

3. Eigene Untersuchungen - Material und Methoden

3.1. Osteosynthesen

Die für diese Studie ausgewählten Implantate sind im klinischen Alltag für die Versorgung von Tibiaschaftfrakturen gebräuchlich. Da der externe Fixateur einen großen Gestaltungsspielraum zulässt, wird im Folgenden kurz auf das Design des Fixateurs, der in dieser Studie implantiert wird, eingegangen. Auch der verwendete UTN 9 wird kurz in seiner bezüglich dieser Studie veränderten Form vorgestellt.

3.1.1. Fixateur externe

In dieser Studie wird ein monolateraler, uniplanarer Fixateur externe verwendet. Die Montageebene wird durch die ovine Anatomie diktiert. Medial bis kraniomedial an der Tibia ist das Planum cutaneum cruris lokalisiert, das bedeutet, die Tibia ist hier nur von Haut und Faszien bedeckt. Die großen Muskelbäuche der Zehenstrecker, Sprunggelenksbeuger, Zehenbeuger und Sprunggelenksstrecker liegen kraniolateral, lateral und kaudal an der Tibia. Die Perforation oder Abdrängung eines Muskelbauchs durch eine Schanzschraube ist für das Tier schmerzhaft und birgt ein erhöhtes Infektionsrisiko (Behrens, 1989). Sowohl Schmerzen als auch Infektionen beeinflussen die Standardisierung des Modells. Die externen Fixateure bestehen aus sechs in die Tibia eingebrachte Schanzschrauben, welche durch insgesamt zwölf Klemmbacken (Artikelnummer 393.440, Synthes, Schweiz) mit zwei Kohlefaserstäben (\varnothing 11 mm, Länge 150 mm, Artikelnummer 394.820, Synthes, Schweiz) verbunden sind (Abb. 3.1.-1). Eine Klemmbacke verbindet über eine Schraubenkonstruktion je eine Schanzschraube mit der Karbonstange. Die Länge der Schanzschrauben (\varnothing 5 mm, Stahl, Artikelnummer 294.540, Synthes, Schweiz) beträgt 125 mm, davon entfallen 50 mm auf das Gewinde. Das Gewinde der Schrauben wurde entsprechend unseren Anforderungen gekürzt: auf 25 mm für den medial montierten Fixateur, auf 25 bis 40 mm für den kraniomedial montierten Fixateur.

Die Schanzschrauben, die in das Fixateurkonstrukt eingebunden sind, werden von proximal nach distal mit 1 bis 6 durchnummeriert. Die Abstände der montierten Schanzschrauben zueinander werden durch die Bohrschablone definiert: der Mittelpunkt der untersten montierten Schraube 6 ist zehn Millimeter von dem als Anlagepunkt gewählten Malleolus medialis entfernt, der Abstand zur diesseitigen Osteotomiekannte beträgt 72 mm, selbiges gilt

für den Abstand der Schanzschraube 1. Die mittig positionierten Schrauben 2 und 5 haben 50 mm Abstand zur jeweiligen Knochenseite des Osteotomiespalts. Die osteotomienahen Schrauben 3 und 4 sind 15 mm von der jeweiligen Knochenseite der Osteotomie entfernt. Der drei Millimeter breite Osteotomiespalt bildet somit die Spiegelachse des symmetrisch aufgebauten Fixateurkonstrukts (Abb. 3.1.-1). Zusätzlich werden zwei Schanzschrauben (\varnothing 4 mm, Länge 100 mm, Stahl, Artikelnummer 494.450, Synthes, Schweiz) eingebracht, die nicht im Fixateurverbund stehen. Sie dienen der optischen Messung der Fragmentbewegungen in einer parallel durchgeführten Studie.

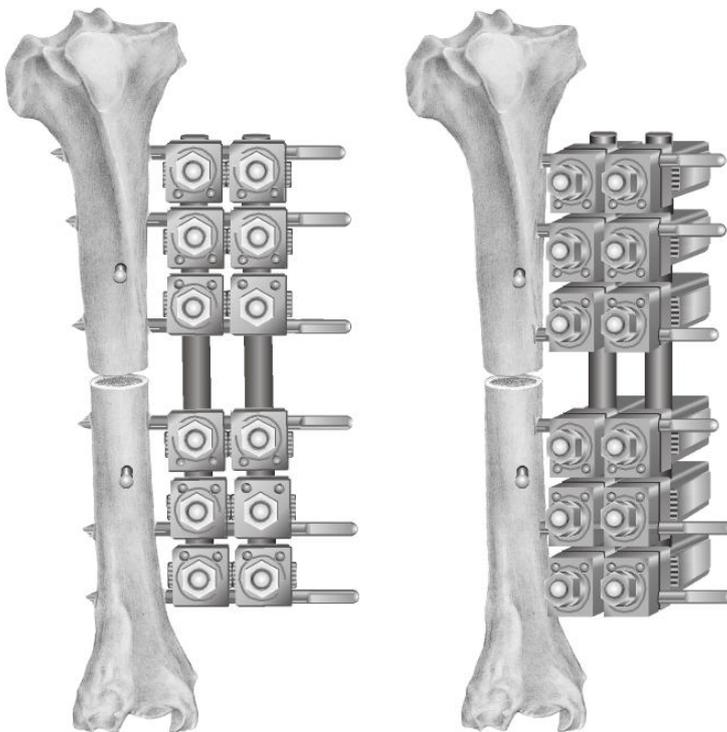


Abb. 3.1.-1:

Grafische Darstellung der unterschiedlichen Montageebene der beiden Fixateure.

Die mediale Seite der Tibia zeigt nach rechts, die kraniale Seite nach vorn. Links ist die mediale Montageebene dargestellt, rechts der kranio-medial montierte Fixateur.

Deutlich erkennbar sind die sechs den Knochen perforierenden Schanzschrauben, welche über je zwei Klemmbacken mit den beiden Carbonstangen verbunden sind. Mittig ist der Osteotomiespalt dargestellt, die proximal und distal von ihm platzierten und nach kranial ausgerichteten Messschanzschrauben kommen auf den Betrachter zu.

3.1.2. Marknagelung der Tibia mittels UTN 9

Ein handelsüblicher Tibianagel (UTN, \varnothing 9,0 mm, Länge 255 mm, Titan, Artikelnummer: 479.250, Synthes[®], Schweiz) wird durch Kürzung auf 210 mm den Dimensionen der Schafstibia angepasst. Die Bohrungen des distalen Nagelendes werden originalgetreu auf die neugeschaffene Spitze des Nagels übertragen.

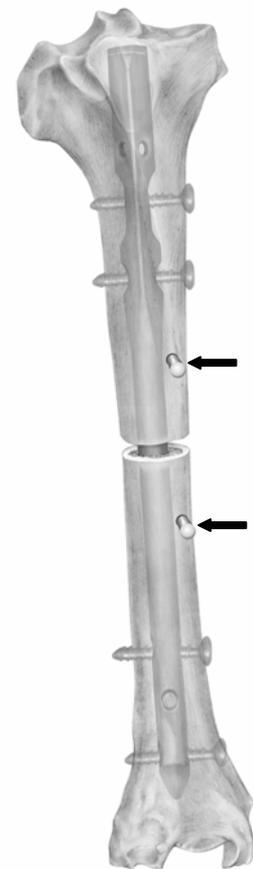
Am Übergang vom proximalen zum mittleren Drittel ist das Implantat neun Grad dorsal-konvex geknickt (Abb. 3.1.-2, links).



Abb. 3.1.-2:

Links: UTN 9 mit Verriegelungsbolzen, die jeweils auf Höhe der besetzten Löcher platziert sind. Der Kreis umzirkelt die Verschlusschraube. Der UTN 9 ist auf 21,0 cm gekürzt, die Spitze und die distalen Verriegelungslöcher sind originalgetreu übertragen.

Rechts: UTN 9 in die unaufgebohrte Markhöhle der Tibia implantiert. Die Köpfe der Verriegelungsbolzen liegen medial. Die Pfeile bezeichnen die zur Messung der interfragmentären Bewegung eingebrachten monokortikalen Kirschner-Drähte.



