

R. Baumgart, S. Hinterwimmer, M. Krammer, W. Mutschler

Zentrale Zugseilssysteme – vollautomatische, kontinuierliche Kallusdistraction zur Behandlung langstreckiger Knochendefekte

Bone Transport System with a Central Cable – Fully Automatic, Continuous Distraction Osteogenesis for the Treatment of Large Bone Defects

Klinikum der Universität München, Chirurgische Klinik und Poliklinik

Schlüsselwörter: Kallusdistraction, Segmenttransport, Zugseilssystem, Knochendefekt

Key Words: Distraction osteogenesis – Bone transport – Cable system – Bone defect

Die Kallusdistraction durch Segmenttransport dient dem Ausgleich von Knochendefekten oder Knochenverlusten. Die Hauptfragmente werden meist von extern stabilisiert, ein intermediäres Knochensegment wird abgelöst und mit einer Geschwindigkeit von ca. 1 mm/Tag durch den Defekt gezogen. In dem ständig größer werdenden Osteotomiespalt bildet sich ein hochwertiges Knochenregenerat. Nachteilig ist, daß die Stabilisatoren des Verschiebesegments über die gleiche Länge, wie sie der Knochendefekt mißt, die Weichteile durchschneiden, was häufig zu schmerzhaften Pininfektionen mit Folgeoperationen sowie einer unschönen Narbenbildung führt. Mit dem in München entwickelten automatischen, motorgetriebenen Segmenttransport mit nur einem einzigen, zentral verlaufenden Zugseil wird der Querverzug von Pins durch die Weichteile vollständig vermieden. Grundsätzlich kann ein derartiges „zentrales Zugseilssystem“ mit jedem externen Fixateur kombiniert werden, da die zu implantierenden Teile unabhängig von diesem Fixateur eingebracht werden. Der in schonender Technik durchführbare operative Eingriff mit Ablösung des Transportsegments, Verankerung des Zugseilsystems und Stabilisierung der Hauptfragmente erfordert zahlreiche Spezialwerkzeuge. Der Distractionsverlauf führt zu deutlich reduzierten Weichteiliritationen und Schmerzen. Pininfektionen sind selten, so daß der Umstieg auf ein internes Stabilisationssystem nach Abschluß des Segmenttransports risikoarm durchgeführt werden kann. In dem hier vorliegenden Beitrag werden die technischen Besonderheiten des Stabilisierungssystems sowie des Transport- und Steuersystems detailliert beschrieben, und der klinische Einsatz wird anhand eines Patientenbeispiels vorgestellt.

Distraction osteogenesis involving bone transport enables the reconstruction of large bone defects. The main bone fragments are usually stabilised externally, an intermediate bone segment is separated and moved through the defect at a rate of about 1 mm/day. New high-quality bone is built up in the constantly enlarging osteotomy gap. A major problem associated with the method is the fact that the fixation pins are also moved over the same distance, and cut through the soft tissue, often resulting in painful pin tract infections and ugly scars. An automatic motorized bone transport system employing a single central cable now eliminates this problem. The system can be combined with any external fixateur, since the relevant implanted parts for bone transport are independent of the external stabilizer. The surgical procedure, which is easy on the patient, consists of bone segment separation, central cable fixation, and stabilisation of the main fragments, and requires the use of numerous special tools. The distraction itself results in significantly less soft tissue irritation and pain. Pin tract infections are rare, so that changeover to internal fixation after completion of bone transport carries little risk of infection. This article details the technical features of the stabilizing system and the transport and the control systems, and describes the clinical application in a patient.

