

6 Diskussion

Die Schrauben-Knochen-Kontaktfläche (Pin-Bone-Interface) wird von vielen Autoren und Untersuchern als das schwächste Glied in der Stabilität einer externen Frakturfixation angesehen. Das Fehlen einer ausreichenden Fixation der Schrauben im Knochen kann zu einer Schraubenlockerung führen (Moroni *et al.*, 1998). Deshalb beschäftigen sich viele Arbeiten mit der Optimierung einer stabilen Fixateur externe-Osteosynthese, die nicht nur initial durch eine gute ossäre Integration der Schrauben charakterisiert sein sollte, sondern auch im Verlaufe der Frakturheilung eine dauerhafte, belastbare Implantatintegration erhalten muss. Verschiedene Implantatbeschichtungen konnten eine Verbesserung dieser Osteointegration bewirken (Moroni *et al.*, 1993; Moroni *et al.*, 1998; Lind *et al.*, 1999; Schmidmaier *et al.*, 2001).

Das Ziel dieser Arbeit war es, die Reaktionen des bindegewebigen und vor allem des knöchernen Gewebes auf die eingesetzte Implantatbeschichtung Poly(D,L-Lactid) hin zu untersuchen und sie mit einer Kontrollgruppe zu vergleichen. Diese Beschichtung zeigte in früheren Studien an Ratten schon alleine, ohne zusätzlich inkorporierte Wachstumsfaktoren, einen positiven Einfluss auf die Frakturheilung (Schmidmaier *et al.*, 2001). Als Fortsetzung dieser Studien und zur Überprüfung der Untersuchungsergebnisse sollte die biologische Reaktion dieses Polymers auf das die Fixateur-Schrauben umgebende Gewebe untersucht werden. Der Einsatz dieser Beschichtung wurde in einem Großtiermodell untersucht, um das Verfahren auch später im Humanpatienten anwenden zu können.

Unter diesem Aspekt wurde zusätzlich die Belastung der Fixateur-Schrauben im Schaf, die der Belastung im Menschen nahe kommt (Lanyon *et al.*, 1979; Matter *et al.*, 1975), auf ihren Einfluss auf die knöcherne Integration der Implantate hin untersucht und mit mechanisch unbelasteten Implantaten verglichen.

Für diese Vergleiche wurden mikrobiologische, histologische und histomorphometrische Analysen der Schrauben-Knochen-Kontaktfläche durchgeführt. Diese Analysen sind geeignet, die biologischen Reaktionen des Knochengewebes auf das Implantat auf der mikroskopischen und zellulären Ebene zu beurteilen, um die biomechanischen, radiologischen und klinischen Befunde nach abgeschlossener Frakturheilung bzw. nach einer Liegedauer der Schrauben von neun Wochen zu untermauern.

Auch in der Veterinärmedizin findet die externe Fixation von Frakturen vielfache Anwendung. Dabei wird den Problemen, die mit dieser Osteosyntheseform in Zusammenhang stehen, noch nicht die vergleichbar hohe Bedeutung wie in der Humanmedizin beigemessen.

Aber auch in den veterinärmedizinischen Untersuchungen werden häufig schwere Pintrakt-Infektionen und ihre Folgen diagnostiziert (Palmer *et al.*, 1990; Aron *et al.*, 1992).

6.1 Tiermodell

Das Schaf ist das geeignete Versuchstier für diese Studie, da es sich in den letzten Jahren als Tiermodell in der orthopädischen Forschung bewährt hat (Claes *et al.*, 1997; Moroni *et al.*, 1998; Goodship *et al.*, 1993; Hyldahl *et al.*, 1991; Klein *et al.*, 2002).

Die vorliegende Arbeit stellt eine Teilstudie einer komplexen, umfangreichen Frakturheilungsstudie dar, bei welcher die interfragmentären Bewegungen des Knochens und die Bodenreaktionskräfte zur Beurteilung der Gliedmaßenbelastung analysiert wurden und die anschließende histologische Aufarbeitung des Frakturkallus zur Darstellung des Heilungsverlaufs erfolgte.

Für diese Großstudie, ebenso für die hier vorgestellte Untersuchung der Schraubenkanäle, waren die Schafe zweckdienliche Tiere, da die biomechanischen und anatomischen Gegebenheiten der ovinen Tibia große Ähnlichkeiten zur humanen Tibia aufzeigen (Finlay *et al.*, 1995; Lanyon *et al.*, 1975). Für eine Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse (z. B. biologische Reaktionen, Biomechanik) auf den Menschen sollten die Versuche daher möglichst nahe an der humanen Situation angelehnt sein. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die biologischen Gegebenheiten von Mensch und Schaf nicht direkt vergleichbar sind, sofern sie die Osteoregeneration betreffen, da systematische Unterschiede in der Osteontopographie und der Lamellenstruktur des Knochengewebes bestehen (Eitel *et al.*, 1981). Hinsichtlich dieser Sekundärstrukturen wären Hunde oder Primaten für diesen Versuch besser geeignet. Aus ethischen Gründen und wegen verstärkten Druckes von Tierschutzorganisationen wird der Einsatz dieser Tierarten heftig kritisiert (Eitel *et al.*, 1981). Trotz oben genannter Unterschiede zwischen Schaf und Hund oder Primaten stellen Finlay und Mitarbeiter (1995) fest, dass eine Schafstudie über die Schrauben-Knochen-Kontaktfläche auf den Menschen übertragbare Ergebnisse liefert, solange die Schrauben nach geometrischen Gesichtspunkten passend gewählt und korrekt plaziert werden und eine angemessene Belastung auf das System erfolgt.

Das Schwein weist zwar in vielen Bereichen (Knochenstoffwechsel, Knochenremodeling und endokriner Rhythmus) Ähnlichkeiten zum menschlichen Organismus auf, die Durchführbarkeit der Schraubenpflege und die extremen Belastungen der Gliedmaße stellen jedoch in

Bezug auf die Frakturheilung bei dieser Tierart ein Problem dar (Raschke *et al.*, 2000; Knabe, 1990).

