

**Eine retrospektive radiologische Fall-Kontroll-Studie
über die operative Behandlung der
Kahnbeinpseudarthrose**

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin

der Medizinischen Fakultät
der Eberhard Karls Universität
zu Tübingen

vorgelegt von
Götz, Marilena

2015

Dekan

Professor Dr. med. I.B. Authenrieth

1. Berichterstatter:

Professor Dr. med. H.-E. Schaller

2. Berichterstatter:

Professor Dr. med. C. Bahrs

Meiner Familie

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	5
1 Einleitung.....	6
1.1 Hintergrund und Fragestellung	6
1.2 Anatomie des Kahnbeins	8
1.3 Gefäßversorgung des Kahnbeins	10
1.4 Die Kahnbeinfraktur	12
1.5 Klinische Symptome der frischen Kahnbeinfraktur	16
1.6 Die Pseudarthrose des Kahnbeins	16
1.6.1 Ursachen der Kahnbeinpseudarthrose.....	16
1.6.2 Einteilung der Kahnbeinpseudarthrose	17
1.6.3 Bedeutung der Kahnbeinpseudarthrose.....	18
1.6.4 Klinik der Kahnbeinpseudarthrose	20
1.6.5 Behandlung der Kahnbeinpseudarthrose	20
2 Patienten und Methoden.....	22
2.1 Das Patientengut	22
2.2 Operationstechniken	24
2.2.1 Konventionelle Pseudarthrosenresektion mit Beckenkammspan-interposition	24
2.2.2 Pseudarthrosenversorgung mit vaskularisiertem Radiusspan	24
2.3 Nachbehandlung.....	26
2.4 Auswertungskriterien	27
3 Ergebnisse.....	28
3.1 Anwendungsgebiete des vaskularisierten Radiusspan	41
3.2 Vorschlag eines Algorithmus zur Behandlung der Kahnbeinpseudarthrose	42
3.3 Gesamtergebnisse.....	45
4 Diskussion.....	47
5 Zusammenfassung	53
6 Literaturverzeichnis	54
7 Veröffentlichung.....	59
Eidesstattliche Erklärung und Danksagung	60

Abkürzungsverzeichnis

A.	Arteria
al.	alii
CT	Computertomographie
DISI	dorsal intercalated segmental instability
ICSRA	intercompartmental supraretinacular artery
K-Draht	Kirschnerdraht
M.	Musculus
MRT	Magnetresonanztomographie
R.	Ramus
S.	Seite
SLAC	scapholunate advanced carpal collapse
SNAC	scaphoid nonunion advanced carpal collapse

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Fragestellung

Diese retrospektive radiologische Fall- Kontroll- Studie über die operative Behandlung der Kahnbeinpseudarthrose in der Klinik für Hand-, Plastische, Rekonstruktive und Verbrennungschirurgie (HPRV) der Berufsgenossenschaftlichen Unfallklinik Tübingen stellt die Fälle von 286 Patienten in dem Zeitraum von 2000 bis 2010 dar.

Anhand dieser Arbeit sollen die Ergebnisse der verschiedenen operativen Behandlungsmethoden der Kahnbeinpseudarthrose miteinander sowie mit der aktuellen Literatur verglichen werden. Daraus hervorgehend soll ein Behandlungsalgorithmus für jegliche Form der Kahnbeinpseudoarthrose dargelegt werden.

Die Kahnbeinfraktur ist die häufigste Fraktur der Handwurzel. Die Spontanheilungsrate von Kahnbeinfrakturen ist durch fehlende Zahlen und Röntgenverläufe nicht zu belegen. Trotz Einzelfallbeobachtungen von spät diagnostizierten (teil-)konsolidierten Frakturen kommt es aufgrund der besonderen Anatomie und Gefäßversorgung (Gelberman and Menon 1980) nicht selten zur Ausbildung einer Pseudarthrose (Betsch, Jungbluth et al. 2010). Die frische, unverschobene Fraktur im mittleren Drittel fällt laut aktuellen Studien weiterhin in die Domäne der konservativen Behandlung im Unterarmgipsverband, mit üblichen Ruhigstellungszeiten von 6 bis 12 Wochen (Dias, Dhukaram et al. 2008). Obwohl sowohl die konservative als auch die operative Behandlung gleiche Ausheilungsraten zeigen, liegt der Vorteil der perkutanen Herbert-Schrauben-Osteosynthese in einer frühzeitigen Mobilisierungsfähigkeit und damit verbunden in einer schnelleren Arbeitsfähigkeit (McQueen, Gelbke et al. 2008).

Bei dislozierten, verspätet diagnostizierten Frakturen und Frakturen des proximalen Kahnbeindrittels gelten moderne Osteosyntheseverfahren mit kanülierten Schrauben als Methode der Wahl (Kuntscher, Trankle et al. 2001). Trotzdem

wird auch nach operativer Versorgung die Pseudarthrosenrate in der Literatur mit bis zu 10% (Nakamura 2000) angegeben. Die mögliche Ausbildung einer Pseudarthrose hängt von der Frakturstellung, der dreidimensionalen Orientierung der Fragmente (Ring, Jupiter et al. 2000) sowie der Operationstechnik ab. Weitere Faktoren, die eine Pseudarthrosenausbildung begünstigen, sind Verzögerungen des Behandlungsbeginns (Cooney, Dobyns et al. 1980), Dislokation der Frakturteile (Cooney, Linscheid et al. 1988), Frakturen im proximalen Kahnbeinpol (Fernandez 1984) und die avaskuläre Nekrose des proximalen Pols (Robbins, Ridge et al. 1995). Eine schlechte Schraubenlage mit wenig oder gar keiner Kompression ist eine häufige Ursache einer Knochenheilungsstörung (Leslie and Dickson 1981).

Eine besondere Herausforderung stellen Frakturen des proximalen Kahnbeinpol dar. Trotz Anwendung kanülierter Schraubensysteme mit oder ohne Spongiosaplastik ist die Ausbildung einer Pseudarthrose mit avaskulärer Nekrose des proximalen Pols eine gefürchtete Komplikation. Die Einführung der vaskularisierten Radiusspäne ermöglicht es, auch in solchen Fällen eine Ausheilung zu erzielen. In der Literatur werden multiple Operationstechniken mit palmaren und dorsalen gestielten vaskularisierten Radiusspänen beschrieben (Kawai and Yamamoto 1988; Zaidenberg, Siebert et al. 1991; Schaller, Lassner et al. 1993; Yuceturk, Isiklar et al. 1997; Mathoulin and Haerle 1998; Haerle 2002; Steinmann, Bishop et al. 2002; Straw, Davis et al. 2002; Sawaizumi, Nanno et al. 2003; Chen, Chao et al. 2006; Durmus 2006; Malizos, Zachos et al. 2007; Jaminet, Werdin et al. 2012). Diese werden im Verlauf dieser Arbeit noch ausführlicher beschrieben. Auch die Revaskularisierung des proximalen Kahnbeinpol mit Zuleitung eines Gefäßbündels (Fernandez and Egli 1995) sowie mit gefäßgestieltem Perioststreifen (Schaller, Lassner et al. 1993; Thompson, Kapoor et al. 2008) wurden beschrieben. Zuletzt sind die aufwendigeren freien Knochentransplantate (Gabl, Reinhart et al. 1999; Doi, Oda et al. 2000) sowie die Knochen-Knorpel-Transplantate (Kalicke, Burger et al. 2008) zu nennen.

1.2 Anatomie des Kahnbeins

Das Kahnbein (Os scaphoideum) ist in seiner Form länglich schlank und nach distal und ulnar etwas eingebogen (Schmidt and Lanz 1992). Seine anatomischen Strukturen gehen von dem distal gelegenen Tuberculum über die davon abzugrenzende Tuberositas, die Kahnbeintaille und den Corpus in den proximalen Pol über (Abbildung 1).