Einleitung

Die Kallusdistraction durch Segmenttransport dient dem Ausgleich von Knochendefekten oder Knochenverlusten. Ein intermediäres Knochensegment wird durch Kortikotomie oder Osteotomie [2] abgelöst und mit einer Geschwindigkeit von ca. 1 mm/Tag durch den Defekt gezogen. Durch Zugspannung entsteht hinter dem Segment aus einem Fibroblastenregenerat Kallusgewebe, das sich in biologisch hochwertigen, voll tragfähigen Knochen umbildet. Bei der praktischen Umsetzung können voll implantierbare Systeme auf Marknagelbasis [1] nur dann zur Anwendung kommen, wenn die verbliebenen Hauptfragmente eine Marknagelstabilisierung zulassen und gesicherte Infektfreiheit vorliegt. Da diese Voraussetzungen vielfach nicht gegeben sind, erfolgt die Stabilisierung der Hauptfragmente beidseits der Defektstrecke meist durch

externe Fixateure. Der Segmenttransport selbst wird in konventioneller Weise durch Kirschnerdrähte, Schanz-Schrauben oder Steinmann-Nägel bewerkstelligt, was mit einem Querverzug dieser „Pins“ durch die Weichteile verbunden ist. Ein großer Teil der mit der Segmentverschiebung verbundenen Nachteile [7] wie häufige und schmerzhaft Pininfektionen mit Folgeoperationen sowie eine unschöne Narbenbildung sind darauf zurückzuführen. Auch die Richtungsstabilität des Transportsegments ist nur bedingt gewährleistet. Mit dem in München entwickelten „zentralen Zugseilssystem“ wird der Querverzug von Weichteilen vollständig vermieden und die Richtungsstabilität garantiert. Zusätzlich wird der automatische, motorgetriebene Segmenttransport in einfacher Weise realisierbar. Grundsätzlich kann ein zentrales Zugseil mit jedem externen Fixateur kombiniert werden, da die zu implantierenden Teile unabhängig vom Fixateur

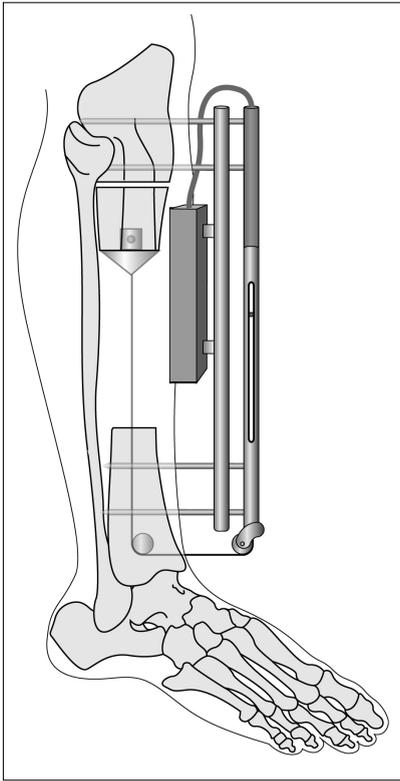


Bild 1. Schematischer Aufbau eines zentralen Zugseilsystems am Unterschenkel.

eingbracht werden. Damit liegt eine funktionelle Trennung zwischen dem Stabilisator der Hauptfragmente und dem Transportsystem vor, was als sehr vorteilhaft erachtet wird. Außerhalb des Körpers bilden die Komponenten des externen Fixateurs und des zentralen Zugseils eine Einheit, so daß diese aufeinander abgestimmt sein müssen.

Material und Methode

Das Stabilisierungssystem der Hauptfragmente

Zentrale Zugseilsysteme sind sowohl am Ober- als auch am Unterschenkel anwendbar und ermöglichen die Knochendefektbehandlung nach der Kallusdistractionmethode. Die Stabilisierung der Hauptfragmente erfolgt entweder mit einem monolateralen oder mit einem bilateralen Rohrfixateur, mit einem Ringfixateur oder mit einem Hybridfixateur. Am Unterschenkel ermöglicht ein streng ventral liegender Rohrfixateur mit jeweils zwei Schrauben im proximalen und zwei Schrauben im distalen Hauptfragment (Bild 1) einen günstigen Kraftfluß parallel zur anatomischen Knochenachse und das einfache Auswechseln von Fixateurschrauben. Mit Carbonstangen als Verbindungselementen ist diese Montage sehr leicht. Bei sehr proximalen Defekten kann diese Montage am Tibiakopf durch eine Querbacke ergänzt werden, die die Platzierung jeweils einer lateralen und einer medialen Schraube ermöglicht. Auch am Oberschenkel ist die streng ventrale Montage – mechanisch gesehen – der lateralen, für die Weichteile günstigeren Fixierung weit überlegen. Sie sollte aber nur dann vorgesehen werden, wenn sich eine temporäre Kniegelenksarthrose

aufgrund der Gelenknähe des Defekts nicht vermeiden läßt. Kurze gelenknahe Hauptfragmente lassen sich am besten mit einem Ringfixateur halten. Das bedeutet aber nicht, daß die gesamte Montage als Ringfixateur ausgebildet werden muß. Im diaphysären Abschnitt kann ohne Probleme wieder auf ein monolaterales System übergegangen werden.

