

Knochenregeneratbildung durch intra- und extramedulläre Kallusdistraction

Bone Reconstruction Using Intra- and Extramedullary Callus Distraction

Florian Pavlu^a, Dan Bieler^a, Katrin Etmüller^a, Stefanie Pavlu^a, Stephan Waldeck^b, Axel Franke^a, Erwin Kollig^a

Zusammenfassung

Muskuloskeletale Traumata sind die häufigste Entität bei Schuss- und Explosionsverletzungen. Dabei finden sich im Rahmen von Schussfrakturen und thermomechanischen Kombinationsverletzungen der Extremitäten regelhaft ausgedehnte knöcherne Defekte, spätestens nach Abschluss des Debridements aller avitalen Gewebsanteile. Nach Kontaminationskontrolle und plastischer Wiederherstellung eines belastbaren und gut durchbluteten Weichteilmantels ist die Überbrückung langstreckiger knöcherner Defekte an den großen Röhrenknochen die Herausforderung und wesentlicher Bestandteil der Extremitätenrekonstruktion. Hierzu stehen u. a. mit der Masquelet-Technik und der Kallusdistraction auch im wehrmedizinischen Kontext etablierte Verfahren zur Verfügung.

Die Kallusdistraction kann dabei über extra- wie intramedulläre Systeme respektive auch in Kombination umgesetzt werden. Bei den rein extramedullären Techniken stehen unilaterale oder Ringfixateure sowie deren Hybridvarianten zur Verfügung, die optional in Verbindung mit einem intramedullären Kraftträger als PABST (plate assisted bone segment transport)-Verfahren oder mittels eines Segmenttransportnagels zum Einsatz kommen.

In diesem Artikel sollen Erfahrungen aus dem Bundeswehrzentral Krankenhaus Koblenz bei der Anwendung externer und interner Rekonstruktionsverfahren anhand ausgewählter Kasuistiken dargestellt werden.

Schlüsselwörter: Kallusdistraction, Knochendefekt, Schussfraktur, Transportfixateur, PABST-Verfahren

Summary

In a military context, wounding and significant defects of the extremities are most commonly related to gunshot and blast injuries. The patients show up with grossly contaminated soft tissue and substantial bone defects. Consequent debridement of necrotic tissues is essential to manage contamination and to avoid superinfection but often increases the dimension of the defects. Therefore, full coverage with local or free soft tissue transfer

is necessary before any surgical intervention for the reconstruction of bone. To replace extended diaphyseal defects and to achieve full weight-bearing capability, several surgical methods have been established and are under research furthermore. In general, the principle, on the one hand, is replacement by autologous artificial bone substitutes after preparing the defect site, e.g., the Masquelet-technique. On the other hand, for extended diaphyseal defects segmental bone transport proved advantageous. It started with external transporting devices as first proposed by Ilizarov's ring fixators and all its successors. The development shows a trend toward partial or complete closed techniques such as common rail, PABST (plate assisted bone segment transport), or motorized, segmental transporting nails. This presentation briefly overviews the experiences in the Bundeswehr Central Hospital Koblenz with bone defect reconstruction using external and internal distraction techniques.

Keywords: callus distraction; bone defect; gunshot injury; transport fixator; PABST technique

Hintergrund

Die Rekonstruktion ausgedehnter knöcherner Defekte an den großen Röhrenknochen ist von hoher wehrmedizinischer Relevanz. Frakturen mit ausgedehntem Weichteil- und Knochendefekten gehören zu den häufigsten Verletzungsentitäten nach Schuss- und Explosionsverletzungen [10, 15].

Debridement

Nach dem die Kontamination oder Infektion sanierenden ggfs. seriellen Debridement resultieren regelhaft u. a. ausgedehnte knöcherne Defekte, die die Gebrauchsfähigkeit einer Gliedmaße unmöglich machen. Die erfolgreiche Rekonstruktion derartiger komplexer Extremitätenverletzungen ist herausfordernd und bedarf eines konsequenten chirurgisch-taktischen Vorgehens. Obligate Voraussetzung für die knöchernen Defektrekonstruktion ist das sequenzielle und konsequent durchgeführte chirurgische Debridement mit dem Ziel, alle avitalen oder kontaminierten Gewebeanteile zu entfernen. Diese erzwungene Infektfreiheit ist die Voraussetzung für die plastisch-chirurgische Schaffung eines belastbaren Weichteilmantels.

^a Bundeswehrzentral Krankenhaus Koblenz, Klinik XIV – Unfallchirurgie und Orthopädie, Wiederherstellungs- und Handchirurgie, Verbrennungsmedizin

^b Bundeswehrzentral Krankenhaus Koblenz, Klinik VIII – Diagnostische und interventionelle Radiologie und Neuroradiologie

Knöcherne Defektrekonstruktion

Sind diese Grundvoraussetzungen erfüllt, kann die knöcherne Defektrekonstruktion erfolgen. Hier stehen bewährte Techniken zur Verfügung [6, 14]. Diesen liegen unterschiedliche Prinzipien zu Grunde; sie haben dadurch methodisch bedingte Einschränkungen bei der Indikationsstellung, die es zu berücksichtigen gilt. Das Masqueletverfahren ist insbesondere bei der Sanierung infektiöser Defekte Mittel der Wahl, setzt aber ein gut durchblutetes, differenzierungsfähiges Empfängerareal voraus. Vorzugsweise ist hier nach dem Debridement gut durchbluteter Muskel zur Ausbildung der Membranamantelung einer PMMA (Polymethylmethacrylat)-Zementplombe zu fordern. Diese Technik stößt jedoch bei langstreckigen Rekonstruktionen an ihre Grenzen, da hier biomechanisch betrachtet ein sprödes, wenig elastisches, knöchernes Konstrukt entsteht und nach wie vor kein (resorbierbarer) Platzhalter für ein Markraumäquivalent zur Verfügung steht, der die Ausbildung eines diaphysären Röhrenersatzes unterstützt. Durch das unphysiologische Elastizitätsmodul des Masquelet-Regenerates resultieren eine gesteigerte Rigidität und ein erhöhtes Re-Frakturrisiko (Abbildung 1). Für langstreckige, diaphysäre Defekte sind rekonstruktive Verfahren bevorzugt einzusetzen, die eine knöcherne Röhrenstruktur zum Ergebnis haben [14]. Die Kallusdistraktion mittels Fixateur externe oder interner Verlängerungssysteme ist hier weiträumig etabliert und in der Literatur als belastbare Methode zur Rekonstruktion knöcherner Defekte bei Schuss- und Explosionsverletzungen beschrieben [1].