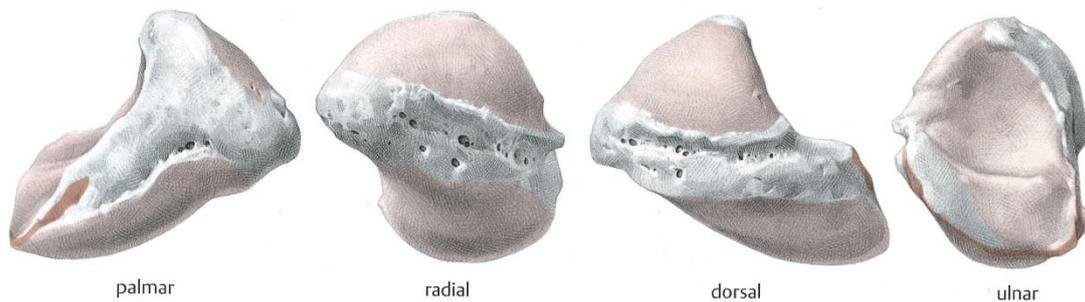


Abbildung 1: Anatomie des Kahnbeins (aus Schmidt H., Lanz U.: Handgelenksregion, Os scaphoideum. In Chirurgische Anatomie der Hand, 2. überarbeitete und aktualisierte Ausgabe, Stuttgart, Georg Thieme Verlag, 2003, S. 46)

Die mit Knorpel überzogenen, konvex und konkav gekrümmten Gelenkflächen des Kahnbeins haben Berührungspunkte mit dem Os lunatum, trapezium, trapezoideum, capitatum und mit dem Radius. Über die, im Verhältnis zur Knochenoberfläche schmalen, knorpelfreien Areale hingegen, treten zahlreiche und unterschiedlich große Gefäße in das Kahnbein ein. Diese Areale nehmen etwa ein Viertel der Kahnbeinoberfläche ein und die Eintrittspforten der Gefäße liegen an der palmaren, radialen sowie dorsalen Seite des Kahnbeins (Taleisnik and Kelly 1966; Gelberman and Menon 1980). Über die dorsale Knochenkante treten die Gefäße für den proximalen Pol und die daran anschließenden 70-80% ein. Dahingegen versorgen die palmaren Äste der A. radialis und ihr R. palmaris superficialis das Tuberculum und die distalen 20-30%. Nach Gelberman und Menon (1980) bestehen keine intraossären Anastomosen zwischen den beiden Versorgungsgebieten (Gelberman and Menon 1980). Das Ligamentum radioscapnocapitatum verläuft palmarseitig und setzt teilweise an der

Kahnbeintaille an. Für die Sehne des M. flexor carpi radialis dient das Tuberculum ossis scaphoidei als Hypomochlion (Schmidt and Lanz 1992).

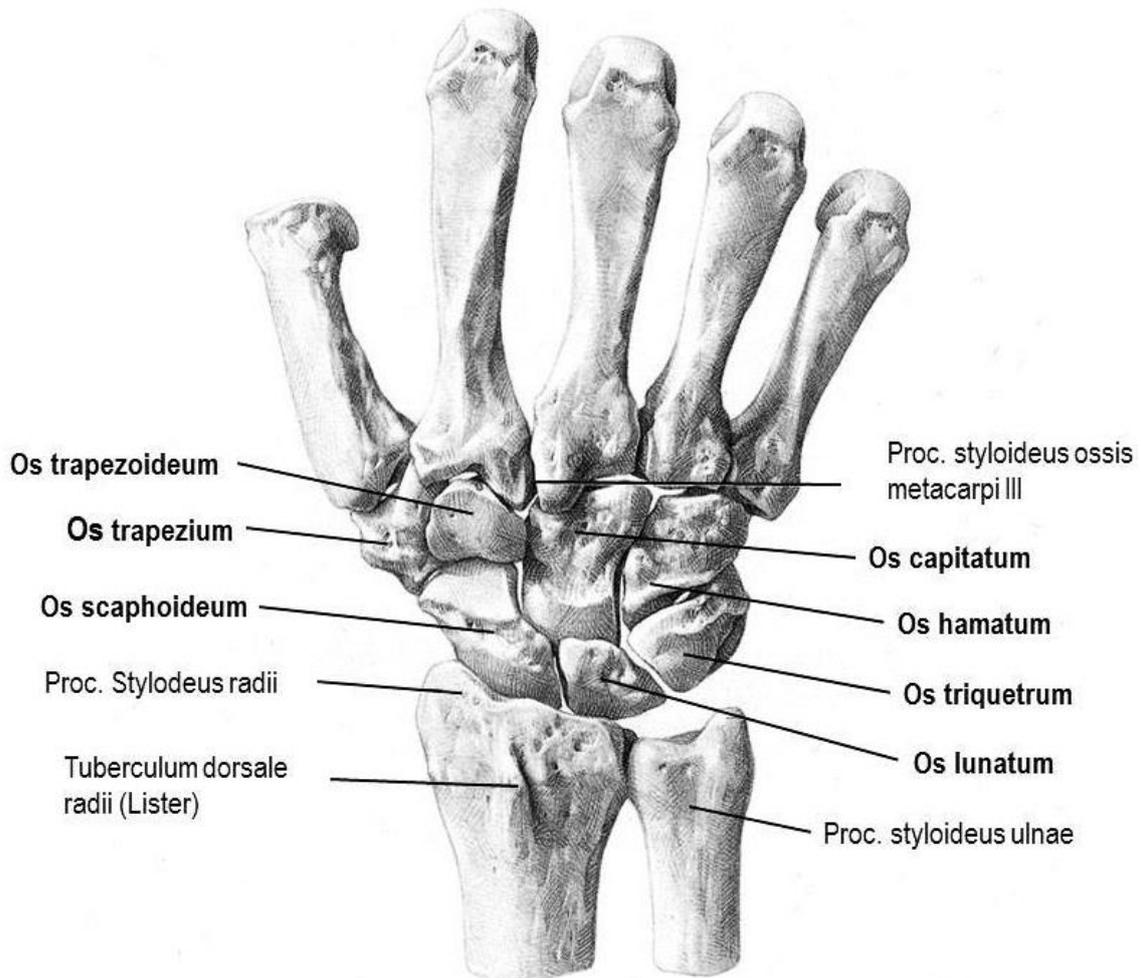


Abbildung 2: Die Handwurzelknochen und die schematische Darstellung ihrer Beziehung zum Kahnbein von dorsal aus (adaptiert nach Schmidt H., Lanz U.: Handgelenksregion, Skelett der Handwurzel, In Chirurgische Anatomie der Hand, 2. überarbeitete und aktualisierte Ausgabe, Stuttgart, Georg Thieme Verlag, 1992, S. 44)

1.3 Gefäßversorgung des Kahnbeins

Taleisnik et al. haben durch Versuche mit Mikroskopie und Gefäßinjektionspräparaten herausgearbeitet, dass die Blutversorgung des Kahnbeins in eine extraossäre und eine intraossäre Gruppe eingeteilt werden kann (Taleisnik and Kelly 1966).

Die extraossäre Gefäßversorgung stammt aus den Ästen der A. radialis, die durch ihren dorsalen Kahnbeinast und durch ihren Ramus palmaris superficialis mit seinen Kahnbeinästen das Kahnbein von distal penetrieren. Die Blutversorgung des proximalen Teils erfolgt hauptsächlich intraossär und retrograd, welche bei Brüchen im Tailenbereich des Kahnbeins oftmals unterbrochen und konsekutiv zu einer avaskulären Nekrose des proximalen Pols führen kann.

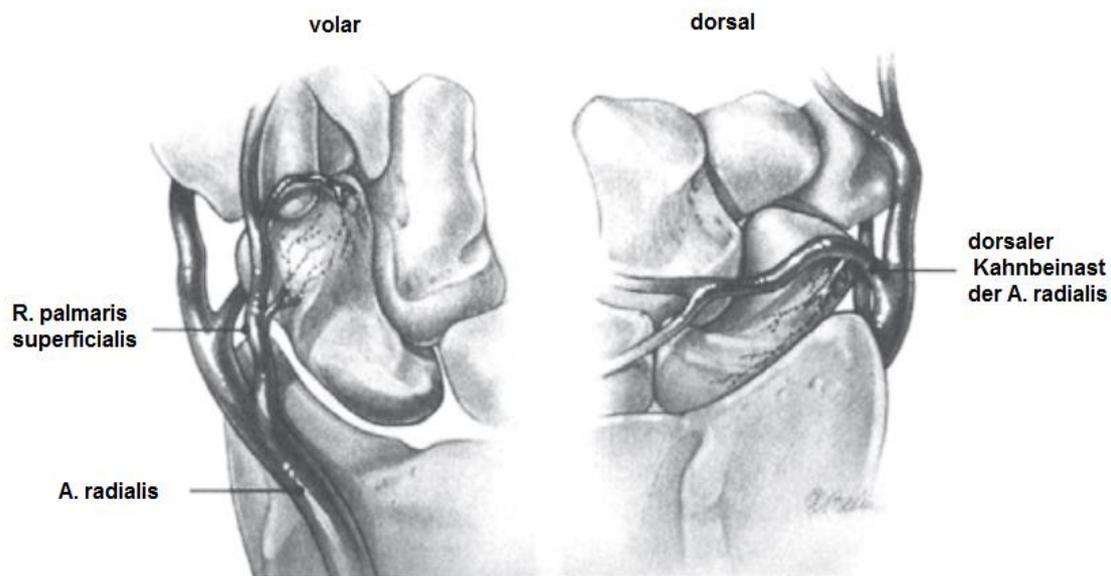


Abbildung 3: Die Blutversorgung des Kahnbeins (aus Amadio PC, Taleisnik J: Fractures of the carpal bones. In Green DP [ed]: Operative Hand Surgery, 3rd ed. New York, Churchill Livingstone, 1993, p 801.)

