

4. Ergebnisse

In die Auswertung gingen pro Gruppe jeweils sechs Tiere ein. Ein mit einem medialen Fixateur externe versorgtes Tier erlitt fünf Tage nach der Operation einen Spiralbruch des oberen Tibiafragments, der durch die Messschanzschraube, Schraube 3 und die Osteotomiezone verlief. Das Tier besserte sich klinisch innerhalb weniger Tage und wurde bis zum Versuchsende im Versuch belassen, um die Daten für Ganganalyse und die histologische Auswertung der unbetroffenen Schrauben zu gewährleisten. Die Osteotomiezone ist allerdings mit derjenigen der anderen Tiere nicht zu vergleichen, da sie von dem Spiralbruch betroffen war. Daher wurde dieses Tier von der Auswertung ausgeschlossen. Ein weiteres, mit einem Marknagel versorgtes Tier musste aufgrund einer schweren Osteomyelitis, die den gesamten tibialen Markraum erfasste, von der histologischen Auswertung ausgeschlossen werden. Die beiden Tiere, die nicht in die histologische Auswertung eingingen, wurden auch aus der biomechanischen und radiologischen Auswertung ausgeschlossen, so dass sich für alle Auswertparameter eine einheitliche Gruppengröße von sechs Tieren ergab.

4.1. Biomechanik

Die biomechanischen Ergebnisse werden in die an Kadaverbeinen (*in vitro*) gewonnenen Daten zur Steifigkeit der Osteosynthesen und die Resultate der postmortalen Torsionstestung (*in vivo*) der explantierten Tibiae untergliedert.

4.1.1. Ergebnisse der *in vitro* Steifigkeitstestung der Implantate

Die Ergebnisse der initialen Steifigkeit der drei verwendeten Implantate zeigte eine deutlich höhere Steifigkeit der beiden Fixateure gegenüber dem verwendeten Marknagel. Dieser war sowohl in der axialen Kompression als auch in der Torsion nur etwa halb so steif wie die verwendeten Fixateure.

Implantat	Axiale Kompression [N/mm]	Torsion [Nm/°]
M Fixateur	2910,1 ±1490,6	3,3 ±0,78
KM Fixateur	2168,8 ±633,5	3,3 ±0,34
UTN	1631 ±1228,18	1,3 ±0,85

Tab. 4.1.-1: Steifigkeitswerte der 3 Implantate für axiale Kompression und Torsion (n = 6/Gruppe).

Ein Vergleich der beiden identisch konfigurierten Fixateure bei unterschiedlicher Montageebene ergab eine höhere Steifigkeit des medial montierten Fixateurs. In der axialen Kompressionssteifigkeit lagen die Werte des kranio-medialen Fixateurs unter denen des medialen. Die Werte für die Torsionssteifigkeit waren identisch. Prozentual ausgedrückt, ergab sich ein Verhältnis des kranio-medialen Fixateurs zum medial montierten von 75 Prozent für die axiale Kompressionssteifigkeit und 100 Prozent für die Torsionssteifigkeit.

Wurden der medial montierte Fixateur externe mit dem intramedullären, statisch verriegelten Nagel verglichen, so imponierte der Fixateur durch deutlich höhere Werte für die axiale Kompressions- und Torsionssteifigkeit. Die unaufgebohrte Marknagelung zeigte nur 56 Prozent der axialen Kompressionssteifigkeit des Fixateurs und nur 39 Prozent von dessen Torsionssteifigkeit.

Aus diesen prozentualen Angaben ergab sich bezüglich der *in vitro*-Steifigkeiten die deutliche höhere Stabilität des Knochen-Implantat-Verbundes der beiden externen Fixateure gegenüber der UTN.

4.1.2. Ergebnisse der postmortalen Torsionstests

Die Ergebnisse der Torsionstests werden im Folgenden für die intakte linke Tibia, die osteotomierte, in Heilung begriffene rechte Tibia und als prozentualer Anteil der Ergebnisse der rechten Tibia an den Resultaten der linken Tibia aufgeführt.

Linke Tibia (intakt)

Die Ergebnisse der Torsionstests der gesunden linken Tibia zeigten keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen:

Implantat	maximales Torsionsmoment [Nm]			Torsionssteifigkeit [Nm/°]		
	M-Fixateur	KM-Fixateur	UTN	M-Fixateur	KM-Fixateur	UTN
Mittelwert	79,6	71,4	76,3	4,6	4,7	4,2
s	7,1	6,3	14,4	1,0	0,8	0,7
Median	78,8	71,3	79,4	4,6	4,8	4,1

Tab. 4.1.-2: Ergebnisse der postmortalen biomechanischen Testung der gesunden, kontralateralen Gegenseite aller drei Gruppen (n = 6/Gruppe).

Das maximale Torsionsmoment der kontralateralen, gesunden Gegenseite waren zwar deutlich, allerdings nicht signifikant, unterschiedlich zwischen den beiden Fixateurgruppen ($p^* = 0,054$). Zwischen den Steifigkeiten der Marknagel-Gruppe und beiden Fixateur-Gruppen ergaben sich keine statistisch signifikanten Unterschiede. Auch die Torsionssteifigkeit der gesunden Tibia der Tiere aller drei Gruppen zeigte keine statistisch signifikanten Unterschiede.

Rechte Tibia (osteotomiert)/prozentualer Anteil

Ein Vergleich der biomechanischen Ergebnisse der osteotomierten rechte Tibiae der verschiedenen Gruppen nach der Ausheilungszeit von neun Wochen zeigte eine höhere Stabilität bei den mit einem Fixateur externe versorgten Tieren.

Implantat	maximales Torsionsmoment [Nm]			Torsionssteifigkeit [Nm/°]		
	M-Fixateur	KM-Fixateur	UTN	M-Fixateur	KM-Fixateur	UTN
Mittelwert	49,7	55,6	40,6	3,6	3,8	3,2
s	13,0	6,3	13,7	0,8	0,8	1,0
Median	48,5	57,7	38,8	3,6	3,5	3,2

Tab. 4.1.-3 : Ergebnisse der postmortalen biomechanischen Testung der osteotomierten Tibia nach Ausheilung (n = 6/Gruppe)

Die Erhöhung der Stabilität war aber nur bezüglich des maximalen Torsionsmoments in der Gruppe des kranio-medialen Fixateurs im Vergleich zur Nagel-Gruppe deutlich ($p = 0,037$). Die Torsionssteifigkeit zeigte keinerlei statistisch signifikante Unterschiede zwischen den drei Gruppen.

Wurden nun die für die rechte Tibia ermittelten Werte als prozentualer Anteil der gesunden kontralateralen Gegenseite ausgedrückt, bestätigte das die höhere Torsionssteifigkeit in der Gruppe des kraniomedialen Fixateurs.

Implantat	maximales Torsionsmoment [%] des Intakten			Torsionssteifigkeit [%] des Intakten		
	M-Fixateur	KM-Fixateur	UTN	M-Fixateur	KM-Fixateur	UTN
Mittelwert	63,1	78,5	53,8	79,3	91,4	74,2
s	13,0	11,0	15,1	12,7	7,1	25,9
Median	64,4	83,0	55,4	75,8	92,7	75,8

Tab. 4.1.-4: Maximales Torsionsmoment und Torsionssteifigkeit der osteotomierten Tibia als prozentualer Anteil an der gesunden Gegenseite (n = 6/Gruppe).

Ein Vergleich der Gruppen bezüglich des prozentualen Anteils der Torsionssteifigkeit und des Torsionsmoments erbrachte ein deutlich höheres maximales Torsionsmoment der KM-Fixateurgruppe gegenüber den beiden anderen Gruppen. Hinsichtlich der Torsionssteifigkeit ergaben sich keine Unterschiede, wenngleich auch hier die KM-Fixateurgruppe die tendenziell höheren Werte zeigte. Derselbe Vergleich zwischen der M-Fixateurgruppe und der Nagelgruppe ergab keinerlei signifikante Unterschiede. Wurde die KM-Fixateurgruppe mit der Nagelgruppe verglichen, so imponierte die erstere durch deutlich höhere prozentuale Werte für beide Parameter. Beurteilt man die biomechanische Testung der Tibiae nach White und Mitarbeitern (1977), so zeigten alle Tiere der M-Gruppe ein Versagen des Knochens außerhalb des Osteotomiespalts bei großem Torsions-Moment (Abb. 4.1.-1, rechts), was dem Stadium IV entspricht. Fünf von sechs Tieren der KM-Gruppe waren ebenfalls diesem Stadium zuzuordnen. Ein Tier dieser Gruppe ist dem Stadium II zuzuordnen, die Tibia versagte bei der Testung bei einem großen Drehmoment im Osteotomiespalt (Abb. 4.1.-1, links). Die mit der UTN versorgten Tibiae konnten zur Beurteilung der Frakturheilung nicht nach den Stadien von White und Mitarbeitern (1977) eingeteilt werden, da die Bruchlokalisierung in den histologischen Schnitten nicht sichtbar war.

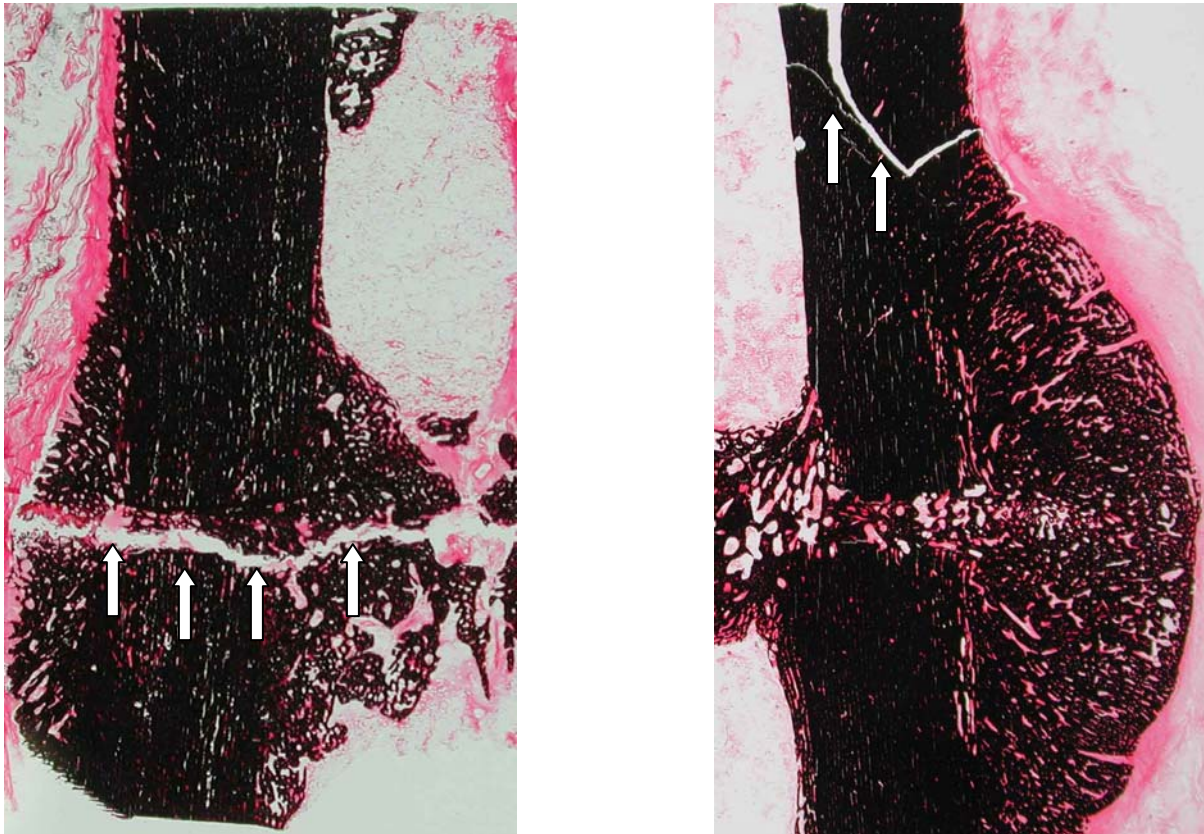


Abb. 4.1.-1:

Histologische Schnitte von biomechanisch getesteten Tibia: die Folgen der biomechanischen Torsionstestung sind deutlich als Frakturen (Pfeile) zu erkennen: links eine Tibia, bei der es zu einer Refraktur im Osteotomiespalt kam, rechts eine Tibia, bei der der Torsionstest zum Versagen in der Kortikalis führte.

4.2. Röntgen-Daten

Die Beurteilung des Heilungsverlaufes mittels Röntgenkontrolle ergab bei den mit einem externen Fixateur versorgten Tieren einen kugelförmigen, einheitlichen Kallus, dessen periostale Ausdehnung nach proximal und distal sich im Wesentlichen auf das Gebiet zwischen den beiden osteotomienahen Schanzschrauben beschränkte. Auch endostal waren Kalluswolken als Verschattungen sichtbar, die in der Ausdehnung entlang der Längsachse der Tibia deutlich geringer waren als das periostale Pendant. Der Frakturspalt war nach neun Wochen bei allen Tieren noch deutlich sichtbar (Abb. 4.2.-1, oben). Der Kallus der mit einer un-aufgebohrten Marknagelung therapierten Tibiae stellte sich diffus, uneinheitlich, mit wolkenigen Verschattungen und Aufhellungen im Kallusgewebe dar. Der Frakturspalt war bei vier von sechs Tieren deutlich erweitert. Die Kortikalis war diffus verdickt, zeigte jedoch strukturelle Auflockerungen. Drei von sechs Tibiae zeigten radiologisch deutlich sichtbare Sequestrierung von Teilen der inneren Kortikalis (Abb. 4.2.-1, unten rechts).

Für die Beurteilung des Heilungsfortschrittes zum Neunwochenzeitpunkt wurden die Röntgenaufnahmen in zwei Ebenen herangezogen, die nach der Tötung der Tiere angefertigt wurden. Es wurde die Anzahl der überbrückten Kortikales ausgewertet (Tab. 4.2-1). Bei den mit einem Fixateur versorgten Tieren waren, unabhängig von der Montageebene, stets alle vier Kortikales knöchern überbrückt. Bei den mit der UTN versorgten Tieren zeigte eine von sechs Tibiae keinerlei knöchernen Überbrückung, drei Tibiae waren über zwei Kortikales überbrückt, eine Tibia wies drei überbrückte Kortikales auf, und eine Tibia war, vergleichbar den mit einem externen Fixateur versorgten Tieren, auf allen vier Kortikales überbrückt. Wiesen die Tibiae zwei oder mehr unüberbrückte Kortikales auf, waren die kraniale und kaudale Kortikalis stets unüberbrückt.