Der Nagel ist distal in mediolateraler Richtung mit zwei Verriegelungslöchern zur statischen Verriegelung ausgestattet. Proximal sind in mediolateraler Richtung je ein Loch zur dynamischen und zur statischen Verriegelung vorgesehen, ein senkrecht angelegtes Loch dient ebenfalls zur statischen Verriegelung. Die zugehörigen Verriegelungsbolzen aus Titan haben einen Durchmesser von 3,9 mm. Ihre Länge wird entsprechend der Situation *in situ* gewählt. Die Verschlusschraube wird mit Beendigung der Operation in den für das Ein- bzw. Ausschlaginstrumentarium bestimmten Gewindestutzen eingebracht. Sie verhindert durch ihre Anwesenheit das Einwachsen von Gewebe in das Innengewinde des UTN 9 und erleichtert die spätere Implantatentfernung. Zusätzlich werden zwei Kirschnerdrähte (Ø 2,5 mm, Länge 150 mm, mit Gewindespitze, Gewinde 15 mm, Stahl, Artikelnummer: 292.790, Synthes[®], Schweiz) monokortikal eingebracht, die der Messung der Fragmentbewegungen in der Parallelstudie dienen (Abb. 3.1.-2, rechts).

3.1.3. Ermittlung der biomechanischen Eigenschaften

Die initialen Steifigkeit des Osteosyntheseverbands wird an ovinen Kadavertibiae ermittelt. Jeweils sechs rechte Kadaverbeine wurden mit den drei beschriebenen Fixationssystemen versehen. Die Implantatsteifigkeit wurde mit Hilfe der Materialprüfmaschine

(Zwick 1455, Zwick GmbH, Ulm, Deutschland) ermittelt, in welche die mit Implantaten versehenen Tibiae kraftschlüssig eingespannt und in zwei Lastfällen auf ihre dreidimensionale Steifigkeit getestet wurden. Die folgenden zwei Lastfälle wurden getestet:

1. axiale Kompression, bei einer definierten Maximalkraft von 400 N bei konstanter Geschwindigkeit
2. Torsion, bei einem Torsionsmoment von 5 Nm/° und einer axialen Vorlast von 25 N

Die axiale Kompression sollte den Vergleich der axial sehr steifen UTN mit den Fixateuren ermöglichen. Zwischen den externen Fixateuren, die durch ihre identische Konfiguration dieselbe axiale Kompression aufweisen sollten, wurde ein Unterschied bezüglich der Torsionssteifigkeit erwartet. Der kranio-medial montierte Fixateur sollte aufgrund seiner Lage in der Laufrichtung der Tiere eine höhere Torsionssteifigkeit bieten als der mediale Fixateur. Die aus den durch die Materialprüfmaschine ausgeübten Lasten resultierenden interfragmentären Bewegungen wurden mit Hilfe eines optischen Meßsystems erfasst. Mit einem mathematischen Algorithmus wurden aus den erfassten Markerpositionen im Raum die Bewegungen der Fragmente zueinander errechnet. Jeder Lastfall wurde acht Mal wiederholt, die letzten fünf Wiederholungen gingen in die Auswertung ein. Die ersten drei Belastungszyklen wurden verworfen, da sie als Setzzyklen der Maschine angesehen werden müssen und noch keine reproduzierbaren Ergebnisse lieferten.

Für die Durchführung der biomechanischen Testung der initialen Implantatsteifigkeit wurde der Muskelmantel abpräpariert, am Knochen verblieben lediglich die Muskelbäuche der Zehenstrecker und Zehenbeuger sowie die der Sprunggelenksbeuger und -strecker, die die Tibia unmittelbar umhüllen. Der passive Weichteilmantel erhöht die Steifigkeitswerte um durchschnittlich 20 Prozent, verglichen mit einem völlig freipräparierten Knochen (Duda et al., 2000). Die Tibiae wurden zum Schutz vor Austrocknung in feuchte Kompressen gewickelt. Bei allen Präparaten wurde das distale Tibiaende auf Rollknorpelhöhe mit zwei kreuzenden Kirschnerdrähten gespickt, was für einen besseren Halt in der Kunststoffeinhüllung sorgte. Das Tibiaplateau wurde etwa vier Zentimeter hoch in Beracryl (P. Bauer, Präparationsbedarf, Waberg, Schweiz) eingegossen, das gespickte distale Ende ca. zwei Zentimeter. Alle Präparat-Enden wurden derart in Beracryl eingegossen, dass der freie Anteil identisch lang war. Das bedeutet, dass der Anteil der in Kunststoff eingebetteten Tibiateile variieren konnte, nicht jedoch der uneingebettete Anteil. Der freie Anteil der Tibia entsprach in seiner

Länge der Länge der Fixateurschablone, welche als Maß für die Präparation der Tibiaenden diente. Die Lage der Schablone orientierte sich an der Lage während der Implantation. Die Einbettung der Tibia in die Beracrylblöcke erfolgte lotrecht parallel zur Achse der Tibia. Die Präparate wurden mit den vorbereiteten Beracrylblöcken in die Materialprüfmaschine eingespannt, in der die biomechanische Testung der Präparate nach oben beschriebenem Protokoll erfolgte. Aus der Auswertung der Bewegungsmessungen und der Lastaufbringung der Materialprüfmaschine konnte die Steifigkeit des Osteosyntheseverbands berechnet werden.

3.2. Tierhaltung/Auswahl der Tiere

Die am Versuch beteiligten Tiere wurden während der gesamten Versuchsdauer in der Tierexperimentellen Einrichtung der Charité, Campus Virchow-Klinikum gehalten und versorgt. Die Genehmigung des Tierversuchsvorhabens wurde durch das Landesamt für Arbeitsschutz, Gesundheitsschutz und technische Sicherheit, Berlin, erteilt (Genehmigungsnummer G 0188/99).

Nach Anlieferung wurden die Tiere auf ihren guten Gesundheitszustand überprüft. Die Tiere waren weiblich, nicht tragend und laut Zahnalterbestimmung zwei Jahre alt. Bei den Tieren, denen ein Marknagel implantiert werden sollte, war zusätzlich noch die Weite des tibialen Markraums ausschlaggebend. Der Durchmesser an der engsten Stelle musste mindestens 9,5 mm betragen. Die Tiere wiesen einen mittleren Markraum von 9,85 mm (9,55/10,3 mm) [Median (Minimalwert/Maximalwert)] auf. Die Selektion auf einen ausreichend großen Markraum spiegelte sich nicht im Gewicht oder in der Schulterhöhe wieder. So waren die Tiere aller Gruppen in etwa gleich groß und gleich schwer. Die Tiere der Gruppe 1 (medialer Fixateur) wogen durchschnittlich 76,6 ($\pm 7,7$) kg, die der Gruppe 2 (kraniomedialer Fixateur) 78,4 ($\pm 14,2$) kg und die der Gruppe 3 (UTN) 77,1 ($\pm 13,6$) kg. Die Gruppe 1 bestand aus sieben Tieren, die Gruppe 2 enthielt sechs Tiere und die Gruppe 3 umfasste ebenfalls sieben Tiere.

Die Tiere wurden während des gesamten Versuches artgerecht in Gruppen gehalten. Die Gruppengröße variierte zwischen zwei und acht Tieren, je nach Operationsplanung und -durchführung. Für jedes Tier standen mindestens 1,4 m² Stallfläche zur Verfügung. Die Tiere standen auf einer Einstreu aus Stroh und Hobelspänen, welche zwei Mal wöchentlich erneuert wurde. Die Tiere erhielten morgens und nachmittags Heu ad libitum als Grundfutter. Kraftfut-

ter wurde bei unoperierten Tieren zu Trainingszwecken zugefüttert, bei operierten Tieren während der Ganganalyse. Die Kraftfuttergabe war auf 500 g pro Tier und Tag limitiert. Wasser erhielten die Tiere aus Selbsttränken ad libitum. Diese wurden täglich gereinigt und auf ihre einwandfreie Funktion überprüft. Die Belüftung und Klimatisierung des Raumes erfolgten durch eine Klimaanlage. So wurde eine kontinuierliche Raumtemperatur von 18 bis 20°C bei 65 Prozent relativer Luftfeuchtigkeit aufrechterhalten. Die Tiere hatten einen dem natürlichen Licht entsprechenden Tag-Nacht-Rhythmus. Die Tiere wurden während des Lauftrainings und postoperativ während der Pinpflege täglich adspektorisch auf ihren Gesundheitszustand überprüft.