Zahlreiche technische Varianten

Die ursprüngliche Konzeption von Ilizarov mit dem Transport-Ringfixateur in unterschiedlichen technischen Varianten wurde seither stetig weiterentwickelt. Dies geschah auch unter dem Eindruck der hohen Komplikationsrate durch die Ringsysteme mit den multiplen Pinstellen und

der langen Tragezeit in situ [7, 8, 9]. Es sind unilaterale Transport- respektive Verlängerungssysteme, Hybridvarianten und, als Übergangslösung zu einem internen Verfahren, das „common-rail Verfahren“ etabliert. Dieses kombiniert die intramedulläre Stabilisierung eines großen Röhrenknochens via Verriegelungsmarknagel mit der Kallotaxis via externem Transportfixateur. Der Nagel gewährleistet eine sichere Richtungsvorgabe des Transportsegmentes und ausreichende Stabilität während der Regeneratreifung. Der Transportfixateur externe fällt dabei mit weniger Fixateurpins und deren innenwohnendes Risikopotential erheblich kleiner aus als ein üblicher Transportringfixateur. Der Fixateur kann nach Transportabschluss und Verriegelung des Transportsegmentes entfernt werden. Die Regeneratreifung erfolgt bei einliegendem Verriegelungsnagel. Um einen komplett gedeckten Segmenttransport zu generieren, wurde unter Nutzung der via Induktion elektrisch oder per Magnet angetriebenen motorisierten Verlängerungsnägel das PABST (plate assisted bone segment transport)-Verfahren entwickelt. Hierbei wird der Segmenttransport durch den Verlängerungsnagel von außen gesteuert und überwacht. Die Beibehaltung von Länge, Achse und Rotationsstabilität besorgt ein Plattenfixateur, an dem das Segment bis zum Andocken und der Fixierung an den Fixateur interne entlangläuft. Ein motorisierter Segmenttransportnagel, der intramedulläre Stabilisierung und Transport mit einem Implantat bewerkstelligt, steht nach einer kurzen Zeit fehlender Zulassung neuerdings wieder auf dem Markt zur Verfügung. Erste Erfahrungen damit waren vielversprechend (s.u. Kasuistik 2). Die Wiederzulassung als Titanvariante ist vom Hersteller im April 2023 annonciert.

Erfahrungen im Bundeswehrzentral Krankenhaus Koblenz

Im Bundeswehrzentral Krankenhaus (BwZKrh) Koblenz werden knöcherne Defekte regelhaft mittels externer wie

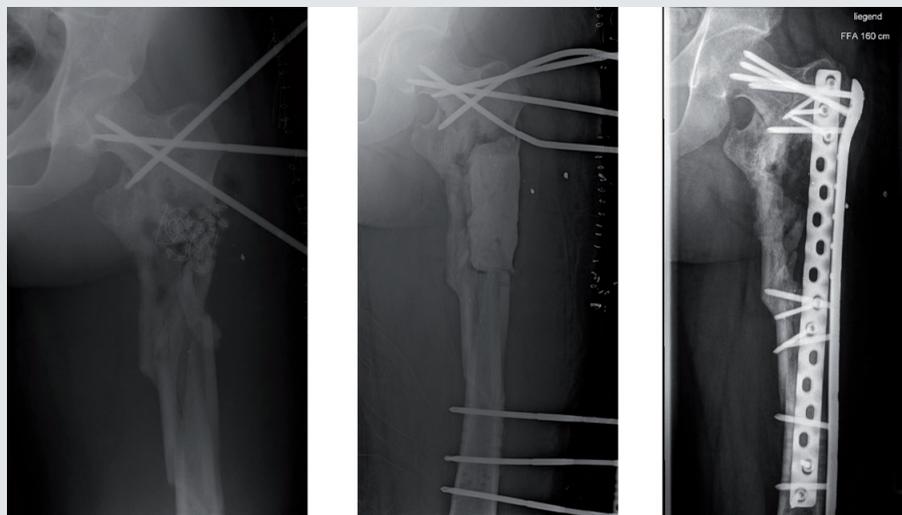


Abb. 1: Masquelet-Regenerat ohne diaphysäre Röhrenstruktur

interner Distraktionstechniken rekonstruiert. Die Indikation wird jeweils fallbezogen individuell gestellt und beinhaltet folgende Entscheidungsfaktoren:

- Länge des Defektes und Lage in Bezug auf die angrenzenden Gelenke,
- Länge der Hebel und potenzielle Krafteinwirkung auf das Konstrukt für die Dauer der Behandlung,
- Lage und Durchblutung von Resektions- und potenzieller Transportstrecke,
- systemischer Patientenstatus (Kardiovaskuläre Vorerkrankungen, Immunkompetenz, Risikofaktoren),
- Zustand des Weichgewebes, Durchblutungssituation und lokoregionäre Gewebekompetenz sowie
- Compliance des Patienten.

Hier haben sich im Laufe der Zeit Stärken und Schwächen der einzelnen Verfahren herauskristallisiert, die in diesem Artikel exemplarisch an repräsentativen Kasuistiken dargestellt und diskutiert werden sollen.

