

R. Baumgart¹, V. Kuhn², S. Hinterwimmer¹, M. Krammer¹, W. Mutschler¹

Zugkraftmessungen beim knöchernen Segmenttransport – in vivo Untersuchungen am Menschen

Tractive Force Measurement in Bone Transport –
an in vivo Investigation in Humans

Klinikum der Universität München

¹Chirurgische Klinik und Poliklinik – Innenstadt, Nußbaumstr. 20, D-80336 München²Anatomische Anstalt, Pettenkoferstr. 11, D-80336 München

Schlüsselwörter: Zugkraftmessung - Kallusdistraktion - Segmenttransport - Knochendefekt

Key Words: Tractive Force Measurement – Distraction osteogenesis – Bone transport – Bone defect

Der Segmenttransport nach der Kallusdistraktionsmethode ermöglicht den Wiederaufbau langstreckiger Knochendefekte nach Trauma oder nach Resektion von Knochentumoren. Das in München entwickelte „zentrale Zugseilssystem“ ist hierzu besonders geeignet. Die Stabilisierung der beiden Hauptfragmente erfolgt durch einen externen Fixateur, der Segmenttransport durch ein einziges, zentral am Knochensegment befestigtes Zugseil und einen externen, programmierbaren Motorantrieb. Zur Messung der dabei auftretenden Zugkräfte wurde ein Messelement, bestückt mit Dehnungsmeßstreifen, in das Zugseil integriert. Bei 15 Patienten erfolgte die kontinuierliche Messung der Zugkräfte während des gesamten Segmenttransports. Die Kraftverläufe lassen Charakteristika des normalen Segmenttransports (Kraftniveau 150 - 250 N) und eine Abgrenzung zu kritischen Verläufen (Kraftniveau > 250 N) mit der Gefahr einer vorzeitigen Überbrückung (Zugkraftanstieg > 10 N/Tag) erkennen. Aus den Messungen ergeben sich Hinweise, daß unmittelbar bevor es im Regenerat zur Überbrückung kommt eine sehr effektive Form des Segmenttransportes mit guter Knochenneubildung möglich ist, sofern dieser Grenz Zustand angesteuert und aufrecht erhalten werden kann. Die zentralen Zugseilssysteme eröffnen diese Möglichkeit, da neben einem kontinuierlichen Kräfte monitoring auch die Option besteht, die Zugkraft als Steuergröße in einem automatischen Regelkreis einzusetzen.

Bone transport applying the principle of distraction osteogenesis makes it possible to reconstruct long bone defects caused by trauma or resection of bone tumors. The method employing a central cable, developed in Munich, is especially suitable for such applications. The main bone fragments are stabilized by an external fixateur, and bone transport is effected with a single central cable fixed to the tip of the segment, and driven by an external, programmable motor. In 15 patients the tractive forces during the entire bone transport were measured with a strain gauge incorporated within the cable. On the basis of the force profiles characteristics normal bone transport (forces between 150 - 250 N) can be distinguished from a critical transport (forces > 250 N) with the risk of premature consolidation. There is some evidence that at a very high level of force, just before premature consolidation a very effective form of bone transport with good bone neoformation can be achieved. Transport systems employing a central cable allow this special form of distraction osteogenesis, since there is continuous force monitoring, and there is the option of employing the traction force as a control factor in a loop.

Einleitung

Für die Behandlung langstreckiger Knochendefekte hat sich in den letzten Jahren die Kallusdistraktion als Methode der Wahl durchgesetzt, da sie in einzigartiger Weise das körpereigene Regenerationspotential des Knochens nutzt und die Spongiosa-Lagerstätten schont. Von dem längeren verbliebenen Hauptfragment wird ein dem Defekt zugewandtes Knochensegment durch Kortikotomie oder Osteotomie [6] abgelöst und mit einer Geschwindigkeit von ca 1mm/Tag in den Defekt gezogen. Im Distraktionsspalt entsteht neues, biologisch hochwertiges Knochengewebe. Die für den Segmenttransport erforderlichen Zugkräfte sind unmittelbar proportional zu der Ausprägung des Regenerats, sie werden aber auch von dem umgebenden Weichteilmantel maßgeblich beeinflusst [12]. Hohe Zugkräfte können das Transport- und Stabilisierungssystem des Knochens überlasten, was zu einem Transportversagen, einem Verlust der Richtungsstabilität oder zum Materialbruch führen kann. Die Messung der

Zugkräfte direkt am Menschen ist deshalb von besonderem Interesse, sie gestaltet sich jedoch schwierig, da das Meßsystem keinen nachteiligen Einfluß auf die Behandlungssicherheit haben darf. Bei vollimplantierbaren Systemen [4] ist der Datentransfer nach außen zudem sehr aufwendig. Bei externen Systemen ist die Messung an den Fixierungselementen (Schanz-Schrauben, Kirschner-Drähten) grundsätzlich sehr fehlerträchtig. Vorteile bringen Zugseilssysteme, da die Kraftmessung im Zugseil frei von Biegemomentbelastungen und bei geeigneten Montagen auch am Menschen durchführbar ist. Bei der Verwendung von zwei jeweils gegenüberliegend ausgeleiteten Zugseilen [7] ist eine abgestimmte Bedienung erforderlich und der Meßaufwand groß, ohne daß durch das zweite Zugseil eine zusätzliche Sicherheit gegeben ist. Mit dem hier vorgestellten „zentralen Zugseil-System“ läßt sich ein automatischer, motorgetriebener Segmenttransport vorteilhaft realisieren. Die Zugkräfte lassen sich am Verschiebesegment in vivo einfach registrieren, ohne daß hiermit die Behandlungssicherheit

Tab. 1: Stammdaten der 15 Patienten, bei denen Zugkraftmessungen beim Segmenttransport durchgeführt wurden. Die abgebildeten Kraftverläufe sind markiert.

Name	Alter	Sex	Ursache	Ort	Defekt	Verlauf	Abb.
AA	16	m	Tumor	US re	220	normal	
BA	61	m	Trauma	US re	72	verzögert	
BA	24	m	Trauma	OS li	95	normal	
EM	12	m	Tumor	US re	115	kritisch	
FF	35	m	Tumor	US li	83	überbrückt	7
GS	20	w	Trauma	US li	51	normal	3
HM	15	m	Trauma	US li	93	kritisch	5
JT	32	m	Trauma	US li	110	überkritisch	
KR	33	m	Trauma	US li	62	normal	
ME	57	m	Trauma	OS li	120	normal	4
MC	11	w	Tumor	OS re	183	verzögert	8
RM	31	m	Trauma	US li	85	normal	
SA	26	m	Trauma	US re	60	normal	
SG	56	m	Tumor	OS li	160	überkritisch	6
WG	21	m	Trauma	US re	48	überbrückt	

beeinträchtigt wird. Damit ergibt sich die Möglichkeit eines Kräftenmonitorings, mit dem folgende Fragen beantwortet werden sollten: In welcher Größenordnung liegen die Distraktionskräfte? Ist der „normale, ungestörte“ Segmenttransport durch einen charakteristischen Kraftverlauf gekennzeichnet? Gibt es Störungen beim Segmenttransport, die im Kraftverlauf frühzeitig erkannt werden können? Könnte es vorteilhaft sein, die aktuell ermittelte Zugkraft als Steuergröße für die Transportgeschwindigkeit zu nutzen?

