peritoneums oder im Sinne einer „Durchschwitzung“ aufgrund unterschiedlicher Kompartimentdrücke kann zum Kamineffekt führen bzw. dazu beitragen.

Zur externen, nicht invasiven Stabilisierung stehen vorgefertigte Beckenschlingen zur Verfügung: Die gängigsten in der Notfallmedizin eingesetzten Modelle stellen T-POD[®], pneumatische Beckenschlinge VBM[®], Sam Sling[®] und der Pelvic Binder[®] dar. Auch die Anlage einer herkömmlichen Tuschschlinge kann in Betracht gezogen werden (34). Benötigt wird hierfür lediglich ein – je nach Patient- ausreichend langes und breites Stück Stoff. Im Rettungsdienst häufig verfügbar sind z.B. Trageneinmalbezüge, dünne Decken oder Bettlaken.

Das Flüssigkeits- und Volumenmanagement hat in der präklinischen Versorgung der instabilen Beckenfraktur ebenfalls einen zentralen Stellenwert. Ziel dieser Therapie ist es, eine Minderperfusion der Organe zu verhindern bzw. zumindest in ihrer Ausprägung einzudämmen (41). Die Volumengabe erfolgt entsprechend des ATLS[®]-Prinzips: Nach einer initialen Gabe von ein bis zwei Litern kristalliner Infusionslösung wird die hämodynamische Situation des Patienten reevaluiert und einer der folgenden Gruppen zugeordnet (52):

- „Rapid Responder“: Patienten, die auf die initiale Flüssigkeitsgabe mit einer Normalisierung ihrer Vitalparameter reagieren. Der Blutverlust beträgt weniger als 20% des Gesamtblutvolumens
- „Transient Responder“: Patienten, die auf die initiale Flüssigkeitsgabe mit einer Normalisierung ihrer Vitalparameter reagieren. Im Verlauf verschlechtert sich die hämodynamische Situation erneut, was auf eine weiterhin aktive Blutungsquelle und/oder eine insuffiziente Volumentherapie schließen lassen sollte. Der Blutverlust dieser Patienten liegt initial zwischen 20 und 40% des Gesamtblutvolumens.

- „Minimal-/ Non- Responder“: Patienten, deren hämodynamische Situation auf Volumengabe keine (deutliche) Verbesserung zeigt. Diese Patienten benötigen eine sofortige, meist invasive Intervention zur definitiven Blutstillung.

Bei polytraumatisierten Patienten ohne Neurotrauma sollte eine Volumentherapie in reduzierter Form durchgeführt werden (36). Gemäß des Prinzips der „Damage Control Resuscitation“ soll möglichst versucht werden, eine sogenannte permissive Hypotonie zu erzielen: Der systolische Blutdruck sollte im niedrigen Bereich von 60-90mmHg gehalten werden, um einem weiteren erhöhten Blutverlust durch zu hohe Blutdrücke entgegenzuwirken (36,41,61–64). Die Flüssigkeits- und Volumentherapie muss daher zwingend diesem Ziel angepasst werden (36,41). Der Einsatz von Katecholaminen in der präklinischen Traumaversorgung wird kritisch gewertet und als Ultima ratio zum Erreichen einer ausreichenden Perfusion bezeichnet (36,41).

Die intravenöse Gabe von kristallinen oder kolloidalen Flüssigkeiten stellt die einzige, präklinisch verfügbare Therapie beim Versuch, Blutverluste auszugleichen, dar (41). Kristalloiden Lösungen sollte der Vorrang gegeben werden, bevorzugt werden Ringer-Malat-, Ringer-Acetat- oder Ringer-Laktat-Lösungen (36).

Bedacht werden muss allerdings, dass eine Flüssigkeit infundiert wird, die sich in ihrer Zusammensetzung vom Plasma unterscheidet. Sie bietet zwar eine ähnliche Elektrolytzusammensetzung, jedoch werden keine Erythrozyten, Thrombozyten oder Gerinnungsfaktoren übertragen. Letzteres stellt damit den limitierenden Faktor dar: Die zu einer Organminderperfusion führende starke Hypotension kann so – zumindest temporär – therapiert werden. Der Mangel an Sauerstoffträgern, den Erythrozyten, kann nur über die Infusion von Erythrozytenkonzentraten behandelt werden – diese Therapie ist jedoch bis dato dem klinischen Setting vorbehalten.

Gleichzeitig kommt es zu einer „Verdünnung“ des Blutplasmas mit relativer Abnahme von Thrombozyten und Gerinnungsfaktoren: Dieser Vorgang kann zusätzlich zur traumatischen Koagulopathie zu einem Gerinnungsversagen bei polytraumatisierten Patienten beitragen (61–64).

Aufgrund einer möglichen Beeinträchtigung der Blutgerinnung ist die Applikation kolloidaler Infusionslösungen kritisch zu bewerten: Bei älteren, großmolekularen HAES-Lösungen wurde eine Beeinträchtigung der Gerinnung beobachtet, dieser Nachteil scheint bei den neueren HAES-Lösungen (130/0,4) nicht mehr zu bestehen – zumindest nicht in diesem Ausmaß (36,41).

Als unterstützendes Gerinnungstherapeutikum in der Versorgung polytraumatisierter Patienten gilt Tranexamsäure: Das synthetische Lysin-Analogon wirkt antifibrinolytisch, indem es die

Bindungsstelle am Plasminogen kompetitiv hemmt und somit die Umwandlung von Plasminogen in Plasmin verhindert (65). Gerade bei polytraumatisierten Patienten steht eine Hyperfibrinolyse als eine der Ursachen schwerer Blutungen im Vordergrund (65).

Basierend auf den Ergebnissen der CRASH-II-Studie entstanden Empfehlungen zur präklinischen Gabe von Tranexamsäure beim polytraumatisierten Patienten: Es gilt, dass die Applikation von Tranexamsäure bei blutenden Patienten oder Patienten mit hohem Blutungsrisiko so früh wie möglich erfolgen soll, jedoch unbedingt innerhalb der ersten drei Stunden nach Trauma (66). Die Möglichkeit einer präklinischen Gabe sollte dabei in Betracht gezogen werden (66).

Allgemeingültige Empfehlungen zum Volumen-, Katecholamin- und Gerinnungsmanagement bei der instabilen Beckenfraktur können nicht gegeben werden, da sie im Wesentlichen auch von den Begleitverletzungen mit ihrer jeweiligen Dynamik abhängig sind.

Die zeitkritische Behandlung des Patienten am Unfallort sowie der zügige Transport in eine geeignete Klinik sind wesentliche Elemente der präklinischen Therapie einer instabilen Beckenringverletzung: Eine hämodynamische Stabilisierung vor Ort durch eine definitive Blutstillung ist kaum oder nur temporär möglich (36,27). Durch oben genannte Maßnahmen kann lediglich der Blutverlust pro Zeiteinheit reduziert werden. Da die definitive Versorgung der Verletzung meist nur operativ oder interventionell gelingt, sollte der Patient dieser Intervention zügig zugeführt werden (37,27). Bei wachen Patienten mit Schmerzen sollte zusätzlich eine adäquate analgetische Therapie – entsprechend hämodynamischer Situation und vermuteter Begleitverletzungen – erfolgen (41). Am Unfallort sollten nur unmittelbar notwendige Maßnahmen erfolgen, die in diesem zeitkritischen Kontext abgewogen werden müssen. Dasselbe gilt für die Therapie etwaiger Begleitverletzungen (24). Der Blutverlust durch eine instabile Beckenfraktur lässt sich präklinisch meist nicht suffizient kontrollieren (27). Oftmals lässt sich die Größenordnung des Blutverlustes nur anhand der hämodynamischen Parameter einschätzen, die nicht zuletzt auch erheblich von eventuell bestehenden Begleitverletzungen beeinflusst sein können (37,41).

1.8 Klinisches Management instabiler Beckenringverletzungen

Als Schnittstelle zwischen Präklinik und Klinik kommt dem Schockraum mit der jeweiligen Diagnostik und interdisziplinären Therapie auch bei der instabilen Beckenringverletzung eine entscheidende Rolle zu. Nach Ankunft des Patienten sollte eine kurze, suffiziente Übergabe des

Notarztes an das interdisziplinäre Schockraumteam erfolgen. Diese Übergabe muss zwingend folgende Informationen enthalten:

- Unfallmechanismus, Unfallzeitpunkt
- Detektiertes bzw. vermutetes Verletzungsmuster
- Präklinisch eingeleitete Therapien

Es beginnt die klinische Phase der Behandlung instabiler Beckenringverletzungen, die auf interdisziplinärer Basis erfolgt.

Das Vorgehen im Schockraum lehnt sich im deutschsprachigen Raum eng an die Vorgaben des ATLS[®]- oder ETC[®]- Prinzips an. Das ATLS[®]-Konzept stellt einen prioritätenorientierten Algorithmus dar, der standardisierte diagnostische und therapeutische Handlungsschritte für die primäre innerklinische Versorgung schwerverletzter Patienten beinhaltet. Der Grundgedanke des ATLS[®] ist es, lebensbedrohliche Verletzungen und Störungen der Vitalfunktionen des Patienten zu erkennen und zu behandeln, bevor es zu Sekundärschäden kommt („Treat first what kills first“). Ursprünglich diente das ATLS[®]-Prinzip als Behandlungsalgorithmus für einen behandelnden Arzt. Während der Algorithmus für die präklinische Notfallmedizin daher weiterhin enorme Relevanz besitzt, wurde er für den klinischen Bereich den deutschen Verhältnissen angepasst: Die interdisziplinäre Zusammenarbeit in deutschen Schockräumen ermöglicht eine simultane Therapie von Pathologien in der ABC-Kaskade (67).

Abhängig von den Vitalparametern werden zwei verschiedene Behandlungspfade eingeschritten: Wird der Patient mit einem traumatisch bedingten Herz-Kreislauf-Stillstand eingeliefert, wird die Reanimation nach ERC-Leitlinien eingeleitet bzw. fortgeführt. Dabei stehen neben der Herzdruckmassage, der elektrischen sowie medikamentösen Therapie vor allem erweiterte Maßnahmen zur Behebung potentiell reversibler Ursachen eines Herz-Kreislauf-Stillstandes im Vordergrund. Vordergründig seien hier der Spannungspneumothorax, externe Blutungen und die Perikardtamponade genannt, die mittels Thoraxdrainage, Blutstillung, Notthorakotomie bzw. Perikardiozentese therapiert werden (68).

Zu den häufigsten Ursachen eines potentiell reversiblen, traumatischen Herz-Kreislauf-Stillstandes gehört u.a. die Hypovolämie. Letztere steht bei Patienten mit instabiler Beckenfraktur im Vordergrund. Therapeutisch steht eine Blutstillung über die Anlage einer Beckenschlinge bzw. definitive operative oder interventionelle Versorgung im Vordergrund. Zusätzlich wird die Hypovolämie über eine intensivierete Volumengabe und Gabe von Blutprodukten, die im Gegensatz zur Präklinik im klinischen Setting zur Verfügung stehen,

behandelt. Zu diesem Zweck wurden in vielen Kliniken Massentransfusionsprotokolle etabliert, um eine genaue Handlungsabfolge bezüglich der diagnostischen Schritte und ihrer therapeutischen Konsequenzen festzulegen.

Moderne Massentransfusionsprotokolle beinhalten als schnell verfügbare Diagnostika sowohl die Blutgasanalyse als auch die Thrombelastographie zur Hämostaseanalyse.

Basierend auf den Ergebnissen dieser bettseitig verfügbaren Untersuchungsverfahren erfolgt die intravenöse Applikation von Erythrozytenkonzentraten, FFP, Gerinnungstherapeutika wie Tranexamsäure und Fibrinogen sowie Gerinnungsfaktoren – z.B. PPSB zur Substitution der Faktoren II, VII, IX und X. In welchem Verhältnis Erythrozytenkonzentrate zu FFP transfundiert werden ist bis dato uneinheitlich (62–64,69). Beispielhaft sei hier das Massentransfusionsprotokoll des Virchow-Klinikums der Charité vorgestellt: Basierend auf klinischen Parametern, der Verletzungsschwere und ermittelten Parametern der Blutgasanalyse erfolgt die Gabe von Tranexamsäure und Fibrinogen. Die Transfusion von EK und FFP erfolgt im Verhältnis 1:1.

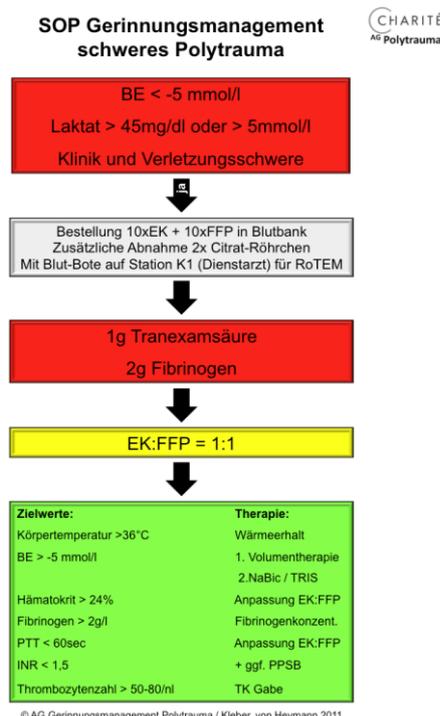


Abb. 8: Massentransfusionsprotokoll der Charité- Universitätsmedizin, Campus Virchow-Klinikum: Die Gabe von EK und FFP erfolgt im Verhältnis 1:1

Neben der durch schwere Blutungen bedingte Hypovolämie müssen auch andere Ursachen eines traumatischen Herz-Kreislauf-Stillstands ausgeschlossen werden: Unsere Arbeitsgruppe konnte zeigen, dass insbesondere ein Spannungspneumothorax beim polytraumatisierten Patienten

häufig – insbesondere präklinisch - nicht suffizient behandelt wird und damit eine vermeidbare Todesursache darstellt (68,70).

In allen anderen Fällen wird die Diagnostik und Therapie anhand des Primary Surveys durchgeführt. Die Reihenfolge der Behandlungsschritte erfolgt anhand der Priorität (71):

- A. - Airway
- B. - Breathing
- C. - Circulation
- D. - Disability
- E. - Exposure

Regelhaft wird die Erhaltung eines Atemwegs zuerst sichergestellt, bei Vorhandensein einer sogenannten „A-Problematik“ ist häufig die Indikation zur endotrachealen Intubation gegeben (71). Durch die mechanische Beatmung mit an die Situation angepasster Sauerstofffraktion lässt sich die periphere Gewebeoxygenierung optimieren. Zudem erfolgt eine aggressive Volumensubstitution mit kristallinen und evtl. kolloidalen Flüssigkeiten, falls indiziert und sobald verfügbar, werden ebenfalls Erythrozytenkonzentrate und FFP infundiert (26). Das Management bezüglich der Flüssigkeits- und Volumentherapie ist von Klinik zu Klinik unterschiedlich: Das bereits oben gezeigte Massentransfusionsprotokoll des Virchow-Klinikums der Charité sieht beispielsweise die Gabe kolloidaler Flüssigkeiten aufgrund einer möglichen Interaktion mit dem Gerinnungssystem nicht vor.

Abhängig von Kreislaufstabilität und Verletzungsmuster des Beckenrings erfolgt direkt im Anschluss an die Schockraumphase entweder weitere radiologische Diagnostik oder eine direkte operative Versorgung. Die Entscheidung, welcher Therapiepfad eingeschritten wird, wird interdisziplinär gefällt. Bei stabilen Vitalparametern und fehlender Notwendigkeit einer unmittelbaren, operativen Versorgung wird eine CT-Polytrauma-Spirale zur Erfassung aller Gesamtverletzungen und akuter Blutungen durchgeführt. Besteht nach Volumentherapie und mechanischer Notfallstabilisierung des Beckens weiterhin eine hämodynamisch instabile Situation müssen folgende, weitere Maßnahmen ergriffen werden: Je nach betroffenem Gefäß und Verfügbarkeit verschiedener Verfahren muss eine interdisziplinäre Entscheidung erfolgen. Bei arteriellen Blutungen und direkter Verfügbarkeit der Angiographie kann die Indikation zur Embolisation gestellt werden (26,36,37). In vielen Kliniken benötigt dies – vor allem nachts – eine entsprechende Vorlaufzeit: Beispielsweise zeigte eine Studie von Osborn et al., dass die Angiographie durchschnittlich erst nach 130min durchgeführt werden konnte (72).

Die Wahl der operativen Versorgung hängt – neben der hämodynamischen Situation des Patienten – auch entscheidend von Gesamtverletzungsmuster, Körpertemperatur, Gerinnungsstatus und dem Frakturmuster des Beckens ab. Da es sich initial fast ausschließlich um eine Notfallversorgung handelt, kommen regelhaft Fixateur externe und in seltenen Fällen die Beckenzwinge zum Einsatz. Ziel dieser operativen Therapie ist neben der Blutungskontrolle ebenso die Versorgung peripelviner Begleitverletzungen.

Bei hämodynamischer und mechanischer Instabilität vorwiegend des hinteren Beckenrings (Typ-C-Beckenfraktur) erfolgt unter Beachtung der Kontraindikationen die Anlage einer Beckenzwinge (36,44,73). Instabilitäten des vorderen Beckenrings (Typ-B-Beckenfraktur) werden über einen Fixateur externe versorgt (36).

Die Anlage von Beckenzwinge und zusätzlichem Fixateur externe kann bei Instabilitäten des gesamten Beckenrings – also im ventralen und dorsalen Bereich – notwendig werden (26,36,37,73).

Das Prinzip der Stabilisierung einer Beckenfraktur mittels Beckenzwinge besteht aus der Einbringung von Pins im Bereich des hinteren Beckenrings auf Höhe der Iliosakralgelenke (73). Dabei wird meist unter Bildwandlerkontrolle noch keine anatomische Reposition des Beckenrings erzielt (73). Vielmehr ist es das Ziel, eine Kompression des hinteren Beckenrings zur Limitierung der spongiösen Blutungen zu erreichen (73). Auf diese Weise kann es zum Sistieren lebensbedrohlicher Blutungen vor allem aus den Frakturflächen kommen (73).

Die Pins werden an der gedachten Kreuzungsstelle zwischen der nach cranial verlängerten Achse des Femurs und einer dazu senkrechten Linie, die durch die Spina iliaca anterior superior verläuft, in das linke und rechte Os ileum eingebracht (34,73). Zusätzlich sind sie über einen ventralen Bügel verbunden, dessen Länge sich entsprechend der gewünschten Fraktur- und Beckenkompression variieren lässt (73).

Die Anlage des Fixateur externe erfolgt ebenfalls über die Einbringung von Pins, sogenannten Schanz-Schrauben (34,73). Zumeist erfolgt die Versorgung mittels supraacetabulärem Fixateur externe (73). Die Schanz-Schrauben werden nach monokortikalem Bohren beidseitig knapp oberhalb der Spina iliaca anterior inferior mit einer 10°-Neigung nach cranial sowie 30°-Neigung in Richtung ISG eingeschraubt (73). Als stabilisierende Verbindung zwischen den Schanz-Schrauben dienen Karbonstangen mit Verbindungsbacken (73).

Die Einbringung der Pins bzw. Schanz-Schrauben sollte bei beiden Verfahren unter Bildwandlerkontrolle erfolgen, um eine korrekte Positionierung zu gewährleisten und Sekundärverletzungen durch Fehllagen zu vermeiden (34,46,73).

Zusätzlich kann eine offene, extraperitoneale Tamponade mittels Packing durchgeführt werden (23). Dabei werden nach Ausräumung eines eventuell bestehenden Hämatoms sterile Tücher oder Kompressen in den Raum hinter der Symphyse eingebracht (26). Diese sorgen nun für eine wirksame Tamponade durch Kompression kleiner Gefäße (26). Das pelvine Packing kann in zwei verschiedenen Varianten angewendet werden: Im Rahmen einer Laparotomie, deren Indikation durch intraabdominelle Begleitverletzungen gegeben ist oder durch ein rein retroperitoneales Packing über einen Unterbauchlängsschnitt (23,35).

Vorteile des pelvinen Packings bestehen darin, dass es schnell und in jedem OP-Saal oder Schockraum durchführbar und die Verfügbarkeit des Verfahrens jederzeit gewährleistet ist, da keine apparativen Hilfsmittel oder besondere Infrastrukturen benötigt werden (23).

Sowohl Beckenzwinge als auch Fixateur externe werden in der Versorgung instabiler Beckenverletzungen als temporäre Notfallmaßnahmen betrachtet. Die definitive osteosynthetische Versorgung hat die Wiederherstellung der Anatomie und Funktion des Beckenrings zum Ziel. Hierfür wird die jeweilige Fraktur meist mittels interner Osteosyntheseverfahren (Schrauben, Platten, Stabsysteme) ausversorgt (34,37). Zum Einsatz kommen beispielsweise ventrale Plattenosteosynthesen oder transiliosakrale Schrauben (26,37).

1.9 Einfluss nicht-/ invasiver Beckenstabilisatoren auf die Reduktion des pelvinen Volumens, Hämodynamik, Transfusionsbedarf und Dauer des Klinikaufenthalts

Die Datenlage über den Einfluss externer, nicht-invasiver Beckenstabilisatoren auf beispielsweise die Reduktion des pelvinen Volumens ist aufgrund mangelnder multizentrischer randomisierter Studien schlecht: Abgesehen von wenigen Case-Reports gibt es nur vereinzelte Studien, die die Effektivität externer, nicht-invasiver Beckenstabilisatoren untersucht haben.

Vermeulen et al. testeten in einer Studie von 1995 den Einsatz einer bereits in ihrem Schockraum erprobten Beckenschlinge im präklinischen Setting (74). Nach ausführlicher Schulung waren die Rettungskräfte in der Lage, den als „Pelvic Strap Belt“ bezeichneten Stabilisator in max. 30 Sekunden anzulegen (74). In einem Zeitraum von vier Jahren wurden 19 Patienten beschrieben,

die mit angelegtem „Pelvic Strap Belt“ in den Schockraum eingeliefert wurden: Von diesen 19 Patienten wiesen allerdings nur 13 definitive, mechanisch instabile Beckenverletzungen auf (74). Die Autoren evaluierten die Anlage eines Beckenstabilisators bereits im präklinischen Setting als positive Entwicklung in der Versorgung polytraumatisierter Patienten mit mechanisch instabiler Beckenverletzung (74). Das Outcome der untersuchten Patienten ist allerdings aus dem Paper nicht ersichtlich. Ebenfalls wurden außerhalb von Röntgen-a.-p.- Beckenübersichtsaufnahmen keine objektiven Parameter zur Wirksamkeit der externen Beckenstabilisatoren herangezogen. Die Aussagekraft der Studie ist damit stark limitiert und der subjektiven Einschätzung der Autoren unterworfen.

Eine Studie aus den Niederlanden aus dem Jahr 2010 verglich die drei Beckenschlingen Pelvic Binder[®], SAM Sling[®] und T-POD[®] miteinander (75). An Kadavern mit artifiziell erzeugten Typ-B- und Typ-C-Beckenfrakturen mit peripelvinen Weichteilen wurden die Stabilisatoren bezüglich der Reduktion des pelvinen Volumens, des Ausmaßes der dynamischen Reposition der Frakturenden und der hierfür benötigten Zugkräfte getestet (75). Eine suffiziente Reduktion des pelvinen Volumens konnte durch alle drei Schlingen erreicht werden. Zudem ergab sich keine klinisch relevante Überreduktion der Frakturenden. Der T-POD[®] benötigte zur Reduktion die geringsten Zugkräfte (75). Limitationen der Studie bestehen in der niedrigen Fallzahl von 16 Kadavern sowie in den künstlich induzierten Frakturen – darunter vier Typ-A-Frakturen, die per definitionem als klinisch stabil gelten (37,75).

Eine andere Kadaverstudie aus den USA von 2008 verglich die Effektivität einer normalen, standardisierten Tuchschnge mit dem T-POD[®] (76). An Kadavern mit ebenfalls artifiziell induzierten, instabilen Beckenfrakturen wurden nacheinander die Tuchschnge und der T-POD[®] appliziert und die Effekte mithilfe einer a.-p.-Röntgenaufnahme des Beckens verglichen (76). Beide Stabilisatoren erzielten eine Reduktion der Symphysenweite (76). Der T-POD[®] vermochte die Symphysenweite signifikant besser zu reduzieren (76). Bei 75% der Kadaver konnte die Symphyseweite durch die Anlage des T-POD[®] auf anatomische Normwerte korrigiert werden (76). Limitierte Aussagekraft hat die Studie dadurch, dass a.-p.-Röntgenbilder jeweils nur vor Anlage der Tuchschnge, direkt nach Anlage der Tuchschnge und direkt nach Anlage des T-POD[®] angefertigt wurden: Eine erneute Röntgenkontrolle nach Entfernung der Tuchschnge erfolgte nicht – damit ist nicht beurteilbar, ob etwaige reduzierende Effekte der Tuchschnge nach ihrer Entfernung am Kadaver weiterhin bestanden (76).

Krieg et al verglichen in einer Studie von 2005 bei 16 Patienten die Reduktion des pelvinen Volumens durch Anlage einer der SAM Sling® ähnelnden Beckenschlinge im Schockraum mit der Reduktion, die danach bei der definitiven, operativen Versorgung erreicht wurde (77). Es zeigten sich signifikante Reduktionsergebnisse durch die Beckenschlinge, die sich stark den finalen, operativen Reduktionsergebnissen annäherten (77). Limitationen der Studie bestehen in der geringen Fallzahl (77).

Die Effekte externer, nicht-invasiver Beckenstabilisatoren bezüglich hämodynamischer Parameter wurden in einer Studie aus den Niederlanden, die 2010 publiziert wurde, untersucht: Bei 15 Patienten mit präklinisch nicht stabilisierter, instabiler Beckenfraktur und Zeichen eines hypovolämischen Schocks erfolgte die fachgerechte Anlage des T-POD® im Schockraum (78). Als Vergleichsparameter dienten die a.-p.-Röntgenbeckenaufnahmen sowie Messungen des mittleren, arteriellen Drucks und der Herzfrequenz – jeweils unmittelbar vor und zwei Minuten nach Anbringung des T-POD® (78). Der mittlere, arterielle Druck zeigte nach Anlage des T-POD® signifikante Anstiege, ebenso konnte eine signifikante Reduktion der Herzfrequenz beobachtet werden (78). Unklar ist, inwieweit eine Volumengabe (Menge und Art - Kristalline, Kolloidale, Blutprodukte) und eine Therapie mit Katecholaminen erfolgte. Stark limitierte Aussagekraft hat diese Studie dadurch, dass die Veränderungen der hämodynamischen Parameter zwar im zeitlichen Zusammenhang mit der Anlage des T-POD® stehen, jedoch auch erheblich durch weitere gängige, parallel durchgeführte Therapiemaßnahmen wie z.B. die Volumengabe beeinflusst werden.

Bezüglich des Transfusionsbedarfs und der Länge des Krankenhausaufenthaltes verglich eine Studie aus den USA von 2007 die Versorgung instabiler Beckenfrakturen mittels Fixateur externe mit dem T-POD® (79). Über einen Zeitraum von 10 Jahren wurden 186 Patienten mit instabilen Beckenfrakturen untersucht: Die erste Gruppe, bestehend aus 93 Patienten, wurde einer sofortigen Versorgung mittels Fixateur externe zugeführt. Aufgrund einer klinikinternen Änderung des Schockraummanagements bei Patienten mit instabilen Beckenfrakturen erfolgte bei den 93 Patienten der zweiten Gruppe initial die Anlage des T-POD® (79). Abhängig vom Vorliegen freier, intraabdomineller Flüssigkeit erfolgte die weitere Versorgung unter T-POD®-Anlage mittels Laparotomie oder Angiographie (79). Für die T-POD®-Gruppe zeigten sich signifikant niedrigere Transfusionsraten sowohl nach 24h wie 48h, mit einer signifikant niedrigeren Verweildauer im Krankenhaus (79). Die niedrigere Mortalitätsrate in der Patientengruppe mit T-POD®-Anlage zeigte sich nicht signifikant (79). Limitationen bestehen

darin, dass die Patienten den beiden Gruppen nicht randomisiert zugeteilt wurden. Im ersten Zeitraum entsprach es dem klinikinternen Standard, eine unmittelbare Versorgung mittels Fixateur externe anzustreben. Nach der Hälfte des Untersuchungszeitraums wurde der klinikinterne Standard geändert – aus der Veröffentlichung ist nicht zu entnehmen, auf welcher Basis dies erfolgte. Fortan wurden alle Patienten mit mechanisch instabiler Beckenfraktur initial mit dem T-POD[®] stabilisiert. Unklar bleibt, ob eventuell weitere Änderungen des klinikinternen Standards – wie z.B. im Bereich des Volumenmanagements, Transfusionsregimes, der operativen Versorgung oder intensivmedizinischer Therapien – unmittelbaren Einfluss auf sowohl die in den Ergebnissen beschriebenen Transfusionsraten, die Dauer des Klinikaufenthalts und die Mortalitätsrate hatten.

Einige Case Reports konnten ebenfalls die klinischen und radiologischen Effekte der Anlage einer externen, nicht-invasiven Vorrichtung zur Beckenstabilisation bestätigen (35,46,80–83).

Der Mangel an aussagekräftigen Studien über den Einfluss externer, nicht-invasiver Beckenstabilisatoren bezüglich verschiedener pelviner Parameter führte zu der in dieser Arbeit beschriebenen CT-gestützten, postmortalen Interventionsstudie an polytraumatisiert verstorbenen Patienten mit nicht-artifiziellen, instabilen Beckenfrakturen.

1.10 Fragestellungen

Primäres Ziel dieser Arbeit ist es, die Effektivität externer, nicht-invasiver Beckenstabilisatoren im Bezug auf die Reduktion des pelvinen Volumens bei nicht-artifiziellen, instabilen Beckenfrakturen an echten polytraumatisierten Verstorbenen wissenschaftlich zu untersuchen. Außerdem soll eine Auswertung epidemiologischer Daten der Patienten mit instabilen Beckenfrakturen erfolgen, um beispielsweise Aussagen über Begleitverletzungen, präklinisch erfolgte Maßnahmen, Hauptblutungsquellen, Todesursachen u.a. treffen zu können. Insbesondere sollen Aussagen zu folgenden, weiteren Fragestellungen getroffen werden:

1.10.1 Was sind die zur instabilen Beckenverletzung führenden Unfallmechanismen?

1.10.2 Was sind die führenden Begleitverletzungen bei polytraumatisiert verstorbenen Patienten mit instabiler Beckenfraktur?

1.10.3 Wie häufig ist die instabile Beckenverletzung die Hauptblutungsquelle und welche klinisch-therapeutische Konsequenz ergibt sich daraus?

1.10.4 Können die am häufigsten angewandten externen nicht-invasiven Beckenstabilisatoren die Fläche der Beckeneingangsebene sowie das pelvine Volumen reduzieren?

1.10.5 Gibt es Unterschiede zwischen den Beckenstabilisatoren bezüglich der Reduktion der Beckeneingangsebene und dem pelvinen Volumen?

1.10.6 Kann eine Steigerung des applizierten Drucks bei pneumatischen Beckenschlingen die Beckeneingangsebene und das pelvine Volumen weiter reduzieren?

1.10.7 Gibt es biomechanische Unterschiede zwischen den getesteten externen, nicht-invasiven Beckenstabilisatoren?

1.10.8 Gibt es einen universell sowie zügig verfügbaren Surrogatparameter, der eine erfolgreiche Reduktion des Beckens bereits vor Anfertigung einer Computertomographie anzeigt?

2. Material und Methoden

Zur Beantwortung zuvor genannter Fragestellungen führten wir

1. eine retrospektive Fallaktenstudie zur Erhebung der epidemiologischen Daten und
2. eine prospektive Interventionsstudie zur Analyse des Effektes und der biomechanischen Eigenschaften externer, nicht-invasiver Beckenstabilisatoren durch.

2.1 Epidemiologische Datenerhebung

Im retrospektiven Teil dieser Dissertation wurden im Archiv des Instituts für Rechtsmedizin der Charité alle Fälle von verstorbenen Patienten mit mechanisch instabilen Beckenverletzungen im Zeitraum von März 2012 bis einschließlich September 2013 (01.03.2012-30.09.2013) untersucht. Die epidemiologische Datenerhebung erfolgte anhand der jeweiligen Fallakte mit Notarzt- bzw. Rettungsdienst- sowie Obduktionsprotokollen. Neben Alter und Geschlecht wurden der Unfallmechanismus, etwaige präklinische Maßnahmen und der Todesort analysiert. Weiterhin wurde anhand der Obduktionsprotokolle erhoben, ob eine Gefäßverletzung im abdominellen und pelvinen Bereich vorlag, welche Hauptblutungsquelle der Leichnam aufwies sowie die definitive Todesursache. Darüber hinaus konnte analog zu den Fällen des prospektiven Interventionsstudienkollektivs anhand der postmortem CT die Einteilung der Beckenverletzung anhand der AO-Klassifikation bestimmt werden.

2.1.1 Alter und Geschlecht

Daten zum Geschlecht des Patienten sowie Alter zum Zeitpunkt des Todes wurden aus der jeweiligen Fallakte entnommen und ausgewertet.

2.1.2 Unfallmechanismus

Unter dem Unfallmechanismus wurde der Unfallhergang zusammengefasst, welcher zum Tode geführt hatte. Dabei wurden folgende Gruppen gebildet:

- Stürze aus der Höhe (definiert als Sturzhöhe aus mehr als drei Metern)
- Verkehrsunfälle
- Zugüberrollungen

Zu den Verkehrsunfällen wurden jegliche Unfälle gezählt, die der Teilnahme am Straßenverkehr geschuldet waren – sei es als Fußgänger, Motorradfahrer oder PKW-Fahrer.

2.1.3 Präklinische Maßnahmen

Unter den präklinisch durchgeführten Maßnahmen wurden alle Maßnahmen verstanden, die zur unmittelbaren, notfallmedizinischen Behandlung des polytraumatisierten Patienten durch Rettungsdienstpersonal oder Laien, zählen. Diese Daten wurden aus den jeweiligen Notarzt- bzw. Rettungsdienst- und Obduktionsprotokollen prospektiv erhoben. Nachfolgende Maßnahmen wurden dabei kategorial analysiert:

2.1.3.1 Reanimation

Im Rahmen der Datenerhebung wurde eruiert, ob eine kardiopulmonale Reanimation des polytraumatisierten Patienten erfolgte.

2.1.3.2 Intubation

Unter einer Intubation wurde jegliche Sicherung des Atemwegs zur externen, künstlichen Beatmung des Patienten, verstanden. Dazu zählten insbesondere die endotracheale Intubation als Goldstandard im Rahmen der Reanimation sowie die Einlage einer Larynxmaske, eines Larynxtubus oder eines Kombitubus.

2.1.3.3 Anlage intravenöser oder intraossärer Zugänge

Ebenso wurden aus den Rettungsdienst- und Obduktionsprotokollen Angaben zur Anlage intravenöser oder intraossärer Zugänge entnommen. Im Falle von in situ befindlichen Zugängen zum Zeitpunkt der Obduktion konnte zusätzlich deren korrekte Lage analysiert werden.

2.1.3.4 Entlastung des Thorax mittels Punktion oder Thoraxdrainage

Informationen darüber, ob eine präklinische thorakale Entlastungspunktion z.B. mittels Venenverweilkanüle bzw. die Anlage einer Thoraxdrainage bei notärztlichem Verdacht auf einen Pneumothorax, Spannungspneumothorax oder Hämatothorax erfolgte, wurden ebenfalls aus den Notarzt- und Rettungsdienstprotokollen entnommen. Zusätzlich konnte die Effektivität dieser Maßnahmen durch die Obduktion evaluiert werden.

2.1.3.5 Externe, nicht-invasive Beckenstabilisierung

Darüber hinaus wurde untersucht, ob präklinisch eine externe, nicht-invasive Beckenstabilisierung durch das Rettungsdienstpersonal erfolgt war.

2.1.4 Todesort

Der Todesort wurde definiert als Ort des Todeseintritts oder – bei Patienten mit bereits vorhandenen, sicheren Todeszeichen – als Auffindungsort des Leichnams. Dabei galt der Ereignisort als Todesort, wenn der Patient noch präklinisch – also am Unfallort oder auf dem Transport ins Krankenhaus - verstarb. Das Krankenhaus galt als Todesort, wenn der Patient im Schockraum, im OP-Saal oder auf der Intensivstation verstarb.

2.1.5 Hauptblutungsquelle

Anhand der Obduktionsbefunde wurde als Hauptblutungsquelle jeweils das Organ benannt, von dem der größte Blutverlust nach innen oder außen ausging. Dabei wurden folgende Gruppen gebildet:

- Becken bzw. peripelvine Weichteile: Bei massiven Gefäßverletzungen im Beckenbereich bzw. einer Zerstörung des den Beckenring umgebenden Weichteilmantels, die auf den dortigen Fokus des Blutverlusts schließen ließen
- Thorax: Bei Blutungsquellen aus thorakalen Organen und Strukturen, die nicht das Herz oder die Aorta selbst betrafen
- Leber: Bei gravierenden Organverletzungen oder Organzerreißen dieses Organs
- Milz: Bei gravierenden Organverletzungen oder Organzerreißen dieses Organs
- Herz: Bei Ruptur einer oder mehrerer der vier Haupthöhlen
- Aortenruptur: Bei in der Obduktion eindeutig identifizierbarem Einriss aller Wandschichten der Aorta und deutlichem Blutaustritt ins umliegende Gewebe
- Externe Blutung: Beispielsweise bei Verlust einer Extremität bzw. eines Extremitätenteils und konsekutiver Durchtrennung der neurovaskulären Strukturen mit deutlichem Blutverlust nach außen

2.1.6 Verletzungsmuster

Um eine Aussage zur Verletzungsschwere des Patienten treffen zu können, wurden neben der Beckenfraktur auch alle zusätzlichen Verletzungen großer Organe bzw. Organsysteme, die der Leichnam bei der Obduktion aufwies, dokumentiert. Die Verletzungen wurden in folgende Kategorien eingeteilt:

- Schädel-Hirn-Trauma (SHT): Bei Hinweisen auf traumatische Schädigungen der Schädelkalotte und/oder des Hirnparenchyms

- Wirbelsäulenverletzungen: Bei Frakturen von Wirbelkörpern, Wirbelkörperbestandteilen oder kompletter Disruption der Wirbelsäule
- Peripelvine Weichteilschäden: Bei Verletzungen der den Beckenring umgebenden muskulären, bindegewebigen oder kutanen Strukturen
- Pneumothorax: Bei kollabierter Lungenhälfte bzw. kollabierten Lungenhälften
- Verletzungen des Herzens: Bei Verletzung einer der vier Haupthöhlen oder gravierender, traumatisch bedingter Schädigung einer der vier Herzklappen
- Verletzungen des Thorax: Alle Verletzungen im Bereich des Thorax – neben Pneumothoraces oder kardialen Verletzungen zählten in diese Kategorie auch Verletzungen des Thoraxgerüsts wie Rippenfrakturen und Verletzungen externer thorakaler Weichteile wie traumatische Schädigungen der Brustwandmuskulatur. Auch Schäden an sonstigen intrathorakalen Strukturen - wie beispielsweise ein Bronchusabriss - fielen unter diese Einteilung
- Verletzungen der thorakalen sowie abdominellen Aorta: Bei traumatisch bedingten Eröffnungen der Aorta, unterschieden nach thorakaler oder abdomineller Lokalisation
- Verletzungen der Vena cava superior sowie inferior: Bei traumatisch bedingter Eröffnung des Gefäßes beispielsweise bei Abriss aus dem Leberbett
- Diaphragmarupturen: Bei zerstörter Integrität des Zwerchfellmuskels und konsekutiver Verlagerung von Organen von thorakal nach abdominal bzw. umgekehrt
- Verletzungen der Milz: Bei traumatisch bedingter Schädigung der Milz
- Verletzungen der Leber: Bei traumatisch bedingter Schädigung der Leber
- Verletzungen der Nieren: Bei traumatisch bedingten Verletzungen an einer oder beiden Nieren
- Pankreasverletzungen: Bei traumatisch bedingter Schädigung des Pankreas

2.1.7 Todesursache laut Obduktion

Die Todesursache wurde dem jeweiligen Obduktionsprotokoll entnommen und in folgende Kategorien gefasst:

- Polytrauma: bei simultan aufgetretenen, gravierenden Verletzungen mehrerer Organe bzw. Organsysteme, welche ohne Anzeichen des Verblutens primär zum Todeseintritt führten
- Verbluten: Einfach- oder Mehrfachverletzungen, die über einen letalen Blutverlust zum Todeseintritt führten und mit eindeutigen Zeichen des Verblutens bei der Obduktion

einhergingen (blasse, innere Organe; spärliche Leichenflecken; subendokardiale Blutungen)

- SHT: Zerstörung von Hirngewebe durch direkte traumatische Verletzung oder intrakranielle Blutungen und fehlenden, weiteren lebensbedrohlichen Verletzungen
- Thoraxtrauma: Verletzungen des Thorax bzw. intrathorakaler Organe, die durch eine mechanische Zerstörung oder physiologische Dysfunktion zum Tode führten.

Nachfolgend werden die Todesursachen nochmals detailliert erläutert.

2.1.7.1 Polytrauma

Das Polytrauma als Todesursache lag bei Vorhandensein mehrerer, gleichzeitig auftretender, potentiell letaler Verletzungen im Sinne einer mechanischen Destruktion lebenswichtiger Organe oder Organteile, die eine genaue Festlegung auf eine todesursächliche Verletzung erschweren bzw. unmöglich machen, vor.

2.1.7.2 Verbluten (Exsanguination)

Im Vergleich zum Polytrauma zeichnet sich der Todeseintritt durch Exsanguination dadurch aus, dass der Blutverlust und nicht die mechanische Destruktion eines oder mehrerer Organe zum Tode führte. Klassische Zeichen dafür bei der Obduktion sind die spärliche Ausdehnung und Intensität der Leichenflecke, subendokardiale Blutungen und blasse innere Organe. Beispielhaft sei hier die Aortenruptur genannt, bei der es zu Austritt großer Blutvolumina in das thorakale und/oder abdominelle Kompartiment kommt. Die resultierende Minderversorgung der Organe führt innerhalb weniger Sekunden zum Eintritt des Todes.