3.3. Operation

3.3.1. Vorbereitung

Die Tiere wurden 12 Stunden vor der Operation nüchtern gehalten, Wasser wurde ad libitum angeboten.

Nach Überprüfung des Gesundheitszustandes und des Gewichts der Tiere wurde mittels eines Verweilkatheter in der V. cephalica antebrachii zunächst eine Blutprobe entnommen. Dann wurden 0,5 g Thiopental-Natrium (Trapanal[®], Fa. Lomberg, Chemische Fabrik GmbH, Konstanz, Deutschland) pro 50 kg KM intravenös infundiert. Die angegebenen Werte sind lediglich Richtwerte, während der Applikation wurden kontinuierlich die Vitalzeichen und Reflexe der Tiere kontrolliert. Die sedierten Tiere wurden mit Hilfe eines Laryngoskopes mit einem Trachealtubus der Größe 9,0 intubiert und sofort mit einem Gemisch aus Isofluran, Lachgas und Sauerstoff beatmet. Der Cuff des Tubus wurde als Schutz vor Aspiration hinter dem Kehlkopf des Tieres geblockt. Die Verankerung des oberen Tubusendes an der Maulspalte erfolgte mittels Klebeband.

Die Tiere erhielten eine Magen-Schlundsonde, welche während der Operation das Entweichen von Gas aus dem Pansen (erster Vormagen) ermöglichte.

Zum Schutz vor Austrocknen wurde in beide Augen Bepanthen-Augensalbe (Jenapharm[®], Deutschland) gegeben. Ein Clip zum Messen der Sauerstoffsättigung des venösen Blutes wurde am Ohr angebracht. An den Beinen wurde auf Fesselgelenkshöhe Klebeelektroden zur Aufzeichnung des EKGs während der Operation angebracht.

Nach Abschluss der Narkoseeinleitung erfolgte die Vorbereitung des Tieres auf den operativen Eingriff. Die Tiere wurden in rechter Seitenlage gelagert, das linke Hinterbein wurde nach vorn über den Rücken ausgebunden, das rechte Hinterbein wurde je nach Operationserfordernissen gelagert: bei die Fixateur-Operation war es wichtig, der Tibia während der Bohrungen der Löcher für die Schanzschrauben Halt zu geben, deshalb lag die Tibia auf dem Tisch auf. Für die Implantierung des Marknagels war ein bewegliches Bein erforderlich, das Kniegelenk musste zur Bestimmung des Eintrittswinkels häufig bewegt werden, deshalb wurden bei diesen Tieren die rechten Hinterbeine vom Kniegelenk aufwärts auf dem OP-Tisch gelagert. Daraufhin wurde das rechte Hinterbein von Fesselhöhe bis zum Knie freigeschoren, das Tier steril vorbereitet.

Zur Überprüfung der Vitalfunktionen wurde ein Kapnograph, das EKG und die Sauerstoffpartialdruckmessung an die Narkoseeinheit angeschlossen. Die Beatmungsfrequenz betrug zwölf Atemzüge pro Minute, das Atemzugvolumen abhängig vom Gewicht des Tieres 5000 bis 8000 ml. Als Richtwert galt 10 ml Gas / kg Körpermasse.

Perioperativ erhielten die Tiere eine intravenöse Infusion plasmatischer Vollelektrolytlösung und eine Schussinfusion mit 2,2 g des in 100 ml Aqua destillata gelösten Antibiotikums Amoxicillin (Augmentan i.v. 2,2 g, GlaxoSmithKline GmbH, München, Deutschland). Zur Analgesie wurde ein Bolus von 0,25 mg Fentanyl Dihydrogen Citrat (Fentanyl-Janssen[®], Janssen GmbH, Neuss, Deutschland) etwa 20 Minuten vor dem ersten Eingriff am Knochen verabreicht.

3.3.2. Operation medialer Fixateur

Nach den allgemeinen Narkosevorbereitungen wurde die Schablone zur Fixateurmontage medial auf das Planum cutaneum cruris der Tibia aufgelegt. Der Malleolus medialis der rechten Tibia diente als Fixpunkt für die standardisierte Lage der Schablone. Dann wurde die Schablone so ausgerichtet, dass, die individuelle Tibiakrümmung berücksichtigt, alle sechs Bohrlöcher mittig in die Tibia gesetzt werden konnten (Abb. 3.3.-1, oben links). Das Setzen der Schanzschrauben begann mit der Hautinzision an der gewählten Stelle. Durch die Schablone und die Hautinzision wurde die Bohrhülse eng auf das Periost gesetzt. Die Vorbohrung erfolgte durch die Bohrhülse, die gleichermaßen als Richtungsweiser und Gewebeschutz

fungierte, mit einem 3,5 mm Spiralbohrer unter ständiger Spülung mit steriler Kochsalzlösung. Die Bohrungen wurden mit einer druckluftbetriebenen Pistole ausgeführt.

Die Schanzschraube wurde mit Hilfe des Universalhandbohrfutters und unter Anwendung eines Gewebeschatzes, der gleichzeitig als Führungsschiene innerhalb der Schablone dient, bikortikal eingedreht. Die Eindrehtiefe wurde nach Einsetzen aller Schrauben radiologisch kontrolliert; die Schanzschrauben sollten mit 1,5 bis 2 Gewindeumdrehungen aus der gegenseitigen Kortikalis herausragen. Nach Einbringen aller Fixateur-Schanzschrauben wurden die zwei nach kranial ausgerichteten Mess-Schanzschrauben eingebracht.

Nach Abschluss der Implantation sämtlicher Schanzschrauben in den Knochen (Abb. 3.3.-1, oben rechts) wurden die Verbindungselemente des Fixateurs montiert. Zwei mit je sechs drehbaren Verbindungsbacken versehene Karbonstangen wurden auf die medial ausgerichteten Schanzschrauben aufgesetzt und mit ca. zwei Zentimeter Spielraum zur Haut festgeschraubt. Die Karbonstangen wurden parallel zur Hautoberfläche angebracht. Die Festigkeit der Schrauben-Mutter-Verbindungen der Klemmbacken wurde überprüft. Die Stabilisierung durch das Fixateurkonstrukt schon während der Osteotomie war nötig, um einer Rotation vorzubeugen und ein seitliches Abknicken des Beines zu vermeiden. Eine unstandardisierte Splitterfraktur hätte sonst die Folge sein können.

Die Sägeschablone wurde an die zwei mittleren Fixateur-Schanzschrauben angelegt, um die Säeebene festzulegen. Nach dem Hautschnitt wurden subkutanes Bindegewebe und die die Tibia dort umgebenden Muskelfaszien stumpf und vorsichtig mit Hilfe einer Metzzenbaum-Präparierschere vom Periost gelöst. Dann wurde die Tibia auf Höhe der Säeebene vorsichtig mit zwei Großzehenhebern nach Hohmann umfahren, die bei der folgenden Sägearbeit das umliegende Weichgewebe schützten. Die Osteotomie wurde mit einer oszillierenden, druckluftbetriebenen Säge durchgeführt. Die Breite des Sägeblattes betrug elf Millimeter, die verursachte Schnittbreite einen Millimeter. Während des Sägens wurde auf eine kontinuierliche Spülung und Kühlung des Gewebes mit steriler Kochsalzlösung geachtet. Die komplette Durchtrennung des Knochens wurde palpatorisch kontrolliert. War die Osteotomie komplett durchgeführt, wurden die karbonstangenseitigen Muttern der Klemmbacken distal der Osteotomie gelöst. Nun konnte die Osteotomie distrahiert und mit der als Abstandshalter fungierenden Sägeschablone auf standardisierte drei Millimeter eingestellt werden. Hernach wurden die gelösten Muttern wieder festgezogen und die Distraction somit fixiert.