Material und Methode

An der Chirurgischen Klinik Innenstadt des Klinikums der Universität München wurden bei 15 Patienten (2 weibl., 13 männl.) im Alter zwischen 11 und 61 Jahren (Mittel 30 Jahre) während des Segmenttransports die Zugkräfte fortlaufend gemessen und aufgezeichnet (Tabelle 1). Die Defekte lagen 4 mal am Femur und 11 mal an der Tibia, bei 9 Fällen handelte es sich um einen Knochendefekt nach Trauma, bei 6 Patienten ging die En-bloc-Resektion eines Tumors voraus. Das Ausmaß der Defektstrecke lag zwischen 48 und 220mm (Mittel 104mm).

Die technische Durchführung des Segmenttransports erfolgte durch die in München entwickelte „zentrale Zugseil-Methode“ [5]. Hierbei werden die Hauptfragmente entweder durch einen monolateralen Fixateur, einen Ringfixateur oder einen Hybridfixateur stabilisiert, je nachdem, für welche Fixierungsart die günstigsten Voraussetzungen an dem verbliebenen Knochen vorliegen. Ein Segment wird von dem längeren Hauptfragment durch Kortikotomie abgelöst und mit einem einzelnen Zugseil ($D = 1\text{mm}$) durch den Defekt gezogen. Weist das Segment zum Defekt hin eine Spitze auf, wird das Zugseil über diese Spitze ausgeleitet. Liegt eine plane Stirnfläche vor, wird ein „Weichteil-Verdrängungskegel“ mit einer Verriegelungsschraube in dem Segment fixiert (Abb.1),

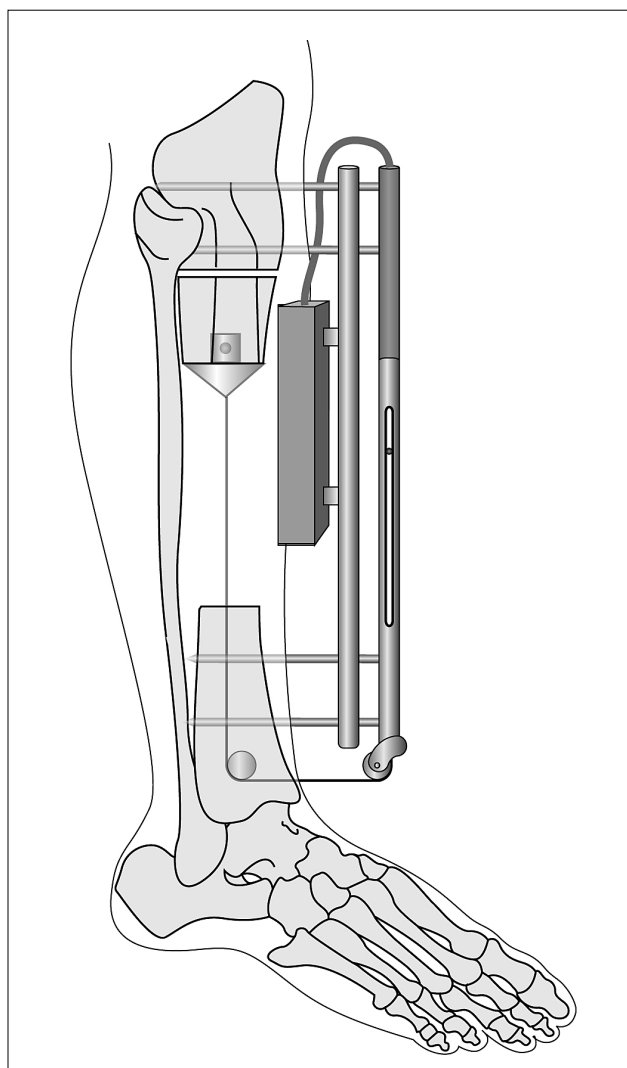


Bild 1: Zentrales Zugseilsystem bei einem langstreckigen Knochendefekt an der Tibia. Die Hauptfragmente sind mit einem monolateralen Rohrfixateur stabilisiert. Das Zugseil ist axial im Zentrum des Verschiebesegments über einen Weichteilverdrängungskegel fixiert. Außen am Fixateur befindet sich der Antrieb und die Steuerungselektronik.

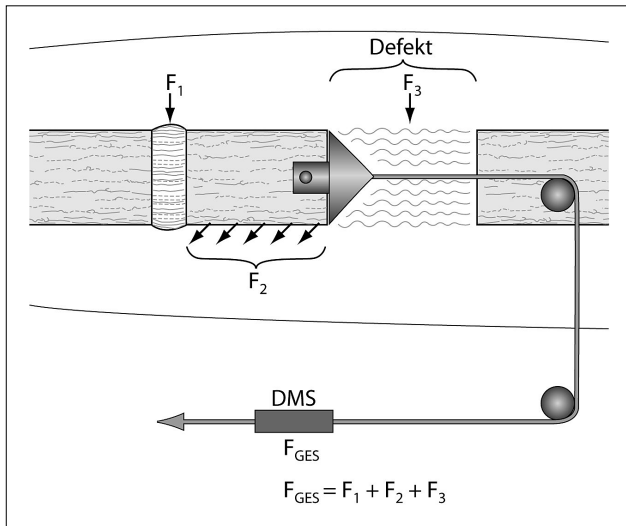


Bild 2: Schematische Darstellung des Meßaufbaus und der an dem Segment angreifenden Kräfte. In das Zugseil ist ein Kraftmeßelement mit einem Dehnungsmeßstreifen integriert, mit dem die Gesamtkraft gemessen wird.

an dessen Spitze das Zugseil austritt. Für den richtungsstabilen Transport ist es unabdingbare Voraussetzung, daß eine Umlenkrolle in dem gegenüberliegenden Hauptfragment derart plziert wird, daß das Zugseil im Zentrum der geplanten Verschiebestrecke zu liegen kommt. Nach der Umlenkrolle verläßt das Zugseil durch eine Bohrung in der Kortikalis den Markraum und im weiteren Verlauf die Weichteile. Der Durchtritt durch die Haut erfolgt punktförmig und ist hinsichtlich Irritation und Infektion unproblematisch, da kein Querverzug stattfindet. Alle für das Distraktionssystem spezifischen operativen Schritte, wie die Kortikotomie, die Plazierung und Fixierung des Kegels und der Umlenkrolle lassen sich mit speziellen Instrumenten in minimal invasiver Technik durchführen.