Es wurden drei Hauptgruppen für die wesentliche intraossäre Versorgung des Kahnbeins gefunden.

Die lateropalmare Gruppe, die die wichtigsten Gefäße zur intraossären Blutversorgung enthält, tritt palmar und lateral zur Artikulationsfläche mit dem Radius in

das Kahnbein ein und versorgt vor allem die proximalen 2/3 des Kahnbeins. Diese großkalibrigen Gefäße verzweigen sich arkadenförmig nach dem Eintritt in den Knochen und werden in der Peripherie immer kleiner.

Die dorsale Gruppe penetriert das Kahnbein über die schmale und geriffelte Seite dorsal und versorgt ebenfalls hauptsächlich die proximalen 2/3 des Kahnbeins.

Die distale Gruppe besteht aus kleineren Gefäßen und versorgt nur einen umschriebenen Anteil im Bereich des Tuberculum.

An nur einem von elf Präparaten konnte ein proximales Gefäß mit sehr geringer intraossärer Länge von Taleisnik et al. dargestellt werden.

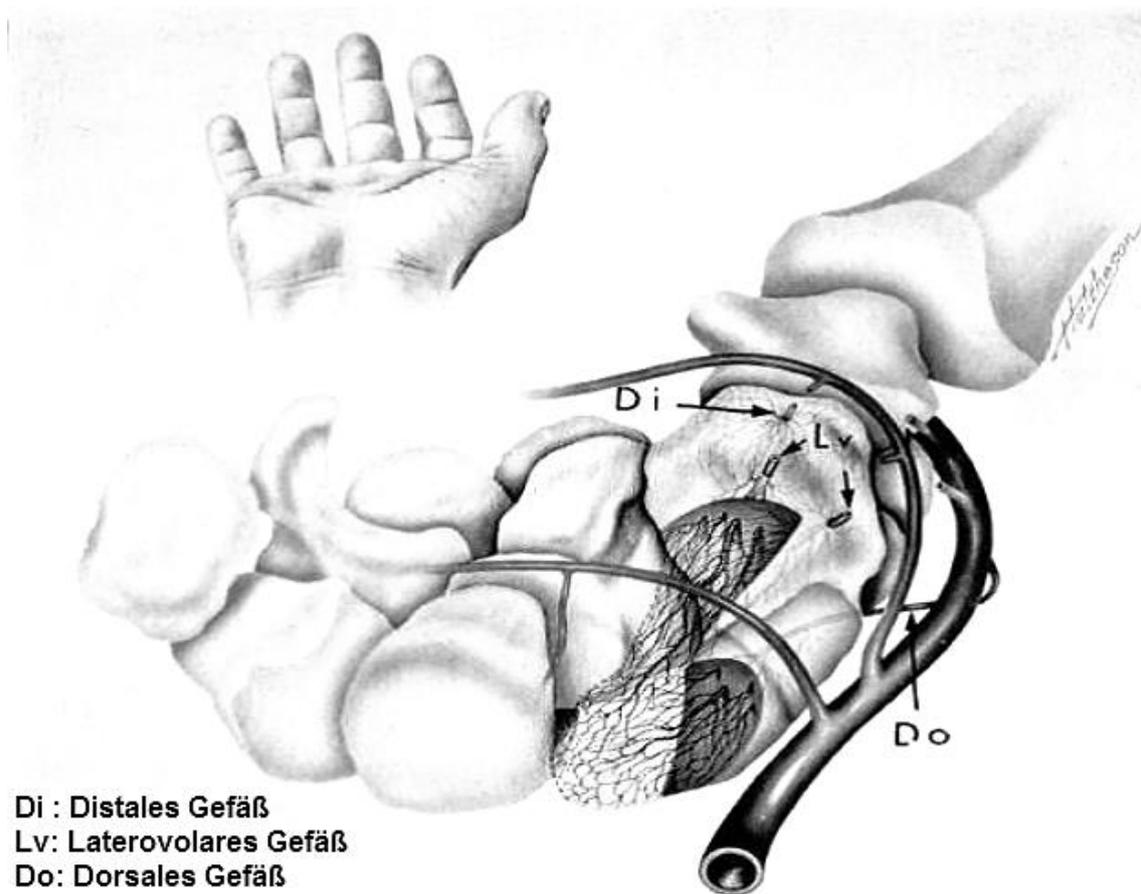


Abbildung 4: Idealisierte Darstellung der extra- und intraossären Blutversorgung des Kahnbeins (aus Taleisnik, J., Kelly, P: The extraosseous and intraosseous blood supply of scaphoid bone, 1966)

Außerdem wurden zahlreiche kleinere Gefäße beschrieben, die von dorsal in den Taillenbereich des Kahnbeins einsprießen und aus dem dorsalen Hohlhandbogen sowie dem dorsalen Kahnbeinast der A. radialis entspringen. Diese verzweigen sich subperiostal und subchondral arkadenartig und verzüngen sich peripherwärts immer weiter.

1.4 Die Kahnbeinfraktur

Die Kahnbeinfraktur (Synonym: Scaphoidfraktur) ist die häufigste Fraktur (ca. 80 %) der Handwurzelknochen (Leslie and Dickson 1981) und entsteht fast ausschließlich durch indirekte Gewalteinwirkung bei Sturz auf die extendierte Hand (Bohler, Trojan et al. 1954). Sie ist eine typische Fraktur junger Erwachsener mit deutlicher Bevorzugung des männlichen Geschlechts.

Man kann zwischen frischen und älteren Frakturen beziehungsweise zwischen stabilen und instabilen Frakturen unterscheiden. Wird die Diagnose der Kahnbeinfraktur innerhalb von 6 Wochen nach dem ursächlichen Trauma gestellt, bezeichnet man diese als frische Fraktur. Andernfalls wird sie als alte Fraktur bezeichnet. Stabile Brüche werden als solche bezeichnet, wenn sich die Stellung der Fragmente in Ruhe oder Bewegung nicht verändert. Bei Verkippung der Fragmente wird der Bruch als instabil bezeichnet. Mehrfragment- sowie Trümmerfrakturen und Frakturen des proximalen Pols sind prinzipiell als instabil anzusehen.

Es wurden verschiedene Klassifikationen der Kahnbeinfraktur vorgeschlagen, bei denen die Lage und der Verlauf der Fraktur im Kahnbein, die Stabilität der Fragmente oder der Heilungsverlauf als führende Merkmale die Grundlage der Klassifizierung waren.

Kahnbeinfrakturen können nach Böhler et al entsprechend ihrer **Lokalisation**, wie in Abbildung 5 dargestellt, eingeteilt werden (Bohler, Trojan et al. 1954). Brüche des mittleren Drittels (70%) sind weitaus häufiger als die des distalen

(10%) oder des schlecht durchbluteten proximalen Drittels (20%) (Bohler, Trojan et al. 1954; Russe 1960; Leslie and Dickson 1981; Schubert 2000). Dies lässt sich durch den Pathomechanismus des Hyperextensionstraumas der Hand erklären, bei dem vor allem das mittlere, taillierte Drittel des Kahnbeins hohen Biegekräften ausgesetzt wird und deshalb die Fraktur dort am häufigsten lokalisierbar ist. Außerdem beschreibt er auch Frakturen in der sehr weit distal gelegenen Tuberositas, die aber in seiner Studie keine Berücksichtigung fanden.

