

Verändert die additive minimalinvasive Kabelcerclage das Komplikationsprofil der Standardversorgung von Tibiaschaftfrakturen?

Jan Reuter

Angaben zur Veröffentlichung / Publication details:

Reuter, Jan. 2025. "Verändert die additive minimalinvasive Kabelcerclage das Komplikationsprofil der Standardversorgung von Tibiaschaftfrakturen?" Augsburg: Universität Augsburg.

Nutzungsbedingungen / Terms of use:

licgercopyright

Dieses Dokument wird unter folgenden Bedingungen zur Verfügung gestellt: / This document is made available under these conditions:

Deutsches Urheberrecht

Weitere Informationen finden Sie unter: / For more information see:

<https://www.uni-augsburg.de/de/organisation/bibliothek/publizieren-zitieren-archivieren/publiz/>



Aus der Klinik für Unfallchirurgie, Orthopädie, Plastische und
Handchirurgie des Universitätsklinikums Augsburg

Verändert die additive minimalinvasive Kabelcerclage das Komplikationsprofil der Standardversorgung von Tibiaschaftfrakturen?

Kumulative Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Dr. med.

eingereicht an der

Medizinischen Fakultät der Universität Augsburg

von

Jan Reuter

Augsburg, 11. Juli 2024



Eidesstattliche Versicherung und Erklärung

Hiermit versichere ich an Eides statt, dass die vorliegende Dissertation von mir selbständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt wurde. Zudem wurden keine anderen als die angegebenen Quellen verwendet. Außerdem versichere ich, dass die Dissertation keiner anderen Prüfungskommission vorgelegt wurde und ich mich nicht anderweitig einer Doktorprüfung ohne Erfolg unterzogen habe.

Statutory declaration and statement

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources. As well I declare that I have not submitted a dissertation without success and not passed the oral exam. The present dissertation (neither the entire dissertation nor parts) has not been presented to another examination board.

Augsburg, 11. Juli 2024

Dissertation eingereicht am: 11.07.2024

Erstgutachter: Prof. Dr. Dr. h.c. Edgar Mayr

Zweitgutachter: PD Dr. Constanze Buhrmann

Tag der mündlichen Prüfung: 21.11.2024

Inhalt

Eidesstattliche Versicherung und Erklärung	1
Statutory declaration and statement	2
Einleitung	4
Epidemiologie.....	4
Klassifikation der Tibiaschaftfraktur	4
Diagnostik und Therapie der Tibiaschaftfraktur.....	6
Operationstechnik der minimalinvasiven Kabelcerclage an der Tibia	12
Fragestellung der zugrunde liegenden Veröffentlichungen	14
Diskussion	16
Zusammenfassung	22
Summary.....	23
Literaturverzeichnis	24
Appendix	29
Abkürzungsverzeichnis.....	29
Abbildungsverzeichnis	29
Tabellenverzeichnis.....	29
Danksagung	30
Eigene Veröffentlichungen.....	31

Einleitung

Epidemiologie

Die Tibiaschaftfraktur des Erwachsenen ist eine häufige Fraktur der langen Röhrenknochen (1). Ihre Inzidenz wird mit 13,4 - 17 pro 100.000 Menschen und Jahr angegeben (2–4). Sie betrifft auf die Gesamtpopulation betrachtet überwiegend Männer (63,8%), erst ab einem Alter über 50 Jahren kehrt sich das Verhältnis um (2). Dies liegt auch an der unterschiedlichen Entstehung einer Tibiaschaftfraktur: Am Häufigsten entsteht sie durch Hochenergietraumata wie zum Beispiel Verkehrs- und Sportunfälle, die zusammen bereits 68,4% der Ursachen ausmachen (1). Von diesen Unfallmechanismen sind vor allem jüngere und männliche Patienten betroffen (5). Im Gegensatz hierzu stehen Niedrigenergietraumata wie Stürze, welche in der Altersgruppe der über 65-jährigen mehrheitlich für eine Tibiaschaftfraktur ursächlich sind und mehr Frauen als Männer betreffen (5,6).

Auf Grund der anatomischen Lagebeziehung am Unterschenkel sind Margo anterior und Facies medialis der Tibia nur mit einem geringen Weichteilmantel überzogen (7). In Verbindung mit dem überwiegend direkten und hochenergetischen Trauma geht eine Tibiaschaftfraktur oft mit einem relevanten Weichteilschaden und einem hohen Anteil an offenen Frakturen einher (1,6). Weitere Verletzungen sind keine Seltenheit, so können neben knöchernen Begleitverletzungen (am Häufigsten sind Sprunggelenk, Rippen und Brustbein sowie die Wirbelsäule) auch innere Organverletzungen (am Häufigsten Lunge und intrakranielle Verletzungen) auftreten (5).

Klassifikation der Tibiaschaftfraktur

Die etablierteste Klassifikation von Frakturen richtet sich nach den Vorgaben der Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen (AO), durch welche jeder Frakturtyp als alphanumerischer Code dargestellt werden kann (8):

Die erste Stelle gibt den Knochen an (die Tibia hat die Nummer 4), die zweite Stelle gibt die Lokalisation des frakturierten Teils des Knochens an (1 proximales Segment, 2 Schaft, 3 distales Segment). Die dritte Stelle gibt den Frakturtyp an, die vierte Stelle die Gruppe und die fünfte Stelle die Subgruppe. Darauffolgend können noch Qualifikationen und Modifikatoren angegeben werden (8).

Bei Schaftfrakturen werden drei Frakturtypen unterschieden: Einfache Frakturen (Typ A), Keilfrakturen (Typ B) und multifragmentäre Frakturen (Typ C).

Typ A-Frakturen sind durch eine einzelne zirkumferentielle Frakturlinie durch den Schaft gekennzeichnet. Je nach Frakturverlauf werden sie weiter in die Gruppen Spiralfaktur (= 1), Schrägfraktur (= 2) und Querfraktur (= 3) eingeteilt.

Typ B-Frakturen weisen eine keilförmige Fraktur auf, dennoch haben die Hauptfragmente nach erfolgter Reposition Kontakt zueinander. Die weitere Gruppierung unterscheidet einen intakten Keil (Gruppe 2) von einem fragmentierten Keil (Gruppe 3).

Typ C-Frakturen haben mehrere Frakturlinien und Fragmente, wodurch ein Fraktursegment entsteht. Dieses Segment kann intakt (Gruppe 2) oder multifragmentär (Gruppe 3) sein (8).

Abbildung 1 AO-Klassifikation der Tibiaschaftfrakturen, basierend auf Meinberg et al.2018 (8)

Tibiaschaft AO 42	Frakturtyp		
	Einfache Frakturen		
	42A1	42A2	42A3
			
	Keilfrakturen		
		42B2	42B3
			
	Mehrfragmentäre Frakturen		
		42C2	42C3
			

Diagnostik und Therapie der Tibiaschaftfraktur

Die Diagnostik beginnt mit der Anamnese. Hiermit können der Unfallmechanismus und etwaige therapierelevante Vorerkrankungen und Komorbiditäten wie vorbestehende Durchblutungsstörungen (inklusive Nikotinabusus), Stoffwechselerkrankungen (zum Beispiel Diabetes mellitus, Osteoporose) und Dauermedikationen herausgefunden werden. Sollte die Eigenanamnese nicht möglich sein, sollte mittels Fremdanamnese versucht werden möglichst viele Informationen zu erlangen. Anschließend erfolgt die klinische Untersuchung. Die Erfassung und schriftliche Dokumentation der peripheren Durchblutung, Motorik und Sensibilität ist obligat (6). Der Weichteilmantel sollte genau inspiziert werden, um die nicht geringe Anzahl an Weichteilschäden, offenen Frakturen und möglichen Kompartmentsyndromen zu detektieren (1,6). Der Weichteilschaden wird bei geschlossenen Frakturen nach Oestern und Tschernö (Tabelle 1) klassifiziert, bei offenen Frakturen nach Gustilo und Anderson (Tabelle 2) (9,10).