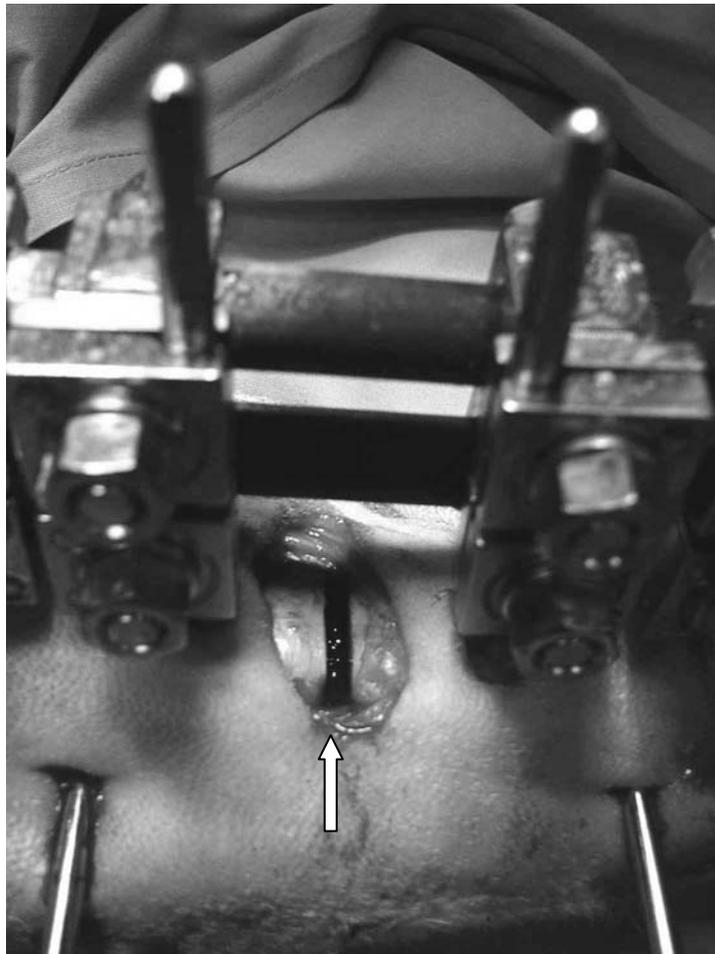
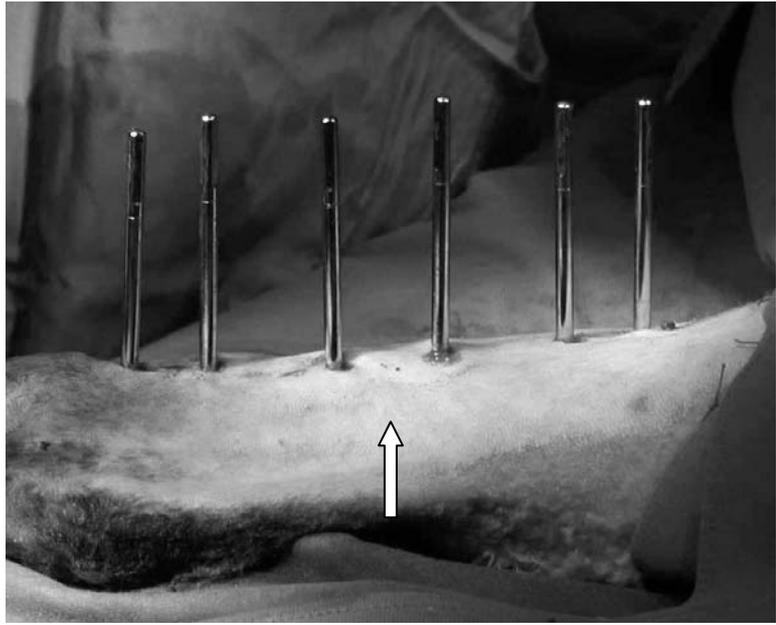
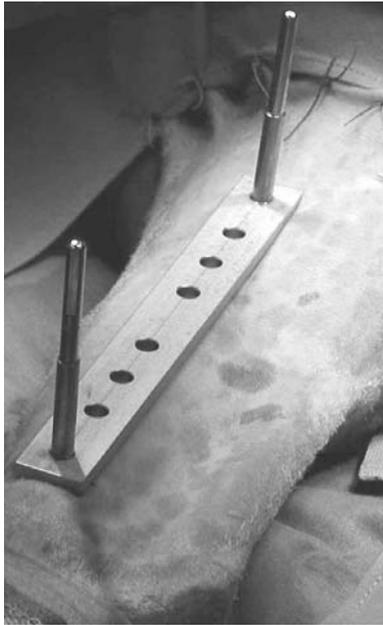


Abb. 3.3.-1:

Oben links: Platzierung der Schablone, die vom Gewebeschutz umgebenen Pins 1 und 6 sind bereits gesetzt.

Oben rechts: Abnahme der Schablone nach Platzierung aller sechs Fixateurschanzschrauben, der Pfeil weist auf die Stelle der später auszuführenden Osteotomie.

Unten: Nahaufnahme des Osteotomie-spalts vor Abschluss der Operation durch die Hautnaht. Erkennbar der ca. vier Zentimeter lange Hautschnitt, die Sägekanten der Kortikalis und das zwischen den Kortikalisanteilen lokalisierte Osteotomiehämatom (Pfeil).

Im nächsten Schritt wurden die schraubenseitigen Muttern der Verbindungsbacken der inneren Karbonstange gelöst. Dies erlaubte ein Absenken der Karbonstange entlang der

Schanzschrauben bis auf den festgelegten Abstand zur Haut von fünf Millimetern (Abstandsbestimmung mit der Fixateurschablone). War der Abstand exakt eingestellt, wurden die gelösten Muttern wieder fest verschraubt. Die Verbindungsbacken der zweiten Karbonstange wurden ebenfalls gelöst, so nah als möglich an die der ersten gebracht und ebenfalls fest verschraubt. Alle Schraubverbindungen wurden noch einmal auf ihre Festigkeit überprüft. Erst jetzt wurde der Abstandhalter entfernt (Abb. 3.3.-1, unten). Die Hautinzision wurde mit Knopfheften verschlossen, die Inzisionen an den Schanzschraubeneintrittsstellen waren so dimensioniert, dass kein Wundverschluss erforderlich war. Der Unterschenkel wurde steril verbunden.

3.3.3. Operation kraniomedialer Fixateur

Die Montage des Fixateurs in kraniomedialer Position erfolgte in weiten Teilen identisch zu derjenigen des medialen Fixateurs. Im Folgenden werden die Unterschiede erläutert, die zur veränderten Montageebene führten:

Die Schablone zur Fixateurmontage wurde mit zwei Winkelstücken bestückt, welche die korrekte Winkelung nach kraniomedial erlaubten. Mit diesem Zubehör ausgestattet, wurde die Schablone wie gehabt auf das Planum cutaneum cruris der Tibia aufgebracht. Nun wurde die Schablone entlang der Längsachse der Tibia nach kranial verschoben, bis die korrekte Winkelung erreicht war (Abb. 3.3.-2 und 3.3.-3, oben). Auch bei diesem Fixateur wurde auf die zentrische, bikortikale Einbringung der Schanzschrauben geachtet. Nach der Vorbohrung wurde mit Hilfe eines Tiefenmessers der Knochendurchmesser bestimmt und die Gewindelänge der Schanzschraube entsprechend gewählt. Die Durchführung der Osteotomie, der Distraction, der Absenkung des Fixateurs, der Einbringung der als Messpins dienenden Schanzschrauben und des Wundverschlusses sind absolut identisch zu dem unter 3.3.2. beschriebenen.