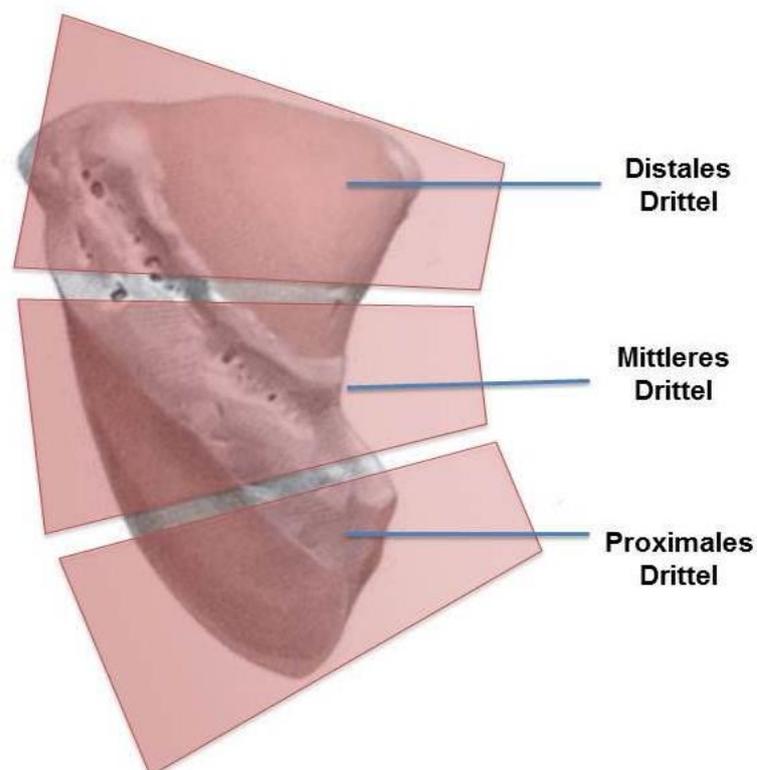


Abbildung 5: Einteilung der Kahnbeinfraktur nach Böhler

Eine weitere Einteilung nach Trojan berücksichtigt den **Frakturverlauf** (Bohler, Trojan et al. 1954), der schematisch in Abbildung 6 dargestellt wird. Dabei wird der Bruchspaltverlauf, in Anlehnung an die Einteilung der Schenkelhalsfrakturen in Pauwels I-III, in horizontal-schräge, quer verlaufende und vertikal-schräge Frakturen eingeteilt. Diese Einteilung ist von therapeutischer Konsequenz, da die Instabilität und somit das Pseudarthrosrisiko von den horizontal-schrägen über die quer verlaufenden zu den vertikal-schrägen Frakturverläufen stetig zunimmt.

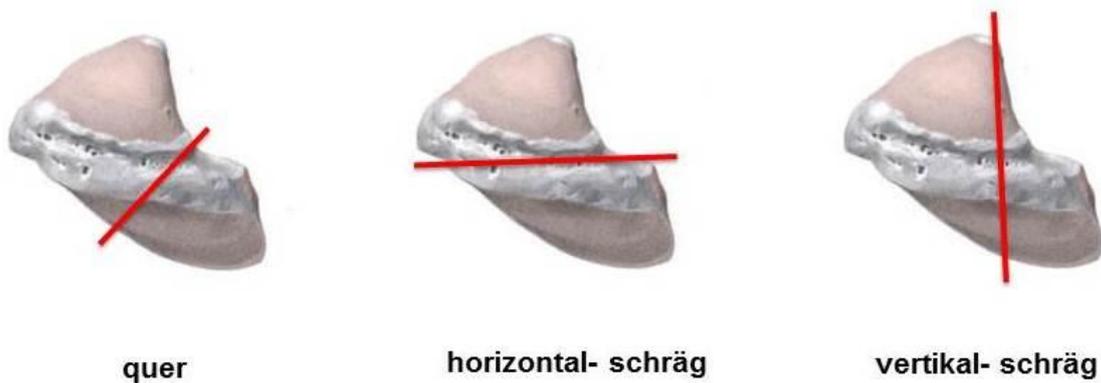


Abbildung 6: Einteilung der Kahnbeinfraktur nach Trojan

Die derzeit gebräuchlichste Klassifikation nach **Herbert** fasst Frakturen und Pseudarthrosen in vier Hauptgruppen (A-D) zusammen, wie in Abbildung 7 dargestellt. Diese werden dann in Subgruppen weiter differenziert. Bei den Frakturtypen A und B handelt es sich um frische Frakturen.

Typ A: stabile Frakturen

- A1: Frakturen durch das Tuberculum
- A2: inkomplette Fraktur der Kahnbeintaille (Waist)

Typ B: instabile Frakturen

- B1: distale Schrägfraktur
- B2: komplette Fraktur der Kahnbeintaille (Waist)
- B3: proximale Polfraktur
- B4: transscaphoidale perilunäre Luxationsfraktur

Typ C: verzögerte Heilung (delayed union): verzögert heilender Bruch jeglicher Lokalisation (keine Zeichen knöcherner Konsolidierung im Zeitraum 3 bis 6 Monate nach Behandlungsbeginn).

Typ D: Pseudarthrose (nonunion)

Für die Pseudarthrose unterscheidet Herbert weitere fünf Untergruppen, wie in Abschnitt 1.6.2 beschrieben.

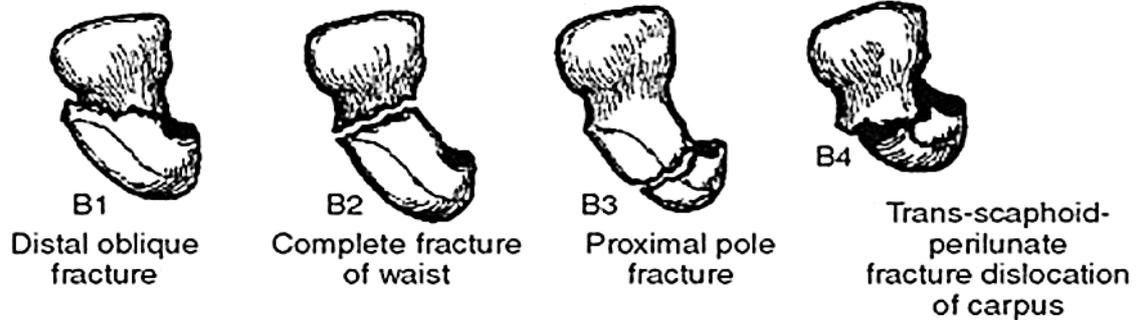
Diese Unterscheidung in stabile und instabile Frakturen beinhaltet die Frakturlokalisation, den Frakturverlauf, das Dislokationsausmaß sowie die Anzahl der

Fragmente und die eventuelle Einbeziehung der Kahnbeinfraktur in eine komplexere Handwurzelluxationsfraktur.

TYPE A:
Stable acute fractures



TYPE B:
Unstable acute fractures



TYPE C:
Delayed union



TYPE D:
Established nonunion

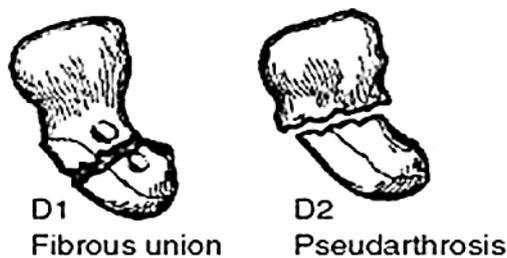


Abbildung 7: Die Herbert Klassifikation der Kahnbeinfraktur (aus Amadio PC, Taleisnik J: Fractures of the carpal bones. In Green DP [ed]: Operative Hand Surgery, 3rd ed. New York, Churchill Livingstone, 1993, p 801.)

1.5 Klinische Symptome der frischen Kahnbeinfraktur

Zu den klinischen Symptomen einer frischen Kahnbeinfraktur gehören Schmerzen im Handgelenk und eine schmerzhaft eingeschränkte Beweglichkeit bei Dorsalextension und Radialduktion des Handgelenks. Zudem ist oft ein Druckschmerz über der, häufig auch geschwollenen, Tabatière auslösbar und die zumeist dorsal radiale Konkavität des Handgelenks ist verstrichen. Außerdem besteht bei Radialduktion oder Daumenbewegung sowie bei Stauchung des ersten und zweiten Strahls gegen die Handwurzel oft ein lokalisierbarer Schmerz. Die Klinik kann aber bei einer frischen Kahnbeinfraktur auch sehr blande ausfallen und diese kann initial kaum bis keine Beschwerden verursachen.