Kasuistik 1: Defektrekonstruktion mittels Transportfixateur an der Tibiadiaphyse

Anamnese

Der 54-jährige Soldat erlitt 2001 eine I° offene Unterschenkelfraktur rechts. Die initial auswärts durchgeführte Nagelosteosynthese scheiterte in der Infektkomplika-tion und musste entfernt werden. Zur Infektsanierung war hier eine Segmentresektion im Bereich der distalen rechten Tibiadiaphyse notwendig. Dieser Defekt wurde durch antegraden Segmenttransport mittels Spindelfixateur erfolgreich durchgeführt. Die Transportkortikotomie erfolgte dabei weit im Gesunden im Bereich der proximalen Diaphyse (Abbildung 2).



Abb. 2: (Fall 1) Zustand nach antegrader Kallotaxis mittels Spindelfixateur



Abb. 3: (Fall 1) CT-Schnitt mit hochgradigem Verdacht auf Infektpersistenz



Abb. 4: (Fall 1) Z.n. Sequesterresektion und Debridement

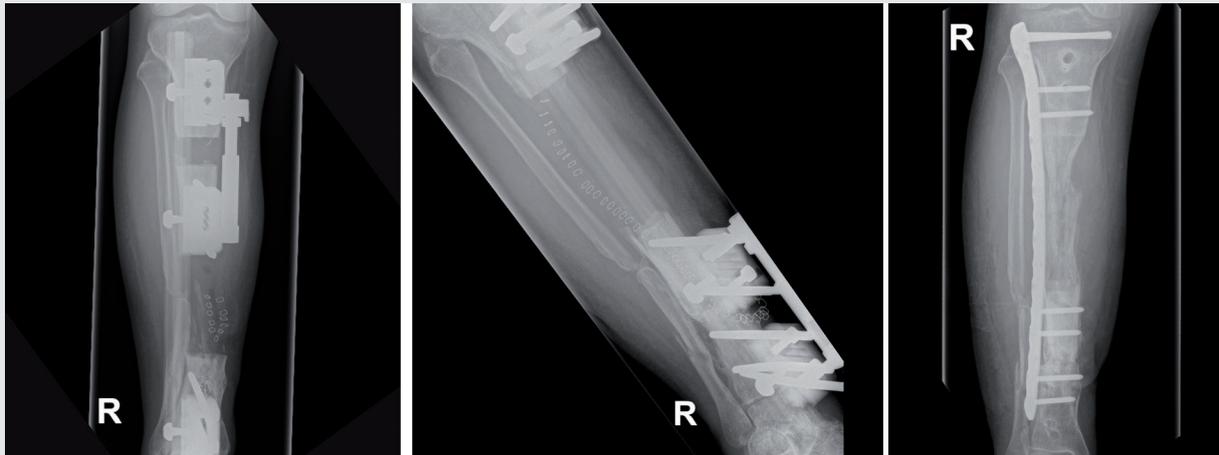


Abb. 5: (Fall 1) Links: Z.n. Segmentresektion und Anlage LRS-Fixateur; Mitte: Transportende; Rechts: Z.n. Dockingoperation

2015 erlitt der Soldat eine Refrakturen am selben Unterschenkel nach einem Verkehrsunfall. Die hier durchgeführte Plattenosteosynthese scheiterte erneut in der Infektkomplizierung. Nach Materialentfernung und Debridement gingen die klinischen Infektzeichen zurück. 2018 kam es zu einer Rezidivinfektion. Der Soldat stellte sich dann im Juni 2018 erstmals in der Ambulanz des BwZKrhs Koblenz vor. Zu diesem Zeitpunkt beklagte er zunehmende Belastungs- und Ruheschmerzen am rechten Unterschenkel. Der Weichteilmantel war zwar geschlossen, zeigte aber unspezifische klinische Entzündungszeichen mit Schwellung, Rötung, Überwärmung und teigiger Schwellung. Die durchgeführte CT ergab den hochgradigen Verdacht auf eine Infektpersistenz auf dem Boden eines avitalen Knochensequesters (Abbildung 3).

Rekonstruktion

Zunächst erfolgte in einem ersten Eingriff zur Infektsanierung die operative Exploration des suspekten Diaphysenbefundes. Hier demaskierte sich intraoperativ eine Abszedierung auf dem Boden des vermuteten Sequesters im Bereich der medialen Diaphyse. Der Sequester wurde entfernt und das radikale chirurgische Debridement durchgeführt (Abbildung 4). Eine antibiotikumhaltige PMMA-Kette wurde eingelegt und vulnär ausgeleitet (Tag 0). Im postoperativen Verlauf wurde diese schrittweise entfernt. Hierunter kam es zu einer kompletten Konsolidierung des Weichteilbefundes, sodass am Tag 44 post OP die Segmentresektion und der Aufbau des Transportfixateurs erfolgte (Transportfixateur Orthofix LRS®). Die Defektstrecke betrug 180 mm (Abbildung 5 links). Bei klinisch wiederaufflammendem Infekt musste die Defektstrecke am Tag 75 erstmalig revidiert werden. Die Infektkontrolle erfolgte mittels Debridement und Einlage von PMMA-Ketten. Eine weitere Revision im Bereich der Defektzone und der Fixateurpins erfolgte am Tag 125 mittels Ketteneinlage. Der hier entstandene Weichteildefekt musste mittels faszio-kutanen Schwenklappens

(Tag 161) gedeckt werden. Der Transport konnte am Tag 155 beendet werden (Abbildung 5 Mitte). Nach 282 und 372 Tagen erfolgten weitere Revisionen bei unkomplizierten Pininfektionen. Am Tag 323 konnte der Fixateur externe entfernt werden, am Tag 419 erfolgte in einem kleinen operativen Eingriff die Dockingoperation mittels Implantation eines Plattenfixateurs (Abbildung 5 rechts). Am 1499. Tag nach Beginn der Behandlung im BwZKrhs Koblenz konnte die endgültige Konsolidierung nachgewiesen werden (Abbildung 6).