Bevor das Zugseil mit einer Zugspindel und einem elektromotorischen Antriebssystem verbunden wird, muß es am Fixateur ein zweites Mal umgelenkt werden. Unmittelbar vor der Zugspindel ist ein mit einem Dehnungsmeßstreifen bestücktes, kalibriertes Meßelement in das Zugseil integriert (Abb. 2). Der dazugehörige Meßverstärker ist gemeinsam mit der Steuerungselektronik des Antriebsmotors in einem kleinen Gehäuse untergebracht, das am Fixateur befestigt wird. Über eine Schnittstelle ist der Datentransfer zu einem PC möglich. Das am Ausgang des Meßverstärkers anliegende, gemessene Analogsignal ist direkt proportional zu der Gesamtkraft im Zugseil. Die doppelte Umlenkung spielt hierbei keine Rolle, da das System quasistationär arbeitet und sich im Gleichgewicht befindet. Folglich kann die gemessene Kraft als Summe aus verschiedenen Einzelkomponenten interpretiert werden (Tabelle 2). Bei allen Patienten lag die Distraktionsrate zwischen 0,5 und 2 mm/Tag aufgeteilt in 12 Einzelintervalle. Die Messung erfolgte unmittelbar vor, während und nach dem Distraktionsintervall mit einer Frequenz von 6 Meßwerten pro Minute. Die Seilkraft wurde entweder digital angezeigt und vom Patienten auf vorbereiteten Formularen registriert oder über ein mobiles Meßdaten-

Tab. 2: Kraftkomponenten am Verschiebesegment (vergl. auch Abb. 2)

F1	Widerstand des Regenerats im Distraktionsspalt
F2	Widerstand vor dem Weichteilverdrängungskegel
F3	Widerstand durch adhärenente Weichteile
Fges	gemessene Gesamtkraft

Erfassungsprogramm (MESDAT 8/88 der Fa. Albert Meßmer München) von einem PC aufgezeichnet. Dargestellt wurden neben der Maximal- und der Minimalkraft die gemittelte Kraft des jeweiligen Tages, sowie die Annäherung der Verläufe durch Polynome 6. Ordnung ($y = ax^6 + bx^5 + cx^4 + \dots$), um Einzelschwankungen zu eliminieren. Weiterhin wurde das dazugehörige Bestimmtheitsmaß als Parameter für die Übereinstimmung der Trendlinie mit der Meßwertkurve ermittelt.

Noch während des stationären Aufenthalts wurden die Patienten in den Umgang mit der Meßvorrichtung eingewiesen, die erforderliche Hardware wurde nach Entlassung leihweise dem Patienten zur Verfügung gestellt, so daß eine fortlaufende Überwachung auch ambulant gewährleistet war.

Ergebnisse

Die aufgezeichneten Zugkräfte F [N] wurden sowohl hinsichtlich der Absolutwerte als auch hinsichtlich der Zugkraftänderung pro Tag $\Delta F/t$ [N/Tag] verglichen, um Charakteristiken der sehr unterschiedlichen klinischen Situationen zu erkennen. In 13 Fällen wurde der Segmenttransport ohne Unterbrechnung durchgeführt, in 2 Fällen kam es zu einer vorzeitigen Überbrückung, so daß eine erneute Osteotomie erforderlich wurde. Bei den 13 durchgehenden Verläufen ließ sich eine Gruppe der kurzen und mittleren Defekte (< 100 mm) von den langstreckigen Defekten ($> ca. 100$ mm) unterscheiden, ferner waren zwei Verläufe auffällig, bei denen unter schneller Zuggeschwindigkeit auf einem extrem hohen Kraftniveau eine sehr gute Knochenneubildung zu erkennen war. Die im folgenden dargestellten Kraftverläufe (Abb. 3 – 8) zeigen Distraktionsverläufe von 5 Patienten in Realzeit, bei denen typische Merkmale (Tab. 3) der Segmentverschiebung besonders deutlich erkennbar werden.

Tab. 3: Formen des Segmenttransports mit dem zentralen Zugseil. Die Kraftbereiche überschneiden sich.

	Zugkraftanstieg [N/Tag]	Kraftniveau [N]
verzögerte		
Regeneratbildung	$\Delta F/t < 2$	$F < 150$
normaler Transport	$2 < \Delta F/t < 6$	$150 < F < 250$
kritischer Transport	$4 < \Delta F/t < 8$	$F > 250$
überkritischer Transport	$6 < vF/t < 10$	\emptyset
vorzeitige Überbrückung	$\Delta F/t > 10$	\emptyset

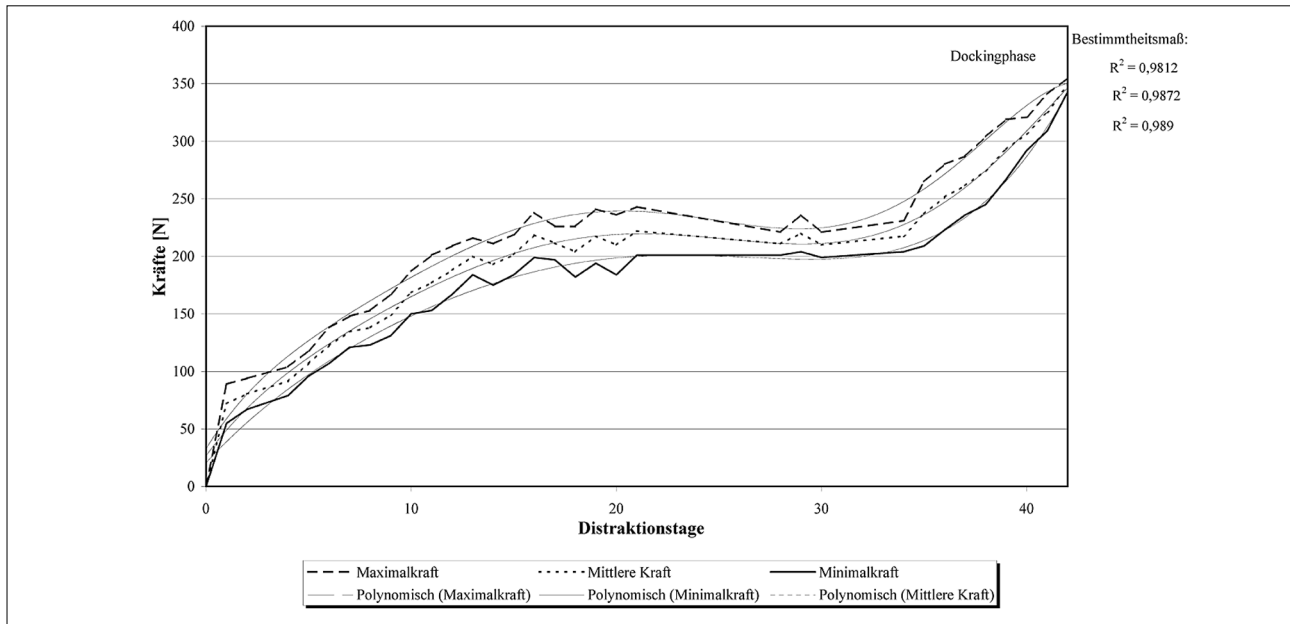


Bild 3: Phasenhafter Kraftverlauf bei einem komplikationslosen Segmenttransport. Deutlich erkennbar sind der initiale und terminale Kraftanstieg und die dazwischenliegende fast horizontal verlaufende Plateauphase.