1.6 Die Pseudarthrose des Kahnbeins

1.6.1 Ursachen der Kahnbeinpseudarthrose

Trotz Einzelfallbeobachtungen von spät diagnostizierten (teil-)konsolidierten Frakturen kommt es aufgrund der besonderen Anatomie und Gefäßversorgung (Gelberman and Menon 1980) nicht selten zur Ausbildung einer Pseudarthrose (Betsch, Jungbluth et al. 2010). Das Kahnbein wird vorwiegend über Gefäße versorgt, die von distal über die Tuberositas eintreten. Dies führt insbesondere bei weit proximal gelegenen Frakturen zu Durchblutungsstörungen des proximalen Fragments. Diese Minderversorgung kann neben der Pseudarthrose auch zur Nekrose des proximalen Fragments führen (Russe 1960; Cooney, Dobyns et al. 1980; Cooney, Linscheid et al. 1988).

Weitere Umstände wie verspäteter Behandlungsbeginn, verschobene Frakturfragmente sowie Fraktur und avaskuläre Nekrose des proximalen Kahnbeinpols begünstigen eine ausbleibende knöcherne Konsolidierung (Fernandez 1984; Robbins, Ridge et al. 1995). Zum einen begibt sich der Patient oft nicht sofort in ärztliche Behandlung, da das Leitsymptom Schmerz bagatellisiert wird und die

initialen, durch Fraktur und Hämarthros bedingten Schmerzen, nach kurzer Zeit abklingen. Unter Umständen sucht der Patient erst nach Wochen, bei neu auftretenden Beschwerden, einen Arzt auf. Zum anderen kann eine unzureichende Diagnostik der Grund für die Ausbildung einer Pseudarthrose sein, da mitunter der Frakturspalt unmittelbar nach dem Trauma, im konventionellen Röntgen oft nur schwer bis nicht darstellbar ist. Als sicherste radiologische Methode, und maßgebend für die weitere Therapieplanung gilt daher die Computertomographie der Handwurzel mit Dünnschichttechnik (Krimmer, Schmitt et al. 2000; Ring, Jupiter et al. 2000). Ebenso kann eine inadäquate konservative oder operative Therapie mit zu kurzer Ruhigstellungszeit oder fehlerhafter operativer Maßnahme, die Ursache einer fehlenden knöchernen Durchbauung sein.

1.6.2 Einteilung der Kahnbeinpseudarthrose

Wie bereits oben erwähnt, werden die Pseudarthrosen nach Herbert noch einmal differenziert in der Gruppe D eingeteilt (Herbert and Filan 1999).

Hauptgruppe Typ D: Pseudarthrose (nonunion)

- D1: Straffe, fibröse Überbrückung der Pseudarthrose (fibrous nonunion) ohne karpalen Kollaps und degenerative Zeichen
- D2: Pseudarthrose ohne Dislokation, geringe pathologische Beweglichkeit und geringer karpaler Kollaps
- D3: Pseudarthrose mit mäßiger Dislokation, verstärkte pathologische Beweglichkeit, resorptive Veränderungen, deutlicher karpaler Kollaps (DISI – dorsal intercalated segmental instability), klinisch eingeschränkte Funktion des Handgelenks, radiologisch manifeste Arthrosezeichen
- D4: Pseudarthrose mit erheblicher Dislokation der einzelnen Fragmente, starke resorptive Veränderungen, erhebliche radiokarpale Arthrose, fixierter karpaler Kollaps, klinisch eingeschränkte Funktion des Handgelenks
- D5: Pseudarthrose mit erheblicher Dislokation und zunehmendem Verfall des proximalen Fragments (ischämische Nekrose), fortgeschrittene Arthrose, fixierter karpaler Kollaps, klinisch zunehmende Einschränkung der Handgelenksbeweglichkeit

1.6.3 Bedeutung der Kahnbeinpseudarthrose

Die Kahnbeinpseudarthrose besteht aus den alten, sich verdichtenden und schließlich sklerosierten Frakturflächen und bildet sich ohne operative Sanierung nicht zurück.

Das Kahnbein, durch Knochenresorption verkürzt und in einer palmar flektierten Stellung, agiert nun mit seinen beiden Fragmenten wie ein eigenes Gelenk, unabhängig von der übrigen Handwurzel. Außerdem ist das frakturierte Kahnbein durch seine Bandverbindungen zu den benachbarten Handwurzelknochen rotierenden und kippenden Kräften ausgesetzt. Dadurch geht die ursprünglich stabilisierende Rolle des Kahnbeins zwischen der proximalen und distalen Handwurzelreihe verloren. Diese Fehlstellung im Handwurzelgefüge, bei der das Kahnbein nach palmar abkippt und das Mondbein eine nach ventral verschobene, dorsal flektierte Stellung einnimmt, bezeichnet man als DISI (dorsal intercalated segment instability). Dabei vergrößert sich der scapholunäre Winkel auf über 70° (physiologisch 45°), die longitudinale Achse durch Radius und Kopfbein liegt nicht mehr auf einer Linie und das Kopfbein kippt im Verhältnis zum Radius nach palmar. Der radiolunäre Winkel vergrößert sich auf über 15° , während der kapitolunäre Winkel negativ wird (Linscheid, Dobyns et al. 1972). Radius, Kopfbein und Mondbein befinden sich nun nicht mehr in einer Ebene, sondern sind stattdessen ineinander verschoben.

Smith et al. haben die Effekte eines künstlich osteotomierten Kahnbeins auf die Stabilität des Handwurzelgefüges untersucht und beschreiben die veränderte Mechanik mit einer, voneinander unabhängigen Reaktion der Fragmente auf äußere Kräfte (Smith, Cooney et al. 1989). Das distale Fragment kippt vorwiegend nach palmar ab, während der mit dem Mondbein verbundene proximale Anteil eine mehr dorsal flektierte Stellung einnimmt. Die beiden Hälften des frakturierten Kahnbeins bilden durch die oben genannten biomechanischen Krafteinwirkungen einen Knick aus. Die daraus resultierende Fehlstellung der beiden Hälften des Kahnbeins, die sogenannte „humpback-Deformität“, bedarf einer operativen Korrektur (Smith, Cooney et al. 1989). Bei frischen Frakturen

wird dabei das Kahnbein aufgerichtet und bei älteren, in Fehlstellung verbliebenen Frakturen oder Pseudarthrosen wird neben der Pseudarthrosenanierung und Korrektur der Humpbackdeformität nach Aufrichtung ein Knochenspan eingesetzt. Bei nicht ausreichender Aufrichtung der Fragmente durch einen operativen Eingriff kommt es zu keiner Ausheilung („nonunion“) oder einer Ausheilung in Fehlstellung der Fragmente („malunion“) (Barton 1992). Eine nicht, oder nur symptomatisch behandelte Kahnbeinpseudarthrose führt in der Regel im Verlauf von Jahren zu einer karpalen Arthrose und zu einer Invalidisierung des Patienten.

Durch das Bestehen einer instabilen Kahnbeinpseudarthrose über längere Zeit kommt es zu einem Zusammenbrechen des karpalen Gefüges, dem sogenannten karpalen Kollaps. Hierbei kommt es durch die Verkippung des distalen Kahnbeinfragments nach palmar zur Verkantung und Reduktion der Kontaktflächen zum Radius. Damit beginnt die Arthrose am Processus styloideus radii und breitet sich anschließend zwischen distalem Fragment und Radius aus.

Zur Stadieneinteilung der Arthrose nach Watson und Ruy (1966) siehe auch Tabelle 1. Dieser karpale Kollaps mit konsekutiver Arthrose wird bei bestehender Kahnbeinpseudarthrose als SNAC- Wrist (scaphoid nonunion advanced collaps) bezeichnet.

Ebenso führt die scapholunäre Dissoziation, entstanden durch eine Ruptur des Ligamentum scapholunatum, über einen längeren Zeitraum zum karpalen Kollaps und wird als SLAC- Wrist (scapholunate advanced collaps) bezeichnet. In diesem Falle resultiert aufgrund der Flexionsstellung des Kahnbeins, die sowohl rein dynamisch als auch statisch ausgeprägt sein kann, eine Verkantung des proximalen Skaphoidpols zum Radius. Die hier beginnenden arthrotischen Veränderungen können sich im weiteren Verlauf auf den gesamten radioskaphoidalen Gelenkabschnitt ausweiten.

In fortgeschrittenem Stadium (III, siehe Tabelle 1) sowohl beim SNAC- als auch beim SLAC- Wrist entsteht, durch die dorsale Kippung des Mondbeins (DISI-Fehlstellung) bei gleichzeitigem Tiefertreten des Kapitatumkopfes, eine

Reduktion der Kontaktflächen. Dies führt zur Arthrosenbildung zwischen Kapitulumkopf und Mondbein und konsekutiv zum Übertreten der Arthrose in das Mediokarpalgelenk (Krimmer, Krapohl et al. 1997).