Fazit

Dieser Fall zeigt eindrücklich die Limitationen des Segmenttransportes mittels Transportfixateur bei sehr langen Defektstrecken. Das hier skizzierte Vorgehen ist langwierig und gekennzeichnet durch immer wieder aufflammende Infektkomplikationen über die Pinstellen des Fixateurs. Dieser Verlauf bewegte sich stetig an der Grenze zum Misserfolg mit dann desaströsen Folgen für den Patienten. Schlussendlich konnte hier eine erfolg-



Abb. 6: (Fall 1) Endgültiger Nachweis der Konsolidierung

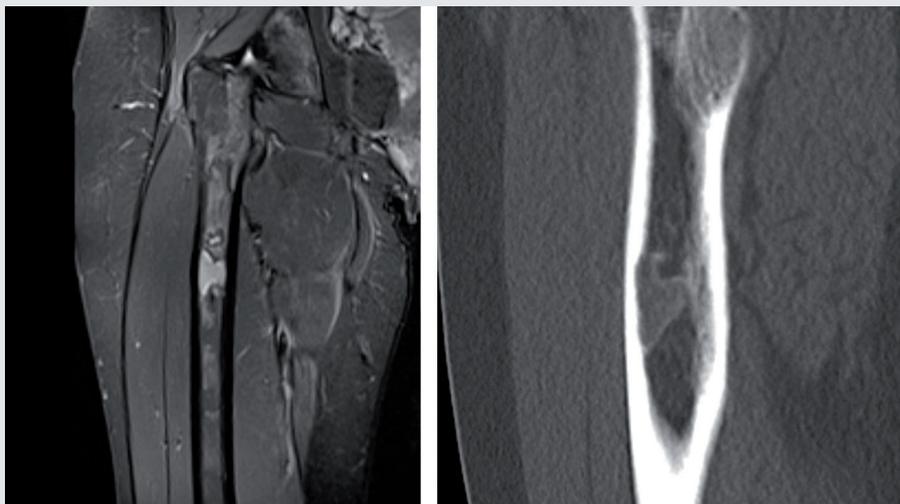


Abb. 7: (Fall 2) Schnittbildgebung bei fibröser Dysplasie

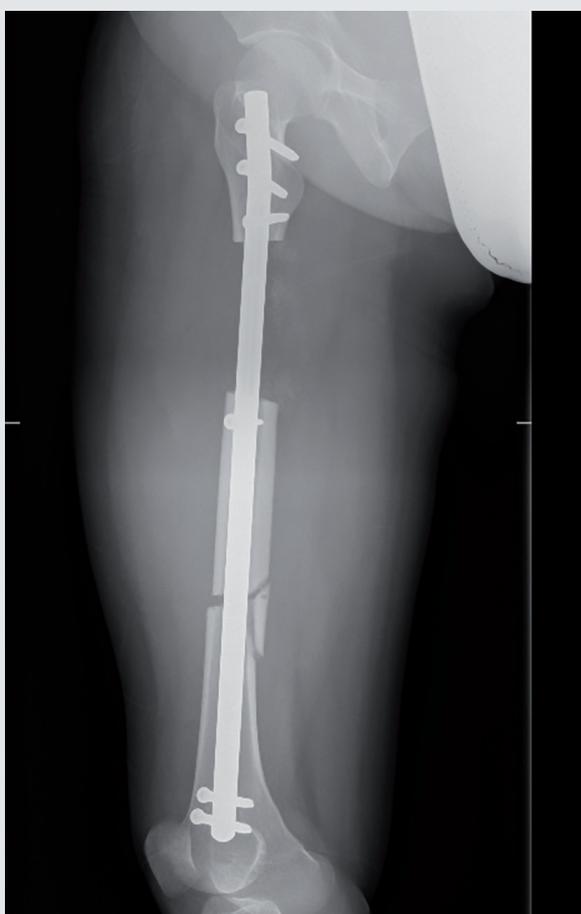


Abb. 8: (Fall 2) Z.n. Segmentresektion und Implantation eines Segmenttransportnagels

reiche Rekonstruktion durchgeführt werden, und der Soldat verfügt heute über eine alltagsbelastbare Extremität. An dieser Stelle könnte von ähnlichen Kasuistiken aus unserer Klinik berichtet werden, die nach langem Heilverlauf frustan verlaufen und in einer Ablatio geendet sind. Der Transportfixateur war und ist aktuell dennoch das „working horse“ der Kallusdistraktion. Die Rate der

Infekt komplikationen im BwZKrhs Koblenz war ähnlich hoch wie die berichteten Komplikationsraten aus vergleichbarer Literatur [2, 4, 5]. Die Studienlage um neue Verfahren (PABST und Segmenttransportnägel) lässt vermuten, dass hier mit deutlich geringeren Infekt komplikationen zu rechnen ist [6, 12, 16].

Kasuistik 2: **Segmenttransportnagel an der Femurdiaphyse**

Anamnese

Eine 39-jährige Patientin stellte sich mit rezidivierend verlaufender, histologisch gesicherter und hochsymptomatischer fibröser Dysplasie im Bereich des rechtsseitigen subtrochantären Femurs vor. Zweimalige Sanierungsversuche in domo mittels Knochenfensterung und Curettage waren aufgrund von Rezidiven gescheitert (Bildgebung Abbildung 7).

Rekonstruktion

In einem ersten Eingriff (Tag 0) erfolgte die subtrochantäre Segmentresektion in sano und die einzeitige Implantation eines antegraden Femursegmenttransportnagels (Nuvasive Precise®). Die Defektstrecke betrug 80 mm. Die Transportkortikotomie erfolgte in der distalen Femurdiaphyse zum retrograden Transport (Abbildung 8). Nach komplikationslosem Transport war das Transportende am Tag 148 erreicht. Am Tag 245 musste wegen unzureichender Konsolidierung der Dockingzone eine Docking-Operation (Abbildung 9) mittels Plattenosteosynthese (Synthes GFI Titan®) und autologer Spongiosa-plastik erfolgen. Hierunter kam es zu einer zeitgerechten Konsolidierung. Die Implantatentfernung der Dockingplatte erfolgte im Verlauf auf Wunsch der Patientin (Abbildung 10). Die Extremität kann regulär belastet werden.