Der normale Segmenttransport

Charakteristisch für einen komplikationslosen Segmenttransport mittlerer Länge (30-80 mm) ist ein phasenhafter Verlauf in dem sich 3 Bereiche abgrenzen lassen (Abb. 3, G S). Zu Beginn der Distraction erfolgt ein stetiger degressiver Kraftanstieg, gefolgt von einem Übergang in eine Plateauphase nach ca. 15 Tagen. Das Niveau der Plateauphase lag bei allen Messungen zwischen 150 N und 250 N und ist Ausdruck eines sich einstellenden Gleichgewichtszustands. Gegen Ende der Distractionphase kündigt sich die Annäherung an die Dockingstelle durch einen erneuten, jetzt aber progressiven Kraftan-

stieg an. Unter Registrierung der Zugkraft wurden die Segmente meist bis zu Werten zwischen 350 und 500 N an das korrespondierende Hauptfragment herangeführt, was radiologisch einem direkten Kontakt entsprach.

Bei längerstreckigem Segmenttransport (> 100mm) über mehrere Monate (Abb. 4, M E) wird erkennbar, daß der zuvor beschriebene horizontale Verlauf in der Plateauphase etwa ab dem 60. Tag leicht ansteigt (ca. 2 N/Tag), die Plateauphase bleibt jedoch auch weiterhin von dem initial degressiven und dem terminal progressiven Kraftanstieg abgrenzbar. Die regelmäßigen Inzsuren etwa alle 45 Tage sind systembedingte Artefakte, die durch das Nachspannen des Zugseils bei Erreichen des

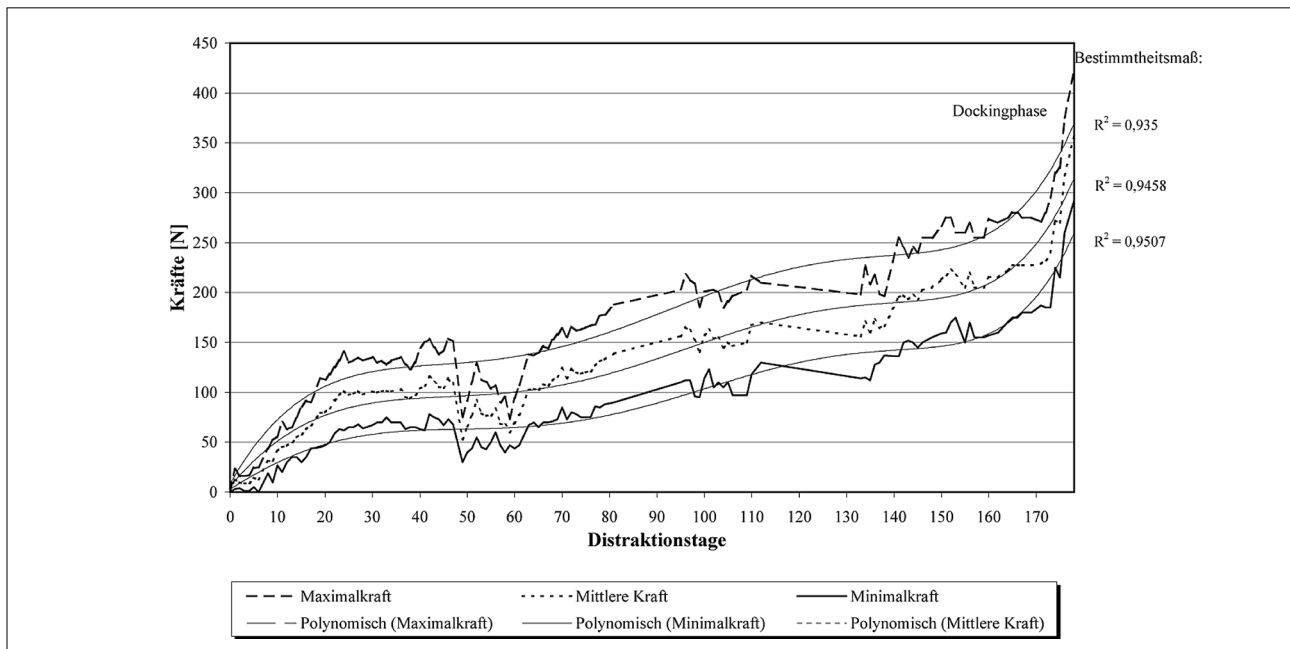


Bild 4: Bei längerstreckigem Segmenttransport ist auch in der Plateauphase ein stetiger Kraftanstieg erkennbar. Die Übergänge vom initial degressiven und zum terminal progressiven Kraftanstieg bleiben abgrenzbar.

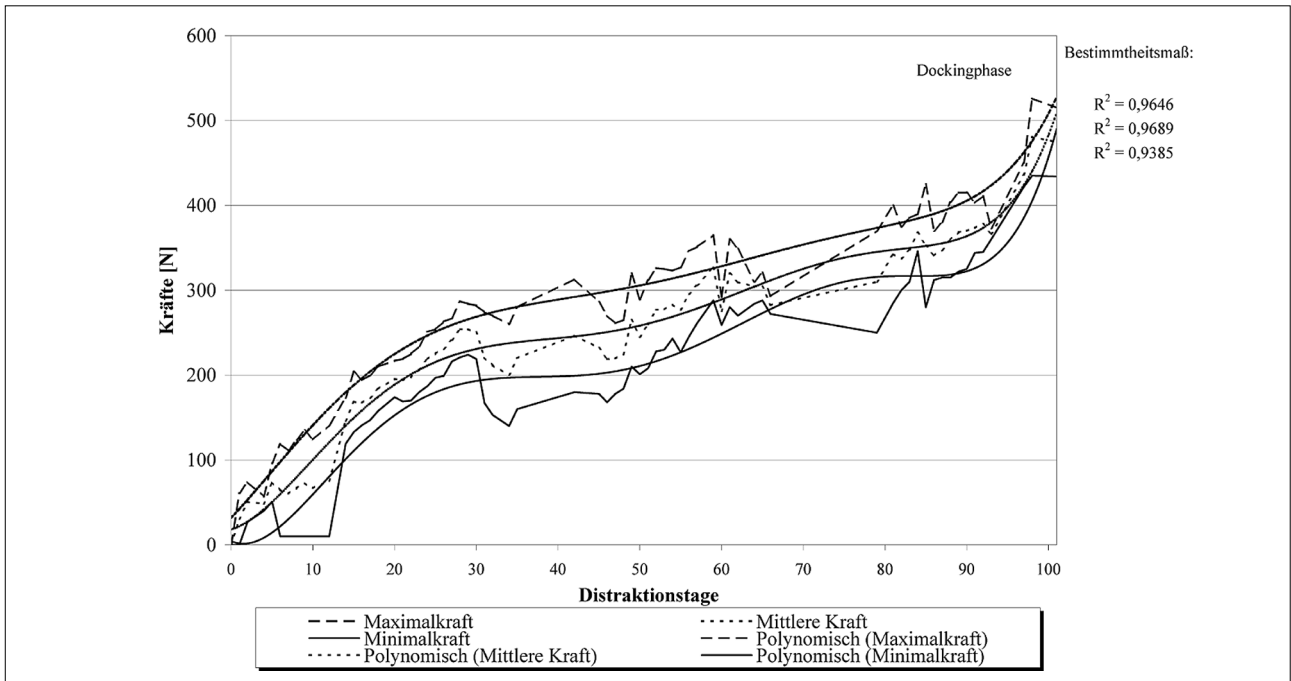


Bild 5: Der „kritische Segmenttransport“ ist durch einen Kraftanstiegsgradienten über 4 N/Tag und ein erhöhtes Kraftniveau gekennzeichnet. Die Plateauphase bleibt abgrenzbar. Diese Form des Segmenttransports tritt gehäuft im metaphysären Bereich und bei Jugendlichen auf und beinhaltet die Gefahr einer vorzeitigen Überbrückung.