Tabelle 1: Stadieneinteilung SNAC-/SLAC-Wrist nach Watson und Ruy, 1966

Stadium	Arthrosenausmaß
I	Beginnende Arthrose am Processus styloideus radii
II	Ausweiten der Arthrose auf den gesamten radioskaphoidalen Gelenkabschnitt
III	Übertreten der Arthrose in das Mediokarpalgelenk

1.6.4 Klinik der Kahnbeinpseudarthrose

Bei bestehender Kahnbeinpseudarthrose können die Symptome entweder sehr diskret und nicht charakteristisch sein oder über längere Zeit komplett fehlen. Die bei Belastung zunehmenden Beschwerden äußern sich vor allem bei Dreh- und Abstützbewegungen des Handgelenks. Weitere Symptome können Kraftlosigkeit, Druckschmerz über der Tabatière sowie ein diffuser, schwer lokalisierbarer Schmerz bei passiven Bewegungen sein.

1.6.5 Behandlung der Kahnbeinpseudarthrose

Im Falle einer Kahnbeinpseudarthrose wird grundsätzlich angestrebt, die Form und Stabilität des Kahnbeins durch eine operative Sanierung wiederherzustellen, um dadurch der Arthrosebildung und der schmerzhaften Bewegungseinschränkung im Handgelenk entgegenzuwirken. Abhängig vom Stadium der Pseudarthrose und unter Berücksichtigung bestimmter Kriterien (nachfolgend aufgeführt) können gute Ausheilungsraten durch eine operative Korrektur erzielt werden.

Bei der Auswahl des Operationsverfahren, welche im Folgenden dargestellt werden, müssen bestimmte Kriterien beachtet werden: Lokalisation und Alter

der Pseudarthrose, Durchblutung und Größe der einzelnen Fragmente, Voroperationen am betroffenen Kahnbein, Vorhandensein arthrotischer Veränderungen des Handgelenks sowie der individuelle Funktionsanspruch des Patienten.

Es wird zwischen rekonstruktiven und palliativen Eingriffen unterschieden:

Rekonstruktive Verfahren

Bei den rekonstruktiven Verfahren versucht man, die Morphologie und Stabilität des Kahnbeins wiederherzustellen. Sie können dann zum Einsatz kommen, wenn die knöcherne Wiederherstellung bei fehlender Arthrose möglich ist. Hierzu zählen:

- Herbertschraube mit Spongiosaplastik oder kortikospongiösem Beckenkammspan
- Gefäßgestielte Knochenspäne vom distalen Radius
- Mikrovaskulär gestielter, freier Span vom Femurkondylus

Palliative Verfahren

Diese sogenannten Rettungsoperationen kommen zum Einsatz, wenn das Kahnbein aufgrund von Arthrose oder karpalem Kollaps nicht mehr wieder hergestellt werden kann. Sie dienen der Schmerzreduktion bei angestrebter Erhaltung einer Teilfunktion und sollen den Totalkollaps des Handwurzelgefüges verhindern. Hierzu zählen:

- Denervation des Handgelenks nach Wilhelm (rein symptomatisch)
- Mediokarpale Teilarthrodese mit Resektion des Kahnbeins (four corner fusion, d.h. 4-Ecken-Arthrodese zwischen Capitatum, Lunatum, Hamatum und Triquetrum)
- Resektion der proximalen Handwurzelreihe
- Vollständige Handgelenksarthrodese (Panarthrodese)
- Styloidektomie am Radius
- Resektionsarthroplastik (Fragmentresektion und interponierter Platzhalter)

Auf einige der oben genannten operativen Verfahren wird unter Berücksichtigung unseres Patientengutes und der damit verbundenen Auswahl bestimmter Eingriffe näher im Kapitel „Patienten und Methoden“ eingegangen.

2 Patienten und Methoden

2.1 Das Patientengut

In dem Zeitraum zwischen 2000 und 2010 wurden fortlaufend 286 Patienten mit Kahnbeinpseudarthrose in der Klinik für Hand-, Plastische, Rekonstruktive und Verbrennungschirurgie (HPRV) der Berufsgenossenschaftlichen Unfallklinik Tübingen operiert. Alle Patienten hatten eine persistierende Pseudarthrose länger als 6 Monate. Die Patienten mit einer fortgeschrittenen karpalen Arthrose oder karpalem Kollaps wurden aus der Studie ausgeschlossen, ebenso wie Patienten, die sich sekundär sogenannten Palliativoperationen unterziehen mussten. 258 der Patienten waren männlich und 28 Patienten weiblich. Das durchschnittliche Alter betrug 26 Jahre in einer Altersspanne von 13 bis 71 Jahren.

Die Kahnbeinpseudarthrose wurde bei 126 Patienten im proximalen Drittel, bei 130 Patienten im mittleren Drittel und bei 30 Patienten im distalen Drittel des Kahnbeins lokalisiert (Abbildung 13).

Präoperativ wurde bei allen Patienten standardgemäß eine Nativröntgenaufnahme des Kahnbeins in 2 Ebenen sowie des Kahnbeinquartetts angefertigt.

Das operative Verfahren wurde abhängig von der Lokalisation der Pseudarthrose im Kahnbein gewählt.

Kahnbeinpseudarthrosen des distalen und mittleren Drittels wurden durch die Pseudarthrosenresektion mit Interposition eines nicht-vaskularisierten kortikospongiösen Beckenkammspanns oder Beckenkammpongiosa mit anschließender Kompressionsverschraubung mit einer Herbert-Schraube (Martin Medi-

zintechnik, Tuttlingen, Deutschland) rekonstruiert. Dies gilt als das Standardverfahren zur Rekonstruktion unkomplizierter Kahnbeinpseudarthrosen.

Im Falle von persistierenden Pseudarthrosen im mittleren Drittel nach einem erfolglosen vorausgegangenen operativen Eingriff wurde ein gefäßgestielter Radiusspan gehoben und in den Pseudarthrosenbereich eingelegt. Stellte sich das Einbringen einer neuen Herbert-Schraube als schwierig bis unmöglich aufgrund von abgelaufenen Resorptionsvorgängen durch die bisherige Schraube dar, wurde der Bereich alternativ nur durch Kirschnerdrähte (K-Drähte) stabilisiert.

Bei Pseudarthrosen im proximalen Drittel oder mit kleinem proximalem Fragment war die intraoperative Beurteilung der Durchblutungssituation maßgebend für die Wahl des operativen Verfahrens und das weitere Vorgehen. Zeigten sich nach Resektion der Pseudarthrose, Anfrischen des Sklerosesaumes und Öffnen der Blutleere kleine punktförmige Blutungen aus der Spongiosa des proximalen Fragments, wurde dieses als gut durchblutet angesehen. Bei einigen der Patienten wurde präoperativ zusätzlich eine Magnetresonanztomographie zur Beurteilung der Vitalität des proximalen Fragments durchgeführt.

Handelte es sich um ein kleines proximales Fragment mit guter Durchblutung wurde ebenfalls oben genanntes Standardverfahren angewandt. Bei avaskulärem proximalem Fragment, das heißt bei ausbleibenden punktförmigen Blutungen aus der Spongiosa wurde zusätzlich zur Pseudarthrosenresektion und Beckenkammspaninterposition ein gefäßgestielter Knochenspan aus dem distalen Radius über einen palmaren oder dorsalen Zugang gehoben und in den Pseudarthrosenbereich eingebracht.

2.2 Operationstechniken

Alle Operationen wurden unter Anlegen einer Oberarm-Blutleere und lupenbrillenassistent durchgeführt.

2.2.1 Konventionelle Pseudarthrosenresektion mit Beckenkammspaninterposition

Über einen beugeseitigen oder streckseitigen Zugang (bei proximalem Fragment) wird die Pseudarthrose zunächst freigelegt und reseziert. Dies geschieht im Sinne einer planparallelen Resektion mit dem Meißel oder im Sinne einer Aushöhlung und Anfrischung der Pseudarthrose mit dem scharfen Löffel oder der Kugelfräse. Im ersten Fall wird ein kortikospongiöser Beckenkammspan interponiert, im zweiten Fall wird der Defekt mit einem rein spongiösen Knochenblock oder einer Spongiosaplastik aufgefüllt. Die Stabilisierung des Kahnbeins geschieht mit einer Herbert-Schraube (Schmidt 2004).