Tabelle 1 Klassifikation der Weichteilbeschädigung für geschlossene Frakturen nach Tschernö und Oestern, basierend auf James P. Stannard et al. (9)

Grad 0	Grad 1	Grad 2	Grad 3
• Kein oder geringfügiger Weichteilschaden • Indirekter Frakturmechanismus • einfache Frakturform	• oberflächliche Abschürfung oder Kontusion • innerer Fragmentdruck auf die Haut • einfache Frakturform oder mittelgradige Verletzungsenergie	• tiefe kontaminierte Wunden oder tiefe Kontusionen • beginnendes Kompartmentsyndrom • mittlere bis schwere Frakturformen	• Ausgedehnte Weichteilkontusionen • Abschürfungen • Zerstörung von Muskelgewebe • Morel-Lavallee-Läsion • Kompartmentsyndrom • Gefäßverletzungen • Trümmerfraktur • Hohe Verletzungsenergie

Tabelle 2 Klassifikation des Weichteilschadens bei offenen Frakturen nach Gustilo und Anderson, basierend auf James P. Stannard et al. (9) und Norbert Harrasser et al. (10)

Grad 1	• Weichteilschaden kleiner 1cm • Durchspießungswunde • Einfache Bruchformen • Minimale periostale Schäden und kleinere Absprengungen • Niedrigenergetische Traumata
Grad 2	• Weichteilschaden 1-10cm • Ausgedehntere periostale Schäden • Gering bis mittelgradig kontaminierte Wunden • Einfache oder komplexere Bruchformen
Grad 3	• 3a: ○ Ausgedehnter Weichteilschaden ○ Ausgeprägte periostale Schäden ○ Deutlich höhere Verletzungsenergie • 3b ○ Benötigt eine plastische Deckung • 3c ○ Benötigt eine neuro-vaskuläre Rekonstruktion

Die Untersuchung des frakturierten Unterschenkels schließt auch die gewissenhafte Untersuchung der angrenzenden Gelenke mit ein, da diese häufig mitbetroffen sind (5). Auf Grund des hohen Anteils an weiteren Begleitverletzungen (5) sollte gerade bei Hochenergietrauma eine vollständige Untersuchung des gesamten Patienten erfolgen, aber auch der geriatrische Patient kann entsprechende weitere Verletzung im Rahmen eines einfachen Stolpersturzes (Niedrigenergietrauma) erleiden. Diese Begleitverletzungen können möglicherweise eine Auswirkung auf die Art und den Zeitpunkt der Therapie haben.

Die weitere apparative Diagnostik umfasst als Basis das konventionelle Röntgen in 2 Ebenen und kann je nach Komplexität der Fraktur um eine Computertomographie (CT) ergänzt werden. Bei Vorliegen einer Durchblutungsstörung wird die Diagnostik präoperativ um eine Dopplersonografie oder nach Möglichkeit um eine CT-Angiographie ergänzt (1,6,11). Liegt bei der Diagnostik eines polytraumatisierten Patienten zuerst eine CT vor, kann im Sinne des Strahlenschutzes auf ein zusätzliches Röntgen verzichtet werden, wenn aus den Rohdaten der CT ein Röntgenbild rekonstruiert werden kann. Dies hilft dem Operateur bei der Planung und Durchführung der Operation, da intraoperativ in der Regel lediglich die Darstellung mittels Röntgen-Bildverstärker zur Verfügung steht.

Als therapeutische Akutmaßnahme erfolgt die Ruhigstellung des Unterschenkels durch eine Oberschenkelgipsschiene mit Einschluss des Sprunggelenks, Unterschenkels, Kniegelenks und Teilen des Oberschenkels. Eine dislozierte Fraktur wird unter adäquater Analgesie oder Analgosedierung zuvor reponiert. Zudem erfolgen eine Hochlagerung und lokale Kühlung sowie gegebenenfalls weitere abschwellende Maßnahmen. Liegt ein entsprechender Weichteilschaden vor, wird zusätzlich eine Antibiotikaphylaxe eingeleitet, entweder mit einem Cephalosporin (2. Generation) (6,9) oder einer Kombination aus Penicillinen und Beta-Lactamase-Inhibitoren (z.B. Ampicillin/Sulbactam), welches der Standard für eine offene Fraktur am Universitätsklinikum Augsburg ist. Weiter sollte bei entsprechendem Weichteilschaden der Impfschutz gegen Tetanus überprüft und gegebenenfalls aufgefrischt werden (6).

Die weitere Therapie muss anhand des Frakturtyps, der Weichteilsituation sowie den patienteneigenen Begleit- und Risikofaktoren individuell gewählt werden (6). Sie erfolgt heutzutage bei Erwachsenen operativ (1,6), da die konservative Therapie ein erhöhtes Risiko für Delayed Union, Nonunion und Malunion verglichen zur operativen Therapie aufweist (12). Zudem erhöht die notwendige, mehrere Wochen bis Monate andauernde Ruhigstellung und Immobilisierung im Rahmen der konservativen Therapie das Risiko für eine tiefe Beinvenenthrombose (6). Ein Ziel der Osteosynthese ist somit das Schaffen einer möglichst hohen Primärstabilität, um eine frühfunktionelle Nachbehandlung zu ermöglichen (1,6,11). Ein weiteres Ziel bei einer Schaftfraktur ist die Wiederherstellung der Länge, Ausrichtung und Rotation durch die Reposition der Fraktur sowie das Einstellen der korrekten Länge und Beziehung der angrenzenden Gelenke zueinander (1,13). Bei einer Gelenkbeteiligung sollte eine möglichst anatomische Reposition erreicht werden (13).

Für die operative Stabilisierung der adulten Tibiaschaftfraktur stehen prinzipiell drei Hauptverfahren zur Verfügung: Die Plattenosteosynthese und die Marknagelosteosynthesen, welche zur definitiven Ausversorgung verwendet werden, und der Fixateur externe (1,6,12–14).

Der Fixateur externe ist das Mittel der Wahl im Rahmen der Damage Control Surgery, vor allem des polytraumatisierten und instabilen Patienten (1,6,14). Er ist einfach und verhältnismäßig schnell anzulegen, gewebeschonend und kostengünstig. Auch bei ausgedehntem Weichteilschaden, notwendiger Weichteilkonsolidierung vor einer definitiven Versorgung oder einem drohenden beziehungsweise manifesten

Kompartmentsyndrom ist die Stabilisierung mit Fixateur externe indiziert (1,6,14). Nach Stabilisierung des Patienten und Konsolidierung der Weichteile erfolgt nach ca. 5-10 Tagen der Verfahrenswechsel auf eine Marknagel- oder Plattenosteosynthese (14). Eine Ausversorgung der Fraktur mit dem Fixateur externe ist möglich und war vor der Etablierung der internen Osteosyntheseverfahren verbreitet, wird heute aber nur bei Kontraindikationen für eine Folgeoperation oder bei Kindern durchgeführt (1,6,14). Kontraindikationen zum Fixateur externe gibt es keine (1,6). Die häufigste Komplikation ist ein Pin-Infekt, weshalb bis zur Ausversorgung eine korrekte Pflege der Pinstellen notwendig ist (1).

Die heutigen winkelstabilen Plattensysteme erlauben eine minimalinvasive Einbringung und verursachen somit weniger Weichteilschaden und folglich weniger damit verbundene Nachteile wie Störung der lokalen Blutversorgung, hohe Raten an Infekten und Pseudarthrosen als frühere Systeme (1,6). Sie werden vorwiegend als biologische Überbrückungsosteosynthesen (Bridging Plates) eingebracht und erzielen eine relative Stabilität (6,13). Die Frakturzone wird nicht offen reponiert, sondern durch die Platte überbrückt, dies erhält die natürliche Biologie der Frakturheilung (13). Die Wiederherstellung der Länge, Ausrichtung und Rotation wird über die winkelstabile Fixierung der proximalen und distalen Hauptfragmente an die Platte erreicht (13).

Die Indikationen für eine moderne Plattenosteosynthese sind neben Gelenkfrakturen auch die Schaftfrakturen, die in eine angrenzende Gelenkfläche einstrahlen, durch eine mehrfragmentäre Konfiguration einer geschlossenen Reposition mittels Marknagel nicht zugänglich sind, einen zu engen Markraum aufweisen, keine metaphysäre Marknagel-Verriegelung ermöglichen sowie periprothetische Frakturen und vorbestehende Pseudarthrosen (1,6,9,14).