Das Transportsystem

Als Transportsystem hat sich ein einzelnes Zugseil bewährt. Zur Anwendung kommt ein Kreuzschlag-Rundlitzenseil mit 7×7 Einzelkomponenten aus Implantatstahl (1.4411) mit einem Durchmesser von 1 mm entsprechend einem reinen Materialquerschnitt von $0,4489 \text{ mm}^2$ [6]. Entscheidend für den richtungsstabilen Segmenttransport sind die Führung und die Befestigung des zentralen Zugseils am Verschiebesegment. Sofern das Verschiebesegment, wie es häufig nach einer durch Infektion bedingten Knochenentfernung der Fall ist, eine keilförmige Stirnfläche aufweist, wird das Zugseil über die Keilspitze geführt und im kortikalen Bereich mit einer Knochenschraube fixiert (Bild 2). Das Seil wird hierzu um eine Rillenscheibe geführt und mit einer Kausche verpreßt. Durch die Asymmetrie der Segmentspitze kommt es zu Beginn der Segmentverschiebung zu einem leichten Abkippen des Verschiebesegments, bis sich die Segmentspitze in Zugrichtung ausgerichtet hat. Dieser Zustand erreicht ein stabiles Gleichgewicht, so daß das Segment mit der Spitze bei Erreichen des gegenüberliegenden Hauptfragments in die Markhöhle eintauchen kann. Bei planen Stirnflächen hat das Verschiebesegment zunächst keine Vorzugsrichtung, womit eine wesentliche Voraussetzung für einen richtungsstabilen Transport fehlt.

Um ein transversales Abgleiten und einen Aufstau von Weichteilgewebe zu vermeiden, wird ein Weichteilverdrängungskegel (Bild 3) vorgesehen, der mit seinem zylindrischen Teil ca. 10 bis 12 mm in den Markraum des Verschiebesegments eingebracht und dort mit einer Ver-

Bild 2. Weist das Verschiebesegment zum Defekt hin eine Spitze auf, muß das Zugseil über die Spitze ausgeleitet werden, um einen richtungsstabilen Transport zu gewährleisten.





Bild 3. Bei planer Stirnflächen wird ein Weichteilverdrängungskegel mit seinem zylindrischen Teil im Markraum des Verschiebesegments platziert und mit einer Schraube verriegelt.

riegelungsschraube unter Zuhilfenahme eines röntgendurchlässigen Winkelgetriebes befestigt wird. Das Zugseil wird im Verdrängungskegel fixiert und verläßt diesen über die dem Defekt zugewandte Spitze. Um das Zugseil auszuleiten, ist in dem gegenüberliegenden Hauptfragment eine Umlenkrolle erforderlich. Von entscheidender Bedeutung ist deren korrekte Platzierung, da die Distractionsrichtung damit unabänderlich vorgegeben ist. Damit das auflaufende Seil zentral im Knochen geführt wird, muß die Umlenkrolle um den Betrag des Radius exzentrisch platziert werden. Bei einem Außendurchmesser der Rolle von 10 mm beträgt der effektive Umlenkradius der verwendeten Mehrrippen-Umlenkrolle 4,5 mm. Das erklärt sich durch die Ausgestaltung der Umlenkrolle mit halbkreisförmigen Vertiefungen entsprechend dem Seildurchmesser. Durch die seitliche Abstützung verringert sich die Beanspruchung der Einzelfasern bei der Umlenkung erheblich. Zur Befestigung der Umlenkrolle sind Distanzhülsen verschiedener Länge und eine 5-mm-Bolzenschraube vorgesehen. Wenn das verbliebene Hauptfragment zu kurz ist oder in einzelnen Fällen keine sichere Fixierung zuläßt, ist es auch möglich, die Umlenkrolle auf einem quer verlaufenden Fixateur-Nagel (Steinmann-Nagel, Ø 5 mm) zu platzieren, der dann allerdings eine bilaterale Fixateurmontage erfordert. Die zweite Richtungsänderung des Zugseils erfolgt außerhalb des Körpers über eine Umlenkrolle, die ebenfalls das Seil in einer Rinne abstützt und einen effektiven Umlenkradius von 4,5 mm aufweist. Das Zugseil läuft in eine geschlitzte, mit einer Skala versehene Hülse, in der sich eine Spindel befindet, die das vom Motor kommende Drehmoment in die erforderliche Translationsbewegung umwandelt. Der Antrieb selbst ist stirnseitig an die geschlitzte Hülse angeflanscht und wird gemeinsam mit der Hülse und der äußeren Umlenkrolle in geeigneter Weise am Fixateur angebracht.