2.2.2 Pseudarthrosenversorgung mit vaskularisiertem Radiusspan

Bei intraoperativer Darstellung eines avaskulären proximalen Kahnbeinpols kommt der gefäßgestielte vaskularisierte Radiusspan zur Anwendung. Ein weiterer Einsatzbereich des Radiusspans stellt die Rezidiv-Pseudarthrose dar. In der Literatur sind multiple Techniken zur Hebung des Spans beschrieben (Schaller, Lassner et al. 1993; Haerle 2002; Durmus 2006; Kirkeby and Hansen 2006; Tambe, Cutler et al. 2006; Jaminet, Werdin et al. 2012).

Bei 59 Patienten, deren proximales Fragment sich intraoperativ als avaskulär erwies, wurde ein gefäßgestielter Radiusspan in den Pseudarthrosenbereich eingebracht.

Nachdem, wie bereits oben beschrieben, das proximale Fragment intraoperativ freigelegt und die Pseudarthrose mithilfe eines Osteotoms reseziert wurde (Megerle, Keutgen et al. 2008), konnte der Resektionsbereich gegebenenfalls noch mit der Kugelfräse radikal angefrischt werden.

Bei Ausbleiben kleiner punktförmiger Blutungen aus der Spongiosa des Resektionsbereiches wurde zusätzlich ein vaskularisierter Span gehoben. Dorsalseitig wurde dieser zum einen an der 1,2 intercompartmental suprarretinacular artery (ICSRA) gestielt gehoben (Straw, Davis et al. 2002). Alternativ wurde ein Span gestielt an einen Ast der A. radialis vom Boden des ersten oder zweiten Strecksehnenfaches gehoben (Zaidenberg, Siebert et al. 1991; Boyer, von Schroeder et al. 1998). Bei palmarseitigem Zugang wurde ein an der A. carpi transversa palmare gestielter vaskularisierter Radiusspan gehoben. Diese Technik haben Mathoulin und Haerle in der Literatur beschrieben (Mathoulin and Haerle 1998; Haerle 2002).

Die Späne mit einem größeren Durchmesser des Gefäßstiels wurden bevorzugt gehoben und dann so präpariert, dass sie sich exakt in den Defekt einpassten. In den meisten Fällen wurde zusätzlich ein kortikospongiöser Span vom Beckenkamm eingebracht. Der gefäßgestielte Knochenspan wurde in die Pseudarthrose eingeklemmt oder der Spongiosa aufgelegt. Die Stabilisierung des Kahnbeins erfolgte mit einer Herbert-Schraube, Mini-Herbert-Schraube oder mit Kirschnerdrähten.

Bei sehr kleinen proximalen Fragmenten war die Interposition eines kortikospongiösen Beckenkammspans häufig nicht mehr möglich, so dass in diesen Fällen nach Pseudarthrosenresektion auf den Beckenkammspan verzichtet und nur Spongiosa eingebracht wurde. Anschließend erfolgte ebenfalls die Apposition eines vaskularisierten Radiusspans zur Verbesserung der Durchblutungssituation (Abbildung 8).

Von den Patienten litten 35 an einer Rezidivpseudarthrose nach einem vorausgegangenen operativen Eingriff am Kahnbein. Diese Patienten wurden insbesondere durch das Einbringen eines palmar gestielten vaskularisierten Radiusspans behandelt.

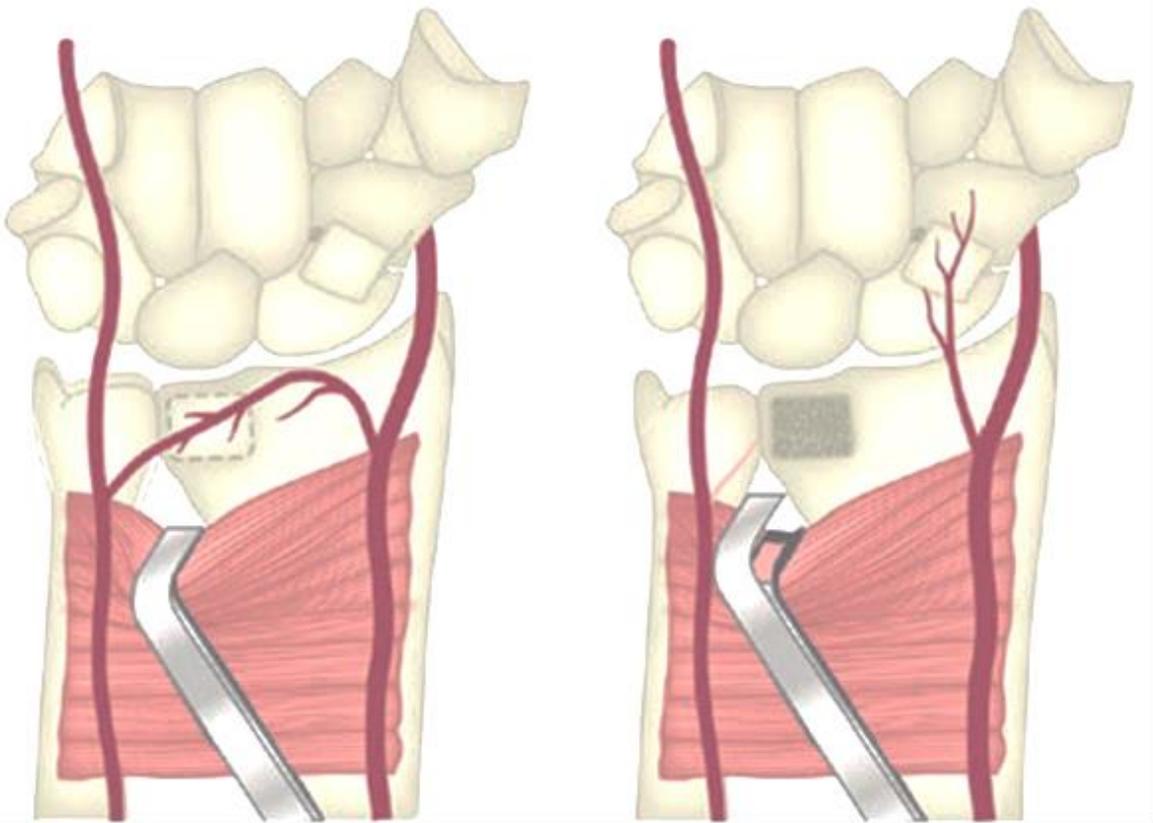


Abbildung 8: Hebung des vaskularisierten palmaren Radiusspanns an der A.carpi transversa palmare und Einpassen in die zuvor geschaffene Vertiefung (adaptiert nach Mathoulin C, Haerle M (1998) Vascularized bone graft from the palmar carpal artery for treatment of scaphoid non-union. J Hand Surg Br 23(3):318–323)

2.3 Nachbehandlung

Auf die Operation folgte eine mindestens 6-wöchige Ruhigstellung im zirkulären Unterarmgips mit Daumeneinschluss. Bei ausbleibender knöcherner Konsolidierung wurde die Ruhigstellung auf 12 Wochen verlängert. Röntgenkontrollen erfolgten nach 6 und 12 Wochen, mit jeweils einer Nativaufnahme in 2 Ebenen und einem Kahnbeinquantett. Bei radiologisch nicht eindeutigen Befund schloss sich nach 12 Wochen eine CT- oder MRT-Untersuchung an.

2.4 Auswertungskriterien

Mithilfe von Röntgen- und CT-Bildern, die im Rahmen der klinischen Nachuntersuchung der Patienten angefertigt und für die Auswertung in dieser Arbeit herangezogen wurden, konnte als Hauptauswertungskriterium die knöcherne Durchbauung des ehemaligen Frakturspaltes mit Einheilung der Späne beurteilt werden. Die Heilung der Kahnbeinfraktur wurde diagnostiziert, wenn Knochen-trabekel sowohl die proximale als auch die distale Seite des Knochenspans kontinuierlich überbrückten.

3 Ergebnisse

Von Januar 2000 bis Mai 2010 wurden in der Klinik für Hand-, Plastische, Rekonstruktive und Verbrennungschirurgie (HPRV) der Berufsgenossenschaftlichen Unfallklinik Tübingen 286 Patienten mit Kahnbeinpseudarthrose operiert. In den folgenden Abbildungen werden die behandelten Patienten bezüglich einiger Eigenschaften differenziert.

Geschlecht

Von den 286 Patienten waren 258 männlich und 28 Patienten waren weiblich, wie im Diagramm in Abbildung 9 ersichtlich ist.