Spindelendes entstehen. Man erkennt deutlich, daß sich das zuletzt gemessene Kraftniveau innerhalb von ca. 10 Tagen wieder einstellt.

Der kritische Segmenttransport

Wenn das Verhältnis von Knochenneubildung zu Distractionsgeschwindigkeit einen kritischen Wert übersteigt, kann es zu einer vorzeitigen Überbrückung im Distraction-

onsspalt kommen. Diese in der Praxis insbesondere bei metaphysennahen Distractionen und bei Kindern und Jugendlichen bekannte Komplikation läßt sich auch in dem Kraftverlauf erkennen. Der sogenannte „kritische Kraftanstieg“ in der Plateauphase scheint nach den bisherigen Erfahrungen zwischen 4 und 8 N/Tag zu liegen. Bei dem in Abb. 5 dargestellten 15-jährigen Patienten (H M) wurde über 100 Tage ein Segmenttransport am Unterschenkel durchgeführt. Man erkennt innerhalb der Plateauphase einen Bereich der stetigen Kraftzunahme um ca.

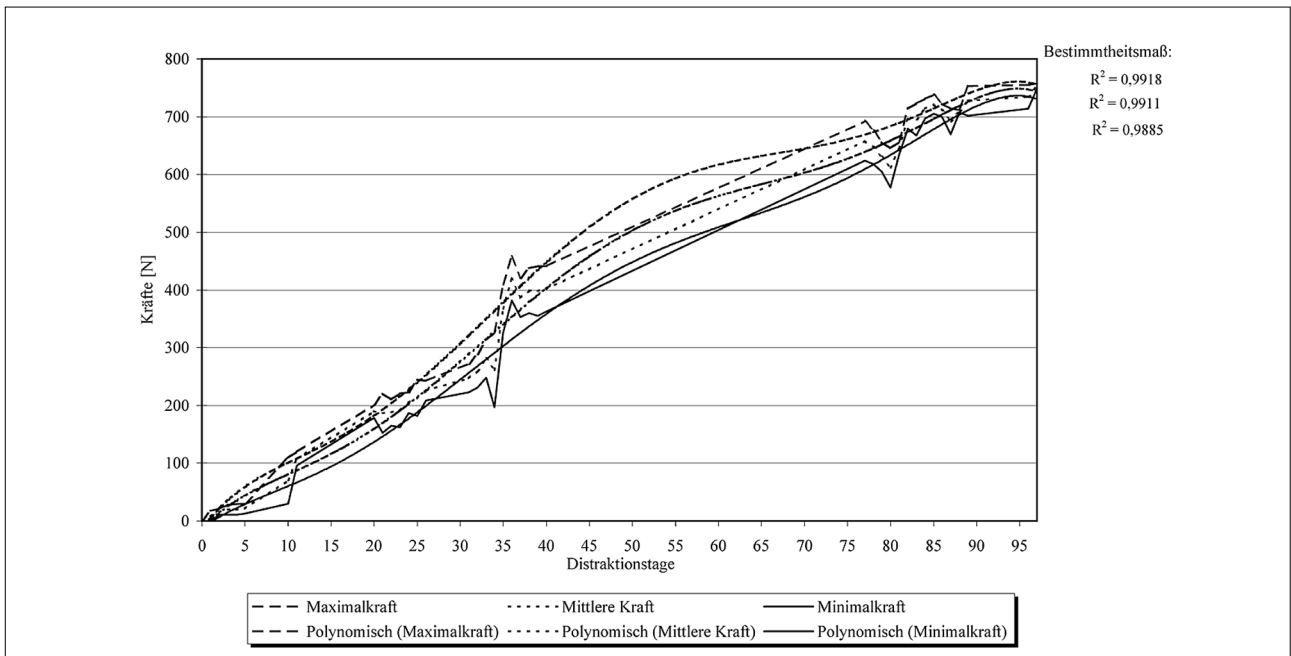


Bild 6: Der „überkritische Segmenttransport“ läßt keine Plateauphase mehr erkennen. Der Kraftanstiegsgradient ist größer als 6 N/Tag. Auf sehr hohem Kraftniveau wird bei hoher Transportgeschwindigkeit eine gute Knochenneubildung beobachtet.

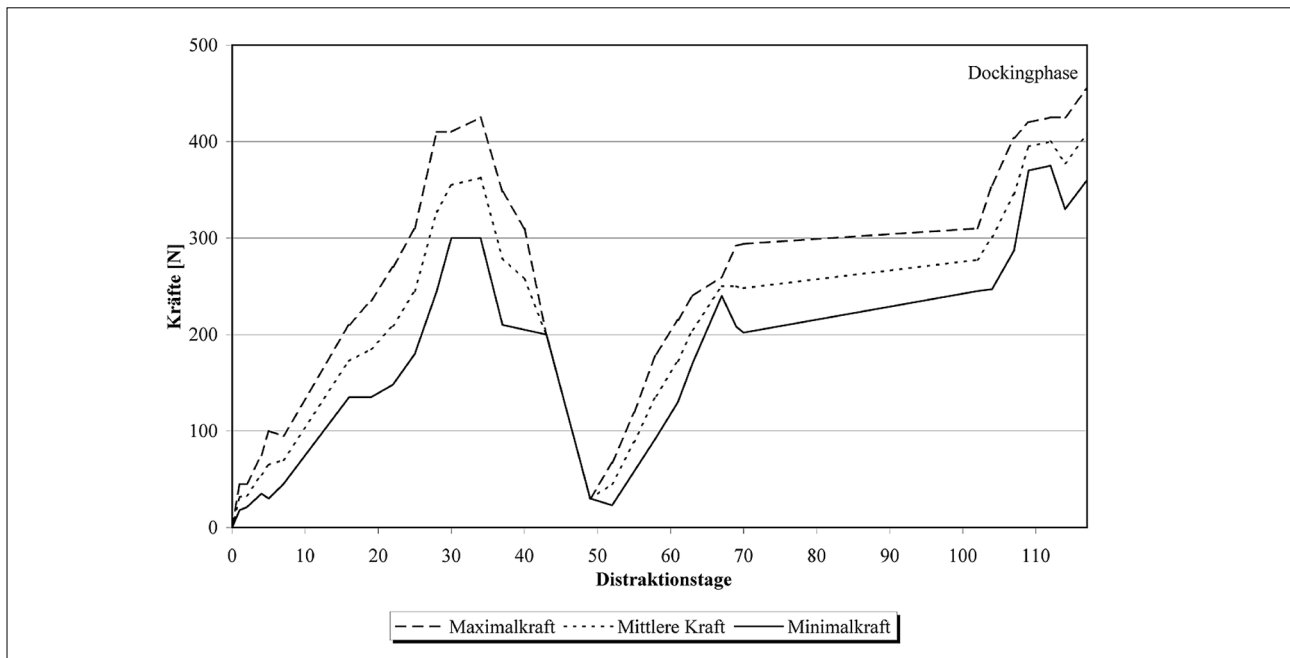


Bild 7: Die vorzeitige Überbrückung ist eine Komplikation der Kallusdistraction, die sich durch einen hohen Kraftanstiegsgradienten $> 10 \text{ N/Tag}$, hier $12,5 \text{ N/Tag}$ ankündigt.