Das Steuerungssystem

Bei den ersten klinischen Einsätzen erfolgte die Steuerung des Motors über eine Schaltuhr. Derzeit ist eine neuartige Steuerung mit Mikroprozessor in klinischer Erprobung. Während mit der Schaltuhr maximal 16 Einschaltintervalle in 24 Stunden möglich waren, kann mit den neuen Steuergeräten eine quasi-kontinuierliche Distraction mit über 700 Einschaltvorgängen in 24 Stunden realisiert werden. Die Geräte sind mit einem wiederaufladbaren Akkumulator bestückt, der dem Patienten ein Höchstmaß an Unabhängigkeit ermöglicht. Akustische und optische Warnsignale informieren über Fehlfunktionen. Die gesamte Steuerung mit der dazugehörigen Energieversorgung hat etwa die Größe einer Zigaretenschachtel und wird ebenfalls am Fixateur angebracht (Bild 4). Trotz Antriebstechnik und Elektronik ist das Gesamtgewicht deutlich geringer als bei einer konventionellen Ringfixateurmontage. Viele weitere Optionen wie integrierte Meßverstärker zur Registrierung von Zugkräften und der Distractionslänge sind installiert und stehen optional zur Verfügung. Sogar die unmittelbare Telekommunikation zur Kontrolle und Programmierung über große Distanzen hinweg ist bei ersten Prototypen über eingebaute GSM-Module möglich.

Klinische Anwendung

Bei der Implantation von zentralen Zugseilsystemen sollte Infektfreiheit sichergestellt werden. Bei infizierten Verhältnissen ist deshalb ein erster Schritt immer die Wund- und Knochensäuberung mit Entfernung aller nekrotischen Gewebsanteile bis hin zur Vitalitätsgrenze. Der externe Fixateur wird so angelegt, daß in einem zweiten Schritt ein zentrales Zugseilsystem ergänzt werden kann. Erst wenn alle Entzündungsparameter negativ sind, wird über einen kleinen Schnitt von der Defektseite aus die Stirnfläche des längeren Hauptfragmentes dargestellt und das Zugseil wie oben beschrieben befestigt. Die Platzierung der Umlenkrolle erfolgt in der Regel am Oberschenkel von lateral und am Unterschenkel von medial.

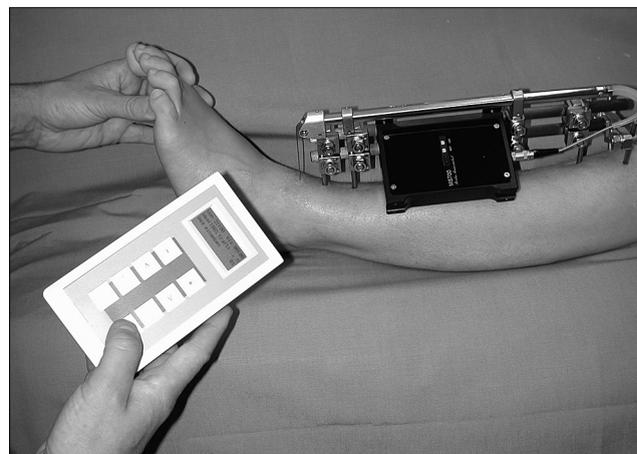


Bild 4. Komplett Montage eines zentralen Zugseilsystems mit Motorantrieb und Steuerelektronik.