Die intramedulläre Marknagelosteosynthese ist die vorherrschende Behandlungsstrategie der isolierten Tibiaschaft- beziehungsweise Unterschenkelchaftfrakturen und wird von manchen Autoren sogar als der Goldstandard bezeichnet (6,9). Auch bei partieller Beteiligung der angrenzenden Gelenkfläche kann eine Marknagelung erfolgen, gegebenenfalls sind hierzu weitere Implantate notwendig (6,9,15). Die Vorteile des Marknagels bei Schaftfrakturen liegen neben der frakturfernen Lage der Inzisionen für den Nageleintritt und dessen Verriegelung vor allem in seinen biomechanischen

Eigenschaften: Er liegt intramedullär in der Belastungsachse der Tibia und weist ein großes Implantat-Knochen-Interface auf (6,14,15). Dieses kann durch ein Aufbohren des Markraums (aufgebohrte Technik) vor dem Einbringen des Marknagels nochmals vergrößert werden, wodurch Marknägel mit größerem Durchmesser verwendet werden können (6,9). Als weitere Vorteile der Markraumbohrung zählen die Mobilisation von stammzellreifen Knochenmarkszellen und Knochenmehl im Sinne einer Spongiosaplastik sowie die im Tiermodell nachgewiesene Erhöhung der Durchblutung der periostären Weichteile, welches die Rate an Knochenheilungsstörungen und Bolzenbrüchen verringern soll (6,9,14). Allerdings führt die aufgebohrte Technik zu einer Abnahme oder sogar Zerstörung der endostalen Durchblutung, was einen negativen Einfluss auf die kortikale Durchblutung hat (6,9,14). Ob nun die aufgebohrte oder unaufgebohrte Technik die vorteilhaftere ist, ist weiterhin nicht abschließend geklärt, weshalb beide Verfahren zur Anwendung kommen (6,9,14).

Indikationen für die Marknagelung sind vor allem isolierte Schaftfrakturen (6,15). Auch bei Schaftfrakturen mit partieller Beteiligung der proximalen Gelenkfläche kann sie angewandt werden, mit steigender Komplexität der Gelenkbeteiligung sind jedoch Kombinationen mit weiteren Implantaten wie isolierten Schrauben und additive Platten notwendig (15). Kontraindikationen der Marknagelung sind Infekte im Bereich des Nageleintritts, der Verriegelungsbolzen und des Markraums (Markraumphlegmone), komplexe Frakturen des Tibiakopfes (Typ AO:41C3), fehlende Beugungsfähigkeit des Kniegelenks über 90° sowie offene Wachstumsfugen (15).

Neben den zuvor beschriebenen 3 Hauptverfahren existiert noch die Cerclage als ein weiteres Osteosynthesetool. Die Cerclage ist eine zirkumferentielle Umschlingung des Knochens mit einem Metalldraht oder Metallkabel auf Höhe der Fraktur, wodurch die Fraktur zusammengehalten wird, ähnlich wie bei einem Fassring (16). Sie kann im Rahmen einer offenen Reposition oder minimalinvasiv/perkutan eingebracht werden und je Frakturform kann auch die Anwendung mehrerer Cerclagen am selben Knochen erfolgen (17–19). Bei ihrer Applikation sollte, wie bei jedem chirurgischen Vorgehen, auf eine schonende Operationstechnik und eine möglichst geringe Anzahl an Cerclagen geachtet werden (20). Cerclagen finden heutzutage nicht als alleiniges Osteosyntheseverfahren Anwendung, sondern in Kombination mit anderen Verfahren wie Platten- oder Marknagelosteosynthesen.

Bereits 1870 beschreibt Béranger-Féraud, dass das Verfahren der Knochenligatur, wie er die Cerclage damals bezeichnete, vermutlich bereits seit der Antike durchgeführt werde, eine genaue Datierung war ihm aber nicht möglich (21). 1913 beschrieb Lambotte eine detaillierte Anleitung zur Durchführung der Reposition und Osteosynthese mit Cerclagen (16). Neben der bebilderten Darstellung der Reposition und Osteosynthese gab er auch eine Übersicht über die benötigten Instrumente und Empfehlungen zur Materialbeschaffenheit des Drahts (16). Er lehnte bereits damals organische Cerclagen (wie z.B. aus Catgutt, Seide oder Rosshaar) ab, da sie teils zu schwierig zu sterilisieren seien und vor allem nicht die erforderlichen Eigenschaften hinsichtlich Festigkeit oder Steifigkeit aufweisen würden. Der Cerclagedraht müsse seiner Meinung nach fest und nicht dehnbar sein, daher sei rostfreies Metall zu bevorzugen (16). Auch in einer aktuellen biomechanischen Untersuchung zur Stabilität verschiedener Arten von Cerclagen in Kombination mit einer winkelstabilen Plattenosteosynthese konnte gezeigt werden, dass Metallcerclagen (Kabelcerclagen noch mehr als Drahtcerclagen) eine effektivere Wirkung auf die Stabilität des Frakturspalts haben als moderne Fadensystemen in Form von Fibertapes (22). Im Jahr 1933 wurde die Durchführung einer perkutanen Drahtcerclage bei Tibiafrakturen durch Goetze beschrieben (18). Sie wurde jedoch zunächst überwiegend nur durch ihn und seine Schüler durchgeführt (17). Durch die Einführung der intraoperativen Röntgenbildgebung und damit der röntgenologischen Kontrolle sowohl der Fragmente als auch der Cerclage wurde die Methode in den 1950er Jahren wiederbelebt und auch Berichte mit großen Fallzahlen veröffentlicht (17). Die Methode wurde zu dieser Zeit jedoch mit einer Ruhigstellung im Gipsverband kombiniert. Erst 1953 erfolgte die Beschreibung der Anwendung der Goetze-Methode mit einer kombinierten intramedullären Marknagelung durch Schumpelich und Jantzen (17). Kritisiert wird die Cerclage wegen des Risikos der möglichen intraoperativen Einklemmung von neurovaskulären Strukturen zwischen Cerclage und Knochen, verzögerter oder ausbleibender Knochenheilung, sekundärem Malalignment und der in einer experimentellen Arbeit nachgewiesenen Beeinträchtigung der periostalen Blutversorgung (23). Die Beeinträchtigung der Blutversorgung ist auch heute noch eines der Hauptargumente gegen die Cerclage (20), obwohl sie inzwischen bei der Versorgung von subtrochantären Femurfrakturen und periprothetischen Frakturen flächendeckende Anwendung findet. In einer Übersichtsarbeit aus 2021 zur experimentellen Studienlage bezüglich der Blutversorgung bei der Verwendung von Cerclagen stellten Förch et al. fest, dass lediglich sieben experimentelle Arbeiten hierzu vorliegen, von denen fünf am Tiermodell

(vor allem Hunde, aber auch Pferde und Kaninchen) und zwei an menschlichen Kadaver-Femora durchgeführt wurden (20). Eine Untersuchung von frakturierten Knochen fand in keiner der Arbeiten statt, lediglich in einer Arbeit wurden osteotomierte Hundefemora analysiert, was insgesamt die Übertragung auf humane Knochenbrüche erschwert. Dennoch konnten Förch et al. festhalten, dass lediglich in einer der Tierstudien eine Reduktion der Knochendurchblutung nachgewiesen wurde, wohingegen weder die übrigen Tierstudien eine Beeinträchtigung der Blutversorgung, einen Einfluss auf das Knochenwachstum oder auf die Heilung nach einer Osteotomie zeigten, noch die menschlichen Kadaverstudien eine substantielle Kompromittierung der Durchblutung nachweisen konnten (20). Lenz et al. fanden 2012 in einer Studie am humanen Femur heraus, dass die Geometrie des Knochens und die Art der Cerclage einen Einfluss auf die Kontaktfläche zwischen beiden hat und dass trotz angezogener Cerclage weiterhin kontaktfreie Areale zwischen Femur und Cerclage bestehen (24). Weiter hielten die Autoren um Lenz fest, dass die modernen Kabelcerclagen im Vergleich zu den Drahtcerclagen flexibler sind, was das Einbringen und die Frakturposition möglicherweise vereinfacht (24).