Fazit

Mit dem Segmenttransportnagel steht nach Neuzulassung als Titanvariante neuerdings wieder ein einzigarti-



Abb. 9: (Fall 2) Z.n. Dockingoperation

ges System zur Verfügung, das die Defektzone mit hinreichender biomechanischer Stabilität überbrücken und den Segmenttransport eines integrierten magnetangetriebenen Transportmoduls realisieren kann. Eine additive biomechanische Stabilisierung im Sinne eines PABST-Verfahrens ist damit überflüssig.

Kasuistik 3 Rekonstruktion einer komplexen Unterschenkelverletzung mittels PABST Verfahren

Anamnese

Ein 34-jähriger männlicher Soldat erlitt im Juli 2022 ein Monotrauma des rechten Unterschenkels mit mehrfragmentärer II° offener proximaler Unterschenkelfraktur. Die externe Erstversorgung in einer zivilen Klinik erfolgte mittels Reposition, Fixateuranlage, biportaler Kompartmentspaltung und Anlage eines NPWT (negative pressure wound therapy)-Systems (Abbildung 11). Bei Zuver-



Abb. 10: (Fall 2) Z.n. Teilimplantatentfernung und Konsolidierung

legung zeigte sich ein großflächiger Weichteildefekt an der medialen Tibiadiaphyse mit mehreren frei liegenden, deperiostierten und ebonisierten Tibiafragmenten.

Rekonstruktion: Im August 2022 (Tag 0) erfolgte das chirurgische Debridement, die Segmentresektion im Bereich der proximalen Tibiadiaphyse in sano (Abbildung 12) und die Implantation einer Masquelet-Zementplombe. Die Defektstrecke betrug 130 mm. Nach ausreichender Weichteilkonditionierung mittels NPWT konnte der Weichteildefekt am Tag 6 mittels kontralateralem, freien ALT (Anterolateral tigh)-Flap gedeckt werden (Abbildung



Abb. 11: (Fall 3) Ausgangsbefunde



Abb. 12: (Fall 3) Z.n. Segmentresektion und Masqueletplombe



Abb. 13: (Fall 3) Weichteildeckung mittels ALT



Abb. 14: (Fall 3) Z.n. Implementierung des PABST Verfahrens

13). Bei ausgeheilten Weichteilverhältnissen konnte am Tag 96 das PABST Verfahren angewendet werden. Hierzu erfolgte die Implantation eines antegraden Tibiatransportnagels (Nuvasive Precise®) und die additive, defektüberbrückende mediale Plattenosteosynthese (Synthes Metaphysenplatte®, Abbildung 14). Die Transportkortikotomie erfolgte weit im Gesunden in der dista-

len Diaphyse zum retrograden Transport. Auf Grund des langstreckigen Defektes zeichnete sich hier im Verlauf bereits nach kurzer Transportzeit eine zunehmende Valgusdislokation ab (Abbildung 15 links). Zum Erzwingen der für den erfolgreichen Transport notwendigen biomechanischen Stabilität musste die Revision zur Achskorrektur mittels zusätzlicher lateraler Plattenosteosynthese erfolgen (Abbildung 15 Mitte). Die maximale Transportstrecke des implantierten Transportnagels beträgt 80 mm, der Defekt war 130 mm lang. Daher wurde am Tag 214

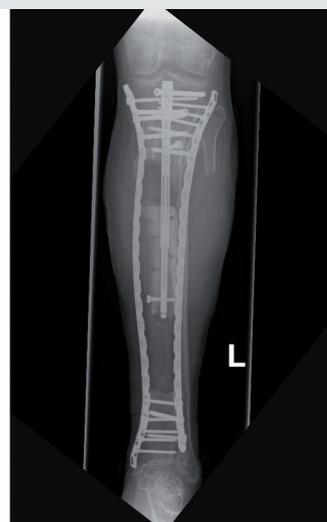


Abb. 15: (Fall 3) Links: Zunehmende Valgusdislokation bei laufendem PABST Verfahren; Mitte: Revision und Achskorrektur; Rechts: Z.n. Recharging-Operation



Abb. 16: (Fall 4) Infektpseudarthrose nach Schussfraktur

unterstreicht dabei zwei wesentliche Bedingungen für den erfolgreichen Transport:

Die Schaffung eines gut durchbluteten, dehnbaren und immunkompetenten Weichteilmantels unter großzügiger Indikationsstellung zur lappenplastischen Deckung ist die *conditio sine qua non* für die erfolgreiche knöcherne Defektrekonstruktion. Ob für den Patienten eine locoregionale Verschiebelappenplastik oder eine freie Lappenplastik in Betracht kommt, muss individuell entschieden werden.

Weiterhin ist insbesondere bei langstreckigen Defekten eine adäquate biomechanische Stabilität, ggf. auch unter Implantation bilateraler Osteosynthesen, zu erzwingen, um Achs- und Rotationsdislokationen im laufenden Transport zu vermeiden.

Kasuistik 4: Rekonstruktion einer infizierten Oberschenkel- schussfraktur mittels PABST Verfahren

Anamnese

Der 42-jährige ukrainische Soldat erlitt am 3. April 2022 eine Durchschussverletzung am linken distalen Oberschenkel mit multifragmentärem Schussbruch der distalen Femurdiaphyse. Es wurden keine neurovaskulären Leitstrukturen verletzt. Die Versorgung in der Ukraine erfolgte mittels initialen Debridements und Fixateuranlage sowie zweizeitiger, retrograder Marknagelosteosynthese. Bei Aufnahme in das BwZKrhS Koblenz zeigte sich im Bereich der Schussfraktur eine Infektpseudarthrose mit einliegenden Projektilfragmenten (Abbildung 16). Der Weichteilmantel zeigte sich äußerlich klinisch infektfrei und geschlossen. Bei einer offenen Probenentnahme wurde der Infekt im Schussbruch mikrobiologisch gesichert.