überbrückte Kortikales	M-Fixateur, n = 6		KM-Fixateur, n = 6		UTN, n = 6	
	Anzahl	Prozent	Anzahl	Prozent	Anzahl	Prozent
0	0	0	0	0	1	17
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	3	50
3	0	0	0	0	1	17
4	6	100	6	100	1	17

Tab. 4.2-1: Darstellung der anhand der radiologischen Kontrollaufnahmen als überbrückt eingestuftten Kortikales in den drei Gruppen, jeweils zum Zeitpunkt neun Wochen post operationem

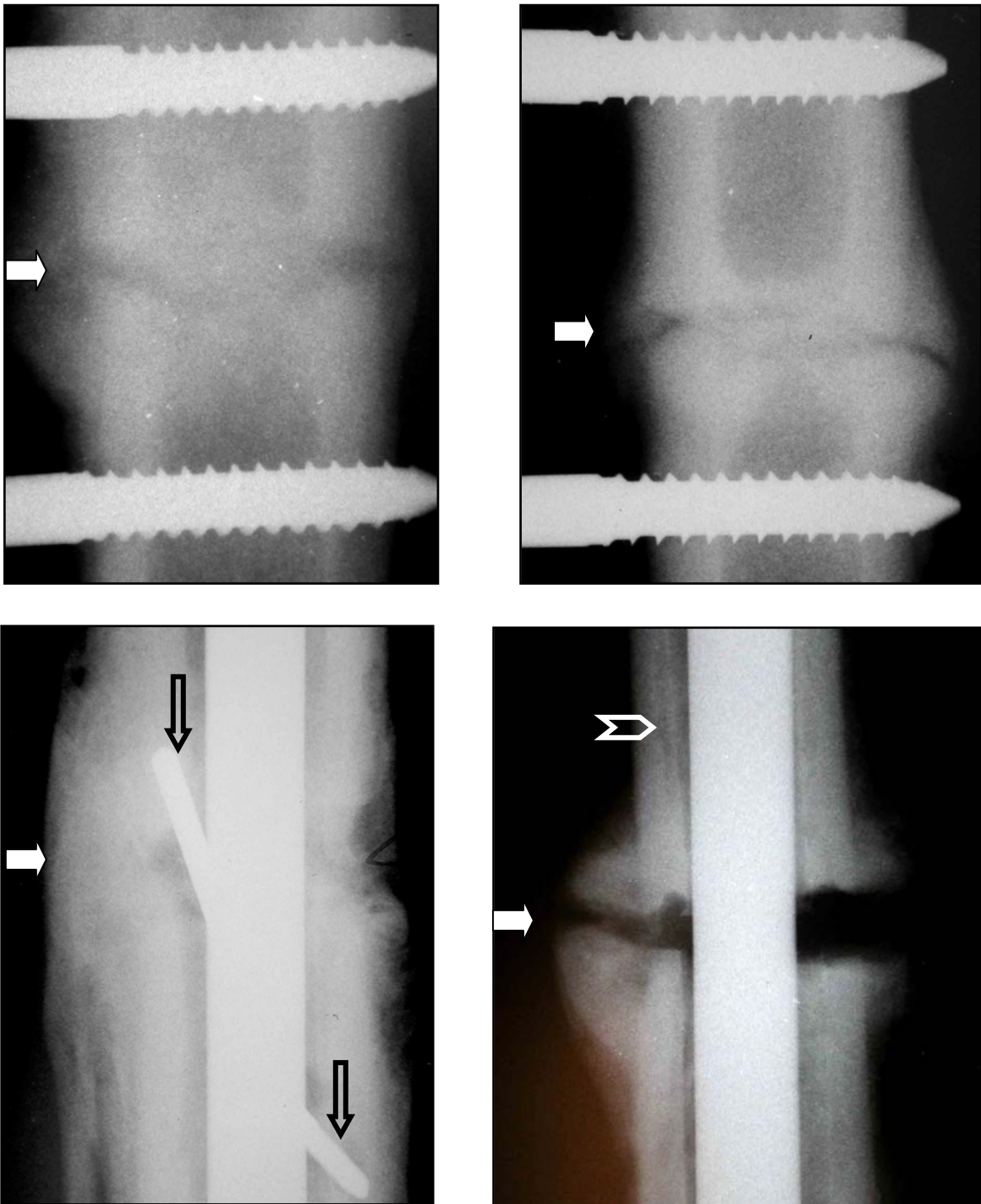


Abb. 4.2.-1: Kallus und Osteotomiespalt (auf Höhe der gefüllten Pfeile) zum Neunwochenzeitpunkt

Oben links: **KM-Fixateur**

Oben rechts: **M-Fixateur**

Unten links: **UTN**, anteroposteriorer Strahlengang, die leeren Pfeile weisen auf den verbogenen distalen Messpin

Unten rechts: **UTN**, mediolateraler Strahlengang. Deutlich zu erkennen ist die ausgebliebene Heilung kranial (links) und kaudal (rechts) und der stark erweiterte Osteotomiespalt. Der unausgefüllte Pfeil weist auf eine deutliche Sequestrierung der inneren Kortikalisanteile.

4.3. Mikrobiologische Untersuchung der Schraubengewinde

Bei der Tötung der Tiere wurden keine klinisch manifesten Infekte der Schanzschraubenkanäle beobachtet. Dennoch wurde eine mikrobiologische Kontrolle vorgenommen: die Gewinde der mit dem Handbohrfutter ausgedrehten Schanzschrauben wurden auf Blutagarplatten ausgerollt. Im Mikrobiologielabor wurde eine Keimzahlbestimmung von allen entfernten Schanzschrauben vorgenommen, die bei 18 Prozent der Schrauben einen Infekt ergab. Insgesamt zeigten 13 Schrauben eine Keimbesiedelung, zwölf der Schrauben waren mit *Staphylokokkus aureus* infiziert, der Abklatsch einer Schraube ergab eine Besiedelung mit *Campylobacter species*.

4.4. Histologie

4.4.1. deskriptiv

Die histologischen Präparate der Osteotomiezone wurden makroskopisch in drei getrennte Gebiete untergliedert: das Kallusgewebe, das Kortikalisgewebe und das Gewebe des Markraums. Die Verteilung und Lokalisation der Zonen war innerhalb der beiden Fixateurgruppen sehr ähnlich und werden deshalb gemeinsam beschrieben. Die Präparate aus der unaufgebohrten Marknagelung zeigten einige deutliche Unterschiede.

Die histologischen Präparate aus mit externen **Fixateuren** stabilisierten Tibiae zeigten eine dichte, kompakte Kortikalis mit glatten Seitenrändern auf der periostalen und endostalen Oberfläche (Abb. 4.4.-1, oben links). Da es sich um einen Schnitt in der Längsachse der Tibia handelte, stellte sich die Kortikalis als zwei durch den Markraum getrennte Rechtecke dar. Die proximodistale Kontinuität des kranialen und kaudalen Kortikalisgewebes war in der Mitte des histologischen Präparates durch den Osteotomiespalt unterbrochen. Die Kortikalis bestand aus gleichmäßig mineralisiertem Gewebe, regelmäßig durchzogen von Haversschen Kanälen, die, längs angeschnitten, die Kortikalis in Längsrichtung durchzogen (Abb. 4.4.-1, oben Mitte). Selten waren Volkmannsche Kanäle, die Quervernetzung zwischen den Haversschen Kanälen, angeschnitten. In den Kanälen war vereinzelt eine endotheliale Auskleidung erkennbar, desgleichen rote Blutkörperchen. Die durch die Osteotomie erzeugte scharfe, rechtwinklige Kante, die auf den postoperativen Röntgenaufnahmen deutlich zu erkennen ist, stellte sich in den histologischen Präparaten nach einer Ausheilungszeit von neun Wochen deutlich weniger scharfkantig dar: die Kortikalis, die an den Osteotomiespalt grenzte, zeigte

eine leicht abgerundete Grenzfläche (Abb. 4.4.-1, unten links). In Kallusnähe zeigten sich in der Kortikalis Diskontinuitäten in Form von größeren Höhlen oder Kavernen, welche die regelmäßige Anschnittsfläche der Kortikalis unterbrachen. Der Kallus der mit einem Fixateur versorgten Osteotomie entwickelt sich in drei unterschiedlichen Regionen: direkt zwischen den osteotomierten Kortikalisanteilen, im endostalen und im periostalen Bereich. Der endostale Anteil des Kallus durchbaute in allen Präparaten den Markraum auf Osteotomiehöhe. Er begann ca. zehn bis 15 mm proximal und distal des eigentlichen Osteotomiespalts und überbrückte unter stetiger Umfangzunahme den Spalt. Der periostale Anteil des Kallus umschließt den Osteotomiespalt wie eine ringförmige Manschette. Der periostale Kallus begann jeweils etwas weiter distal bzw. proximal als sein endostales Pendant. Der interkortikale Kallus füllte die durch die Osteotomie entstandene Lücke in der Kortikalis aus (Abb. 4.4.-1, unten links). Alle drei Bereiche des Kallus gingen nahtlos und ohne gewebliche Grenzen in einander über, die Beschreibung ist rein auf die Lokalisation des Kallus gemünzt. Alle Tibiae der beiden Fixateurgruppen zeigten in allen drei beschriebenen Lokalisationen eine nahtlose knöchernen Überbrückung. Das mineralisierte Knochengewebe des Kallus erschien dichter als das der Kortikalis, war jedoch durch zahlreiche Lakunen bzw. Kavernen aufgelockert. Im Gegensatz zur Kortikalis, welche eindeutig aus kompaktem Lamellenknochen bestand, fand man im knöchernen Kallusgewebe verschiedene Knochenstrukturen: periostal in der Nähe der Kortikalis waren quer getroffene Osteone zu finden, die aus Haversschen Kanälen mit den typischen, sie umgebenden konzentrischen Knochenlamellen und den eingemauerten Osteozyten bestanden (Abb. 4.4.-2, links). Im Bereich dieser Osteone war der Knochen sehr dicht. Mit zunehmender Entfernung von der Kortikalis lockerte die kompakte Knochenmasse auf, sie bestand dort hauptsächlich aus Geflechtknochen, der ein ungeordnetes, aufgelockertes Netzwerk bildete. Vereinzelt waren Osteone in das Geflechtknochengewebe eingebettet. Direkt zwischen den Kortikales (interkortikal) ergab sich ein nämliches Bild. Knorpelgewebe wurde nur als wenige Knorpelzellen umfassende Inseln beobachtet, der Knorpel zeigte sich dabei in den verschiedenen Phasen der Mineralisation. Diese war in der Safranin-Orange / Lichtgrün Färbung als zunehmende „Vergrünung“ des eigentlich rot angefärbten (unmineralisierten) Knorpels (Abb. 4.4-6) zu erkennen.

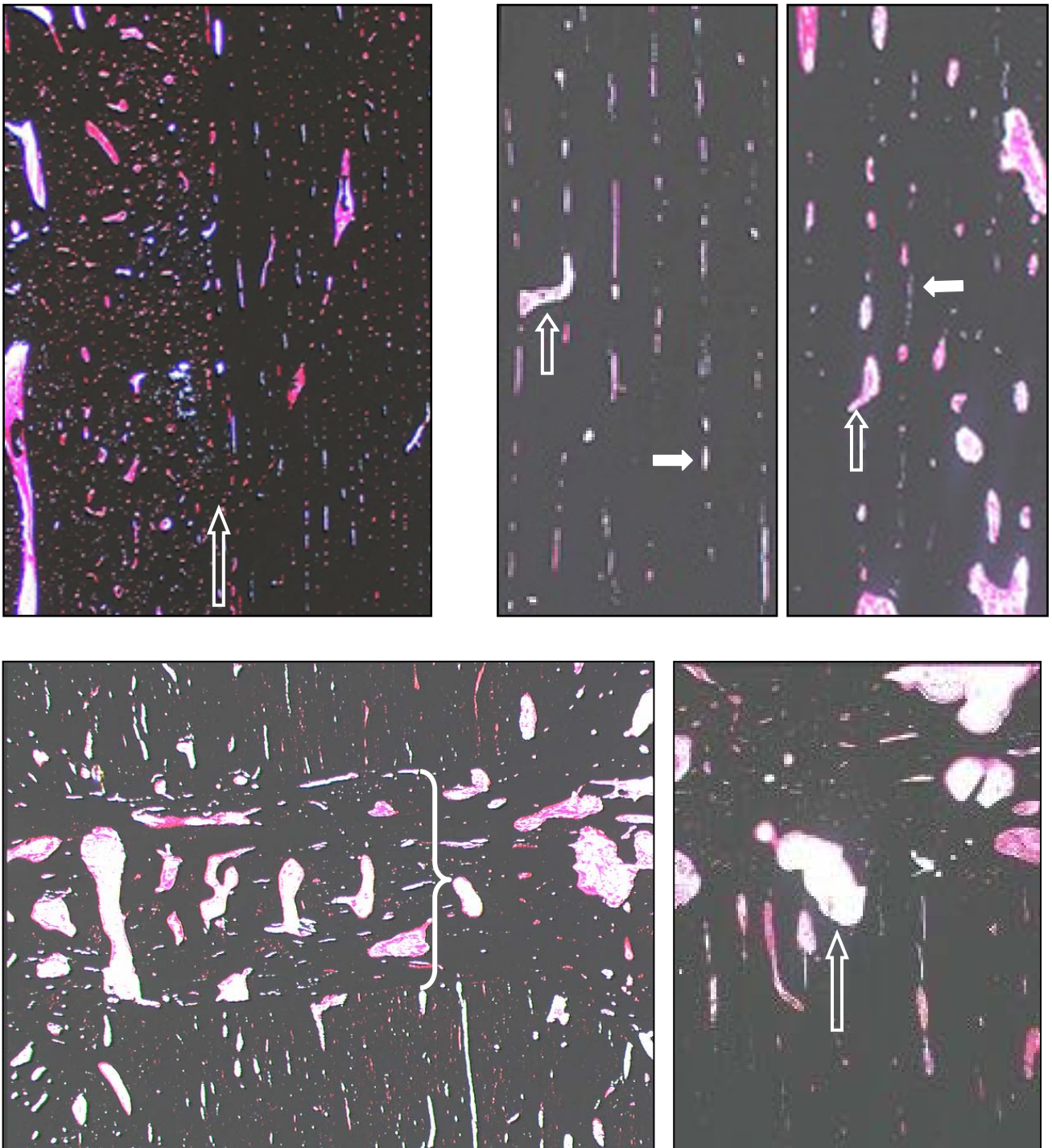


Abb. 4.4.-1: Histologische Bilder von Präparaten aus mit externem Fixateur stabilisierten Tibiae

Oben links: Grenze (Pfeil) zwischen Kortikalis (rechts im Bild) und periostalem Kallus (links), beide deutlich an Dichte und Struktur des Knochens zu unterscheiden. (Vergr.: 27,5x)

Oben Mitte: Gleichmäßige Struktur der Kortikalis mit angeschnittenen Haversschen (gefüllter Pfeil) und Volkmannschen (leerer Pfeil) Kanälen (Vergr.: 55x), als Vergleich: oben rechts: Kortikalis eines UTN- Tieres (Vergr.: 55x).

Unten links: Übergang Kortikalis- Kallus- Kortikalis. Die geschweifte Klammer umfasst den durchgebaute Osteotomiespalt (Vergr.: 13,75x).