Eine experimentelle oder anatomische Untersuchung zu Cerclagen an der Tibia lag bisher in der Literatur jedoch nicht vor.

Operationstechnik der minimalinvasiven Kabelcerclage an der Tibia

Am Universitätsklinikum Augsburg erfolgt die Durchführung der additiven minimalinvasiven Cerclage im Rahmen der operativen Ausversorgung der Fraktur unter sterilen Bedingungen im OP und kann wie folgt beschrieben werden:

Zu Beginn erfolgt die geschlossene Reposition der Fraktur möglichst anatomisch. Sollte dies allein durch manuelle Manipulation nicht suffizient erreicht werden, kann ein Fixateur externe temporär zu Hilfe genommen werden, sofern dieser noch nicht in einer vorherigen Notfalloperation angelegt wurde. Anschließend wird Lage der Cerclage mittels Röntgen-Bildwandler bestimmt. Zwei Inzisionen von je circa einem Zentimeter werden etabliert, eine knapp lateral des Margo anterior der Tibia, eine am dorsomedialen Rand der Tibia. Über diese erfolgt durch stumpfe Präparation mit einer Schere das Ablösen der Weichteile von der Tibia. Hierbei ist ein ständiger enger Kontakt zur Tibia von äußerster Wichtigkeit um Sehnen, Gefäße und Nerven vom Knochen zu lösen und sie davor zu bewahren, im weiteren Vorgehen zwischen Tibia und Cerclage

eingeschlossen zu werden. Die so präparierten Kanäle entlang der Facies posterior und Facies lateralis sollten einen Durchmesser von circa 5-7 Millimetern haben. Über die dorsomediale Inzision wird eine Kürette streng am Knochen geführt eingebracht bis die Öse lateral der Tibia im anterior-posterioren Strahlengang zu liegen kommt. Über die anterolaterale Inzision wird nun die Gewebeschutzhülse eines Standard-AO-Fixateurs ebenfalls streng am Knochen entlang der Facies lateralis eingebracht bis diese in der Öse der Kürette zu liegen kommt. Die richtige Lage kann taktil oder mittels Röntgen erfolgen. Nun werden die inneren Anteile der Gewebeschutzhülse entfernt und über den verbliebenen Trokar wird eine 8 Charrière Redondrainage (REF 21861 Primed Halberstadt Medizintechnik GmbH, Halberstadt, Germany) eingeführt, sie kommt in der Öse der Kürette zu liegen. Mit der Kürette wird die Redondrainage dann aus der posteromedialen Inzision herausgeführt. Der ventrale Anteil der Redondrainage wird schließlich mittels einer Klemme subkutan streng an der Facies medialis zur dorsomedialen Inzision geschuttlet, wodurch die Drainage nun zirkulär um Tibia liegt. Eine 1,7 Millimeter Kabelcerclage (REF 298.801.01, Cable System, DePuy Synthes, Johnson & Johnson Medical GmbH) passt exakt in das Lumen der 8 Charrière Redondrainage und kann somit zirkulär um die Tibia eingezogen werden. Beim Einziehen der Cerclage sollte darauf geachtet werden, dass das Schloss der Kabelcerclage dorsomedial an der Facies posterior zu liegen kommt. Diese Lage des Schlosses hat zwei Vorteile: Erstens kommt es zu keinem Konflikt mit einer möglichen ventromedialen Plattenosteosynthese und zweitens liegt hier eine gute Weichteildeckung vor, was für die Patienten weniger Irritationen verursacht. Durch Anziehen der Cerclage kann eine anatomische Reposition und primäre Stabilität der Tibiaschaftfraktur erreicht werden. Sollte es hierbei zu einer Verkürzung der Fraktur kommen, ist eine vorübergehende Überdistraktion der Fraktur (manuell oder über den Fixateur externe) vor dem Schließen der Cerclage hilfreich. Zum Verblocken des Cerclagenschlusses muss die dorsomediale Inzision meist auf insgesamt zwei bis drei Zentimeter verlängert werden. Nach erfolgter Anlage der Cerclage wird eine Marknagel- oder Plattenosteosynthese in entsprechender (minimalinvasiver) Standardtechnik durchgeführt (19). Die anatomische Reposition der Fraktur mit Hilfe der Cerclage führt zu einem deutlichen Anstieg der Stabilität der gesamten Osteosynthese (25) und ermöglicht somit unmittelbar postoperativ nicht nur eine frühfunktionelle Nachbehandlung, sondern auch eine schmerzadaptierte Vollbelastung (19).

Fragestellung der zugrunde liegenden Veröffentlichungen

Welches Komplikationsprofil die Osteosynthese einer Tibiafraktur mit additiver minimalinvasiver Kabelcerclage hat, soll in dieser Arbeit anhand einer retrospektiven Betrachtung des Patientenguts am Universitätsklinikum Augsburg und der anatomischen Beziehung der Cerclage zu relevanten Strukturen am anatomischen Präparat untersucht und diskutiert werden.

Im Rahmen der ersten Veröffentlichung erfolgte die Beschreibung der Operationstechnik der minimalinvasiven Kabelcerclage an der Tibia und die Darstellung der Ergebnisse aus der durchgeführten klinischen Studie sowie deren Diskussion. Die klinischen Ergebnisse wurden durch mich in Form einer retrospektiven Analyse des Patientenguts am Universitätsklinikum Augsburg, welches im Zeitraum von 01.01.2014 bis einschließlich 30.06.2020 operativ versorgt wurde und eine additive minimalinvasive Cerclage erhielten, erhoben. Die Detektion und Erfassung der Patienten erfolgte anhand der Operationen- und Prozeduren-Schlüssel für die Cerclage an der Tibia im primären Klinikinformationssystem (ORBIS) und anschließendem Abgleich mit dem Operationsbericht, ob wirklich eine minimalinvasive Cerclage durchgeführt wurde. Die weiteren Behandlungsverläufe wurden anhand der vorliegenden Dokumentation in den Klinikinformationssystemen des Universitätsklinikums Augsburg (ORBIS, Agfa Impax/ Dedalus DeepUnity) erfasst und manuell extrahiert. Die Daten wurden in Microsoft Excel logisch sortiert und dort vororganisiert, anschließend für die weitergehende Auswertung in die Statistiksoftware SPSS übertragen. Dort wurden die Daten statistisch deskriptiv und induktiv ausgewertet. Abschließend erfolgte die Diskussion der Daten in der Veröffentlichung. Die Beschreibung des Verfahrens erfolgte durch Dr. med. Stefan Förch. Die Veröffentlichung mit dem Titel „A minimally invasive cerclage of the tibia in a modified Goetze technique: operative technique and first clinical results“ (19) erfolgte daher als geteilte Erstautorenschaft.

In der veröffentlichten anatomischen Studie mit dem Titel „Minimally invasive cerclage at the tibia using a modified Goetze technique: An anatomical study“ (26) wurde die Operationstechnik an 10 Kadaverpräparaten durchgeführt. Ziel war zum einen festzustellen, ob relevante Strukturen zwischen der Cerclage und der Tibia eingefasst werden und zum anderen, welche Lagebeziehung und Abstände die relevanten Sehnen, Gefäße und Nerven zur den eingebrachten Cerclage haben. Hierfür wurden an jedem der 10 Kadaverunterschenkel jeweils vier Kabelcerclagen in der modifizierten Götze-Technik auf definierten Leveln (24cm, 18cm, 12cm und 6cm oberhalb der Facies

articularis inferior tibiae) eingebracht. Die operierten Präparate wurden dann auf den 4 Cerclagenleveln quer durchtrennt und die Schnittebenen auf eingeschlossene Strukturen zwischen Tibia und Cerclage untersucht. Anschließend wurde jeweils ein standardisierter Marker aufgebracht und eine digitale Fotografie der Schnittebenen angefertigt. Mittels Software konnte somit der Abstand der jeweiligen Strukturen zur Kabelcerclage ausgemessen und schließlich ausgewertet werden. In dieser Arbeit wirkte ich als Co-Autor bei der Diskussion der Ergebnisse und der Verfassung des Artikels mit.