2.1.7.3 SHT

Von einem Schädel-Hirn-Trauma als Todesursache wurde bei Zerstörung von Hirngewebe durch direkte traumatische Verletzung oder intrakranielle Blutungen und fehlenden, weiteren lebensbedrohlichen Verletzungen, ausgegangen.

2.1.7.4 Thoraxtrauma

Bei schwerwiegender Verletzung des Thorax oder intrathorakaler Organe, die zu einer mechanischen Destruktion mit Funktionseinbuße oder –verlust der jeweiligen Struktur führte und den Todeseintritt bewirkte, wurde vom Thoraxtrauma als Todesursache ausgegangen.

2.1.8 Klassifikation der Beckenringverletzungen

Die Einteilung der Beckenverletzungen erfolgte anhand der OTA/AO-Klassifikation (siehe 1.2) durch einen Facharzt der Unfallchirurgie anhand des postmortem CT's und 3D-Rekonstruktionen des Beckens.

2.1.9 Inzidenz zusätzlich vorhandener proximaler Femurfrakturen

Im Rahmen der zweiten Studie wurde anhand der CT-Scans bei 36 Patienten die Koinzidenz einer zusätzlichen proximalen Femurfraktur analysiert. Bei positivem Befund wurde unterschieden, ob es sich um eine ein- oder beidseitige Femurfraktur handelte.

2.2 Prospektive Interventionsstudie zur Analyse externer, nicht-invasiver Beckenstabilisatoren

Der zweite Teil der Dissertation stellt eine prospektive Interventionsstudie dar, die in Kooperation der AG Polytrauma des Centrums für Muskuloskeletale Chirurgie und des Institut für Rechtsmedizin der Charité - Universitätsmedizin Berlin erfolgte.

Die Studie wurde durch ein positives Ethikvotum durch den Ethikausschuss 1 der Ethikkommission der Charité - Universitätsmedizin (Antragsnummer EA1/250/11) unterstützt. In selber Sitzung wurde die Fallzahl von ca. 30 Patienten durch das für die Biometrie zuständige Kommissionsmitglied Herr Prof. Dr. Klaus-Dieter Wernecke bezüglich der Aussagekraft als ausreichend eingeschätzt.

2.2.1 Untersuchungszeitraum

Als erster Untersuchungszeitraum, in dem die CT-gestützten Messungen an den ersten 30 Patienten erfolgten, wurde der Zeitraum von März 2012 bis einschließlich September 2013 (01.03.2012-30.09.2013) definiert. Weiterhin wurden neben den CT-gestützten Messungen zusätzliche biomechanische Messungen an weiteren sechs Patienten im Zeitraum September bis einschließlich Dezember 2014 durchgeführt (siehe 2.1.5.).

2.2.2 Ein- und Ausschlusskriterien

In die Studie eingeschlossen wurden Patienten mit instabilem Beckenbefund im Rahmen der äußeren Leichenschau. Zusätzlich mussten die Studienpatienten zum Zeitpunkt des Todes ein Mindestalter von 18 Jahren aufweisen.

Ausgeschlossen wurden alle Patienten mit stabilem Beckenbefund in der äußeren Leichenschau. Patienten mit instabilem Beckenbefund, bei denen die Integrität des peripelvinen Weichteilmantels durch operative Eingriffe oder traumatische Zerreißen nicht erhalten war, wurden nicht zur Studie zugelassen. Grund hierfür war ein potentieller Bias beim Vergleich der Stabilisierung einer Beckenverletzung mit oder ohne intakten peripelvinen Weichteilmantel.

Ebenso wurden keine Patienten mit bereits osteosynthetisch versorgten Beckenfrakturen in die Studie eingeschlossen, da durch diese operative Therapiemaßnahme von einer wiederhergestellten Stabilität des Beckenrings auszugehen ist und eine externe Kompression durch die jeweilige Beckenschlinge ohne quantitative Veränderung am Beckengerüst bleiben dürfte.

In den beiden oben genannten Zeiträumen konnten insgesamt 36 Patienten eingeschlossen werden, an denen die deskriptiven und quantitativen Auswirkungen der verschiedenen Beckenschlingen mittels CT-Scans untersucht wurden.

2.2.3 Verwendete externe, nicht-invasive Beckenstabilisatoren

In dieser computertomographisch gestützten Interventionsstudie wurden vier unterschiedliche, im Folgenden genannte externe Beckenstabilisatoren verwendet und auf ihre Effektivität zur Reduktion der Beckeneingangsebene und des intrapelvinen Volumens hin analysiert. Die Anlage der Beckenstabilisatoren erfolgte, der biomechanischen Studie von Bottlang et al. folgend, auf Höhe des Trochanter major (57).

2.2.3.1 Pneumatische Beckenschlinge VBM®

Die pneumatische Beckenschlinge Standard® der Firma VBM Medizintechnik GmbH mit Sitz in Sulz / Deutschland wurde mit manometrisch applizierten Drücken von 100 mmHg und 200 mmHg angelegt. In der Herstellergebrauchsanweisung zu dieser Beckenschlinge wurde der optimal zu applizierende Druck basierend auf Expertenmeinungen mit 100mmHg festgelegt, ohne dass dies in einer Studie getestet oder mit anderen Druckwerten verglichen wurde.



2.2.3.2 T-POD[®]

Bei der zweiten getesteten Vorrichtung zur Beckenstabilisierung handelte es sich um das T-POD[®] Pelvic Stabilization Device der Firma Pyng Medical mit Sitz in Richmond / Kanada.



2.2.3.3 Tuchschnle

Eine herkömmliche Tuchschnle (Bettlaken) wurde ebenfalls auf Höhe der großen Trochanteren angelegt, vor dem Becken mit maximaler Armkraft zugezogen und anschließend ventral doppelt verknotet, um den applizierten Druck zu halten.



2.2.3.4 SAM Sling[®]

Bei den letzten sechs Patienten (Patienten-Nr. 31-36) wurde neben der pneumatischen Schnle[®], dem T-POD[®] und der Tuchschnle auch die SAM Sling[®] getestet. Es wurde das Modell SAM Pelvic Sling II[®] der Firma SAM Medical Products mit Sitz in Wilsonville/ USA verwendet.



2.2.4 Studienprotokoll

Als erste Maßnahme sah das Studienprotokoll die Prüfung der Instabilität des knöchernen Beckens im Rahmen der äußeren Leichenschau vor. Im Zuge dessen wurde regelhaft die Leichenstarre gebrochen, um eine annähernd vergleichbare Situation der peripelvinen Weichteile post mortem mit der eines Lebenden zu schaffen.

Darauf folgte die Anfertigung der computertomographischen Scans. Insgesamt erfolgten pro Patient acht CT-Scans in standardisierter Reihenfolge:

Legende	Scan
X_W0	Scan des ganzen Körpers – 1mm Schichtdicke (0,5mm CCT)
X_N0	Scan des Beckenbereichs ohne Beckenschlinge zum „Vorher-Nachher-Vergleich“ (Nativ_0) – 0,5mm Schichtdicke
X_PS1	Scan des Beckenbereichs nach Anlage der pneumatischen Schlinge VBM [®] mit einem Druck von 100mmHg – 0,5mm Schichtdicke
X_PS2	Scan des Beckenbereichs nach Anlage der pneumatischen Schlinge VBM [®] mit einem Druck von 200mmHg – 0,5mm Schichtdicke
X_N1	Scan des Beckenbereichs ohne Beckenschlinge zum „Vorher-Nachher-Vergleich“ (Nativ_1) – 0,5mm Schichtdicke
X_TP	Scan des Beckenbereichs nach Anlage des T-PODs [®] – 0,5mm Schichtdicke
X_N2	Scan des Beckenbereichs ohne Beckenschlinge zum „Vorher-Nachher-Vergleich“ (Nativ_2) – 0,5mm Schichtdicke
X_TS	Scan des Beckenbereichs nach Anlage einer gewöhnlichen Tuchslinge – 0,5mm Schichtdicke

Tab. 1: Standardisierte Abfolge der CT-Scans zur Messung der quantitativen Auswirkungen nach Anlage verschiedener Beckenschlingen (X= fortlaufende, anonymisierte Patienten-Nummer)

Zunächst wurde ein Ganzkörper-Scan (Scan X_W0) mit einer Schichtdicke 0,5 Millimeter für kranial, sowie einer Schichtdicke von 1 Millimeter für den thorakalen, abdominalen und pelvinen Bereich und die Extremitäten durchgeführt.

Nach Brechen der Leichenstarre folgte die Anlage der drei Vorrichtungen zur provisorischen, externen Beckenstabilisierung zur jeweiligen computertomographischen Dokumentation des Kompressionseffektes des frakturierten Beckens (Scan X_PS1, X_PS2, X_TP, X_TS). Die kraniale Begrenzung des Scanbereichs wurde für diese Scans auf Höhe LWK3 und kaudal auf Höhe der Mitte des Femurs gewählt. Unmittelbar vor Anlage der entsprechenden Vorrichtung

erfolgte jeweils eine Nativ-Aufnahme des gewählten Scanbereiches (Scan X_N0, X_N1, X_N2), um einen direkten Vorher-Nachher-Vergleich gewährleisten zu können.

Alle CT-Scans des Beckenbereiches wurden mit einer Schichtdicke von 0,5 Millimeter angefertigt.

2.2.5 Biomechanische Kraftmessungen der wirkenden Zugkräfte nach Beckenschlingenanlage

An insgesamt sechs Patienten (Patienten-Nr. 31-36) mit mechanisch instabilem Beckenbefund in der äußeren Leichenschau wurden erneut CT-Scans in der identischen, standardisierten Reihenfolge angefertigt. Zusätzlich wurden die Messungen nun um eine weitere Beckenschlinge ergänzt: Auf den CT-Scan nach Anlage der Tuchslinge (X_TS) folgend wurde ein erneuter Nativ-Scan (X_N3) angefertigt. Anschließend erfolgte die Anlage der SAM Sling[®] mit erneuter computertomographischen Dokumentation (X_SAM).

Legende	Scan
X_W0	Scan des ganzen Körpers – 1mm Schichtdicke (0,5mm CCT)
X_N0	Scan des Beckenbereichs ohne Beckenschlinge zum „Vorher-Nachher-Vergleich“ (Nativ_0) – 0,5mm Schichtdicke
X_PS1	Scan des Beckenbereichs nach Anlage der pneumatischen Schlinge VBM [®] mit einem Druck von 100mmHg – 0,5mm Schichtdicke
X_PS2	Scan des Beckenbereichs nach Anlage der pneumatischen Schlinge VBM [®] mit einem Druck von 200mmHg – 0,5mm Schichtdicke
X_N1	Scan des Beckenbereichs ohne Beckenschlinge zum „Vorher-Nachher-Vergleich“ (Nativ_1) – 0,5mm Schichtdicke
X_TP	Scan des Beckenbereichs nach Anlage des T-PODs [®] – 0,5mm Schichtdicke
X_N2	Scan des Beckenbereichs ohne Beckenschlinge zum „Vorher-Nachher-Vergleich“ (Nativ_2) – 0,5mm Schichtdicke
X_TS	Scan des Beckenbereichs nach Anlage einer gewöhnlichen Tuchslinge – 0,5mm Schichtdicke
X_N3	Scan des Beckenbereichs ohne Beckenschlinge zum „Vorher-Nachher-Vergleich“ (Nativ_3) – 0,5mm Schichtdicke
X_SAM	Scan des Beckenbereichs nach Anlage der SAM Sling [®] – 0,5mm Schichtdicke

Tab. 2: Erweiterung der computertomographischen Messungen um die SAM Sling[®] an weiteren sechs Patienten mit mechanisch instabilem Beckenbefund in der äußeren Leichenschau

Als Besonderheit wurden für die CT-Scans alle vier Beckenschlingen mit Zugfedern präpariert, um die wirkenden Zugkräfte nach fachgerechter Anlage zu dokumentieren.

Hierfür wurde in die Gurte der Beckenstabilisatoren an ausgewählter Stelle ein Newtonmeter installiert, um die entstehenden Zugkräfte nach Anlage an der Leiche quantifizieren zu können.



Abb. 9: Newtonmeter, das für die biomechanischen Messungen benutzt wurde

Zur Installation wurde bei jeder Schlinge eine Stelle gewählt, an der von einer möglichst geringen Alteration des Verschlussmechanismus auszugehen war. Um einen Ausriss des Newtonmeters zu verhindern, wurden jeweils beide Enden der durchtrennten Stelle mit einem Metallband verstärkt.



Abb. 10: Mit Newtonmeter und Zugfeder präparierte pneumatische Beckenschlinge VBM[®]



Abb. 11: Mit Newtonmeter und Zugfeder präparierter T-POD[®]



Abb. 12: Mit Newtonmeter und Zugfeder präparierte SAM Sling®

Bei den Zugfedern handelte es sich um das Modell Wazau Kraftaufnehmer des Typs OCDZ 0-3000N (Seriennummer 87388, Baujahr 1999) der Firma Wazau Mess- und Prüfsysteme GmbH mit Sitz in Berlin. Konnektiert wurden die Kraftaufnehmer über vier MC55-Messverstärkereinschübe für ohmsche und induktive Aufnehmer an ein Messkraftverstärkersystem MGC des Baujahrs 1995 der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH mit Sitz in Darmstadt.

Die Kalibrierung des Equipments wurde fachgerecht durch einen Dipl.-Ing. J.E. Ode, Biomechaniker des Julius-Wolff-Instituts der Charité- Universitätsmedizin, durchgeführt.

Die Dokumentation der wirkenden Zugkräfte bei anliegender Beckenschlinge während der Durchführung der CT-Scans erfolgte durch das Messequipment alle 0,02 Sekunden jeweils über einen Zeitraum von 182,78 Sekunden.

Es wurden vier verschiedene Zeitpunkte definiert, an denen die Werte abgelesen und verglichen wurden: Zum einen wurden die maximal erreichte Zugkraft (F_{max}) – unabhängig vom Zeitpunkt – dokumentiert. Standardisiert wurden außerdem die wirkenden Kräfte nach 45 Sekunden (t_1), 80 Sekunden (t_2) und 120 Sekunden (t_3) verwertet.

2.2.6 CT-Gerät

Bei dem für die Studie verwendeten CT-Gerät handelte es sich um einen Toshiba Activion 16 Multislice-Computertomographen der Firma Toshiba Medical Systems, Japan (Schichtkollimation bei Datenaufnahme 5mm, 8 Schichten/Rotation, 55mm Tischvorschub/Rotation, 1,375 Pitch, 1,2s Scanzeit, 0,4s Rotationszeit).

2.2.7 Software/OsiriX®

Zur Bildanalyse wurde das Software-Programm OsiriX® Version 4.1. der Firma Pixmeo mit Sitz in Bernex, Schweiz, verwendet. Hierfür wurden die erstellten CT-Bilder als DICOM-Dateien in das Programm kopiert.

2.2.8 Erhobene Daten

Anhand der computertomographischen Scans vor und nach Applikation der jeweiligen Beckenstabilisierungsvorrichtung wurden mithilfe von OsiriX[®] folgende Parameter ausgemessen bzw. analysiert:

- Volumetrie des Beckenrings
- Fläche der Beckeneingangsebene
- Abstand zwischen den Zentren beider Hüftköpfe
- Abstand zwischen beiden Köhler'schen-Tränenfiguren
- Abstand zwischen beiden Iliosakralgelenken ventral und dorsal
- Abstand bzw. Weite der Symphyse

2.2.8.1 Volumetrie des Beckens

Zur Berechnung der Volumetrie des Beckens wurde in der „3D MPR“-Ansicht mittels OsiriX[®] die Transversalansicht gewählt. Das Becken wurde in allen drei Ebenen primär standardisiert eingestellt. Als kraniale Begrenzung wurde die Ebene am Übergang zwischen LWK 4 und LWK 5 eingestellt, wo gerade die Facettengelenke von LWK4 nicht mehr sichtbar waren. Die kaudale Begrenzung markierte das kaudale Ende des Tuber ischiadicums. Bei Asymmetrie des Beckens aufgrund der Dislokation war das jeweilige weiter nach kaudal reichende Tuber ischiadicum als kaudale Begrenzung zu wählen. Es erfolgte die Markierung der Ebenen des Beckens in regelmäßigen Schichtabständen zwischen der kranialsten und kaudalsten Ebene mithilfe der Funktion „closed polygon“. Um alle Ebenen zu generieren wurde die Option „ROI Rename“ und „Generate Missing ROIs“ ausgewählt. Es erfolgte eine Kontrolle und eventuelle Korrektur aller ROIs der gesamten Schichtebenen. Das Volumen des Beckens wurde danach über die Option „Compute Volume“ berechnet und in cm³ angegeben.



Abb. 13: Beispielhafte Darstellung der Berechnung des pelvinen Volumens mittels OsiriX[®]

2.2.8.2 Fläche der Beckeneingangsebene

Die Fläche der Beckeneingangsebene wurde definiert als Transversalebene zwischen der Unterkante von SWK1 und Oberkante der Symphyse. Um die Vergleichbarkeit aller Scans zu gewährleisten, wurde im OsiriX[®]-Programm mit allen drei verfügbaren Ebenen gearbeitet: In der Transversalebene – in OsiriX[®] blau umrandet – wurde die gelbe Linie so eingestellt werden, dass sie mittig durch das Sakrum verläuft und dieses in zwei identische Hälften teilt. Dasselbe Prinzip wurde in der angeschrägten Frontalebene – in OsiriX[®] lila umrandet – angewendet. Die blaue Linie im Sagittalfenster – in OsiriX[®] orange umrandet – zeigt dann die Beckeneingangsebene an. Zur Vermessung der Fläche wurde die Option „closed polygon“ ausgewählt und die innere Begrenzung des Beckenrings anhand von Markierungen entlang der knöchernen Strukturen erstellt. Die Flächenberechnung erfolgte bei Verbindung der Markierungen zu einer geschlossenen Struktur automatisch. Die Fläche wurde in cm² angegeben.



Abb. 14: Beispielhafte Darstellung der Berechnung des Fläche in der Beckeneingangsebene mittels OsiriX[®]

2.2.8.3 Symphysenweite

Zur Vermessung wurde dieselbe Grundeinstellung gewählt wie zur Vermessung der Fläche der Beckeneingangsebene.

Die Symphysenweite wurde in cm dort vermessen, wo die beiden Ossa pubes am weitesten voneinander entfernt standen. Dafür musste ggf. eine Parallelebene zur Beckeneingangsebene in kranialer oder kaudaler Richtung aufgesucht werden.

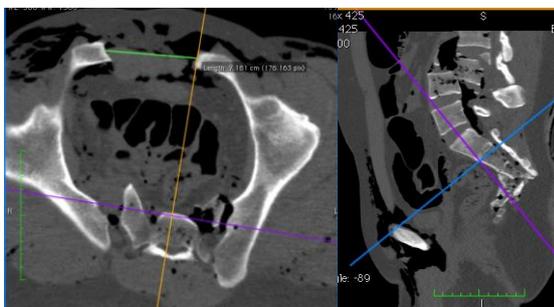


Abb. 15: Beispielhafte Darstellung der Vermessung der Symphysenweite mittels OsiriX[®]

2.2.8.4 Hüftkopfabstand

Der Hüftkopfabstand wurde definiert als Abstand zwischen den Zentren der beiden Hüftköpfe. In der Frontal- und Transversalebene wurden die Hüftköpfe so eingestellt, dass die Ebenen genau durch die Hüftkopfbazentren verliefen. Die Messung des Abstands erfolgte dann in der Frontalebene und wurde in cm angegeben.

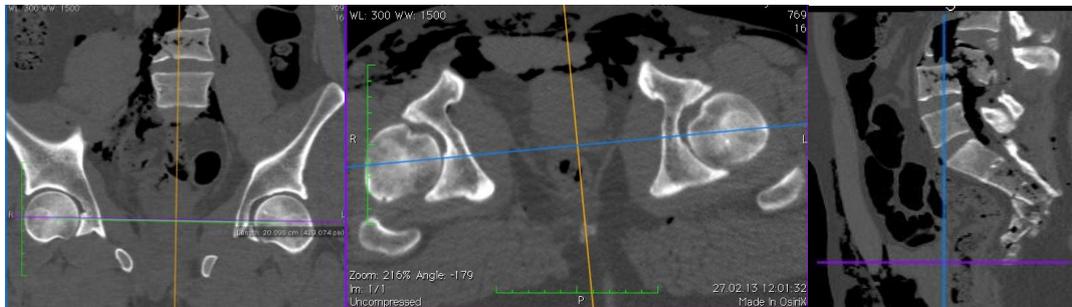


Abb. 16: Beispielhafte Darstellung der Vermessung des Hüftkopfabstands mittels OsiriX®

2.2.8.5 Abstand zwischen den Köhler'schen-Tränenfiguren

Bei der Köhler'schen Tränenfigur handelt es sich um eine Struktur, die in der Frontalebene eines CT-Bildes oder in einer Röntgen-Beckenübersichtsaufnahme sichtbar ist. Diese wird lateral durch den medialen Anteil des Acetabulums gebildet, medial durch die Acetabulumrückwand begrenzt und entspricht der Gestalt einer Träne.

Der Abstand zwischen den beiden Tränenfiguren wurde daher als kürzeste Distanz zwischen den beiden kaudalsten Polen der Figur in der Frontalebene definiert und entsprechend in cm ausgemessen.

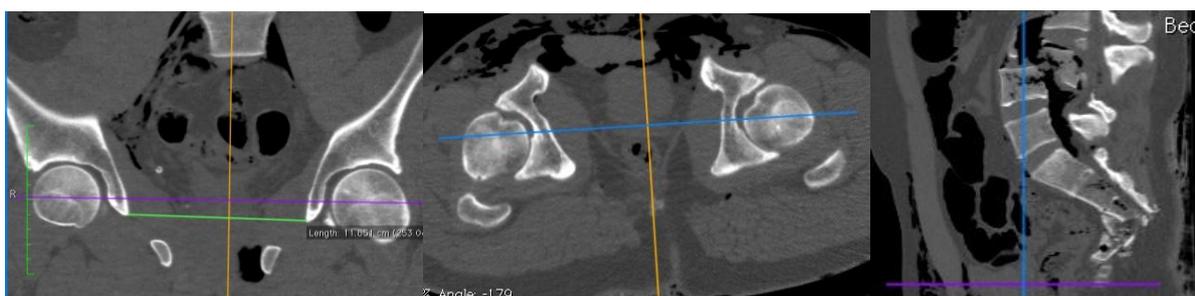


Abb. 17: Beispielhafte Darstellung der Vermessung des Abstands zwischen den Köhler'schen Tränenfiguren mittels OsiriX®

2.2.8.6 Abstand zwischen den Iliosakralgelenken ventral und dorsal

Zur Vermessung wurde dieselbe Grundeinstellung gewählt wie zur Vermessung der Fläche der Beckeneingangsebene. Diese Parameter dienen der Differenzierung von Instabilitäten und der Reposition bei Typ B- sowie Typ C-Beckenringverletzungen.

Der ventrale Abstand zwischen den Iliosakralgelenken wurde als Distanz zwischen den ventralen Anteilen des ISG-Gelenkspalts – definiert als Übergang vom Os Ileum zum Os Sacrum – abgemessen.

Als dorsalen Abstand zwischen den ISG wurde in derselben Ebene beidseitig die dorsalste knöcherne Begrenzung des Os Ileum gesucht und eine Linie dazwischen gezogen. Beide Abstände wurden in cm angegeben.

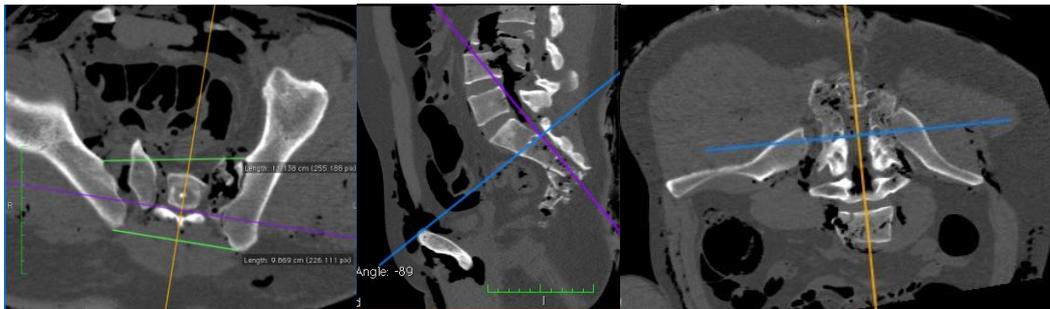


Abb. 18: Beispielhafte Darstellung der Vermessung des ventralen und dorsalen Abstands zwischen den Iliosakralgelenken mittels OsiriX®

2.3 Datenverarbeitung und statistische Auswertung

Die Datenverarbeitung erfolgte mittels IBM SPSS Statistics 22® (IBM Corporation Armonk, NY, USA) und Microsoft Office Excel 2007® (Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA).

Die statistische Auswertung erfolgte mittels IBM SPSS Statistics 22®. Deskriptive Daten wurden mittels Mittelwert (MW) und Standardabweichung (\pm) dargestellt. Für nicht normalverteilte Variablen wurden der Wilcoxon- und Kolmogorov-Test angewendet, normalverteilte Variablen wurden mithilfe des paired t-Test berechnet. Eine Signifikanz wurde bei einem $p < 0,05$ angenommen.

3. Ergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse der retrospektiven Fallaktenstudie zur Erhebung epidemiologischer Daten (3.1.) sowie die Ergebnisse der prospektiven Interventionsstudie zur Analyse des Effektes (3.2.) und der biomechanischen Eigenschaften externer, nicht-invasiver Beckenstabilisatoren (3.3) präsentiert.

3.1 Studienpopulation

Im Folgenden wird von den epidemiologischen Ergebnissen der Untersuchung von insgesamt 91 Fällen im Zeitraum März 2012 bis einschließlich September 2013 (01.03.2012-30.09.2013) berichtet (3.1.1. bis einschließlich 3.1.8.).

Diese Fallzahl setzt sich zusammen aus:

- 36 Patienten des Studienkollektivs (3.1.8. sowie 3.1.9. beziehen sich nur auf dieses Kollektiv), bei denen CT-Scans mit den verschiedenen Beckenschlingen angefertigt wurden sowie
- weiteren 55 Fällen, deren epidemiologische Daten durch Akteneinsicht im Archiv des Instituts für Rechtsmedizin untersucht wurden.

3.1.1 Alter und Geschlecht

Das durchschnittliche Alter der 91 Patienten betrug 49 ± 19 Jahre. Der jüngste Patient war zum Zeitpunkt des Todes 18, der älteste Patient 92 Jahre alt.

Mit 67% war der überwiegende Teil der Patienten männlichen Geschlechts. Konsekutiv fielen 33% auf das weibliche Geschlecht.

3.1.2 Unfallmechanismus

Die analysierten Todesfälle waren in 13% (12 Patienten) durch einen Verkehrsunfall, in 23% (21 Patienten) durch ein Zugüberrolltrauma und in 64% (58 Patienten) durch einen Sturz aus der Höhe verursacht.

Unfallmechanismen

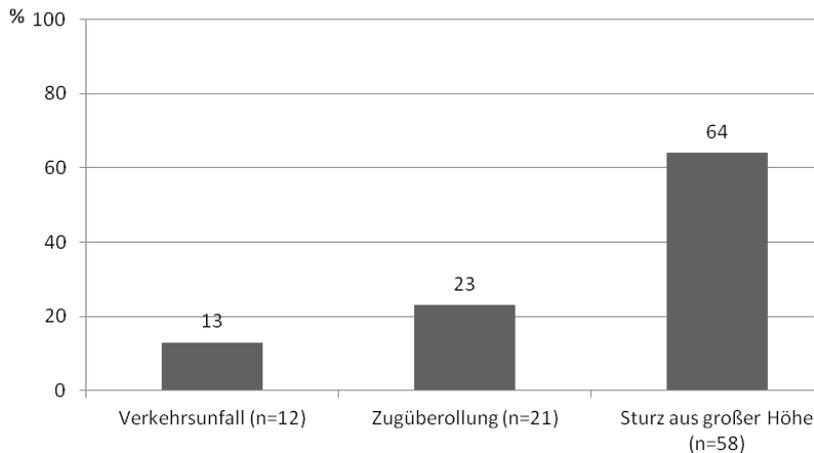


Abb. 19: Verteilung der Unfallmechanismen (n=91): Der überwiegende Teil der Patienten verstarb infolge eines Sturzes aus großer Höhe, gefolgt von Zugüberrollungen und Verkehrsunfällen

3.1.3 Präklinische medizinische Maßnahmen

Im Folgenden werden die präklinisch durchgeführten medizinischen Maßnahmen der 91 verstorbenen Patienten mit Beckenverletzung ausgewertet. Bei 37% der Patienten des untersuchten Kollektivs (n=34) war aus den Protokollen ersichtlich, dass präklinisch medizinische Maßnahmen durchgeführt wurden.

Die folgende Abbildung zeigt eine Zusammenfassung der durchgeführten präklinischen Maßnahmen:

Präklinische medizinische Maßnahmen

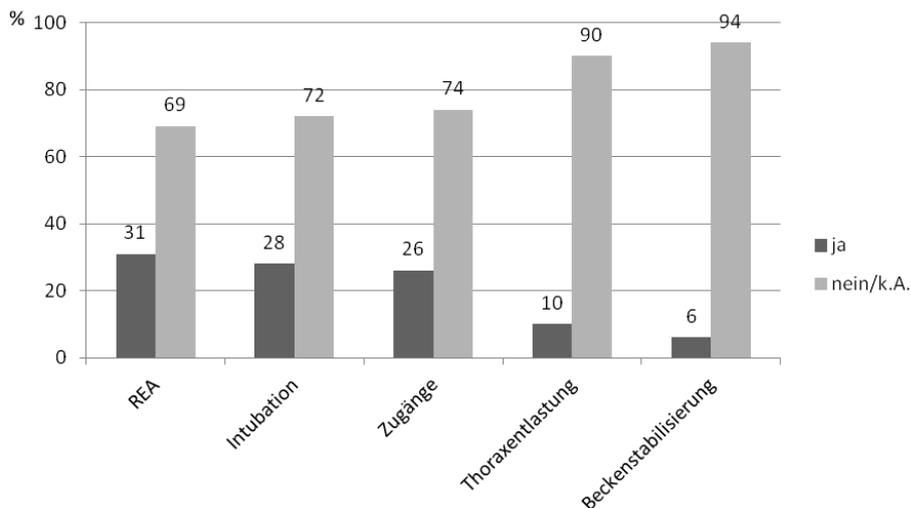


Abb. 20: Zusammenfassende Verteilung präklinischer Maßnahmen: Mehrheitlich wurde auf die Durchführung präklinischer Maßnahmen verzichtet (REA=Reanimation, ja=Durchführung der Maßnahme, nein/k.A.=keine Durchführung der Maßnahme bzw. keine Angabe hierzu in den Protokollen auffindbar)

3.1.3.1 Reanimation

Eine präklinische Reanimation erfolgte bei 28 Patienten (31%).

Der überwiegende Anteil der 91 Patienten wurde vor Ort nicht reanimiert (60%, n=55) oder die Durchführung einer Reanimation war anhand der vorliegenden Dokumente nicht sicher ersichtlich (9%, n=8).

3.1.3.2 Intubation

Eine Intubation wurde bei 25 Patienten (28%) präklinisch durchgeführt. Beim überwiegenden Anteil der Patienten (72%, n=66) fand keine Sicherung des Atemweges durch das rettungsdienstliche Personal statt oder wurde nach Todeseintritt entfernt.

3.1.3.3 Anlage intravenöser oder intraossärer Zugänge

74% der Patienten (n=67) erhielten keinen Zugang, während 22% (n=20) einen intravenösen und 4% (n=4) einen intraossären Zugang erhielten. Konsekutiv wurden den 24 Patienten, die zur Volumentherapie und Applikation von Medikamenten einen Zugang erhielten, mehrheitlich intravenöse Zugänge (83% vs. 17% intraossär) gelegt.

3.1.3.4 Entlastung des Thorax mittels Punktion oder Thoraxdrainage

Die Anlage einer Thoraxdrainage im präklinischen Setting erfolgte bei sieben Patienten (8%).

Bei zwei Patienten (2%) wurde eine Entlastungspunktion bei Verdacht auf Spannungspneumothorax durchgeführt.

Beim Großteil der Patienten des Kollektivs (90%) erfolgte keine Entlastungspunktion oder Anlage einer Thoraxdrainage.

Laut Obduktionsprotokollen der 91 untersuchten Patienten fanden sich jedoch bei 66% (n=60) Pneumothoraces (siehe 3.1.6).

3.1.3.5 Externe, nicht-invasive Beckenstabilisierung

Bei lediglich fünf von 91 Patienten (6%) mit instabiler Beckenverletzung erfolgte bereits präklinisch eine externe, nicht-invasive Beckenstabilisierung, in einem Fall (1%) konnte dies anhand der Dokumentation nicht mehr sicher nachvollzogen werden.

3.1.4 Todesort

Der häufigste Todesort war der Ereignisort. Von den 91 untersuchten Fällen verstarben 79 Patienten (87%) präklinisch bzw. vor Aufnahme in eine Klinik. 12 Patienten (13%) verstarben im Krankenhaus und stellten damit die Minderheit dar.

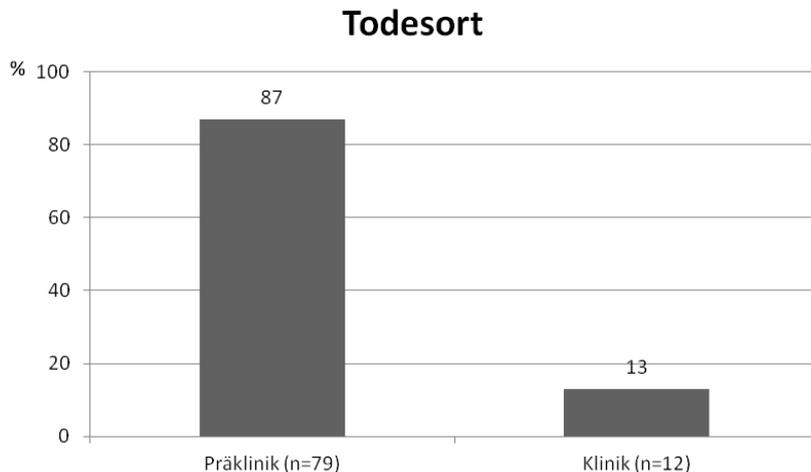


Abb. 21: Verteilung der Todesorte der 91 untersuchten Patienten des Zeitraums März 2012 bis September 2013: Mehrheitlich verstarben die Patienten im präklinischen Setting

Von den 12 in der Klinik verstorbenen Patienten wurden fünf präklinisch reanimiert, zwei Patienten zeigten sich im präklinischen Setting nicht reanimationspflichtig. Bei fünf Patienten konnte die Frage nach einer präklinischen Reanimation aufgrund mangelnder Dokumentation in den Protokollen nicht sicher beantwortet werden.

3.1.5 Hauptblutungsquellen

Anhand der Obduktionsprotokolle ließen sich mehrheitlich Hauptblutungsquellen bei den Verstorbenen erkennen: Führend zeigten sich Hauptblutungsquellen im thorakalen Bereich (25%, n=23), gefolgt von Blutungsquellen im Bereich der peripelvinen Weichteile (19%, n=17). Starke Blutungen der Leber (12%, n=11) sowie durch eine Aortenruptur verursachte Blutungen (7%, n=6), ließen sich genauso finden wie Blutungen durch Zerstörung anatomischer Strukturen des Herzens (2%, n=2). Selten standen externe Blutungsquellen - durch eine Oberschenkelamputation - im Vordergrund (1%, n=1).

Bei 34% (n=31) der Patienten war im Rahmen der Obduktion eine eindeutige Zuordnung der Hauptblutungsquelle nicht möglich.

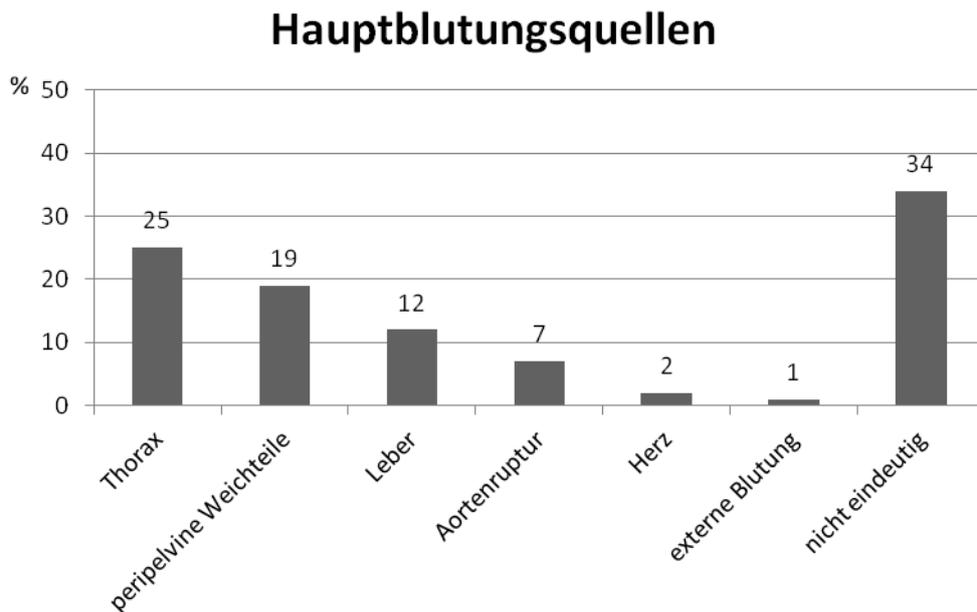


Abb. 22: Überblick über die Hauptblutungsquellen im untersuchten Kollektiv: Neben häufig nicht eindeutig zuordenbaren Befunden, fanden sich Hauptblutungsquellen vor allem im Thorax und den peripelvinen Weichteilen.

3.1.6 Verletzungsmuster

Bei den 91 Patienten des Kollektivs wurden aus den Obduktionsprotokollen neben den Befunden der Beckenfrakturen auch alle weiteren Verletzungen großer Organe bzw. Organsysteme des Körperstamms, die der Leichnam aufwies, entnommen und ausgewertet.

Bei fast allen Patienten des untersuchten Kollektivs zeigten sich Verletzungen am und/oder im Thorax (96%, n=87): So konnte bei 66% der Patienten (n=60) ein Pneumothorax sowie bei 39% (n=35) eine Verletzung des Herzens festgestellt werden.

Im Bereich des Neurotraumas konnte für den Großteil der Verstorbenen ein Schädel-Hirn-Trauma (84%, n=76) dokumentiert werden. Ebenfalls zeigten sich bei der Mehrheit des Kollektivs Verletzungen der Wirbelsäule (63%, n=57).

Im Vergleich zum Thoraxtrauma zeigten sich für das abdominelle Trauma etwas geringere Inzidenzen: 76% der Patienten (n=69) wiesen eine Verletzung der Leber, 54% (n=49) eine Verletzung der Milz auf. Verletzungen der Nieren und des Pankreas zeigten sich weniger häufig mit 36% (n=33) bzw. 12% (n=11).

Diaphragmarupturen als Zeichen eines ausgedehnten Zwei-Höhlen-Traumas konnten bei 13% des Kollektivs (n=12) nachgewiesen werden.

Die Untersuchung der Inzidenz von großen Gefäßverletzungen zeigte bei 37% der Patienten (n=34) Verletzungen der thorakalen Aorta. Schädigungen im Bereich der abdominellen Aorta wiesen 29% der Patienten auf (n=26). Die Integrität der Vena cava superior oder inferior war hingegen bei 11% des Studienkollektivs (n=10) nicht mehr erhalten.

Peripelvine Weichteilschäden zeigten sich bei 86% des untersuchten Kollektivs (n=78). Lediglich 3% der Patienten (n=3) wiesen diese nicht auf. Bei 11% der Population (n=10) war der Zustand der peripelvinen Weichteile in den Obduktionsprotokollen nicht ausreichend dokumentiert.