5 N/Tag, wobei das Kraftniveau bis auf Werte über 300N ansteigt und dann in einen progressiven Verlauf übergeht.

Der überkritische Segmenttransport

Ein weiteres charakteristisches Bild, das sich zunächst nicht zuordnen ließ, ist durch eine stetig ansteigende Kraft bis auf über 700 N und eine nicht mehr abgrenzbare Plateauphase gekennzeichnet (Abb. 6, S G). In dem dargestellten Fall mit einer Defektstrecke von 160 mm lag

der Kraftgradient oberhalb 8 N/Tag , so daß nach den bisherigen Erfahrungen mit einer vorzeitigen Überbrückung zu rechnen gewesen wäre. Aufgrund der Leistungsfähigkeit des Zugseilsystems konnte jedoch durch Erhöhung der Zuggeschwindigkeit ein Transportstop abgewandt und das Distractionsziel nach 95 Tagen erreicht werden. Diese Form der Kallusdistraction wurde deshalb „überkritischer Segmenttransport“ genannt. Von den 15 gemessenen Kraftverläufen wurde diese Transportform in 2 Fällen realisiert. Beide Fälle lassen eine auffallend gute und unter Berücksichtigung des Ausgangsbefundes schnelle Knochenneubildung erkennen.

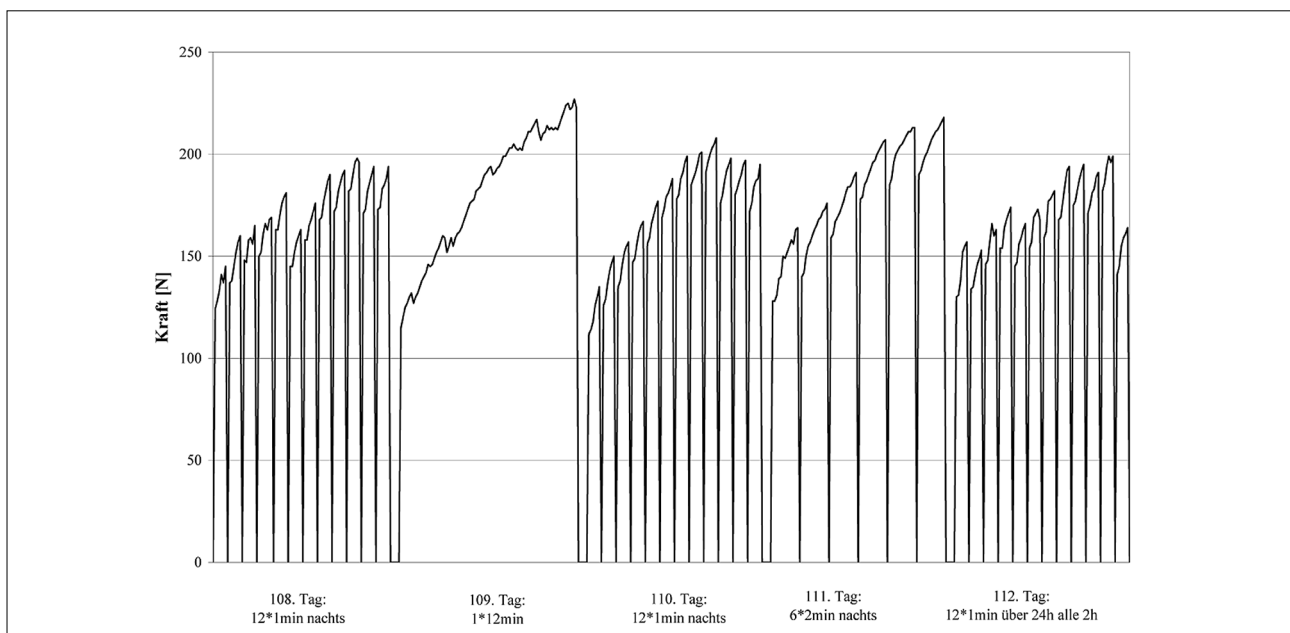


Bild 8: Einfluß der Distractionsfrequenz auf die Zugkraft. Das Kraftniveau kann um bis zu 20% gesenkt werden.

Die Komplikation der vorzeitigen Überbrückung

Reagiert man bei einem erkennbar hohen Kraftgradienten und radiologisch erkennbar guter Knochenneubildung nicht rechtzeitig durch Erhöhung der Zuggeschwindigkeit, kommt es zu einem Transportversagen und einer vorzeitigen Überbrückung (Abb. 7, FF). Nach einem steilen initialen Kraftanstieg mit 12.5 N/Tag ohne Übergang in eine Plateauphase folgte eine vorzeitige Überbrückung mit einem Abbruch der Segmentverschiebung bei einer Maximalkraft von 420 N am 35. Tag. Nach erneuter Osteotomie wird zunächst wieder ein steiler Kraftanstieg registriert, es folgt jedoch dann am 15. Tag der Übergang zur Plateauphase, die entsprechend dem gesamten Fortgang der Behandlung mit leicht ansteigendem Niveau zu einem progressiven Kraftanstieg und der Dockingphase führt.

Möglichkeiten das Kraftniveau zu senken

Ilizarov hat in mehreren Studien darauf hingewiesen, daß sich die Regeneratqualität verbessert, wenn die Distraktionsrate auf möglichst viele Einzelintervalle verteilt wird [11]. Um den Einfluß der Zugfrequenz auf die Zugkraft zu untersuchen, wurde bei 5 Patienten in verschiedenen Phasen des Segmenttransports die Zugfrequenz variiert. Erwartungsgemäß zeigte sich in allen Fällen bei höherer Zugfrequenz ein niedrigeres Kraftniveau. Bei dem Patienten M C wurde etwa in der Mitte der Distraktionsphase um den 110. Tag eine Reduktion der Zugkraft um 20% (Abb. 8) gemessen. Die höchsten Werte (230N) wurden bei einmaliger Distraktion (1mm in 12min) und die niedrigsten Werte (190N) bei 12 maliger Distraktion (1mm in 12 x 1min in 24 Std) gemessen.