Vollautomatische, kontinuierliche Kallusdistraktion

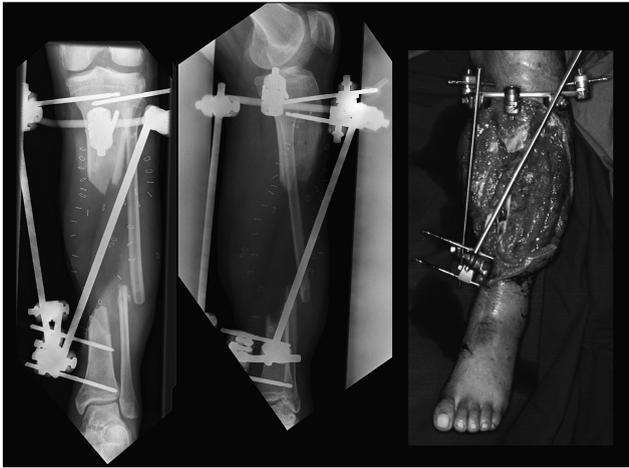


Bild 5. 3° offene US-Defekt-Fraktur bei einem 29-jährigen Verkehrsofper.

Die Führung des Zugseils durch die Defektstrecke und um die Umlenkrolle kann ohne Freilegung getunnelt mit einem Mandrin und einem Cerclagedraht entlang der gedachten anatomischen Knochenachse erfolgen. Zur Ausleitung des Zugseils ist eine weitere Knochenbohrung derart erforderlich, daß das Seil die Extremität verlassen kann, ohne den Knochen nach der Umlenkung zu berühren. Erst wenn alle Komponenten implantiert sind, erfolgt als letzter Schritt die schonende perkutane Kortikotomie mit Bohrer und Meißel. Externe Spindel und elektromotorischer Antrieb werden außerhalb des OPs im Laufe der Folgetage montiert. Die Distraktion wird nach einer Woche gestartet. Die Patienten sind an Unterarmgehstöcken unter Belastung mit 20 kg mobilisiert. Mit ein- bis zweiwöchigen kleinformatischen Röntgenkontrollen wird die Regeneratbildung überwacht und die Zuggeschwindigkeit angepaßt. Nach Erreichen der Dockingstelle wird das Transportsegment in einem weiteren operativen Eingriff durch eine Fixateur-Schraube oder einen starren Draht fixiert. Nach Entfernung des Zugseils, des Verdrängungskegels und der Umlenkrolle wird obligat Beckenkamm-spongiosa an der Dockingstelle angelagert. In der Regel wird ein Verfahrenswechsel auf einen ungebohrten Marknagel oder vorzugsweise auf eine getunnelt eingebrachte, dem Knochen anmodulierte „Schiffchenplatte“ durchgeführt, um die Fixateurtragezeit zu reduzieren.

Klinisches Beispiel

Bild 5 zeigt das Röntgenbild und die klinische Situation 6 Wochen nach 3° offener Unterschenkelfraktur bei einem 29-jährigen Verkehrsofper. Nach Wundreinigung mit Entfernung des avitalen Knochens resultierte ein 18 cm langer Defekt der Tibia. Die Stabilisierung erfolgte durch einen monolateralen, streng ventral liegenden Fixateur, so daß im distalen Hauptfragment ausreichend Abstand zum Defekt bestand, um ein ca. 3 cm langes Verschiebesegment zu mobilisieren (Bild 6).