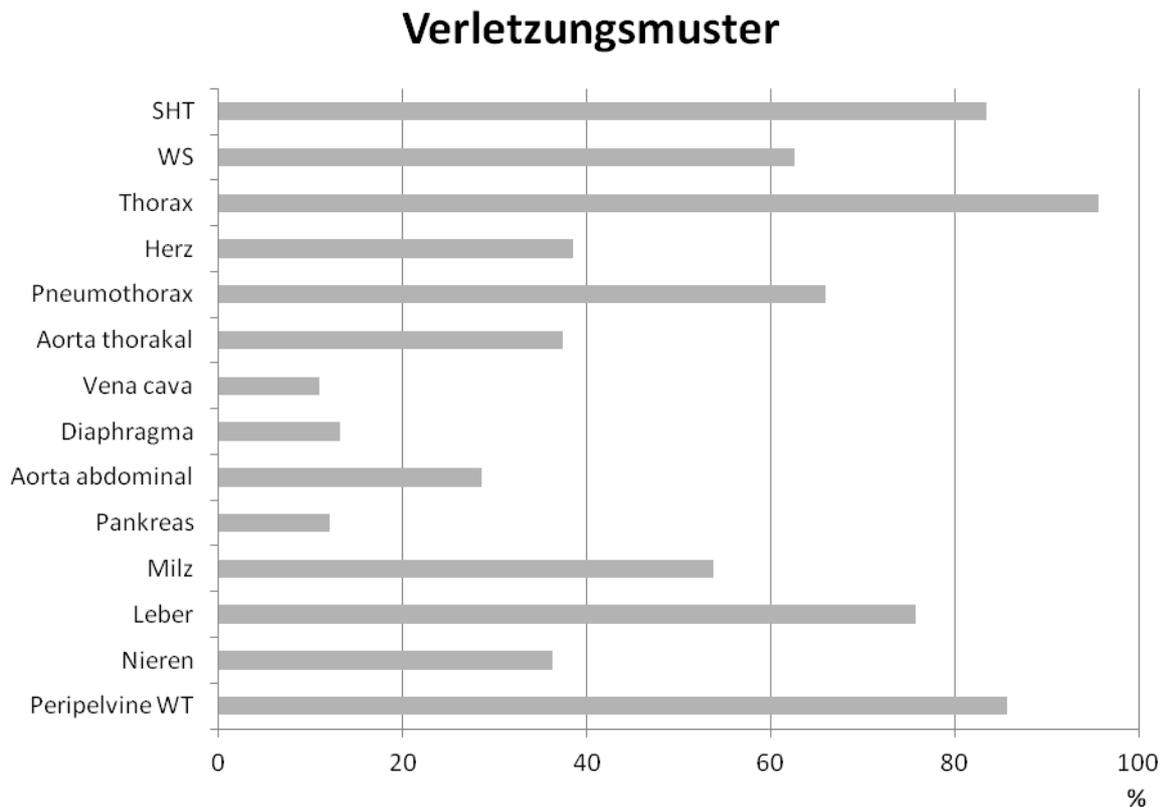


Abb. 23: Zusammenfassung der Verletzungsverteilung bei verstorbenen Patienten mit instabiler Beckenverletzung: Führend zeigten sich thorakale Begleitverletzungen, gefolgt von Verletzungen der peripelvinen Weichteile und dem Schädel-Hirn-Trauma (SHT= Schädel-Hirn-Trauma, WS= Wirbelsäule, WT= Weichteile)

Eine graphische Darstellung und Unterteilung der Verletzungen nach Körperregion illustrieren nachfolgende Abbildungen:



Abb. 24: Bildliche Veranschaulichung der Verletzungen im Bereich des Neurotraumas (links) und Thorax (rechts): Sowohl das SHT als auch allgemeine thorakale Verletzungen zeigten in unserem Studienkollektiv hohe Inzidenzen (SHT= Schädel-Hirn-Trauma, WS= Wirbelsäule)

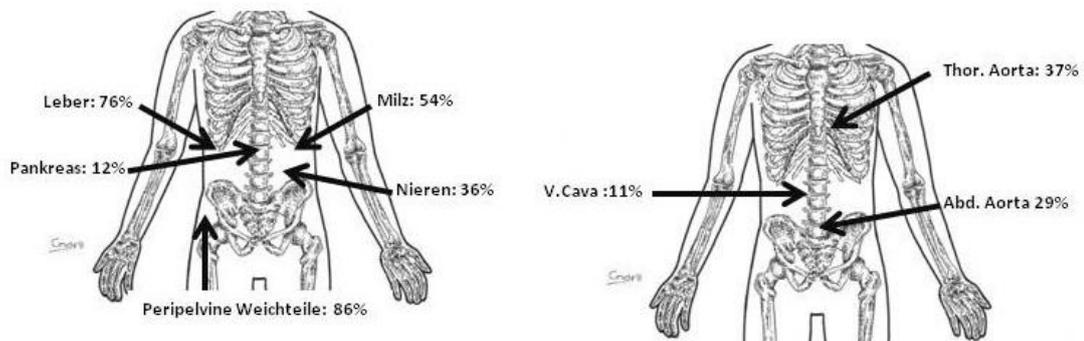


Abb. 25: Bildliche Veranschaulichung der Verletzungen abdomineller Organe, peripelviner Weichteile (links) sowie der großen, zentralen Gefäße (rechts): Sowohl der das Becken umgebende Weichteilmantel als auch Verletzungen der Leber ließen sich sehr häufig bei den Obduktionen nachweisen. Verletzungen der Aorta traten wesentlich häufiger in Erscheinung als Verletzungen der Vena cava

3.1.7 Todesursache laut Obduktion

Todesursächlich zeigte sich im überwiegenden Teil des untersuchten Kollektivs das Polytrauma (93%, n=85). In 6% der Fälle (n=5) kam es zum Todeseintritt durch Verbluten. Bei einem Patienten des Kollektivs (1%) zeigte sich das Schädel-Hirn-Trauma als todesursächlich.

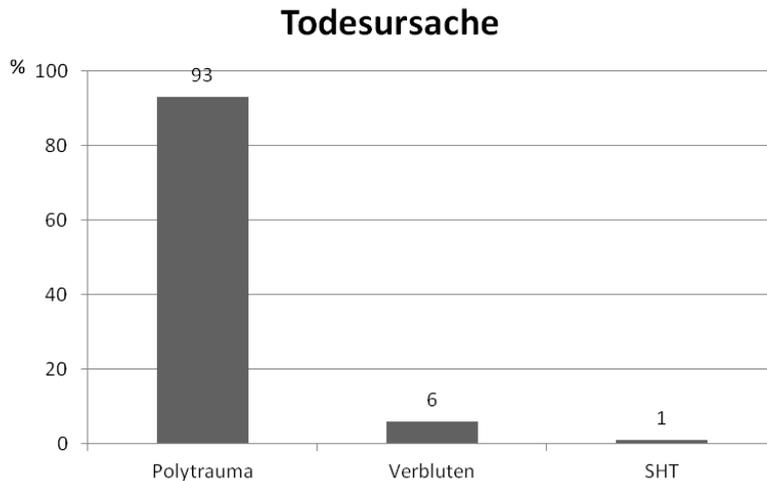


Abb. 26: Überblick über die Todesursachen laut Obduktionsbericht: Der überwiegende Teil der Patienten verstarb am Polytrauma.

3.1.8 Klassifikation der Beckenringverletzungen

Die Klassifikation der Beckenringverletzungen nach AO basiert auf einer radiologischen CT-Bildgebung, sodass nachfolgend (3.1.8. und 3.1.9.) ausschließlich die 36 verstorbenen Patienten mit post-mortem CT analysiert werden.

Führend zeigten sich im untersuchten Kollektiv Typ-C-Beckenverletzungen. Typ-B-Beckenverletzungen konnten im untersuchten Kollektiv nicht nachgewiesen werden. Analog der Einschlusskriterien wurde ein Patient mit einer Typ-A-Beckenverletzung in die Studie eingeschlossen: Bei der klinischen Stabilitätsprüfung ergab sich aufgrund einer Ala-Fraktur mit konsekutiver Instabilität der Beckenschaufel bei der lateralen und ventralen Kompression das Bild eines instabilen Beckens. Erst durch die post-mortem CT Analyse stellte sich heraus, dass es sich um eine Typ-A-Verletzung handelte.

Nachfolgende Abbildungen zeigen eine Übersicht über die Verteilung der verschiedenen Frakturtypen und –gruppen:

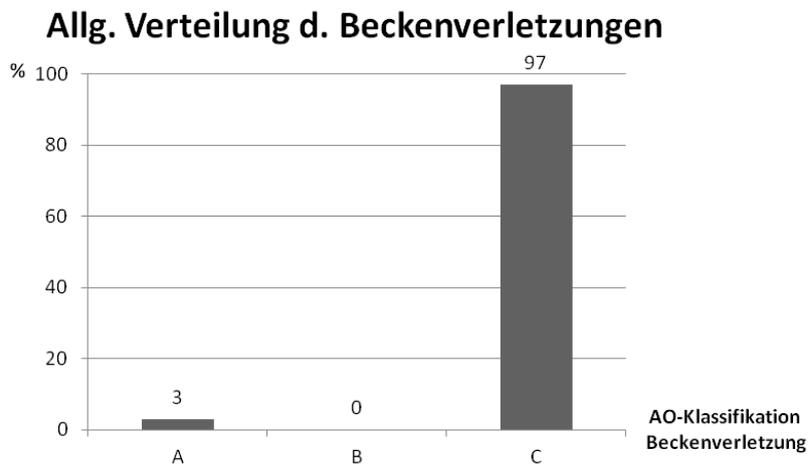


Abb. 27: Verteilung in Typ A-/B-/C-Beckenverletzungen: Mehrheitlich handelte es sich um Typ-C-Beckenverletzungen

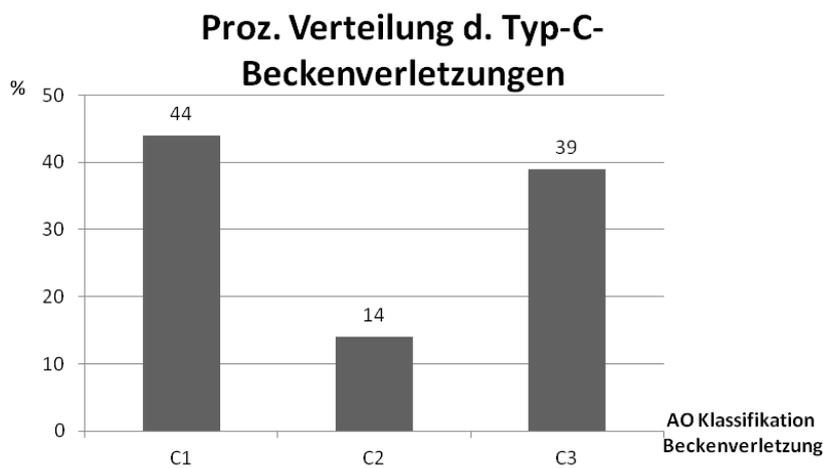


Abb. 28: Verteilung der Typ-C-Beckenverletzungen des untersuchten Kollektivs. Führend zeigten sich Typ-C1-Verletzungen, gefolgt von Typ-C3-Beckenverletzungen.

Nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht über die Unterteilung der Beckenverletzungen des Kollektivs gemäß der AO-Klassifikation nach Pennal und Tile:

Typ Beckenfraktur nach AO-Klassifikation	Absolute Häufigkeit im Studienkollektiv	Prozent des Studienkollektivs
A2.1	1	2,8
C1.1	2	5,6
C1.2	9	25
C1.3	5	13,9
C2.1	1	2,8
C2.2	2	5,6
C2.3	2	5,6
C3.1	2	5,6
C3.2	8	22,1
C3.3	4	11
Gesamt	36	100

Tab. 3: Verteilung der Frakturtypen im 36 Fälle umfassenden Studienkollektiv: Es handelt sich fast ausschließlich um Typ-C-Beckenfrakturen

3.1.9 Inzidenz zusätzlich vorhandener proximaler Femurfrakturen

Es zeigte sich, dass mehr als ein Drittel der Patienten unseres Studienkollektivs (n=14) zusätzlich zur instabilen Beckenringfraktur auch proximale Femurfrakturen aufwies (39%). Bei 2 Patienten lagen bilaterale Femurfrakturen (6%) vor.

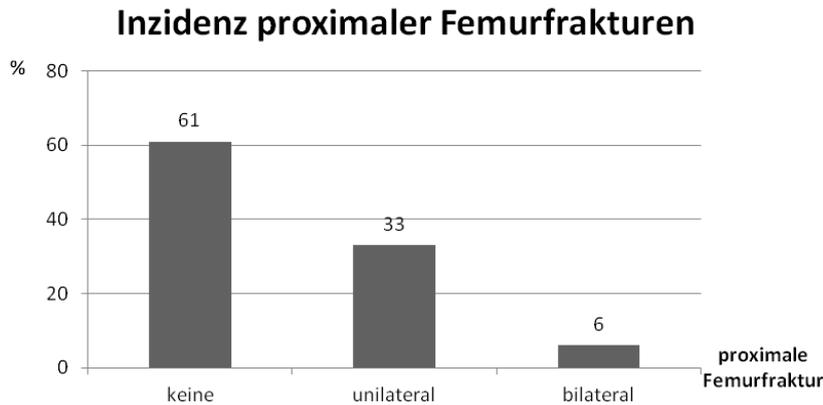


Abb. 29: Inzidenz proximaler Femurfrakturen bei den 36 Patienten mit instabiler Beckenfraktur des Studienkollektivs: Bei 22 Patienten fand sich keine, bei 12 eine unilaterale und bei 2 eine bilaterale proximale Femurfraktur

3.2 CT-gestützte Messungen nicht-invasive, externe Beckenstabilisatoren

Die folgenden Ergebnisse beziehen sich auf die computertomographischen Scans der 36 Patienten des Studienkollektivs. Bei 31 Patienten wurden CT-Scans angefertigt mit und ohne angebrachte pneumatische Schlinge VBM[®] (100mmHg und 200mmHg), T-POD[®] und Tuchslinge. Die restlichen fünf Patienten erhielten zusätzlich eine Untersuchung der SAM Sling[®].

3.2.1 Reduktion des intrapelvinen Volumens

Alle angelegten externen, nicht-invasiven Beckenstabilisatoren konnten eine Reduktion des intrapelvinen Volumens im Vergleich zu den Nativscans erzielen.

Die pneumatische Beckenschlinge VBM[®] erzielte bezüglich dessen sowohl bei einem applizierten Druck von 100mmHg als auch bei appliziertem Druck von 200mmHg signifikante Ergebnisse ($p < 0,001$).

Die Reduktion des intrapelvinen Volumens gelang bei der pneumatischen Schlinge VBM[®] mit appliziertem Druck von 100mmHg durchschnittlich um $268 \pm 185 \text{cm}^3$, bei appliziertem Druck von 200mmHg um durchschnittliche $306 \pm 176 \text{cm}^3$.

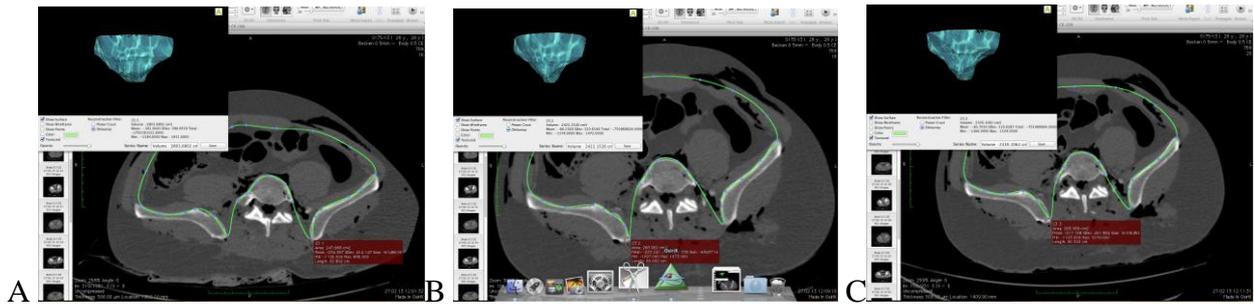


Abb. 30: Reduktion des intrapelvines Volumens nach Anlage der pneumatischen Schlinge VBM[®] am Beispiel von Patient 23: A: intrapelvines Volumen vor Anlage, B: unmittelbar nach Anlage des Beckenstabilisators mit einem Druck von 100mmHg. C: intrapelvines Volumen mit einem Druck von 200mmHg

Die Reduktion des intrapelvines Volumens nach Anlage des T-POD[®] erzielte ebenfalls signifikante Ergebnisse ($p < 0,001$). Dem T-POD[®] gelang eine durchschnittliche Reduktion um $333 \pm 234 \text{cm}^3$.

Die Tuschlinge erzielte eine durchschnittliche Reduktion von $186 \pm 222 \text{cm}^3$ bei entsprechender Signifikanz ($p < 0,001$).

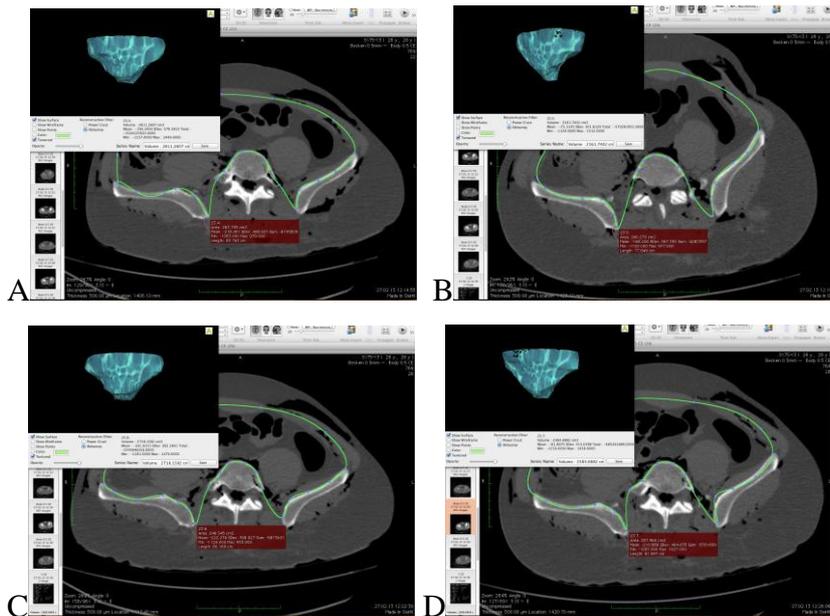


Abb. 31: Veranschaulichung der Reduktion des intrapelvines Volumens vor (A) sowie nach Anlage des TPOD[®](B) bzw. vor (C) und nach Anlage der Tuschlinge (D) am Beispiel von Patient 23

Die SAM Sling[®] konnte ebenfalls eine Reduktion des intrapelvines Volumens aufweisen, jedoch zeigte diese bei $n=5$ im Vergleich zu den anderen getesteten nicht-invasiven Beckenstabilisatoren lediglich einen Trend ($p = 0,1$): Sie lag durchschnittlich bei $184 \pm 114 \text{cm}^3$.

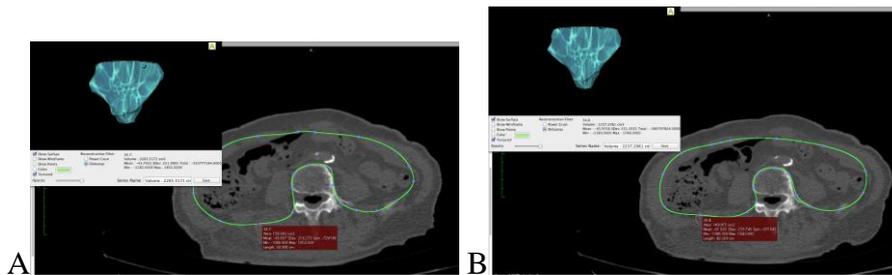


Abb. 32: Veranschaulichung der Reduktion des intrapelvines Volumens nach Anlage der SAM Sling® am Beispiel von Patient 33: Intrapelvines Volumen vor Anlage (A) sowie unmittelbar nach Anlage des Beckenstabilisators (B)

Die nachfolgende Tabelle dient als Übersicht der durchschnittlichen Reduktionsergebnisse des intrapelvines Volumens der getesteten externen, nicht-invasiven Beckenstabilisatoren:

Reduktion intrapelvines Volumen	Mittelwert (in cm³)	Std ± (in cm³)
PS1	268*	185
PS2	306*	176
TP	333*	234
TS	186*	222
SAM	184	114

Tab. 4: Übersicht über die Reduktionsergebnisse des intrapelvines Volumens anhand der Mittelwerte und Standardabweichung im direkten Vergleich der getesteten Beckenstabilisatoren zu den Nativscans (PS1= pneumatische Beckenschlinge VBM® mit appliziertem Druck von 100mmHg; PS2= pneumatische Beckenschlinge VBM® mit appliziertem Druck von 200mmHg, TP= T-POD®; TS= Tuschschlinge, SAM= SAM Sling®; Std= Standardabweichung; *p<0,001)

Im direkten Vergleich des Reduktionsvermögens der Beckenstabilisatoren untereinander zeigten sich folgende Ergebnisse: Die Reduktionsergebnisse der pneumatischen Beckenschlinge VBM® zeigten bei appliziertem Druck von 200mmHg ($306 \pm 176\text{cm}^3$) signifikant höhere Ergebnisse ($p = 0,002$) als bei appliziertem Druck von 100mmHg ($268 \pm 185\text{cm}^3$).

Dem T-POD® gelang durchschnittlich eine höhere Reduktion des pelvines Volumens ($333 \pm 234\text{cm}^3$) als der pneumatischen Schlinge VBM® mit appliziertem Druck von 100mmHg ($268 \pm 185\text{cm}^3$), dieses Ergebnis stellte sich jedoch nicht als signifikant dar ($p = 0,09$).

Der Tuschschlinge ($186 \pm 222\text{cm}^3$) gelang im Vergleich zur pneumatischen Schlinge VBM® mit appliziertem Druck von 100mmHg ($268 \pm 185\text{cm}^3$) eine signifikant niedrigere Volumenreduktion

($p = 0,01$). Die Sam Sling[®] ($184 \pm 114\text{cm}^3$) zeigte im Vergleich zur pneumatischen Schlinge VBM[®] mit appliziertem Druck von 100mmHg ($268 \pm 185\text{cm}^3$) ebenfalls eine niedrigere Volumenreduktion, hier zeigte sich der Unterschied jedoch nicht signifikant ($p = 0,9$).

Im Vergleich mit der pneumatischen Schlinge VBM[®] mit appliziertem Druck von 200mmHg ($306 \pm 176\text{cm}^3$) schnitten die verglichenen Beckenstabilisatoren wie folgt ab:

Der T-POD[®] ($333 \pm 234\text{cm}^3$) ($p = 0,8$) und die SAM Sling[®] ($184 \pm 114\text{cm}^3$) ($p = 0,6$) zeigten eine vergleichbare Volumenreduktion, die Tuchschnge ($186 \pm 222\text{cm}^3$) ($p < 0,001$) schnitt auch hier signifikant niedriger ab.

Der direkte Vergleich der Reduktionsergebnisse des T-PODs[®] ($333 \pm 234\text{cm}^3$) mit den weiteren Beckenstabilisatoren erbrachte folgende Ergebnisse:

Die Tuchschnge ($186 \pm 222\text{cm}^3$) ($p < 0,001$) zeigte signifikant niedrigere Reduktionsergebnisse. Die SAM Sling[®] ($184 \pm 114\text{cm}^3$) zeigte niedrigere Reduktionsergebnisse, die Unterschiede waren jedoch nicht signifikant ($p = 0,3$).

Im Vergleich zwischen Tuchschnge ($186 \pm 222\text{cm}^3$) und SAM Sling[®] ($184 \pm 114\text{cm}^3$) zeigten sich keine signifikanten Unterschiede ($p = 0,13$).

Die nachfolgende Tabelle fasst die Ergebnisse des Vergleichs der verschiedenen Beckenstabilisatoren untereinander in Bezug auf die Reduktion des intrapelvinen Volumens zusammen:

Reduktion Volumen	PS1	PS2	TP	TS	SAM
PS1	-				
PS2	$p = 0,002$	-			
TP			-		
TS	$p = 0,01$	$p < 0,001$	$p < 0,001$	-	
SAM					-

Tab. 5: Übersicht über die Reduktionsergebnisse des intrapelvinen Volumens im direkten Vergleich der getesteten Beckenstabilisatoren untereinander: Signifikante niedrigere Reduktionsergebnisse im Vergleich aller Beckenstabilisatoren zeigte die Tuchschnge (PS1= pneumatische Beckenschlinge VBM[®] mit appliziertem Druck von 100mmHg; PS2= pneumatische Beckenschlinge VBM[®] mit appliziertem Druck von 200mmHg, TP= T-POD[®]; TS= Tuchschnge, SAM= SAM Sling[®])

Beim Vergleich der verschiedenen CT-Nativ-Scans zeigten sich signifikante Unterschiede bezüglich des intrapelvinen Volumens des CT-Nativ-Scan vor Anlage der pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] (=Nativ-Scan; $2643 \pm 541\text{cm}^3$) und des CT-Nativ-Scan vor Anlage des T-POD[®] (=Nativ1-Scan; $2571 \pm 584\text{cm}^3$) ($p = 0,01$). Ebenso zeigte sich ein hochsignifikanter Unterschied im Vergleich des CT-Nativ-Scans vor Anlage der pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] (=Nativ-Scan; $2643 \pm 541\text{cm}^3$) und vor Anlage der Tuchschiene (=Nativ 2-Scan; $2529 \pm 584\text{cm}^3$) ($p < 0,001$). Weitere signifikante Unterschiede waren beim Vergleich der CT-Nativ-Scans vor Anlage des T-POD[®] (=Nativ1-Scan; $2571 \pm 584\text{cm}^3$) und vor Anlage der Tuchschiene (=Nativ 2-Scan; $2529 \pm 584\text{cm}^3$) ($p = 0,001$) sowie vor Anlage der Tuchschiene und vor Anlage der SAM Sling[®] (=Nativ 3-Scan; $2323 \pm 324\text{cm}^3$) ($p = 0,03$) zu verzeichnen.

Keine signifikanten Unterschiede zeigten sich beim Vergleich der CT-Nativ-Scans vor Anlage der pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] und vor Anlage der SAM Sling[®] ($p = 0,7$) sowie vor Anlage des T-POD[®] und vor Anlage der SAM Sling[®] ($p = 0,2$).

3.2.2 Reduktion der Fläche in der Beckeneingangsebene

Alle angelegten externen, nicht-invasiven Beckenstabilisatoren konnten eine Reduktion der Fläche in der Beckeneingangsebene erzielen.

Bezüglich der Fläche in der Beckeneingangsebene konnte die pneumatische Beckenschlinge VBM[®] eine Reduktion um durchschnittlich $34 \pm 29\text{cm}^2$ (100mmHg) bzw. $35\text{cm}^2 \pm 29\text{cm}^2$ (200mmHg) aufweisen. Im Vergleich zu den Nativscans handelte es sich dabei um signifikante Ergebnisse ($p < 0,001$).

Im direkten Vergleich der beiden applizierten Drücke (100 vs. 200mmHg) gab es ebenfalls signifikante Unterschiede: Bei der Reduktion der Beckeneingangsebene erzielte die pneumatische Beckenschlinge VBM[®] bei angelegtem Druck von 200mmHg ($35 \pm 29\text{cm}^2$) entscheidend höhere Reduktionsergebnisse als bei appliziertem Druck von 100mmHg ($34 \pm 29\text{cm}^2$) ($p < 0,001$).

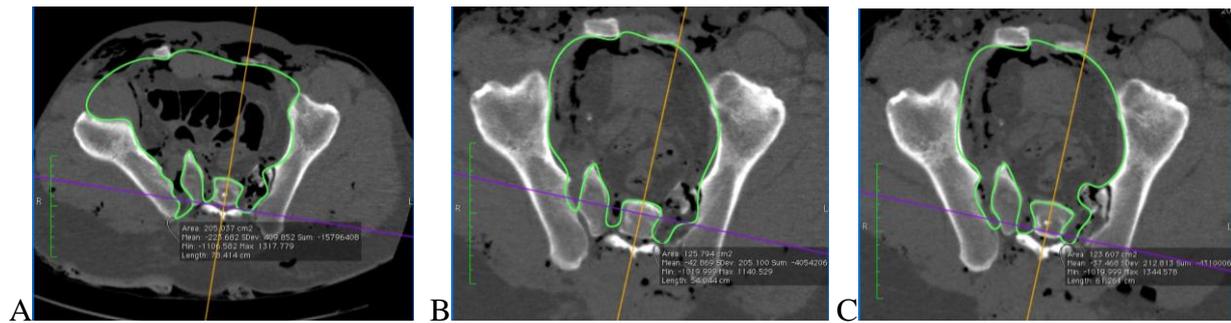


Abb. 33: Exemplarische Darstellung der Reduktion der Fläche in der Beckeneingangsebene unmittelbar vor (A) sowie nach Anlage der pneumatischen Schlinge VBM[®] mit einem Druck von 100mmHg (B) und 200mmHg (C) am Beispiel von Patient 23

Die Reduktion der Fläche in der Beckeneingangsebene nach Anlage des T-PODs[®] erzielte ebenfalls signifikante Ergebnisse ($p < 0,001$), gleiches galt für die Tuchschnle.

Die Reduktion der Beckeneingangsebene gelang mittels T-POD[®] um $28 \pm 24 \text{ cm}^2$. Die Tuchschnle erzielte hier eine durchschnittliche niedrigere Reduktion von $18 \pm 18 \text{ cm}^2$.

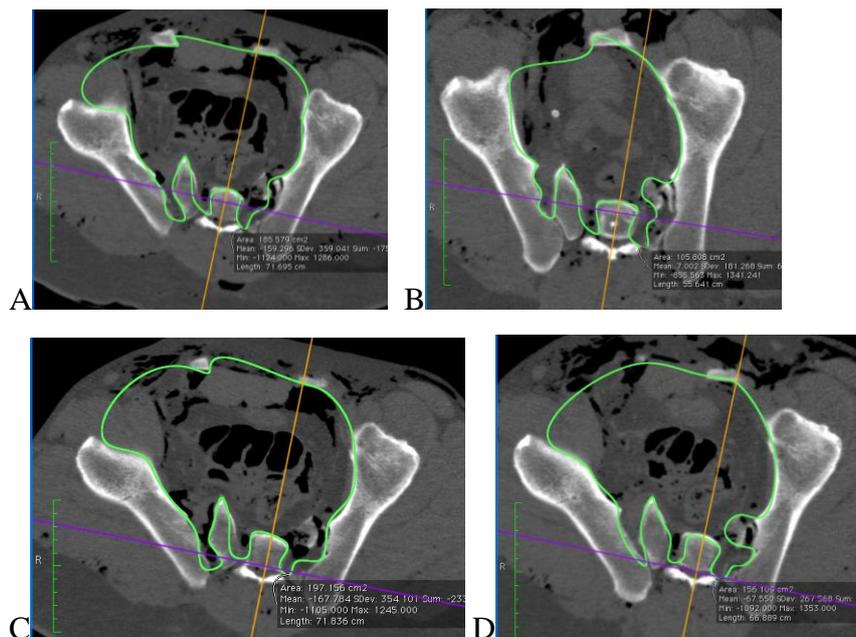


Abb. 34: Reduktion der Fläche in der Beckeneingangsebene vor (A) sowie nach Anlage des TPOD[®] (B) bzw. vor (C) und nach Anlage der Tuchschnle (D) am Beispiel von Patient 23

Die SAM Sling[®] erzielte ebenfalls eine Reduktion der Beckeneingangsfläche, welche jedoch aufgrund der niedrigen Fallzahl $n=5$ im Vergleich zu den anderen getesteten externen, nicht-invasiven Beckenstabilisatoren nur einen Trend zeigte ($p = 0,1$).

Durchschnittlich konnte die Beckeneingangsebene um $14 \pm 8 \text{ cm}^2$ reduziert werden.

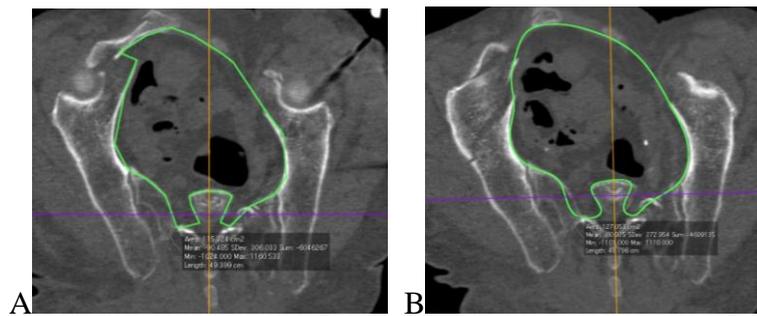


Abb. 35: Reduktion der Fläche in der Beckeneingangsebene unmittelbar vor (A) sowie nach Anlage der SAM Sling® (B) am Beispiel von Patient 33

Die nachfolgende Tabelle dient als Übersicht über die durchschnittlichen Reduktionsergebnisse der einzelnen externen, nicht-invasiven Beckenstabilisatoren:

Reduktion Fläche der Beckeneingangsebene	Mittelwert (in cm ²)	Std ± (in cm ²)
PS1	34*	29
PS2	35*	29
TP	28*	24
TS	18*	18
SAM	14	8

Tab. 6: Übersicht über die Reduktionsergebnisse der Fläche in der Beckeneingangsebene anhand der Mittelwerte und Standardabweichung im direkten Vergleich der getesteten Beckenstabilisatoren zu den Nativscans (PS1= pneumatische Beckenschlinge VBM® mit appliziertem Druck von 100mmHg; PS2= pneumatische Beckenschlinge VBM® mit appliziertem Druck von 200mmHg, TP= T-POD®; TS= Tuchschnge, SAM= SAM Sling®; Std= Standardabweichung; *p<0,001)

Im direkten Vergleich des Flächenreduktionsvermögens der Beckenstabilisatoren untereinander zeigten sich folgende Ergebnisse: Die Flächenreduktionsergebnisse der pneumatischen Beckenschlinge VBM® zeigten signifikant höhere Ergebnisse bei appliziertem Druck von 200mmHg ($35 \pm 29\text{cm}^2$) als bei appliziertem Druck von 100mmHg ($34 \pm 29\text{cm}^2$) ($p < 0,001$). Der T-POD® ($28 \pm 24\text{cm}^2$) zeigte im Vergleich zur pneumatischen Beckenschlinge VBM® mit appliziertem Druck von 200mmHg ($35 \pm 29\text{cm}^2$) signifikant niedrigere Ergebnisse ($p = 0,004$). Keine signifikanten Unterschiede erbrachte der Vergleich von T-POD® ($28 \pm 24\text{cm}^2$) mit der Beckenschlinge VBM® bei appliziertem Druck von 100mmHg ($34 \pm 29\text{cm}^2$) ($p = 0,3$).

Die Tuchschnge ($18 \pm 18 \text{ cm}^2$) erzielte im Vergleich jeweils eine niedrigere Flächenreduktion als die pneumatische Beckenschlinge VBM[®] (100mmHg: $34 \pm 29\text{cm}^2$ / 200mmHg: $35 \pm 29\text{cm}^2$) und der T-POD[®] ($28 \pm 24 \text{ cm}^2$) ($p < 0,001$).

Die SAM Sling[®] ($14 \pm 8\text{cm}^2$) zeigte im Vergleich zur pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] (100mmHg: $34 \pm 29\text{cm}^2$ / 200mmHg: $35 \pm 29\text{cm}^2$), dem T-POD[®] ($28 \pm 24 \text{ cm}^2$) und der Tuchschnge ($18 \pm 18\text{cm}^2$) jeweils keine signifikanten Unterschiede in der Flächenreduktion ($p = 0,9$ (pneum. Beckenschlinge VBM[®] mit 100mmHg), $p = 0,7$ (pneum. Beckenschlinge VBM[®] mit 200mmHg), jeweils $p = 0,1$ für T-POD[®] und Tuchschnge).

Die nachfolgende Tabelle fasst die Ergebnisse des Vergleichs der verschiedenen Beckenstabilisatoren untereinander in Bezug auf die Reduktion der Fläche in der Beckeneingangsebene zusammen:

Reduktion Beckeneingangsebene	PS1	PS2	TP	TS	SAM
PS1	-				
PS2	$p < 0,001$	-			
TP		$p = 0,004$	-		
TS	$p < 0,001$	$p < 0,001$	$p < 0,001$	-	
SAM					-

Tab. 7: Übersicht über die Reduktionsergebnisse der Fläche der Beckeneingangsebene im direkten Vergleich der getesteten Beckenstabilisatoren: Es zeigten sich einige signifikante Unterschiede. Keine signifikanten Unterschiede zeigten sich zwischen der pneumatischen Schlinge VBM[®] mit appliziertem Druck von 100mmHg und dem T-POD[®] ($p=0,3$) sowie beim Vergleich der SAM Sling[®] mit allen anderen Beckenstabilisatoren (PS1= pneumatische Beckenschlinge VBM[®] mit appliziertem Druck von 100mmHg; PS2= pneumatische Beckenschlinge VBM[®] mit appliziertem Druck von 200mmHg, TP= T-POD[®]; TS= Tuchschnge, SAM= SAM Sling[®])

Beim Vergleich der verschiedenen CT-Nativ-Scans zeigte sich, dass zwischen der Fläche der Beckeneingangsebene des CT-Nativ-Scan vor Anlage der pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] (=Nativ-Scan) sowie der des CT-Scan vor Anlage des T-POD[®] (=Nativ1-Scan) signifikante Unterschiede bestanden ($p < 0,001$). Ebenso zeigte sich ein signifikanter Unterschied im Vergleich des CT-Nativ-Scans vor Anlage der pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] und vor

Anlage der Tuchschnge ($p = 0,04$). Die Fläche der Beckeneingangsebene zeigte sich durchschnittlich signifikant kleiner im Nativ 1-Scan ($151 \pm 33\text{cm}^2$) bzw. Nativ 2-Scan ($155 \pm 31\text{cm}^2$) im Vergleich zum Nativ-Scan ($158 \pm 35\text{cm}^2$).

Kein signifikanter Unterschied zeigte sich beim Vergleich der CT-Nativ-Scans vor Anlage der pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] ($158 \pm 35\text{cm}^2$) und vor Anlage der SAM Sling[®] ($137 \pm 11\text{cm}^2$)($p = 0,3$).

Im Vergleich der restlichen CT-Nativ-Scans untereinander zeigten sich ebenfalls keinerlei signifikante Unterschiede (Nativ 1-Scan (vor T-POD[®]) vs. Nativ 2-Scan (vor Tuchschnge): $p = 0,1$ / Nativ 1-Scan (vor T-POD[®]) vs. Nativ 3-Scan (vor SAM Sling[®]): $p = 0,2$ / Nativ 2-Scan (vor Tuchschnge) vs. Nativ 3-Scan (vor SAM Sling[®]): $p = 0,8$).

3.2.3 Reduktion der Symphysenweite

Die Reduktion der Symphysenweite gelang allen getesteten externen, nicht-invasiven Beckenstabilisatoren.

Der pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] gelang bei appliziertem Druck von 100mmHg durchschnittlich eine Reduktion um $1,1 \pm 1,9\text{cm}$ sowie $1,2 \pm 2\text{cm}$ bei Erhöhung des applizierten Drucks auf 200mmHg.

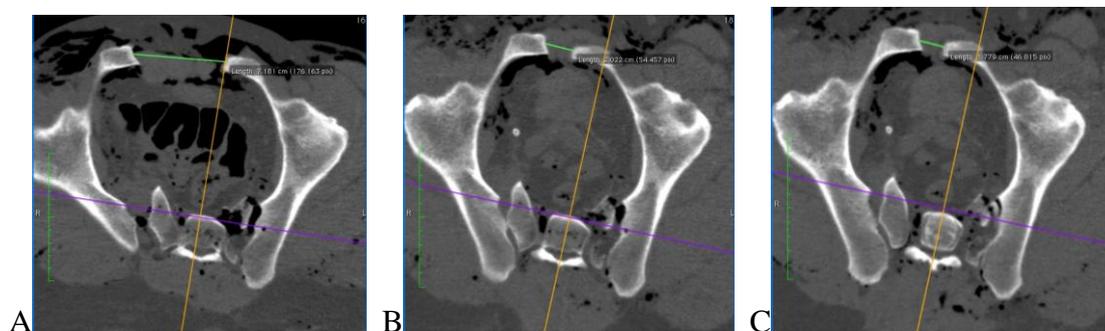


Abb. 36: Reduktion des Symphysenabstands am Beispiel von Patient 23: A: unmittelbar vor Anlage der pneumatischen Schlinge VBM[®]; B: nach Anlage mit einem Druck von 100mmHg; C: nach Anlage mit einem Druck von 200mmHg

Die Anlage des T-PODs[®] erbrachte eine Reduktion der Weite der Symphyse um durchschnittliche $1,1 \pm 1,8\text{cm}$.

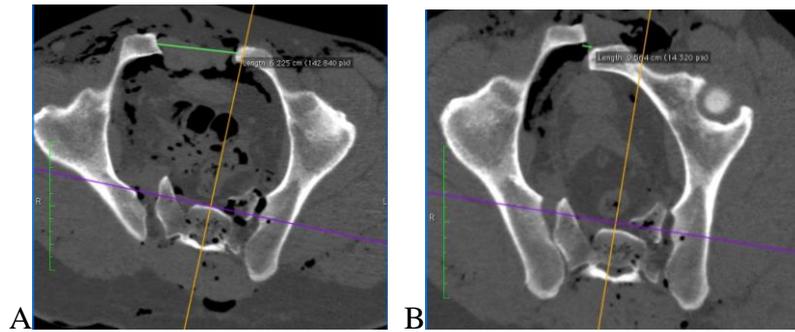


Abb. 37: Reduktion der Symphysenweite nach Anlage des T-POD[®] am Beispiel von Patient 23 A: vor Anlage, B: nach Anlage des T-POD[®])

Mittels Tuchschnlle konnte die Symphysenweite um durchschnittliche $0,6 \pm 1\text{cm}$ reduziert werden.

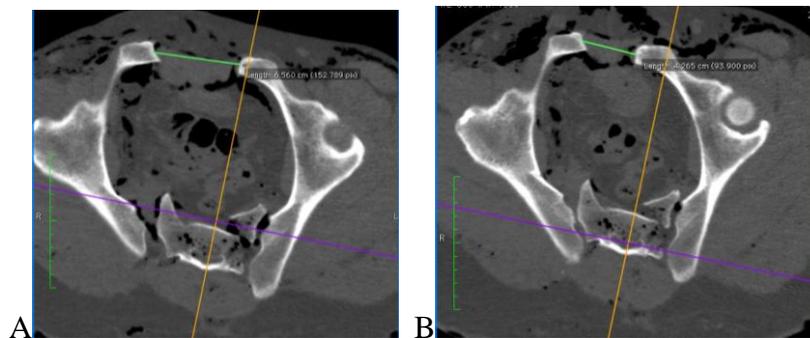


Abb. 38: Reduktion der Symphysenweite nach Anlage der Tuchschnlle am Beispiel von Patient 23 (A: vor Anlage, B: nach Anlage der Tuchschnlle)

Der SAM Sling[®] gelang eine Reduktion um durchschnittliche $0,06 \pm 0,1\text{cm}$.