Diskussion

Gemäß der initialen Fragestellungen galt es zu klären, in welcher Größenordnung die Zugkräfte bei einem Segmenttransport liegen und ob anhand von Kraftmessungen verschiedene Formen des Segmenttransports identifiziert werden können. Die dargestellten Kraftverläufe lassen dies für wahrscheinlich erachten, es gilt jedoch zunächst die Entstehung der Meßdaten kritisch zu analysieren. Wie in Tabelle 2 dargestellt, handelt es sich bei den durchgeführten Kraftmessungen um ein Summenbild aus 3 verschiedenen, voneinander unabhängigen Kraftkomponenten. Allein die isolierte Messung der Widerstandskraft im Regenerat würde die o.g. Rückschlüsse unstrittig zulassen, es gilt deshalb den Einfluß der anderen Komponenten abzuschätzen. Die an dem Verschiebesegment angreifenden Gewebekräfte sind vermutlich von der anatomischen Region, insbesondere von adhärenen Fascien abhängig und der Segmentlänge direkt proportional. Man kann davon ausgehen, daß sie im Verlauf der Segmentverschiebung eher kleiner als größer werden, da

sich Bindegewebsbrücken ablösen. Gegenläufig verhält sich vermutlich die Widerstandskomponente, bedingt durch das sich vor dem Verdrängungskegel aufstauende Weichteil. Zu Beginn des Transports gleitet das Segment in die „leere“ Defektzone, in der sich im Laufe der Zeit und der Strecke Narbengewebe aufstaut und Kontrakturen entwickeln. Oft ist auch der Weichteilmantel sanduhrförmig eingezogen und man erkennt, wie der Kegel mit dem anhängenden Segment diesen Weichteilmantel aufbougiert. Ohne Verdrängungskegel wäre dies kaum möglich. Die Widerstandskräfte aus der Weichteilverdrängung, insbesondere kurz vor Erreichen der Dockingstelle sind deshalb eher im Verlauf ansteigend und bestimmen sicher gegen Ende des Segmenttransports zu einem wesentlichen Anteil das Kraftniveau der gemessenen Gesamtkraft. Diese sind bei einem bifokalen im Vergleich zu einem unifokalen Segmenttransport nochmals deutlich erhöht [1]. Aus diesen Betrachtungen folgt, daß beide Komponenten gemeinsam eher einen konstanten als einen progressiven Einfluß auf die Gesamtkraft haben. Simpson et al. [12] und Gardner et al. [9] bestätigen mit ihren Untersuchungen zu den Weichteilkräften bei Ilizarov-Segmenttransport diese These.

Der phasenhafte Kraftverlauf als Kennzeichen eines ungestörten Segmenttransports wurde auch von anderen Autoren beschrieben. Brunner et al. [7] führte an Schafen Zugkraftmessungen bei internem Transport über Defekte von 20 mm und 45 mm durch. Dabei zeigte sich vor allem bei den Defekten von 45 mm Länge ein ähnlicher, wie hier beschriebener Zugkraftverlauf, gekennzeichnet durch einen initialen Kraftanstieg, eine Plateauphase und einen erneuten Kraftanstieg am Ende der Distraktion. Als Maximalkraft wurden 350 N registriert [7,12]. Forriol et al [8] sowie Aronson und Harp [3] beschreiben den zeitlichen Verlauf der Kraft bei Segmenttransport an der Tibia und bestätigen ebenfalls das Erreichen der Plateauphase nach ca. 20-25 Tagen.

Der stetige Kraftanstieg in der Plateauphase ist bei allen Segmenttransporten über mehr als 40-60 Tage zu beobachten und könnte als Strukturierungseffekt gedeutet werden. Während zu Beginn der Distraktion (1. und 2. Woche) unstrukturierte Zellformationen im Distraktionspalt vorherrschen, zeichnet sich ab der 3. Woche sowohl longitudinal als auch transversal eine für den gesamten Rest der Distraktion vorherrschende Ordnung ab [11]. Vor allem die an Länge und Breite zunehmenden Trabekelzonen mit zunehmender Mineralisation, nehmen jetzt den Hauptteil des Regenerats ein. Damit verteilt sich die Distraktion einerseits auf die Zwischenzone, darüber hinaus aber auch auf die peripheren Zonen, in denen eine progressive Widerstandszunahme aufgrund der fortschreitenden Mineralisation zu erwarten ist.

Zugkraftmessungen während des Segmenttransports in vivo am Menschen sind apparativ aufwändig und bedürfen einer Mitarbeit des Patienten. Bei zunehmender Erfahrung mit der Interpretation der Meßwerte ist es jedoch sehr schnell möglich, den ungestörten, normalen Verlauf von sich anbahnenden Komplikationen abzugrenzen (Tab. 3). Nach den bisherigen Erfahrungen lassen sowohl der Zugkraftanstieg als auch das Kraftniveau Rück-

schlüsse auf verschiedene Distraktionsformen zu. Während Distraktionskräfte in der Plateauphase unter 150 Newton meist mit einer verzögerten Regeneratbildung einhergehen, können hohe Zugkräfte ein Indiz für eine schnelle und hochwertige Knochenneubildung sein. Erreichen die Kraftgradienten den als kritisch angesehenen Bereich von über 4 N/Tag, ist dies ein Hinweis, die Distraktionsgeschwindigkeit zu erhöhen. Aus den o.g. Gründen können allerdings die gemessenen Summenkräfte niemals alleine zu dieser Feststellung führen. Dies ist nur gemeinsam mit dem klinischen Bild, das den Gewebewiderstand abschätzen lässt, und dem Röntgenbild, auf dem die Kalkdichte des Regenerats erkennbar ist, möglich. Erfolgt die Zugkraftenerhöhung zu spät oder wird sie nicht wirksam am Segment umgesetzt, kommt es zu einer vorzeitigen Überbrückung. Bei Zugkraftgradienten über 4 N/Tag muß nach den bisherigen Erfahrungen mit dieser Komplikation zumindest gerechnet werden, insbesondere wenn sich kein Übergang in die Plateauphase ca. 2 Wochen nach Distraktionsbeginn abzeichnet.

Segmenttransporte auf einem hohen Kraftniveau, insbesondere in den Extremfällen wie sie bei „überkritischem Segmenttransport“ beobachtet wurden, stellen eine erhebliche Strukturbelastung der Gesamtsysteme dar. Um die Kräfte zu reduzieren, besteht die Möglichkeit, die Zugfrequenz zu erhöhen. Während bei manueller Distraktion mehr als 4 Zugintervalle pro Tag kaum praktikabel sind, läßt sich mit der motorgetriebenen Distraktion eine beliebig hohe Einschaltfrequenz bis hin zum kontinuierlichen Zug erzielen. Neben der dadurch erreichbaren Verbesserung der Regeneratqualität [2] kann die Reduktion der Zugkraft um etwa 20 % dazu genutzt werden, das System zu entlasten bzw. die Montagen trotz effektiver Distraktionsformen leichter zu gestalten. Die hieraus folgenden Konsequenzen betreffen nicht nur das Zugseil, sondern den gesamten Aufbau der Distraktionsvorrichtung, da diese durch die Fixierung der Hauptfragmente und durch den Knochentransport strukturell in gleicher Größenordnung belastet wird.