Diskussion

Wie in verschiedenen Studien nachgewiesen werden konnte, erhöht die Kombination einer Marknagel- oder Plattenosteosynthese mit einer Kabelcerclage die Stabilität des Gesamtkonstrukts (25,27). Auch wurde gezeigt, dass die Art und das Material der Cerclage einen Einfluss auf die Stabilität hat (22,28). So wird durch moderne Kabelcerclagen eine höhere Stabilität und Fixierungsstärke erreicht als durch die klassische Drahtcerclage, eine FiberTape- Cerclage schnitt in der biomechanischen Testung am schlechtesten ab (22,28). Zudem konnte gezeigt werden, dass Scherkräfte durch die additive Kabelcerclage unter simulierter Vollbelastung so deutlich reduziert werden konnten, dass die Werte unter dem Niveau derer einer alleinigen Plattenosteosynthese unter simulierter Teilbelastung lagen (25). Durch diese Stabilitätssteigerung sollte eine unmittelbar postoperative Vollbelastung möglich sein (25). Eine frühfunktionelle Mobilisation des Patienten nach erfolgter Operation sollte das Ziel einer jeden Osteosynthese sein und senkt gerade an der unteren Extremität das Risiko für Thrombosen und thromboembolische Ereignisse, welche im Rahmen einer Ruhigstellung deutlich erhöht sind (1,6). Des Weiteren führt eine Verzögerung der initialen Aufbelastung des Beines zu einer Beeinträchtigung der Frakturheilung der Tibia (29). Möglicherweise können durch den Wegfall von Restriktionen hinsichtlich der postoperativen Mobilisierung diese Risiken nochmals gesenkt werden. Durch eine unmittelbar mögliche Vollbelastung des Beines sind weitere Vorteile für den Patienten vorstellbar wie die schnellere Rückkehr zur vollen Mobilität, Selbstständigkeit, Berufstätigkeit und zum sportlichen Aktivitätsniveau vor der Verletzung.

Aus biomechanischer Sicht ist die additive Kabelcerclage somit empfehlenswert. Bisher war aber lediglich ein perkutanes Verfahren für die Drahtcerclage durch Goetze beschrieben und die Entwicklung eines minimalinvasiven Verfahrens für Kabelcerclagen notwendig. Dieses minimalinvasive Verfahren für moderne Kabelcerclagen an der Tibia, welches die Grundlage dieser Arbeit ist, wurde am Universitätsklinikum Augsburg entwickelt und konnte mit klinischen Ergebnissen publiziert werden (19). Es findet regelhafte Anwendung im klinischen Alltag der Klinik für Unfallchirurgie und Orthopädie des Universitätsklinikum Augsburg.

Ein Risiko bei der minimalinvasiven Einbringung von Cerclagen ist, dass relevante Strukturen, vor allem neurovaskuläre Strukturen und Sehnen, eingeklemmt werden können (17,26). Dies wird von Kritikern als ein Argument gegen eine Anwendung von Cerclagen vorgebracht. Selbst Buhler, ein Anwender der minimalinvasiven Goetze-

Technik, empfiehlt, dass diese Technik keine Anwendung in den distalen 12cm der Tibia finden solle um dieses Risiko zu reduzieren (17). Einen fundierten Beleg für diese Empfehlung, der z.B. auf Grund einer anatomischen Studie erbracht wurde, bringt er jedoch in seiner Ausführung nicht an (26). Generell empfehlen die Anwender der beiden minimalinvasiven Techniken, nach Goetze oder in der Augsburger Technik, zur Vermeidung des Einfassens von kritischen Strukturen zwischen Knochen und Cerclage, dass eine entsprechend schonende Operationstechnik angewandt wird, eine so exakt wie mögliche geschlossene Reposition der Fraktur vor der Applikation der Cerclage erfolgt und während der Durchführung ein ständiger Kontakt zwischen Instrumenten und Tibia besteht (17,19,20,26).

Um die bis vor kurzem fehlende Darstellung der anatomischen Lagebeziehung zwischen der Cerclage der Tibia und den gefährdeten Strukturen des Unterschenkels zu erbringen, erfolgte die anatomische Studie an Kadaver-Unterschenkeln in unserer Abteilung (26). Auf 4 Höhen des Unterschenkels an jeweils 10 Unterschenkeln wurde der Abstand zu den anatomischen Strukturen des Unterschenkels bestimmt und hierüber die gefährdetsten Strukturen identifiziert. Auf den Höhen mit einem Abstand von 24 cm (Level 1) und 18cm (Level 2) zum Gelenkspalt des oberen Sprunggelenks (OSG), welche zur proximalen Hälfte des Tibiaschafts gezählt werden können, sind vor allem die Arteria tibialis posterior und die Vena tibialis posterior gefährdet. In der distalen Hälfte des Tibiaschafts, in der Studie als Level 3 (12cm oberhalb des OSG) und Level 4 (6cm oberhalb des OSG) bezeichnet, sind es Arteria tibialis anterior, Vena tibialis anterior, Nervus fibularis profundus und die Sehne des Musculus tibialis posterior (26).

Auf Grund ihrer teils deutlich variierender Nähe zur Tibia in den einzelnen Präparaten, können die Vena saphena magna und der Nervus saphenus in der distalen Hälfte der Tibia, insbesondere je näher der Abstand zum OSG ist, eine enge Lagebeziehung zur Tibia und somit zur Cerclage aufweisen und damit auch gefährdet sein (26).

Zu nennen sind jedoch die drei Limitationen der anatomischen Studie: Die Konservierung der Präparate mit Alkohol und Formaldehyd lässt die Gewebe starrer werden, sodass unter anderem die Präparation im Rahmen der Operationstechnik erschwert wird. Hierdurch ist das Risiko für ein Einfassen von Strukturen zwischen Tibia und Cerclage höher und spricht damit eher für die erhaltenen Ergebnisse (26). Weiter konnten nur direkte Schäden der Gefäße oder der Einschluss eines Gefäßes in die Cerclage analysiert werden, da bei dem verwendeten Kadavermodell nach Applikation der Kabelcerclagen weder eine Angiographie durchgeführt wurde noch eine Aussage zu

sekundären Gefäßschäden wie Dissektionen oder sekundären Thrombosen möglich ist. Die letzte Limitation ist die Durchführung an nicht frakturierten Unterschenkeln, sodass eine stattgehabte Dislokation der Strukturen im Rahmen des Unfalls oder der Reposition nicht detektiert werden konnte. Da unserer Meinung nach die Technik vor allem bei Spiralfrakturen mit eher niedriger Energie durchgeführt wird, ist der Grad der Frakturdislokation jedoch nicht sehr groß und eine weitestgehend anatomische Reposition vor der Applikation der Cerclage ist zudem empfohlen, was das Risiko einer unbeabsichtigten Umschlingung von Strukturen verringert (19,26). Trotz dieser Limitationen liefert die Studie einen weiteren Baustein zum Wissen in der Anwendung von minimalinvasiven Kabelcerclagen an der Tibia. Dieses Wissen um die gefährdetsten Strukturen auf den unterschiedlichen Höhen und ihrer teils engen Lagebeziehung zu einer Cerclage muss bei der Applikation berücksichtigt werden und fordert die bereits zuvor schon erwähnte schonende Durchführung dieser Operationstechnik. Aber auch für die postoperative Visite des Patienten bringt diese Kenntnis Vorteile, da so eine noch gezieltere Untersuchung dieser Strukturen durchgeführt werden kann, abhängig von der Höhe der angelegten Cerclage. Bei etwaigen Auffälligkeiten kann dann eine gezielte Diagnostik eingeleitet werden, entweder mittels Sonographie zur Darstellung der Sehnen, Nerven und Gefäße oder mittels (CT-) Angiographie zur bestmöglichen Darstellung der Gefäße.