Unten rechts: Übergang Kortikalis (unten im Bild) zu Kallus (oben): deutlich erkennbar ein Osteon (Pfeil), welches sich aus dem Kallus in die Kortikalis „vorarbeitet“ (Vergr.: 55x).

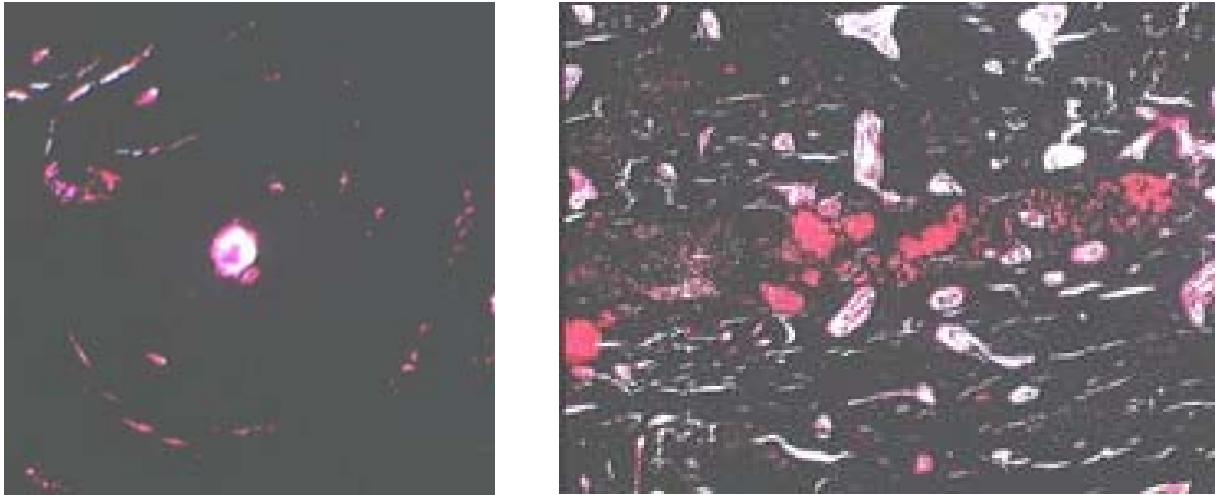


Abb. 4.4.-2: Histologische Bilder von Präparaten von mit externem Fixateur versorgten Tibiae
 Links: Ein Osteon aus der periostalen Kallusregion mit großem zentralen Haversschen Kanal und die ihn konzentrisch umgebenden Osteozyten in ihren Knochenlamellen (Vergr.: 220x), .
 Rechts: Periostaler Kallus auf Höhe des ehemaligen Osteotomiespalts, dargestellt eine Mineralisationsfront: kleine Inseln von Bindegewebe und Knorpel sind von granuliertem schwarzen Gewebe (mineralisierender Knochen) umgeben (Vergr.: 27,5x), .

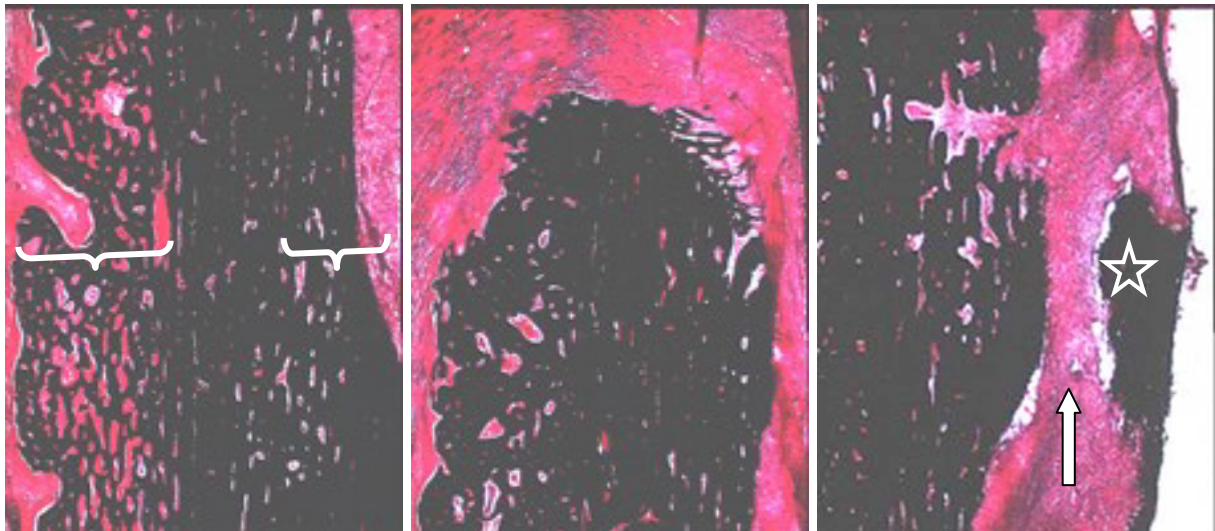


Abb. 4.4.-3: Histologische Bilder von Präparaten von mit UTN therapierten Tibiae (Vergr.: 13,75x)

Links: Kortikalis, der periostale Anteil (geschweifte Klammer links) ist stark aufgelockert und verdickt, der endostale Anteil (geschweifte Klammer rechts) ist stark mit rot gefärbtem Bindegewebe durchsetzt. Der zentrale Teil der Kortikalis ist wenig verändert.

Mitte: Osteotomiekante mit darüber liegendem, den Spalt ausfüllendem Bindegewebe (rot). Deutliche Abrundung und sichtbare Resorptionsvorgänge an der ehemals rechteckigen Kante.

Rechts: endostale Sequestrierung von Kortikalisbestandteilen (Sternchen), der Sequesterspalt (Pfeil) ist mit Bindegewebe ausgefüllt. Die weiße Fläche am rechten Bildrand repräsentiert den Markraum.

Die Kortikalis der durch eine unaufgebohrte **Marknagelung** versorgten Tibiae erschien uneinheitlicher: der zentrale Teil zeigte weitgehend unverändertes, dichtes kortikales Knochengewebe. Das endostal und periostal daran anschließende Gewebe war aufgelockert und deutlichen Umbauvorgängen unterworfen (Abb. 4.4.-3, links). Dieses Gewebe setzte sich dort aus aufgelockertem Knochengewebe und großen, unregelmäßig eingestreuten Bindegewebsinseln zusammen. Die weitgehend unveränderte zentral gelegene Kortikalis zeigte regelmäßig längs angeschnittene Haverssche Kanäle und wenige Volkmannsche Kanäle als Quervernetzung. In den Kanälen war vereinzelt eine endotheliale Auskleidung erkennbar, desgleichen rote Blutkörperchen. Im kortikalen Knochen waren wenige Lakunen unregelmäßig eingestreut, deren Ränder von Osteoklasten gesäumt waren und die mit mehr oder weniger lockerem Bindegewebe und vereinzelt Gefäßen angefüllt waren (Abb. 4.4.-1, oben rechts). Die Anzahl und die Lumenweite der Lakunen nahmen mit der Entfernung vom Zentrum der Kortikalis in periostaler und endostaler Richtung zu.

Die Osteotomieanten waren durch Resorptionszonen verändert, die Kantenform deutlich ellipsoid umgestaltet (Abb. 4.4.-3, Mitte). Die Kanten waren an vielen Stellen sägeblattartig gezackt, in den Zackentälern lagen Osteoklasten (Abb. 4.4.-5). In den periostalen und endostalen Randbereichen zeigte die Kortikalis große Zonen, in denen das regelmäßig strukturierte lamelläre Knochengewebe durch Bindegewebe oder aber durch Geflechtknochen ersetzt war (Abb. 4.4.-3, links). Der Osteotomiespalt war bei fünf von sechs Tieren bereits makroskopisch sichtbar deutlich erweitert. Die am histologischen Präparat gemessene Höhe des Osteotomiespalts, die intraoperativ bei drei Millimetern fixiert wurde, betrug medial 5 mm (0/8 mm) [Median (Min/Max)] und lateral 7 mm (0/9 mm). Ein Tier, welches in der radiologischen Auswertung die knöcherne Überbrückung auf allen vier Kortikales zeigte, wies keine Erweiterung des Osteotomiespalts auf. Im histologischen Präparat zeigte dieses Tier als einziges eine vollständige knöcherne Überbrückung des Osteotomiespalts in voller Kortikalisbreite. Bei der Beurteilung des Aussehens und der Gewebequalitäten des periostalen, endostalen und interkortikalen Kallus anhand der histologischen Schnitte fiel auf, dass nur 50 Prozent (drei) der UTN-Tibiae medial eine knöcherne Überbrückung des Osteotomiespalts aufwiesen. Die laterale Seite war bei fünf von sechs Tibiae knöchern überbrückt. Die Überbrückung erfolgte, abgesehen von der o. g. Ausnahme, auf der lateralen Seite periostal und dezent interkortikal (Abb. 4.4.-4, rechts), auf der medialen Seite überwiegend periostal. Das Schienbein, welches lateral keine knöcherne Überbrückung der Osteotomie aufwies, wies diese auch medial nicht auf.

In den periostalen und endostalen Randbereichen zeigte die Kortikalis große Zonen, in denen das regelmäßig strukturierte Knochengewebe durch Bindegewebe oder aber durch Geflechtknochen ersetzt war (Abb. 4.4.-3, links). Das Bindegewebe war besonders endostal und im Bereich des Osteotomiespalts massiv von Entzündungszellen durchsetzt. Die Entzündungszellen ließen die Zellen des lockeren Bindegewebes zahlenmäßig in den Hintergrund treten (Abb. 4.4-7). Es wurden kleine und große Lymphozyten anhand ihres dunkel gefärbten Zellkerns und ihres schmalen (kleine L.) bzw. breiten (große L.) Zytoplasmasaums identifiziert. Auch kugelförmige Plasmazellen, die etwa dieselbe Größe aufwiesen wie die großen Lymphozyten, jedoch einen exzentrischen Kern mit inwändig abgelagerten Chromatinbrocken (sog. Radspeicherkern), lagen im lockeren Bindegewebe verteilt. Zudem waren eosinophile und neutrophile Granulozyten mit ihrem typischen gelappten Zellkern und dem groben bzw. fein granulierten Zytoplasma vorhanden.

Aufgrund der intramedullären Lage des Nagels kam es endostal nicht zur knöchernen Überbrückung. Allerdings kam es auch endostal in wenigen Fällen zur Ausbildung eines knöchernen Kallus (Abb. 4.4.-4, links). Dieser ging immer von den Osteotomiekannten aus und war nur zu beobachten, wenn die Kanten einigermaßen „intakt“ schienen. Waren die Osteotomiekannten nach einer Ausheilungszeit von neun Wochen im Vergleich zum postoperativen Status stark durch Resorptions- oder Sequestrierungsvorgänge gekennzeichnet (Abb. 4.4.-3), wurde kein endostaler Kallus ausgebildet. Bei zwei Tibiae war medial distal endostaler Kallus zu beobachten, ein weiteres Tier bildete ihn lateral distal aus. Sequester der Kortikalis fanden sich endostal, aus dem Kortikalis-Zusammenhang gerissen, bei vier Tieren medial, bei zwei Tieren lateral (Abb. 4.4.-3, rechts). Eine Tibia zeigte keine Sequestrierung der Kortikalis. Zwischen der Kortikalis und den Knochensequestern befand sich eine Schicht aus lockerem Bindegewebe, welches ebenfalls von Entzündungszellen infiltriert war. Die Sequester waren deutlichen Resorptionsvorgängen durch Osteoklasten unterworfen. Neubildung von Knochen, erkennbar durch angelagertes Osteoid oder auf der Knochenoberfläche sitzende Osteoblasten konnte dort nicht beobachtet werden.

Die äußere Form des Kallus war am ehesten mit spindelförmig zu umschreiben. Allerdings war der Kallus nicht so klar umschrieben und abgrenzbar wie bei den aus mit einem externen Fixateur versorgten Tibiae. Vielmehr erinnerte er an eine diffuse Auftreibung oder Verdickung des gesamten Knochens, die ihren größten Durchmesser und Umfang auf Höhe des Osteotomiespalts aufwies. Endostal bestand der Kallus aus einer breiten Bindegewebschicht, die allerdings nicht nur eine Zubildung als Reaktion auf die Osteotomie darstellte,

sondern auch eine Umwandlung der einst knöchernen Kortikalis in Bindegewebe (Abb. 4.4.-3, links). Die spindelförmigen Zellen bildeten auf Höhe des ehemaligen Osteotomiespalts ein dichtes, kompaktes Bindegewebe, dessen Fasern größtenteils in Richtung der Knochenlängsachse ausgerichtet waren. Das feste Bindegewebe nahm teilweise Kontakt zur Kortikalis auf und zog, diese ausfüllend, in die entstandenen Resorptionslakunen (Abb. 4.4.-3, rechts). Proximal und distal des Osteotomiespalts änderte sich das Aussehen des Bindegewebes: das Gewebe war locker, zellarm, von einzelnen Fettzellen durchsetzt, eine einheitliche Faserausrichtung war hier nicht zu beobachten. Der knöcherne periostale Kallus bestach durch seine bizarre, fingerabdruckartige Formation. Im kallösen Geflechtknochen fanden sich große Lakunen, deren Ränder von Osteoblasten gesäumt waren. Vereinzelt Osteoklasten erweiterten das Lumen der Osteone, welches mit Bindegewebe angefüllt war. Im lockeren Bindegewebe, vor allem zentral, waren vereinzelt blutgefüllte Gefäße erkennbar. Bindegewebe war, abgesehen von seiner endostalen Lokalisation, häufig im überbrückenden knöchernen Kallus in Höhe der Osteotomie zu finden (Abb. 4.4.-4, rechts).

Auch die selten vorhandenen und flächenmäßig kleinen Knorpelareale waren, wenn vorhanden, im periostalen Kallus auf Höhe des Osteotomiespalts zu finden. Es handelte sich um hyalinen Knorpel, der anhand seiner großblasigen Knorpelzellen und den maskierten, d. h. lichtmikroskopisch nicht sichtbaren, Kollagenfibrillen von Bindegewebsknorpel unterschieden werden konnte. Das wenige vorhandene Knorpelgewebe lag immer zu Knochengewebe benachbart, war aber auch von Bindegewebe umgeben. Der Knorpel befand sich zudem, wie oben bei den Präparaten aus den Fixateurgruppen erläutert, teilweise bereits in der Mineralisation (Abb. 4.4-6). Die Mineralisation wurde je nach histologischer Färbung durch die rote bzw. grüne Anfärbung der Knorpelmatrix belegt.

Abb. 4.3.-4: nächste Seite, oben (Vergr.: 13,75x), unaufgebohrte Marknagelung

Links: Ausbildung endostalen knöchernen Kallus dicht distal des Osteotomiespalts.

Rechts: knöcherne Überbrückung des Osteotomiespalts (mittig), die Kortikalis ragt von oben und unten in das Bild. Die knöcherne Überbrückung ist diskontinuierlich und von Bindegewebe durchzogen.