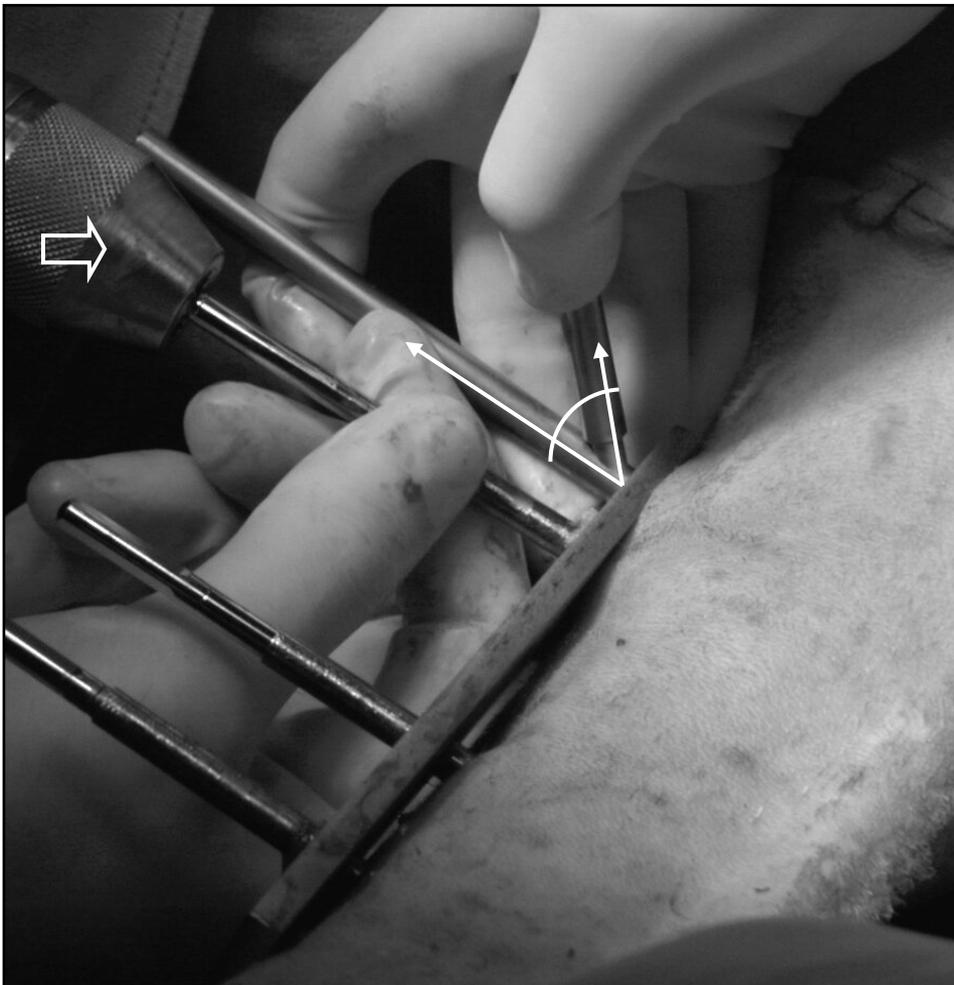


Abb. 3.3.-2:

Einbringen des Pins Nummer 4 mit dem Handbohrfutter (leerer Pfeil).

In dem davon proximal gelegenen Loch der Schablone ist das Winkelstück montiert, welches die Winkelung von 45° nach kranial ermöglicht (Pfeile).

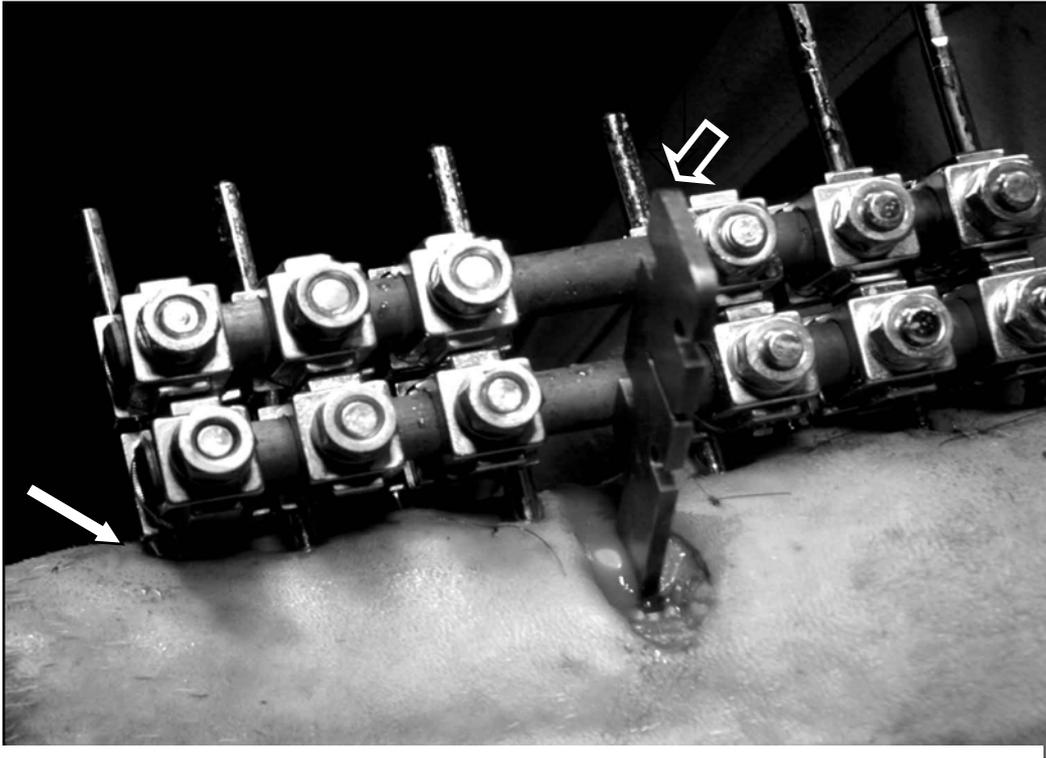
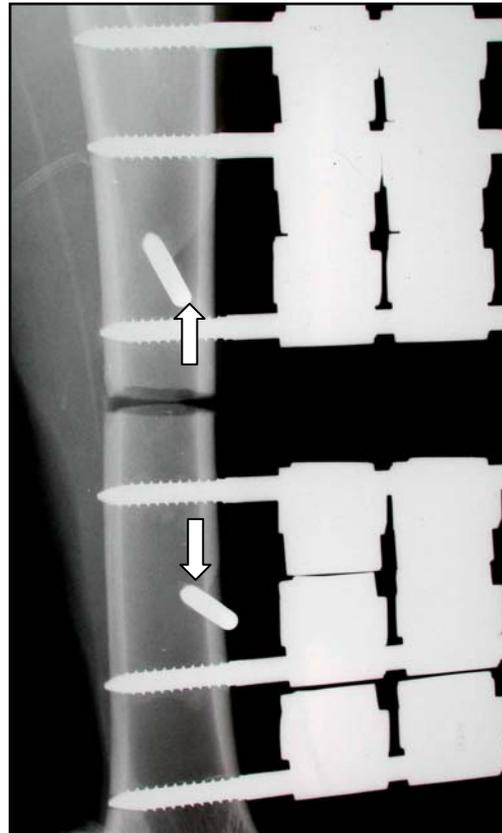
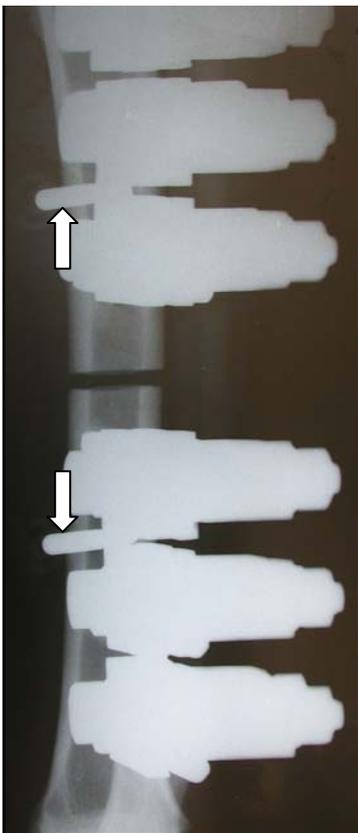


Abb. 3.3.-3:

Oben: Fertig montierter KM-Fixateur nach der Distraction des Osteotomiespalt auf drei Millimeter. Der der genauen Einstellung der Osteotomie dienende Spacer (leerer Pfeil) liegt noch im Osteotomiespalt. Der gefüllte Pfeil deutet auf den medialen Malleolus, den Anlagepunkt für die Schablone zur Fixateurmontage.