Schafe sind relativ leicht zu handhaben, obwohl sie auch ein aufwendiges Management benötigen (Unterbringung, Fütterung, Personal, Medikamentenkosten, Tierkörperbeseitigung). Die tägliche Pinpflege mit steriler Pinzette, Spritze mit Kanüle, Kompressen und Rivanol (0,1 %ig) und anschließendem Schutzverband beugte groben Verschmutzungen der Fixateure vor und reduzierte die über die Haut fortgeleiteten Schraubenkanal-Infektionen im Vorfeld des Versuchs. Zudem entfällt eine Kontamination der Wundgebiete bei diesen Tieren, wie sie durch gegenseitiges Belecken oder Beknabbern bei Hunden und Schweinen vorkommen. Extrembelastungen der operierten Gliedmaße konnten durch das gemäßigte Temperament ausgewählter Tiere, eine Herdenhaltung, antrainierte Zutraulichkeit der Tiere und durch behutsames Einfangen und Behandeln vermieden oder zumindest möglichst gering gehalten werden.

Durch diese Vorkehrungen sind denkbar günstige Voraussetzungen für eine Analyse der Schrauben-Knochen-Kontaktflächen in diesem Tiermodell gegeben.

6.2 Versuchsaufbau

Als Fixationssystem für dieses Tiermodell ist der unilaterale Fixateur externe gewählt worden, da diese Form der Osteosynthese seine vielversprechende Anwendung auf dem Gebiet der experimentellen Frakturheilung findet (Goodship *et al.*, 1993; Claes *et al.*, 1997; Duda *et al.*, 1998).

Neben den mechanisch belasteten Schrauben (\emptyset 0,5 mm), die mit dem Fixateurkonstrukt in Verbindung standen, dienten zum Vergleich zusätzlich in den Knochen eingebrachte Schrauben (\emptyset 0,4 mm), die mit dem Fixateur-Konstrukt nicht in Verbindung standen und somit mechanisch unbelastet waren. Desweiteren wurden die Fixateurschrauben im Gegensatz zu den zusätzlichen Schrauben, die als Halterung für reflektierende Marker für ganganalytische Messungen dienten, radial vorgespannt.

Um den Einfluss mechanischer Belastung durch Fixateurschrauben im beanspruchten Knochen zu untersuchen, wurden durch diesen Versuchsaufbau, in Anlehnung an eine Studie von Hyldahl und Mitarbeitern (1991), die Voraussetzungen für einen Vergleich von vier Gruppen (beschichtete/unbeschichtete und belastete/unbelastete Implantate) zu weitergehenden Analysen geschaffen.

Für die mechanische Belastung der Schrauben-Knochen-Kontaktfläche ist neben den Bewegungen des Tieres auch das Maß der Vorspannung der implantierten Schrauben von Bedeutung. Ein Missverhältnis der Durchmesser von Schrauben und Bohrloch von mehr als 0,4 mm kann einerseits eine verbesserte Verankerung des Implantates im Knochen, aber andererseits auch strukturelle Schäden in Form von lamellärer Verformung, osteonaler Kompression und Mikrofrakturen im Knochengewebe nach sich ziehen (Biliouris *et al.*, 1989; Höntzsch, 1997). In dieser Studie beträgt das Missverhältnis der Durchmesser der mechanisch belasteten Schraube und des Bohrloches 0,5 mm und überschreitet somit nach den Angaben Biliouris und Mitarbeitern (1989) diese kritische Grenze um 0,1 mm. Unter diesen Voraussetzungen ist bei den für diese Untersuchungen durchgeführten Schraubenimplantation davon auszugehen, dass aufgrund der relativ hohen Vorspannung der implantierten Schrauben kein unversehrtes Pin-Bone-Interface entstanden ist, was bei den histologischen und histomorphometrischen Auswertungen zu berücksichtigen ist.

Andererseits konnte in einer Studie von Hyldahl und Mitarbeitern (1991) gezeigt werden, dass auch bei vollkommen unbelasteten Schrauben (keine Vorspannung und mechanisch unbelastet) Reaktionen am Pin-Bone-Interface in Form von osteolytischen Prozessen nach fünf Wochen zu sehen sind. Es muss deshalb im Zusammenhang mit der Auswertung dieser Untersuchung festgestellt werden, dass sowohl mechanische Belastung von Schrauben als auch Nichtbelastung schon zu Knochenveränderungen in Implantatnähe führen.

Außer dem Einfluss der mechanischen Belastung des Implantates auf die Schrauben-Knochen-Kontaktfläche sollte durch die vorliegende Untersuchung die Einflussnahme einer Poly(D,L-Lactid)-Implantatbeschichtung unter „Extrembelastungen“ im Modelltier Schaf untersucht werden, da diese Implantatbeschichtung schon einen positiven Einfluss auf die Frakturheilung in einem unbelasteten Modell an der Ratte gezeigt hat (Schmidmaier *et al.*, 2001; Lucke *et al.*, 2002). Die verwendete Beschichtung der Schrauben hat eine Schichtdicke von 10 - 14 µm, und zeigte eine gewisse mechanische Stabilität im Zuge der Implantation in der Ratte. Durch die gewählte Beschichtung der Implantate sollte das Risiko vor unerwünschten Reaktionen im implantatumgebenden Knochen gemindert werden (Schmidmaier *et al.*, 2001). Aus diesen Gründen wurde dieselbe Schichtdicke in diesem Schafmodell verwendet. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei diesem Tiermodell andere Knochen- und Implantatdimensionen und unter Umständen andere biologische Reaktionen auf die Poly(D,L-Lactid)-Beschichtung der Implantate zugrunde liegen könnten. So könnte die Schichtdicke für das Tiermodell Schaf nicht ausreichend dick gewählt sein, um eine

Wirkung auf das Knochengewebe in der Umgebung der Schrauben hervorzurufen. Auf der anderen Seite darf das Polymer auch nicht in zu hoher Konzentration vorhanden sein, da es ansonsten zu unerwünschten Reaktionen im Gewebe, vor allem durch eine schnelle Biodegradation, kommen kann (Koskikare *et al.*, 1998). Mit einer langsam degradierenden Beschichtung sollten in diesem Versuch günstige Voraussetzungen für den erfolgreichen Sitz der Schrauben im Bohrkanal über die Zeit geschaffen sein und die Schrauben-Knochen-Kontaktfläche stabilisiert sowie verbessert werden.

Mit dem gewählten Versuchsaufbau ist es möglich, den Einfluss einer biodegradierbaren Substanz als Implantatbeschichtung auf die Osteointegration in Abhängigkeit von der Belastung der implantierten Schrauben zu untersuchen und zu ermitteln, welche biologischen Veränderungen im Knochengewebe auf die Belastung und welche auf die Beschichtung des Implantates zurückzuführen sind.