Rekonstruktion

In einer ersten Revision (Tag 0) wurde der Nagel explantiert und ein Fixateur externe aufgebaut. Weiterhin wurde die Defektzone in sano mittels knöcherner Seg-

die Recharging-Operation zum Weitertransport durchgeführt (Abbildung 15 rechts). Der aktuell noch laufende Segmenttransport verläuft bis dato regelrecht. Der Weichteilmantel ist infektfrei und geschlossen.

Fazit

Mit dem PABST-Verfahren steht eine Alternative zum Segmenttransportnagel zur Verfügung. Dieser Casus



Abb. 17: (Fall 4) Links: Situs nach Segmentresektion; Mitte: Geschoss- und Gewebereste aus der Pseudarthrose; Rechts: Z.n. Segmentresektion, Masqueletplombe und Fixateuranlage

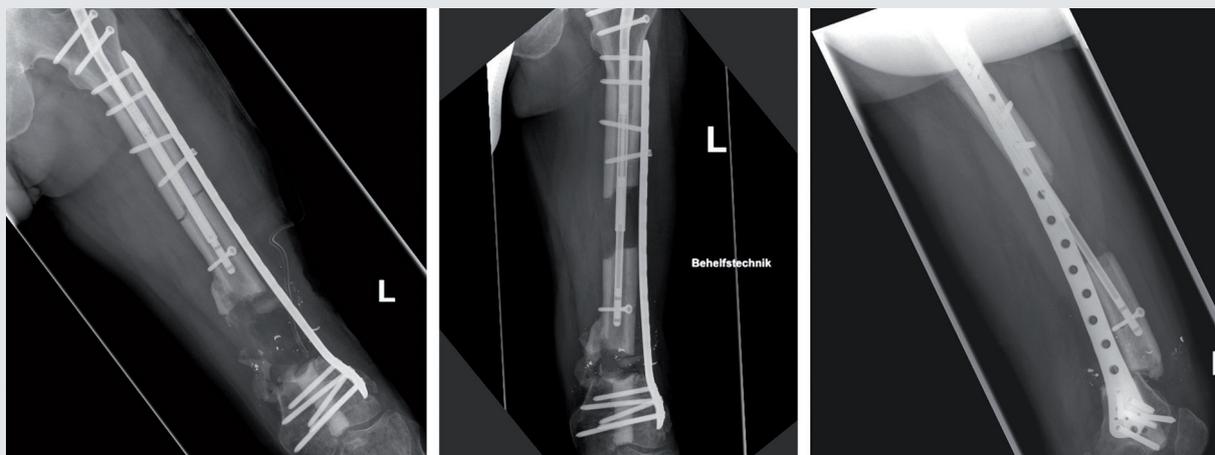


Abb. 18: (Fall 4) Links: Z.n. Implementierung des PABST Verfahrens; Mitte und Rechts: Laufender Transport und Dislokation



Abb. 19: (Fall 4) Z.n. Revision und Achskorrektur

mentresektion debridiert und mit einer Masquelet-Plombe aufgefüllt (Abbildung 17). Aus der Defektzone wurden Projekttilfragmente und Uniformfetzen entfernt. Bei steriler Inzisionspunktion des linken Kniegelenkes wurde eine intraartikuläre Infektbeteiligung in der mikrobiologischen Diagnostik ausgeschlossen. Das Nagellager im Kondylenmassiv wurde ebenfalls mit antibiotikumhaltigen PMMA-Zement aufgefüllt und dadurch der Markraum nach distal zum Gelenk hin versiegelt. Die Stabilisierung erfolgte via unilateralem Fixateur externe. In einem weiteren, kleinen Eingriff wurde nach Konsolidierung des Weichgewebemantels die Infektfreiheit der Defektzone mittels Gewinnung und mikrobiologischer Aufarbeitung von Gewebeproben nachgewiesen.

Am Tag 91 konnte bei weiterhin negativen klinischen und laborchemischen Infektparametern die Implementierung des PABST Verfahrens erfolgen. Hierzu wurde ein antegrader Femurtransportnagel (Nuvasive Precise®) implantiert. Die additive Plattenosteosynthese erfolgte mittels Implantation eines lateralen, überbrückenden Plattenfixateurs (Zimmer NCB®). Die Transportkortikotomie wurde im Gesunden in der proximalen Femurdiaphyse zum antegraden Transport durchgeführt. Die Defektstrecke betrug 74 mm (Abbildung 18 links). Bei insgesamt problemlos laufendem Transport musste im Verlauf eine Revision durchgeführt werden (Abbildung 18 Mitte). Wegen der für das Femur typischen, beim Verlängerungsnagel aber fehlenden Antekurvation kam es hier zu einem Hinauslaufen des Transportsegmentes nach ventral aus der Femurachse (Abbildung 18 rechts). Hier erfolgte am Tag 169 die Achsenkorrektur (Abbildung 19) bei abgeschlossenem Transport durch Einschwenken des Plattenfixateurs nach dorsal und Schraubenfixation des Transportsegmentes bei Kompressionsdocking an das distale Femur. Bei weiterhin infektfreiem Verlauf erfolgte die Repatriierung des Soldaten bei nativradiologisch zeitgerechter Regeneratreifung.

Fazit

Dieser Kasus zeigt eindrücklich, dass das initiale Debridement der Schlüssel zum Erfolg ist. Wird dieses nicht in notwendiger Konsequenz durchgeführt, ist die Infektkomplikation oder der Misserfolg der Osteosynthese vorprogrammiert. Das PABST Verfahren hat inzwischen auch im militärmedizinischen Kontext seinen Stellenwert unter Beweis gestellt.