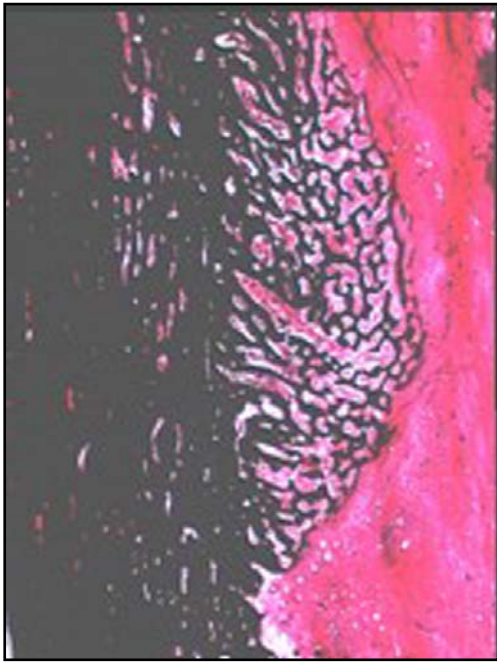


Abb. 4.4-4

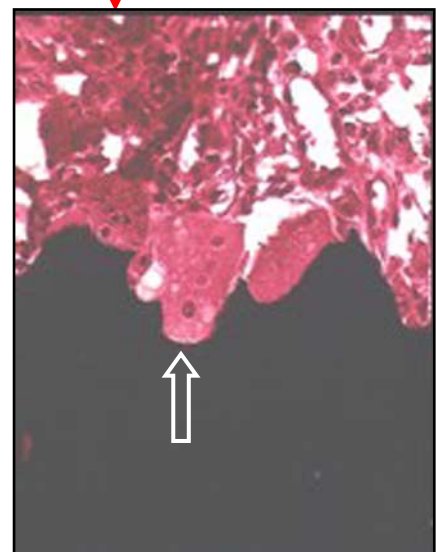
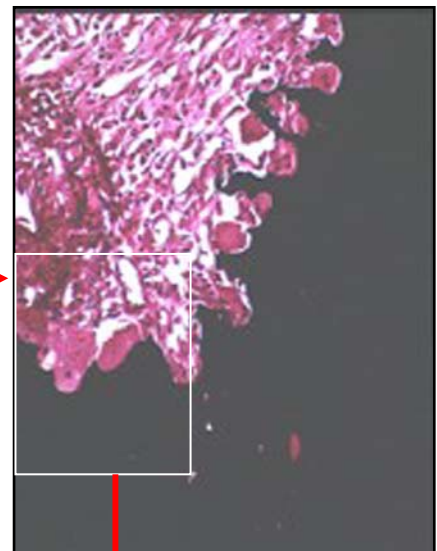
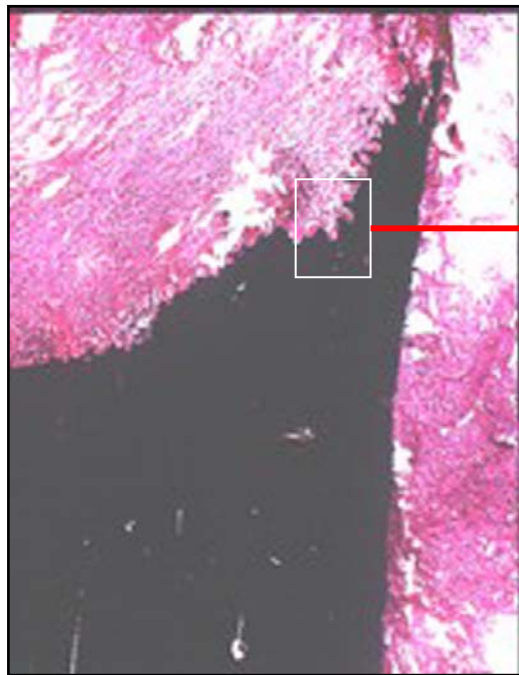


Abb. 4.4.-5:

Links: scharfkantige, gezackte Osteotomie-kante mit deutlichen Resorptionsspuren (Vergr.: 55x),

Rechts oben: Ausschnitt aus dem linken Bild, Osteoklasten in Resorptionslakunen (Vergr.: 110x),

Rechts unten: Ausschnitt aus obigem Bild, Osteoklast (leerer Pfeil) in Howshipscher Lakune, deutlich erkennbar die multiplen Zellkerne des Osteoklasten (Vergr.: 220x).

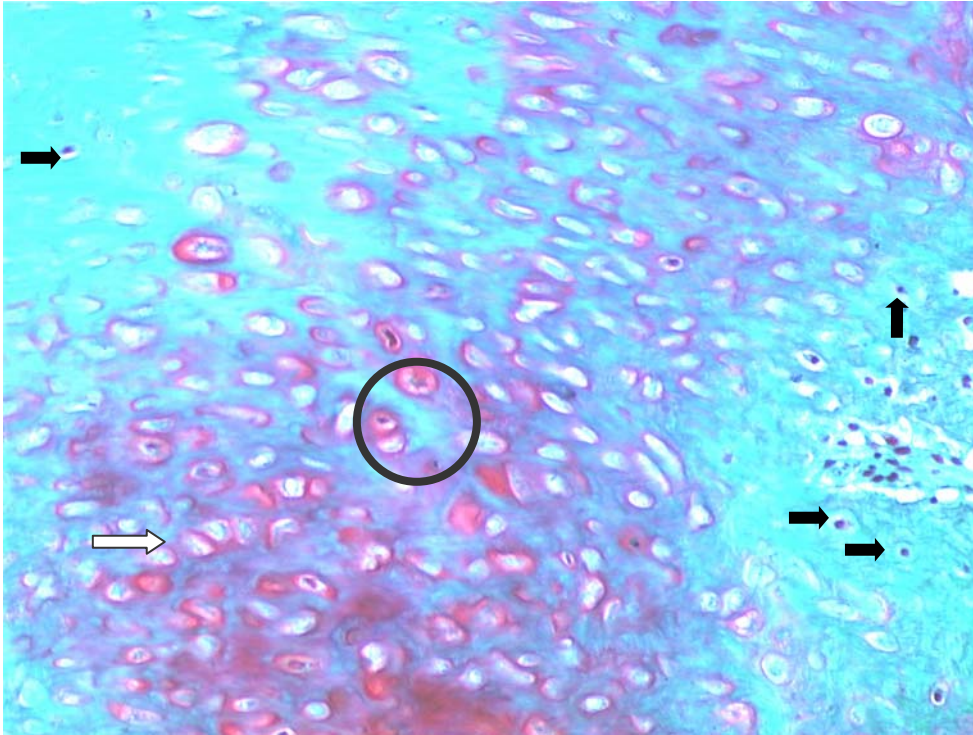


Abb. 4.4-6: Safranin-Orange / Lichtgrün Färbung

Insel hyalinen Knorpels, unmineralisierte Knorpelgrundsubstanz ist rot gefärbt, die Knorpelzellen zeigen typische säulenförmige Anordnung (heller Pfeil). Teilweise ist die Grundsubstanz zwischen den Zellen mineralisiert (Kreis), erkennbar an der Grünfärbung. In der rechten oberen und linken unteren Bildecke ist grügefärbter Geflechtknochen benachbart, mit für diesen Knochen typischen, relativ großen Osteozyten (schwarze Pfeile). (Vergr.: 110x)

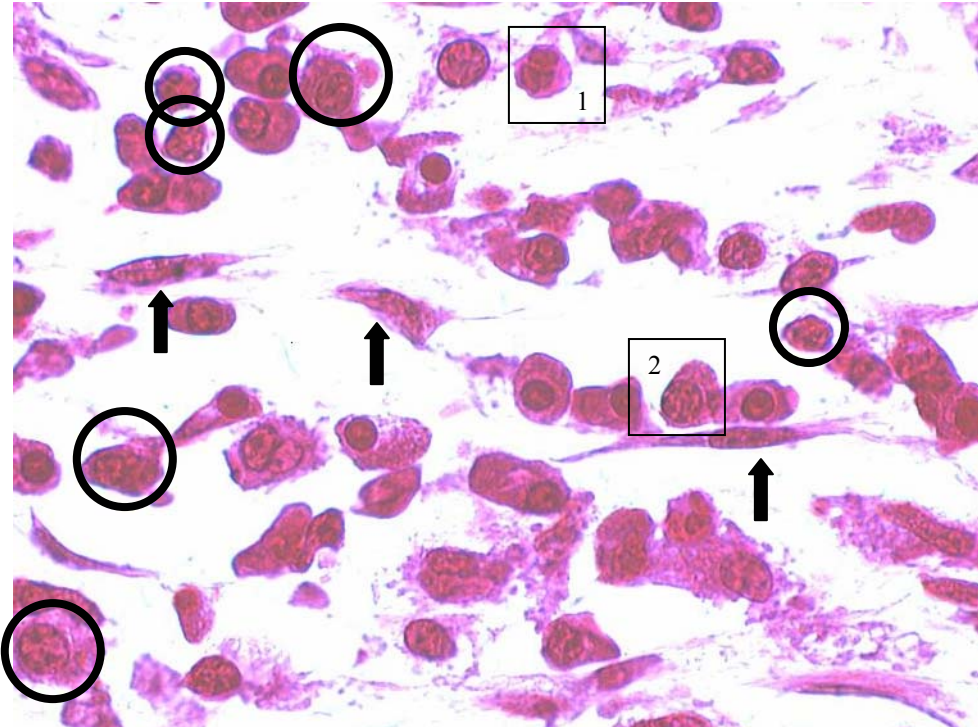


Abb. 4.4-7: Safranin-Orange / von Kossa Färbung

Lockeres Bindegewebe, situiert in dem Raum zwischen Kortikalis und Kortikalissequester eines UTN-Tieres. Deutlich erkennbar die wenigen spindelförmigen Fibrozyten (Pfeile) mit ihren Zytoplasmafortsätzen. Bei den zahlreichen Entzündungszellen dominieren die kleinen und großen Lymphozyten (Kreise), auch vereinzelte eosinophile Granulozyten (1) und Plasmazellen (2) sind erkennbar. (Vergr.: 550x)

4.4.2. Histomorphometrie

Die Ergebnisse der histomorphometrischen Auswertung wurden aufgrund der geringen Fallzahl pro Gruppe ($n = 6$) und der daher nicht zu erwartenden Normalverteilung der Werte als Mediane dargestellt. Sämtliche Ergebnisse werden als Boxplots dargestellt (Abb. 4.4-0). Die Boxplotdarstellung enthält folgende Parameter: den Median (auch 50-Prozentquartil genannt), das 25- und 75-Prozentquartil, den Minimum- und Maximumwert. Außerdem sind Ausreißer und Extremwerte dargestellt. Der Körper des Boxplots wird vom 25- und 75-Prozentquartil begrenzt und vereint 50 Prozent der Werte in sich. Die sich oben und unten an den Körper anschließenden Whisker (Abb. 4.4-0) umfassen jeweils die Werte unterhalb des 25-Prozentquartils bzw. oberhalb des 75-Prozentquartils. Die Whisker können maximal die 1,5-fache Länge der Box betragen. Gibt es Fälle mit Werten außerhalb dieses Bereichs, werden sie als Ausreißer bzw. Extremwerte bezeichnet.

- * Extremwerte: Fälle mit Werten, die über 3 Boxlängen vom oberen oder unteren Rand der Box entfernt sind.
- Ausreißer: Fälle mit Werten, die zwischen 1,5 und 3 Boxlängen vom oberen oder unteren Rand der Box entfernt sind.