6.3 Entnommene Pintrakts

Um eine möglichst genaue histologische und histomorphometrische Analyse der Schrauben-Knochen-Kontaktfläche durchführen zu können, wird die Anfertigung von histologischen Dünnschliffen empfohlen (Donath, 1987; Moroni *et al.*, 1998). Auf diese Weise ist die Möglichkeit gegeben, die Knochen-Implantat-Kontaktfläche bei im Knochen liegendem Implantat zu analysieren. Ein Herausdrehen der Schrauben, wie in der vorgelegten Studie, hat eine partielle Ablösung der mesenchymalen Zwischenschicht zur Folge, soweit diese vorhanden ist, und läßt somit keine exakte Aussage in Bezug auf die erhaltene Kontaktfläche zu. Weiterhin kann es in einigen Fällen zu einer Veränderung der ursprünglichen Knochenstruktur in Schraubennähe durch das Entfernen der Schrauben kommen. Da sich im Rahmen einer Frakturheilungsstudie noch andere Untersuchungen, wie z. B. die biomechanische Steifigkeitsmessung des Frakturkallus, aber auch die mikrobiologischen Untersuchungen der entfernten Implantate anschlossen, war die strukturelle Untersuchung der Schraubenkanäle nur auf dem Wege der Implantatentfernung möglich. Ähnliche Untersuchungen von Schraubenkanälen nach Implantatentfernung konnten jedoch auch in anderen Arbeitsgruppen erfolgreich durchgeführt werden und sind somit vergleichbar (Hyldahl *et al.*, 1991; Pettine *et al.*, 1993; Aro *et al.*, 1993).

Die Schraubenpositionen „1“ und „6“ (Abb. 4) standen im Rahmen dieser Untersuchungen nicht zur Verfügung, da sie aufgrund ihrer räumlichen Nähe zum Kunststoff-Einguss der Tibiaenden für die Biomechanik für diese Versuche nicht geeignet wären. Radiologisch konnte periostal und endostal entlang der Pintrakte „3“ und „4“, aufgrund ihrer Nähe zum Frakturspalt (Abb. 8) und somit auch zum sich entwickelnden Frakturkallus, eine prominentere Knochenneubildung beobachtet werden. Diese osteogenetischen Prozesse sind von der Frakturheilung beeinflusst und würden somit die Ergebnisse hinsichtlich neuer Knochenformationen in Schraubenumgebung verfälschen. Aus diesem Grund und weil zudem die Pintrakte „3“ und „4“ mit der primären Fragestellung nichts zu tun haben, wurden sie ebenfalls nicht für die weiteren Auswertungen entnommen.

In den Studien von Pettine und Mitarbeitern (1993), David und Mitarbeitern (1994) und Moroni und Mitarbeitern (1998) wurde auf die Auswahl der Pintrakte hinsichtlich ihrer Lokalisation keine Rücksicht genommen und die histologischen Ergebnisse nicht getrennt von einander beurteilt. Aro und Mitarbeiter (1993) versuchten hingegen diesen kallusbildenden Effekt des Frakturgebietes auszuschalten, indem sie nur die am weitesten proximal bzw. distal von der Fraktur gelegenen Pintrakte, wie die hier vorliegende Präparate, in die histologischen Auswertungen mit einschlossen. Ein weiterer Grund für deren Auswahl der Proben begründete sich darauf, dass die Form der caninen Tibia eine exzentrische Positionierung der Pins in der Kortex zur Folge hatte. In Anlehnung an die Arbeit von Aro und Mitarbeitern (1993) wurden auch die hier vorliegenden Knochenproben entnommen.

Über einen Vergleich von mechanisch belasteten und unbelasteten Fixateurschrauben existieren wenige Studien. So berichteten nur Hyldahl und Mitarbeiter (1991) über die Auswertung von belasteten und unbelasteten Pins bzw. Pintrakts, obgleich in dieser Studie keine Osteotomie des Tibiaschaftes erfolgte, die Pins jedoch kortikal in enger räumlicher Beziehung in die Tibiadiaphyse eingebracht wurden.

Die Entnahme transversaler Knochenscheiben mit den darin enthaltenen Pintrakten stellte sich als problematisch dar, da aus technischen Gründen die Führungslinie der Säge nicht immer zentral durch den Pintrakt geführt werden konnte und es somit zu Abweichungen der zu beurteilenden zentralen Schnittebene kam. Diese Abweichungen wurden in den histomorphometrischen Auswertungen entsprechend berücksichtigt (siehe Material und Methoden).

6.4 Anmerkungen zu den Analysemethoden

Mithilfe verschiedener Methoden wurde die Qualität bzw. die Stabilität der Schrauben-Knochen-Kontaktfläche (Pin-Bone-Interface) beurteilt.

6.4.1 Drehmomente

Die mechanische Verankerung der Schrauben im Knochen kann einerseits *in vivo* und *ex vivo* durch ihre Drehmomente bestimmt werden (Moroni *et al.*, 2001). Andererseits ist der Einsatz eines standardisierten Bewertungsschlüssels (Scores) möglich, der die Verankerung der Schrauben beurteilt (Mahan *et al.*, 1991; Voos *et al.*, 1999). In diesem Versuch wurde die Verankerung der Schrauben mittels Drehmomentmessung durchgeführt, da sie eine genauere Möglichkeit zur Auswertung bietet, als die röntgenologische und klinische Beurteilung. Diese Methoden sind aufgrund ihrer Subjektivität von eingeschränkter Aussagekraft (Moroni *et al.*, 2001).

Es musste jedoch bei der Durchführung der vorliegenden Versuche festgestellt werden, dass der Drehmomentmesser in 67 % der untersuchten Schrauben nicht messbereit bzw. defekt war, da keine Messwerte angezeigt wurden. Somit konnte nicht geklärt werden, ob die große Streuung der durchgeführten 33 % der Messungen auf ein fehlerhaftes Messgerät zurückzuführen ist, oder ob die gemessenen Drehmomentwerte zufällig eine große Streuung zeigten. Aus diesem Grund, und weil zudem die Anzahl der durchgeführten Messungen sehr gering war, wurden die Drehmomentmessungen für wenig aussagekräftig angesehen und zur Beurteilung der Stabilität des Schrauben-Knochen-Kontaktes nicht weiter berücksichtigt.