Diskussion

Die Rekonstruktion komplexer Extremitätenverletzungen ist eine Herausforderung im wehrmedizinischen Kon-

text – dies unter Berücksichtigung der Tatsache, dass nach aktuellen Angaben aus der ukrainischen Militärchirurgie in 69 % der Fälle Extremitätenverletzungen mit Knochendefekten (bei 75 % aller Extremitätenverletzungen) vorliegen [18]. Insbesondere Schussfrakturen – auch solche durch Splitter und Schrapnelle – gehen regelmäßig mit komplexen Frakturentitäten und obligater Kontamination einher. Anhand der beschriebenen Kasuistiken lässt sich zusätzlich folgern, dass die Rekonstruktion von komplexen Extremitätenverletzungen oder Pathologien auch abseits des militärmedizinischen Kontexts klinisch relevant ist [10, 15]. Durch das konsequente chirurgische Debridement zur Kontaminationskontrolle entstehen regelmäßig Defektstrecken, die einer chirurgischen Reparatur bedürfen.

Grundbedingungen für eine erfolgreiche Rekonstruktion

Für eine erfolgreiche Wiederherstellung sind mehrere Grundbedingungen zu erfüllen:

Debridement

Das effiziente und konsequente, chirurgische Debridement steht am Anfang jeder Rekonstruktion. Wird hierdurch die Kontaminationskontrolle nicht erreicht, ist ein Scheitern aller rekonstruktiven Maßnahmen vorprogrammiert. Diese *conditio sine qua non* ist durch vielfältige Literaturhinweise belegt. Aktuelle Empfehlungen zur systematischen Rekonstruktion komplexer Extremitätentraumata setzen diese Grundbedingung einstimmig voraus [3, 11, 13].

Konsolidierung des Weichteilmantels

Vor jedem rekonstruktiven Ansatz am Knochen ist eine Konsolidierung des Weichteilmantels unter großzügiger Indikationsstellung zur lappenplastischen Deckung obligat. Hier decken sich die Erfahrungen aus dem BwZKrhS Koblenz mit den Empfehlungen aus der aktuellen Literatur [3, 11].

Ausreichende biomechanische Stabilität

Jedes Konstrukt zur knöchernen Rekonstruktion bedarf einer hinreichenden biomechanischen Stabilität. Die Kasuistik 3 zeigt beispielhaft den Verlauf bei unzureichender Stabilität auf. In der Literatur finden sich nur vereinzelte Fallberichte zur Bewertung biomechanischer Komplikationen bei laufendem Segmenttransport. Die beschriebenen Komplikationen sind jedoch fast ausschließlich Achsabweichungen mit konsekutivem Implantatversagen, wie es auch bei ausbleibender Korrektur im dargestellten Kasus gedroht hätte. [6, 16]. Hieraus kann gefolgert werden, dass bei sich abzeichnender Achsdeviation kein abwartendes Verhalten, sondern eine umgehende Indikationsstellung zur Revision der Schlüssel zum Erfolg ist. Es muss in diesem Zusammenhang auch festgehalten werden, dass die Korrekturmöglichkeiten

bei einer Rekonstruktion mittels Transportnagel ad latim oder ad axim durch das völlig gerade aufbauende Implantat bei physiologischer Knochenkrümmung z. B. am Femur limitiert sind. Der Transport mittels externem Transportfixateur bietet hier durch Korrektur der Pinpositionierung und der Transportachse deutlich mehr Möglichkeiten zur weniger aufwändigen Korrektur [6].

Keine algorithmische Empfehlung zur Methode

Eine generelle, gar algorithmische Empfehlung zur Rekonstruktion diaphysärer Defekte auszusprechen, ist derzeit nicht möglich. Die unterschiedlichen Verfahren bieten, jedes für sich bewertet, spezifische Vor- und Nachteile. Der Transport mittels Transportfixateur ist leichter korrigierbar, bewährt in der Anwendung und eignet sich auch für langstreckige Transporte. Die Komplikationsrate durch Infektionen, insbesondere Pininfekte, ist höher als bei internen Verfahren [6, 16, 17]. Die internen Verfahren sind weniger infektanfällig, und der Segmenttransport via internem Antriebsmechanismus ist einfach zu bewerkstelligen. Insgesamt sind sie deutlich anspruchsvoller in der Implementierung und geben weniger Spielraum zur Korrektur etwaiger biomechanischer Komplikationen in Folge von Achs- und Rotationsabweichungen [16]. Zudem sind sie erheblich kostenintensiver: Ein Transportfixateur kann grundsätzlich wiederverwendet werden, ein ungleich teurer Verlängerungsnagel nicht. Zudem müsste er nach sicherer Konsolidierung explantiert werden. Inwiefern hier tatsächlich eine evidente Überlegenheit bezüglich Erfolgs- versus Komplikationsraten zu verzeichnen ist, kann und sollte Gegenstand zukünftiger Studien sein. Systematische Aufarbeitungen hierzu finden sich in der aktuellen Literatur bisher nicht. Nicht nur aus wirtschaftlicher Perspektive sind vergleichende (Langzeit-) Studien mit dem Endpunkt der einsetzbaren und infektfreien Gliedmaße erforderlich.

Individuelle patientenbezogene Entscheidung

Schlussendlich muss die Entscheidung zur Verwendung des Rekonstruktionsverfahrens individuell auf den Patienten, die Defektsituation und die technischen und operativen Voraussetzungen zugeschnitten sein, um die bestmögliche Behandlungsqualität zu liefern. Eine belastbare Compliance des Betroffenen ist ein nicht zu unterschätzender Faktor hinsichtlich der Erfolgsaussichten. Mit den Transportnägeln steht ein hochpotentes, neues Rekonstruktionsverfahren zur Verfügung, dass zunehmend etabliert ist. Dabei ist das PABST Verfahren als die bestmögliche Alternative zum Segmenttransportnagel im Sinne einer „all in“-Lösung zu bewerten. Mit der Wiedereinführung werden sich ein Teil der biomechanischen Problemfelder des PABST Verfahrens relativieren und die Komplikationsrate der internen Verfahren signifikant absenken lassen. Es bedarf einer wissenschaftlich strukturierten Anwendungsbeobachtung im Sinne kon-

trollierter Studien, um hier evidenzbasierte Empfehlungsgrade formulieren zu können.