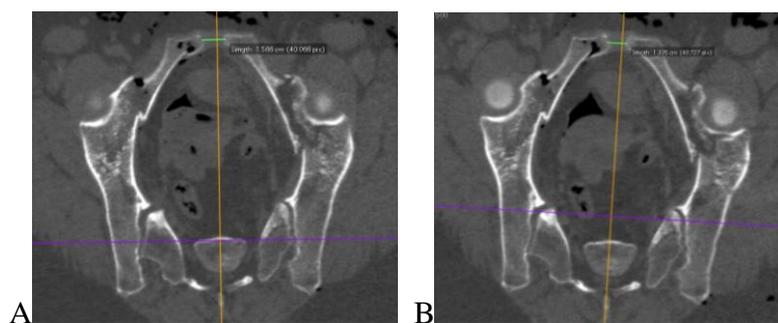


Abb. 39: Reduktion der Symphysenweite nach Anlage der SAM Sling[®] am Beispiel von Patient 35 (A: vor Anlage, B: nach Anlage der Sam Sling[®])

Die nachfolgende Tabelle dient als Übersicht der durchschnittlichen Reduktionsergebnisse der einzelnen externen, nicht-invasiven Beckenstabilisatoren:

Reduktion der Symphysenweite	Mittelwert (in cm)	Std ± (in cm)
PS1	1,1	1,9
PS2	1,2	2
TP	1,1	1,8
TS	0,6	1
SAM	0,06	0,1

Tab. 8: Übersicht über die Reduktionsergebnisse der Symphysenweite anhand der Mittelwerte und Standardabweichung im direkten Vergleich der getesteten Beckenstabilisatoren zu den Nativscans (PS1= pneumatische Beckenschlinge VBM[®] mit appliziertem Druck von 100mmHg; PS2= pneumatische Beckenschlinge VBM[®] mit appliziertem Druck von 200mmHg, TP= T-POD[®]; TS= Tuschlinge, SAM= SAM Sling[®]; Std= Standardabweichung)

Im direkten Vergleich des Reduktionsvermögens der Beckenstabilisatoren untereinander zeigten sich folgende Ergebnisse:

Die Reduktionsergebnisse der pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] zeigten für die Reduktion der Symphysenweite keine signifikant besseren Ergebnisse bei appliziertem Druck von 200mmHg als bei appliziertem Druck von 100mmHg (100mmHg: 1,1 ± 1,9cm / 200mmHg: 1,2 ± 2cm) (p =0,1).

Der T-POD[®] (1,1 ± 1,8cm) zeigte im Vergleich zur pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] (100mmHg: 1,1 ± 1,9cm / 200mmHg: 1,2 ± 2cm) vergleichbare Ergebnisse, unabhängig vom applizierten Druck (jeweils p =0,4).

Der Vergleich der Tuschlinge (0,6 ± 1cm) mit der pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] bei appliziertem Druck von 100mmHg (1,1 ± 1,9cm) ergab signifikant niedrigere Reduktionsergebnisse (p =0,047) und stellt damit den einzigen signifikanten Unterschied bei den Ergebnissen zur Reduktion der Symphysenweite dar.

Keine signifikanten Unterschiede zeigten sich beim Vergleich der Tuschlinge (0,6 ± 1cm) mit der pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] bei appliziertem Druck von 200mmHg (1,2 ± 2cm) (p =0,2) und dem T-POD[®] (1,1 ± 1,8cm) (p=0,1).

Vergleichbare Reduktionsergebnisse erbrachte die SAM Sling® (0,06 ± 0,1cm): Sie zeigte sowohl im Vergleich mit der pneumatischen Beckenschlinge VBM® bei appliziertem Druck von 100mmHg (1,1 ± 1,9cm) (p =0,3) als auch 200mmHg (1,2 ± 2cm) (p =0,4), dem T-POD® (1,1 ± 1,8cm) (p =0,6) sowie der Tuchschnge (0,6 ± 1cm) (p =0,6) keine signifikant schlechteren Reduktionsergebnisse.

Die nachfolgende Tabelle fasst die Ergebnisse des Vergleichs der verschiedenen Beckenstabilisatoren untereinander in Bezug auf die Reduktion der Symphyssenweite zusammen:

Reduktion Symphyssenweite	PS1	PS2	TP	TS	SAM
PS1	-				
PS2		-			
TP			-		
TS	p=0,047*			-	
SAM					-

Tab. 9: Übersicht über die Reduktionsergebnisse der Symphyssenweite im direkten Vergleich der getesteten Beckenstabilisatoren: Es zeigten sich kaum signifikante Unterschiede (PS1= pneumatische Beckenschlinge VBM® mit appliziertem Druck von 100mmHg; PS2= pneumatische Beckenschlinge VBM® mit appliziertem Druck von 200mmHg, TP= T-POD®; TS= Tuchschnge, SAM= SAM Sling®); *p<0,05

3.2.4 Reduktion des Hüftkopfabstands

Die Reduktion des Hüftkopfabstands gelang allen getesteten externen, nicht-invasiven Beckenstabilisatoren.

Der pneumatischen Beckenschlinge VBM® gelang bei appliziertem Druck von 100mmHg durchschnittlich eine Reduktion des Hüftkopfabstands um 2,5 ± 1,3cm und bei appliziertem Druck von 200mmHg um 2,9 ± 1,4cm.

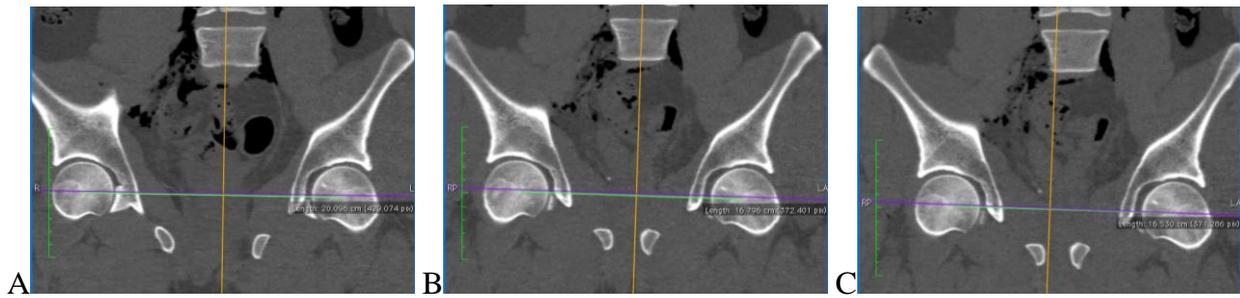


Abb. 40: Veranschaulichung der Reduktion des Hüftkopfabstands unmittelbar vor (A) sowie nach Anlage der pneumatischen Schlinge VBM[®] mit einem Druck von 100mmHg (B) und 200mmHg (C) am Beispiel von Patient 23

Durch die Anlage des T-POD[®] konnte eine Reduktion des Abstands um durchschnittliche $2,1 \pm 1,4$ cm erreicht werden.

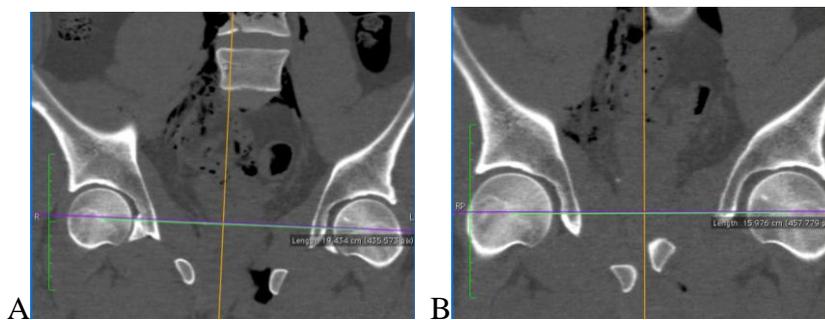


Abb. 41: Reduktion des Hüftkopfabstands nach Anlage des T-POD[®] am Beispiel von Patient 23 (A: vor Anlage, B: nach Anlage des T-POD[®])

Die Tuschlinge wies eine durchschnittliche Reduktion im Hüftkopfabstand von $1,1 \pm 1$ cm auf, die der SAM Sling[®] lag im Bereich von $1,1 \pm 0,5$ cm.

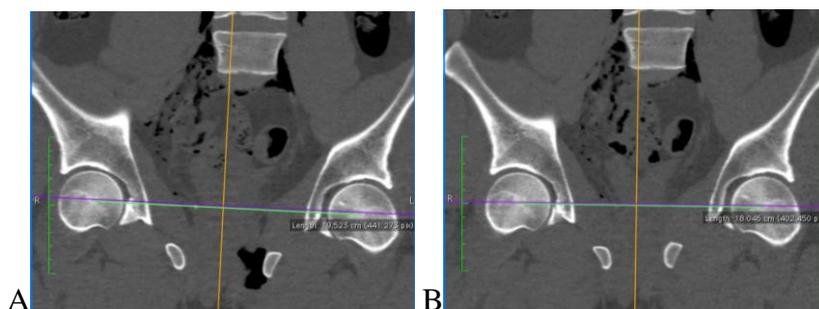


Abb. 42: Reduktion des Hüftkopfabstands nach Anlage der Tuschlinge am Beispiel von Patient 23 (A: vor Anlage, B: nach Anlage der Tuschlinge)

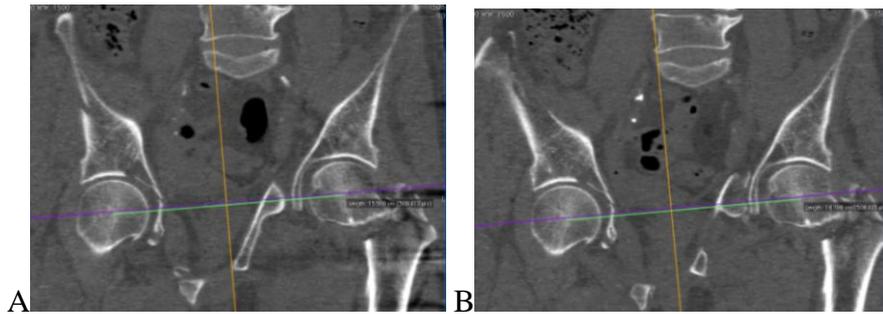


Abb. 43: Reduktion des Hüftkopfabstands nach Anlage der Sam Sling[®] am Beispiel von Patient 33 (A: vor Anlage, B: nach Anlage der SAM Sling[®])

Die nachfolgende Tabelle zeigt die durchschnittlichen Reduktionsergebnisse der einzelnen externen, nicht-invasiven Beckenstabilisatoren:

Reduktion des Hüftkopfabstands	Mittelwert (in cm)	Std ± (in cm)
PS1	2,5	1,3
PS2	2,9	1,4
TP	2,1	1,4
TS	1,1	1
SAM	1,1	0,5

Tab. 10: Übersicht über die Reduktionsergebnisse des Hüftkopfabstands anhand der Mittelwerte und Standardabweichung im direkten Vergleich der getesteten Beckenstabilisatoren zu den Nativscans (PS1= pneumatische Beckenschlinge VBM[®] mit appliziertem Druck von 100mmHg; PS2= pneumatische Beckenschlinge VBM[®] mit appliziertem Druck von 200mmHg, TP= T-POD[®]; TS= Tuchschnge, SAM= SAM Sling[®]; Std= Standardabweichung)

Im direkten Vergleich des Reduktionsvermögens der Beckenstabilisatoren untereinander zeigten sich folgende Ergebnisse:

Die Reduktionsergebnisse der pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] zeigten auch für die Reduktion des Hüftkopfabstands signifikant höhere Ergebnisse bei appliziertem Druck von 200mmHg (2,9 ± 1,4cm) als bei appliziertem Druck von 100mmHg (2,5 ± 1,3cm) (p <0,001).

Der T-POD[®] (2,1 ± 1,4cm) zeigte im Vergleich zur pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] mit appliziertem Druck von 100mmHg (2,5 ± 1,3cm) vergleichbare Ergebnisse (p =0,2). Im Vergleich mit der Beckenschlinge VBM[®] mit appliziertem Druck von 200mmHg (2,9 ± 1,4cm)

konnte der T-POD[®] ($2,1 \pm 1,4\text{cm}$) eine signifikant niedrigere Reduktion der Hüftkopfabstände erzielen ($p = 0,001$).

Die Tuchslinge ($1,1 \pm 1\text{cm}$) erzielte im Vergleich zur pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] (100mmHg: $2,5 \pm 1,3\text{cm}$ / 200mmHg: $2,9 \pm 1,4\text{cm}$) und dem T-POD[®] ($2,1 \pm 1,4\text{cm}$) signifikant niedrigere Reduktionsergebnisse bezüglich des Hüftkopfabstands (jeweils $p < 0,001$).

Im Vergleich zu allen anderen getesteten externen, nicht-invasiven Beckenstabilisatoren konnte die SAM Sling[®] ($1,1 \pm 0,5\text{cm}$) niedrigere Reduktionsergebnisse erzielen, die Unterschiede zeigten sich jedoch nicht signifikant (jeweils $p = 0,1$ für pneum. Beckenschlinge VBM[®] und Tuchslinge, $p = 0,6$ für T-POD[®]).

Die nachfolgende Tabelle fasst die Ergebnisse des Vergleichs der verschiedenen Beckenstabilisatoren untereinander in Bezug auf die Reduktion des Hüftkopfabstands zusammen:

Reduktion Hüftkopfabstand	PS1	PS2	TP	TS	SAM
PS1	-				
PS2	$p < 0,001$	-			
TP		$p = 0,001$	-		
TS	$p < 0,001$	$p < 0,001$	$p < 0,001$	-	
SAM					-

Tab. 11: Übersicht über die Reduktionsergebnisse des Hüftkopfabstands im direkten Vergleich der getesteten Beckenstabilisatoren: Es zeigten sich erneut signifikante Ergebnisse. (PS1= pneumatische Beckenschlinge VBM[®] mit appliziertem Druck von 100mmHg; PS2= pneumatische Beckenschlinge VBM[®] mit appliziertem Druck von 200mmHg, TP= T-POD[®]; TS= Tuchslinge, SAM= SAM Sling[®])

3.2.5 Reduktion des Abstands zwischen den Köhler'schen Tränenfiguren

Die Reduktion des Abstands zwischen der jeweils rechten und linken Köhler'schen Tränenfigur gelang allen getesteten externen, nicht-invasiven Beckenstabilisatoren.

Der pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] gelang bei appliziertem Druck von 100mmHg durchschnittlich eine Reduktion dieses Abstands um $2 \pm 1,2\text{cm}$ und bei appliziertem Druck von 200mmHg um $2,3 \pm 1,2\text{cm}$.

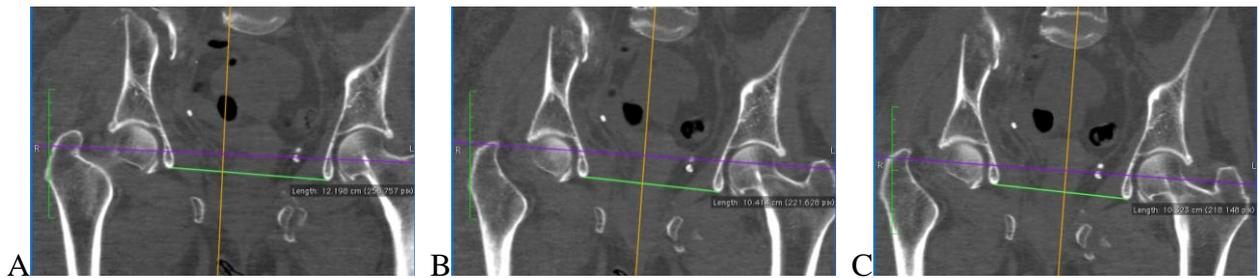


Abb. 44: Reduktion des Abstands zwischen den Köhler'schen Tränenfiguren am Beispiel von Patient 3: A: unmittelbar vor Anlage der pneumatischen Schlinge VBM®; B: nach Anlage mit einem Druck von 100mmHg; C: nach Anlage mit einem Druck von 200mmHg

Durch die Anlage des T-PODs® konnte eine Reduktion des Abstands um durchschnittliche $1,6 \pm 1,1$ cm erreicht werden.

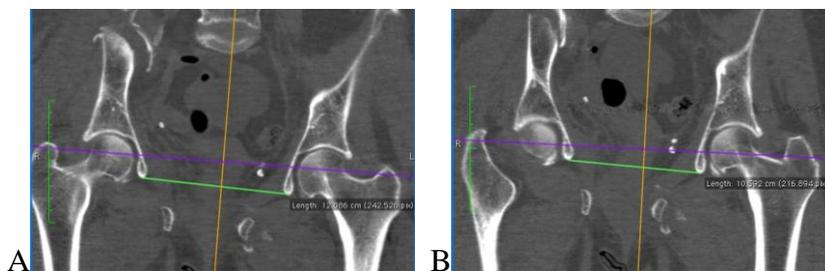


Abb. 45: Reduktion des Abstands zw. den Köhler'schen Tränenfiguren nach Anlage des T-POD® am Beispiel von Patient 3 (A: vor Anlage, B: nach Anlage des T-POD®)

Die Tuchschnge vermochte den Abstand zwischen den Köhler'schen Tränenfiguren um durchschnittliche $0,9 \pm 0,8$ cm zu reduzieren. Die Reduktionsergebnisse der SAM Sling® lagen im Bereich von $0,9 \pm 0,6$ cm.

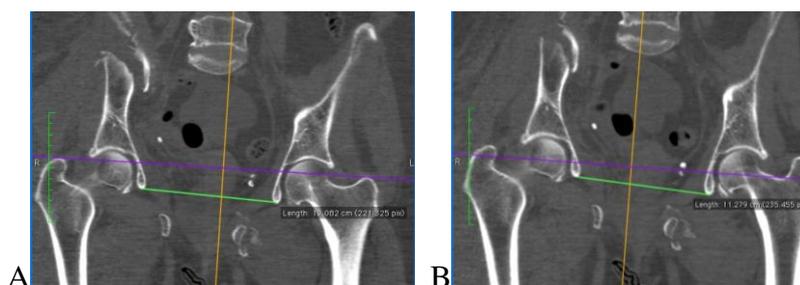


Abb. 46: Reduktion des Abstands zw. den Köhler'schen Tränenfiguren nach Anlage der Tuchschnge bzw. der SAM Sling® am Beispiel von Patient 3 (A: vor Anlage, B: nach Anlage der Tuchschnge)

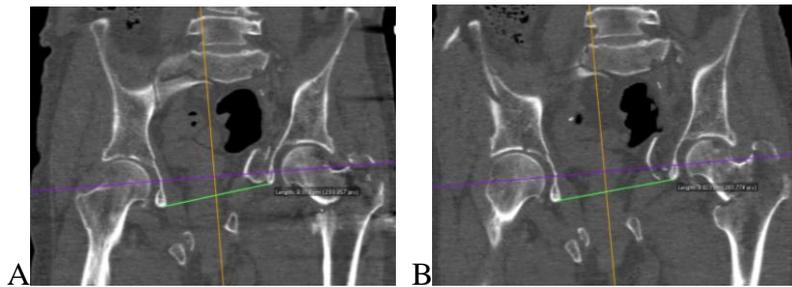


Abb. 47: Reduktion des Abstands zw. den Köhler'schen Tränenfiguren nach Anlage der Tuschlinge bzw. der SAM Sling[®] am Beispiel von Patient 3 (A: vor Anlage, B: nach Anlage der SAM Sling[®])

Die nachfolgende Tabelle zeigt die durchschnittlichen Reduktionsergebnisse der einzelnen externen, nicht-invasiven Beckenstabilisatoren:

Reduktion des Abstands zw. d. Köhler'schen Tränenfiguren	Mittelwert (in cm)	Std ± (in cm)
PS1	2	1,2
PS2	2,3	1,2
TP	1,6	1,1
TS	0,9	0,8
SAM	0,9	0,6

Tab. 12: Übersicht über die Reduktionsergebnisse des Abstands zwischen den beiden Köhler'schen Tränenfiguren anhand der Mittelwerte und Standardabweichung im direkten Vergleich der getesteten Beckenstabilisatoren zu den Nativscans (PS1= pneumatische Beckenschlinge VBM[®] mit appliziertem Druck von 100mmHg; PS2= pneumatische Beckenschlinge VBM[®] mit appliziertem Druck von 200mmHg, TP= T-POD[®]; TS= Tuschlinge, SAM= SAM Sling[®]; Std= Standardabweichung)

Im direkten Vergleich des Reduktionsvermögens der Beckenstabilisatoren untereinander zeigten sich folgende Ergebnisse:

Die Reduktion des Abstands zwischen den Köhler'schen Tränenfiguren gelang der pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] erneut signifikant höher bei appliziertem Druck von 200mmHg (2,3 ± 1,2cm) als bei appliziertem Druck von 100mmHg (2 ± 1,2cm) (p < 0,001).

Der T-POD[®] ($1,6 \pm 1,1\text{cm}$) zeigte im Vergleich zur pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] mit beiden appliziertem Drücken (100mmHg: $2 \pm 1,2\text{cm}$) / 200mmHg: $2,3 \pm 1,2\text{cm}$) niedrigere Reduktionsergebnissen ($p = 0,04$ bzw. $p = 0,001$).

Die Tuchschnge ($0,9 \pm 0,8\text{cm}$) erzielte im Vergleich zur pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] (100mmHg: $2 \pm 1,2\text{cm}$) / 200mmHg: $2,3 \pm 1,2\text{cm}$) und dem T-POD[®] ($1,6 \pm 1,1\text{cm}$) signifikant niedrigere Ergebnisse bei der Reduktion des Abstands zwischen den Köhler'schen Tränenfiguren (jeweils $p < 0,001$).

Im Vergleich der SAM Sling[®] ($0,9 \pm 0,6\text{cm}$) mit den weiteren Beckenstabilisatoren zeigten sich auch hier niedrigere Reduktionsergebnisse, allerdings ohne Signifikanz (jeweils $p = 0,1$ für pneum. Beckenschlinge VBM[®] und Tuchschnge, $p = 1$ für T-POD[®]).

Die nachfolgende Tabelle fasst die Ergebnisse des Vergleichs der verschiedenen Beckenstabilisatoren untereinander in Bezug auf die Reduktion des Abstands zwischen den Köhler'schen Tränenfiguren zusammen:

Reduktion des Abstands zw. d. Köhler'schen Tränenfiguren	PS1	PS2	TP	TS	SAM
PS1	-				
PS2	$p < 0,001$	-			
TP	$p = 0,04$	$p = 0,001$	-		
TS	$p < 0,001$	$p < 0,001$	$p < 0,001$	-	
SAM					-

Tab. 13: Übersicht über die Reduktionsergebnisse des Abstands zwischen den Köhler'schen Tränenfiguren im direkten Vergleich der getesteten Beckenstabilisatoren: Es zeigten sich erneut mehrheitlich signifikante Ergebnisse. (PS1= pneumatische Beckenschlinge VBM[®] mit appliziertem Druck von 100mmHg; PS2= pneumatische Beckenschlinge VBM[®] mit appliziertem Druck von 200mmHg, TP= T-POD[®]; TS= Tuchschnge, SAM= SAM Sling[®])

3.2.6 Reduktion des ISG-Abstands

Die Reduktion des Abstands zwischen den ventralen und dorsalen Gelenkspalten des Iliosakralgelenks gelang allen getesteten externen, nicht-invasiven Beckenstabilisatoren.

Der pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] gelang bei appliziertem Druck von 100mmHg durchschnittlich eine Reduktion dieses Abstands ventral um $1,2 \pm 0,9$ cm und dorsal um $0,8 \pm 2$ cm. Bei appliziertem Druck von 200mmHg konnte dieser Beckenstabilisator eine Reduktion ventral um durchschnittliche $1,4 \pm 1$ cm sowie dorsal um $0,5 \pm 1,3$ cm erzielen.

Die Anlage des T-PODs[®] erbrachte eine Reduktion des Abstands um durchschnittliche $1,1 \pm 0,9$ cm ventral sowie $0,4 \pm 1$ cm dorsal.

Mittels Tuschlinge gelange am ISG ventral eine Reduktion um durchschnittliche $0,7 \pm 0,6$ cm, dorsal lagen die Reduktionsergebnisse bei $0,4 \pm 1$ cm.

Der SAM Sling[®] gelang eine Reduktion der Abstände ventral um durchschnittliche $0,5 \pm 0,4$ cm. Am dorsalen ISG konnte die SAM Sling[®] keine Reduktion vorweisen.

Die nachfolgende Tabelle veranschaulicht die durchschnittlichen Reduktionsergebnisse der einzelnen externen, nicht-invasiven Beckenstabilisatoren:

Reduktion des ISG-Abstands	Mittelwert (in cm) ventral	Std ± (in cm) ventral	Mittelwert (in cm) dorsal	Std ± (in cm) dorsal
PS1	1,2	0,9	0,8	2
PS2	1,4	1	0,5	1,3
TP	1,1	0,9	0,36	1
TS	0,7	0,6	0,4	1
SAM	0,5	0,4	-	-

Tab. 14: Übersicht über die Reduktionsergebnisse bezüglich des ventralen sowie dorsalen ISG-Abstands anhand der Mittelwerte und Standardabweichung im direkten Vergleich der getesteten Beckenstabilisatoren zu den Nativscans (PS1= pneumatische Beckenschlinge VBM[®] mit appliziertem Druck von 100mmHg; PS2= pneumatische Beckenschlinge VBM[®] mit appliziertem Druck von 200mmHg, TP= T-POD[®]; TS= Tuschlinge, SAM= SAM Sling[®]; Std= Standardabweichung)

Der Vergleich des Reduktionsvermögens der Beckenstabilisatoren untereinander bezüglich der Reduktion des ventralen ISG-Abstands erbrachte folgende Ergebnisse:

Die Reduktion mittels der pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] erbrachte erneut signifikant höhere Ergebnisse bei appliziertem Druck von 200mmHg (1,4 ± 1cm) als bei appliziertem Druck von 100mmHg (1,2 ± 0,9cm) (p <0,001).

Dem T-POD[®] (1,1 ± 0,9cm) gelangen im Vergleich zur pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] mit applizierten 100mmHg (1,2 ± 0,9cm) vergleichbare Ergebnisse (p =0,6). Bei Erhöhung des Drucks auf 200mmHg (1,4 ± 1cm) erzielte der T-POD[®] (1,1 ± 0,9cm) jedoch signifikant schlechtere Reduktionsergebnisse (p =0,049).

Die Tuschschlinge (0,7 ± 0,6cm) erzielte im Vergleich zur pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] (100mmHg: 1,2 ± 0,9cm / 200mmHg: 1,4 ± 1cm) und dem T-POD[®] (1,1 ± 0,9cm) signifikant niedrigere Reduktionsergebnisse (jeweils p <0,001).

Im Vergleich der SAM Sling[®] (0,5 ± 0,4cm) mit den weiteren Beckenstabilisatoren zeigten sich auch hier niedrigere Reduktionsergebnisse, allerdings ohne Signifikanz (p =0,6 für pneum. Beckenschlinge VBM[®] mit 100mmHg, jeweils p =0,1 für pneum. Beckenschlinge VBM[®] mit 200mmHg und Tuschschlinge, p =0,3 für T-POD[®]).

Die nachfolgende Tabelle fasst die Ergebnisse des Vergleichs der verschiedenen Beckenstabilisatoren untereinander in Bezug auf die Reduktion des ventralen ISG-Abstands zusammen:

Reduktion des ventralen ISG-Abstands	PS1	PS2	TP	TS	SAM
PS1	-				
PS2	p <0,001	-			
TP		p =0,049	-		
TS	p <0,001	p <0,001	p <0,001	-	
SAM					-

Tab. 15: Übersicht über die Reduktionsergebnisse des ventralen Abstands zwischen den beiden IS-Gelenken im direkten Vergleich der getesteten Beckenstabilisatoren: Es zeigten sich erneut mehrheitlich signifikante Ergebnisse. (PS1= pneumatische Beckenschlinge VBM[®] mit appliziertem Druck von 100mmHg; PS2= pneumatische Beckenschlinge VBM[®] mit appliziertem Druck von 200mmHg, TP= T-POD[®]; TS= Tuschschlinge, SAM= SAM Sling[®])

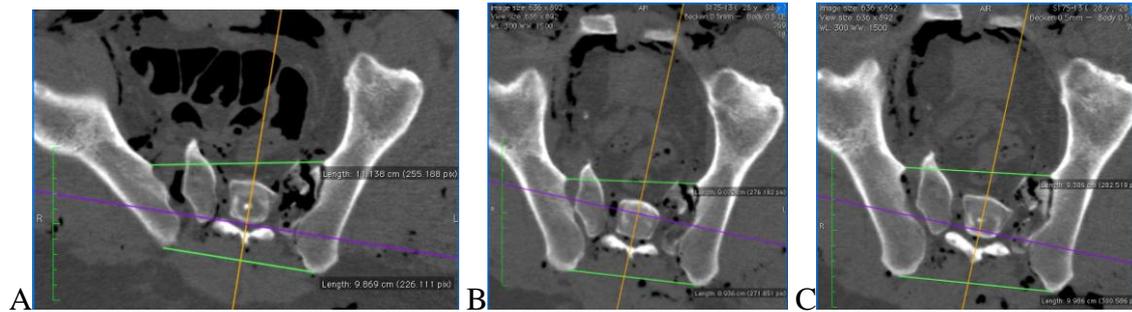


Abb. 48: Reduktion der Abstände zwischen den beiden ISG sowohl ventral als auch dorsal am Beispiel von Patient 23 (A: unmittelbar vor Anlage der pneumatischen Schlinge VBM®; B: nach Anlage mit einem Druck von 100mmHg; C: nach Anlage mit einem Druck von 200mmHg)

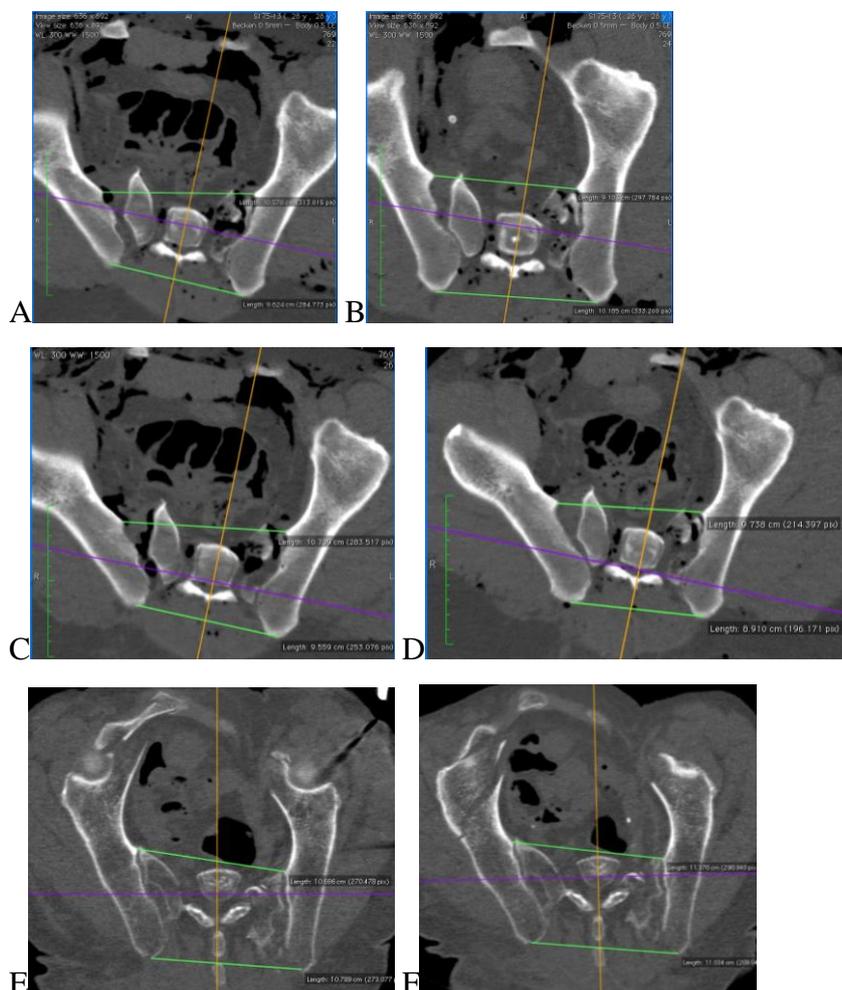


Abb. 49: Reduktion der Abstände zwischen den beiden ISG sowohl ventral als auch dorsal am Beispiel von Patient 23 (A: vor Anlage des T-POD®; B: nach Anlage des T-POD®; C: vor Anlage der Tuchsling®; D: nach Anlage der Tuchsling®; E: vor Anlage der SAM Sling®; F: nach Anlage der SAM Sling®)

Der Vergleich der Reduktion des dorsalen ISG-Abstands der Beckenstabilisatoren untereinander zeigte keine signifikanten Unterschiede.

Im Bereich des dorsalen Abstands zwischen den beiden IS-Gelenken erzielte die pneumatische Beckenschlinge VBM[®] beim höheren, applizierten Druck höhere Reduktionsergebnisse (100mmHg: $0,8 \pm 2\text{cm}$ / 200mmHg: $0,5 \pm 1,3\text{cm}$) – der Unterschied zeigte sich jedoch ohne Signifikanz ($p = 0,9$).

Die Reduktionsergebnisse des T-POD[®] ($0,4 \pm 1\text{cm}$) im Vergleich zur pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] (100mmHg: $0,8 \pm 2\text{cm}$ / 200mmHg: $0,5 \pm 1,3\text{cm}$) zeigten keine signifikanten Unterschiede ($p = 0,3$ für 100mmHg und $p = 0,4$ für 200mmHg).

Die Tuschlinge ($0,4 \pm 1\text{cm}$) erzielte im Vergleich zur pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] mit appliziertem Druck von 100mmHg ($0,8 \pm 2\text{cm}$) niedrigere Reduktionsergebnisse – diese zeigten sich jedoch ohne Signifikanz ($p = 0,1$). Ebenso fiel der Vergleich der Reduktionsergebnisse zur pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] mit appliziertem Druck von 200mmHg ($0,5 \pm 1,3\text{cm}$) sowie dem T-POD[®] ($0,4 \pm 1\text{cm}$) ohne signifikante Unterschiede aus ($p = 0,4$ bzw. $p = 0,7$).

3.3 Biomechanische Kraftmessung der wirkenden Zugkräfte nach Beckenstabilisatorenanlage

Zur weiteren Analyse signifikanter Unterschiede in den Reduktionsergebnissen der nicht-invasiven Beckenstabilisatoren führten wir zur Analyse der wirkenden Zugkräfte im Anschluss bei weiteren fünf Patienten eine Messung der wirkenden Zugkräfte am jeweiligen Beckenstabilisator durch. Um diese Messungen durchführen zu können, wurde ein Newtonmeter in die Beckenstabilisatoren eingebaut (siehe 2.2.5).

3.3.1 Pneumatische Beckenschlinge VBM®

Die Messergebnisse der wirkenden Kräfte an den Zugfedern nach Anlage der pneumatischen Schlinge VBM® mit einem Druck von 100mmHg sind in der folgenden Tabelle dargestellt:

VBM® 100	Spitzenzugkraft Fmax [N]	t1 [N]	t2 [N]	t3 [N]
Pat 31	64	42	36,8	33,9
Pat 32	96,2	74,1	66,2	61,7
Pat 33	25,9	18,1	14,7	12,7
Pat 34	69	48,7	43,1	40,2
Pat 35	112,1	91,4	86,2	83,3
Mittelwerte	73,44	54,86	49,4	46,36
Std	33,1	28,6	27,6	33,1

Tab. 16: Ergebnisse der Kraftmessungen an fünf Patienten mit instabilem Becken und angelegter pneumatischer Beckenschlinge VBM® mit einem Druck von 100mmHg zu den definierten Zeitpunkten (Fmax=Maximalkraft; t1=45sec n. Anlage; t2=80sec n. Anlage; t3=120sec n. Anlage; Std= Standardabweichung)

Die Messung zu den drei verschiedenen Zeitpunkten wurde durchgeführt, um einen eventuellen Kraftverlust der Stabilisatoren über die Zeit analysieren und vergleichen zu können. Ebenso ließ sich über die Untersuchung der Spitzenzugkraft in Kombination mit den wirkenden Kräften im zeitlichen Verlauf Vergleiche zur mechanischen Manipulation am frakturierten Becken ziehen.

Die durchschnittlich erzielte Spitzenzugkraft lag bei $73,4 \pm 33,1\text{N}$ (Range: 26-112N).

Im zeitlichen Verlauf zeigte sich, dass die initial erzielten Zugkräfte rasch abnahmen: Bereits 45 Sekunden nach Anlage befanden sich die wirkenden Zugkräfte durchschnittlich bei $54,9 \pm 28,6\text{N}$ (Range: 18-91N), nach 80 Sekunden durchschnittlich bei $49,4 \pm 27,6\text{N}$ (Range: 15-86N) sowie nach 120 Sekunden durchschnittlich bei $46,4 \pm 33,1\text{N}$ (Range: 13-83N).

Kinetik der Zugkräfte bei PS100

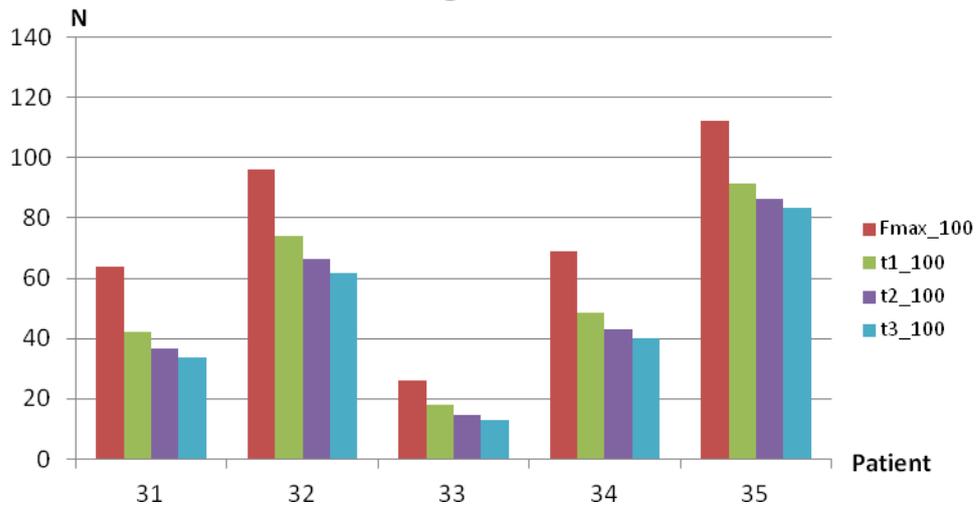


Abb. 50: Übersicht über die erzielten Ergebnisse der Kraftmessungen an fünf Patienten mit instabilem Becken und angelegter pneumatischer Beckenschlinge VBM[®] mit einem Druck von 100mmHg zu den definierten Zeitpunkten (Fmax=Maximalkraft; t1=45sec n. Anlage; t2=80sec n. Anlage; t3=120sec n. Anlage)

Das Messequipment zeichnete die wirkenden Kräfte alle 0,02 Sekunden auf, sodass insgesamt zu 9140 Zeitpunkten Werte erhoben und dokumentiert wurden. Diese Werte wurden graphisch als Kurve dargestellt. Im Folgenden sind die Graphen der Patienten 31 bis 35 nach Anlage pneumatischen Schlinge VBM[®] mit appliziertem Druck von 100mmHg dargestellt:

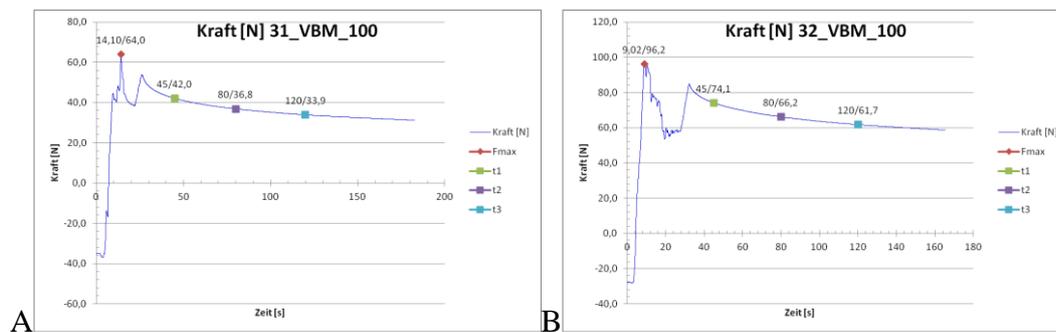


Abb. 51: Graphische Darstellung der Messergebnisse zu den wirkenden Zugkräften nach Anlage der pneumatischen Schlinge VBM[®] an zwei von fünf Patienten (A,B) mit einem Druck von 100mmHg

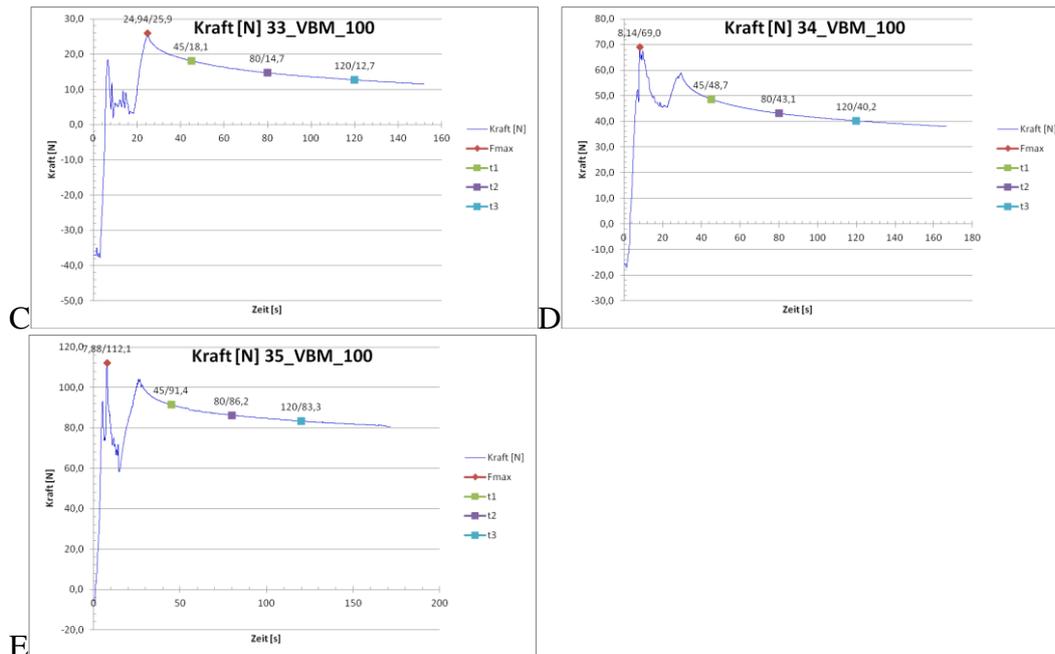


Abb. 52: Fortsetzung: Graphische Darstellung der Messergebnisse zu den wirkenden Zugkräften nach Anlage der pneumatischen Schlinge VBM[®] an den weiteren drei der fünf Patienten (C-E) mit einem Druck von 100mmHg

Die Ergebnisse der Messungen mit angelegter pneumatischer Schlinge VBM[®] bei einem nun höheren, pneumatischen Druck von 200mmHg sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst:

VBM [®] 200	Spitzenzugkraft Fmax [N]	t1 [N]	t2 [N]	t3 [N]
Pat 31	66,9	54	50,4	48,3
Pat 32	105,9	90,8	87,1	84,4
Pat 33	36,8	30,2	28,5	27,2
Pat 34	65,1	51,2	46,8	44,2
Pat 35	132,6	118,6	114,7	112,1
Mittelwerte	81,46	68,96	65,5	63,24
Std	37,71	35,29	34,76	34,35

Tab. 17: Ergebnisse der Kraftmessungen an fünf Patienten mit instabilem Becken und angelegter pneumatischer Beckenschlinge VBM[®] mit einem Druck von 200mmHg zu den definierten Zeitpunkten (Fmax=Maximalkraft; t1=45sec n. Anlage; t2=80sec n. Anlage; t3=120sec n. Anlage; Std= Standardabweichung)

Die durchschnittlich erzielte Spitzenzugkraft lag bei $81,5 \pm 37,7\text{N}$ (Range: 37-133N).