Viel Raum für Interpretationen läßt der beschriebene „überkritische Segmenttransport“ zu. Offenbar ist eine Mindesttransportstrecke erforderlich, damit sich diese Transportform einstellen kann. Ob durch die hohen Zugkräfte eine vorzeitige Überbrückung immer wieder aufgelöst wird, oder ob z.B. die transversale Zonengliederung Verschiebungen und damit Aktivitätsänderungen unterworfen ist, kann derzeit noch nicht beantwortet werden. An der Grenze zur vorzeitigen Überbrückung liegt eventuell ein „biomechanischer Ansatz“ verborgen, die Kallusdistraktion weiter zu effektivieren. Theoretisch ist es vorstellbar, daß man das Segment durch eine zunächst eher relativ langsame Zuggeschwindigkeit in einen Zustand unmittelbar vor der Überbrückung bringt und anschließend den Transport so beschleunigt, daß dieser Zustand beibehalten wird, aber gerade eben nicht zur Überbrückung führt. Mit herkömmlichen Fixateursystemen ist dies kaum in die Praxis umzusetzen, da in der Regel das hohe Kraftniveau unmittelbar vor der Überbrückung durch Verbiegung der Komponenten die effektive Transportgeschwindigkeit zunächst eher verlangsamt. Dies lässt

st dann tatsächlich die vorzeitige Überbrückung eintreten. Die zentralen Zugseilsysteme mit funktioneller Entkopplung von Stabilisator und Transportsystem und extrem leistungsstarken Antrieben mit einem Zugkraftpotential von über 2000 N verhalten sich in dieser Situation anders. Wenn die Zuggeschwindigkeit am Antrieb unmittelbar vor der Überbrückung erhöht wird, überträgt sich dies auch vollständig auf das Segment. Es folgt ein schneller Transport bis zu 2 mm/Tag auf einem extrem hohen Kraftniveau, das sogar über der theoretischen Bruchfestigkeit des Zugseiles liegen kann. Trotz dieser hohen Zuggeschwindigkeit ist eine gute Knochenneubildung zu beobachten.

Als Konsequenz aus diesen Beobachtungen ist als Weiterentwicklung der zentralen Zugsysteme die Steuerung als Regelkreis vorstellbar, der automatisch einen überkritischen Distraktionszustand herbeiführen und aufrechterhalten könnte. Unter Registrierung der Zugkraft muß zunächst bei relativ langsamer Distraktionsgeschwindigkeit das Regenerat in den überkritischen, d. h. in den Zustand unmittelbar vor der Überbrückung gebracht werden. Hierbei ist die Zugkraft die Steuergröße und die Distraktionsgeschwindigkeit die Regelgröße. Sobald die Zugkraft Werte > 250 N und einen noch näher einzugrenzenden Gradienten zwischen 6 und 10 N/Tag übersteigt, wird die Zuggeschwindigkeit automatisch soweit hochgeregt, daß dieser Zustand bei kontrolliert steigendem Kraftniveau über den gesamten Verlauf aufrechterhalten wird. Der Regelkreis bewirkt hierbei, daß einerseits keine vorzeitige Überbrückung auftritt und andererseits das Regenerat nicht den Anschluß verliert und versagt. Die zu erwartende Größenordnung der Distraktionsbeschwindigkeit könnte nach den bisherigen Erfahrungen bei 1,5 bis 2 mm/Tag liegen. Um allerdings einen automatischen Distraktionsprozeß am Menschen in dieser Größenordnung zuzulassen, müßte die Zugkraft ein wesentlich zuverlässigerer Meßparameter sein. Insbesondere müssen die in Tabelle 1 genannten Störgrößen durch zusätzliche Sensoren subtraktiv eliminiert und Sicherheiten gegen Fehlfunktion vorgesehen werden. Der sogenannte „zugkraftgesteuerte Segmenttransport“ könnte bei hoher Distraktionsgeschwindigkeiten und hochwertiger Regeneratbildung sehr effektiv sein, er birgt aber auch die Gefahr eines Regeneratversagens sowie vaskuläre und nervale Risiken in sich.

Literatur:

- [1] Aarnes, G.T., Steen, H., Kristiansen, L.P., Ludvigsen, P., Reikeras, O.: Tissue response during monofocal and bifocal leg lengthening in patients. *J. Orthop. Res.* 20 (2002) 137-141.
- [2] Aarnes, G.T., Steen, H., Ludvigsen, P., Kristiansen, L.P., Reikeras, O.: High frequency distraction improves tissue adaptation during leg lengthening in humans. *J. Orthop. Res.* 20 (2002) 789-792.
- [3] Aronson, J., Harp, J.H.: Mechanical forces as predictors of healing during tibial lengthening by distraction osteogenesis. *Clin. Orthop.* 301 (1994) 73-79.

- [4] Baumgart R., Betz A., Kettler M., Zeiler C., Schweiberer L.: Perspektiven der Kallusdistraction. Unfallchirurg 99 (1996) 84-91.
- [5] Baumgart R., Hinterwimmer S., Krammer M., Mutschler W.: Zentrale Zugseilsysteme - vollautomatische, kontinuierliche Kallusdistraction zur Behandlung langstreckiger Knochendefekte. BioMed. Technik, 49 (2004) 202-207.
- [6] Baumgart, R., Kettler, M., Zeiler, C., Betz, A., Schweiberer, L.: Möglichkeiten der Knochendurchtrennung - Osteotomie- und Kortikotomietechniken. Unfallchirurg 100 (1997) 797-804.
- [7] Brunner, U.H., Cordey, J., Schweiberer, L., Perren, S.M.: Force required for bone segment transport in the treatment of large bone defects using medullary nail fixation. Clin. Orthop. 301 (1994) 147-155.
- [8] Forriol, F., Goenaga, I., Mora, G., Vinolas, J., Canadell, J.: Measurement of bone lengthening forces; an experimental model in the lamb. Clin. Biomech. 12 (1997) 17-21.
- [9] Gardner, T.N., Evans, M., Simpson, H., Kenwright, J.: Force-displacement behaviour of biological tissue during distraction osteogenesis. Med. Eng. Phys. 20 (1998) 708-715.
- [10] 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.
- [11] Ilizarov, G.A.: The tension-stress effect on the genesis and growth of tissues: Part II. The influence of the rate and frequency of distraction. Clin. Orthop., 239 (1989) 263-285.
- [12] Simpson, A.H., Cunningham, J.L., Kenwright, J.: The forces which develop in the tissues during leg lengthening. A clinical study. J. Bone Joint Surg. (Br) 78 (1996) 979-983.

1191

Korrespondenzadresse:

PD Dr. R. Baumgart

Klinikum der Universität München

Chirurgische Klinik und Poliklinik - Innenstadt,

Nußbaumstr. 20, D-80336 München

Tel.: +49 89 5160 2655; Fax.: +49 89 5160 4786

E-Mail: Rainer.Baumgart@med.uni-muenchen.de