Unten: postoperative Röntgenaufnahmen im anteroposterioren Strahlengang. Deutlich erkennbar der im Vergleich zum medial montierten Fixateur (rechtes Bild) spitzere Winkel zwischen den nach kranial ausgerichteten Messpins (Pfeile) und den kranio-medial ausgerichteten Fixateur-Schanzschrauben beim KM-Fixateur (linkes Bild).



3.3.4. Operation unaufgebohrte Marknagelung

Medial am Knie wurde eine großzügige Hautinzision angelegt. Medial des geraden Kniescheibenbandes wurde die Fascia lata mit dem Skalpell getrennt (Abb. 3.4.-4, oben links). Der nun sichtbare präpatellare Fettkörper wurde stumpf vom Tibiaplateau abpräpariert (Abb. 3.3.-4, oben rechts). Nun wurde der Eintrittspunkt des Nagels mittig auf dem Tibiaplateau festgelegt und mit einem Kirschnerdraht fixiert. Der Kirschnerdraht wurde durch das Plateau in die Markhöhle vorgetrieben und diente später als Leitschiene für den Knochenräumer. Winkelung und Sitz des Drahtes wurde radiologisch überprüft. Der Markraum wurde dann mit dem Knochenräumer in drehenden Bewegungen eröffnet. Der Marknagel wurde mit Hilfe des Insertionsinstrumentariums in den (nicht aufgebohrten) Markraum vorgetrieben (Abb. 3.3.-4, unten), wobei unter dem Bildwandler immer wieder die Kontrolle des Sitzes des Implantates im Knochen erfolgte, um ein Bersten der Kortikalis zu verhindern. Das Bein musste während der Operation extrem nach hinten abgewinkelt werden, um durch die maximale Kniebeugung ein übersichtliches Operationsfeld und einen günstigen Eintrittswinkel für den Marknagel zu schaffen. Der Nagel wurde soweit vorgetrieben, dass sich der Kopf des Nagels unter dem Niveau des Tibiaplateaus befand. Dann wurden in die mediale Kortikalisrundung zwei Kirschnerdrähte von 2,5 mm Durchmesser monokortikal eingebracht, die nach kranial ausgerichtet waren und später als Mess-Pins dienen sollten. Vorgebohrt wurde mit 1,8 mm Bohrern unter ständiger Kühlung mit steriler Kochsalzlösung. Nach Einbringen der Messpins, deren parallele Einbringung ein Maß für eine eventuell auftretende Achstorsion bot, wurde die Osteotomie vorbereitet. Um diese durchführen zu können, wurde der Nagel etwas mehr als zur Hälfte aus dem Knochen zurückgezogen. Die Lage des Osteotomiespalts wurde mit der Schablone zur Fixateurmontage bestimmt. Das sicherte einen identischen Abstand der Osteotomie zum medialen Malleolus bei den Tieren aller drei Gruppen. Nach der Hautinzision wurde die Tibia auf Höhe der geplanten Osteotomie sorgfältig freipräpariert, der Knochen zum Schutz mit zwei Großzehenhebern nach Hohmann umfahren und die Osteotomie mit der unter der Fixateur-Operation beschriebenen Säge unter ständiger Kühlung mit steriler Kochsalzlösung durchgeführt. Das Bein musste für die Sägetätigkeit stabil auf dem Operationstisch gelagert werden. Die Vollständigkeit der durchgeführten Osteotomie wurde palpatorisch überprüft. Alsdann wurde der Nagel erneut vorgetrieben. Saß der Nagel an der vorgesehenen Stelle, wurde der Osteotomiespalt mittels eines Abstandhalters auf drei Millimeter distrahiert. Anhand der vorher eingebrachten Mess-Pins wurden eventuelle Achsverdrehungen korrigiert und die originäre Achse der Tibia eingestellt, dann wurde der Marknagel mit je zwei Bolzen zunächst proximal, dann distal verriegelt (Abb. 3.3.-5, oben links). Die

proximale Verriegelung erfolgte über ein Zielgerät. Zunächst wurde eine kleine Hautinzision gesetzt, durch die dann die Vorbohrung mit 2,7 mm Bohrern erfolgte. Mit einem Tiefenmessgerät wurde der Knochendurchmesser bestimmt, der Bolzen entsprechend ausgewählt und eingebracht. Das Zielgerät erwies sich für die beiden proximalen Verriegelungslöcher als sehr hilfreich, die distalen Löcher wurden mit Zielgeräthilfe meist verfehlt, so dass diese Bolzen unter Bildwandlerkontrolle eingebracht wurden. Der Nagel wurde statisch verriegelt, indem proximal und distal die jeweils mediolateral ausgerichteten Verriegelungslöcher mit Verriegelungsbolzen versehen wurden. Die Länge der benötigten Bolzen war abhängig von Individuum und Lokalisation, lag aber immer zwischen 18 und 36 mm. Der im Kopf des Nagels befindliche Anschluss-Stutzen für das Ein- und Ausschlagwerkzeug wurde mit der Verschlusskappe versehen. Der Operationszugang am Knie wurde sukzessive mit resorbierbarem Nahtmaterial verschlossen, die Inzision über der Osteotomie und den Verriegelungsbolzen wurden durch Einzelhefte verschlossen. Es erfolgte ein Verband mit sterilen Mullbinden.

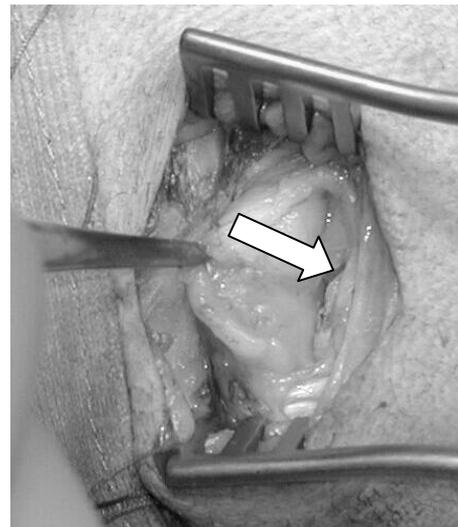
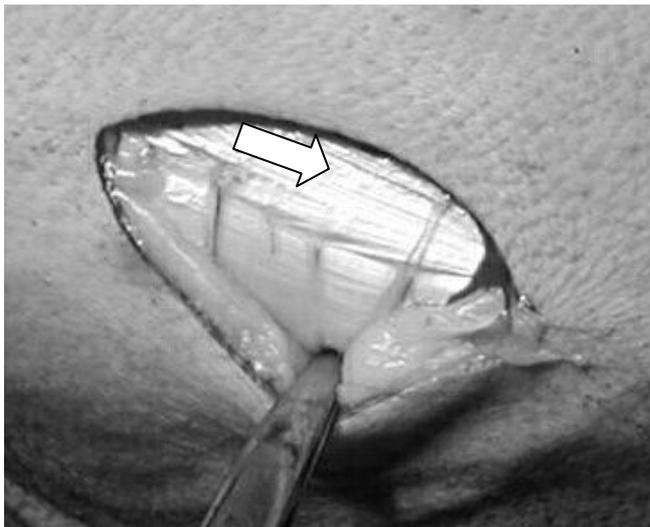
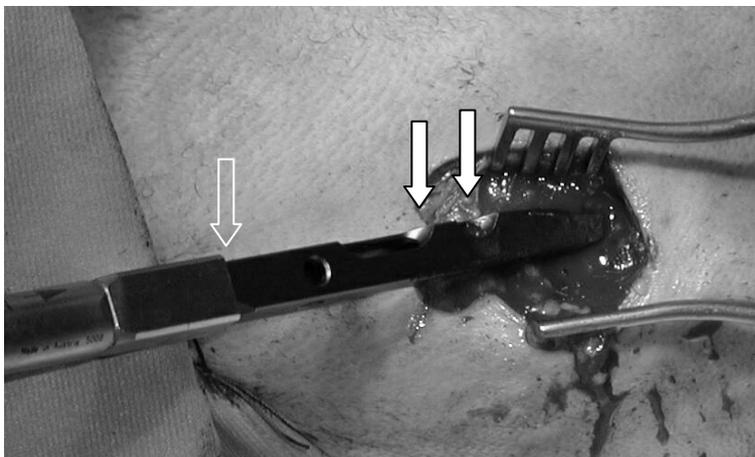


Abb. 3.3.-4 :



Oben links: Darstellung des geraden Kniescheibenbandes, der Pfeil zeigt Ort und Richtung der Inzision für die Nagelinsertion.