Die Kinetik zeigte, dass die initial erzielten Zugkräfte rasch abnahmen: Bereits 45 Sekunden nach Anlage befanden sich die wirkenden Zugkräfte durchschnittlich bei $69 \pm 35,3\text{N}$ (Range: 30-119N), nach 80 Sekunden durchschnittlich bei $65,5 \pm 34,8\text{N}$ (Range: 29-115N) sowie nach 120 Sekunden durchschnittlich bei $63,2 \pm 34,4\text{N}$ (Range: 27-112N).

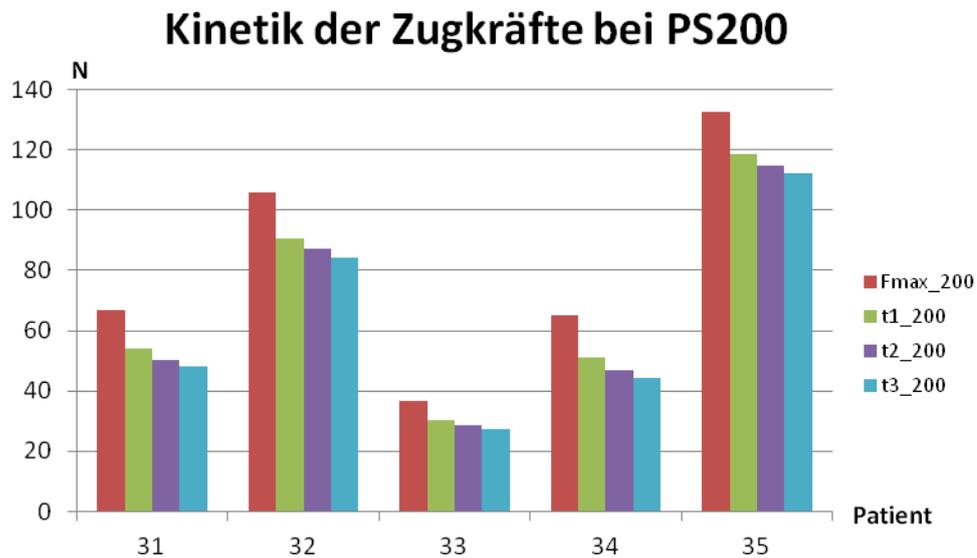


Abb. 53: Übersicht über die erzielten Ergebnisse der Kraftmessungen an fünf Patienten mit instabilem Becken und angelegter pneumatischer Beckenschlinge VBM[®] mit einem Druck von 200mmHg zu den definierten Zeitpunkten (Fmax=Maximalkraft; t1=45sec n. Anlage; t2=80sec n. Anlage; t3=120sec n. Anlage)

Das Messequipment zeichnete die wirkenden Kräfte alle 0,02 Sekunden auf, sodass insgesamt zu 9140 Zeitpunkten Werte erhoben und dokumentiert wurden. Diese Werte wurden graphisch als Kurve dargestellt. Im Folgenden sind die Graphen der Patienten 31 bis 35 nach Anlage pneumatischen Schlinge VBM[®] mit appliziertem Druck von 200mmHg dargestellt:

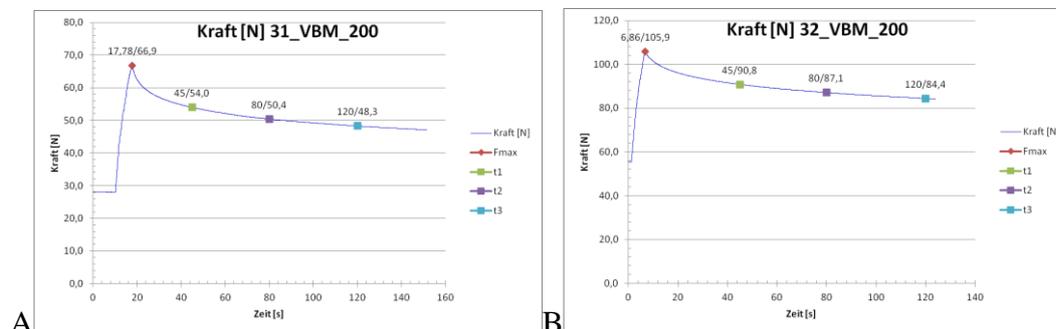


Abb. 54: Graphische Darstellung der Messergebnisse zu den wirkenden Zugkräften nach Anlage der pneumatischen Schlinge VBM[®] an zwei von fünf Patienten (A,B) mit einem Druck von 200mmHg

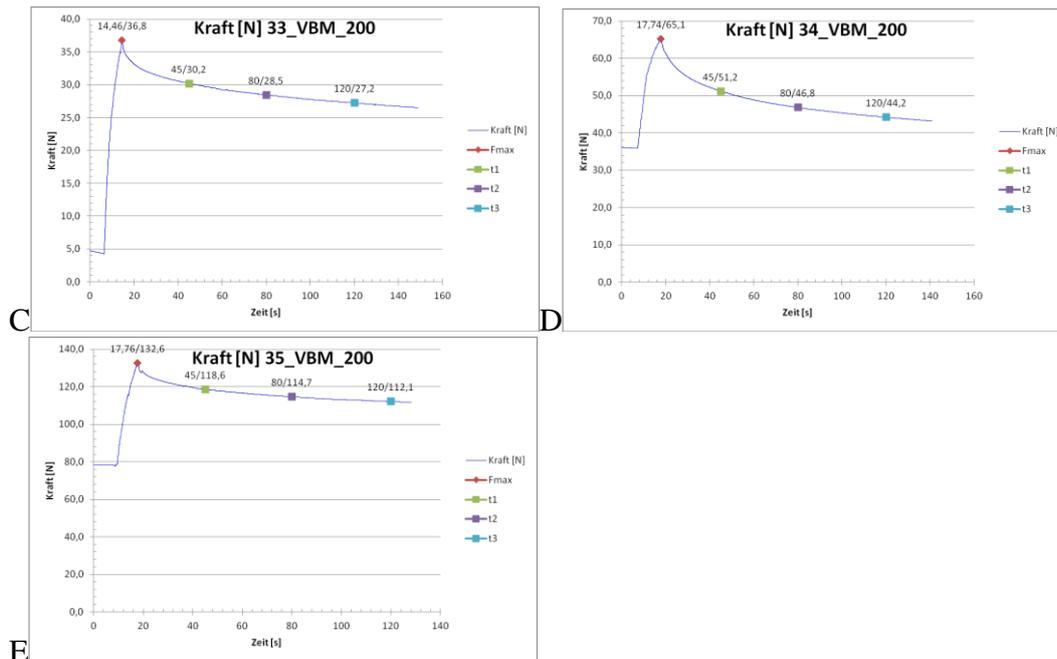


Abb. 55: Fortsetzung: Graphische Darstellung der Messergebnisse zu den wirkenden Zugkräften nach Anlage der pneumatischen Schlinge VBM[®] mit 200mmHg an den weiteren drei der fünf Patienten (C-E)

Die folgende Abbildung vergleicht die dargestellten Ergebnisse der beiden applizierten Drücke: Abgebildet sind die Kraftmaxima und erzielten Kräfte der pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] sowohl mit anlegten 100 als auch 200mmHg an allen fünf Patienten:

Kinetik der Zugkräfte PS100 vs. PS200

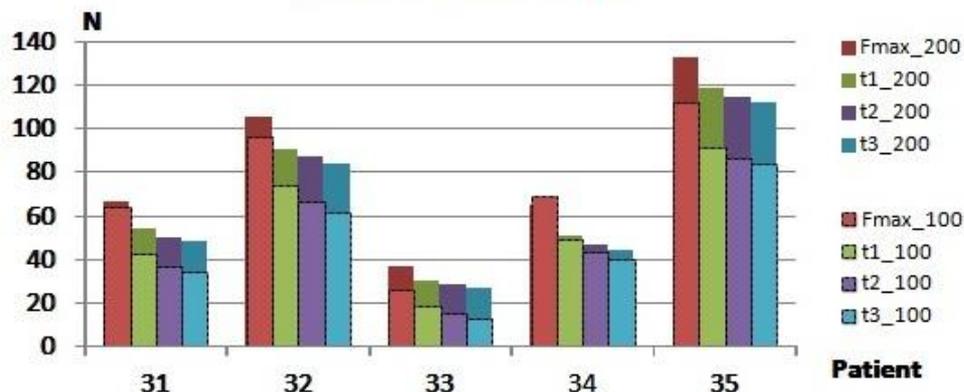


Abb. 56: Übersicht über die erzielten Ergebnisse der Kraftmessungen an fünf Patienten mit instabilem Becken und angelegter pneumatischer Beckenschlinge VBM[®] mit einem Druck von 100/200mmHg zu den definierten Zeitpunkten (Fmax=Maximalkraft; t1=45sec n. Anlage; t2=80sec n. Anlage; t3=120sec n. Anlage): In der helleren Farbgebung im Vordergrund abgebildet sind die erzielten Kräfte bei Applikation eines Drucks von 100mmHg, in der dunkleren Farbgebung im Hintergrund diejenigen bei Applikation von 200mmHg

Nachfolgende Tabelle veranschaulicht die durchschnittlich erzielten Zugkräfte im Vergleich der beiden applizierten Drücke (100mmHg vs. 200mmHg) anhand der Mittelwerte von fünf Patienten:

	Mittelwerte PS1	Mittelwerte PS2
Fmax [N]	73,4	81,5
t1 [N]	54,9	69
t2 [N]	49,4	65,5
t3 [N]	46,4	63,2

Tab. 18: Übersicht über die Mittelwerte der gemessenen Zugkräfte bei angelegter pneumatischer Schlinge VBM[®] mit den beiden unterschiedlichen Drücken zu den definierten Zeitpunkten (F_max=Maximalkraft; t1=45sec n. Anlage; t2=80sec n. Anlage; t3=120sec n. Anlage; PS1= pneumatische Beckenschlinge VBM[®] mit appliziertem Druck von 100mmHg; PS2= pneumatische Beckenschlinge VBM[®] mit appliziertem Druck von 200mmHg): Bei appliziertem Druck von 200mmHg konnten durchweg höhere Zugkräfte gemessen werden.

3.3.2 T-POD[®]

Nachfolgende Tabelle zeigt die Messergebnisse der Zugkraftmessungen nach Anlage des T-PODs[®]:

T-POD[®]	Spitzenzug- kraft Fmax [N]	t1 [N]	t2 [N]	t3 [N]
Pat 31	148	105,6	100,3	97,1
Pat 32	149,3	57,2	53,5	50,9
Pat 33	68,3	-7,8	-8	-8,2
Pat 34	67,7	13,8	13,6	13,1
Pat 35	116	50	48,5	47,6
Mittelwerte	109,86	43,76	41,58	40,1
Std	40,47	43,59	41,47	40,26

Tab. 19: Ergebnisse der Kraftmessungen an fünf Patienten mit instabilem Becken und angelegtem T-POD[®] zu den definierten Zeitpunkten (Fmax=Maximalkraft; t1=45sec n. Anlage; t2=80sec n. Anlage; t3=120sec n. Anlage; Std= Standardabweichung)

Auch die Spitzenzugkraft, die der T-POD[®] erzielen konnte, wurde unmittelbar nach Anlage erreicht. Sie lag bei $109,9 \pm 40,5\text{N}$ (Range: 68-149N).

Analog zu den bisher getesteten Stabilisatoren zeigte sich auch hier eine rasche Abnahme der initial erreichten Maximalkraft: Im Gegensatz zur pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] kam es bereits nach 45 Sekunden bei einer Messung zu Negativwerten: Bei durchschnittlich erzielten $43,8 \pm 43,6\text{N}$ zeigte sich ein Range von -8 bis 106N. Bei 80 Sekunden zeigten sich durchschnittliche Kraftwerte von $41,6 \pm 41,5\text{N}$ (Range: -8-100N) und bei 120 Sekunden durchschnittlich $40,1 \pm 40,3\text{N}$ (Range -8-97N).

Das Messequipment zeichnete die wirkenden Kräfte alle 0,02 Sekunden auf, sodass insgesamt zu 9140 Zeitpunkten Werte erhoben und dokumentiert wurden. Diese Werte wurden graphisch als Kurve dargestellt. Im Folgenden sind die Graphen der Patienten 31 bis 35 nach Anlage des T-POD[®] abgebildet:

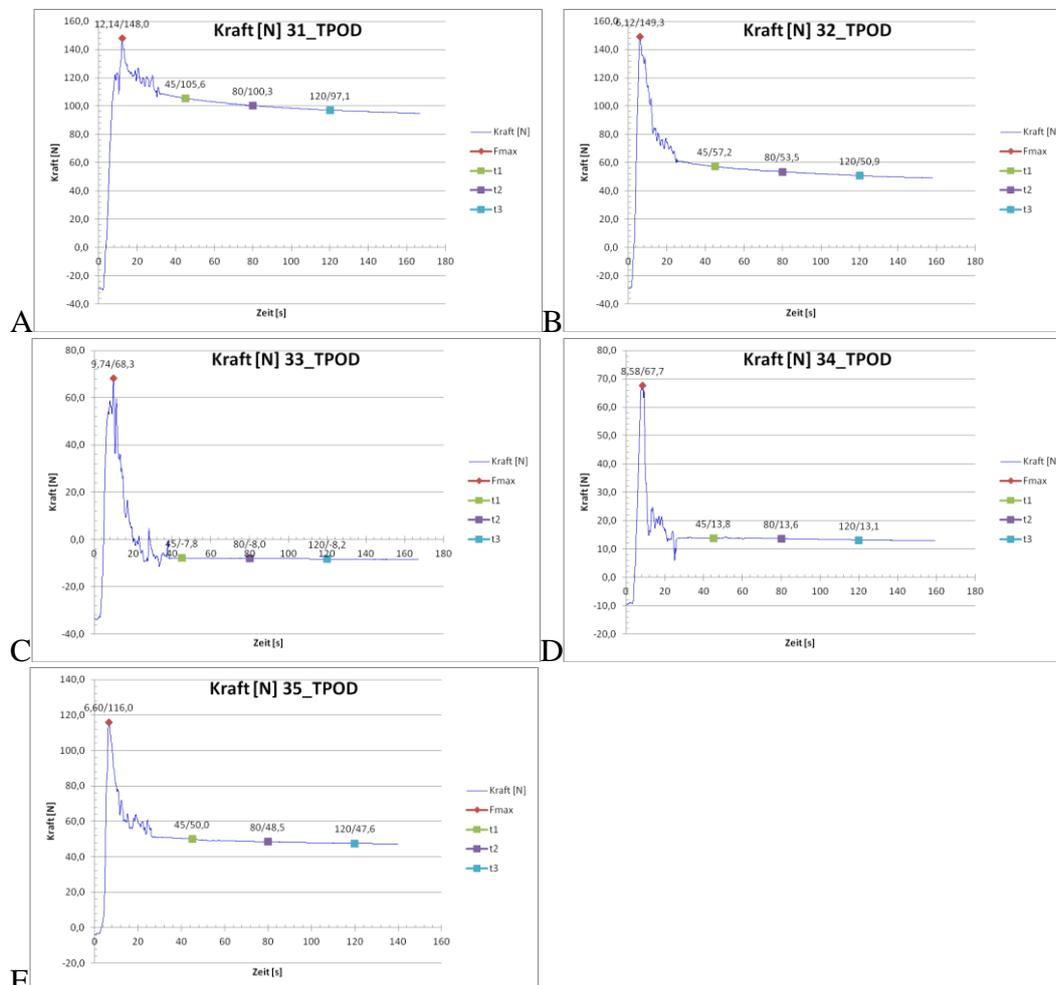


Abb. 57: Graphische Darstellung der Messergebnisse zu den wirkenden Zugkräften nach Anlage des T-POD[®] an fünf Patienten (A-E)

3.3.3 Tuschlinge

Die Messergebnisse der wirkenden Zugkräfte an den Zugfedern nach Anlage einer herkömmlichen Tuschlinge sind in der folgenden Tabelle dargestellt:

Tuschlinge	Spitzenzug- kraft Fmax [N]	t1 [N]	t2 [N]	t3 [N]
Pat 31	89,4	-13,7	-13,4	-13,4
Pat 32	226,4	-3,8	-2	-1,5
Pat 33	29,9	-19	-19,1	-19,7
Pat 34	90,4	-4,5	-4,6	-4,8
Pat 35	90	19,1	19,3	19,2
Mittelwerte	105,22	-4,38	-3,96	-4,04
Std	72,56	14,6	14,7	14,83

Tab. 20: Ergebnisse der Kraftmessungen an fünf Patienten mit instabilem Becken und angelegter Tuschlinge zu den definierten Zeitpunkten (Fmax=Maximalkraft; t1=45sec n. Anlage; t2=80sec n. Anlage; t3=120sec n. Anlage; Std=Standardabweichung)

Die Spitzenzugkraft der Tuschlinge befand sich durchschnittlich bei $105,2 \pm 72,6\text{N}$ (Range: 30-226N).

Analog zur pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] und dem T-POD[®] verlor auch die Tuschlinge im zeitlichen Verlauf zügig an Zugkraft, sodass es mehrfach sogar zu Negativwerten kam. Die ermittelten Werte lagen nach 45 Sekunden durchschnittlich bei $-4,4 \pm 14,6\text{N}$ (Range: -19-19N), nach 80 Sekunden bei $-4 \pm 14,7\text{N}$ (Range -19-19N) sowie nach 120 Sekunden bei $-4 \pm 14,8\text{N}$ (Range -20-19N).

Auffällig war, dass es zwar zu einer raschen Reduktion der Zugkraft nach Anlage der Tuschlinge kam, die weiteren, im zeitlichen Verlauf ermittelten Messwerte jedoch relativ stabil blieben.

Analog zu den vorherigen Messungen wurden auch nach Anlage der Tuschlinge zu 9140 Zeitpunkten Werte erhoben und dokumentiert. Diese Werte wurden graphisch als Kurve dargestellt. Im Folgenden sind die Graphen der Patienten 31 bis 35 nach Anlage der Tuschlinge abgebildet:

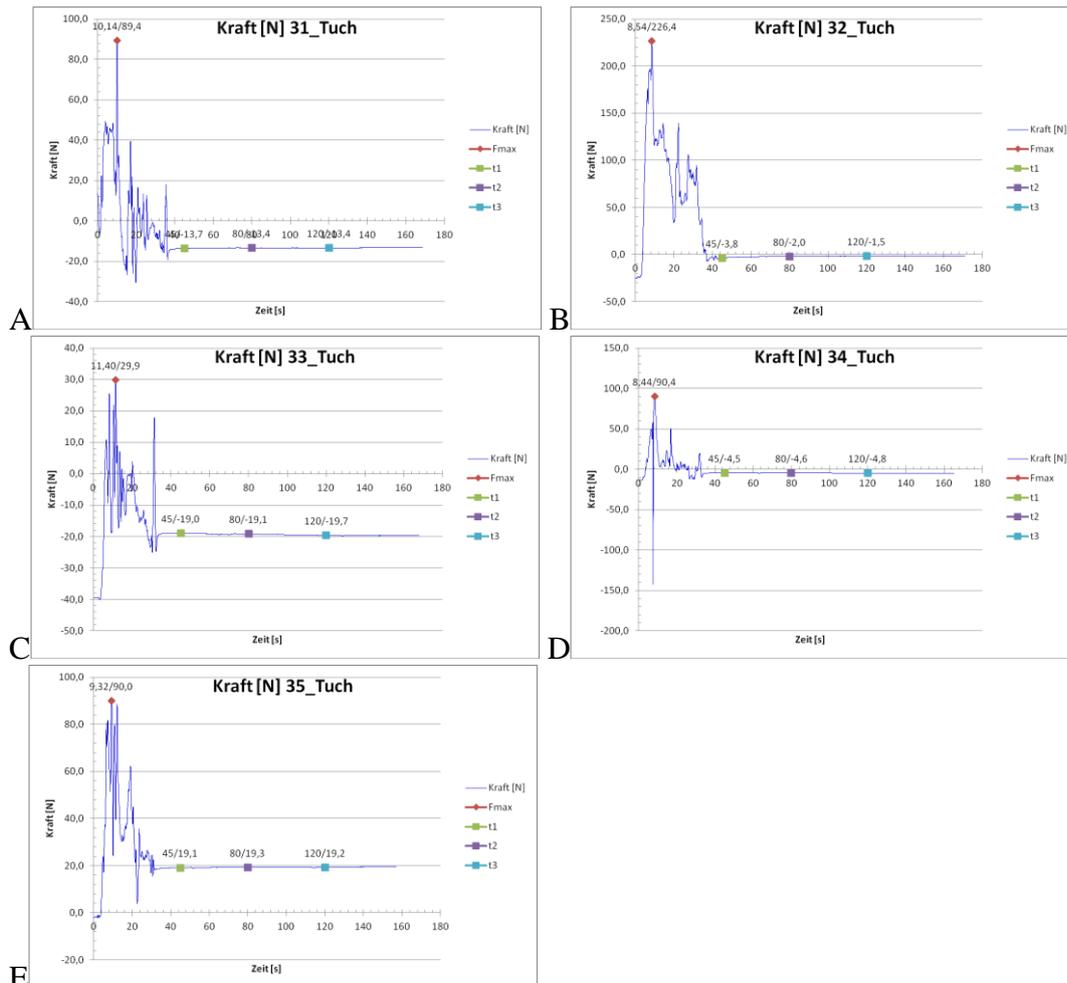


Abb. 58: Graphische Darstellung der Messergebnisse zu den wirkenden Zugkräften nach Anlage der Tuchslinge an fünf Patienten (A-E)

3.3.4 SAM Sling®

Die biomechanischen Kraftmessungen an den Zugfedern der angelegten SAM Sling® erbrachten folgende Ergebnisse:

SAM Sling®	Spitzenzugkraft Fmax [N]	t1 [N]	t2 [N]	t3 [N]
Pat 31	105,7	28,8	27,2	26,6
Pat 32	217,3	70,9	68,7	68,7
Pat 33	84,5	4,9	3,3	2,2
Pat 34	67,6	13,6	12,1	11
Pat 35	186,6	34,7	33,7	33
Mittelwerte	132,22	30,58	29	27,9
Std	66,01	25,46	25,24	24,9

Tab. 21: Ergebnisse der Kraftmessungen an fünf Patienten mit instabilem Becken und angelegter SAM Sling® zu den definierten Zeitpunkten (Fmax=Maximalkraft; t1=45sec n. Anlage; t2=80sec n. Anlage; t3=120sec n. Anlage; Std=Standardabweichung)

Die SAM Sling® konnte beeindruckende Spitzenzugkräfte erreichen, diese zeigten sich – analog der anderen, getesteten Beckenstabilisatoren – kurz nach Anlage. Die Werte lagen durchschnittlich bei $132,2 \pm 66\text{N}$ (Range: 68-217N).

Im Gegensatz dazu erfolgte die bereits mehrfach erfahrene rasche Abnahme der wirkenden Zugkräfte überproportional stark: Bereits nach 45 Sekunden waren durchschnittliche $30,6 \pm 25,5\text{N}$ (Range: 5-71N) zu dokumentieren. Nach 80 Sekunden lagen die Mittelwerte bei $29 \pm 25,2\text{N}$ (Range 3-69N) sowie nach 120 Sekunden bei $27,9 \pm 24,9\text{N}$ (Range: 2-67 N).

Analog zu den vorherigen Messungen wurden auch nach Anlage der SAM Sling® zu 9140 Zeitpunkten Werte erhoben und dokumentiert. Diese Werte wurden graphisch als Kurve dargestellt. Im Folgenden sind die Graphen der Patienten 31 bis 35 nach Anlage abgebildet.

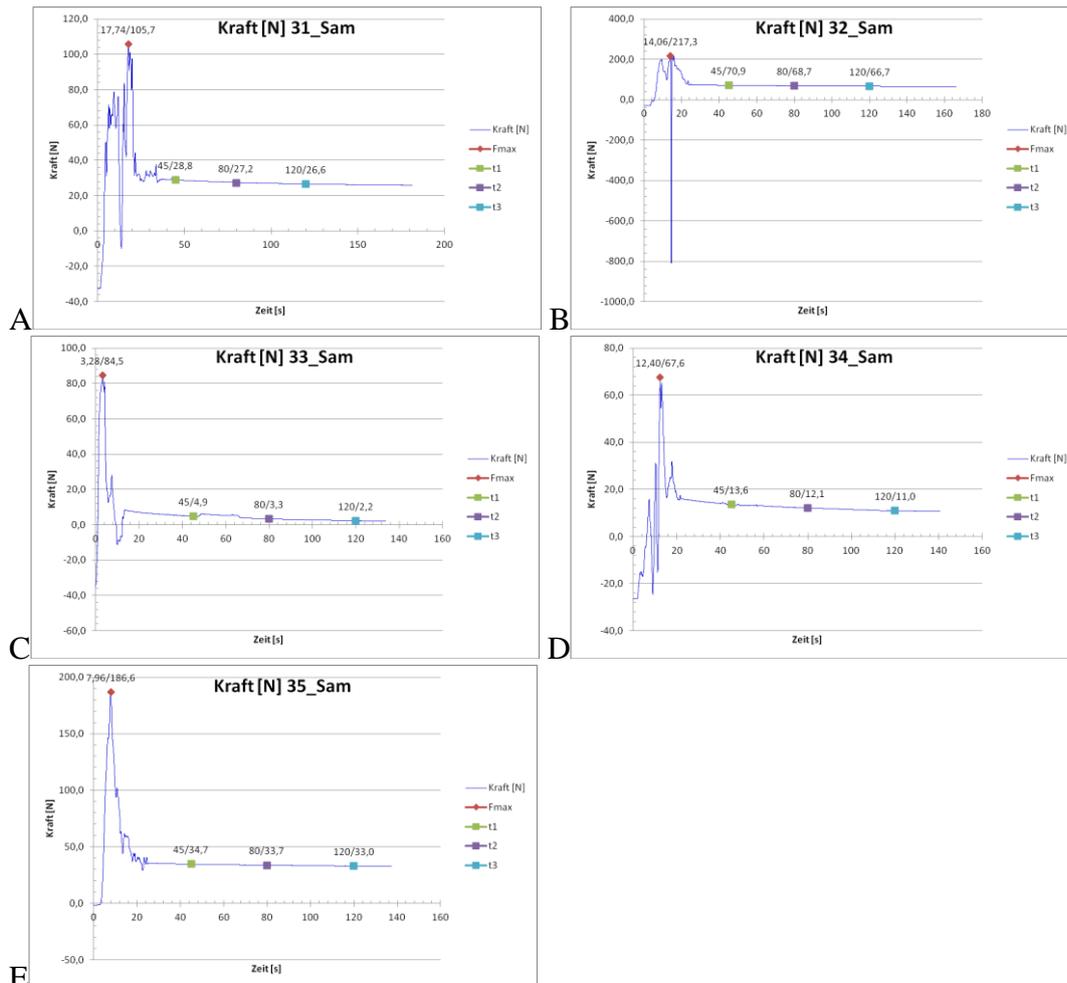


Abb. 59: Graphische Darstellung der Messergebnisse zu den wirkenden Zugkräften nach Anlage der Tuschlinge an fünf Patienten (A-E)

3.3.5 Mittelwerte aller Beckenschlingen im Vergleich

Die nachfolgende Tabelle stellt die Mittelwerte der wirkenden Zugkräfte für jede der vier verwendeten Beckenschlingen dar:

	PS1	PS2	TP	TS	SAM
Fmax [N]	73,4	81,5	109,9	105,2	132,3
t1 [N]	54,9	69	43,8	-4,4	30,6
t2 [N]	49,4	65,5	41,6	-4	29
t3 [N]	46,4	63,2	40,1	-4	27,9

Tab. 22: Mittelwerte der wirkenden Zugkräfte der fünf Messungen mit den jeweils vier Beckenschlingen (PS1= pneumatische Schlinge VBM[®] mit Druck von 100mmHg, PS2= pneumatische Schlinge VBM[®] mit Druck von 200mmHg; TP= T-POD[®]; TS= Tuschlinge; SAM= SAM Sling[®]) zu den definierten Zeitpunkten (Fmax=Maximalkraft; t1=45sec n. Anlage; t2=80sec n. Anlage; t3=120sec n. Anlage)

Ersichtlich ist, dass nach Anlage der SAM Sling® durchschnittlich die höchste Maximalzugkraft erreicht werden konnte, diese im Verlauf jedoch überproportional stark abnahm.

Die Eigenschaft, die höchste Spitzenkraft unmittelbar nach Anlage zu erreichen, hatten alle vier Beckenstabilisatoren gemeinsam. Genauso nahmen die gemessenen Zugkräfte im zeitlichen Verlauf bei allen externen, nicht-invasiven Beckenstabilisatoren rasch ab. Dies zeigte sich am deutlichsten bei der Tuchschnur und der SAM Sling®. Die pneumatische Beckenschlinge VBM® konnte bei einem applizierten Druck von 200mmHg den geringsten Zugkraftverlust über den zeitlichen Verlauf nachweisen.

Kinetik der Beckenstabilisatoren

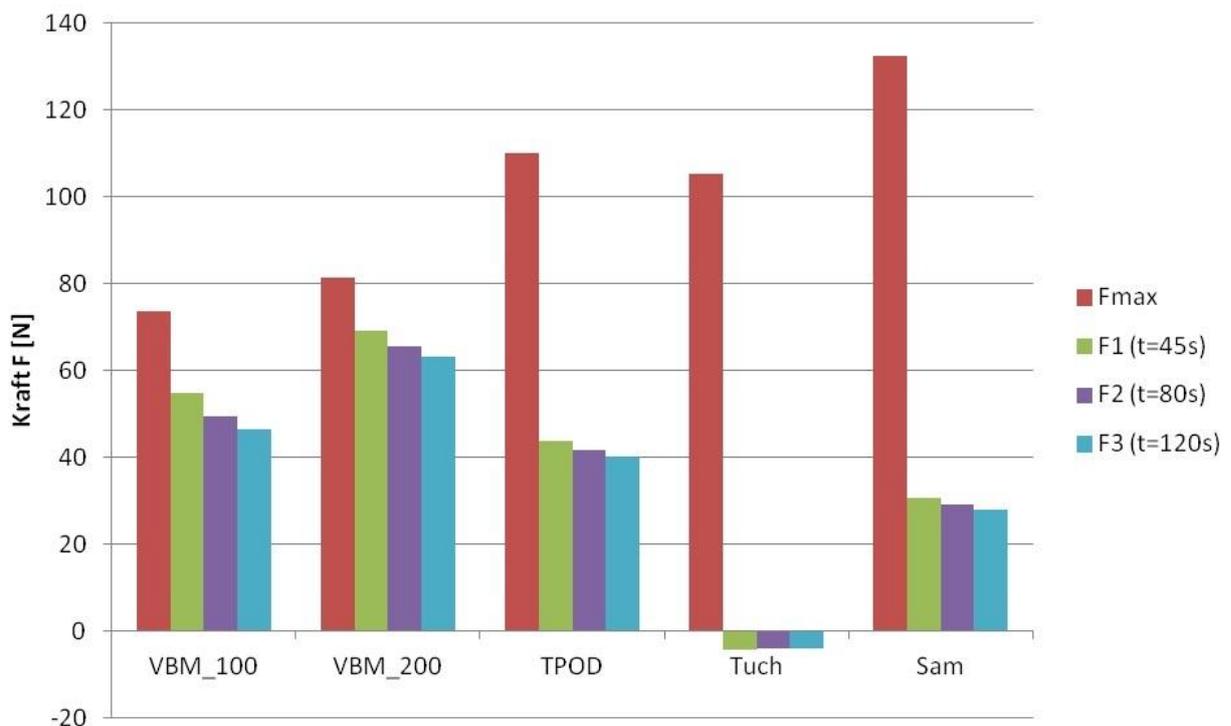


Abb. 60: Erreichte Kraftmaxima und Mittelwerte zu den verschiedenen, vordefinierten Zeitpunkten nach Anlage der jeweiligen Beckenschlinge: Deutlich wird, dass die SAM Sling® die höchsten Spitzenzugkräfte erreichen konnte, diese aber rapide und überproportional stark abfielen. Die konstanteste Zugkraft aller Beckenschlingen zu den untersuchten Zeitpunkten konnte die pneumatische Beckenschlinge VBM® mit appliziertem Druck von 200mmHg nachweisen

4. Diskussion

Die vorliegende Arbeit quantifiziert unser Kenntnis nach erstmalig die Effekte nicht-invasiver externer Beckenstabilisatoren auf die knöchernen Strukturen nicht-artifizieller Beckenringverletzungen und verifiziert wirkende Zugkräfte. Weiterhin erfolgt die epidemiologische Analyse von Begleitverletzungen und Obduktionsergebnissen.

4.1 Charakteristika der Studienpopulation und der Archivfälle

4.1.1 Alter und Geschlecht

Die Ergebnisse dieser Studie bezüglich Alter und Geschlecht decken sich weitestgehend mit den Angaben in der internationalen Literatur: Der überwiegende Teil unseres Kollektivs war männlichen Geschlechts (67%). In internationalen Studienkollektiven ist der polytraumatisierte Patient in ca. 70% der Fälle männlich und im durchschnittlichen Alter von 38 bis 47 Jahren (5,8,24,30,84–87). Das mit 49 Jahren in unserem Kollektiv leicht erhöhte Durchschnittsalter lässt sich als Hinweis auf eine allmählich alternde Gesellschaft interpretieren: Es ist mit einer in Zukunft steigenden Tendenz polytraumatisierter Patienten auch fortgeschrittenen Lebensalters zu rechnen. Etwaige Komorbiditäten dieses Patientenguts werden erwartungsgemäß großen Einfluss auf die präklinische und klinische Versorgung nehmen. Laut Jahresbericht des Traumaregisters der DGU[®] waren 2012 ebenfalls 70% der Patienten männlichen Geschlechts mit einem durchschnittlichen Alter von 48 Jahren (85).

Somit zeigen sich unsere Ergebnisse weitestgehend deckungsgleich zu den nationalen und internationalen Angaben. Damit sind sie nicht nur repräsentativ für Deutschland, sondern auch weltweit – zumindest für Industrienationen.

4.1.2 Unfallmechanismus

Wie bereits in der internationalen Literatur beschrieben, ist für eine instabile Beckenverletzung typischerweise ein Hochrasanztrauma ursächlich (41,88). Die hierbei benötigten Kräfte sind enorm: Es werden zwischen 2000 und 10000 Newton benötigt, um den Beckenring zu frakturieren (89). Der Zusammenhang zwischen Kräftewirkung, Vektorenrichtung und resultierender Beckenverletzung ist mehrfach untersucht worden (29,76). Es ist bekannt, dass z.B. anterior-posterior gerichtete Kräftevektoren zu einem typischen Verletzungsmuster im Beckenbereich führen: Durch eine kurzzeitige, nach außen gerichtete Rotation des Hemipelvis kommt es zu Verletzungen von Symphyse und/oder Rami ossis pubis (z.B. Open Book-Fraktur) (29).

Bei einem Sturz aus großer Höhe können die einwirkenden Scherkräfte abhängig von ihrer Vektorenrichtung eine komplette Instabilität des Beckenrings durch Zerreißung aller Bänderstrukturen sowie zusätzliche Verletzung einzelner knöcherner Anteile des Beckenrings verursachen (29). Dies wäre klassischerweise beim Aufkommen mit den Füßen voran zu erwarten, resultierend in einer Kettenverletzung von den Füßen über das Azetabulum, Becken und die Wirbelsäule.

In unserem Kollektiv zeigten sich Großstadt-spezifische Traumamechanismen mit überwiegend Stürzen aus großer Höhe (64%), gefolgt von Zug-berrolltraumen (23%) und Verkehrsunfällen (13%).

Damit übersteigen unsere Ergebnisse bezüglich Stürzen aus mehr als 3m Höhe deutlich die Angaben der internationalen Literatur zu den todesurschlichen Unfallmechanismen von Traumapatienten: Die Daten der letzten Jahre zeigen, dass Hhenstrze durchschnittlich für 20-25% der Todesfälle von Traumapatienten verantwortlich sind (8,90–92).

Verkehrsunfälle, zu denen berrolltraumen durch Züge häufig hinzugezählt wurden, zeigen sich mit bis zu 72% vor allem in ländlichen bzw. im Vergleich zur mitteleuropäischen Großstadt weniger dicht besiedelten Gebieten häufiger todesursächlich (87,91–94). Auch in amerikanischen Großstädten zeigen sie sich häufiger todesursächlich als Hhenstrze (95).

Parreira et al. bestätigten diese für allgemeine Traumapatienten gültigen todesurschlichen Unfallmechanismen ebenfalls für ein Studienkollektiv von 103 Patienten mit instabilen Beckenverletzungen: So zeigten sich auch hier Verkehrsunfälle mit 79% federführend, Stürze aus größer Höhe mit lediglich 17% (96). Diese Ergebnisse konnten in weiteren Studien mit Patienten mit instabiler Beckenfraktur sowohl für den asiatischen und australischen Raum bestätigt werden (97,98).

Kleber et al. konnten bereits 2010 in einem Studienkollektiv von traumatisch bedingten Todesfällen zeigen, dass Hhenstrze als häufiger todesurschlicher Mechanismus typisch für Berlin erscheinen (1). Im Vergleich zu den internationalen Ergebnissen mag dies zum einen an der städtischen Architektur mit einer Vielzahl an hohen Gebäuden und Brücken liegen. Die vergleichsweise geringe Zahl an verkehrsunfallbedingten Todesfällen lässt sich nicht zuletzt auf das in Berlin exzellent entwickelte öffentliche Personennahverkehrsnetz zurückführen. Gerade in nationalen und internationalen ländlichen Gebieten sowie bekannter Weise auch in amerikanischen Großstädten ist dies wesentlich weniger entwickelt mit daraus resultierendem höheren Bedarf an und Gebrauch von PKWs.

Zu bedenken gilt jedoch, dass unser Kollektiv nur Patienten enthielt, die im Rahmen des Traumas verstarben. Es ist also von einer höheren Gesamtverletzungsschwere auszugehen als bei Patienten, die einen solchen Unfall überlebten. Bei einem Großteil unseres Patientenguts (60%, n=55) trat der Tod unmittelbar durch das Unfallereignis oder kurz danach (vor Eintreffen des Rettungsdienstes) ein. Konsekutiv ist anzunehmen, dass die ermittelten Traumamechanismen ursächlich für die in den Obduktionen erkennbare höhere Gesamtverletzungsschwere im Kollektiv sind.

4.1.3 Präklinische Maßnahmen

Unsere Studie zeigt erstmalig weitere Daten zu durchgeführten medizinischen Maßnahmen im Rahmen der präklinischen Versorgung polytraumatisierter Patienten.

In unserem Studienkollektiv wurde mehrheitlich auf die Durchführung medizinischer Maßnahmen verzichtet. Dies könnte darin begründet sein, dass ein erheblicher Anteil der Patienten unserer Studie bereits bei Eintreffen des Rettungsdienstes sichere Todeszeichen im Sinne einer Leichenstarre, Leichenflecke oder Leichenfäulnis aufwies. Damit war aufgrund der offensichtlichen Irreversibilität des klinischen Todes die Indikation zur Reanimation bzw. weiterer medizinischer Maßnahmen nicht mehr gegeben. Die nicht überlebbare Verletzung - in der Literatur als viertes sicheres Todeszeichen genannt – bietet unserer Meinung nach in unterschiedlichem Ausmaß individuellen Raum zur Interpretation und wurde in unserer Studie als unsicheres Todeszeichen gewertet (99).

Diese Einschränkung gilt es bei der Interpretation unserer Daten zu beachten.

4.1.3.1 Reanimation

Eine Reanimation wurde bei rund 31% der Patienten in unserem Kollektiv durchgeführt. Wie bereits oben beschrieben, wird dieser geringe Prozentsatz zum einen an der unmittelbaren Feststellung von sicheren Todeszeichen und konsekutiv fehlender Indikation zur Reanimation bei dem Großteil unseres Patientenguts gelegen haben (60%, n=55). Ebenso wurde bei einigen Patienten eine Reanimation durch Laien oder die Polizei begonnen, diese aber bei Eintreffen des Notarztes und Feststellung bereits vorhandener, sicherer Todeszeichen eingestellt (6%, n=5). Im Gegensatz dazu verfügten einige Patienten unseres Studienkollektivs beim Eintreffen von Polizei und Rettungsdienst noch über einen eigenen, suffizienten Kreislauf mit fehlender Indikation zur Reanimation.