6.4.2 Mikrobiologie

Im Rahmen einer Fixateur externe-Osteosynthese sind Pintrakt-Infektionen eine häufige Komplikation und ein wichtiges Kriterium für die Beurteilung der Stabilität der Implantatverankerung (Mahan *et al.*, 1991). In der Literatur sind verschiedene Methoden beschrieben worden, um einen Nachweis bzw. das Ausmaß einer mikrobiologischen Infektion des Pintrakts zu erbringen. Bei den verschiedenen Nachweisverfahren ist darauf zu achten,

dass bei der Probengewinnung möglichst steril und sauber gearbeitet wird (Clasper *et al.*, 1999, Maki *et al.*, 1977). Deshalb wurde bei der Schraubenentnahme darauf geachtet, die Schraube nicht durch die äußeren Haut zu kontaminieren. Zur Absicherung wurden sterile Tupferproben der die Schrauben umgebenden Haut genommen. Eine nachträgliche Kontamination durch die Haut könnte durch das Negativ-Ergebnis einer Kolonisation der Abstriche ausgeschlossen werden.

Während Mahan und Mitarbeiter (1991) sowie Schatzker und Mitarbeiter (1975) ausführen, dass das Vorkommen von entzündeten Pintrakts oder die Besiedlung der Pinspitzen mit invasiven Bakterien mit einer Lockerung der Pins signifikant korreliert, stellten Dobbins und Mitarbeiter (1988) fest, dass es bei Vorhandensein von *Staphylococcus aureus* nicht unweigerlich zu einer klinischen Infektion kommen muß. Die Arbeitsgruppe von Mahan (1991) konnte jedoch aufzeigen, dass die klinische Pintrakt-Entzündung und eine positive Pinspitzen-Kolonisation keine signifikante Korrelation zu einander zeigten. Ebenso zeigten osteolytische Prozesse im Schraubenkanal und eine Pinlockerung zum Zeitpunkt der Pin-entfernung keine signifikante Beziehung zueinander.

So stellt sich die Beurteilung eines Pintrakts hinsichtlich einer Infektion, die sich negativ auf die ossäre Integration der Schraube auswirkt, als sehr komplex dar und verlangt genaueste Methoden und sterilste Bedingungen, um eine validierte Aussage über die Infektionsrate treffen zu können. Aus diesem Grund sind die hier vorgestellten mikrobiologischen Ergebnisse keine allgültige Aussage, sie sind eher richtungsweisend.

6.4.3 Histologie

Die histologischen Schnitte, die u. a. für die histomorphometrischen und histochemischen Auswertungen genutzt wurden, waren sehr dünn (6 µm dick), sodass nur wenige Überlagerungen mehrerer Gewebeschichten auftraten. Daraus resultiert eine hohe Sensitivität der histochemischen Nachweisverfahren und anschließenden Messungen. Nachteilig wirkte sich die Präparation der knöchernen Schraubenkanäle nach Implantatentfernung aus. In manchen Fällen kam es zu präparationsbedingten Schäden. Diese Schäden drückten sich im Ablösen der mesenchymalen Zwischenschicht und in Rissen in der Kortikalis aus, sodass ein Auftreten fibröser Knochen-Implantat-Kontaktschichten nicht durchweg beurteilt werden konnte und die Risse der Kortikalis bei der bildanalytischen Untersuchung knöcherner Strukturen manuell nachgebessert werden mussten. Dennoch erlauben Übersichtsfärbungen unentkalkter, in

Methylmethacrylat eingebetteter Knochenpräparate eine bessere Darstellung von Knochengewebe als die erwähnten Dünnschliffverfahren (Donath, 1987; Moroni *et al.*, 1998) und erleichtern die spätere quantitative und qualitative Auswertung von Knochenarealen.

Die Erstellung eines histologischen Bewertungsschlüssels (Grading Score), der eigens neu entwickelt wurde, orientierte sich an verschiedenen Literaturangaben, welche die Parameter Remodeling, Resorption, Osteoklastenvorkommen respektive -aktivität, Kallusformationen und bindegewebige Reaktionen mit einschlossen (Chao u. An, 1982; Oni *et al.*, 1993; Pettine *et al.*, 1993; Schatzker, 1995; Amling u. Delling 1996). Die Gewichtung der zu bewertenden Parameter erfolgte in Anlehnung an die oben erwähnten Literaturangaben. Die Auswertung der histologischen Präparate nach diesem Bewertungsschlüssel ergab, dass diese Methode zur Beurteilung von Zellen und Strukturen einerseits reproduzierbar ist, aber andererseits keine große quantitative Genauigkeit zulässt. Als vorteilhaft stellte sich die rasche Bewertung der histologischen Präparate heraus. Der Bewertungsschlüssel zeigte zudem Übereinstimmungen mit den histochemischen und histomorphometrischen Befunden in Bezug auf die günstigen Effekte der Beschichtung (siehe Kap. 5).

6.4.4 Histochemie

Der histochemische Nachweis des Enzyms saure Phosphatase in den Osteoklasten, der bereits an Rattenknochen erfolgte (Hermanns, 1986), konnte auch in der vorliegenden Studie erfolgreich am Methylmethacrylat-eingebetteten Schafknochen durchgeführt werden. Der Nachweis dieser multinukleären Zellen konnte dadurch auch anschließend quantifiziert werden.

Erstmals erfolgte die Quantifizierung der Osteoklasten innerhalb definierter Knochenareale (Schraubenzacken und deren unmittelbare Umgebung) im Schaf. Somit ist kein Vergleich zu anderen bereits erfolgten Studien möglich. Durch manuelles Zählen der Osteoklasten konnte eine hohe Messgenauigkeit erzielt werden und auch schwach positive Zellen konnten problemlos vom Untersucher unter dem Mikroskop als Osteoklasten erkannt werden.

6.4.5 Histomorphometrie

Die computergestützte Quantifizierung von Zellen und Gewebemerkmale bietet die Möglichkeit, repräsentative Messungen vorzunehmen, die auch von mehreren Untersuchern

reproduziert werden können. Diese Methode wurde bereits in verschiedenen Arbeitsgruppen in Bezug auf den Knochen-Implantat-Kontakt angewendet (David *et al.*, 1994; Vercaigne *et al.*, 1998; Lind *et al.*, 1999). Da diese Arbeitsgruppen aber teilweise unterschiedliche Strukturen untersucht haben und auch kein einheitliches Computerprogramm („Makro“) für die Analyse der Schrauben-Knochen-Kontaktfläche erstellt wurde, können die hier vorliegenden Ergebnisse nicht direkt mit anderen Untersuchungen verglichen werden.