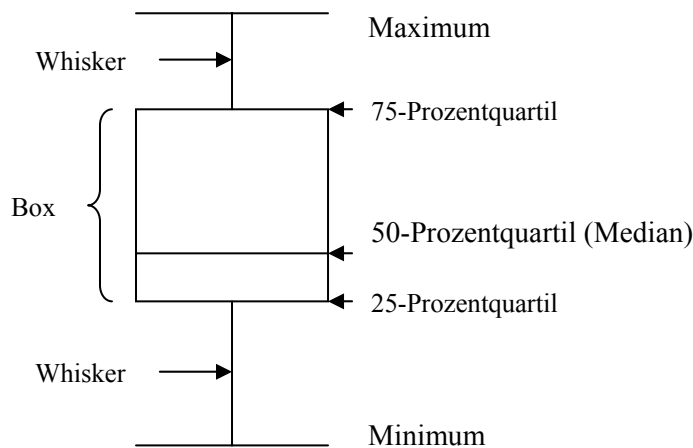


Abb. 4.4-0:
Darstellung eines Boxplots

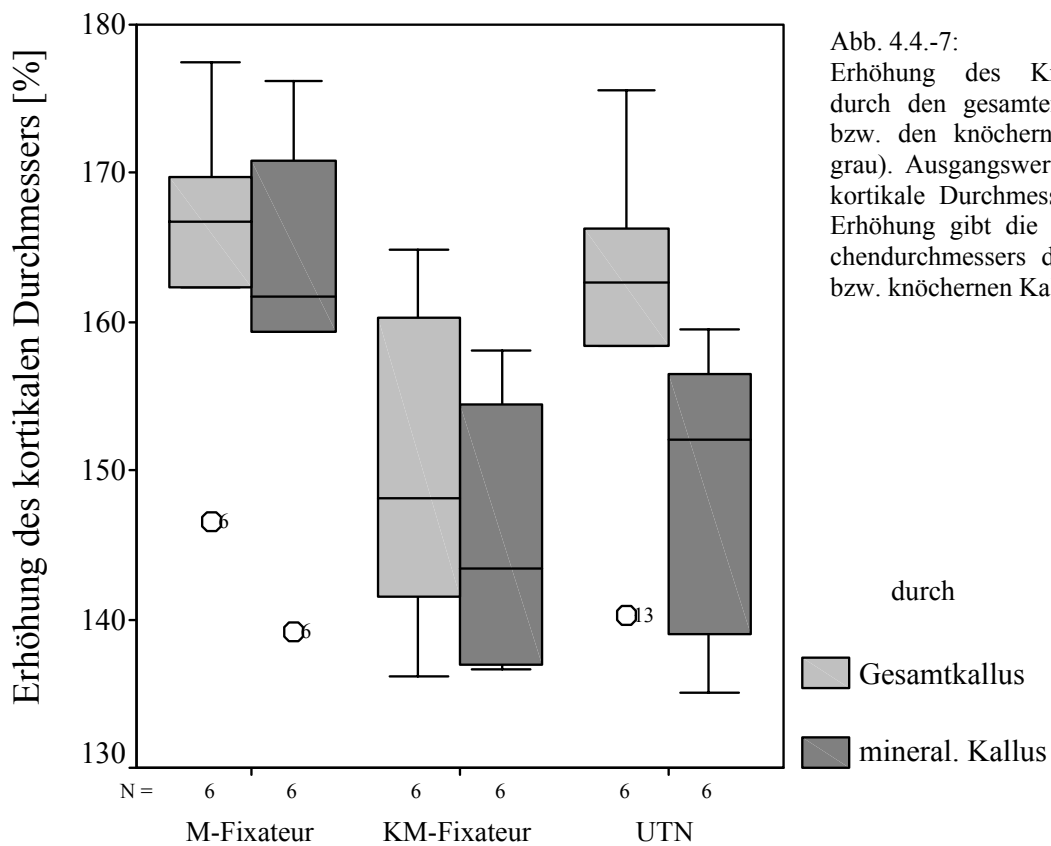
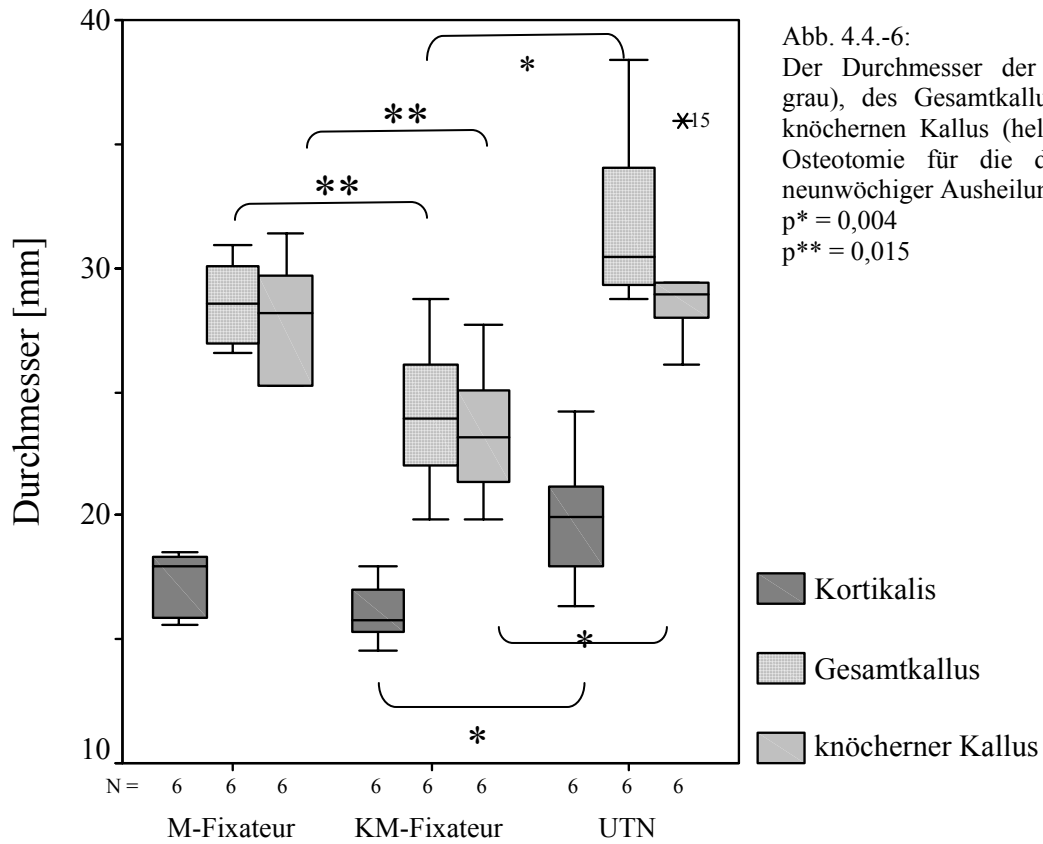
Alle im nachfolgenden aufgeführten Ergebnisse sind innerhalb der in Kapitel 3.8.2. erläuterten ROI, definiert durch die Gesamtkallusbreite und die festgelegte Höhe von 12 Millimetern, erhoben.

Die durchschnittliche kortikale Weite auf Höhe des Osteotomiespalts betrug in der M-Fixateurgruppe 18 mm (Median), in der KM-Fixateurgruppe 15,7 mm und in der UTN-Gruppe (unaufgebohrte Marknagelung) 19,9 mm. Die kortikale Weite der UTN-Gruppe war signifikant ($p = 0,004$) größer als die der KM-Fixateurgruppe. Der Durchmesser des entstandenen knöchernen Kallus betrug in der Gruppe des medialen Fixateurs 28,2 mm, in der Gruppe des kraniomedialen Fixateurs 23,1 mm, in der UTN-Gruppe 28,9 mm. Der knöcherne Kallusdurchmesser der M-Fixateurgruppe war signifikant ($p = 0,015$) größer als derjenige der KM-Fixateurgruppe, während diesbezüglich zwischen der M-Fixateur-Gruppe und der UTN-Gruppe keine statistisch signifikanten Unterschiede bestanden (Abb. 4.4.-6). Der knöcherne Kallusdurchmesser der UTN-Gruppe war ebenfalls signifikant ($p = 0,004$) größer als derjenige der KM-Fixateurgruppe. Die eben genannten absoluten Werte für den knöchernen Kallusdurchmesser entsprachen, ausgehend von dem Kortikalisdurchmesser der jeweiligen Tibiae, einer relativen Vergrößerung des knöchernen Durchmessers auf 162 % in der M-Fixateurgruppe, auf 146 % in der KM-Fixateurgruppe, bzw. auf 160 % in der UTN-Gruppe. Auf eine statistische Auswertung dieser prozentualen Werte wurde aufgrund der Abhängigkeiten von bereits statistisch ausgewerteten Parametern (absoluter Durchmesser von Kortikalis und knöchernem Kallus) verzichtet, dennoch ist erkennbar, dass die KM-Fixateurgruppe einen deutlich geringeren relativen knöchernen Kallusdurchmesser aufwies (Abb. 4.4.-7).

Die Gesamtkallusbreite betrug 28,5 mm in der M-Fixateurgruppe, 23,9 mm in der KM-Fixateurgruppe und 30,5 mm in der UTN-Gruppe. Die Gesamtkallusbreite der mit dem kraniomedialen Fixateur versorgten Gruppe war signifikant geringer ($p = 0,015$) als die der mit dem medialen Fixateur versorgten Gruppe. Die Gesamtkallusbreite der KM-Fixateurgruppe war ebenfalls signifikant ($p = 0,004$) geringer als die der Nagel-Gruppe (Abb. 4.4.-6).

Eine Tabelle mit den Medianen und Minimal-/Maximalwerten der jeweiligen histomorphometrischen Parameter für die drei untersuchten Gruppen findet sich im Anhang.

Die histomorphometrische Auswertung von Gewebeflächen wird im Folgenden nach Kortikalis und Kallus getrennt vorgenommen.



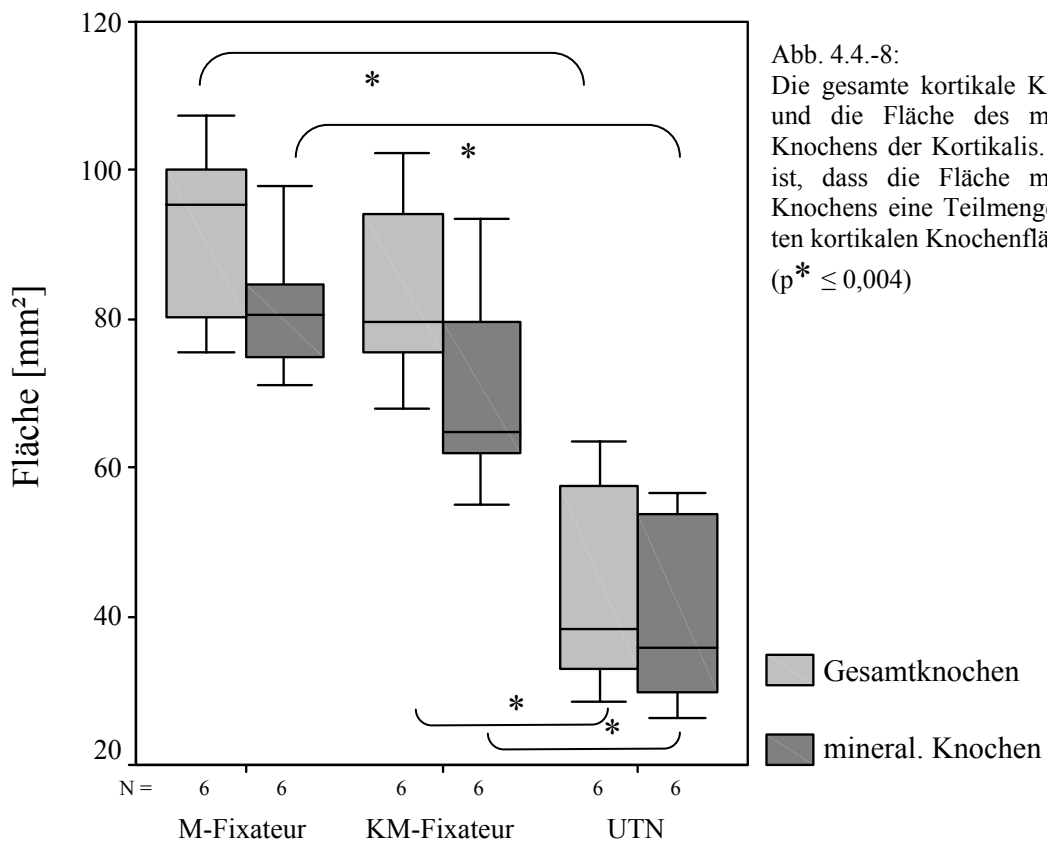
Kortikalis

Die Kortikalis wurde bezüglich ihrer Gesamtknochenfläche, ihrer Fläche mineralisierten Knochens, ihrer Bindegewebsfläche und ihrer Knochendichte beurteilt. Dabei stellte sich heraus, dass sich beide Fixateurgruppen in keiner der vier Parameter unterschieden. Ein Vergleich der M-Fixateurgruppe mit der Gruppe, deren Tibiae durch unaufgebohrte Marknagelung versorgt waren, ergab keine Unterschiede für die kortikale Bindegewebsfläche und Knochendichte. Allerdings imponierte die UTN-Gruppe durch eine signifikant ($p = 0,002$) geringere kortikale Gesamtknochenfläche und eine signifikant ($p = 0,002$) kleinere Fläche mineralisierten Knochens (Abb. 4.4.-8). Ähnliche Tendenzen waren auch beim Vergleich zwischen KM-Fixateurgruppe und UTN-Gruppe zu finden: die UTN-Gruppe wies eine signifikant ($p = 0,002$) kleinere kortikale Gesamtknochenfläche auf, ebenso eine signifikant ($p = 0,004$) kleinere Fläche mineralisierten Knochens in der Kortikalis. Die kortikale Knochendichte der UTN-Gruppe war hingegen signifikant ($p = 0,009$) höher als die der KM-Fixateurgruppe (Abb. 4.4.-9). Keinerlei statistische Unterschiede zwischen den Gruppen war bezüglich des kortikalen Bindegewebsanteils zu ermitteln (Abb. 4.4.-10). Wurden diese absoluten Werte für die Bindegewebsfläche allerdings auf die signifikant unterschiedlichen Gesamtknochenflächen der einzelnen Gruppen bezogen, so ergab sich, dass die UTN-Gruppe durch ihre signifikant kleinere Gesamtknochenfläche einen signifikant ($p = 0,015$) höheren prozentualen Bindegewebsanteil in der Kortikalis aufwies als die M-Fixateurgruppe.

Die absoluten Zahlen für die vier die Kortikalis beschreibenden Parameter sind im Folgenden tabellarisch aufgeführt.

Implantat		Gesamtknochen- fläche [mm ²]	Fläche mineral. Knochens [mm ²]	Bindegewebs-fläche [mm ²]	Knochendichte [%]
M-Fixateur	Median	95,28	80,52	0,51	89,10
	Mittelwert	92,32	81,64	0,64	88,86
	s	12,20	9,55	0,43	4,97
KM-Fixateur	Median	79,69	64,78	0,88	83,34
	Mittelwert	83,26	69,91	1,45	83,60
	s	12,66	14,11	1,28	4,86
UTN	Median	38,28	35,88	2,24	91,81
	Mittelwert	43,15	39,74	2,92	92,35
	s	14,02	12,66	2,31	2,57

Tab. 4.4.-1: histomorphometrische Daten der Kortikalis für die drei Gruppen, statistisch signifikante Unterschiede werden im Text erläutert (n = 6/Gruppe).



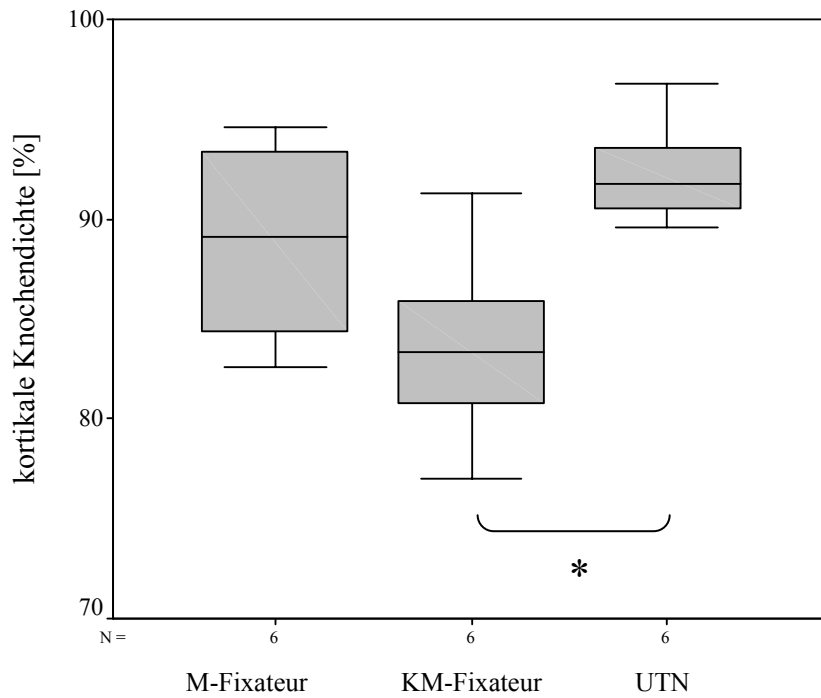


Abb. 4.4.-9: Vergleich der kortikalen Knochendichte. Die Dichte des kortikalen Knochens der Nagel-Gruppe (UTN) ist signifikant ($p = 0,009$) höher als die der KM-Fixateurgruppe.