Oben rechts: Abheben des präpatellären Fettkörpers mittels Pinzette, der Pfeil zeigt auf den Eintrittspunkt des Nagels (Tibiaplateau)

Unten: Einbringen des Nagels unter Austritt von Blut und Knochenmark aus dem Markkanal, leerer Pfeil: Übergang Einschlaginstrument–UTN, gefüllte Pfeile: proximale Verriegelungslöcher

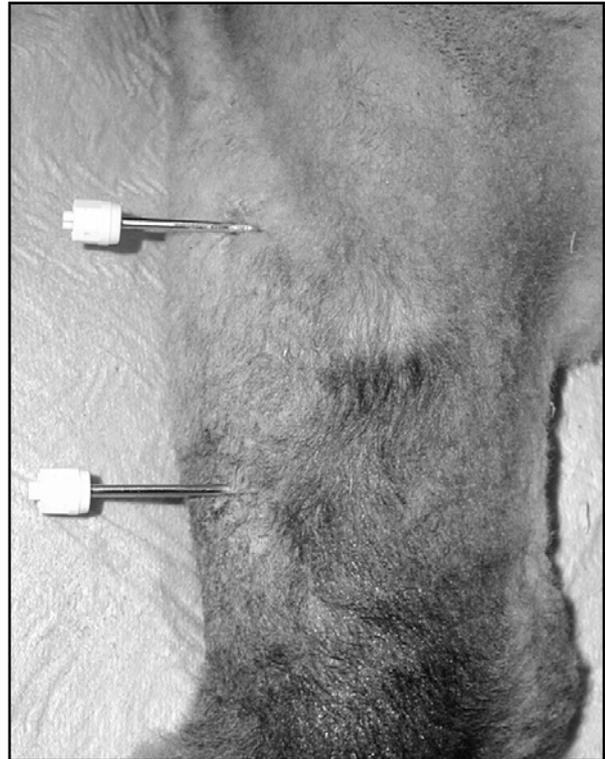
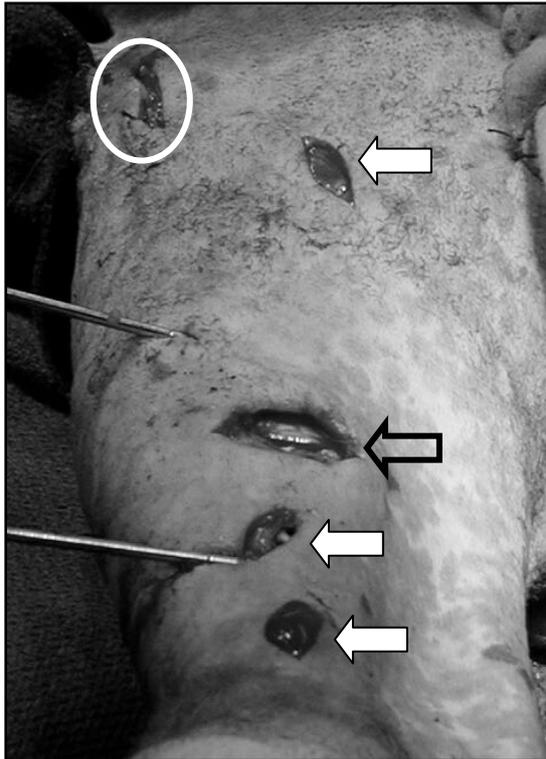


Abb. 3.3.-5:

Zustand nach UTN 9 - Implantation in die unaufgebohrte Markhöhle der Tibia

Oben links: unmittelbar postoperativ, der Kreis bezeichnet die Eintrittsstelle des Nagels am Knie, die Unterhautnaht ist bereits durchgeführt, die gefüllten Pfeile weisen auf die Hautinzisionen zur Einbringung der Verriegelungsbolzen (proximal sind beide Bolzen durch den gleichen Hautschnitt eingebracht), der leere Pfeil zeigt auf den Osteotomiespalt.

Oben rechts: nach neun Wochen. Alle Hautinzisionen sind gut verheilt. Die Plastikkappen auf den Messpins haben Schutzfunktion.

Unten: postoperatives Röntgenbild in medio-lateralem (links) und anteroposteriorem (rechts) Strahlengang. Deutlich erkennbar die intramedulläre Position des Nagels und die Lage der Verriegelungsbolzen (Köpfe medial gelegen) und der als Messpins dienenden Kirschner-Drähte (freie Enden zeigen nach kranial).

3.4. Nachsorge

Sobald die rechte Tibia steril verbunden war, wurden Röntgenaufnahmen im lateralen und im anteroposterioren Strahlengang angefertigt (Abb. 3.4.-3, unten und 3.4.-5, unten). Diese unmittelbare postoperative Röntgenaufnahme diente der Kontrolle. Es wurde einerseits die Weite des Osteotomiespalts begutachtet. Andererseits wurde bei den Fixateurtieren die Positionierung und Eindrehtiefe der Schanzschrauben dokumentiert. Bei den mit einem UTN 9 versorgten Tieren wurde auf einen korrekten Sitz des Nagels in der unaufgebohrten Markhöhle geachtet. Die Tiere wurden, sobald sie selbständig atmeten, in den Stall verbracht, extubiert und solange betreut, bis sie sicher stehen konnten. Das dauerte individuell unterschiedlich lang zwischen 30 Minuten und mehreren Stunden. Sobald die Tiere sicher standen, wurden ihnen 1,1 ml Flunixin-Meglumin (Finadyne[®]RP, Essex Tierarznei, München, Deutschland) pro 50 kg KM subkutan appliziert und Heu und Wasser ad libitum angeboten. Es wurde entschieden, die Tiere in ihrer Herde aufwachen zu lassen, da sie sich dort ruhiger zeigten als in Einzelhaltung. Die langfristige Nachsorge bezog sich sowohl auf den allgemeinen Gesundheitszustand der Tiere als auch im Besonderen auf den Zustand des operierten Beins. Die folgend beschriebenen Maßnahmen waren z. T. palliativer (Schmerzmedikation), z. T. diagnostischer Natur (Radiologie, Blutentnahme und Pinpflege).

Schmerzmedikation: beginnend am Operationstag wurde den Tieren 1,1 ml Flunixin-Meglumin (Finadyne[®]) pro 50 kg Körpermasse subkutan appliziert. Die Medikation wurde eine Woche beibehalten. Ein Tier, welches mit einem kranio-medialen Fixateur versorgt war, zeigte nach der ersten Applikation anaphylaktische Reaktionen, daraufhin wurde bei diesem Tier auf Finadyne[®] verzichtet.