Da es bei manchen Präparaten zu Artefakten während der Herstellung der Schnitte und der folgenden Färbungen gekommen ist, musste eine manuelle Nachbearbeitung markierter Flächen im Rahmen der bildanalytischen Bearbeitung des Präparates erfolgen. Deshalb sollte man sich stets diese Einschränkungen (manuelle Nachbesserungen präparationsbedingter Schäden oder ungenügende Zellfärbung), die eine automatisierte Methode beinhaltet, vergegenwärtigen und bei der Bewertung der Messergebnisse berücksichtigen (Hunt u. Williams, 1995).

Die Schwierigkeiten der morphometrischen Analyse in dieser Studie stellten sich in Form von Programm-spezifischen Angleichungen zwischen den histologischen Schnitten dar, weil unterschiedliche Schnittebenen die Bestimmung unterschiedlicher Gewebeflächen nach sich ziehen könnten.

Dieses Problem konnte durch die Art der Berechnung von Daten unter Berücksichtigung von Referenzflächen gelöst werden. Sie gestattet die hohe Reproduzierbarkeit, die allerdings von leichten Abweichungen, auch manueller Distanzeingaben verschiedener Untersucher, begleitet wird. Zusätzliche Ungenauigkeiten traten während der Messung der Remodeling-Flächen auf, da auch resorptive Vorgänge in die programmierte „Region of Interest“ dieser Bereiche eingeschlossen wurden. Diese Resorptionen sind jedoch im Verhältnis zu den Umbauprozessen so verschwindend gering, dass sie die Messungen des Remodelings nicht beeinflussen werden.

Neben der Zeitersparnis ist die computergestützte Auswertung insofern auch vorteilhaft, da sie in dieser Studie, wie auch in anderen Studien (Aro *et al.*, 1993; David *et al.*, 1994), die getrennten Einzelmessungen der Kortikales- und neuen, angelagerten Knochenflächen zwischen den Eingangs- und Ausgangsbereichen des Implantates ermöglichte. So war eine detailliertere Analyse der Strukturen durchführbar.

In den vorliegenden histomorphometrischen Arbeiten werden kaum Angaben über die Untersucherfehler (intra-observer-error) gemacht, weshalb eine Aussage über statistische Testverfahren problematisch erscheint. In der Literatur werden allgemeine Messfehler mit unter 5 % angegeben (Rompanen, 1982). Diese sind aber sicherlich auch von den

verwendeten Computerprogrammen abhängig, welche jeweils unterschiedlich gut reproduzierbare Messungen zulassen.

Wiederholte Messungen exemplarischer Präparate wurden in der vorliegenden Studie nicht auf einen individuellen (intra-observer) Messfehler untersucht, eine Größenordnung von 5 % Messfehlern erscheint jedoch auch in dieser Studie als realistisch.

6.5 Diskussion der Ergebnisse

Wie in der Literaturübersicht erwähnt wurde, wird der Erfolg einer Fixateur externe-Osteosynthese von Pintrakt-Infektionen und Pinlockerungen beeinträchtigt (Masse *et al.*, 2000; David *et al.*, 2001).

Um diese Komplikationen zu reduzieren, ist eine verbesserte ossäre Integration an der Schrauben-Knochen-Kontaktfläche erwünscht, welche durch biologische (z. B. Blutversorgung, Weichteilschäden) und mechanischen Faktoren (z. B. Belastung der Gliedmaße) beeinflusst wird (Mahan *et al.*, 1991; Pommer *et al.*, 1998; Aro *et al.*, 1993; Hyldahl *et al.*, 1991). Es hat sich gezeigt, dass die Belastung respektive die Nichtbelastung des Implantates einen Einfluss auf die biologische Reaktion des Knochengewebes am Pin-Bone-Interface hat (Hyldahl, 1993). Zudem wird in vielen Studien darüber berichtet, diese knöcherne Integration zu stimulieren, indem man die Implantate mit bioaktiven Substanzen beschichtet (Moroni *et al.*, 1998; Lind *et al.*, 1999; Schmidmaier *et al.*, 2001). Vor diesem Hintergrund wurde die Poly(D,L-Lactid)-Beschichtung am belasteten und unbelasteten Implantat untersucht, um daraus Schlussfolgerungen für den Nutzen solcher beschichteter Implantate im klinischen Einsatz zu ziehen.

6.5.1 Einfluss der Beschichtung

Verschiedene bioaktive oder resorbierbare Materialien haben einen Einfluss auf die biologische Reaktion im Knochen- und Weichteilgewebe eines Organismus (Bostman *et al.*, 1990; Huré *et al.*, 1996; Panagiotopoulos *et al.*, 1997). Polylaktide und Polyglykolate, sowie Ihre Copolymere, können sowohl als Implantat-Beschichtung als auch in Form eines resorbierbaren Implantates einen positiven Einfluss im Sinne einer verbesserten knöchernen

Integration und problemlosen Resorbierbarkeit des Implantates haben (Schmidmaier *et al.*, 2001; Mainil-Varlet *et al.*, 1997; Duan *et al.*, 2000; Nordstrom *et al.*, 1998; Prokop *et al.*, 2002). In anderen Untersuchungen interner Fixationsverfahren mittels dieser Materialien wird jedoch auch von starken Fremdkörperreaktionen bis hin zu dann notwendigen operativen Nachbehandlungen berichtet (Bostman *et al.*, 1990; Steinmann *et al.*, 1990).

In der vorliegenden Studie ergaben sich in Übereinstimmung mit anderen vergleichbaren Studien (Hyldahl *et al.*, 1991) keine oder kaum klinische Pintrakt-Infektionen zum Versuchsende neun Wochen post operationem. Trotz dieses positiven Ergebnisses wurden im Verlauf der Studie 26 % (16 von 60) leichte Infektionen beobachtet (Dauer: zwei bis fünf Wochen post operationem). Diese initialen Pintrakt-Infektionen wurden nicht weiter berücksichtigt, da sie im Zuge des operativen Eingriffes als Folge einer initialen Entzündungserscheinung an der Eintrittsstelle interpretiert werden und somit als normale Abwehrreaktion der Tiere auf die Operation gewertet werden. Klinisch werden Infektionen der Pintrakts meist erst gar nicht erfasst, zumal die Verbreitung von Infektionen von der Oberfläche des Pintrakts bis hin zum Knochenmark trotz der Abwesenheit mechanischer Pinlockerung erfolgen können und deswegen spät erkannt werden (Clasper *et al.*, 2001). Es wird jedoch auch von bis zu 83 % klinischer Pin-Infektionen berichtet, die initiale Entzündungserscheinungen mit einschlossen (David *et al.*, 1994), welches eine einheitliche klinische Bewertung der Häufigkeit von Pintrakt-Infektionen erschwert.