In unserer monozentrischen Nachbetrachtung der klinischen Ergebnisse nach durchgeführter minimalinvasiver Kabelcerclage bei 96 Patienten mit insgesamt 113 Cerclagen konnte keine Gefäßverletzung detektiert werden. Aus Gründen des Strahlenschutzes und der knappen Ressourcen ist eine intra- oder postoperative Gefäßdarstellung jedoch nicht obligat, sodass klinisch inapparente Gefäßaffektionen gegebenenfalls übersehen wurden. Diese sollten aber auf Grund der fehlenden Klinik keinen Einfluss auf die Patienten haben. Die postoperativen Visiten beinhalten im Rahmen der klinischen Untersuchung die Erhebung des Nerven- und Gefäßstatus, den Wundzustand und das Bewegungsausmaß bei Entlassung. Sollte hierbei eine pathologische Situation festgestellt werden, so wird eine weitere Stufendiagnostik eingeleitet. Bezüglich der Gefäße ist dies zuerst eine Doppleruntersuchung und bei weiter bestehendem Verdacht eine Angiographie oder CT-Angiographie des betroffenen Beines (30).

In der Literatur werden Gefäßläsionen nur selten beschrieben und lediglich in wenigen Studien explizit aufgeführt und betreffen nur wenige Prozent der Patienten (31).

Sekundäre und iatrogene Schäden wie Pseudoaneurysmen oder Irritationen durch Verriegelungsschrauben finden sich nur in Einzelfallberichten (32–37), zudem sind die in den Berichten verwendeten Marknägel ältere und keine modernen Implantate. In unserem zugrundeliegenden Patientengut lagen keine Gefäßläsion vor.

Jedoch wurde eine Nervenläsion detektiert. Bei einer Patientin fiel in der postoperativen Visite ein Ausfall des Nervus peroneus profundus auf, der sich in Form einer Großzehenheberparese und einer Hypästhesie im Interdigitalraum der ersten und zweiten Zehe darstellte. In der durchgeführten neurologischen und apparativen Diagnostik konnte auf Grund der postoperativen Schwellung keine genaue Zuordnung erfolgen, sodass sich für eine operative Entfernung der Cerclage entschieden wurde. Circa ein halbes Jahr nach Entfernung hatte sich die Symptomatik fast vollständig zurückgebildet. Dieser eine Fall (1% der Patienten bzw. 0,9% der Cerclagen) lag noch unter der Rate der Nervenläsionen, die Habernek et al. in ihrer Studie (2,7% von 186 Patienten) feststellen mussten (23), hier wurde die Läsion aber der Braun'schen Schiene zugeschrieben und nicht der Cerclage selbst. Da sich jedoch nur bei einem Teil der 5 Patienten die Nervenläsion vollständig erholte (23), bleibt hier Platz zur Diskussion, ob nicht auch eine Cerclagen-bedingte Schädigung in Betracht gezogen werden muss.

Mit zwei dokumentierten Kompartmentsyndromen liegt unser Kollektiv unter den in der Literatur genannten Raten von 8,1-10,4% für extraartikuläre Tibiafrakturen beziehungsweise 7,8-13,3% bei offenen Frakturen (6,38–40). Das Risiko für die Entwicklung eines Kompartmentsyndrom ist für jüngere Patienten höher als für ältere (38,39), das mag wohl auch an der unterschiedlichen Kinetik des Unfallmechanismus liegen. Die Spiralfaktur der Tibia, die gut geeignet ist für die Anwendung einer minimalinvasive Kabelcerclage, entsteht eher durch Niedrigenergietraumata, was eine Erklärung für die geringe Anzahl an Kompartmentsyndromen in unserem Kollektiv sein könnte (19). Ein anderer Punkt im Hinblick auf Kompartmentsyndrome ist wichtig für alle Behandler von Unterschenkelfrakturen, denn ein offener Weichteilschaden mindert nicht das Risiko für ein akutes Kompartmentsyndrom und auch bei diesen Patienten muss an ein Kompartmentsyndrom gedacht werden (38). Dies gilt für alle Arten der Therapie, ob nun mit oder ohne Cerclage.

Bleibt noch die Betrachtung der Rate an Wundinfektionen. Es ergaben sich in 10 Fällen der 96 Patienten (10,4%) beziehungsweise der 113 Cerclagen (8,8%) eine postoperative Wundinfektion. Alle Infekte waren in Kombination mit einer Plattenosteosynthese aufgetreten und entsprechen damit einer Infektionsrate von 14% in der Subgruppe mit

Plattenosteosynthese. Von den insgesamt 10 Fällen einer Wundkomplikationen konnten aber lediglich drei Fälle den Operationszugängen der additiven Kabelcerclage zugeschrieben werden. Dies entspricht 3,1% der Patienten oder 2,7% der Cerclagen. Generell ist eine Nagelosteosynthese des Schienbeins seltener mit Wundkomplikationen und tiefen Wundinfekten vergesellschaftet als eine Plattenosteosynthese, auch wenn sie in minimalinvasiver Technik eingebracht wird. Für die Marknagelosteosynthese findet man Angaben zu postoperativen Wundkomplikationen inklusive oberflächlicher und tiefer Wundinfektionen in Höhe von 2-8% (12,40–42), für eine minimalinvasive Plattenosteosynthese jedoch von 9-16% (12,41,43). Dieser Unterschied fällt meines Erachtens aus mindestens zwei Gründen zu Ungunsten der Plattenosteosynthese aus: Bei der Plattenosteosynthese ist die kumulierte Hautschnittlänge und damit das direkte Weichteiltrauma größer und die Weichteildeckung des Osteosynthesematerials an der Facies medialis geringer. Hinzu kommt eine Kombination aus diesen beiden negativen Faktoren auf Höhe des Innenknöchels, weil die Platte hier über eine mediale Inzision über dem Malleolus medialis retrograd eingebacht wird und das distale Ende der Platte schließlich unter dieser Inzision mit einer geringen Weichteildeckung zu liegen kommt.

Ein weiterer Risikofaktor für eine Wundinfektion ist das simultane Vorliegen eines Kompartmentsyndroms. So erhöht sich der Anteil an Wundinfektionen für Nagelosteosynthesen auf bis zu 17% bei gleichzeitigem Vorliegen eines Kompartmentsyndroms (40). In unserem Kollektiv erlitten zwei Patienten ein Kompartmentsyndrom, einmal bereits unmittelbar nach Trauma, im zweiten Fall entwickelte sich dieses erst postoperativ nach der ausversorgenden Operation mit Cerclagen und Platte. In letzterem Fall entwickelte sich im Rahmen der weiteren Operationen nach der durchgeführten Fasziotomie des Unterschenkels ein tiefer Wundinfekt, der eine weitere aufwändige operative Behandlung mit sich brachte. Dieser Fall ist bereits in den 10 Fällen von Wundkomplikationen eingeschlossen.

Insgesamt kann somit festgehalten werden, dass trotz der notwendigen zusätzlichen Inzisionen für die minimalinvasive Kabelcerclage die Gesamtrate an Wundinfekten in unserem Kollektiv nicht erhöht ist. Zudem benötigt die Versorgung ohne Kabelcerclagen teilweise auch ein perkutanes oder offenes Repositionsmanöver (11,15,42), wodurch die Anzahl der Hautschnitte und Größe der Wundfläche ebenfalls erhöht wird.

Zusammenfassend kann man somit festhalten: Die minimalinvasive additive Kabelcerclage einer Tibiaschaftfraktur erhöht die Stabilität der gesamten Osteosynthese, sodass eine unmittelbare postoperative Vollbelastung ermöglicht werden kann (25).

Mit den dieser Arbeit zugrunde liegenden Studien konnte zum ersten Mal ein minimalinvasives Verfahren für moderne Kabelcerclagen an der Tibia beschrieben werden, welches in dieser Art bisher nicht existierte. Zum anderen konnte eine bisher noch nie durchgeführte anatomische Studie zu Cerclagen an der Tibia veröffentlicht werden. Durch diese konnte gezeigt werden, welche Strukturen auf Grund ihrer engen Lagebeziehung zur Tibia durch das Einbringen der Cerclage ein hohes Risiko haben verletzt oder in die Cerclage eingeschlossen zu werden. Weiter konnte diese modifizierte Technik, die am Universitätsklinikum Augsburg regelhaft eingesetzt wird, an einem entsprechenden Patientengut klinisch nachuntersucht werden und eine Kenntnis über das Komplikationsprofil gewonnen werden.