Die Weichteile konnten durch lokale Muskelschwenklappen, Weichteilzügelung und Spalthaut geschlossen wer-

den, weitere plastische Maßnahmen waren nicht erforderlich. Aufgrund der Keilform der defektzugewandten Stirnfläche des distalen Hauptfragments konnte auf einen Weichteilverdrängungskegel verzichtet werden. Das Zugseil wurde so geführt, daß es das Segment über eine Bohrung in der Spitze verlassen konnte. Die Platzierung der Umlenkrolle im proximalen Hauptfragment erfolgte weichteilbedingt von lateral und bot ein festes Widerlager. Über eine ventrale Bohrung wurde das Zugseil ausgeleitet. Der Segmenttransport über 190 Tage verlief ohne Zwischenfälle (Bild 7). Eine Weichteilirritation trat nicht auf, ein Pinwechsel war nicht erforderlich. Nach dem Erreichen des proximalen Hauptfragments wurde das Transportsystem entfernt und Beckenkamm-spongiosa an der Dockingstelle angelagert. Sechs Wochen später erfolgte der Verfahrenswechsel auf eine Schiffchenplatte (Bild 8). 2 Jahre nach Beginn der Rekonstruktionsbehandlung durch Segmenttransport konnte die Metallentfernung vorgenommen werden (Bild 9). Es besteht Beinlängengleichheit, eine Vollbelastung ist schmerzfrei möglich. Die Beweglichkeit im linken Kniegelenk entspricht der Gegenseite, im Sprunggelenk ist bei hinkfreiem Gangbild die Dorsalextension auf 5° und die Plantarflexion auf 25° bei erhaltenem Nulldurchgang eingeschränkt.

Bild 6. 18-cm-Tibiadefekt nach Entfernung von nekrotischem Knochen. Stabilisierung mit einem ventral liegenden Rohrfixateur und Anlage eines zentralen Zugseilsystems.



Diskussion

Der besondere Nachteil beim Segmenttransport mit konventionellen Fixateursystemen liegt im Querverzug von Weichteilen durch die Transportpins, die die Verbindung zum Verschiebesegment herstellen. Die wesentlichen Probleme wie permanente Irritationen, Infektionen, Schmerzen und Narbenbildungen sind hierauf zurückzuführen. Folgeoperationen wie Pinwechsel bis hin zu kompletten Fixateurneuanlagen sind die Folge, vielfach lassen die Verläufe den Wechsel auf eine interne Stabilisierung nach Abschluß der Distraktion als zu riskant erscheinen. Die Originalmethode nach Ilizarov [4] basiert auf

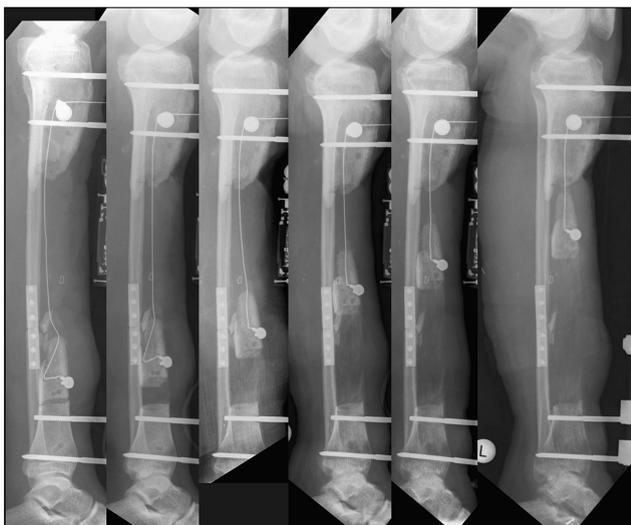


Bild 7. Kontinuierlicher, motorgetriebener Segmenttransport über 190 Tage.

zwei überwiegend axial belasteten Kirschnerdrähten, die unter einem spitzen Winkel die Weichteile durchdringen und über Gewindestangen an einem Ringfixateur, der auch die Stabilisierung der Hauptfragmente übernimmt, gezogen werden. Brutscher [3] und Weber [9] stellte die Kombination eines Fixateur externe mit zwei Zugseilen vor. Diese sind seitlich am Segment fixiert, werden über Bohrungen in Schraubköpfen umgelenkt und zwei gegenüberliegenden Ratschen außen am Fixateur zugeführt. Bei dieser Methode ist der Weichteilverzug zwar vollständig eliminiert, die Verwendung von zwei Zugseilen ist jedoch technisch unbefriedigend, da eine synchrone Bedienung erforderlich ist und das zweite Seil keine zusätzliche Sicherheit bei Materialversagen bietet. Das von Raschke [8] favorisierte Mono-Rail-System stabilisiert die Hauptfragmente über einen Marknagel, der Transport des Verschiebesegments erfolgt aber weiterhin über einen externen Fixateur, so daß die Probleme des Querverzugs der Weichteile bleiben. Von Vorteil ist, daß die Richtungsstabilität gewährleistet ist und die Tragedauer des Fixateurs auf die reine Distaktionszeit beschränkt werden kann.