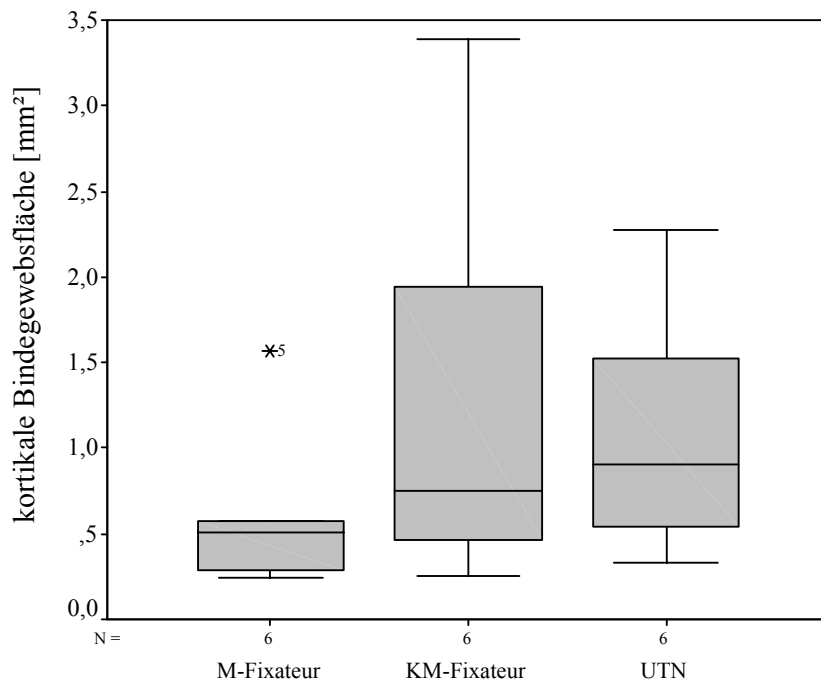


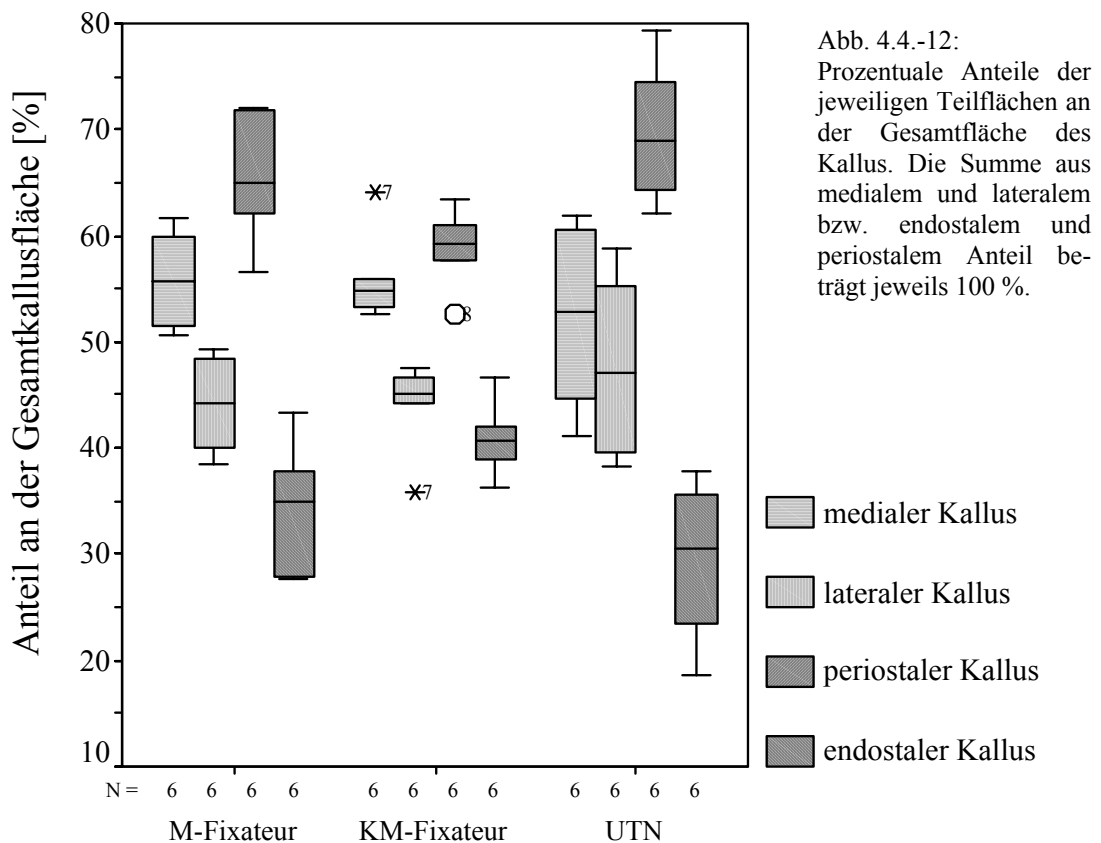
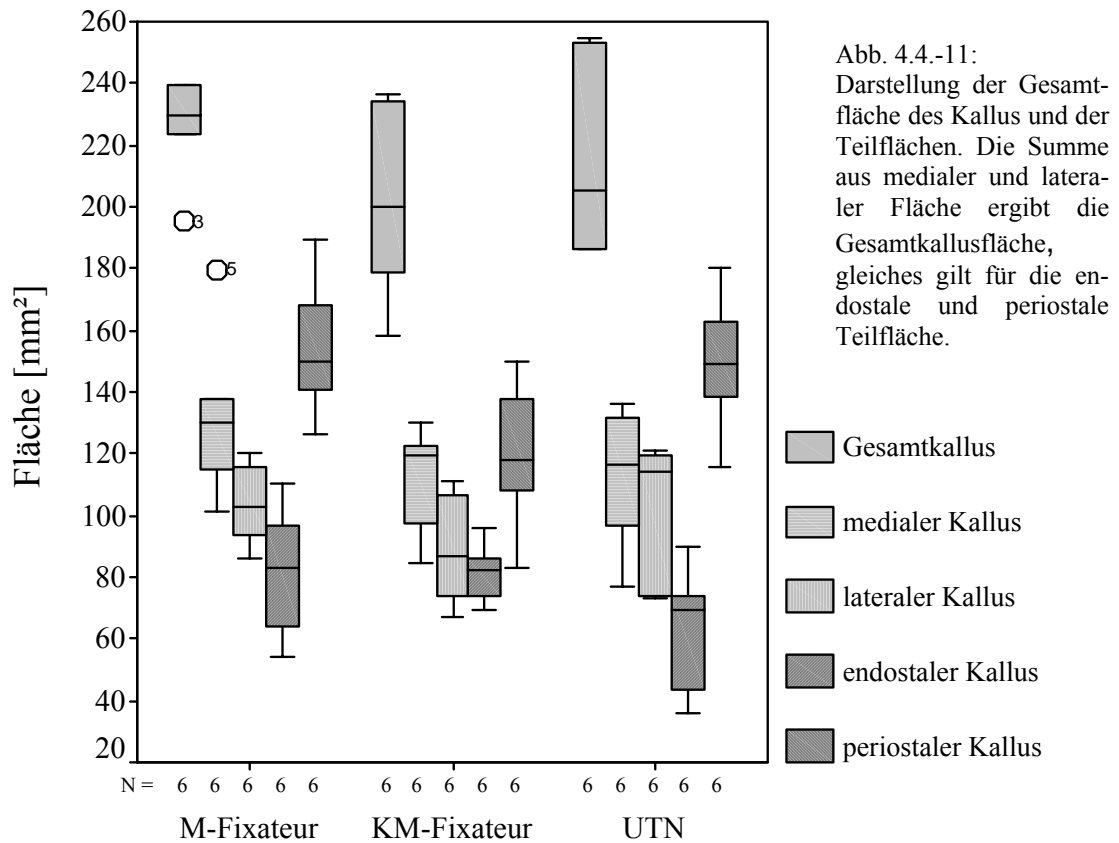
Abb. 4.4.-10: Darstellung der Bindegewebsfläche der Kortikalis. Die absoluten Werte ergeben keinen signifikanten Unterschied zwischen den drei Gruppen. Dieser Unterschied wird erst sichtbar, wenn die Bindegewebsfläche auf die Gesamtfläche kortikalen Knochens bezogen wird. Da die Nagel-Gruppe (UTN) eine signifikant niedrigere Gesamtknochenfläche aufwies (Tab. 4.3.-1 und Abb. 4.3.-8), führt eine ähnliche Fläche von Bindegewebe zu einem signifikant erhöhten Bindegewebsanteil.

Kallus

Die Gesamtkallusfläche der M-Fixateurgruppe hatte eine durchschnittliche Größe von 229,4 mm². In der KM-Fixateurgruppe wies der Kallus eine durchschnittliche Fläche von 199,6 mm² auf. Für die UTN-Gruppe wurde eine mittlere Gesamtkallusfläche von 204,9 mm² gemessen. Es gab zwischen den Gruppen keine statistisch signifikanten Unterschiede bezüglich dieser Gesamtkallusfläche (Abb. 4.4.-11). Als nächstes wurde ein Vergleich der verschiedenen Kalluszonen durchgeführt, um Einflüsse des Implantates auf die Lokalisation der Kallusentwicklung zu untersuchen. Der Kallus wurde in seine medialen und lateralen Anteile sowie in seine periostalen und endostalen Anteile aufgeteilt. Bei den nachfolgenden Schilderungen muss unbedingt beachtet werden, dass die Summe aus medialem und lateralem Anteil den Gesamtkallus ausmachen, aber auch Teilmengen des endostalen und periostalen Anteils und vice versa sind! In den folgenden Tabellen werden als erstes die absoluten Flächengrößen der jeweiligen Kallusareale dargestellt, dann wird der prozentuale Anteil der Kallusareale am Gesamtkallus tabellarisch aufgelistet, um diese Anteile zwischen den drei Gruppen besser miteinander vergleichen zu können.

Implantat		Gesamtkallus	Kallus medial	Kallus lateral	Kallus endostal	Kallus periostal
M-Fixateur	Median	229,39	130,48	103,03	82,71	149,97
	Mittelwert	236,09	132,50	103,59	81,84	153,98
	s	34,68	27,01	14,05	21,12	21,93
KM-Fixateur	Median	199,64	119,27	87,20	82,13	117,64
	Mittelwert	201,07	112,22	88,85	81,61	119,07
	s	31,45	17,39	17,72	9,65	23,89
UTN	Median	204,95	116,29	113,91	69,73	149,33
	Mittelwert	214,97	112,33	102,63	63,77	149,37
	s	32,00	22,47	22,69	20,14	22,00

Tab. 4.4.-2: Größe der Gesamtkallusflächen und seiner verschiedenen Teilflächen in den drei Gruppen, (n = 6/Gruppe) **alle Angaben in [mm²]**.



Die statistische Auswertung der Fläche des gesamten Kallus und seiner jeweiligen Anteile ergab keine Unterschiede zwischen den Gruppen. Einzig der periostale Kallus der KM-Fixateurgruppe ist deutlich, aber nicht signifikant ($p = 0,041$) kleinflächiger als derjenige der UTN-Gruppe. Auffällig war jedoch, dass in allen Gruppen die periostale Kallusfläche deutlich größer ausgeprägt war als ihr endostales Pendant (Abb. 4.4.-11). Bemerkenswert war, dass in der UTN-Gruppe trotz intramedullärer Implantatlage endostaler Kallus nachzuweisen war, der sich flächenmäßig nicht von demjenigen der Fixateurgruppen unterschied. Bei den beiden Fixateurgruppen fiel weiterhin auf, dass der mediale Kallusanteil deutlich größer war als der laterale Teil (Abb. 4.4.-12). Diese Tendenz konnte in der UTN-Gruppe nicht beobachtet werden. Um die Qualität des Regeneratgewebes beurteilen zu können, müssen die Gewebeanteile des Kallus aufgeschlüsselt werden. Im Folgenden werden zunächst die Anteile von Knochen-, Binde- und Knorpelgewebe in der Anschnittfläche des medialen und lateralen Kallus dargestellt, sowohl als absolute Zahlen als auch relativ in Bezug auf die Gesamtkallusfläche. Für das Knochen- und Bindegewebe wird auch eine Unterteilung in periostale / endostale und mediale / laterale Lokalisation vorgenommen, dieses unterbleibt für das Knorpelgewebe, da es flächenmäßig in allen Gruppen verschwindend gering ausgeprägt ist.

Die Fläche mineralisierten Knochens wird der Übersicht halber für jede Gruppe getrennt aufgeführt und in einer Abbildung (4.4.-13 und -14) verdeutlicht. In der Abbildung ist als Anhaltsgröße zusätzlich noch die Gesamtkallusfläche aufgetragen.

Die M-Fixateurgruppe wies im Kallus eine mittlere mineralisierte Knochenfläche von $197,6 \text{ mm}^2$ auf. Von dieser Fläche waren $113,8 \text{ mm}^2$ im medialen Kallus lokalisiert, $88,4 \text{ mm}^2$ im lateralen Kallus. Auf den endostalen Kallus entfielen im Durchschnitt 74 mm^2 , der periostale Kallus hatte eine durchschnittliche Fläche von $131,8 \text{ mm}^2$. Die Dichte des knöchernen Kallus betrug durchschnittlich $78,8 \%$ ($72,8 \%$ - $82,7 \%$) [Median (Min/Max)].