Durch die begleitenden mikrobiologischen Untersuchungen konnten weniger Infektionen der äußeren Haut und weniger Pintrakt-Infektionen in der Gruppe der beschichteten Implantate nachgewiesen werden, wenn auch keine signifikanten Unterschiede zwischen den untersuchten Gruppen darzustellen waren. Aus der mikrobiologischen Analyse ist ersichtlich, dass die Ergebnisse der lokalisierten Infektionen der beiden verschiedenen Probenentnahmen miteinander korrelieren, wenngleich die Schraubenoberflächen eine höhere Infektionsrate im Vergleich zu den Hautabstrichen aufwiesen (Protokoll 4). Dieses Resultat könnte durch eine ungenügend sterile Entnahmetechnik der Schrauben erklärt werden, die eine allgemeine Kontamination der ausgedrehten Schrauben mit Keimen der Haut zur Folge gehabt haben könnte und somit sich auch keine signifikanten Unterschiede darstellen lassen. Die langsame Degradation des Polymers (Schmidmaier *et al.*, 2001) und seine antimikrobielle Potenz in wässriger Lösung (Van Sliedregt *et al.*, 1992; Daniels *et al.*, 1992) sind aber sicherlich ein Grund dafür, dass beschichtete Implantate günstigere Ergebnisse zeigten. Dieses spricht für die mechanische Stabilität des Polymers in der Implantat-Beschichtung, die ihre Wirkung

über einen längeren Zeitraum erfüllen kann und in den vorliegenden Untersuchungen im Gegensatz zu Literaturangaben keine schweren Fremdkörperreaktionen nach sich zog.

Röntgenologisch konnten keine Auswirkung der Implantatbeschichtung auf die Knochen-Implantat-Kontaktfläche dargestellt werden. Eine mögliche Erklärung dafür ist die semiquantitative Beurteilungsmethode durch einen Bewertungsschlüssel am Röntgenbild, die zu Ungenauigkeiten in der Bewertung führen kann. Stattdessen könnten mikroradiographische Aufnahmen histologischer Präparate eine genauere Beurteilung der Osteointegrität des Implantates zulassen (Aro *et al.*, 1993). Insofern wären bei einem Vergleich der radiologischen grobsinnlichen Scores mit denjenigen anderer Studien vorsichtig zu beurteilen.

Im Rahmen der histologischen Untersuchung der Präparate können die vorteilhaften Ergebnisse der mikrobiologischen Auswertung beschichteter Implantate gestützt und akzentuiert werden. Es zeigte sich, dass wiederum die beschichteten Implantate eine signifikant bessere ossäre Integration im Rahmen des histologischen Scorings aufwiesen als die unbeschichteten Implantate (Abb. 21), welche u. a. durch eine objektiv bewertete höhere Kallusmenge in Schraubkanal-Umgebung, ein geringeres Remodeling und weniger Resorptionen hergestellt wird.

Resorptive Vorgänge im Knochen werden besonders durch die Osteoklastenaktivität charakterisiert (Amling u. Dellling 1996). Eine erhöhte Osteoklastenaktivität steht somit in dieser Studie stellvertretend für erhöhte Remodeling- und Resorptionsvorgänge, welche insbesondere in Schraubennähe beobachtet werden konnten. Die Anzahl der Osteoklasten war in den Gruppen der unbeschichteten Implantate signifikant höher als in denjenigen der beschichteten Implantate (Abb. 35, 36), was die Schlussfolgerung zulässt, dass die Poly(D,L-Lactid)-Beschichtung aufgrund ihrer günstigen Materialeigenschaften die resorptive Aktivität im Knochengewebe hemmt und die beschichteten Schrauben somit keine oder nur geringe Reaktionen im Knochengewebe hervorrufen.

Die histomorphometrischen Befunde geben Aufschluss über die osteonalen Strukturen des kortikalen Knochens und ihr Verhalten als Reaktion auf die Implantat-Beschichtung. Die Bestimmung der kortikalen Knochendichte zeigte in den Gruppen der beschichteten Schrauben, dass der Schraubeneintritt tendentiell und der Schraubenaustritt signifikant dichteren Knochen zeigte (Abb. 22, 23). Dieses lässt den Schluss zu, dass beschichtete Schrauben weniger Knochenreaktionen auslösen und dass dadurch ein dichterer kortikaler Knochen für eine bessere Stabilität der Schrauben-Knochen-Kontaktfläche sorgen kann.

An stabilen und nicht infizierten Knochen konnte in anderen Studien gezeigt werden, dass kleine Durchmesser der Haversschen Kanäle und geringe Resorptionen entlang der

Haversschen Gefäße und an Knochenbälkchen zu sehen sind (Petty *et al.*, 1985; Nickel, 1992; Eitel *et al.*, 1980; Eitel *et al.*, 1981). Diese Befunde können bei Poly(D,L-Lactid)-beschichteten Schrauben durch den histochemischen Nachweis von Osteoklasten und histomorphometrische Analyse bestätigt werden. In Übereinstimmung dazu konnte eine Jahresstudie belegen, dass der Einsatz von Polylaktiden in Form resorbierbarer Implantate keine Knochenresorption in der Pin-Umgebung hervorruft (Mainil-Varlet *et al.*, 1997).

Da infizierte Schraubenkanäle in die histologischen Auswertungen nicht mit eingeschlossen werden konnten, ist anzunehmen, dass diese positiven Auswirkungen einer Poly(D,L-Lactid)-Beschichtung auf die Knochenqualität noch deutlicher ausfallen würden, da die unbeschichteten Schrauben tendenziell häufiger infiziert waren, somit auch ungünstigere knöcherne Strukturen aufgezeigt hätten. So ist zu überlegen, ob man in Zukunft die Auswertmethoden modifiziert, um alle Präparate mit in die histologischen Auswertungen einzuschließen.