Kernaussagen

- **Das konsequente Debridement ist der Schlüssel zum Erfolg.**
- **Die Infektfreiheit ist durch die negative mikrobiologische Gewebebeimpfung im Defekt nachzuweisen, bevor Schritte zur knöchernen Rekonstruktion aufgenommen werden.**
- **Eine biologisch belastbare Weichteildeckung mit Infektfreiheit ist die *conditio sine qua non* für eine erfolgreiche Extremitätenrekonstruktion.**
- **Externe Transportverfahren weisen häufig lange Heilverläufe durch eine höhere Rate an Pin-assoziierten Infektkomplikationen auf.**
- **Bei internen Verfahren stellt der Transportnagel – aktuell im PABST Verfahren – eine wertvolle Alternative dar. Bedingung ist dabei eine gute, knöchernen Verankerungsmöglichkeit im Hinblick auf eine der Rekonstruktionsdauer standhaltenden Stabilität.**
- **Der Segmenttransportnagel hat das grundsätzliche Potenzial, sich als eine realistische Alternative zu etablieren.**

Literatur

1. Baumgart R, Schuster B, Baumgart T: [Callus distraction and bone transport in the treatment of bone defects]. *Orthopäde* 2017; 46: 673–680.
2. Bieler D, Franke A, Willms A et al.: Masquelet technique for reconstruction of osseous defects in a gunshot fracture of the proximal thigh—a case study. *Mil Med* 2014; 179:e1053–1058.
3. Cholok D, Saberski E, Lowenberg DW: Approach to Complex Lower Extremity Reconstruction. *Seminars in Plastic Surgery* 2022; 36:233–242.
4. Franke A, Bieler D, Wilms A et al.: [Treatment of gunshot fractures of the lower extremity: Part 2: Procedures for secondary reconstruction and treatment results]. *Unfallchirurg* 2014; 117: 985–994.
5. Franke A, Hentsch S, Bieler D et al.: Management of Soft-Tissue and Bone Defects in a Local Population: Plastic and Reconstructive Surgery in a Deployed Military Setting. *Mil Med* 2017; 182:e2010-e2020.
6. Gardner MP, Beason AM: Plate-Assisted Bone Segment Transport Versus Precice Bone Transport Nail. *J Orthop Traumatol* 2022; 35: S19-s24.
7. Hosny GA: Limb lengthening history, evolution, complications and current concepts. *J Orthop Traumatol* 2020; 5; 21(1): 3.
8. Ilizarov GA: The principles of the Ilizarov method. *Bulletin of the Hospital for Joint Diseases Orthopaedic Institute* 1988; 48:1–11.
9. Ilizarov GA: *Transosseous osteosynthesis: theoretical and clinical aspects of the regeneration and growth of tissue*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1992.

10. Janiak F: Analyse der Schuss- und Explosionsverletzten des Bundeswehrzentralkrankenhauses Koblenz zu Verletzungsmuster, chirurgischem Versorgungskonzept, Infektiologie, Outcome und posttraumatischer Lebensqualität. In: *Universitätsmedizin. Johannes Gutenberg-Universität Mainz* 2021, <https://openscience.ub.uni-mainz.de/handle/20.500.12030/6041>.
11. Khundkar R: Lower extremity flap coverage following trauma. *J Clin Orthop Trauma* 2019; 10:8 39–844.
12. Laubscher M, Mitchell C, Timms A et al.: Outcomes following femoral lengthening: An initial comparison of the Precice intramedullary lengthening nail and the LRS external fixator monorail system. *Bone Joint J* 2016; 98-b: 1382–1388.
13. Mansour AM, Jacobs A, Raj MS et al.: Lower Extremity Soft Tissue Reconstruction Review Article. *Orthop Clinics North Am* 2022; 53:287–296.
14. Mathieu L, Mourtialon R, Durand M et al.: Masquelet technique in military practice: specificities and future directions for combat-related bone defect reconstruction. *Mil Med Res* 2022; 9: 48.
15. Petfield JL, Lewandowski LR, Stewart L et al.: IDCRP Combat-Related Extremity Wound Infection Research. *Mil Med* 2022; 187:2 5–33.
16. Summers S, Krkovic M: Bone transport with magnetic intramedullary nails in long bone defects. *Eur J Orthop Surg Traumatol* 2021; 31: 1243–1252.
17. Watson JT: Distraction osteogenesis. *J Am Acad Orthop Surg* 2006; 14: S168–174.
18. Yarmoliak Y: Report from Kiev Military Hospital. Vortrag ARCHIS 2023; Bad Nauheim 01.-03.03.23.

Bildquellennachweis

Alle Abbildungen stammen aus der Sammlung der Klinik für Unfallchirurgie und Orthopädie des Bundeswehrzentralkrankenhauses Koblenz. Bildrechte Dritter bestehen nicht.

Manuskriptdaten

Zitierweise

Pavlu F, Bieler D, Etmüller K, Pavlu S, Waldeck S, Franke A, Kollig E: Knochenregeneration durch intra- und extramedulläre Kallusdistraction. *WMM* 2023; 67(6): 226-236.

DOI: <https://doi.org/10.48701/opus4-148>

Für die Verfasser

Flottillenarzt Dr. Florian Pavlu
Bundeswehrzentralkrankenhauses Koblenz, Klinik XIV – Unfallchirurgie und Orthopädie, Wiederherstellungs- und Handchirurgie, Verbrennungsmedizin
Rübenacher Str. 170, 56072 Koblenz
E-Mail: florianpavlu@bundeswehr.org

Manuscript Data

Pavlu F, Bieler D, Etmüller K, Pavlu S, Waldeck S, Franke A, Kollig E: Bone [Reconstruction Using Intra- and Extramedullary Callus Distraction.] *WMM* 2023; 67(6): 226-236.

DOI: <https://doi.org/10.48701/opus4-148>

For the Authors

Commander (MC) Dr. Florian Pavlu
Bundeswehr Central Hospital Koblenz, Department XIV – Traumatology, Orthopedics and Septic Reconstructive Surgery
Rübenacher Str. 170, D-56072 Koblenz
E-Mail: florianpavlu@bundeswehr.org