Ziel bei der Entwicklung der zentralen Zugseilsysteme war es deshalb in erster Linie, den Weichteilquerverzug vollständig zu eliminieren. Die statischen Fixateurpins zur Stabilisierung der Hauptfragmente machen bei richtiger Platzierung insbesondere am Unterschenkel auch bei langen Verläufen kaum Probleme. Ein weiterer Vorteil des einzelnen, zentral verlaufenden Zugseils ist die einfache Realisierbarkeit einer automatischen, motorgetriebenen Distraction. Bereits Ilizarov konnte nachweisen, daß durch den kontinuierlichen Zug die Regeneratqualität deutlich homogener wird [5]. Für den Patienten bedeutet der automatische Zug ein Höchstmaß an Komfort und Zuverlässigkeit.

Da die Zugkräfte Werte über 600 N erreichen können, ist eine stabile Verankerung aller Zugseilkomponenten essentiell. Das betrifft in erster Linie die Befestigung am Verschiebesegment, aber auch die Umlenkrolle. Neben der Dimensionierung des Zugseils sind die Einflüsse der Seilumlenkung und der Preßkauschen zu berücksichti-

gen. Zu Beginn der klinischen Erprobung (vor Anwendung der oben beschriebenen Zugseil-Umlenkrolle) kam es in zwei Fällen zu einem Seilriß. Die rechnerische Bruchlast für das verwendete Drahtseil liegt bei 763 N. Diese Herstellerangabe wird sowohl durch die Seilumlenkung als auch durch die Preßklemmen verringert, deren Bedeutung es abzuschätzen galt. Der nicht zu unterschreitende Umlenkradius gemäß DIN 15 020 liegt für das 1-mm-Drahtseil bei 26 mm, wobei die Berechnungsgrundlagen nur annäherungsweise auf Feindrahtseile unter der hier gegebenen Belastung übertragbar sind. Da der berechnete Umlenkradius für die interne Umlenkung im Knochen nicht realisierbar ist, wurde experimentell der Einfluß der Umlenkung durch eine Rolle der oben beschriebenen Art für verschiedene Umlenkwinkel (45° , 90° , 135°) ermittelt. Das klinisch verwendete Seil wurde zunächst in gestreckter Form belastet, in Annäherung an DIN 51 201 jedoch unter Verwendung von Preßklemmen an den Einspannungen, um die realen Gegebenheiten zu erfassen. Die Seilkraft wurde mit einem DMS-bestückten Kraftmeßelement gemessen. Bild 9 zeigt die ermittelten Bruchlasten des geraden Seils (0°) und rechts daneben den Einfluß der Umlenkwinkel. Während ohne Umlenkung regelmäßig der Bruch an einer Preßklemme auftrat, im Mittel bei 695 N, kam es bereits bei einer Umlenkung von 45° zu einem Seilriß auf der Umlenkrolle. Für die klinisch häufig relevante 90° -Umlenkung wurde eine Bruchlast von 614 N ermittelt, was bereits einer Schwächung um 12 % entspricht. Da man bei Segmentverschiebungen auf hohem Kraftniveau durchaus in diese Belastungsbereiche kommen kann, ist eine weitere Verkleinerung der Umlenkradien nicht zulässig.

Bild 8. Nach Entfernung des zentralen Zugseilsystems und Spongiosaplastik erfolgte ein Verfahrenswechsel auf eine „Schiffchenplatte“, um die Fixateurtragezeit zu reduzieren.



Vollautomatische, kontinuierliche Kallusdistraktion



Bild 9. Behandlungsergebnis nach vollständiger Metallentfernung 2 Jahre nach Beginn der Segmentverschiebung mit Beinlängengleichheit, achsengerechte Stellung in beiden Ebenen und reizlosen Weichteilen.