4.1.3.2 Intubation

Laut Jahresbericht des Traumaregisters der DGU[®] wurden 2012 23% der polytraumatisierten Patienten am Unfallort intubiert (85). Ebenso ist aus den Daten zu erkennen, dass 17% der Patienten einen GCS kleiner als 9 Punkten aufwiesen (85). In unserem Patientenkollektiv fand eine Intubation bei rund 28% der Patienten statt. Die Diskrepanz zu der Anzahl an Reanimationen (31%) ergibt sich über die jeweilige Indikationsstellung: In wenigen Fällen wurde die Reanimation durch medizinische Laien begonnen, diese aber dann bei Detektion sicherer Todeszeichen durch den Notarzt beendet. Daher wurden diese Patienten formal zwar reanimiert, jedoch nicht intubiert. Genauso gab es Patienten, die – zumindest präklinisch nicht-reanimationspflichtig waren – jedoch aufgrund ihrer Gesamtverletzungsschwere, z.B. bei respiratorischer Insuffizienz aufgrund von Thoraxverletzungen, im Rahmen der präklinischen Traumaversorgung durch den Notarzt intubiert wurden. Somit zeigen sich unsere Daten aus Berlin bezüglich durchgeführter Intubationen beim polytraumatisierten Patienten ebenfalls weitestgehend deckungsgleich mit den nationalen Daten und gelten somit als repräsentativ für Deutschland (85).

Goldstandard in der Notfallmedizin ist weiterhin die Sicherung des Atemweges bei einem GCS < 9 Punkten, dies trifft offensichtlich auf alle reanimationspflichtigen Patienten zu. Aber auch beim polytraumatisierten Patienten mit eigenem, suffizienten Kreislauf wäre aufgrund der Verletzungsschwere – insbesondere bei Vorliegen eines schweren SHTs – ein reduzierter GCS-Score nicht außergewöhnlich.

Bei unseren Daten gilt einschränkend zu bedenken, dass die Untersuchung der medizinischen Maßnahmen retrospektiv anhand von Rettungsdienst- und Obduktionsprotokollen erfolgte. Es ist bekannt, dass es insbesondere nach frustraner Reanimation fälschlicherweise zur Entfernung von medizinischem Material vom Leichnam kommt – insbesondere der Entfernung eines endotrachealen Tubus oder einer alternativen Atemwegshilfe (100).

Bei nicht verfügbarem Rettungsdienstprotokoll und Entfernung von medizinischem Material vom Leichnam war somit zum Zeitpunkt der Obduktion bzw. Akteneinsicht nicht eindeutig ersichtlich, welche medizinischen Maßnahmen im Rahmen der präklinischen Versorgung tatsächlich durchgeführt wurden (100). So konnte in unserer Studie vereinzelt keine definitive Aussage zur Durchführung medizinischer Maßnahmen bei den verstorbenen Patienten gemacht werden (z.B. bei 9% unklar, ob eine Reanimation stattfand).

4.1.3.3 Anlage intravenöser und intraossärer Zugänge

Nicht alle Patienten, die reanimiert wurden, erhielten auch einen Zugang. Dies lässt sich dadurch erklären, dass vereinzelt eine Reanimation durch Laien oder die Polizei begonnen, bei Eintreffen des Notarztes und Feststellung sicherer Todeszeichen dann jedoch abgebrochen wurde. Dies gilt es bei der Interpretation unserer Ergebnisse zu beachten.

Bei rund 25% der Patienten erfolgte die Anlage eines Zugangs – im überwiegenden Teil erfolgte diese intravenös. Die Wirksamkeit von Notfallmedikamenten setzt voraus, dass diese unverändert und zügig zu ihrem Wirkungsort gelangen können, um dort die entsprechenden Effekte zu entfalten. Während es heutzutage viele Applikationswege für pharmakologische Wirkstoffe gibt – z.B. sublingual, rektal, transdermal oder subcutan, um nur einige zu nennen – sind die meisten aufgrund des damit verbundenen, verzögerten Wirkbeginns für medizinischen Akutsituationen denkbar ungeeignet. Nicht zuletzt deshalb gilt in der Notfallmedizin die Anlage eines sicher intravenös liegenden Zugangs als Goldstandard für die Applikation von Notfallmedikamenten (101).

Rund 17% der Zugänge in unserer Studie wurden intraossär etabliert. Es ist anzunehmen, dass in Zukunft die Inzidenz an intraossär etablierten Zugängen gerade in Reanimationssituationen weiter ansteigen wird, stellen sie doch eine zügig erlernbare und suffiziente Alternative zum intravenösen Zugang dar (102,103). Mehrere internationale Studien konnten zeigen, dass es im Vergleich zur intravenösen Applikation von Notfallmedikamenten auch bei der intraossären Applikation zu keiner nennenswerten zeitlichen Verzögerung des Wirkeintritts kommt: Der direkte Kontakt des roten Knochenmarks mit dem Blut ermöglicht einen Transport des Wirkstoffs entlang des Blutstroms aus dem Knochen entlang des venösen Systems des Körpers (103,104). Somit sind nicht nur Gaben von kristallinen oder kolloidalen Flüssigkeiten oder Adrenalin - z.B. im Rahmen einer Reanimationssituation – der intravenösen Applikation gleichzustellen (104). Auch die sogenannte Rapid Sequence Induction – eine zügige Induktion einer Narkose – deren Erfolg direkt von einem unmittelbaren Wirkeintritt der applizierten Narkosemedikamente abhängt, ist über einen intraossären Zugang ebenso möglich (104).

Ein weiterer Vorteil dieser Methode liegt in der zeitlich raschen Etablierungsmöglichkeit – dies ist in der zeitkritischen Versorgung polytraumatisierter Patienten zusätzlich als positiv zu bewerten. Reades et al. konnten zeigen, dass die durchschnittlich benötigte Zeit zur Anlage eines intraossären Zugangs im Bereich der Tibia kürzer ist, als die Anlage eines intravenösen Zugangs (105).

Gleichzeitig ist die Wahrscheinlichkeit, dass es direkt beim ersten Versuch zu einer Etablierung eines funktionsfähigen i.o.-Zugangs mit konsekutiv sofort möglicher Medikamentengabe kommt,

sehr hoch: Mehrere internationale Studien konnten initiale Erfolgsraten von 84-91% aufzeigen (101,104–106).

Bezüglich der Sicherheit dieses Verfahrens und möglicher Komplikationen konnten Gazin et al. beschreiben, dass es bei 39 etablierten i.o.-Zugängen in ihrer Studie nur bei einem Patienten zu einer lokalen Entzündungsreaktion um die Einstichstelle kam (104). Zu den potentiellen Komplikationen – neben Erfolgslosigkeit des Verfahrens und Dislokation der Nadel - zählen weiterhin Osteomyelitis, Hautabszesse und Cellulitis (103). Letztere scheinen vor allem mit einer langen Verweildauer der i.o.-Kanüle verbunden und damit für den auf die Präklinik begrenzten Einsatz irrelevant zu sein (103). Die häufigste Komplikation des i.o.-Zugangs ist das Kompartmentsyndrom: Ursächlich zeigt sich ein Extravasat, dass vor allem bei Druckinfusion kristalliner oder kolloidaler Flüssigkeiten über eine nicht suffizient oder vollständig intramedullär platzierte i.o.-Nadel, entstehen kann (103). Damit erhält diese Komplikation selbstredend auch eine präklinische Relevanz. Ebenso wären mehrfache, notwendige Bohrungen am selben Knochen als Ursache eines Kompartmentsyndroms denkbar, dies ist unserer Kenntnis nach in der Literatur jedoch noch nicht beschrieben worden.

Eine Metaanalyse von 2010 konnte für keines der gängigen Instrumente eine deutliche, klinische Überlegenheit zeigen (107). In einer Studie von 2014 wurde durch Kurowski et al. ein minimaler Vorteil der BIG[®] bezüglich Erfolgsrate der Etablierung und benötigte Zeit zur Anlage gezeigt werden, gefolgt von der EZ-IO[®] und der Jamshidi[®] (108). Abgeleitet von der Anzahl an internationalen Publikationen scheint sich im praktischen Setting jedoch die EZ-IO[®] deutlich durchgesetzt zu haben (101,102,104–106). Für den deutschsprachigen Raum beschrieben Helm et al., dass i.o.-Zugänge signifikant häufiger bei Traumapatienten sowie anderweitig vital bedrohten Patienten mit gegebener Notwendigkeit zur Durchführung von invasiven Maßnahmen wie Thoraxdrainagenanlage, Intubation oder Reanimation etabliert wurden (106).

Bezüglich des Anlageortes für i.o.-Zugänge gibt es mehrere Empfehlungen: Klassischerweise erfolgt die Punktion im medialen proximalen Tibiadrittel, am Sternum oder im lateralen proximalen Humerusdrittel (108). Der Vollständigkeit halber sollte jedoch auch die Möglichkeit der Punktion am Innenknöchel (distale Tibia) genannt werden – diese wird jedoch selten praktiziert (108). Da Patienten mit instabilen Beckenverletzungen häufig venöse Verletzungen im Beckenbereich aufweisen, sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass in diesen Fällen von der Anlage eines i.o.-Zugangs an der unteren Extremität mit konsekutiver Infusion von Notfallmedikamenten in die Verletzung abzusehen ist. Stattdessen sollte der empfohlene Punktionsort an der oberen Extremität gewählt werden.

4.1.3.4 Entlastung des Thorax mittels Punktion oder Thoraxdrainage

Die Anlage einer Thoraxdrainage zeigte sich auch in unserem Kollektiv als selten durchgeführte, präklinische Maßnahme: Sie wurde bei rund 8% der Patienten etabliert, weitere 2% erhielten eine Entlastungspunktion bei Verdacht auf Spannungspneumothorax. Im Gegensatz dazu steht die Erkenntnis, dass 66% der in unserer Studie obduzierten Traumapatienten einen Pneumothorax aufwiesen. Eine Studie unserer Arbeitsgruppe aus dem Jahr 2010 konnte zeigen, dass der nicht suffizient entlastete oder nicht erkannte Spannungspneumothorax eine der wenigen definitiv vermeidbaren Todesursachen polytraumatisierter Patienten darstellt (70). Huber-Wagner et al. empfahlen bereits 2007 die beidseitige Anlage von Thoraxdrainagen im Rahmen der Reanimation von Traumapatienten und dem Verdacht auf ein Thoraxtrauma (109). Basierend auf den Daten des Traumaregisters konnte in dem Kollektiv von Patienten mit erfolgter traumatischer Reanimation mit 72% eine hohe Inzidenz an schweren Thoraxtraumen gezeigt werden, bei rund 23% der reanimierten Traumapatienten erfolgte frühzeitig die Anlage von Thoraxdrainagen. Die Autoren postulierten, dass diese frühzeitige Thoraxdrainagenanlage unter Reanimation mit einer vergleichsweise geringen Inzidenz an Spannungspneumothoraces einhergeht (109).

Es gilt daher erneut darauf hinzuweisen, dass invasive Maßnahmen - wie z.B. die Anlage einer Thoraxdrainage - zwar eine enge Indikationsstellung benötigen, jedoch von Notärzten beherrscht und bei entsprechender Indikation zwingend angewandt werden müssen. Dies gilt insbesondere als Ultima Ratio bei der Reanimation polytraumatisierter Patienten nach Überprüfung und Therapie weiterer reversibler Ursachen eines traumatischen Herz-Kreislaufstillstandes (68). An dieser Stelle sei erneut darauf hingewiesen, dass ein Großteil des Patientengutes unserer Studie unmittelbar durch das Unfallgeschehen verstarb und bei Auffinden bereits sichere Todeszeichen aufwies. Dies erklärt größtenteils die niedrige Rate an etablierten Thoraxdrainagen im Vergleich zur hohen Inzidenz von Pneumothoraces in den Obduktionen.

4.1.3.5 Externe, nicht-invasive Beckenstabilisierung

Die Prävalenz von Beckenfrakturen bei Patienten mit stumpfem Trauma ist in der internationalen Literatur mit 3-12% angegeben und zählt somit zu den seltenen Verletzungen (23,41,110). Gemeinsamkeit unserer Patienten des Studienkollektivs ist die instabile Beckenverletzung, die somit alle untersuchten 91 Patienten aufwiesen.

In lediglich 6% der Fälle erfolgte in unserem Kollektiv die präklinische Anlage eines externen, nicht-invasiven Beckenstabilisators. Trotz einer hohen Anzahl an mit sicheren Todeszeichen aufgefundenen Patienten in dieser Studie, erscheint die Zahl der Patienten, deren frakturiertes Becken bereits präklinisch stabilisiert wurde, sehr niedrig – insbesondere, da 31% der Patienten reanimiert wurden. Während der Gebrauch eines externen Beckenstabilisators bereits im präklinischen Setting laut den amerikanischen ATLS[®]- Guidelines, europäischen ITLS[®]- Guidelines sowie der deutschen S3-Leitlinie Polytrauma/Schwerverletzten-Behandlung der DGU[®], bereits seit Jahren mit Nachdruck empfohlen wird, scheint dies in Berlin, stellvertretend für Deutschland, noch nicht flächendeckend umgesetzt zu sein (52). Nichtsdestotrotz ist die Datenlage bezüglich der Effektivität dieser Stabilisatoren bis dato nur unzureichend. Neben mehreren internationalen Einzelfallberichten kommen größere Studien vor allem aus dem niederländischen und angloamerikanischen Raum (35,46,74–83,111). Auch unsere Studie, die erstmalig computertomographisch generierte Daten nicht-artifizieller, instabiler Beckenverletzungen für den deutschsprachigen Raum präsentieren konnte, vermag lediglich die quantitativen Effekte durch Anlage eines Beckenstabilisators beschreiben. Resultierende Effekte auf Hämodynamik und Gesamtprognose eines Traumapatienten sind dadurch nicht ableitbar. Bis dato gibt es keine Studie, die die alleinigen Effekte einer Stabilisierung des Beckens mittels externem, nicht-invasiven Beckenstabilisator auf die Hämodynamik untersucht hat. Tan et al. konnten in ihrer Studie von 2010 eine Verbesserung der hämodynamischen Situation im Schockraum nach Anlage des T-POD[®] beschreiben (78). Kritisch zu sehen ist jedoch zum einen, dass das Studienkollektiv lediglich zehn Patienten umfasste. Zum anderen war die Anlage des T-POD[®] nicht die einzige, zu den beschriebenen Zeitpunkten durchgeführte medizinische Maßnahme. Auch die im Schockraum gängige, an die Hämodynamik und die klinische Blutungssituation des Patienten angepasste Gabe von kristallinen bzw. kolloidalen Flüssigkeiten und Vasopressoren sowie die Transfusion von Blutprodukten, haben bekanntlich erheblichen Einfluss auf Vitalparameter wie Herzfrequenz und Blutdruck. Somit ist der Einfluss des T-POD[®] auf die Hämodynamik nicht eindeutig nachgewiesen.

Aufgrund der mangelnden Alternativen und theoretisch sinnvollem Ansatz der intrapelvinen Volumenreduktion zur Minimierung des Blutverlustes pro Zeiteinheit ist Leitlinien entsprechend für die präklinische Versorgung polytraumatisierter Patienten dennoch zu fordern, dass instabile Beckenverletzungen im Rahmen des Body Checks erkannt und unmittelbar stabilisiert werden. Es gilt, die Notärzte für diese seltene, aber gravierende Verletzung zu sensibilisieren und sie in der adäquaten Anlagetechnik verschiedener externer Beckenstabilisatoren zu schulen. Ebenso

sollte die Vorhaltung eines externen, nicht-invasiven Beckenstabilisators in die entsprechenden DIN-Normen für die Ausstattung von RTW, NEF sowie RTH aufgenommen werden.

In diesem Kontext ist erneut auf die Wertigkeit einer suffizienten, präklinischen körperlichen Untersuchung - dem Body Check - hinzuweisen. Auch wenn sich die klinische Stabilitätsprüfung des Beckens beim polytraumatisierten Patienten schwierig gestalten kann, stellt sie doch die einzige Möglichkeit zur präklinischen Detektion dieser schwerwiegenden Verletzung dar. Äquivalent zur Anlage eines Stiff-Necks bei Verdacht auf HWS-Trauma ist daher bei geringstem Verdacht auf eine instabile Beckenverletzung die Anlage eines Beckenstabilisators im Rahmen des PHTLS[®]- bzw. ATLS[®]-/ITLS[®]-Algorithmus zu fordern. Jedoch muss die Anlage eines externen, nicht-invasiven Beckenstabilisators mit Bedacht erfolgen: Toth et al. konnten bereits 2012 zeigen, dass es zu einer vermehrten Fehlstellung der Frakturrenden nach Anlage externer, nicht-invasiver Beckenstabilisatoren bei einigen Patienten mit lateralen Kompressionsfrakturen kam, diese blieb jedoch ohne hämodynamische Relevanz (112).

Garner et al. konnten mit ihrem Case Report erstmalig einen Fall einer lateralen Kompressionsfraktur zeigen, bei der der Patient nach Anlage eines T-POD[®] eine zunehmende hämodynamische Instabilität aufwies (113). Ebenso klagte der noch wache und spontan atmende Patient über eine deutliche Schmerzzunahme in der betroffenen Region (113). Unklar ist jedoch, ob die zunehmende hämodynamische Instabilität lediglich der arteriellen Blutungsquelle nahe des frakturierten rechten Azetabulums zuzuschreiben war: Der Patient wies neben multiplen Rippenfrakturen, Lungenkontusionen und einer nicht näher beschriebenen Verletzung der distalen thorakalen Aorta zusätzlich eine Leberverletzung auf (113). Ebenso wurden bei Ankunft im Schockraum hypertensive Blutdruckwerte gemessen, ob diese durch Katecholamingabe, Schmerz oder Volumentherapie bedingt waren bleibt ebenso unklar (113).

Da es am Unfallort größtenteils unmöglich ist, die definitive Vektorenrichtung der wirkenden Kräfte nachzuverfolgen und die klinische Beckenuntersuchung nur einen unsicheren Hinweis auf eine laterale Kompressionsfraktur bieten kann, argumentieren Garner et al. im Zweifelsfall den externen, nicht-invasiven Beckenstabilisator anzulegen, jedoch nicht fest zu applizieren (113). Toth et al. ziehen hingegen eine Lockerung des Beckenstabilisators erst nach Anfertigung eines Röntgenbildes im Schockraum und Evaluation durch den unfallchirurgischen Traumaleader in Betracht (112). Letztendlich mangelt es an aussagekräftigen Daten zur Stabilisierung dieses speziellen Typs der Beckenverletzung durch externe, nicht-invasive Beckenstabilisierung, sodass an diesem Punkt keine eindeutige Empfehlung gegeben werden kann. Ein generelles Unterlassen einer präklinischen Beckenstabilisierung aus Angst vor weiterer Frakturfragmentdislokation und konsekutiver hämodynamischer Instabilität erscheint jedoch inakzeptabel. Unter strenger

Nutzen-Risiko-Abwägung bietet die korrekte präklinische Anlage eines nicht-invasiven externen Beckenstabilisators aus unserer Sicht mehr Vor- als Nachteile und sollte deshalb entsprechend den aktuellen Leitlinienempfehlungen als Standard bei instabilen Beckenringverletzungen mit hämodynamischer Instabilität angelegt werden (36). Notärzte sollten sich - wie bei allen ärztlichen Maßnahmen - jedoch über die potentiellen Risiken einer inkorrekten Anlage bewusst sein.

4.1.4 Todesort

Die Mehrheit der Patienten im untersuchten Kollektiv (87%) verstarb in der Präklinik. Dies ist erneut vor allem damit zu begründen, dass ein hoher Anteil der Patienten bereits mit sicheren Todeszeichen aufgefunden wurde.

Im internationalen Vergleich zeigt sich bezüglich der Angaben zu präklinisch verstorbenen Traumpatienten eine große Spannweite: Bis zu 85% der traumatischen Todesfälle ereignen sich noch am Unfallort (1,6–8,10,91,93). Dies scheint mitunter auch von der Lokalisation des Unfallgeschehens abhängig zu sein: Wisborg et al. postulierten beispielsweise für eine ländliche Gegend in Norwegen, dass bei einigen präklinisch verstorbenen Traumpatienten ein unbeobachtetes Unfallgeschehen dazu führte, dass sofortige, medizinische und lebensrettende Maßnahmen ausblieben bzw. erst mit erheblich zeitlicher Verzögerung einsetzten (93).

So konnte unsere Arbeitsgruppe für Berlin 2010 zeigen, dass knapp 59% aller Traumpatienten in der Präklinik verstarben (1). Ähnliche Ergebnisse erbrachte auch eine amerikanische Studie von 1997: Während in ländlichen Gebieten 72% der Patienten noch am Unfallort verstarben, waren dies im urbanen Setting lediglich 41% (114). Die Überlebenschancen von Traumpatienten bei einem Unfallgeschehen in einem Ballungszentrum scheint also im Vergleich zur ländlichen Gegend höher zu sein. Dies könnte neben der höheren Wahrscheinlichkeit eines beobachteten Unfallgeschehens auch in der schnelleren Verfügbarkeit medizinischer Hilfe durch kürzere Rettungswege begründet liegen. Zweifelsohne kommt dem präklinischen Abschnitt in der Versorgung von Traumpatienten dadurch weiterhin ein kritischer Stellenwert zu: Während der Unfallprävention nach wie vor eine unangefochtene Wichtigkeit zukommt, sollte der Fokus überdies auf der Verbesserung der Gegebenheiten im Rettungswesen, z.B. intensive Ausbildung von Rettungsdienstpersonal und kürzere Rettungszeiten durch zusätzlich eingesetzte Rettungsmittel, liegen.

Nationale Daten bezüglich des Todesorts von Traumpatienten konnte unsere Arbeitsgruppe bereits 2010 vorstellen: Die Verteilung der Todeszeitpunkte von Traumpatienten in Berlin

zeigte zwei Peaks: Initial durch das Unfallgeschehen oder innerhalb der ersten Stunde danach und 6-48h nach Trauma im Verlauf der klinischen Behandlung (1). Knapp 59% der traumabedingten Todesfälle fielen in den Bereich der Präklinik, der zweite Peak mit 33% in den Bereich der intensivmedizinischen Versorgung (1). Lediglich je 3% der Patienten verstarben im Schockraum, dem OP oder auf Normalstation (1).

Mit nur 13% klinischen Todesfällen suggerieren die Daten unserer Studie, dass Patienten, die den Schockraum lebend erreichen generell eine wesentlich höhere Überlebenschance aufweisen. Dies mag mitunter auch an einer stetigen Verbesserung der klinischen Versorgung Schwerstverletzter und den sich kontinuierlich erweiternden intensivmedizinischen Möglichkeiten liegen. Diese Interpretation lässt sich durch die Traumaregisterdaten der letzten Jahre zusätzlich untermauern (11,85).

Während bei der klinischen Versorgung eine stetige Verbesserung zu verzeichnen ist, besteht in der Optimierung der präklinischen Versorgung noch deutlicher Handlungsbedarf. Dies zeigt sich umso mehr an dem Patientenkollektiv mit instabiler Beckenverletzung. Durch in den letzten Jahren stetig wachsende Erkenntnisse im Bereich der präklinischen Traumaversorgung ergeben sich neue Behandlungsempfehlungen und Therapiemöglichkeiten. Diese gilt es an Notärzte und rettungsdienstliches Personal zu vermitteln sowie neue Techniken z.B. im Rahmen von praktisch orientierten Workshops zu schulen, damit diese auch bzw. gerade bei seltenen Einsätzen sicher und schnell angewandt werden können.

4.1.5 Hauptblutungsquelle

In nur 19% der Fälle zeigte sich die instabile Beckenverletzung in der Obduktion als Hauptblutungsquelle. Dies stellt eine essentielle Information dar, deren Kenntnis enormen Einfluss auf die Priorisierung der operativen Versorgung von Verletzungen bei Patienten mit instabiler Beckenverletzung hat. Mehrere retrospektive Studien zeigten sich zu unseren Ergebnissen deckungsgleich: Sowohl Parreira et al. als auch Poole et al. postulierten, dass die instabile Beckenverletzung zwar ein enormes Risiko zur Entwicklung eines hämorrhagischen Schocks birgt, das Outcome der Patienten jedoch im Wesentlichen von den Begleitverletzungen abhängt (96,115). Poole et al. zeigten, dass von den 236 untersuchten Patienten 18 verstarben – sieben aufgrund eines hämorrhagischen Schocks (115). Jedoch wies nur ein Patient nachweislich eine pelvine Hauptblutungsquelle auf, während die restlichen sechs Patienten an extrapelvinen Hauptblutungsquellen verstarben (115).

Fraglich ist daher, ob die operative mechanische Beckenstabilisierung zwingend vor der operativen Versorgung anderer Verletzungen im Rahmen eines Polytraumas, wie z.B. aktiven

abdominellen Blutungen, erfolgen sollte. Gerade bei korrekt angelegtem externen, nicht-invasivem Beckenstabilisator konnten Einzelfallberichte ein erfolgreiches Management zeigen, bei dem die operative Versorgung thorakaler und abdomineller Verletzung Priorität bekam (116,117). Jedoch sollte dabei das potentielle Risiko von druckbedingten, teils gravierenden Weichteilnekrosen nicht verschwiegen werden, die die Dauer der Anlage auf ein zeitlich vertretbares Minimum beschränken (116,118). Ein Argument für eine priorisierte mechanische Beckenstabilisierung stellt ein gegebenenfalls notwendiges Packing dar: Ein mechanisch stabilisiertes Becken erscheint als Widerlager sinnvoll, dafür existiert jedoch keine klinische Evidenz.

Gleichzeitig sollte die Diagnose einer instabilen Beckenverletzung zu einer suffizienten Untersuchung weiterer Organe bzw. Organsysteme führen, deren Verletzung ebenfalls zügig lebensbedrohliche Ausmaße annehmen kann. So zeigten sich in unserem Kollektiv allein bei 12% der Patienten Verletzungen der Leber als führende Hauptblutungsquelle. Daher sollte die instabile Beckenverletzung bis zum Beweis des Gegenteils immer als Indikator für schwere innere Verletzungen und Blutungen gesehen werden. Bei abdominellen Hauptblutungsquellen, beispielsweise bedingt durch eine schwere Leberverletzung, sollte folglich der Laparotomie klarer Vorzug gegeben werden. Dabei sollte jedoch bedacht werden, dass im Falle eines notwendigen Packings der Bauchhöhle bei operativ nicht beherrschbarer Blutung z.B. aus dem Leberstromgebiet das operativ stabilisierte Becken ein besseres Widerlager darstellt. Jedoch gibt es auch die Möglichkeit des simultanen intraperitonealen Packings von Bauchhöhle und Becken über eine mediane Laparotomie (23).

4.1.6 Verletzungsmuster

Die instabile Beckenverletzung ist hinweisgebend auf die eingewirkte Kraft (bis 10.000 N) und stellt einen Surrogatparameter für gravierende Begleitverletzungen dar (89).

Führend zeigten sich thorakale Begleitverletzungen bei 87% der Patienten unseres Studienkollektivs, gefolgt von schwerwiegenden Verletzungen im Bereich des ZNS (84%).

Dies steht in Diskrepanz zu den Angaben in der internationalen Literatur bezüglich der federführenden Begleitverletzungen von Patienten mit instabiler Beckenfraktur: Parreira et al. zeigten für ihr 103 Patienten mit instabiler Beckenverletzung umfassendes Kollektiv die hohe Inzidenzen für abdominelle Traumata (42%) (96). Thorakale Verletzungen belegten mit 25% beispielsweise erst den vierten Rang (96). In diesen Vergleich sollte jedoch auch mit einfließen,

dass der Großteil ihres Kollektivs (n=83 von 103, 81%) das Trauma überlebte. Leberverletzungen stellten sich in unserem Kollektiv bei 76% der Patienten dar und waren damit ebenfalls wesentlich häufiger nachweisbar.

Kido et al. veröffentlichten mit ihrer 102 Patienten umfassenden Studie keine genauen Details zum jeweiligen Verletzungsmuster, erklärten jedoch, dass sich unter den 47 innerhalb der ersten 24 Stunden nach Trauma verstorbenen Patienten mit instabiler Beckenverletzung sehr hohe Inzidenzen von ZNS-Begleitverletzungen zeigten (119).

Peripelvine Weichteilschäden zeigten sich bei 86% unseres Kollektivs (n=78). Die Angaben in der internationalen Literatur sind diesbezüglich sehr spärlich. Diese hohe Inzidenz ist als Sonderfall zu werten, umschließt unser Kollektiv ausschließlich Patienten mit massiven Destruktionen am knöchernen Beckenring. Diese lassen sich direkt durch den jeweiligen Unfallmechanismus erklären: Fast 90% der Patienten unseres Kollektivs verstarben nach einem Sturz aus großer Höhe oder Zugüberrollungen.

Daher ist nicht verwunderlich, dass auch Verletzungen des die knöchernen Strukturen umgebende Binde- und Muskelgewebes in hoher Zahl in Erscheinung tritt. Schlussfolgernd sollte bei offensichtlichen Verletzungen des pelvinen Weichteilmantels an die Möglichkeit einer instabilen Beckenverletzung gedacht und diese differentialdiagnostisch z.B. bei instabilen Kreislaufverhältnissen und nicht eindeutiger Stabilitätsprüfung in Betracht gezogen werden.

Unumstritten ist, dass die Begleitverletzungen das Outcome und die Überlebenschancen der Patienten mit instabiler Beckenverletzung im Wesentlichen beeinflussen oder sogar bestimmen (96–98). Darauf deuten unsere Ergebnisse ebenfalls hin. Die Begleitverletzungen relativieren die Priorität der notfallchirurgischen Stabilisation von Beckenringverletzungen bei simultanem Vorliegen z.B. gravierender abdomineller Blutungsquellen. Präklinisch sollte im Zweifelsfall jederzeit die externe, nicht-invasive Beckenstabilisierung durchgeführt werden, stellt sie in der Regel eine zügig durchzuführende Maßnahme dar (siehe 4.1.3.5). Intraabdominelle Blutungen sind präklinisch nicht beherrschbar. Hier gilt die Priorität dem zügigen Transport in eine geeignete Klinik, um eine notwendige Notfalllaparotomie nicht zu verzögern (120). In Schockraum und OP hingegen darf die Anlage eines invasiven Beckenstabilisators (Fixateur externe, Beckenzwinge) die Blutstillung arterieller oder gravierender abdomineller Verletzungen nicht verzögern. So kann eine Notfalllaparotomie auch bei appliziertem externem, nicht-invasiven Beckenstabilisator erfolgen. Im Anschluss an die abdominelle Blutstillung kann eine Stabilisation des Beckens erwogen werden. In

Abhängigkeit der Blutungsquelle (venös, spongiös, arteriell) der Verletzung und des klinischen Zustands des Patienten kann diese als interne Osteosynthese z.B. mittels Symphysenplatte oder extern mittels Fixateur externe realisiert werden. Bei dorsalen Instabilitäten mit Diastase der sakroiliakalen Strukturen und hämodynamischer Instabilität bei aktiver pelviner Blutung hat die Anlage einer Beckenzwinge unter Beachtung der Kontraindikationen oberste Priorität.

Selbstredend sollte daher ein ausführlicher Body Check im Rahmen der präklinischen und klinischen Traumaversorgung nicht nur auf die Detektion der instabilen Beckenverletzung abzielen, sondern auch bestmöglich alle weiteren lebensbedrohlichen und Outcome-relevanten Begleitverletzungen erfassen. Hier haben die FAST-Sonographie und die CT im Rahmen des Schockraummanagements einen hohen Stellenwert.

4.1.7 Todesursache laut Obduktion

Fast alle Patienten der vorliegenden Studie verstarben am Polytrauma (93%). Diese Daten unterstützen - in Kombination mit der Kenntnis über die zugrundeliegenden Traumamechanismen und den Todesort - die Interpretation, dass unser Studienkollektiv aus schwerstverletzten Patienten bestand. Somit ist unser Patientenquerschnitt nicht generell auf alle Populationen von Traumapatienten übertragbar. Auch der Vergleich mit klinischen Studien sollte diesbezüglich mit Vorsicht erfolgen. Dennoch spiegelt unser Studienkollektiv auch das Patientengut wider, auf welches Notärzte und Rettungsdienst im präklinischen Setting treffen und vorbereitet sein müssen. Bezüglich Alter und Geschlecht der Traumapatienten entsprechen unsere Ergebnisse den Daten aus Traumaregister und internationaler Literatur (5,8,24,30,84–87). Das erfolgreiche präklinische und klinische Management dieser Patienten stellt eine derartige Herausforderung dar, sodass sich die Analyse dieser Fälle mit der Zielsetzung der zukünftigen Reduktion der Traumaletalität bei instabilen Beckenverletzungen lohnt.

Historisch führende Todesursachen von Traumapatienten in der internationalen Literatur sind vor allem das Schädel-Hirn-Trauma mit bis zu 72% und Verbluten mit bis zu 25% (10,90,91,114). In der vorliegenden Studie fielen nur 6% der Todesursachen auf das Verbluten, nur 1% verstarb nachweislich am SHT. Für Berlin konnten Kleber et al. zeigen, dass von den 440 untersuchten Traumapatienten des Jahres 2010 46% am Polytrauma verstarben, 10% am Verbluten sowie 38% am SHT (1).

Mehrere klinische Studien zu Patienten mit instabilen Beckenfrakturen konnten bezüglich der Todesursachen folgende Ergebnisse vorweisen:

Smith et al. zeigten, dass 74% der verstorbenen Traumpatienten mit instabilen Beckenverletzungen am Verbluten verstarben (121). Multiorganversagen war bei 18% desselben Kollektivs todesursächlich (121).

Ähnliche Ergebnisse erbrachte die Studie von Kido et al.: Bei den 47 verstorbenen Patienten war das Verbluten in 48% todesursächlich, gefolgt von Verletzungen des ZNS mit 21% (119).

Hervorzuheben gilt, dass das Polytrauma als eigenständige Todesursache in der internationalen Literatur als solches nicht definiert ist: Mehrfach sind jedoch „multiple Verletzungen“ bzw. Multiorganversagen als Todesursache zu finden (10,90,91,114,119,121). Viele unserer per Definition am Polytrauma verstorbenen Patienten sind an der Kombination von Schäden lebenswichtiger Strukturen wie Herz, Leber und Gefäßsystem verstorben, diese werden in mehreren Studien unter der Kategorie des „Verblutens“ zusammengeführt (10,90,91,114). Die auf den ersten Blick bestehende Divergenz zwischen den Ergebnissen unserer Studie und den internationalen Daten der letzten Jahrzehnte scheint also auch durch unterschiedliche Definitionen und Auffassungen bezüglich der Kategorisierung von Todesursachen bedingt zu sein. Um Todesursachen traumatisch verstorbener Patienten in Zukunft auch international besser vergleichen zu können, empfiehlt sich die Benennung einer einheitlichen rechtsmedizinischen Klassifikation der traumatischen Todesursachen.

4.1.8 Klassifikation der Beckenringverletzungen

Unser Kollektiv beinhaltet ebenfalls eine Beckenverletzung Typ A, die sich in der klinischen Untersuchung aufgrund der Ala Os ileum-Fraktur nicht von einer Typ B- oder Typ C-Fraktur unterscheiden ließ. Da konsekutiv die Stabilitätsprüfung negativ ausfiel, hätte die Beckenverletzung im präklinischen Setting ebenfalls als instabil gewertet werden und in einer Stabilisierung mittels nicht-invasiven externen Beckenstabilisator resultiert. Gleichzeitig zeigt dieser Fall die Limitationen der körperlichen Untersuchung: Eine eindeutige Identifikation einer Typ B- bzw. Typ C-Beckenringverletzung ist letztendlich nur über eine Bildgebung mittels Röntgen oder Computertomographie möglich. Da diese Verfahren präklinisch jedoch nicht zur Verfügung stehen und die Stabilitätsprüfung des Beckens eine hinreichende Sensitivität (bis 93%) aufweist, sollte auf das Ergebnis der körperlichen Untersuchung gebaut werden (37,49–51). Analog der Stabilisierung der HWS mittels Stiff-Neck bei Verdacht auf ein HWS-Trauma, sollte auch bei dem geringsten Verdacht auf eine instabile Beckenverletzung bereits präklinisch die Stabilisierung des Beckens mittels externen, nicht-invasivem Beckenstabilisator erfolgen. An dieser Stelle sollte erneut auf die korrekte Applikationslokalisation zwischen Beckenkamm und

den großen Trochanteren hingewiesen werden, ebenso sollte keine Überkorrektur erfolgen. Da die korrekte Anlage eines Beckenstabilisators innerhalb kürzester Zeit zu realisieren ist und in einer Risiko-Nutzen-Abwägung vorteilhaft erscheint, ist eine abwartende Haltung bis zur Bestätigung des Untersuchungsbefunds mittels bildgebender Verfahren nicht nachvollziehbar.

Interessant ist, dass alle weiteren Patienten unseres Studienkollektivs ausschließlich instabile Beckenfrakturen des Typ C nach Pennal und Tile aufwiesen. Instabile Beckenfrakturen des Typ B wurden in unserem Kollektiv von Traumatoten nicht beobachtet. Wie bereits mehrfach diskutiert, werden die hohen einwirkenden Kräfte während des Traumas in unserem Studienkollektiv dafür ursächlich sein.

Dass Patienten mit Typ-B-Beckenverletzungen höhere Überlebenschancen haben, lässt sich an dieser Stelle nur mutmaßen: Die Schlussfolgerung, dass eine aufgrund geringerer Krafteinwirkung resultierende inkomplette Instabilität des hinteren Beckenrings bei Typ-B-Beckenfraktur auch mit einem weniger schweren Verletzungsmuster – insbesondere niedrigeren Inzidenzen abdomineller Begleitverletzungen - einhergeht, erscheint denkbar.

4.1.9 Inzidenz zusätzlich vorhandener proximaler Femurfrakturen

Ein Drittel der Patienten wiesen eine unilaterale oder bilaterale Femurfraktur auf.

Diese Begleitverletzung scheint vor allem bei instabilen Beckenfrakturen des Typ C keine Rarität zu sein: In internationalen Publikationen zur instabilen Beckenverletzung ist sie mehrfach beschrieben (24,35,37,56). Das Vorhandensein dieser Begleitverletzung ist als Zeichen der maximalen Gewalteinwirkung im Rahmen des Unfallgeschehens zu werten: Trotz Femurfraktur kam es zusätzlich zur Beckenfraktur im Sinne einer Kettenverletzung. Daher muss ebenfalls von gravierenden Verletzungen abdomineller und thorakaler Organe sowie Gefäße ausgegangen werden.

Siegmeth et al. beschrieben in ihrem 126 Patienten umfassenden Studienkollektiv bei sechs Patienten zusätzlich zur instabilen Beckenverletzung eine proximale Femurfraktur, bei zwei Patienten zeigte sich diese bilateral (24). Experten empfehlen die Durchführung der präklinischen, externen Beckenstabilisierung auch bei Detektion oder Verdacht auf proximale Femurfrakturen – bis dato gibt es keine Daten, die eine gegenteilige Empfehlung unterstützen (56).

In diesem Zusammenhang sei die sogenannte „Floating Hip“ erwähnt: Definiert als eine Kombination aus einer Fraktur des Beckenrings bzw. des Azetabulums und einer ipsilateralen Femurfraktur, die sich fast ausschließlich beim polytraumatisierten Patienten zeigt (122,123). Neben den knöchernen Verletzungen und deren gravierenden Auswirkungen, stehen vor allem direkt durch die Floating Hip bzw. intraoperativ iatrogen verursachte neurologische Schäden im Vordergrund: Mit einer Inzidenz von bis zu 33% gelten sie dennoch nicht als für die Floating Hip spezifische Begleitverletzung (124,125).

Selten, aber gefürchtet sind bei diesem Verletzungsmuster vaskuläre Schäden, die im schlimmsten Fall zum Verlust der betroffenen Extremität im Sinne einer notwendigen Oberschenkelamputation oberhalb des Knies resultieren können (122).

Dass 14 von unseren 36 Patienten des CT-Studienkollektivs zusätzlich zur instabilen Beckenfraktur eine ipsi- oder bilaterale Femurfraktur aufwiesen, stützt folglich erneut die These der enormen Krafteinwirkung.

Gleichzeitig sollte diese Erkenntnis zu einer Sensibilisierung für dieses in der internationalen Literatur als Rarität dargestellte Krankheitsbild führen.

4.2 CT-gestützte Messungen nicht-invasive externe Beckenstabilisatoren und biomechanische Kraftmessungen

Die mit dieser Studie gewonnenen Ergebnisse stellen die ersten quantitativen Daten zur Effektivität von externen Beckenstabilisatoren in Bezug auf die Reduktion verschiedener Parameter des Beckenbereichs (intrapelvines Volumen, Fläche der Beckeneingangsebene, Hüftkopfabstand, Abstand zwischen den Köhler'schen Tränenfiguren, ventraler und dorsaler ISG-Abstand, Symphysenweite) bei nicht-artifizieller instabiler Beckenfraktur dar. Der Großteil der bisher veröffentlichten Daten stammt aus dem angloamerikanischen Raum: Dabei handelt es sich um Studien an Kadavern mit artifiziell herbeigeführten Beckenfrakturen und Einzelfallbeschreibungen (35,46,75,76,80–83,126–128). Die quantitativen Effekte nach Anlage externer, nicht-invasiver Beckenstabilisatoren in den Kadaverstudien wurden mittels pelvinen Röntgenbildern, elektromagnetischen Sensoren oder Infrarot-Dioden, die allesamt ein dreidimensionales Bild aufzeichneten, gemessen.

Erstmalig können wir Daten zu quantitativen Änderungen des intrapelvines Volumens, der Beckeneingangsfläche und der wirkenden Zugkräfte nach Anlage externer, nicht-invasiver Beckenstabilisatoren an instabilen Beckenverletzungen real verunfallter Patienten durch computertomographische Bildgebung und biomechanische Messungen präsentieren.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass alle getesteten Beckenstabilisatoren zu einer Reduktion von intrapelvinen Volumen, der Beckeneingangsfläche, des Hüftkopfabstandes, dem Abstand zwischen den Köhler'schen Tränenfiguren, ISG-Abstand und Symphysenweite führen konnten – wenn auch in unterschiedlichem Maße.