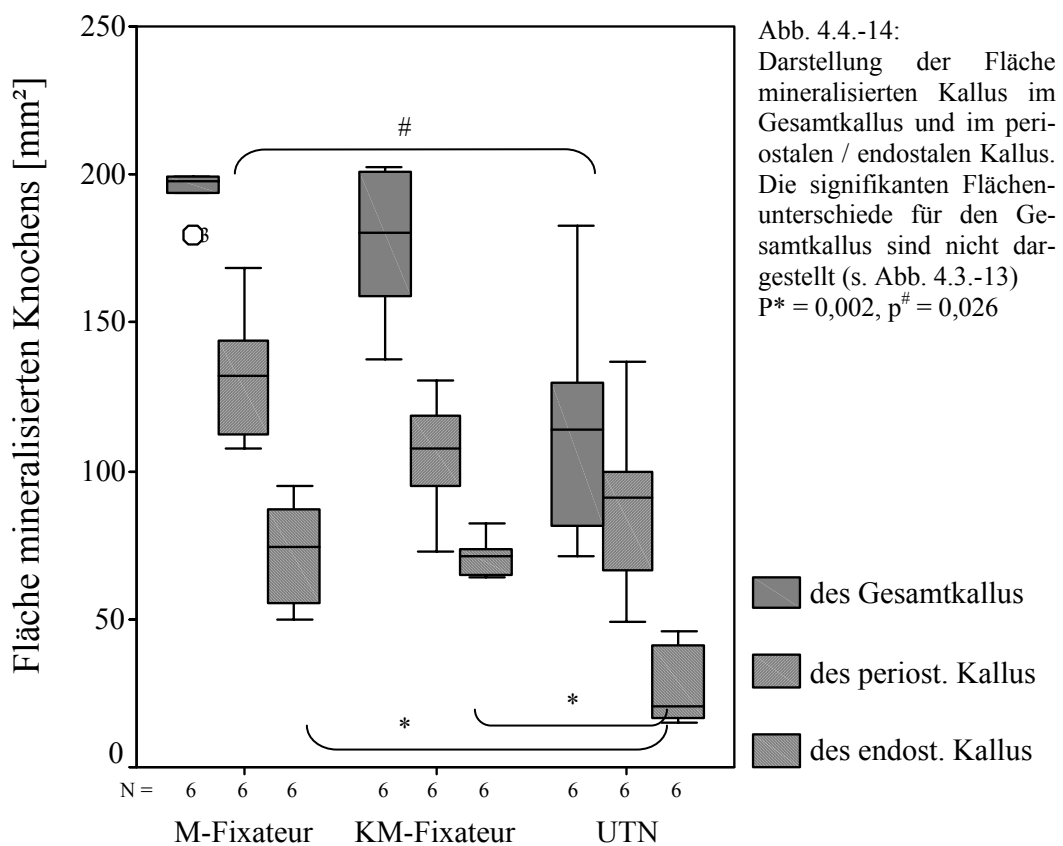
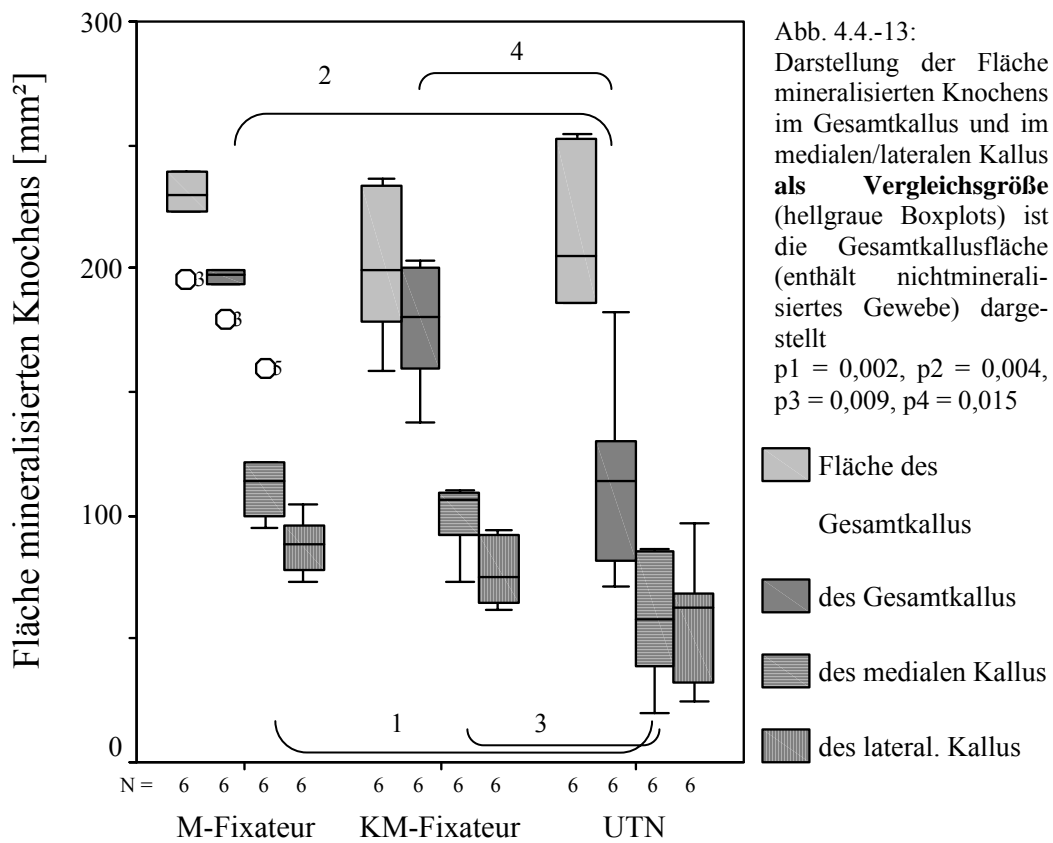
Die KM-Fixateurgruppe wies eine durchschnittliche mineralisierte Kallusknochenfläche von $180,2 \text{ mm}^2$ auf. Auf den medialen Kallus entfielen durchschnittlich $106,8 \text{ mm}^2$ mineralisierter Knochenfläche, nur $75,1 \text{ mm}^2$ auf den lateralen Kallus. Die Verteilung im endostalen zum periostalen Kallus betrug durchschnittlich $71,5 \text{ mm}^2$ zu $108,0 \text{ mm}^2$. Die Knochen-dichte des Kallusgewebes wurde mit $78,5 \%$ ($74,0 \%$ - $85,3 \%$) gemessen.

Die Gruppe des UTN zeigte im Gesamtkallus eine mittlere mineralisierte Knochenfläche von $114,0 \text{ mm}^2$, wovon annähernd hälftig $57,8 \text{ mm}^2$ auf den medialen Kallus und $62,2 \text{ mm}^2$ auf den lateralen Kallus entfielen. Im Vergleich des periostalen mit dem endostalen Kal-

lus entfiel der größere Anteil der mineralisierten Knochenfläche auf den periostalen Kallus (90,7 mm²), während der endostale Kallus durchschnittlich nur 20,2 mm² an mineralisierter Knochenfläche aufwies. Die Dichte des knöchernen Kallusgewebes lag bei durchschnittlich 81,0 % (76,6 % - 92,1 %).

Zwischen den beiden Fixateurgruppen waren keine statistischen Unterschiede bezüglich der mineralisierten Knochenfläche im Kallus messbar. Die Fläche mineralisierten Knochens war im Gesamtkallus der Nagel-Gruppe (UTN) deutlich kleiner als in beiden Fixateurgruppen, selbiges gilt auch für die mineralisierte Knochenfläche im medialen und endostalen Kallus ($p \leq 0,015$, einzelne Werte s. Abb. 4.4.-13 und -14). Auffällig ist, dass für die Nagel-Gruppe zwar vergleichbare Kallusflächen zu ermitteln waren, die Gewebequalität dieser sich aber deutlich von derjenigen der Fixateurtiere unterschied: so lag der Anteil der mineralisierten Knochenfläche signifikant unter demjenigen der Fixateurtiere. Die Knochendichte des Kallus war jedoch in allen drei Gruppen gleich hoch. Aus welchem Gewebe die nicht knöchernen Kallusfläche der mit einem UTN versorgten Tibiae besteht, zeigt der folgende Vergleich der Bindegewebs- und Knorpelanteile des Kallus.

Die Bindegewebsfläche des Gesamtkallus war in der Nagel-Gruppe statistisch signifikant ($p = 0,002$) höher als die der beiden Fixateurgruppen (Abb. 4.4.-15). So wies die Nagel-Gruppe mit 94,9 mm² einen gut drei- bis vierfach höheren Bindegewebsanteil auf als die M-Fixateurgruppe (31,5 mm²) und die KM-Fixateurgruppe (20,6 mm²). Dieses Bindegewebe macht einen Großteil der Kallusfläche in der Nagel-Gruppe aus und erklärt die vergleichbare Kallusfläche bei geringerem Anteil mineralisierten Knochens im Vergleich zu den Fixateurgruppen. Der Bindegewebsanteil im Kallus war in der Nagel-Gruppe (UTN), verglichen mit beiden Fixateurgruppen, statistisch signifikant höher für den Gesamtkallus ($p = 0,002$), den medialen Kallus ($p = 0,002$), den periostalen Kallus ($p \leq 0,004$), und den endostalen Kallus ($p = 0,002$); die Werte für den lateralen Kallus unterschieden sich nur zur KM-Fixateurgruppe signifikant ($p = 0,015$). Auffällig war zudem die vergleichsweise breitere Streuung der Werte in der Nagel-Gruppe (Abb. 4.4.-16 und -17).



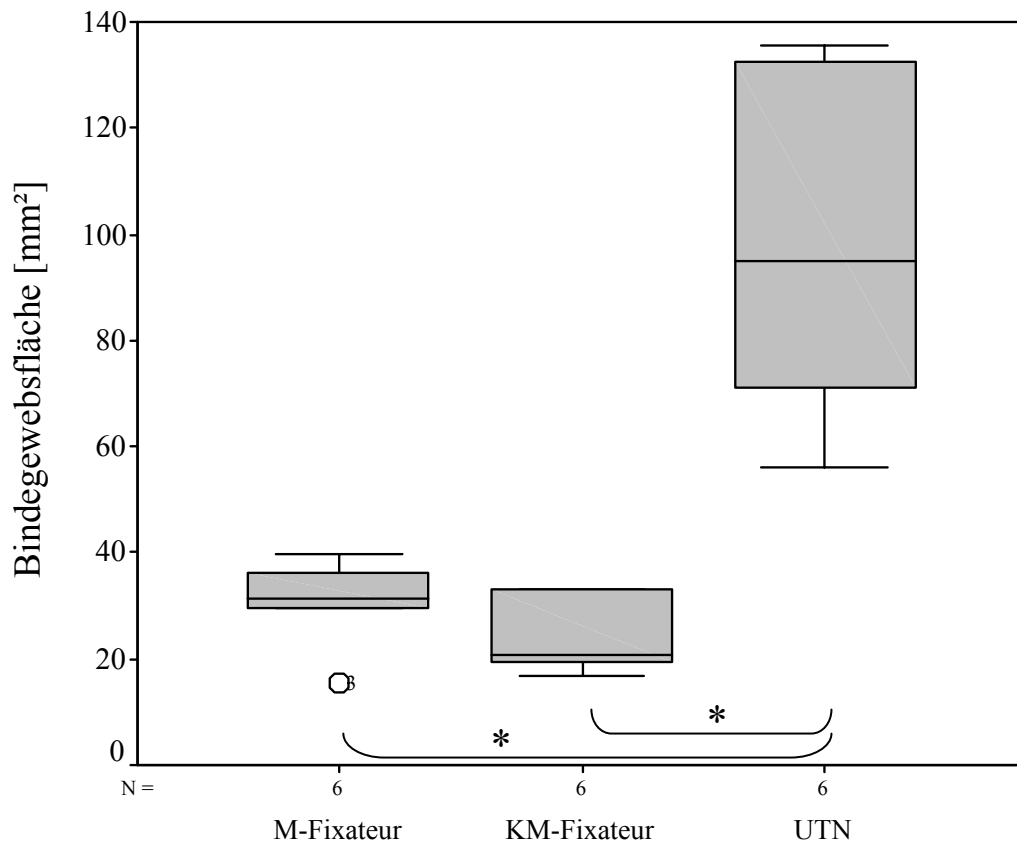
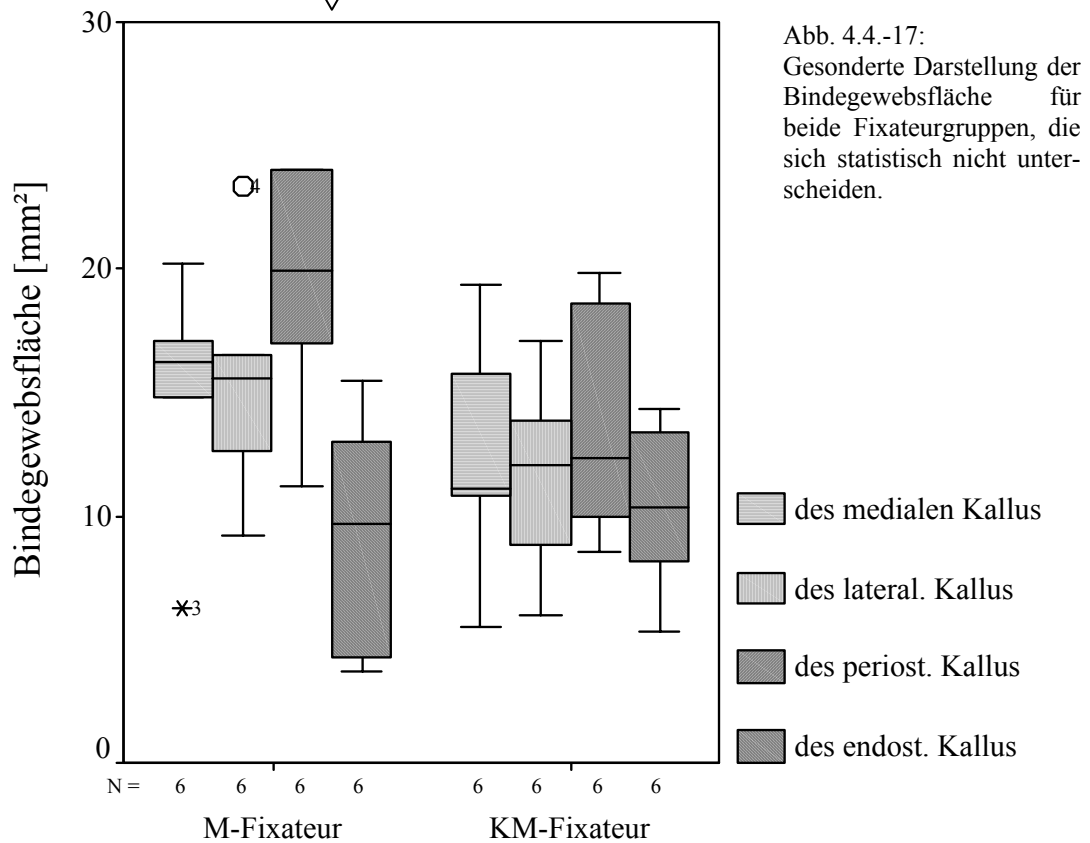
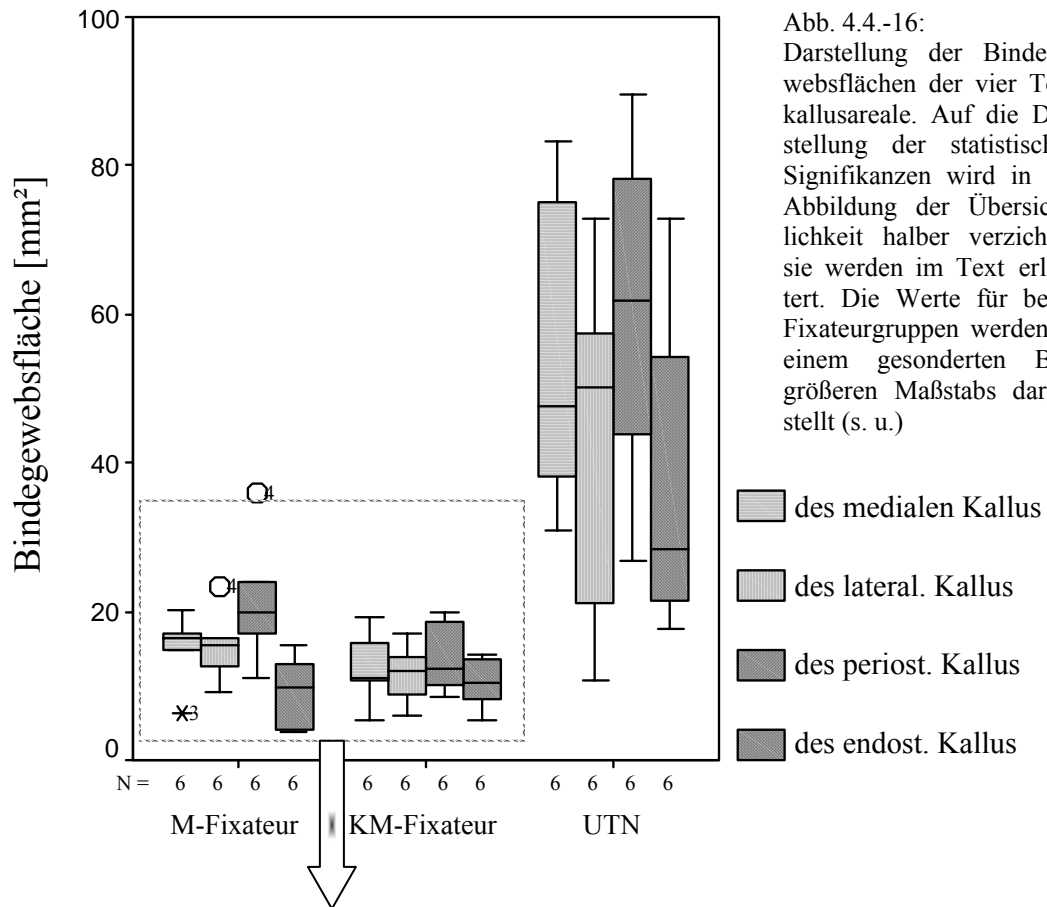
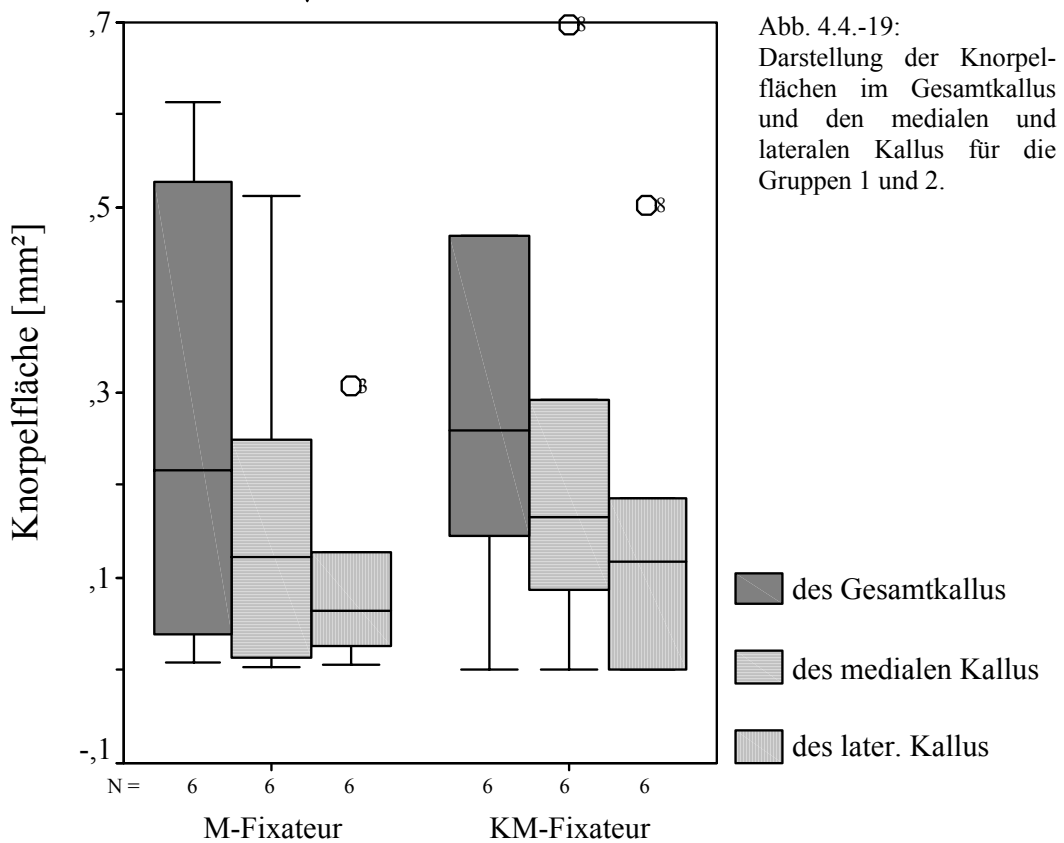
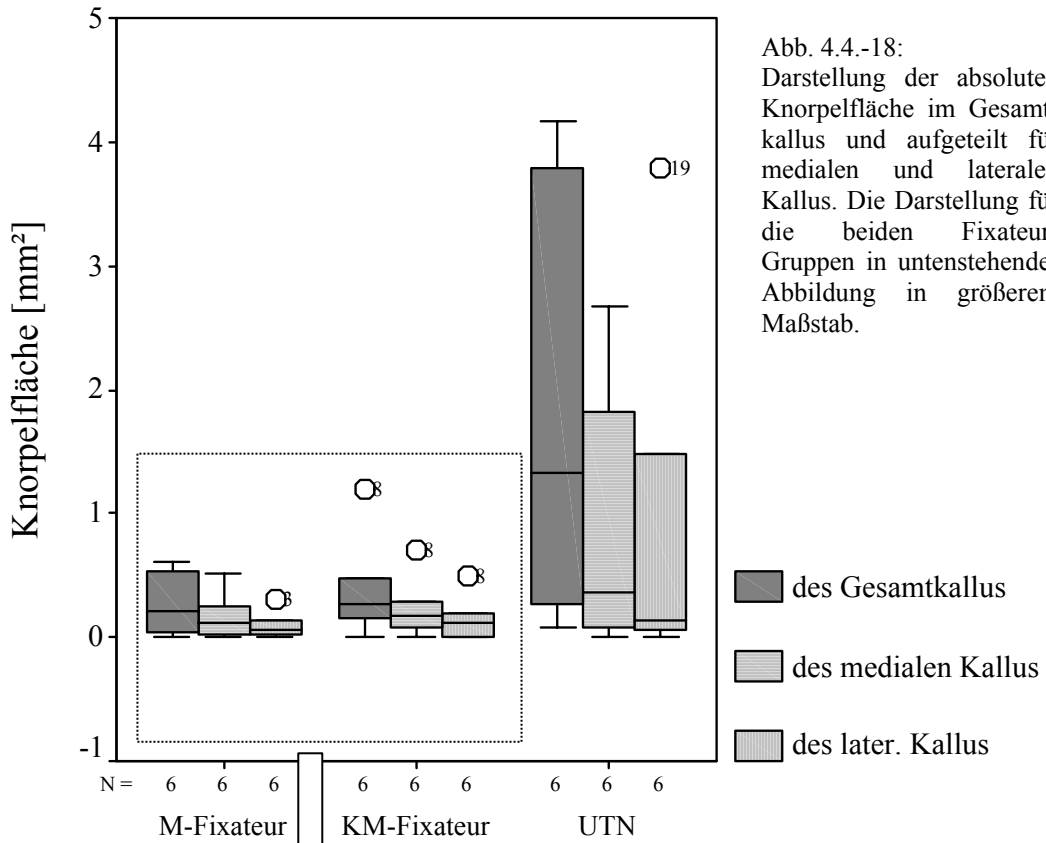