Die zentralen Zugseilsysteme erfordern auf der einen Seite einen erhöhten operativen Aufwand und eine weitere Operation, um die Komponenten wieder zu entfernen. Bei diesem Eingriff erfolgen obligatorisch eine Anfrischung der inneren Stirnflächen an der Docking-Stelle und eine Spongiosaplastik. Die Fixateurtragezeit kann durch den Wechsel auf einen internen Kraftträger abgekürzt werden. Auf der anderen Seite überwiegen bei weitem die Vorteile bei der Distraktion, insbesondere die deutlich reduzierte Weichteilreizung mit weniger Pininfektionen und Schmerzen, die garantierte Richtungsstabilität und der verbesserte Behandlungskomfort. Zentrale Zugseilsysteme machen damit auch langwierige Verläufe für den Patienten erträglich, führen zu einer wesentlich besseren Akzeptanz des Segmenttransports und stärken den Stellenwert dieser biologisch hochwertigsten Rekonstruktionsmethode bei langstreckigen Knochendefekten.

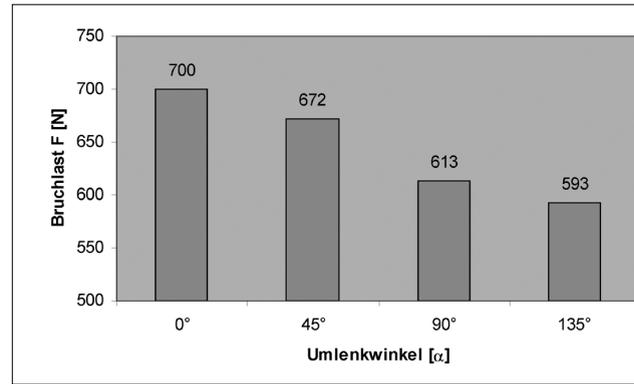


Bild 10. Seilzugfestigkeit in Abhängigkeit vom Umlenkwinkel bei einem Umlenkradius von 4,5 mm.

Literatur:

- [1] Baumgart, R., Betz, A., Kettler, M., Zeiler, C., Schweiberer, L.: Perspektiven der Kallusdistraktion. Unfallchirurg 99 (1996), 84–91.
- [2] Baumgart, R., Kettler, M., Zeiler, C., Betz, A., Schweiberer, L.: Möglichkeiten der Knochendurchtrennung – Osteotomie- und Kortikotomietechniken. Unfallchirurg 100 (1997), 797–804.
- [3] Brutscher, R., Josten, C.: Spongiosaplastik und Transportcorticotomie – Alternative oder Ergänzung? Chirurg 62 (1991), 388–393.
- [4] Ilizarov, G. A.: The principles of the Ilizarov method. Bull. Hosp. Jt. Dis. Orthop. Inst. 48 (1998), 1–11.
- [5] Ilizarov, G. A.: The tension-stress effect on the genesis and growth of tissues. Part I. The influence of stability of fixation and soft-tissue preservation. Clin. Orthop. 238 (1989), 249–281.
- [6] Labitzke, R.: Manual of Cable Osteosyntheses. History, Technical Basis, Biomechanics of the Tension Band Principle, and Instructions for Operation. Springer Verlag, Heidelberg, 2000.
- [7] Paley, D.: Problems, obstacles, and complications of limb lengthening by the Ilizarov technique. Clin. Orthop. 250 (1990), 81–104.
- [8] Raschke, M. J., Mann, J. W., Oedekoven, G., Claudi, B. F.: Segmental transport after unreamed intramedullary nailing. Preliminary report of a „Monorail“ system. Clin. Orthop. 282 (1992), 233–240.
- [9] Weber, M.: Segmenttransport des Knochens mittels Kabelrollen und flexiblem Draht – Eine neue Technik am Ringfixateur. Med Orth Tech 118 (1998) 134–140. 1190

Korrespondenzanschrift:

PD Dr. R. Baumgart
 Klinikum der Universität München
 Chirurgische Klinik und Poliklinik – Innenstadt
 Nußbaumstr. 20
 D-80336 München
 Tel.: +49 89 51 60 26 55
 Fax: +49 89 51 60 47 86
 E-Mail: Rainer.Baumgart@med.uni-muenchen.de