Eingehend auf die anfänglich gestellte Forschungsfrage, ob die additive minimalinvasive Cerclage das Komplikationsprofil der Standardversorgung von Tibiaschaftfrakturen verändert, konnte somit gezeigt werden, dass das Komplikationsprofil nicht verändert wird. Bei einer sorgsamten Präparation und Applikation ist dieses Verfahren, trotz anatomischer Nähe zu angrenzenden Strukturen, ohne erhöhte Rate an Gefäß-, Nerven- und Sehnenläsionen sowie Wundinfektionen anwendbar. Die Vorteile für die Patienten werden somit nicht durch eine Steigerung des Operationsrisikos und der Komplikationsrate im Vergleich zu den etablierten Verfahren erkauft und das Verfahren stellt einen Mehrwert für den Patienten dar.

Inwiefern die Patienten eine erlaubte postoperative Vollbelastung zeitnah umsetzen können und ob die Knochenbruchheilung positiv durch die Kabelcerclage beeinflusst wird, müssen weitere Untersuchungen zeigen.

Zusammenfassung

Cerclagen stellen in der heutigen operativen Versorgung von Knochenbrüchen ein gängiges Zusatztool dar, dennoch werden sie von vielen Chirurgen kritisch gesehen oder sogar abgelehnt. Gerade in der Behandlung von subtrochantären Femurfrakturen oder periprothetischen Femurfrakturen sind sie zusätzlich zu Marknagel- oder Plattenosteosynthesen etabliert. Für die Versorgung von Tibiaschaftfrakturen konnte ein minimalinvasives Operationsverfahren für moderne Kabelcerclagen beschrieben werden, das additiv zur Standardosteosynthese durchgeführt wird und somit die Stabilität des Gesamtkonstrukts deutlich erhöht. Zur Beurteilung des Verfahrens hinsichtlich seines Komplikationsprofils erfolgte die retrospektive Betrachtung des auf diese Weise versorgten Patientengut am Universitätsklinikum Augsburg sowie eine anatomische Studie an humanen Unterschenkelkadavern. Im Rahmen der anatomischen Studie wurde zum ersten Mal gezeigt, welche Strukturen in welchem Abschnitt des Unterschenkels durch dieses minimalinvasive Verfahren gefährdet sind verletzt oder zwischen Tibia und Kabelcerclage eingefasst zu werden. Diese sind in der proximalen Hälfte Arteria et Vena tibialis posterior sowie in der distalen Hälfte Arteria et Vena tibialis anterior, Nervus peroneus profundus und die Sehne des Musculus tibialis posterior. In der Betrachtung der klinischen Ergebnisse konnte ermittelt werden, dass die Anwendung dieser additiven Operationstechnik ohne erhöhte Rate an Gefäß-, Nerven- und Sehnenläsionen sowie Wundinfektionen einhergeht. Das Verfahren stellt einen Mehrwert für den Patienten ohne Erhöhung des Komplikationsprofils im Vergleich zu den etablierten Verfahren dar.

Summary

A cerclage is a common additional tool in today's surgical treatment of bone fractures, but many surgeons view it critically or even reject it. Especially in the treatment of subtrochanteric femur fractures or periprosthetic femur fractures, they are established in addition to intramedullary nail or plate osteosynthesis. For the treatment of tibial shaft fractures, a minimally invasive surgical procedure for modern cable cerclages has been described, which is performed in addition to standard osteosynthesis and thus significantly increases the stability of the overall construct. To assess the procedure with regard to its complication profile, a retrospective analysis of the patients treated in this way at the University Hospital Augsburg and an anatomical study of human lower leg cadavers were carried out. For the first time this anatomical study showed which structures in which section of the lower leg are at risk of being injured or trapped between the tibia and the cable cerclage as a result of this minimally invasive procedure. These are the posterior tibial artery and vein in the proximal half and the anterior tibial artery and vein, the deep fibular nerve and the tendon of the tibial posterior muscle in the distal half. When analysing the clinical results, it was determined that the use of this additive surgical technique is associated with no increased rate of vascular, nerve and tendon lesions or wound infections. The procedure provides added value for the patient without increasing the complication profile compared to established procedures.

Literaturverzeichnis

1. Märdian S, Schwabe P, Schaser KD. Tibiaschaftfrakturen. Vol. 153, Zeitschrift für Orthopädie und Unfallchirurgie. Georg Thieme Verlag; 2015. p. 99–119.
2. Larsen P, Elsoe R, Hansen SH, Graven-Nielsen T, Laessoe U, Rasmussen S. Incidence and epidemiology of tibial shaft fractures. Injury. 2015 Apr 1;46(4):746–50.
3. Weiss RJ, Montgomery SM, Ehlin A, Dabbagh Z Al, Stark A, Jansson KÅ. Decreasing incidence of tibial shaft fractures between 1998 and 2004: Information based on 10,627 Swedish inpatients. Acta Orthop. 2008 Aug 1;79(4):526–33.
4. Rupp M, Walter N, Pfeifer C, Lang S, Kerschbaum M, Krutsch W, et al. Originalarbeit: Inzidenz von Frakturen in der Erwachsenenpopulation in Deutschland. Dtsch Arztebl Int. 2021 Oct 8;118(40):665–9.
5. Anandasivam NS, Russo GS, Swallow MS, Basques BA, Samuel AM, Ondeck NT, et al. Tibial shaft fracture: A large-scale study defining the injured population and associated injuries. J Clin Orthop Trauma. 2017 Jul 1;8(3):225–31.
6. Rittstieg P, Wurm M, Müller M, Biberthaler P. Current treatment strategies for lower leg fractures in adults. Unfallchirurg. 2020 Jun 1;123(6):479–90.
7. Schünke M, Schulte E, Schumacher U, Voll M, Wesker K. Prometheus, LernAtlas der Anatomie, Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem. Vol. 1. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2005. 360–509 p.
8. Meinberg EG, Agel J, Roberts CS, Karam MD, Kellam JF. Fracture and Dislocation Classification Compendium-2018. J Orthop Trauma. 2018 Jan 1;32:S1–170.
9. Stannard JP, Schmidt AH, Wentzensen A, Gebhard F, Grützner PA, Ruchholtz S, et al., editors. Spezielle Unfallchirurgie. Vol. 2. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2020. 61–1023 p.
10. Harrasser N, von Eisenhart-Rothe R, Biberthaler P, editors. Facharztwissen Orthopädie Unfallchirurgie. Vol. 2. Berlin, Heidelberg: Springer; 2021. 189–217 p.
11. Rommens PM, Attal R, Hansen M, Kuhn S. Intramedulläre Nagelung von proximalen Tibiafrakturen. Oper Orthop Traumatol. 2011;23:411–22.

12. Coles CP, Gross M. Closed tibial shaft fractures: Management and treatment complications. A review of the prospective literature. *Can J Surg*. 2000 Aug;43(4):256–62.
13. Rüedi TP, Buckley RE, Moran CG, editors. *AO-Prinzipien des Frakturmanagements*. 2nd ed. Vol. 1. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2008. 1–555 p.
14. Bode G, Strohm PC, Südkamp NP, Hammer TO. Tibial Shaft Fractures-Management and Treatment Options. A Review of the Current Literature. *Acta Chir Orthop Traumatol Cech*. 2012;79(6):499–505.
15. Rommens PM, Kuechle R, Hofmann A, Dietz SO. Reduction techniques in intramedullary nailing osteosynthesis. Vol. 122, *Unfallchirurg*. Springer Verlag; 2019. p. 95–102.
16. Lambotte A. *Chirurgie Opératoire Des Fractures*. Paris; 1913. 1–556 p.
17. Buhler J. Percutaneous cerclage of tibial fractures. *Clin Orthop Relat Res*. 1974;(105):276–82.
18. Goetze O. Subcutane Drahtnaht bei Tibiaschrägfrakturen. *Arch f Klin Chir*. 1933;177:445–9.
19. Förch S, Reuter J, von der Helm F, Lisitano L, Hartwig C, Sandriesser S, et al. A minimally invasive cerclage of the tibia in a modified Goetze technique: operative technique and first clinical results. *Eur J Trauma Emerg Surg*. 2022 Aug 1;48(4):3115–22.
20. Förch S, Sandriesser S, Fenwick A, Mayr E. Beeinträchtigung der Blutversorgung durch Cerclagen: Mythos oder Realität? *Unfallchirurg*. 2021 Mar 19;124(3):231–40.
21. Bérenger-Féraud LJB. *Traité de l'immobilisation directe des fragments osseux dans les fractures*. Paris; 1870. 1–744 p.
22. Förch S, Sandriesser S, Mayr E, Schrödl F, von Rüden C, Augat P. Biomechanical comparison of different cerclage types in addition to an angle stable plate osteosynthesis of distal tibial fractures. *Injury*. 2021 Aug 1;52(8):2126–30.
23. Habernek H, Walch G, Dengg C. Cerclage for torsional fractures of the tibia. *J Bone Joint Surg Br*. 1989 Mar;71-B(2):311–3.