Abb. 4.4.-15: Dargestellt ist die Bindegewebsfläche des Gesamtkallus der drei Gruppen, $p^* = 0,002$.

Nach der Ausheilungszeit von neun Wochen wurden histologisch nur sehr wenige und flächenmäßig kleine Knorpelareale im Kallusgewebe gefunden. Dieser Befund wird durch die histomorphometrisch gewonnenen Daten gestützt. So unterschieden sich die beiden Fixateurgruppen statistisch bezüglich ihrer Knorpelfläche im Kallus überhaupt nicht: die M-Fixateurgruppe wies durchschnittlich $0,2 \text{ mm}^2$ Knorpelfläche im Gesamtkallus auf, von der $0,1 \text{ mm}^2$ auf den medialen Kallus und $0,1 \text{ mm}^2$ auf den lateralen Kallus entfielen. Der Anteil des Knorpelgewebes am Gesamtkallus betrug $0,1 \%$. Vergleichbare Werte fanden sich auch in der Gruppe des kraniomedial montierten Fixateurs: hier betrug die Knorpelfläche des Gesamtkallus durchschnittlich $0,3 \text{ mm}^2$. Diese Werte entsprachen einem prozentualen Knorpelanteil von $0,2 \%$. Im medialen Kallus lag die Knorpelfläche bei $0,2 \text{ mm}^2$, im lateralen Kallus bei $0,1 \text{ mm}^2$. Die Nagel-Gruppe zeigte einen etwas größeren Anteil an Knorpelgewebe, der Unterschied zu den Fixateurgruppen war allerdings statistisch nicht zu belegen. Die Knorpelfläche des gesamten Kallus betrug in dieser Gruppe $1,3 \text{ mm}^2$, davon entfielen auf den medialen Kallus durchschnittlich $0,4 \text{ mm}^2$ Knorpelfläche, auf den lateralen Kallus $0,1 \text{ mm}^2$.

Die histomorphometrischen Daten für die Knorpelfläche werden in den Abbildungen 4.4.-18 und -19 graphisch dargestellt.





4.5. Zusammenfassung der Ergebnisse

Der verwendete **mediale Fixateur** externe zeigte ein Initialsteifigkeit von durchschnittlich 2910,1 N/mm ($\pm 1490,6$ N/mm) für die axiale Kompression und 3,3 Nm/° ($\pm 0,78$ Nm/°) für die axiale Torsion. Nach der neunwöchigen Ausheilungszeit ergab die biomechanische Testung der osteotomierten Tibia ein durchschnittliches maximales Torsionsmoment von 63 Prozent bzw. eine durchschnittliche Torsionssteifigkeit von 79 Prozent der gesunden Gegenseite.

Histologisch war ein gleichförmiges, hauptsächlich aus mineralisiertem Knochengewebe bestehendes Kallusgewebe zu sehen. Der absolute und relative Anteil dieses Gewebes am Kallus ist in Abbildung 4.3.-20 dargestellt. Die Knochendichte des Kallus lag mit durchschnittlich 79 Prozent ca. zehn Prozentpunkte unter der durchschnittlichen Dichte des kortikalen Knochens. Der Osteotomiespalt war sowohl interkortikal als auch periostal und endostal vollständig knöchern überbrückt. Dieses neugebildete Knochengewebe im Osteotomiespalt bestand überwiegend aus Geflechtknochen, der an vielen Orten bereits durch Lamellenknochen ersetzt wurde (Abb. 4.4-2).

Der **kraniomediale Fixateur** war im *in vitro*-Vergleich mit der M-Fixateurgruppe durch eine geringere axiale Kompressionssteifigkeit bei identischer Torsionssteifigkeit charakterisiert. Nach dem Ende der neunwöchigen Heilungszeit wurde in der biomechanischen Testung ein maximales Torsionsmoment von durchschnittlich 79 Prozent der intakten Gegenseite ermittelt, die durchschnittliche Torsionssteifigkeit lag bei 91 Prozent der intakten Gegenseite. Das maximale Torsionsmoment lag deutlich, die Steifigkeit tendenziell höher als in der M-Fixateurgruppe. Die mit einem kraniomedialen Fixateur versorgte osteotomierte Tibia war nach neun Wochen im Durchschnitt deutlich stabiler als die mit einem medialen Fixateur stabilisierten osteotomierten Tibiae.

Das histologische Bild des Kallus glich nach neunwöchiger Ausheilungszeit demjenigen der M-Fixateurgruppe, Unterschiede waren nur histomorphometrisch in der Größe der Kallusfläche auszumachen. Die KM-Fixateurgruppe wies durchschnittlich eine kleinere Kallusfläche auf. Da die absoluten Werte für die Fläche von mineralisiertem Knochen und Bindegewebe ebenfalls niedriger waren, resultierte eine vergleichbare prozentuale Verteilung (Abb. 4.3.-20). Die Dichte des knöchernen Kallus wurde mit durchschnittlich 79 Prozent gemessen und lag fünf Prozentpunkte unter der des kortikalen Knochens.

Die mittels unaufgebohrter **Marknagelung** fixierten osteotomierten Tibiae zeigten eine initiale Kompressionssteifigkeit in axialer Richtung von durchschnittlich 56 Prozent, die durchschnittliche Torsionssteifigkeit lag gar nur bei 39 Prozent der vom medialen Fixateur erreichten. Die unaufgebohrte Marknagelung erwies sich also als deutlich weniger stabil als die beiden verwendeten externen Fixateure.

Die biomechanische Testung der osteotomierten Tibiae nach neun Wochen Ausheilungszeit ergab ein durchschnittliches maximales Torsionsmoment von 54 Prozent desjenigen der intakten Gegenseite, der Durchschnitt der Torsionssteifigkeit lag bei 74 Prozent derjenigen der intakten Gegenseite. Das Torsionsmoment ist bei den Tibiae der UTN-Gruppe deutlich niedriger als das durch den medialen Fixateur erreichte, die Torsionssteifigkeit erreicht ähnliche Werte. Die Werte beider Parameter lagen in der Nagel-Gruppe deutlich niedriger als die der KM-Fixateurgruppe. Somit war nicht nur die Steifigkeit des initialen Osteosynthesverbundes deutlich geringer ausgeprägt als bei den Fixateuren versorgten Tibiae, sondern auch die Steifigkeit des Regeneratgewebes nach der neunwöchigen Ausheilungszeit.

Das histologische Bild der Regeneration in der Nagel-Gruppe war charakterisiert durch seine Uneinheitlichkeit. Einzelne Gewebetypen belegten größere, gut gegeneinander abgegrenzte Areale. So bestand der Kallus insbesondere aus großen Arealen von Bindegewebe und mineralisiertem Knochen. Das Bindegewebe war z. T. aufgelockert und mit Entzündungszellen durchsetzt. Die Kortikalis ist besonders endostal osteolytischen Prozessen anheim gefallen, die Ränder wirkten scharf und schartig, die Kortikalis aufgelockert (Abb. 4.4.-1, -3 und -5). Die Überbrückung des Osteotomiespalts erfolgte uneinheitlich und selten komplett. Histomorphometrisch wiesen die mittels eines unaufgebohrten Marknagel behandelten osteotomierten Tibiae eine ähnlich große Kallusfläche auf wie die mit einem externen Fixateur therapierten Tibiae. Allerdings war der Anteil an mineralisiertem Knochen im Vergleich zu den beiden Fixateurgruppen deutlich geringer, die Fläche mit überwiegend Bindegewebe aufgefüllt (Abb. 4.4.-20). Die Unterschiede in den Knochen- und Bindegewebsflächen im Vergleich mit beiden Fixateurgruppen waren statistisch signifikant. Der Anteil an Knorpelgewebe war zwar etwas höher als bei beiden Fixateuren, dieses war statistisch jedoch nicht abzuschließen. Diese unterschiedliche gewebliche Zusammensetzung des Kallus ist in Abbildung 4.4.-20 dargestellt. Sehr deutlich ist zu erkennen, dass der Kallus der Nagel-Gruppe beinahe zu gleichen Teilen aus Bindegewebe und Knochengewebe besteht, während in den Fixateurgruppen das Knochengewebe weit mehr als drei Viertel des

Kallus ausmacht. Die Dichte des kallösen Knochens in den mit einem Marknagel versorgten Tibiae betrug 81 Prozent und lag damit etwa zehn Prozentpunkte unter der des kortikalen Knochens.