6.5.2 Einfluss der Belastung

In der vorliegenden Studie sollte der Einfluss der mechanischen Belastung der Implantate im beanspruchten Knochen detaillierter untersucht werden. Zum Einen waren die untersuchten Schrauben der belasteten Gruppen radial vorgespannt, zum Anderen waren sie aufgrund ihrer Verbindung zum Fixateurkonstrukt mechanisch belastet. Es ist bekannt, dass sowohl durch belastete als auch unbelastete Schrauben kein unversehrtes Pin-Bone-Interface entsteht (Hyldahl *et al.*, 1991). In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, wie groß der Einfluss der Belastung des Implantates auf das Pin-Bone-Interface sein würde und wie er sich röntgenologisch oder histologisch darstellt.

Die Ergebnisse der hier vorliegenden Studie zeigen, dass das umliegende Gewebe unbelasteter Implantate im Gegensatz zu den belasteten Implantaten häufiger klinische Entzündungsprozesse zeigte (Verhältnis 4:1). Dieses kann durch Reizungen im umliegenden Weichteilgewebe begründet sein, da die unbelasteten Schrauben kranial im Knochen verankert sind und näher an der Muskulatur (M. tibialis cranialis, M. fibularis tertius) liegen (Hardy *et al.*, 1984; Behrens, 1989). Bei der Implantation der Schrauben sollte deshalb darauf geachtet werden, dass es nicht zu Spannungen des umliegenden Gewebes kommt, da es ansonsten durch anhaltende Reizungen zu einer von der Hautoberfläche fortgeleiteten

Pintrakt-Infektion und einer daraus resultierenden Pinlockerung kommen kann (Aron u. Dewey, 1992).

Nach einer Standzeit der Tiere von neun Wochen sind hinsichtlich der mikrobiologischen Analyse der Pintrakts jedoch bezüglich der Belastung keine signifikanten Unterschiede mehr zu sehen (Abb. 19), belastete Schrauben wiesen jedoch eine tendenziell höhere Rate geringgradiger Pintrakt-Infektionen auf (Abb. 19). Bakterielle Faktoren scheinen jedoch in der vorliegenden Studie weniger die Ursache für Umbauvorgänge der Schrauben-Knochen-Kontaktschicht belasteter und unbelasteter Implantate zu sein. Vielmehr gewinnen die mechanischen Faktoren, welche zu Umbauvorgängen führen, an Bedeutung (Gallo *et al.*, 2002). Es ist zudem bekannt, dass höchste Belastungen der Implantate strukturelle Schäden im Knochen bedingen (Biliouris *et al.*, 1989).

So zeigte die histochemische Analyse der Pintrakte ein erhöhtes Vorkommen resorptiver Vorgänge bei den Gruppen der belasteten Schrauben, da die kortikalen Bereiche des Knochens signifikant mehr Osteoklasten aufwiesen (Abb. 36). Diese Belastungen der Schrauben sind dementsprechend zu hoch und somit unvorteilhaft für die Aufrechterhaltung eines intakten Pin-Bone-Interfaces. Diese Aussage steht im Kontrast zu der Äusserung von Hyldahl und Mitarbeitern (1991), die zu dem Ergebnis kommen, dass eine zusätzliche radiale Vorspannung der Implantate die bessere knöcherne Verankerung erzielt. Diese positiven Ergebnisse von Hyldahl und Mitarbeitern (1991) können durch die vorliegenden Untersuchungen nicht bestätigt werden. Möglicherweise sind die abweichenden Ergebnisse der vorliegenden Studie in der vergleichsweise höher gewählten radialen Vorspannung begründet.

Die histomorphometrischen Ergebnisse der Pintrakts belegen, dass im mechanisch beanspruchten Knochen durch die Belastung der Schrauben eine erhöhte periostale Kallusfläche entsteht, welche als Reaktion auf Instabilität der Schrauben im Knochen gedeutet werden könnte (Abb. 26, 27). Die erhöhte Kallusfläche war vor allem am Schraubeneintritt zu sehen. Diese Untersuchungen werden auch durch die Analyse der periostalen mineralisierten Kallusfläche gestützt, die sogar am Schraubenaustritt in den Gruppen der belasteten Implantate signifikant erhöht war (Abb. 28, 29).

Es kann nicht genau abgegrenzt werden, wieviel implantatumgebendes Kallusgewebe für die Stabilität der Schraube förderlich ist oder ob große Kallusformationen ein negatives Kriterium für die Verankerung der Schraube darstellen. So können überschießende Kallusformationen als Reaktion auf infektiöse Geschehnisse angesehen werden (Mahan *et al.*, 1991; Petty *et al.*, 1985), die häufig von starken Umbauprozessen und osteolytischen Veränderungen begleitet

werden. Aber auch die Belastung kann einen solchen Effekt auslösen, wenn ein mechanischer Stimulus zu groß ist (Beaupre *et al.*, 1990; Carter, 1987). Die vorliegenden Ergebnisse in der Gruppe der belasteten Schrauben können jedoch im Falle extrem hoher Belastungen, die auf den Knochen einwirken, nach den Aussagen von Martin (2002) und Liebich (1999) einen verstärkten Knochenumbau (Remodeling) der Kortikalis nicht bestätigen.

Appositionelles Knochenwachstum könnte auch einen förderlichen Effekt in Form einer Stabilisierung der implantierten Schraube für die kortikale Integration haben, dafür müsste jedoch bei im Knochen verankertem Implantat die Schrauben-Knochen-Kontaktfläche histomorphometrisch anhand von Dünnschliffen untersucht werden, um eine Aussage über die Qualität der Verankerung treffen zu können (Moroni *et al.*, 1998).

Unterschiede in der Ausprägung der periostalen mineralisierten Kallusfläche sind bei den untersuchten Knochenproben am Schraubeneintritt und -austritt zu sehen, welche auf biologische und mechanische Faktoren zurückzuführen sind. Die periostale mineralisierte Kallusfläche ist am Schraubeneintritt durchschnittlich zwei bis dreimal größer als am Austritt (siehe Anhang, Tab. 6, 7, 8, 9). Dieses kann zum Einen durch eine ausgeprägte biologische Reaktion infolge des chirurgischen Zuganges (Traumatisierung des Gewebes) erklärt werden (Remedios, 1999). Es ist möglich, dass knochenspezifische Zellen mit osteogenem Potential einwandern und besonders am Schraubeneintritt für eine derartige Knochenbildung sorgen und diese auch aufrechterhalten.