Pinpflege: beginnend am Tag nach der Operation wurde täglich während der gesamten Standzeit die Pinpflege durchgeführt. Die Schanzschrauben wurden auf Lockerungserscheinungen untersucht, die Pineintrittsstellen auf Entzündungserscheinungen. Die Eintrittsstellen und anfänglich auch die Hautinzision über dem Osteotomiebereich wurden mit Hilfe einer Knopfkanüle und einer 20er Spritze mit Rivanol[®] (Chinosolfabrik, Seelze, Deutschland) gespült. Die Knopfkanülen wurden täglich sterilisiert, für jedes Tier wurde eine neue Knopfkanüle verwendet, um eventuelle Entzündungen nicht von Tier zu Tier zu tragen. Exsudatkrusten wurden entfernt. Nach Abtrocknung der Tibia mit sterilen Tupfern wurde ein doppelt gelegter Schlauchverband über das Bein gestülpt und ober- und unterhalb der jeweiligen Schanzschrauben bzw. des Kirschnerdrahtes mit Klebeband befestigt. Pinlockerungen und

Entzündungen der Eintrittsstelle wurden im Pinpflegeprotokoll vermerkt. Der Kontinuität wegen wurde die Pinpflege immer von derselben Person durchgeführt. Angelehnt an den Pin-Haut-Reaktions-Score nach Mahan und Mitarbeitern (1991) wurden die Pineintrittsstellen folgendermaßen beurteilt:

- 0 keine Entzündungserscheinungen, Eintrittsstelle trocken und sauber
- 1 leichte Entzündungserscheinungen: Eintrittsstelle vermehrt warm oder schmerzhaft, wenig seröses Exsudat
- 2 mäßige Entzündungserscheinungen: Eintrittsstelle vermehrt warm und schmerzhaft, mäßig bis viel seröses oder wenig eitriges Exsudat
- 3 starke Entzündungserscheinungen: Eintrittsstelle vermehrt warm und schmerzhaft, gerötet, mäßig bis viel eitriges Exsudat

Pinlockerungen wurden nicht im Score berücksichtigt, sondern unter Besonderheiten vermerkt. Bei keinem der Tiere kam es zu einer Pinlockerung infolge Entzündung. Vereinzelt kam es zu Pinlockerungen durch Traumata. Betroffen waren ausschließlich die frei nach vorn ausgerichteten Mess-Schanzschrauben, die bei Stürzen während Fluchtreaktionen sehr exponiert waren. Nach der Tötung der Tiere wurde eine mikrobiologische Untersuchung der Abstriche der Schanzschraubengewinde vorgenommen. Ab dem Auftreten von 1×10^3 koloniebildenden Einheiten eines Erregers wurde eine Besiedelung des Schraubengewindes in vivo angenommen.

Röntgenkontrollen wurden unmittelbar nach der Operation am noch narkotisierten Tier in zwei Ebenen durchgeführt, dann folgend im wöchentlichen Abstand am unsedierten, stehenden Tier in der posteroanteriorer Richtung. Die letzten Röntgenaufnahmen wurde nach der Tötung der Tiere sowohl mit als auch ohne Implantate in jeweils zwei Ebenen angefertigt. Alle Röntgenaufnahmen dienten der Kontrolle des Heilungsverlaufes.

Blutentnahmen erfolgten unmittelbar vor der Operation und dann im wöchentlichen Abstand. Sie dienten der Aufdeckung und Kontrolle von systemischen Entzündungsvorgängen über den Heilungsverlauf.

3.5. Gewinnung der Präparate

Mit Ende der Standzeit von neun Wochen wurden die Tiere mit je 2,5g Thiopental intravenös narkotisiert und erhielten sofort darauffolgend zur Euthanasie 100 ml 7,5 prozentige Kaliumchloridlösung. Der dadurch ausgelöste Herzstillstand wurde durch Auskultation festgestellt.

Es wurden die abschließenden Röntgenaufnahmen mit intaktem Implantat in zwei Ebenen angefertigt (Abb. 4.2.-1).

Die Entnahme der Tibiae erfolgte nach Enthäuten der Hinterbeine. Die folgende Präparation erfolgte, abgesehen von der Implantatentfernung, für rechte und linke Tibia absolut identisch. Das Kniegelenk wurde eröffnet und durchtrennt, ebenso das Tarsokruralgelenk. Die mächtigen Muskelbäuche des M. gastrocnemius wurden von der Tibia entfernt, an der als kompakter Weichteilmantel die Zehenbeuger und -strecker verblieben. Beide Gelenkflächen wurden von Band- und Geweberesten sauber freipräpariert, ebenso die anschließende Schaftregion auf einer Höhe von zwei bis vier Zentimetern. Die Entfernung der Präparate erfolgte nach der Entnahme der Tibiae aus ihrem Gewebeverbund, um eventuelle, mit der Entnahme verbundene Kräfte über das Fixationssystem zu leiten und nicht über die zu untersuchende Kallusregion. Dieses war wichtig, um die histologischen und biomechanischen Ergebnisse nicht zu verfälschen.

Das Fixateurkonstrukt (Karbonstäbe und Verbindungsbacken) wurde mit Maulschlüsseln entfernt, die Schanzschrauben wurden mit Hilfe des Handbohrfutters ausgedreht. Die Verriegelungsbolzen des Marknagels wurden sorgfältig freipräpariert und ausgedreht, der UTN 9 anschließend in einem kontrollierten, standardisierten Auszugversuch mittels der Materialprüfmaschine entfernt. Nach Implantatentfernung wurden die Tibiae mit in Natriumchloridlösung getränkten Mullbinden umwickelt und so vor dem Austrocknen geschützt.

3.6. Biomechanik

Alle rechten Tibiae wurden nach der Ausheilungszeit von neun Wochen einem biomechanischen Torsionstest unterzogen. Dieser Test erfolgte als Versagenstest mit definierter, konstanter Geschwindigkeit. Eine axiale Vorkraft von 25 N wurde aufgebracht, um im Falle einer Fraktur eine Dislokation von Fragmenten zu vermeiden und die Kontinuität der Achse

zu gewährleisten. Die Auswertung zeigte einerseits über die Steigung der Kurve, in dem das Drehmoment über den Torsionswinkel aufgetragen ist, die Steifigkeit des Knochens. Andererseits wurde das maximale Torsionsmoment (oder Versagemoment), welches den Knochen zerstörte, ermittelt. Diese Testung wurde auch für die kontralaterale Gegenseite durchgeführt, so dass es möglich ist, die Ergebnisse der heilenden Knochen auf diejenigen der intakten Knochen zu beziehen.

Alle explantierten Tibiae wurden wie bereits in Kapitel 3.1.3. beschrieben für die biomechanischen Tests vorbereitet. Die Präparate wurden mit den Beracrylblöcken in die Materialprüfmaschine eingespannt (Abb. 3.6.-1). Alsdann erfolgte der oben beschriebene Torsionstest, dem sowohl die gesunde linke, als auch die osteotomierte rechte Tibia unterzogen wurde.

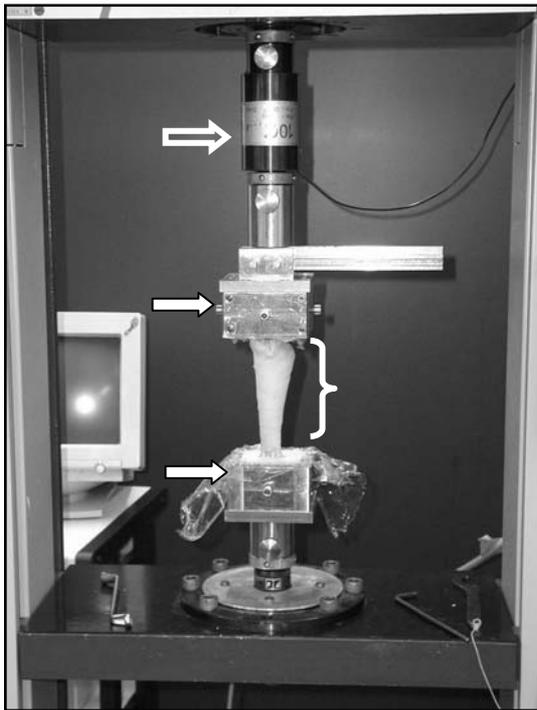


Abb. 3.6.-1:

Das Präparat, der in Mullbinde eingewickelter Unterschenkel (geschweifte Klammer), ist mit dem proximalen und distalen Anteil mittels Beracrylblöcken fest mit der Einspannvorrichtung der Materialprüfmaschine (gefüllte Pfeile) verbunden ist.

Der leere Pfeil zeigt auf die Torsionsmessdose.