Daher sollte bei dem Verdacht auf eine instabile Beckenverletzung bereits im präklinischen Setting die Anlage eines externen, nicht-invasiven Beckenstabilisators erfolgen - zeigt unsere Studie, dass auch eine Stabilisierung mittels herkömmlicher Tuschlinge bereits reduzierende Effekte aufweist und daher auf keinen Fall unterlassen werden sollte. Die fehlende Vorhaltung von pneumatischer Schlinge VBM[®], T-POD[®], SAM Sling[®] oder anderer, dafür entworfener Vorrichtungen auf den Notarzteinsatzfahrzeugen bzw. RTWs und RTHs soll und darf somit nicht als Argument gegen eine bereits präklinisch erfolgte Beckenstabilisierung gelten. Aufgrund der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit kann eine klare Empfehlung für die Vorhaltung eines speziellen externen, nicht-invasiven Beckenstabilisators gegeben werden. Zusätzlich sollte dieser in die entsprechende DIN-Norm aufgenommen werden.

4.2.1 Beeinflussung des vorderen und hinteren Beckenrings nach Anlage nicht-invasiver externer Beckenstabilisatoren

Zur Unterscheidung der Effekte auf den vorderen bzw. hinteren Beckenring ist die Einordnung der ermittelten Parameter zum vorderen (Symphysenabstand, Hüftkopfabstand, Abstand zwischen den Köhler-Tränenfiguren) bzw. hinteren Beckenring (ventraler/dorsaler ISG-Abstand) und ihrer Ergebnisse sinnvoll.

Der Hüftkopfabstand und der Abstand zwischen den Köhler'schen Tränenfiguren zeigten exzellente Reduktionsergebnisse nach Anlage der Beckenstabilisatoren. Insbesondere konnte die pneumatische Beckenschlinge VBM[®] diese Parameter signifikant besser reduzieren als alle anderen getesteten Vorrichtungen. Die Reduktion der Symphysenweite gelang allen Beckenstabilisatoren, es zeigte sich lediglich ein signifikanter Unterschied: Die pneumatische Beckenschlinge VBM[®] mit applizierten 100mmHg zeigte im Vergleich zur Tuschlinge signifikant besser reduzierte Symphysenweiten.

Die Ergebnisse bezüglich des Hüftkopfabstands bestätigten jeweils die Ergebnisse der Flächenreduktion in der Beckeneingangsebene durch die angelegten Stabilisatoren. Für den klinischen Alltag lässt sich somit der Hüftkopfabstand als einfacher Surrogatparameter heranziehen, um eine suffiziente Reduktion des Beckens mittels Beckenübersichtsaufnahme zu kontrollieren. Der Vorteil dieses röntgenologischen Verfahrens liegt – im Vergleich zur

Computertomographie - in der universellen Verfügbarkeit, der raschen Einsatzmöglichkeit direkt im Schockraum und der zur CT vergleichsweise geringeren Strahlenbelastung.

Auffallend zeigten sich die Unterschiede in der Reduktion von ventralem zu dorsalem ISG-Abstand: Dabei gelangen allen getesteten Beckenstabilisatoren ventral durchschnittlich bessere Reduktionsergebnisse als für den dorsalen ISG-Abstand. Zusätzlich zeigten die Ergebnisse des dorsalen ISG-Abstands eine große Streuung (Standardabweichung > Mittelwert). Es lässt sich vermuten, dass es durch die Anlage des jeweiligen Beckenstabilisators und konsekutivem ventralen Bogenschluss zum milden Aufklappen der dorsalen Strukturen kommt. Per definitionem kann dies nur bei Verletzungen auftreten, bei denen der hintere Beckenring vollständig durchtrennt ist. Da unser Patientenkollektiv ausschließlich Typ-C-Beckenverletzungen aufwies, ließ sich dieser Effekt in unserer Studie nachweisen.

Der Vergleich von Reduktion der Beckeneingangsfläche und den Abständen zwischen den Hüftköpfen und den Köhler'schen Tränenfiguren zeigte nahezu deckungsgleiche Ergebnisse mit größtenteils signifikant besseren Ergebnissen der pneumatischen Beckenschlinge VBM[®]. Somit zeigen sich diese Parameter als Maß zur Beurteilung der Reposition des vorderen Beckenrings geeignet. Theoretisch würden Reduktionsunterschiede zwischen den Abständen zwischen den Hüftköpfen und den Köhler'schen Tränenfiguren bei angelegtem Beckenstabilisator lediglich bei transazetabulären Verletzungen vorliegen. Ebenso würden Unterschiede in den Reduktionsergebnissen von Symphysenweite und Abstand zwischen den Köhler'schen Tränenfiguren bei transsymphysären Verletzungen imponieren. Für den klinischen Gebrauch ließen divergente Reduktionsergebnissen bei einem applizierten externen, nicht-invasiven Beckenstabilisator daher auf einzelne anatomische Verletzungen schließen.

Die relativ geringe Reduktion des dorsalen ISG-Abstands in Kombination mit den überwiegend guten und deckungsgleichen Reduktionsergebnissen der Parameter des ventralen Beckenrings (Hüftkopfabstand, Abstand zwischen den Köhler'schen Tränenfiguren, Symphysenweite) legt die Vermutung nahe, dass externe, nicht-invasive Beckenstabilisatoren vordergründig den ventralen Beckenring beeinflussen. Nach Anlage der Stabilisatoren ließen sich anhand der Parameter des vorderen Beckenrings mehrheitlich signifikante Unterschiede zwischen den Beckenstabilisatoren feststellen. Dies scheint die These, dass die Beurteilung der Reduktion der dorsalen ISG-Abstände zur Effektivität externer, nicht-invasiver Beckenstabilisatoren nur stark eingeschränkt geeignet ist, zusätzlich zu untermauern.

Es lässt sich mutmaßen, dass vor allem Instabilitäten im Bereich des ventralen Beckens durch die Anlage eines externen, nicht-invasiven Beckenstabilisators suffizient reponiert und reduziert werden können.

4.2.2 Unterschiede zwischen den Nativ Scans

Beim Vergleich der verschiedenen CT-Nativ-Scans zeigte sich, dass es bezüglich der Fläche in der Beckeneingangsebene sowie des intrapelvinen Volumens einige signifikante Unterschiede gab.

Kurz zusammengefasst zeigten sich bezüglich der Fläche in der Beckeneingangsebene signifikante Unterschiede zwischen den CT-Nativ-Scans vor Anlage der pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] und vor Anlage des T-POD[®] sowie der Tuchslinge. Bezüglich des intrapelvinen Volumens zeigten sich dieselben signifikanten Unterschiede. Zusätzlich zeigten sich hier jedoch auch signifikante Unterschiede beim Vergleich der CT-Nativ-Scans vor Anlage des T-POD[®] mit dem CT-Nativ-Scan vor Anlage der Tuchslinge sowie dem CT-Nativ-Scan vor Anlage der Tuchslinge und vor Anlage der SAM Sling[®].

Die Vermutung, dass die in dieser Studie jeweils zuerst angelegte pneumatische Beckenschlinge VBM[®] auch nach ihrer Entfernung für eine gewisse Restreduktion sorgte, lässt sich somit nicht von der Hand weisen. Ebenso lässt sich ein möglicher Einfluss der Leichenstarre nicht negieren: Durch wiederholte Manipulation am Becken ist von einem wiederholten Brechen der Leichenstarre auszugehen, resultierend in einem verminderten stabilisierenden Effekt der starren Beckenmuskulatur. Darauf weisen die CT-Nativ-Scans zur Fläche in der Beckeneingangsebene vor Anlage der SAM Sling[®] hin, die jeweils zuletzt angelegt wurde: Durchweg gab es keine signifikanten Unterschiede zu den vorherigen CT-Nativ-Scans. Dagegen sprechen die signifikanten Unterschiede im intrapelvinen Volumen in den CT-Nativ-Scans vor Anlage der pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] und vor Anlage der Tuchslinge, vor Anlage des T-POD[®] und Anlage der Tuchslinge sowie vor Anlage der Tuchslinge und Anlage der SAM Sling[®]: Hier zeigte sich über signifikante Unterschiede ebenfalls eine gewisse Restreduktion nachweisbar.

Aus der beschriebenen Restreduktion lässt sich zum einen schließen, dass es auch nach Entfernung der pneumatischen Beckenschlinge VBM[®], bzw. in geringerem Maße auch des T-POD[®], nicht zu einem erneuten, kompletten Aufklappen der Beckenfraktur kommt. Dies ist grundsätzlich als positiv zu bewerten. Fraglich ist, ob dies einem Effekt der Leichenstarre auf die

peripelvine Muskulatur zuzuschreiben ist, oder ob dieser Effekt auch beim lebenden Patienten auftritt. Letzteres wäre selbstredend begrüßenswert.

Gleichzeitig muss die beschriebene Restreduktion in die Bewertung der Ergebnisse mit einfließen: Vor allem T-POD[®] und Tuchschnur hatten somit „erschwerte“ Reduktionsbedingungen. Es ist also fraglich, ob der T-POD[®] beispielsweise im Vergleich zur pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] deutlich bessere Ergebnisse gezeigt hätte, wäre er in den Messungen jeweils zuerst angelegt worden.

4.2.3 Pneumatische Beckenschlinge VBM[®]

Die pneumatische Beckenschlinge der Firma VBM[®] erzielte durchweg sehr gute Ergebnisse: Intrapelvinisches Volumen, Beckeneingangsfläche, Symphysenweite, Hüftkopfabstand, Abstand zwischen den Köhler'schen Tränenfiguren und ISG-Abstände ließen sich durch die Anlage dieses Stabilisators suffizient reduzieren. Unsere Studie konnte – außer bei der Symphysenweite und dem dorsalen ISG-Abstand - signifikant bessere Reduktionsergebnisse bei Applikation eines Drucks von 200mmHg im Vergleich zu 100mmHg zeigen.

Bezüglich der Reduktion des intrapelvinischen Volumens zeigte die pneumatische Beckenschlinge VBM[®] im Vergleich zum T-POD eine vergleichbare Volumenreduktion.

Bei der Reduktion der Fläche in der Beckeneingangsebene konnte die pneumatische Beckenschlinge VBM[®] mit 200mmHg die größten Reduktionseffekte in unserer Studie vorweisen. Diesmal zeigte sich der Unterschied zum T-POD[®] signifikant. Bei der Reduktion des Hüftkopfabstands, des ISG-Abstands ventral und des Abstands zwischen den Köhler'schen Tränenfiguren konnte sie im Vergleich aller Stabilisatoren überwiegend die besten Reduktionsergebnisse vorweisen.

Mutmaßlich könnte der Vorteil der pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] in der Anordnung ihrer pneumatischen Polster begründet sein: Bei korrekter Anlage sind diese jeweils seitlich bzw. leicht dorsal am Becken platziert. Das Aufpumpen des Beckenstabilisators mit optischer Kontrolle des Manometers nach Anlage bewirkt eine zusätzliche Kompression der beiden Beckenhälften im Vergleich zur zirkumferentiellen Druckverteilung nach Anlage des T-POD[®].

Dies erscheint grundsätzlich vorteilhaft. Bei der lateralen Kompressionsverletzung wäre jedoch denkbar, dass eben dieses Design nachteilig sein könnte. Die pneumatischen Polster würden hier zu einer zusätzlichen Kompression der Beckenhälften führen, mit gegebener Möglichkeit einer weiteren Aggravation der Beckenverletzung. Da laterale Kompressionsverletzungen in der Beckenuntersuchung meist federnd imponieren, sollte die Anwendung eines externen, nicht-

invasiven Beckenstabilisators hier mit Vorsicht erfolgen. Zwingend ist eine Überreduktion zu vermeiden.

Ein anderer Vorteil in der Handhabbarkeit der pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] liegt unserer Meinung nach in der Möglichkeit der optischen Kontrolle des applizierten Drucks: Während der Druck bei T-POD[®], Tuschlinge[®] und SAM Sling[®] letztendlich „nach Gefühl“ gewählt wird, kann dieser bei der Beckenschlinge VBM[®] jederzeit und simpel am Manometer abgelesen werden. Dies ist grundsätzlich als positiv zu bewerten, sodass ein Druckverlust objektiviert und genauestens korrigiert werden kann, vermutlich ohne eine Überreduktion zu bewirken.

Es gibt nur wenige Studien, die sich bis dato den biomechanischen Aspekten der externen Beckenstabilisatoren gewidmet haben. Insbesondere die Entwicklung der Zugkräfte im zeitlichen Verlauf nach Anlage eines Beckenstabilisators ist nicht vorbeschrieben, da die Untersuchung technisch schwierig umzusetzen ist und multiple Einflussgrößen ebenso auf die Zugkräfte einwirken.

In den biomechanischen Messungen zur Kinetik der pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] zeigte dieser Beckenstabilisator durchschnittlich die niedrigsten Spitzenzugkräfte. Dabei imponierte nur ein geringer Unterschied in der Spitzenzugkraft zwischen applizierten 100 und 200mmHg (73 vs. 82N). Ebenso vermochte die pneumatische Beckenschlinge VBM[®] im Vergleich zu den anderen Stabilisatoren ihre Zugkraft im zeitlichen Verlauf am konstantesten halten zu können. Jedoch zeigte sie - wie alle getesteten Beckenstabilisatoren – einen Zugkraftverlust im zeitlichen Verlauf: Zwei Minuten nach Anlage hatten sich die durchschnittlichen Zugkräfte bei angelegtem Druck von 100mmHg fast halbiert, bei angelegtem Druck von 200mmHg nur um fast 25% verringert. Im Vergleich dazu zeigte sich beim T-POD[®] innerhalb von zwei Minuten ein Druckverlust von durchschnittlich 64%, die Tuschlinge wies einen kompletten Druckverlust bis in Negativwerte auf. Bei der SAM Sling[®] kam es zu einem Druckverlust von 79%.

Durch die geringere benötigte Spitzenzugkraft und die geringe Druckabnahme im zeitlichen Verlauf ließe sich schlussfolgern, dass es ebenso zu einer geringeren mechanischen Manipulation am frakturierten Becken durch die Beckenstabilisatoranlage kommt.

Auch im klinischen Alltag zeigt sich häufig, dass die externen, nicht-invasiven Beckenstabilisatoren im zeitlichen Verlauf nachgezogen bzw. erneut gespannt werden müssen. Ursächlich für den Druckverlust dürften eine Druckverteilung im Weichteilgewebe, eine Umverteilung von Lympflüssigkeit und Blut in venöse Kapazitätsgefäße sowie die Reposition

der Beckenverletzung sein. In unserer Studie an verstorbenen Patienten wird ebenso die Leichenstarre einen potentiellen Effekt auf die Ergebnisse gehabt haben (siehe 4.2.2). Die Tatsache, dass die pneumatische Beckenschlinge VBM[®] in unserer Studie den geringsten Zugkraftverlust und damit einhergehend den geringsten Druckverlust zeigte, soll an dieser Stelle als deutlicher Vorteil dieses Beckenstabilisators hervorgehoben werden.

In der Anwendungsanleitung der pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] wird ein auf Expertenmeinungen basierender zu applizierender Druck von 100mmHg angegeben. Aufgrund der signifikant besseren Reduktionsergebnisse beim Großteil der gemessenen Parameter sowie der biomechanischen Ergebnisse, kann eine Empfehlung zur Änderung dieser Angabe in der Anwendungsanleitung auf 200mmHg gegeben werden. Die vernachlässigbaren Unterschiede in der gemessenen Spitzenzugkraft untermauern diese Empfehlung zusätzlich.

Bis dato gibt es unserer Kenntnis nach neben Einzelfallbeschreibungen nur vereinzelte Studien, die sich mit dem potentiellen Risiko von Druckulcera durch Anlage eines Beckenstabilisators beschäftigen:

Aufgrund der Ergebnisse ihrer Studie an gesunden Probanden empfehlen Jowett et al. die Beckenstabilisierung mittels externem, nicht-invasiven Beckenstabilisator auf eine maximale Zeitspanne von drei Stunden zu begrenzen (129). So konnten Druckwerte von 5 bis 33kPa an unterschiedlichen Lokalisation am Beckenring nach Applikation eines Beckenstabilisators gemessen werden (129). Die Empfehlung zur zeitlichen Begrenzung auf maximal drei Stunden fußt auf der theoretischen Berechnung, dass die Applikation von mehr als 9,3kPa (=70 mmHg) auf Hautgewebe für mehr als drei Stunden zu entsprechenden Gewebsschäden im Sinne von Druckulcera führen kann (129). Knops et al. konnten mit ihrem Modellversuch ähnliche Ergebnisse produzieren, dies resultierte ebenfalls in der Empfehlung, die Applikation der Beckenstabilisatoren auf ein klinisch vertretbares zeitliches Minimum zu begrenzen (130). Auch Prasarn et al. beschrieben für den Pelvic Binder[®], T-POD[®], SAM Sling[®] und eine Tuschlinge gemessene Druckwerte zwischen 23 und 41 kPa und warnten daher vor potentiellen Hautnekrosen (131). Sie empfahlen, die operative Versorgung der instabilen Beckenversorgung sobald wie möglich zu realisieren (131).

Sowohl Krieg et al. sowie Schaller et al. wussten je von einem Patienten mit instabiler Beckenverletzung zu berichten, bei dem nach mehrstündiger Applikation einer entsprechenden Vorrichtung zur Beckenstabilisierung (PCCD= pelvic circumferential compression device, Modell wird nicht genannt) bzw. einer Tuschlinge druckbedingte Hautveränderungen auftraten

(118,132). Diese normalisierten sich jedoch innerhalb von zehn Wochen unter entsprechender Pflege und ohne operative Intervention (118).

Ein Extremfall von Weichteilnekrosen nach einwöchiger Beckenstabilisierung durch eine Tuschlinge wird von Mason et al. beschrieben: Aufgrund gravierender Begleitverletzungen nach einem sogenannten Crush Injury stand zunächst die operative Versorgung von Aorta, Vena cava inferior, Dick- sowie Dünndarm per Laparotomie im Vordergrund (116). Die definitive Versorgung der instabilen Beckenverletzung im Rahmen des Damage Control Surgery Prinzips wurde bei hämodynamischer Stabilität des Patienten unter Applikation einer Tuschlinge für einen späteren Zeitpunkt geplant, jedoch fielen nach drei Tagen Druckstellen im Bereich der anliegenden Tuschlinge auf (116). Unklar bleibt, ob oder inwiefern eine intermittierende Lagerungstherapie des Patienten erfolgte, da die instabile Beckenverletzung erst sieben Tage nach Unfall operativ stabilisiert wurde (116). Mason et al. beschreiben, dass der Patient nach mehreren plastischen Eingriffen mit Weichteillappendeckungen und entsprechend andauerndem Heilungsprozess seinen Weg in einen weitestgehend unabhängigen Alltag geschafft hat (116).

Da es sich bei der pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] um einen primär im deutschsprachigen Raum gebräuchlichen Beckenstabilisator handelt, gibt es keinerlei internationale Daten zur Effektivität oder potentieller Komplikationen. Unter Berücksichtigung der o.g. seltenen, jedoch potentiell gravierenden Komplikation kann für die pneumatische Beckenschlinge VBM[®] aufgrund wesentlich besserer Reduktionsergebnisse daher folgende Empfehlung gegeben werden: Eine Anpassung des empfohlenen Druckniveaus auf 200mmHg sollte erfolgen, bei gleichzeitigem Warnhinweis, die Dauer der Applikation auf wenige Stunden zu begrenzen. In unseren biomechanischen Messungen erzielte die pneumatische Beckenschlinge VBM[®] mit 200mmHg ähnliche Zugkräfte wie der T-POD[®], wobei es zu letzterem keine Publikationen zu Komplikationen nach Anlage am lebenden Patienten mit instabiler Beckenverletzung gibt. Eine Angleichung an die Druckverhältnisse des T-POD[®] bei vergleichbaren Reduktionsergebnissen bezüglich des intrapelvinen Volumens scheint somit vertretbar.

Da die Applikationsdauer unmittelbar von den Begleitverletzungen und der Prioritätenreihenfolge der operativen Versorgung abhängt, bedarf das Management bezüglich Druck und Anlagezeit jedoch letztendlich immer einer Einzelfallentscheidung.

Bis dato gibt es keine internationalen Studien oder Case Reports zur pneumatischen Beckenschlinge VBM[®]. Eine unserer verwendeten pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] vergleichbare Vorrichtung wurde in einem deutschen Case Report thematisiert (46). Bei dem

genannten Beckenstabilisator handelt es sich ebenfalls um eine pneumatische Beckenschlinge der Firma VBM, die Abbildung zeigt jedoch ein anderes Modell, sodass die Aussagekraft des Case Reports nicht 1:1 auf unseren getesteten Beckenstabilisator übertragbar ist (46). Bei anliegender Beckenschlinge und zur instabilen Beckenverletzung passenden Hämodynamik des Patienten zeigte sich im CT zunächst kein Hinweis auf eine Fraktur (46). Erst nach Entfernung der Vorrichtung war eine Typ-B-Beckenverletzung auf der röntgenologisch angefertigten Beckenübersichtsaufnahme deutlich zu erkennen (46). Dies bestätigt die Effektivität pneumatischer Vorrichtungen - vermochte sie in dem genannten Fallbeispiel zu einer kompletten Reposition der Frakturen zu führen, sodass die Fraktur computertomographisch nicht mehr nachweisbar war. Aufgrund dieses Effekts wird in vielen Kliniken ein präklinisch applizierter Beckenstabilisator bis zu CT-Diagnostik in situ belassen. Imponiert im CT unter appliziertem Beckenstabilisator keine instabile Beckenverletzung, so wird das Becken nochmals klinisch und computertomographisch bzw. röntgenologisch ohne Beckenstabilisator untersucht.

Zusammenfassend konnte die pneumatische Beckenschlinge VBM[®] am ventralen Beckenring und der Beckeneingangsfläche den größten Reduktionseffekt aufweisen. Eine Steigerung des Drucks auf 200mmHg hatte eine signifikante Verbesserung der Flächenreduktion zur Folge und wird daher unter strenger Risiko-Nutzenabwägung für den klinischen Einsatz empfohlen.

4.2.4 T-POD[®]

Der T-POD[®] konnte sehr gute Reduktionsergebnisse bezüglich der Reduktion des intrapelvinen Volumens vorweisen. Da sich der Unterschied zur pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] mit appliziertem Druck von 200mmHg aber nicht signifikant zeigte, kann an dieser Stelle keine eindeutige Empfehlung für oder gegen die pneumatische Beckenschlinge VBM[®] oder den T-POD[®] gegeben werden. Bei der Reduktion der Fläche in der Beckeneingangsebene, dem Hüftkopfabstand, dem Abstand zwischen den Köhler'schen Tränenfiguren und dem ventralen ISG-Abstand zeigte der T-POD[®] signifikant geringere Reduktionsergebnisse als die pneumatische Schlinge VBM[®] mit appliziertem Druck von 200mmHg, sodass letztere für die Reduktion der genannten Parameter vorteiliger erscheint.

In der biomechanischen Kraftmessung zeigte sich, dass der T-POD[®] zum Erzielen der Reduktion des intrapelvinen Volumens initial ein deutlich höheres Kraftmaximum, dann jedoch im zeitlichen Verlauf deutlich geringere Kräfte als die pneumatische Beckenschlinge VBM[®] mit 200mmHg benötigte. Es lässt sich mutmaßen, dass der T-POD[®] aufgrund seines Designs mit

gleichmäßig zirkumferentiell wirkendem Druck zur initialen Reposition der Beckenverletzung – insbesondere vermutlich des hinteren Beckenrings - höhere Drücke benötigt, als die pneumatische Beckenschlinge VBM[®]. Im zeitlichen Verlauf bleibt die Reduktion des intrapelvinen Volumens dann jedoch im Vergleich bei deutlich niedrigeren Drücken erhalten. Dies ist im Hinblick auf die oben genannte potentielle Komplikation von Hautnekrosen als positiv zu bewerten und als Vorteil des T-POD[®] zu betonen.

Knops et al. konnten mit ihrer Studie zeigen, dass der T-POD[®] im Vergleich zur SAM Sling[®] und dem Pelvic Binder für eine suffiziente Reposition der Symphysenweite mit durchschnittlichen 43 Newton die geringsten Zugkräfte benötigte (75). In unserer Studie benötigte der T-POD[®] mit durchschnittlichen 110N ebenfalls deutlich niedrigere Spitzenzugkräfte als die SAM Sling[®] (130N). Diese lagen jedoch dennoch deutlich oberhalb der bei der pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] ermittelten Maximalkraft (73 bzw. 82N bei 100 bzw. 200mmHg).

Bis dato gibt es zu potentiellen Komplikationen nach Anlage des T-POD[®] in der internationalen Literatur nur einen Case Report: Garner et al. zeigten die Limitationen der Anlage externer, nicht-invasiver Beckenstabilisatoren am Beispiel eines Patienten mit einer lateralen Kompressionsfraktur des Beckens auf (113). Bei diesem Patienten kam es nach Anlage des T-POD[®] zur hämodynamischen Instabilität (113). Dabei bleibt jedoch unklar, inwiefern die Begleitverletzungen des Patienten, wie z.B. die Leberverletzung, ebenfalls auf die hämodynamische Instabilität Einfluss nahmen (113).

Von allen getesteten, spezifischen Vorrichtungen, sind für den T-POD[®] die meisten Studien und Case Reports zu finden – überwiegend aus dem angloamerikanischen Raum (77,78,80,81,127,134): So konnte der T-POD[®] beispielsweise im direkten Vergleich mit einer Tuchslinge deutlich bessere Ergebnisse bezüglich der Reduktion der Symphysenweite aufzeigen (76). Dies bestätigen die Daten unserer Studie ebenfalls, jedoch zeigten sich die Unterschiede größtenteils nicht signifikant.

Einem Großteil dieser Studien ist gemein, dass alle Daten an Kadavern mit artifiziellen Beckenfrakturen produziert wurden: Knops et al. zeigten, dass der T-POD[®] im Vergleich zum Pelvic Binder und der SAM Sling[®] für eine suffiziente Reduktion des intrapelvinen Volumens die niedrigsten Zugkräfte benötigte (75). DeAngelis et al. wiesen eine deutlich bessere Reduktion der Symphysenweite durch den T-POD[®] im Vergleich zur Tuchslinge nach (76).

Prasarn et al. untersuchten, inwieweit der T-POD[®] im Vergleich zur externen, operativen Beckenstabilisierung dem artifiziell frakturiertem Becken bei Umlagerung und Bewegung des Kadavers Stabilität bieten kann: Sie konnten zeigen, dass es bei beiden Gruppen zu keinen signifikanten Unterschieden bezüglich etwaiger Frakturdislokationen kam und postulierten daher, dass der T-POD[®] dem frakturierten Becken eine ähnliche Stabilität wie die externe, operative Beckenstabilisierung bieten kann (133). Beim Vergleich von T-POD[®] und Tuschlinge konnte die Forschungsgruppe jedoch ebenfalls keine signifikanten Unterschiede bezüglich Dislokationen darstellen (126).

Unsere Ergebnisse sind nicht vollkommen mit diesen Daten vergleichbar, für den klinischen Vergleich mit reell verunfallten Patienten jedoch besser übertragbar.

Die retrospektive Analyse von Croce et al. an 186 real verunfallten Patienten ergab einen Vorteil bezüglich Transfusionsrate, Mortalität und Länge des Klinikaufenthalts bei Patienten, die im Schockraum unmittelbar mit dem T-POD[®] stabilisiert wurden im Vergleich zur Kontrollgruppe, die per Embolisation oder operativer Beckenstabilisierung versorgt wurden (79).

Ebenso postulierten Tan et al. mit ihrer Studie an zwölf Patienten, dass der T-POD[®] zum einen die Symphysenweite signifikant reduzieren konnte (um 60%) und zum anderen signifikante Effekte auf die Verbesserung der hämodynamischen Situation der Patienten hatte (78). Die Evaluation der Effektivität erfolgte per Beckenübersichtsaufnahme oder CT (78). Bei den Beckenverletzungen handelte es sich um neun Typ-B-Verletzungen und sechs Typ-C-Verletzungen (Gesamtkollektiv 15 Patienten), drei Patienten zeigten eine progrediente hämodynamische Instabilität, sodass die Aufnahme nach T-POD[®]-Anlage nicht erfolgen konnte (78). Wir konnten in unserer Studie eine eingeschränkte Aussagekraft bezüglich der Reduktion der Symphysenweite zeigen, unser Patientenkollektiv zeigte jedoch ausschließlich Typ-C-Verletzungen. Letztendlich erfolgte in der genannten Studie jedoch auch kein Vergleich mit anderen Vorrichtungen zur Beckenstabilisierung (78).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der T-POD[®] das intrapelvine Volumen vergleichbar zu reduzieren vermochte wie die pneumatische Beckenschlinge VBM[®] mit 200mmHg. Bezüglich aller anderen gemessenen Parameter zeigte er sich der pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] mit 200mmHg unterlegen. Der T-POD[®] benötigte im Vergleich zur pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] zwar durchschnittlich höhere Spitzenzugkräfte, konnte aber die Reduktion des intrapelvinen Volumens bei geringeren Zugkräften beibehalten.

4.2.5 Tuschlinge

Die Tuschlinge schnitt im Vergleich zur pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] und dem T-POD[®] vor allem bezüglich der Reduktion von intrapelvinem Volumen, Beckeneingangsfläche, Hüftkopfabstand, des Abstands zwischen den Köhler'schen Tränenfiguren und des ventralen ISG-Abstands schlechter ab. Zwar konnte die Tuschlinge für alle gemessenen Parameter Reduktionen aufweisen, diese fielen im Vergleich zur Beckenschlinge VBM[®] und dem T-POD[®] jedoch teils signifikant geringer aus.

Nichtsdestotrotz zeigten sich insbesondere die Reduktion des pelvinen Volumens und der Fläche in der Beckeneingangsebene im Vergleich zu den Nativ-Scans signifikant. Somit gilt die Empfehlung, dass die Anlage einer Tuschlinge bei mangelnder Vorhaltung eines spezifischen Beckenstabilisators wie der pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] oder dem T-POD[®] der Nicht-Stabilisierung der instabilen Beckenverletzung jederzeit vorzuziehen ist. Wir weisen jedoch nochmals auf die notwendige Aufnahme eines spezifischen Beckenstabilisators in die DIN-Norm zur Ausstattung von NEF, RTW und RTH hin.

Die Empfehlung des Gebrauchs einer Tuschlinge anstatt des Unterlassens der externen, nicht-invasiven Beckenstabilisierung wird durch die internationale Literatur unterstützt: Über keine Vorrichtung zur Beckenstabilisierung lassen sich vergleichbar viele Empfehlungen, Einzelfallbeschreibungen und Kadaverstudien finden (29,31,35,38,53,55,75,76,80,83,121,126,134–136). Dass auch die Anlage einer herkömmlichen Tuschlinge zu reduktiven Effekten am frakturierten Becken führt, konnten beispielsweise DeAngelis et al. mit ihrer Kadaverstudie demonstrieren: Die Tuschlinge zeigte jedoch im Vergleich zum T-POD[®] bezüglich der Reduktion der Symphysenweite deutlich schlechtere Ergebnisse (76).

Unsere Daten unterstützen die Ergebnisse mehrerer Einzelfallstudien: Simpson et al. konnten beispielsweise für zwei Patienten mit Typ-B-Beckenverletzungen eine suffiziente, auch wenn teils nur partielle Frakturposition mittels herkömmlicher Tuschlinge zeigen (80). Vardon et al. zeigten, dass sich die initiale Stabilisierung mittels Tuschlinge bei ihrem Patienten mit einer Typ-C-Beckenverletzung insuffizient zeigte und erst mit der Anlage einer weiteren Tuschlinge die suffiziente Beckenposition erreicht werden konnte (111).

Die Eigenschaft, die höchste Spitzenkraft unmittelbar nach Anlage zu erreichen, hatten alle vier externen, nicht-invasiven Beckenstabilisatoren gemeinsam. Unsere Studie konnte zeigen, dass die gemessenen Zugkräfte dann jedoch im Verlauf rasch abnahmen, vermutlich aufgrund von

einer Druckverteilung im Weichteilgewebe, einer Umverteilung von Lympheflüssigkeit, der Reposition der Beckenverletzung sowie dem Einfluss der Leichenstarre.

Dieser Effekt zeigte sich am deutlichsten bei der Tuschlinge und der SAM Sling®: Die Tuschlinge konnte als einzige Vorrichtung zwei Minuten nach Anlage sogar Negativwerte für ihre durchschnittlichen Zugkräfte aufweisen. Dies wird direkt mit der Knotung im Bereich des ventralen Beckens und/oder der Beschaffenheit des Materials mit konsekutivem Druckverlust einhergehen und stellt die wesentliche Limitation der Anwendung einer Tuschlinge dar. Die Ergebnisse (hohe Maximalkraft, zügiger Kraftverlust) lassen sich gut mit dem schmalen Design der Tuschlinge erklären: Die Tuschlinge zeigt im vorderen Bereich – wenn korrekt appliziert - aufgrund der ventralen Verknotungstechnik nur eine Breite von wenigen Zentimetern. Interessanterweise hatte die gemessene hohe Maximalzugkraft keinen höheren reduktiven Einfluss auf die Qualität bzw. Effektivität der Reduktion von intrapelvinem Volumen oder Beckeneingangsfläche: Unsere Studie konnte zeigen, dass die Reduktionsergebnisse der Tuschlinge wesentlich schlechter waren, als die der spezifischen Beckenstabilisatoren.

Letztendlich lässt sich vermuten, dass die reduktive Wirkung der Tuschlinge in nicht unerheblichem Maße von der Rigidität des verwendeten Materials sowie vom Widerstand des Knotens am Textil abhängig ist. Ebenso ist die Breite der Tuschlinge und damit die Auflagefläche nicht einheitlich und hängt direkt vom verwendeten Material und der verwendeten Muskelkraft des Anwenders ab.

Zusammenfassend lassen die Ergebnisse unserer Studie sowie die internationalen Daten folgende Schlussfolgerung zu: Eine Beckenstabilisierung mittels Tuschlinge sollte nicht unterlassen werden, da sie nachgewiesene, positive Effekte auf die Frakturposition und vermutlich auch die Hämodynamik des Patienten hat. Bei Möglichkeit der Anwendung einer spezifischen, für die Beckenstabilisierung entworfenen Vorrichtung wie einer pneumatischen Beckenschlinge oder dem T-POD® sollte in jedem Fall dieser Vorzug gegeben werden.

4.2.6 SAM Sling®

Die SAM Sling® konnte als weiterer spezifischer Beckenstabilisator suffiziente Reduktionsergebnisse vorweisen: So zeigte sie für fast alle gemessenen Parameter (intrapelvinisches Volumen, Beckeneingangsfläche, Symphysenweite, Hüftkopfabstand, Abstände zwischen den Köhler'schen Tränenfiguren und ventraler ISG-Abstand) im Vergleich zu den Nativ-Scans

entsprechende Reduktionswerte. Für den dorsalen ISG-Abstand konnten keine reduktiven Effekte gemessen werden.

Die Reduktionsergebnisse fielen allerdings insgesamt geringer aus, als bei allen anderen getesteten Beckenstabilisatoren. Aufgrund der deutlich niedrigeren Fallzahl (n=5) ließen sich jedoch keine signifikanten Unterschiede feststellen. Die computertomographisch ermittelten Ergebnisse der SAM Sling® sind daher nur eingeschränkt aussagekräftig.

Volle Aussagekraft haben jedoch die Ergebnisse der biomechanischen Messungen: Die bereits erwähnte Eigenschaft, die höchste Spitzenkraft unmittelbar nach Anlage zu erreichen, mit zügiger Abnahme der gemessenen Zugkräfte im Verlauf, zeigten sich – neben der Tuschlinge – auch bei der SAM Sling® deutlich: So zeigte die SAM Sling® bereits nach zwei Minuten eine Reduktion der Zugkräfte um fast 80%. Diese Ergebnisse (höchste Spitzenzugkraft, zügiger Kraftverlust) lassen sich gut mit dem schmalen Design der SAM Sling® erklären: Die SAM Sling® zeigt im vorderen Bereich – wenn korrekt appliziert - nur eine Breite von wenigen Zentimetern. Ähnlich der Tuschlinge scheint der reduktive Effekt auch direkt abhängig von der Muskelkraft des anlegenden Anwenders zu sein und davon abgeleitet, an welchem Punkt die Schnallenfixierung des Gurtes letztendlich einschnappt.

Somit benötigt die SAM Sling® für eine suffiziente Frakturposition und –reduktion entsprechend höhere Spitzenzugkräfte. Unsere Resultate finden in der internationalen Literatur Bestätigung: Knops et al. zeigten in ihrer Kadaverstudie, dass die SAM Sling® im Vergleich zum T-POD® und dem Pelvic Binder für die suffiziente Frakturposition bei Typ-B- sowie Typ-C-Beckenverletzungen deutlich höhere Zugkräfte benötigte (durchschnittliche 112N vs. 43N bzw. 60N), während dem T-POD® diese Reposition bereits bei einem Drittel der Zugkraft gelang (75). Limitierend gilt zu erwähnen, dass eine höhere Druckapplikation als 150N für die SAM Sling® aufgrund der Autostop-Vorrichtung in der Kadaverstudie nicht möglich war (75). Dies deckt sich nicht mit unseren Ergebnissen: Wir konnten an zwei von fünf Patienten Maximalkraftwerte messen, die 150 Newton deutlich überschritten (217 bzw. 187N). Die von Knops et al. ermittelten Drücke wurden jeweils unmittelbar bei Anlage der jeweiligen Vorrichtung am artifiziell frakturiertem Becken gemessen (75). Somit lassen sich die Zugkräfte dieser Studie nur mit unseren Werten zur Maximalkraft vergleichen: Die Ergebnisse können wir insofern bestätigen, als dass der T-POD® auch in unserer Studie eine suffiziente Reduktion mit durchschnittlich geringeren Zugkräften erzielte als die SAM Sling® (110 vs. 130N).

Bottlang et al. maßen in ihrer Kadaverstudie sogar durchschnittliche 180 Newton bei korrekter Applikation auf Höhe der großen Trochanteren, um eine suffiziente Frakturposition bei

artifiziellen Typ-B-Beckenverletzungen erzielen zu können (57). Unsere Daten mit durchschnittlich benötigten 130N liegen entsprechend zwischen den von Knops et al. sowie Bottlang et al. ermittelten Zugkraftwerten.

Neben T-POD[®] und Tuchslinge wird auch die SAM Sling[®] in der internationalen Literatur mehrfach erwähnt und Gebrauchsempfehlungen ausgesprochen, ohne dies jedoch mit belastbaren Daten untermauern zu können (41,56,78,111,137).

Bis dato gibt es nur vier Studien zur SAM Sling[®] bzw. ihrem Prototyp: Bonner et al. konnten mit ihrer 17 Patienten umfassenden Studie zeigen, dass die SAM Sling[®] eine suffiziente Reduktion der Symphysenweite bei nicht-artifiziellen Typ-B- und Typ-C-Verletzungen zu erzielen vermochte (128). Bottlang et al. bestätigten mit ihrer Kadaverstudie, dass die besten Repositionsergebnisse erzielt wurden, wenn ein Prototyp der SAM Sling[®] auf Höhe der großen Trochanteren angelegt wurde (57). Auch eine 16 Patienten umfassende Studie konnte dies für einen dem SAM Sling[®] ähnelnden Stabilisator bestätigen (77). Knops et al. zeigten mit ihrer Kadaverstudie, dass SAM Sling[®], Pelvic Binder und T-POD[®] allesamt suffiziente Frakturpositionen des verletzten Beckens aufwiesen (75).

Letztendlich lässt sich zwar schlussfolgern, dass eine Reduktion und Reposition der Beckenfraktur mittels SAM Sling[®] erreicht werden kann. Sie scheint letztlich in ihrer Effektivität - im Vergleich zu T-POD[®] und pneumatischer Beckenschlinge VBM[®] - aber deutlich unterlegen zu sein.

4.3 Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse

Unsere Studie konnte die folgenden, wesentlichen Ergebnisse hervorbringen:

1.) Die instabile Beckenverletzung zeigte sich nur in 19% als Hauptblutungsquelle. Sie ist damit als Surrogatparameter für weitere, schwere Verletzungen – insbesondere abdominell – zu werten.

2.) Alle getesteten Beckenstabilisatoren konnten die wesentlichen Parameter wie das intrapelvine Volumen und die Fläche in der Beckeneingangsebene suffizient reduzieren. Daher ist bei Detektion von instabilen Beckenverletzungen die Anlage eines externen, nicht-invasiven Beckenstabilisators zu fordern.

Gewarnt werden sollte bei in der klinischen Untersuchung deutlich federnden Beckenhälften: Typischerweise kann es sich hierbei um eine laterale Kompressionsfraktur handeln, bei der die

Anlage eines nicht-invasiven externen Beckenstabilisators mit Bedacht und Vorsicht erfolgen muss, um Sekundärschäden zu vermeiden.

3.) Die spezifischen externen, nicht-invasiven Beckenstabilisatoren pneumatische Beckenschlinge VBM[®] und T-POD[®] konnten im Vergleich zur herkömmlichen Tuschlinge größtenteils signifikant bessere Reduktionsergebnisse aufweisen. Daher ist eine Vorhaltung dieser spezifischen Beckenstabilisatoren zu fordern. Es sollte eine Anpassung der DIN-Norm für die Ausstattung der Rettungsmittel erfolgen.

4.) Die pneumatische Beckenschlinge VBM[®] zeigte bei applizierten 200mmHg fast ausschließlich signifikant bessere Reduktionsergebnisse als bei applizierten 100mmHg. Da sich die Spitzenzugkräfte bei beiden Drücken nur minimal unterschieden, kann eine Empfehlung für die Anpassung des empfohlenen Druckniveaus auf 200mmHg in der Herstelleranleitung gegeben werden.

5.) Alle getesteten Beckenstabilisatoren zeigten einen Zugkraftverlust im zeitlichen Verlauf – wenn auch in unterschiedlichem Maße. Für die klinische Handhabung kann daher eventuell eine Nachadjustierung der Beckenstabilisatoren vonnöten sein.