Zum Anderen ist anzunehmen, dass diese Reaktion, die sich in Form von Kallusformationen und Remodelierung des Knochens darstellt, durch Belastung unterstützt wird, da jede Änderung der physiologischen Druck-, Zug- und Scherkräfte in kurzer Zeit einen Knochenumbau nach sich zieht (Liebich, 1999; Martin, 2000). In Folge der mechanischen Belastung der Implantate findet eine ständige Reizung der umliegenden, beanspruchten Gewebe statt, welche die Zellen zur Produktion von chemischen Mediatoren veranlasst. Solche Zytokine, Wachstumshormone und Matrixproteine, die von den Osteozyten produziert werden, sind für die Aktivierung von Osteoblasten und Osteoklasten notwendig (Nomura u. Takano-Yamamoto, 2000). Ein tendenziell erhöhtes Remodeling (= geringere kortikale Knochendichte) am Schraubeneintritt in der vorliegenden Studie kann mit der reaktiven Kallusbildung in Zusammenhang stehen und würde die Untersuchungen mehrerer Autoren bestätigen, welche ausgeprägte Osteolysen und Umbauvorgänge der montagenahen Kortikalis als Reaktion auf Belastung beobachtet hatten (Hyldahl *et al.* 1994; Pettine *et al.*, 1993; Stürmer, 1984; Stürmer, 1993; Oni *et al.*, 1993; Pettine *et al.*, 1993). Auch zusätzliche Mikroschäden in

der Kortikalis, die durch die radiale Vorspannung der implantierten Schrauben entstehen können, stehen mit einem erhöhten Remodeling in Verbindung (Burr *et al.*, 1985; Bentolila *et al.*, 1998). Die kortikale Knochendichte zeigte jedoch überraschenderweise bei den belasteten und unbelasteten Gruppen in der vorliegenden Studie keine Unterschiede (siehe Anhang, Tab. 6, 7, 8, 9). Die Traumatisierung des Knochens scheint also in beiden Gruppen ein ähnlich ausgeprägtes Remodeling zur Folge zu haben.

6.6 Schlussfolgerung und klinische Relevanz

Es lässt sich aus den hier vorliegenden Ergebnissen schließen, dass die Poly(D,L-Lactid) Beschichtung von Schanz-Schrauben die ossäre Integration dieser Implantate verbessert. Dieses legen die angewendeten *in vivo* und *in vitro* Analysen nahe. Die knöchernen Pintrakts beschichteter Implantate weisen weniger Knochenabbau und Knochenresorption auf und indizieren eine verbesserte Knochenqualität, da die Messergebnisse eine höhere kortikale Knochendichte und eine verminderte kortikale Osteoklastenaktivität belegen.

Darüber hinaus scheint die Beschichtung das Risiko von Pintrakt-Infektionen, zumindest in einem Versuchszeitraum von neun Wochen, durch eine weniger häufige bakterielle Besiedlung der Schraubenoberflächen zu reduzieren. Unter Berücksichtigung der eingeschränkten Zuverlässigkeit der mikrobiologischen Analysemethoden, muss diese Aussage jedoch durch weitergehende Untersuchungen bestätigt werden.

Es kann geschlossen werden, dass die mechanische Beanspruchung im Knochen dieser Tiere sehr hoch war und der Knochen und das Fixateurkonstrukt Maximalbelastungen ausgesetzt waren. Überschießende Kallusformationen konnten in allen Schraubengruppen insbesondere am Schraubeneingang beobachtet werden. Mechanisch belastete Schrauben zeigten jedoch die größte gemessene Kallusfläche und somit die stärksten Reaktionen im Knochengewebe auf ein metallisches Implantat. Ein verstärktes Remodeling des Kortex wurde allgemein am Schraubeneintritt beobachtet, dessen Auswertung zeigte aber keine klaren Unterschiede zwischen belasteten und unbelasteten Implantaten. Dieses deutet darauf hin, dass die biologische Reaktion im kortikalen Knochen im Zuge des operativen Eingriffes sowohl in den Gruppen belasteter als auch unbelasteter Schrauben sehr hoch war und keine Unterschiede mehr erkennbar waren. Ein ausgewogenes Maß an Vorspannung und mechanischer Belastung sollte also vorhanden sein, um Resorptionen in Form einer erhöhten Osteoklastenaktivität und

exzessive Kallusbildung zu mindern, welches in einer Erhöhung der Knochenqualität und einer besseren Verankerung der Implantate resultiert.

Eine zusätzliche Beschichtung der Schrauben reduzierte in der vorliegenden Studie diesen negativen Umbauprozess und sorgte für eine verbesserte ossäre Integration.

Anhand dieser Studie war es möglich, den Einfluss der Poly(D,L-Lactid)-Beschichtung auf die Schrauben-Knochen-Kontaktfläche unabhängig von der mechanischen Belastung nach einer Liegedauer der Implantate von neun Wochen semiquantitativ und quantitativ zu beurteilen. Es konnte gezeigt werden, dass Poly(D,L-Lactid) beim Einsatz der Fixateur externe-Osteosynthese als Beschichtung von Schrauben deren Osteointegration gefördert hat, da diese Implantatbeschichtung die Knochenqualität des Pin-Bone-Interface unabhängig von den mechanischen Bedingungen verbessert hat. Zusätzlich konnte gezeigt werden, dass sehr hohe Belastungen, die auf das Fixateurkonstrukt und den Knochen einwirken, unvorteilhaft für das Gelingen einer stabilen Osteosynthese sein können und die Osteointegration nicht fördern.

Der Einsatz der Implantatbeschichtung konnte in dieser Untersuchung am Tiermodell eine osteoinduktive Wirkung zeigen. Die verwendete Beschichtung führt also nicht zu zusätzlichen osteolytischen Veränderungen im implantatumgebenden Knochengewebe oder zu Schraubenlockerungen, sondern fördert zum Teil sogar die knöcherne Integration der Implantate. Um jedoch noch genauere Aussagen über die Stabilität der Verankerung der mit Poly(D,L-Lactid) beschichteten Schrauben treffen zu können, sind die Messungen der Ein- und Ausdrehmomente der Schrauben eine wichtige Voraussetzung, um die Festigkeit der Verankerung der Schrauben und die Schrauben-Knochen-Kontaktfläche zu beurteilen.

Die vorliegenden Untersuchungen bestätigen, dass die Qualität der Schrauben-Knochengrenze der limitierende Faktor für eine gute Schraubenfixierung und damit für eine erfolgreiche orthopädische Therapie mittels Fixateur externe ist.