24. Lenz M, Perren SM, Gueorguiev B, Richards RG, Krause F, Fernandez dell'Oca A, et al. Underneath the cerclage: an ex vivo study on the cerclage-bone interface mechanics. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2012 Oct 28;132(10):1467–72.
25. Sandriesser S, Förch S, Mayr E, Schrödl F, von Rüden C, Augat P. Supplemental cerclage wiring in angle stable plate fixation of distal tibial spiral fractures enables immediate post-operative full weight-bearing: a biomechanical analysis. *European Journal of Trauma and Emergency Surgery.* 2022;48(3):621–8.
26. Förch S, Lisitano L, von der Helm F, Reuter J, Mayr E. Minimally invasive cerclage at the tibia using a modified Goetze technique: An anatomical study. *Orthopaedics and Traumatology: Surgery and Research.* 2024 Feb 1;110(1).
27. Förch S, Sandriesser S, von Rüden C, Mayr E, Augat P. Cerclage Wiring Improves Biomechanical Stability in Distal Tibia Spiral Fractures Treated by Intramedullary Nailing. *J Clin Med.* 2023 Mar 1;12(5).
28. Lenz M, Marcel Perren S, Geoff Richards R, Mückley T, Olaf Hofmann G, Gueorguiev B, et al. Biomechanical performance of different cable and wire cerclage configurations. *Int Orthop.* 2013;37(1):125–30.
29. Houben IB, Raaben M, Van Basten Batenburg M, Blokhuis TJ. Delay in weight bearing in surgically treated tibial shaft fractures is associated with impaired healing: a cohort analysis of 166 tibial fractures. *European Journal of Orthopaedic Surgery & Traumatology.* 2018;28(3):1429–36.
30. Deutsche Gesellschaft für Gefäßchirurgie. Gefäßverletzungen (S2). In: Leitlinien zu Diagnostik und Therapie in der Gefäßchirurgie. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2010. p. 161–5.
31. Langård Ø, Bø O. Segmental Tibial Shaft Fractures. *Acta Orthop Scand.* 1976 Jan 8;47(3):351–7.
32. Sautet P, Choufani • Elie, Petit P, Franck Launay •, Jouve JL, Pesenti S. Pseudoaneurysm of anterior tibial artery following a diaphyseal fracture of the tibia mimicking a malignant bone tumor. *Arch Orthop Trauma Surg.* 136.
33. Gómez-Salazar JA, Tovar-López J, Hernández-Rodríguez G, De la Concha-Ureta H. Caso clínico Seudoaneurisma postraumático de arteria tibial anterior

- secundario a fractura diafisiaria de tibia. Reporte de caso. *Acta Ortop Mex.* 2016;30(1):25–7.
34. Inamdar D, Alagappan M, Shyam L, Devadoss S, Devadoss A. Pseudoaneurysm of Anterior Tibial Artery following Tibial Nailing: A Case Report. *Journal of Orthopaedic Surgery.* 2005 Aug 4;13(2):186–9.
 35. Roberts C, Ruktanonchai D, King D, Seligson D. Vascular Compromise and Amputation After Intramedullary Nailing of a Tibia Fracture. *J Orthop Trauma.* 1998 Feb;12(2):136–8.
 36. Urban WP, Tornetta P. Vascular Compromise after Intramedullary Nailing of the Tibia. *The Journal of Trauma: Injury, Infection, and Critical Care.* 1995 May;38(5):804–7.
 37. Bono CM, Sirkin M, Sabatino CT, Reilly MC, Tarkin I, Behrens FF. Neurovascular and Tendinous Damage With Placement of Anteroposterior Distal Locking Bolts in the Tibia. *J Orthop Trauma.* 2003 Nov;17(10):677–82.
 38. Gamulin A, Wuarin L, Zingg M, Belinga P, Cunningham G, Gonzalez AI. Association between open tibia fractures and acute compartment syndrome: A retrospective cohort study. *Orthopaedics and Traumatology: Surgery and Research.* 2022 Sep 1;108(5).
 39. Park S, Ahn J, Gee AO, Kuntz AF, Esterhai JL. Compartment Syndrome in Tibial Fractures. *J Orthop Trauma.* 2004 Aug;23(7).
 40. Blair JA, Stoops TK, Doarn MC, Kemper D, Erdogan M, Griffing R, et al. Infection and Nonunion After Fasciotomy for Compartment Syndrome Associated With Tibia Fractures: A Matched Cohort Comparison. *J Orthop Trauma.* 2016 Jul;30(7):392–6.
 41. Liu XK, Xu WN, Xue QY, Liang QW. Intramedullary Nailing Versus Minimally Invasive Plate Osteosynthesis for Distal Tibial Fractures: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Orthop Surg.* 2019 Dec;11(6):954–65.
 42. Auston DA, Meiss J, Serrano R, Sellers T, Carlson G, Hoggard T, et al. Percutaneous or Open Reduction of Closed Tibial Shaft Fractures during Intramedullary Nailing Does Not Increase Wound Complications, Infection or Nonunion Rates. *J Orthop Trauma.* 2017 Apr 1;31(4):215–9.

43. Wenger R, Oehme F, Winkler J, Perren SM, Babst R, Beeres FJP. Absolute or relative stability in minimal invasive plate osteosynthesis of simple distal meta or diaphyseal tibia fractures? *Injury*. 2017 Jun 1;48(6):1217–23.

Appendix

Abkürzungsverzeichnis

AO:	Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen
CT:	Computertomographie
OSG	oberes Sprunggelenk

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 AO-Klassifikation der Tibiaschaftfrakturen, basierend auf Meinberg et al. 2018 (8).....	5
--	---

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Klassifikation der Weichteilbeschädigung für geschlossene Frakturen nach Tscherne und Oestern, basierend auf James P. Stannard et al. (9).....	6
Tabelle 2 Klassifikation des Weichteilschadens bei offenen Frakturen nach Gustilo und Anderson, basierend auf James P. Stannard et al. (9) und Norbert Harrasser et al. (10)	7

Danksagung

Abschließend möchte ich mich bei denjenigen herzlich bedanken, die mich während der Durchführung meiner Promotion und der Anfertigung dieser Dissertation unterstützt haben.

Zuerst möchte ich Prof. Dr. med. Dr. h.c. Edgar Mayr besonders danken für die Überlassung des Promotionsthemas, seine anhaltende Unterstützung, Beratung und Motivation.

Ein besonderer Dank gilt Dr. med. Stefan Förch für seine ausgezeichnete Betreuung und Zusammenarbeit. Mit seinem Interesse, seinen Anmerkungen und Anstößen hat er mich und meine Promotion vorangebracht und geprägt.

Meiner Familie und meinen Freunden danke ich sehr für die Geduld und Motivation. Insbesondere meiner Verlobten gebührt Dank für ihren Zuspruch und Antrieb sowie dem wiederholten Verzicht auf gemeinsame Zeit.

Eigene Veröffentlichungen

Förch S, Reuter J, von der Helm F, Lisitano L, Hartwig C, Sandriesser S, et al. A minimally invasive cerclage of the tibia in a modified Goetze technique: operative technique and first clinical results. *Eur J Trauma Emerg Surg.* 2022 Aug 1;48(4):3115–22.

Förch S, Lisitano L, von der Helm F, Reuter J, Mayr E. Minimally invasive cerclage at the tibia using a modified Goetze technique: An anatomical study. *Orthopaedics and Traumatology: Surgery and Research.* 2024 Feb 1;110(1).