4.4 Zusammenfassende Beantwortung der initialen Fragestellungen

4.4.1 Was sind die zur instabilen Beckenverletzung führenden Unfallmechanismen?

Wir konnten mit unserer Studie in der Metropole Berlin für Patienten mit instabiler Beckenverletzung drei führende Unfallmechanismen zeigen: Führend zeigten sich Stürze aus großer Höhe gefolgt von Zugüberrollungen und Verkehrsunfällen.

4.4.2 Was sind die führenden Begleitverletzungen bei polytraumatisiert verstorbenen Patienten mit instabiler Beckenfraktur?

In unserem Patientenkollektiv zeigte sich neben der Gemeinsamkeit der instabilen Beckenverletzung eine sehr hohe Inzidenz an Verletzungen am oder im Thorax. Den thorakalen Verletzungen folgten peripelvine Weichteilverletzungen und das Schädel-Hirn-Trauma.

Es konnte aufgrund der Untersuchung der Begleitverletzungen gezeigt werden, dass es sich bei unserem Studienkollektiv um schwerst-polytraumatisierte Patienten handelte.

4.4.3 Wie häufig ist die instabile Beckenverletzung die Hauptblutungsquelle und welche klinisch-therapeutische Konsequenz ergibt sich daraus?

Die instabile Beckenverletzung zeigte sich in unserem Kollektiv nur in rund 19% als führende Blutungsquelle. Gleichzeitig sollte sie als Indikator für gravierende Begleitverletzungen vor allem thorakaler oder abdomineller Organe gelten.

Die Priorisierung der operativen Versorgung muss daher zwingend in Zusammenschau der Begleitverletzungen erfolgen.

4.4.4 Können die am häufigsten angewandten externen nicht-invasiven Beckenstabilisatoren die Fläche der Beckeneingangsebene sowie das pelvine Volumen reduzieren?

Allen getesteten Beckenstabilisatoren gelang die Reduktion des pelvinen Volumens und der Fläche in der Beckeneingangsebene.

4.4.5 Gibt es Unterschiede zwischen den Beckenstabilisatoren bezüglich der Reduktion von Beckeneingangsebene und pelvinem Volumen?

In unserer Studie waren deutliche Unterschiede in der Effektivität der Beckenstabilisatoren bezüglich der Reduktion dieser Größen zu erkennen. Daher ist vor allem die Anwendung des T-POD[®] oder der pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] mit appliziertem Druck von 200mmHg zu empfehlen.

Für den Fall, dass keine spezifische Vorrichtung verfügbar ist, sollte die Stabilisierung mit einer Tuchschnur erfolgen. Diese Methode ist – auch bei schlechteren Reduktionsergebnissen - jederzeit einem Verzicht auf Stabilisierung vorzuziehen.

4.4.6 Kann eine Steigerung des applizierten Drucks bei pneumatischen Beckenschlingen die Beckeneingangsebene und das pelvine Volumen weiter reduzieren?

Die pneumatische Beckenschlinge VBM[®] konnte deutlich bessere Ergebnisse bei Applikation eines Drucks von 200mmHg aufweisen. Wir befürworten daher eine Anpassung der empfohlenen Druckapplikation in der Gebrauchsanweisung.

4.4.7 Gibt es biomechanische Unterschiede zwischen den getesteten externen, nicht-invasiven Beckenstabilisatoren?

Biomechanische Unterschiede ließen sich ebenfalls bei den getesteten Beckenstabilisatoren aufdecken. Erneut zeigten sich die pneumatische Beckenschlinge VBM[®] mit 200mmHg und der T-POD[®] überlegen.

4.4.8 Gibt es einen universell sowie zügig verfügbaren Surrogatparameter, der eine erfolgreiche Reduktion des Beckens bereits vor Anfertigung einer Computertomographie anzeigt?

Die Resultate der Messungen des Hüftkopfabstands zeigten sich deckungsgleich zur Reduktion der Fläche in der Beckeneingangsebene. Daher kann der Hüftkopfabstand mittels röntgenologisch angefertigter Beckenübersichtsaufnahme als zügig verfügbarer Surrogatparameter herangezogen werden.

4.5 Limitationen

Es gilt zu betonen, dass diese Studie an Leichen mit nicht-artifiziellen, instabilen Beckenverletzungen durchgeführt wurde. Zwar konnten hervorragende Resultate durch die Anlage der nicht-invasiven externen Beckenstabilisatoren erzielt werden, alle gemessenen Effekte sind jedoch rein anatomischer und biomechanischer Natur. Aussagen dazu, inwieweit sich die Anlage eines Beckenstabilisators bei instabiler Beckenringverletzung auf die hämodynamischen Parameter des jeweiligen Patienten und konsekutiv auf Outcome und Überlebenschancen auswirkt, können mit dieser Studie nicht getroffen werden.

Aus demselben Grund kann keine Aussage zum potentiellen Auftreten von Haut- und Weichteilnekrosen nach Beckenstabilisator-Anlage gemacht werden. Diese wurden in der Literatur vereinzelt beschrieben, vor allem jedoch nach mehrstündiger bis mehrtägiger Applikation.

Die Verteilung der Messergebnisse der wirkenden Zugkräfte bei angelegtem Beckenstabilisator veranschaulichen, dass bei allen getesteten Vorrichtungen Maximalwerte von mehr als 100 Newton erreicht werden konnten. Folglich vermögen alle Vorrichtungen einen gewissen Druck zu applizieren – zumindest für eine gewisse Zeit. Während die computertomographisch ermittelten Ergebnisse der SAM Sling[®] aufgrund der niedrigen Fallzahl einer geringeren Aussagekraft unterliegen, sind die biomechanischen Resultate dieser Vorrichtung bei identischer Fallzahl zu den anderen Stabilisatoren vollständig interpretierbar.

Ebenso muss ein potentieller Effekt der Leichenstarre sowie die Reihenfolge der Beckenstabilisatoren-Anlage in dieser Studie mit bedacht werden: Beim Großteil der Parameter erzielte die pneumatische Beckenschlinge VBM[®] signifikant bessere Reduktionsergebnisse als die restlichen getesteten Beckenstabilisatoren. Diese wurde standardisiert bei allen Patienten zuerst angelegt (siehe 2.2.4). Der Vergleich der Nativ-Scans untereinander konnte einige signifikante Unterschiede hervorbringen, sodass von einer erhaltenen Restreduktion nach Abnahme der pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] ausgegangen werden muss.

Inwiefern dies einem Effekt der Leichenstarre auf die peripelvine Muskulatur zuzuschreiben ist, oder ob dieser Effekt auch beim lebenden Patienten auftritt, kann nicht abschließend beantwortet werden.

Die beschriebene Restreduktion ließ sich in erster Linie nach Abnahme der pneumatischen Beckenschlinge VBM[®] nachweisen, sodass die folgenden Beckenstabilisatoren „erschwerte“ Bedingungen hatten. Daher wäre denkbar, dass eine andere Reihenfolge bei der Anlage der Beckenstabilisatoren eventuell auch andere Ergebnisse produziert hätte.

Aufgrund der in dieser Studie durchgeführten biomechanischen Messungen konnten wir den bereits häufiger klinisch beobachteten Effekt des Druckverlusts im zeitlichen Verlauf bestätigen und quantifizieren. Es wäre denkbar, dass es durch die Reposition des Beckens und der damit einhergehenden Reduktion von Volumen und Fläche natürlicherweise zu einem Abfall der gemessenen Zugkraft kommt. Ebenso bleibt unklar, wie groß der tatsächliche Einfluss der Leichenstarre auf unsere biomechanischen Ergebnisse ist.

Für die klinische Praxis bleiben daher einige Fragen offen: Muss eine regelmäßige Nachadjustierung des applizierten Drucks am Beckenstabilisator erfolgen, und wenn ja: In welchen zeitlichen Abständen?

Genauso ist unklar, welchen Effekt diese Nachadjustierung auf die instabile Beckenverletzung hätte: Zum einen wäre denkbar, dass es durch die erneute mechanische Manipulation zu einer Dislokation der Frakturteile – welcher Art auch immer – kommen könnte. Zusätzlich birgt die Nachadjustierung die Gefahr der Überreduktion. Beides könnte weitreichende Konsequenzen in Bezug auf Hämodynamik, Beschädigung oder sogar Perforation von intrapelvinen Organen haben. Zum anderen wäre eine Schmerzprovokation und -exazerbation beim nicht-sedierten Patienten im Moment der Nachadjustierung denkbar und bedürfte einer differenzierten Schmerztherapie mit potentiell erneuter vitaler Relevanz.

Es bedarf weiterer Studien, um diese Fragen letztendlich beantworten zu können.

5. Literaturverzeichnis

1. Kleber C, Giesecke MT, Tsokos M, Haas NP, Schaser KD, Poloczek S, Buschmann CT. Overall distribution of trauma-related deaths in Berlin 2010: Advancement or stagnation of German trauma management? *World J Surg.* 2012;36(9):2125–30.
2. Schmelz A, Ziegler D, Beck A, Kinzl L, Gebhard F. Akutstationäre Behandlungskosten polytraumatisierter Patienten. *Unfallchirurg.* 2002;105(11):1043–8.
3. Wick M, Ekkernkamp A, Muhr G. [The epidemiology of multiple trauma]. *Der Chir.* 1997;68(11):1053–8.
4. Keel M, Trentz O. Pathophysiology of polytrauma. *Injury.* 2005;36(6):691–709.
5. Bardenheuer M, Obertacke U, Waydhas C, Nast-Kolb D, AG Polytrauma der DGU. Epidemiologie des Schwerverletzten. *Unfallchirurg.* 2000;103(5):355–63.
6. Meislin H, Criss EA, Judkins D, Berger R, Conroy C, Parks B, Spaite DW, Valenzuela TD. Fatal trauma: the modal distribution of time to death is a function of patient demographics and regional resources. *J Trauma.* 1997;43(3):433–40.
7. Baker CC, Oppenheimer L, Stephens B, Lewis FR, Trunkey DD. Epidemiology of trauma deaths. *Am J Surg.* 1980;140(1):144–50.
8. Cothren CC, Moore EE, Hedegaard HB, Meng K. Epidemiology of urban trauma deaths: A comprehensive reassessment 10 years later. *World J Surg.* 2007;31(7):1507–11.
9. 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;249(2):28–35.
10. Sobrino J, Shafi S. Timing and causes of death after injuries. *Proc (Bayl Univ Med Cent).* 2013;26(2):120–3.
11. Jahresbericht 2014. Cologne, Germany. Sektion Notfall- & Intensivmedizin, Schwerverletztenversorgung (NIS) der Deutschen Gesellschaft für Unfallchirurgie (DGU); Arbeitskreis TraumaRegister, 2014. (Accessed January 17, 2016, at http://www.dgu-online.de/fileadmin/published_content/5.Qualitaet_und_Sicherheit/PDF/2014_TR_DGU_Jahresbericht.pdf)
12. Grotz M, Schwermann T, Lefering R, Ruchholtz S, Graf v.d. Schulenburg JM, Krettek C, Pape HC. DRG-Entlohnung beim Polytrauma - Ein Vergleich mit den tatsächlichen Krankenhauskosten anhand des DGU-Traumaregisters. *Unfallchirurg.* 2004;107(1):68–76.

13. Schwermann T, Grotz M, Blanke M, Ruchholtz S, Lefering R, Graf v.d. Schulenburg JM, Krettek C, Pape HC. Evaluation of costs incurred for patients with multiple trauma particularly from the perspective of the hospital. *Unfallchirurg*. 2004;107(7):563–74.
14. Willenberg L, Curtis K, Taylor C, Jan S, Glass P, Myburgh J. The variation of acute treatment costs of trauma in high-income countries. *BMC Health Serv Res.*; 2012;12(1):267.
15. Oestern HJ. Polytrauma- Entwicklung, Traumaregister und Traumanetzwerk. In: *Das Polytrauma. Präklinisches und klinisches Management*. 1. Auflage. München, Germany. Urban und Fischer. 2008:1-20.
16. Norton R, Kobusingye O. Injuries. *N Engl J Med*. 2013;368(18):1723–30.
17. Definition Polytrauma. DGU Homepage. (Accessed August 7, 2015 at <http://www.dgu-online.de/en/patienteninformation/haeufige-diagnosen/schwerverletzte/polytrauma.html>.)
18. Oestern HJ, Regel G. Allgemeine Aspekte. In: *Tscherne H, Regel G. Tscherne Unfallchirurgie - Trauma-Management*. 1. Auflage. Berlin Heidelberg. Springer-Verlag. 1997:225-238.
19. Butcher N, Balogh ZJ. The definition of polytrauma: the need for international consensus. *Injury*. 2009;40:12–22.
20. Pape HC, Lefering R, Butcher N, Peitzman A, Leenen L, Marzi I, Lichte P, Josten C, Bouillon B, Schmucker U, Stahel P, Giannoudis P, Balogh Z. The definition of polytrauma revisited. *J Trauma Acute Care Surg*. 2014;77(5):780–6.
21. Brohi K. Abbreviated Injury Scale (AIS) Score - Overview of the anatomical scoring tool (Accessed August 13, 2015 at <http://www.trauma.org/index.php/main/article/510/>)
22. Paffrath T, Lefering R, Flohe S, TraumaRegister DGU. How to define severely injured patients?— An Injury Severity Score (ISS) based approach alone is not sufficient. *Injury*. 2014;45(Suppl 3):64–9.
23. Kleber C, Haas NP, Schaser KD. Packing des kleinen Beckens bei Beckenringverletzungen. *Chir - Mitteilungen des BÖC und der ÖGC*. 2012;01:14–9.
24. Siegmeth A, Müllner T, Kukla Ch, Vécsei V. Begleitverletzungen beim schweren Beckentrauma. *Unfallchirurg*. 2000;103(7):572–81.
25. Pohlemann T, Stengel D, Tosounidis G, Reilmann H, Stuby F, Stöckle U, seekamp A, Schmal H, Thannheimer A, Holmenschlager F, Gänsslen A, Rommens PM, Fuchs T, Baumgärtel F, Marintschev I, Krischak G, Wunder S, Tscherne H, Culemann U. Survival trends and predictors of mortality in severe pelvic trauma: Estimates from the German Pelvic Trauma Registry Initiative. *Injury*. 2011;42(10):997–1002.

26. Rommens PM, Heinermann M, Hessmann MH. Notfallmanagement instabiler Beckenverletzungen. *Notfall & Rettungsmedizin*. 2004;7(3):151–60
27. Ellinger K, Genzwürker H. *Kursbuch Notfallmedizin*. 2. Auflage. Köln, Germany. Deutscher Ärzte-Verlag. 2011:456-608
28. Mittelmeier T, Beck M. Verletzungen von Becken und Azetabulum. *Trauma und Berufskrankheit*. 2009;11(1):97–106.
29. McCormack R, Strauss EJ, Alwattar BJ, Tejwani NC. Diagnosis and management of pelvic fractures. *Bull NYU Hosp Jt Dis*. 2010;68(4):281–91.
30. Hauschild O, Strohm PC, Culemann U, Pohlemann T, Suedkamp NP, Koestler W, Schmal H. Mortality in Patients With Pelvic Fractures : Results From the German Pelvic Injury Register. *J Trauma*. 2008;64(2):449–55.
31. Grotz MR, Allami MK, Harwood P, Pape HC, Krettek C, Giannoudis PV. Open pelvic fractures : epidemiology, current concepts of management and outcome. *Injury*. 2005;36(1):1–13.
32. Holstein JH, Culemann U, Pohlemann T, Working Group Mortality in Pelvic Fracture Patients. What are Predictors of Mortality in Patients with Pelvic Fractures ? *Clin Orthop Relat Res*. 2012;470(8):2090–7.
33. Wohlrath B, Trentzsch H, Hoffmann R, Kremer M, Schmidt-Horlohè K, Schweigkofler U. Präklinische und klinische Versorgung der instabilen Beckenverletzung. Ergebnisse einer Online-Umfrage. *Unfallchirurg*. 2016;119:755-762.
34. Pohlemann T. Becken. In: Weigel B, Nerlich ML. *Praxisbuch Unfallchirurgie*. 2. Auflage. Berlin, Germany. Springer-Verlag. 2011:475-489
35. Smith WR, Moore EE, Osborn P, Agudelo JF, Morgan SJ, Parekh AA, Cothren C. Retroperitoneal packing as a resuscitation technique for hemodynamically unstable patients with pelvic fractures: report of two representative cases and a description of technique. *J Trauma*. 2005;59(6):1510–4.
36. Deutsche Gesellschaft für Unfallchirurgie. S3 – Leitlinie Polytrauma/ Schwerverletzten-Behandlung. 2011. (Accessed August 13, 2015 at http://www.awmf.org/uploads/tx_szleitlinien/012-019l_S3_Polytrauma_Schwerverletzten-Behandlung_2017-08.pdf)
37. Culemann U, Oestern HJ, Pohlemann T. Aktuelle Behandlung der Beckenringfraktur. *Der Chir*. 2013;84:809–25.
38. Rice PL, Rudolph M. Pelvic Fractures. *Emerg Med Clin North Am*. 2007;25:795–802.
39. Buschmann CT, Gahr P, Tsokos M, Ertel W, Fakler JK. Clinical diagnosis versus autopsy

- findings in polytrauma fatalities. *Scand J Trauma Resusc Emerg Med*; 2010;18(1):55.
40. Tittel K. Beckengürtel. In: Tittel K. Beschreibende und funktionelle Anatomie. 14.Auflage. München Jena, Germany. Urban & Fischer Verlag. 2003:169-176.
 41. Riepl C, Beck A, Kraus M. Präklinisches Management von Beckenverletzungen. *Der Notarzt*. 2012;28(03):125–36.
 42. Gasche T. Zur Problematik von Beckenringverletzungen mit kritischer Analyse externer Fixationssysteme. 2006; (Accessed on August 13, 2015 at http://edoc.ub.uni-muenchen.de/9000/1/Gasche_Tino.pdf)
 43. Rise C, Heisel C. Hüfte und Becken. In: Flechtenmacher J, Sabo D. Praktische Röntgendiagnostik Orthopädie und Unfallchirurgie: Indikation, Einstelltechnik, Strahlenschutz. Karlsruhe Heidelberg, Germany. Thieme Verlag. 2014:115-124.
 44. Seekamp A, Burkhardt M, Pohlemann T. Schockraummanagement bei Verletzungen des Beckens. *Unfallchirurg*. 2004;107(10):903–10.
 45. Pohlemann T, Culemann U, Gänsslen A, Tscherne H. Die schwere Beckenverletzung mit pelviner Massenblutung: Ermittlung der Blutungsschwere und klinische Erfahrung mit der Notfallstabilisierung. *Unfallchirurg*. 1996;99(10):734–43.
 46. Szalay G, Meyer C, Schaumberg A, Mann V, Weigand MA, Schnettler R. Stabilisierung instabiler Beckenfrakturen mittels pneumatischer Beckenschlinge im Schockraum. *Notfall Rettungsmed*. 2009;13(1):47–51.
 47. Tile M. Becken. In: Müller ME, Allgöwer M, Schneider R, Willenegger H. Manual der Osteosynthese: AO-Technik. 3. Auflage. Berlin Heidelberg, Germany. Springer Verlag. 1992:485-500.
 48. Grifka J. Hüftregion. In: Grifka J, Krämer J. Orthopädie Unfallchirurgie. 9.Auflage. Berlin Heidelberg, Germany. Springer Verlag. 2013:289-325.
 49. Gonzalez RP, Fried PQ, Bukhalo M. The Utility of Clinical Examination in Screening for Pelvic Fractures in Blunt Trauma. *J Am Coll Surg*. 2002;194(2):121–5.
 50. Sauerland S, Bouillon B, Rixen D, Raum MR, Koy T, Neugebauer EA. The reliability of clinical examination in detecting pelvic fractures in blunt trauma patients: A meta-analysis. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2004;124(2):123–8.
 51. Pehle B, Nast-Kolb D, Oberbeck R, Waydhas C, Ruchholtz S. Wertigkeit der körperlichen und radiologischen Basisdiagnostik des Beckens in der Schockraumbehandlung. *Unfallchirurg*. 2003;106(8):642–8.
 52. American College of Surgeons Committee on Trauma. ATLS: Advanced Trauma Life Support for Doctors (Student Course Manual). 8. Edition. Chicago, IL, USA. 2008:1-211.

53. White CE, Hsu JR, Holcomb JB. Haemodynamically unstable pelvic fractures. *Injury*. 2009;40(10):1023–30.
54. Metcalfe AJ, Davies K, Ramesh B, O'Kelly A, Rajagopal R. Haemorrhage control in pelvic fractures - A survey of surgical capabilities. *Injury*. 2011;42(10):1008–11.
55. Hou Z, Smith WR, Strohecker KA, Bowen TR, Irgit K, Baro SM, Morgan SJ. Hemodynamically Unstable Pelvic Fracture Management by Advanced Trauma Life Support Guidelines Results in High Mortality. *Orthopedics*. 2012;35(3):319–24.
56. Scott I, Porter K, Laird C, Greaves I, Bloch M. The prehospital management of pelvic fractures. *Emerg Med J*. 2013;30(12):1070–2.
57. Bottlang M, Krieg J, Mohr M, Simpson TS, Madey SM. Emergent management of Pelvic ring fractures with use of circumferential compression. *J Bone Joint Surg Am*. 2002;84(A Suppl 2):43-7.
58. Sturm JA, Polytrauma. In: Benzer H, Burchardi H, Larsen R, Suter PM. *Lehrbuch der Anästhesiologie und Intensivmedizin: Band 2: Intensivmedizin*. 6. Auflage. Berlin Heidelberg, Germany. Springer-Verlag. 1993:693-697
59. Köhler D, Sellei RM, Sop A, Tarkin IS, Peifer R, Garrison RL, Pohlemann T, Pape HC. Effects of Pelvic Volume Changes on Retroperitoneal and Intra- Abdominal Pressure in the Injured Pelvic Ring : A Cadaveric Model. *J Trauma Inj Infect Crit Care*. 2011;71(3):585–90.
60. Gänsslen A, Hildebrand F, Pohlemann T. Management of Hemodynamic Unstable Patients “ in extremis ” with Pelvic Ring Fractures. *Acta Chir Orthop Traumatol Cech*. 2012;79(33):193–202.
61. Kaafarani HM, Velmahos GC. Damage control resuscitation in trauma. *Scand J Surg*. 2014;103(2):81–8.
62. Pohlman TH, Walsh M, Aversa J, Hutchinson EM, Olsen KP, Lawrence Reed R. Damage control resuscitation. *Blood Rev*. 2015;29(4):251–62.
63. Perkins JG, Beekley AC. Damage control resuscitation. In: Lenhart MK, Savitsky E, Eastridge B. *Combat Casualty Care: Lessons Learned from OEF and OIF*. Office of the Surgeon General, Department of the Army, United states of America. 2012;121–64.
64. Ball CG. Damage control resuscitation: history, theory and technique. *Can J Surg*. 2014;57(1):55–60.
65. CRASH-2 trial collaborators. Effects of tranexamic acid on death, vascular occlusive events, and blood transfusion in trauma patients with significant haemorrhage (CRASH-2): a randomised, placebo-controlled trial. *Lancet*. 2010;376:23–32.

66. Spahn DR, Bouillon B, Cerny V, Coats TJ, Duranteau J, Fernández-Mondéjar E, Filipescu D, Hunt BJ, Komadina R, Nardi G, Neugebauer E, Ozier Y, Riddez L, Schultz A, Vincent JL, Rossaint R. Management of bleeding and coagulopathy following major trauma : an updated European guideline. *Crit Care*. 2013;17(2):R76.
67. Josten Ch, Koch O. GAU: Der polytraumatisierte Patient. In: Francke A, Josten C, Thie A. Interdisziplinäre Notaufnahme: ein Ratgeber für Aufnahme und Bereitschaftsdienst. 1. Auflage. Stuttgart, Germany. Thieme-Verlag. 2009:90-101
68. Kleber C, Giesecke MT, Lindner T, Haas NP, Buschmann CT. Requirement for a structured algorithm in cardiac arrest following major trauma: Epidemiology, management errors, and preventability of traumatic deaths in Berlin. *Resuscitation*. 2014;85(3):405–10.
69. Miller TE. New evidence in trauma resuscitation - is 1:1:1 the answer? *Perioper Med*. 2013;2(13):1-7.
70. Kleber C, Giesecke MT, Tsokos M, Haas NP, Buschmann CT. Trauma-related preventable deaths in Berlin 2010: Need to change prehospital management strategies and trauma management education. *World J Surg*. 2013;37(5):1154–61.
71. Lögters T, Lefering R, Schneppendahl J, Alldinger I, witte I, Windolf J, Flohé S, TraumaRegister der DGU. Abbruch der Schockraumdiagnostik und Notfalloperation beim Polytrauma – Inzidenz und klinische Relevanz. *Unfallchirurg*. 2010; 113:832–38.
72. Osborn PM, Smith WR, Moore EE, Cothren CC, Morgan SJ, williams AE, Stahel PF. Direct retroperitoneal pelvic packing versus pelvic angiography : A comparison of two management protocols for haemodynamically unstable pelvic fractures. *Injury*. 2009;40(1):54–60.
73. Seekamp A. [External fixation in the pelvic ring]. *Trauma und Berufskrankheit*. 2007;9(S2):S149–53.
74. Vermeulen B, Peter R, Hoffmeyer P, Unger PF. Prehospital Stabilization of Pelvic Dislocations: A New Strap Belt to Provide Temporary Hemodynamic Stabilization. *Swiss Surg*. 1999;5(2):43–6.
75. Knops SP, Schep NWL, Spoor CW, van Riel MP, Spanjersberg WR, Kleinrensink GJ, van Lieshout EM, Patka P, Schipper IB. Comparison of three different pelvic circumferential compression devices: a biomechanical cadaver study. *J Bone Joint Surg Am*. 2011;93(3):230–40.
76. DeAngelis NA, Wixted JJ, Drew J, Eskander MS, Eskander JP, French BG. Use of the trauma pelvic orthotic device (T-POD) for provisional stabilisation of anterior-posterior

- compression type pelvic fractures: a cadaveric study. *Injury*. 2008;39(8):903–6.
77. Krieg JC, Mohr M, Ellis TJ, Simpson TS, Madey SM, Bottlang M. Emergent Stabilization of Pelvic Ring Injuries by Controlled Circumferential Compression: A Clinical Trial. *J Trauma*. 2005;59(3):659–64.
 78. Tan EC, van Stigt SF, van Vugt AB. Effect of a new pelvic stabilizer (T-POD®) on reduction of pelvic volume and haemodynamic stability in unstable pelvic fractures. *Injury*. 2010;41(12):1239–43.
 79. Croce MA, Magnotti LJ, Savage SA, Wood GW II, Fabian TC. Emergent pelvic fixation in patients with exsanguinating pelvic fractures. *J Am Coll Surg*. 2007;204(5):935–942.
 80. Simpson T, Krieg JC, Heuer F, Bottlang M. Stabilization of pelvic ring disruptions with a circumferential sheet. *J Trauma*. 2002. 52(1):158-61.
 81. Warne W, Todd M. The circumferential antishock sheet. *Mil Med*. 2002;167(5):438–41.
 82. Rudol G, Ramdass S, Mestha P, Doughan S, Skyrme A. Major pelvic injury complicated by abdominal compartment syndrome. *Inj Extra*. 2006;37(8):299–301.
 83. Routt ML jr., Falicov A, Woodhouse E, Schildhauer TA. Circumferential pelvic antishock sheeting: a temporary resuscitation aid. *J Orthop Trauma*. 2006;16(1):45–8.
 84. Verbeek D, Sugrue M, Balogh Z, Cass D, Civil I, Harris I, Kossmann T, Leibman S, Malka V, Pohl A, Rao S, Richardson M, Schuetz M, Ursic C, Wills V. Acute Management of Hemodynamically Unstable Pelvic Trauma Patients : Time for a Change ? Multicenter Review of Recent Practice. *World J Surg*. 2008;32(8):1874–82.
 85. Jahresbericht 2013. Cologne, Germany. Sektion Notfall- & Intensivmedizin, Schwerverletztenversorgung (NIS) der Deutschen Gesellschaft für Unfallchirurgie (DGU); Arbeitskreis TraumaRegister, 2013. (Accessed August 13, 2015, at http://www.traumaregister.de/index.php?option=com_content&view=article)
 86. Pfeifer R, Tarkin IS, Rocos B, Pape HC. Patterns of mortality and causes of death in polytrauma patients-Has anything changed? *Injury*. 2009;40(9):907–11.
 87. Poole G, Ward E, Muakkassa F, Hsu H, Griswold J, Rhodes R. Pelvic Fracture from Major Blunt Trauma - Outcome Is Determined by Associated Injuries. *Ann Surg*. 1991;213(6):532–9.
 88. Fleiter N, Reimertz C, Lustenberger T, Schweigkofler U, Marzi I, Hoffmann R, Walcher F. [Importance of the Correct Placement of the Pelvic Binder for Stabilisation of Haemodynamically Compromised Patients]. *Z Orthop Unfall*. 2012;150:627–9.
 89. Rommens PM, Wagner D, Hofmann A. Surgical management of osteoporotic pelvic fractures : a new challenge. *Eur J Trauma Emerg Surg*. 2012;38(5):499–509.

90. Søreide K, Krüger AJ, Vardal AL, Ellingsen CL, Søreide E, Lossius HM. Epidemiology and Contemporary Patterns of Trauma Deaths : Changing Place, Similar Pace, Older Face. *World J Surg.* 2007;31:2092–103.
91. Pang JM, Civil I, Ng A, Adams D, Koelmeyer T. Is the trimodal pattern of death after trauma a dated concept in the 21st century ? Trauma deaths in Auckland 2004. *Injury.* 2008;39(1):102–6.
92. Demetriades D, Kimbrell B, Salim A, Velmahos G, Rhee P, Preston C, Gruzinski G, Chan L. Trauma Deaths in a Mature Urban Trauma System : Is “ Trimodal ” Distribution a Valid Concept ? *J Am Coll Surg.* 2005;201(3):343–8.
93. Wisborg T, Hoylo T, Siem G. Death after injury in rural Norway: high rate of mortality and prehospital death. *Acta Anaesthesiol Scand.* 2003;47(2):153–6.
94. Evans J, van Wessem K, McDougall D, Lee KA, Lyons T, Balogh ZJ. Epidemiology of Traumatic Deaths : Comprehensive Population-Based Assessment. *World J Surg.* 2010;34(1):158–63.
95. Potenza BM, Hoyt DB, Coimbra R, Fortlage D, Holbrook T, Hollingsworth-Fridlund P. The Epidemiology of Serious and Fatal Injury in San Diego County Over an 11-Year Period. *J Trauma.* 2004;56:68–75.
96. Parreira JG, Coimbra R, Rasslan S, Oliveira A, Fregoneze M, Mercadante M. The role of associated injuries on outcome of blunt trauma patients sustaining pelvic fractures. *Int J Care Inj.* 2000;31:677–82.
97. Dong JL, Zhou DS. Management and outcome of open pelvic fractures: A retrospective study of 41 cases. *Injury.* 2011;42(10):1003–7.
98. Gabbe BJ, De Steiger R, Esser M, Bucknill A, Russ MK, Cameron PA. Predictors of mortality following severe pelvic ring fracture: Results of a population-based study. *Injury.* 2011;42(10):985–91.
99. Dettmeyer R. Leichenschau. In: Dettmeyer R, Schütz H, Verhoff M. *Rechtsmedizin.* 2. Auflage. Berlin Heidelberg, Germany. Springer-Verlag. 2014:28
100. Buschmann CT, Kleber C. Entfernung notfallmedizinischer Verbrauchsmaterialien vom Leichnam nach frustraner Reanimation. *Rettungsdienst.* 2013;36(1):77-79.
101. Santos D, Carron P, Yersin B, Pasquier M. EZ-IO intraosseous device implementation in a pre-hospital emergency service : A prospective study and review of the literature. *Resuscitation.* 2013;84(4):440–5.
102. Wolfson DL, Tandoh MA, Jindal M, Forgiione PM, Harder VS. Adult Intraosseous Access by Advanced EMTs : A Statewide Non-Inferiority Study. *Preshospital Emerg Care.*

- 2017;21(1):7-13.
103. Petitpas F, Guenezan J, Vendevre T, Scepi M, Oriot D, Mimoz O. Use of intra-osseous access in adults : a systematic review. *Crit Care*; 2016;20(102):1–9.
 104. Gazin N, Auger H, Jabre P, Jaulin C, Lecarpentier E, Bertrand C, Margenet A, Combes X. Efficacy and safety of the EZ-IO intraosseous device : Out-of-hospital implementation of a management algorithm for difficult vascular access. *Resuscitation*. 2011;82(1):126–9.
 105. Reades R, Studnek JR, Vandeventer S, Garrett J. Intraosseous Versus Intravenous Vascular Access During Out-of- Hospital Cardiac Arrest : A Randomized Controlled Trial. *Ann Emerg Med*. 2011;58(6):509–16.
 106. Helm M, Haunstein B, Schlechtriemen T, Ruppert M, Lampl L, Gäßler M. EZ-IO ® intraosseous device implementation in German Helicopter Emergency Medical Service. *Resuscitation*. 2015;88:43–7.
 107. Olausson A, Williams B. Intraosseous Access in the Prehospital Setting : Literature Review. *Preshospital Disaster Med*. 2012;27(5):468–72.
 108. Kurowski A, Timler D, Evrin T, Szarpak L. Comparison of 3 different intraosseous access devices for adult during resuscitation . Randomized crossover manikin study. *Am J Emerg Med*. 2014;32:1490–3.
 109. Huber-Wagner S, Lefering R, Qvick M, Kay MV, Paffrath T, Mutschler W, Kanz KG. Outcome in 757 severely injured patients with traumatic cardiorespiratory arrest. *Resuscitation*. 2007;75:276–85.
 110. Lee C, Porter K. The prehospital management of pelvic fractures. *Emerg Med J*. 2007;24(2):130–3.
 111. Vardon F, Brunel E, Lecoq M, Fourcade O, Geeraerts T. Case Report: External contention for pelvic trauma: is 1 sheet enough? *Am J Emerg Med*. 2013;31:442.e1–442.e3.
 112. Toth L, King KL, Mcgrath B, Balogh ZJ. Efficacy and safety of emergency non-invasive pelvic ring stabilisation. *Injury*. 2012;43(8):1330–4.
 113. Garner AA, Hsu J, Mcshane A, Sroor A. Haemodynamic deterioration in lateral compression pelvic fracture after prehospital pelvic circumferential compression device application. *Air Med J*. 2017;1-2.
 114. Rogers FB, Shackford SR, Hoyt DB, Camp L, Osler TM, Mackersie RC, Davis JW. Trauma Deaths in a Mature Urban vs Rural Trauma System: A Comparison. *Arch Surg*. 1997;132(4):376–82.
 115. Poole G, Ward E, Muakkassa F, Hsu H, Griswold J, Rhodes R. Pelvic fracture from major blunt trauma. Outcome is determined by associated injuries. *Ann Surg*. 1991;213(6):532–

- 9.
116. Mason LW, Boyce DE, Pallister I. Catastrophic myonecrosis following circumferential pelvic binding after massive crush injury: A case report. *Inj Extra*. 2009;40(5):84–6.
 117. Shank JR, Morgan SJ, Smith WR, Meyer FN. Bilateral peroneal nerve palsy following emergent stabilization of a pelvic ring injury. *J Orthop Trauma*. 2003;17(1):67–70.
 118. Schaller TM, Sims S, Maxian T. Skin Breakdown Following Circumferential Pelvic Antishock Sheeting A Case Report. *J Orthop Trauma*. 2005;19(9):661–5.
 119. Kido A, Inoue F, Takakura Y, Hoshida T. Statistical analysis of fatal bleeding pelvic fracture patients with severe associated injuries. *J Orthop Sci*. 2008;13(1):21–4.
 120. Kleber C, Lefering R, Kleber AJ, Buschmann CT, Bail HJ, Schaser KD, Haas NP, DGU TraumaRegister. Rettungszeit und Überleben von Schwerverletzten in Deutschland. *Unfallchirurg*. 2013;116:345–50.
 121. Smith W, Williams A, Agudelo J, Shannon M, Morgan S, Stahel P, Moore E. Early Predictors of Mortality in Hemodynamically Unstable Pelvis Fractures. *J Orthop Trauma*. 2007;21(1):31–7.
 122. Zamora-Navas P, Guerado E. Vascular complications in floating hip. *Hip Int*. 2010;20(Suppl 7):11–8.
 123. Liebergall M, Lowe J, Whitelaw GP, Wetzler MJ, Segal D. The floating hip. Ipsilateral pelvic and femoral fractures. *J Bone Joint Surg Br*. 1992;74(1):93–100.
 124. Müller EJ, Siebenrock K, Ekkernkamp A, Ganz R, Muhr G. Ipsilateral fractures of the pelvis and the femur-floating hip? A retrospective analysis of 42 cases. *Arch Orthop Trauma Surg*. 1999;119(3-4):179–82.
 125. Burd TA, Hughes MS, Anglen JO. The Floating Hip : Complications and Outcomes. *J Trauma*. 2008;64:442–8.
 126. Prasarn ML, Conrad B, Small J, Horodyski M, Rehtine GR. Comparison of circumferential pelvic sheeting versus the T-POD on unstable pelvic injuries: A cadaveric study of stability. *Injury*. 2013;44(12):1756–9.
 127. Bottlang M, Simpson T, Sigg J, Krieg JC, Madey SM, Long WB. Noninvasive reduction of open-book pelvic fractures by circumferential compression. *J Orthop Trauma*. 2002;16(6):367–73.
 128. Bonner TJ, Eardley WGP, Newell N, Masouros S, Mathews JJ, Gibb I, Clasper JC. Accurate placement of a pelvic binder improves reduction of unstable fractures of the pelvic ring. *J Bone Joint Surg Br*. 2011;93(11):1524–8.
 129. Jowett AJ, Bowyer GW. Pressure characteristics of pelvic binders. *Injury*.

- 2007;38(1):118–21.
130. Knops SP, van Riel M, Goossens R, van Lieshout E, Patka P, Schipper IB. Measurements of the Exerted Pressure by Pelvic Circumferential Compression Devices. *Open Orthop J*. 2010;4:101–6.
 131. Prasarn ML, Horodyski M, Schneider PS, Pernik MN, Gary JL, Rehtine GR. Comparison of skin pressure measurements with the use of pelvic circumferential compression devices on pelvic ring injuries. *Injury*. 2016;47(3):717–20.
 132. Krieg J, Mohr M, Mirza A, Bottlang M. Pelvic circumferential compression in the presence of soft-tissue injuries: a case report. *J Trauma*. 2005;59:468–70.
 133. Prasarn ML, Horodyski M, Conrad B, Rubery PT, Dubose D, Small J, Rehtine GR. Comparison of external fixation versus the trauma pelvic orthotic study of stability. *J Trauma Acute Care Surg*. 2012;72(6):1671–5.
 134. Ghaemmaghami V, Sperry J, Gunst M, Friese R, Starr A, Frankel H, Gentilello LM, Shafi S. Effects of early use of external pelvic compression on transfusion requirements and mortality in pelvic fractures. *Am J Surg*. 2007;194(6):720–3.
 135. Heetveld MJ, Harris I, Schlaphoff G, Sugrue M. Guidelines for the Management of haemodynamically unstable Pelvic Frature Patients. *ANZ J Surg*. 2004;74(7):520–9.
 136. Biffl WL, Smith WR, Moore EE, Gonzalez RJ, Morgan SJ, Hennessey T, Offner PJ, Ray CE Jr., Franciose RJ, Burch JM. Evolution of a Multidisciplinary Clinical Pathway for the Management of Unstable Patients With Pelvic Fractures. *Ann Surg*. 2001;233(6):843–50.
 137. Chesser TJ, Cross AM, Ward AJ. The use of pelvic binders in the emergent management of potential pelvic trauma. *Injury*. 2012;43(6):667–9.

6. Eidesstattliche Versicherung

Ich, Mirja Mareike Fechner, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema:

„Epidemiologische, postmortale Computertomographie-morphologische und biomechanische Analyse der Effekte nicht-invasiver externer Beckenstabilisatoren bei reellen instabilen Beckenverletzungen“

selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung (siehe „Uniform Requirements für Manuscripts (URM)“ des ICMJE – www.icmje.org) kenntlich gemacht.

Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) entsprechen den URM (s.o.) und werden von mir verantwortet.

Meine Anteile an etwaigen Publikationen zu dieser Dissertation entsprechen denen, die in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem/der Betreuer/in angegeben sind. Sämtliche Publikationen, die aus dieser Dissertation hervorgegangen sind und bei denen ich Autor bin, entsprechen den URM (s.o.) und werden von mir verantwortet.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unwahren eidesstattlichen Versicherung (§156,161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.

7. Lebenslauf

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.

8. Danksagung

Mein Dank gilt allen Personen, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit in vielfältigster Weise inspiriert, unterstützt, ermutigt und gefördert haben. Insbesondere möchte ich folgenden Personen danken:

Prof. Dr. med. Dr. h.c. N.P. Haas (ehemaliger Direktor des Centrums für Muskuloskeletale Chirurgie, Charité – Universitätsmedizin Berlin)

Prof. Dr. med. K.-D. Schaser (Direktor des Universitätszentrums für Orthopädie und Unfallchirurgie, Universitätsklinikum Dresden, vorher: stellv. Klinikdirektor des Centrums für Muskuloskeletale Chirurgie, Campus Virchow Klinikum, Charité – Universitätsmedizin Berlin)

Prof. Dr. med. M. Tsokos (Direktor des Instituts für Rechtsmedizin, Charité - Universitätsmedizin Berlin)

Priv.-Doz. Dr. med. C. Kleber (Universitätszentrum für Orthopädie und Unfallchirurgie, Universitätsklinikum Dresden, vorher: Centrum für Muskuloskeletale Chirurgie, Charité – Universitätsmedizin Berlin)

Priv.-Doz. Dr. med. C.T. Buschmann (Institut für Rechtsmedizin, Charité - Universitätsmedizin Berlin)

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der AG Polytrauma (Universitätszentrum für Orthopädie und Unfallchirurgie, Universitätsklinikum Dresden und Centrum für Muskuloskeletale Chirurgie, Charité – Universitätsmedizin Berlin)

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Rechtsmedizin der Charité - Universitätsmedizin Berlin

Meiner Familie und meinen Freunden