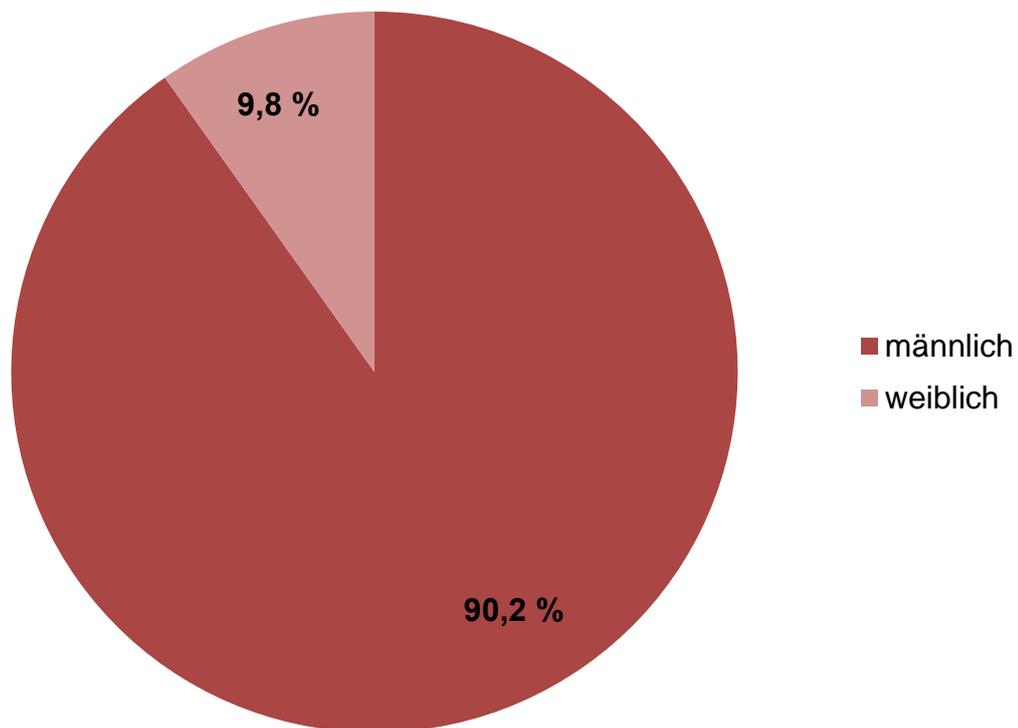


Abbildung 9: Geschlechtsverteilung Kahnbeinpseudarthrosen

Altersstruktur

Des Weiteren wurde eine Einteilung bezüglich der Altersstruktur der Patienten angefertigt.

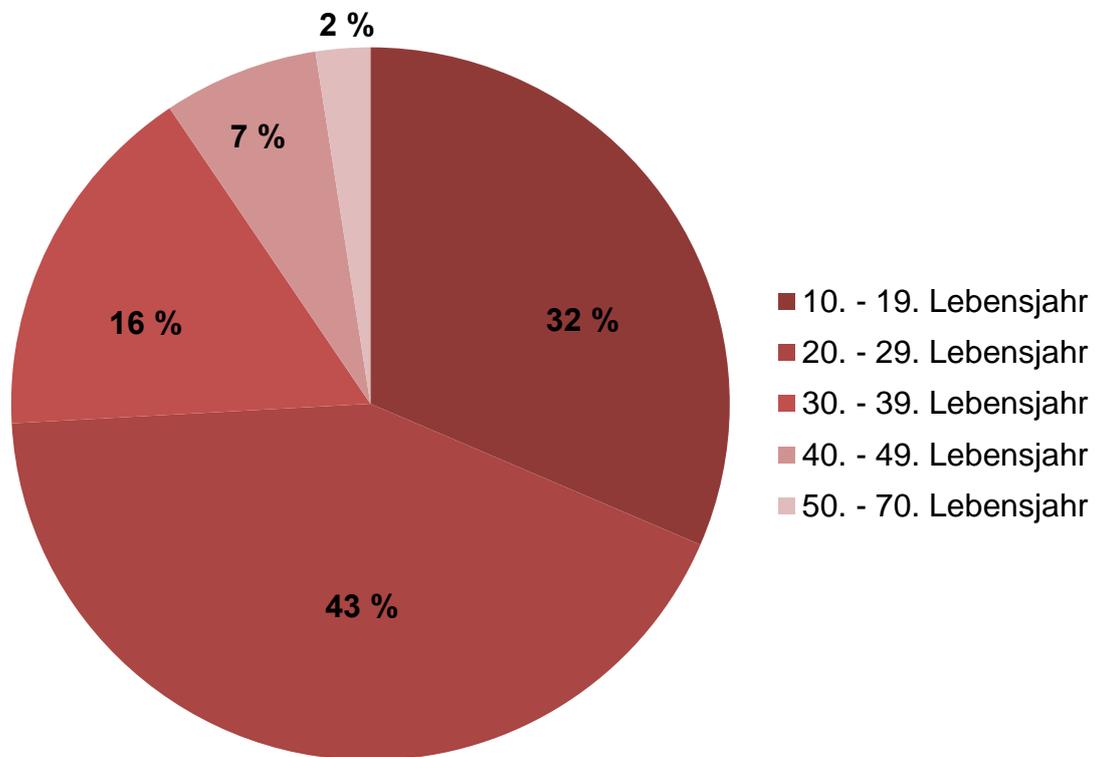


Abbildung 10: Altersverteilung bei Trauma

Die Altersverteilung bei Trauma zeigt einen eindeutigen Höhepunkt zwischen dem 10. und dem 30. Lebensjahr, wie in Abbildung 10 deutlich dargestellt ist.

Betroffene Seite der Hand

Eine Unterscheidung zwischen linker und rechter Hand zeigt in Abbildung 11 eine geringe Mehrheit bezüglich der rechten Hand.

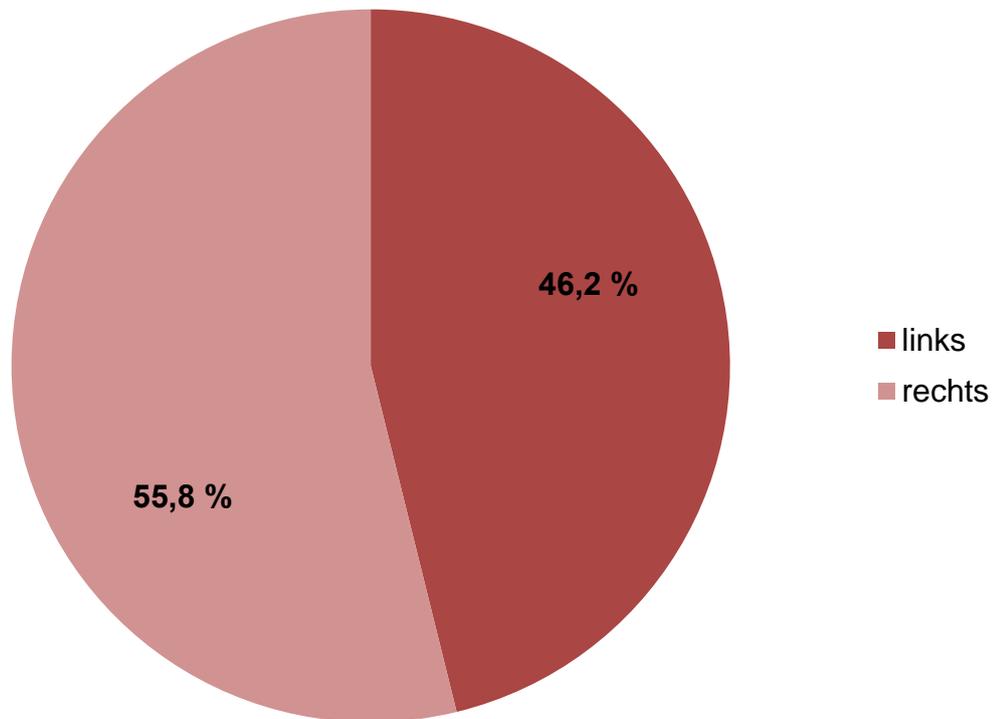


Abbildung 11: Betroffene Handseite

Im Detail waren bei 132 der Patienten die linke Hand und bei 154 der Patienten die rechte Hand betroffen.

Ruhigstellungszeitraum

Betrachtet man den Ruhigstellungszeitraum im Gesamten für alle Lokalisationen, so lässt sich feststellen, dass die betroffene Hand bei der Mehrzahl der 286 Patienten für einen längeren Zeitraum von 12 Wochen ruhiggestellt wurde (Abbildung 12).

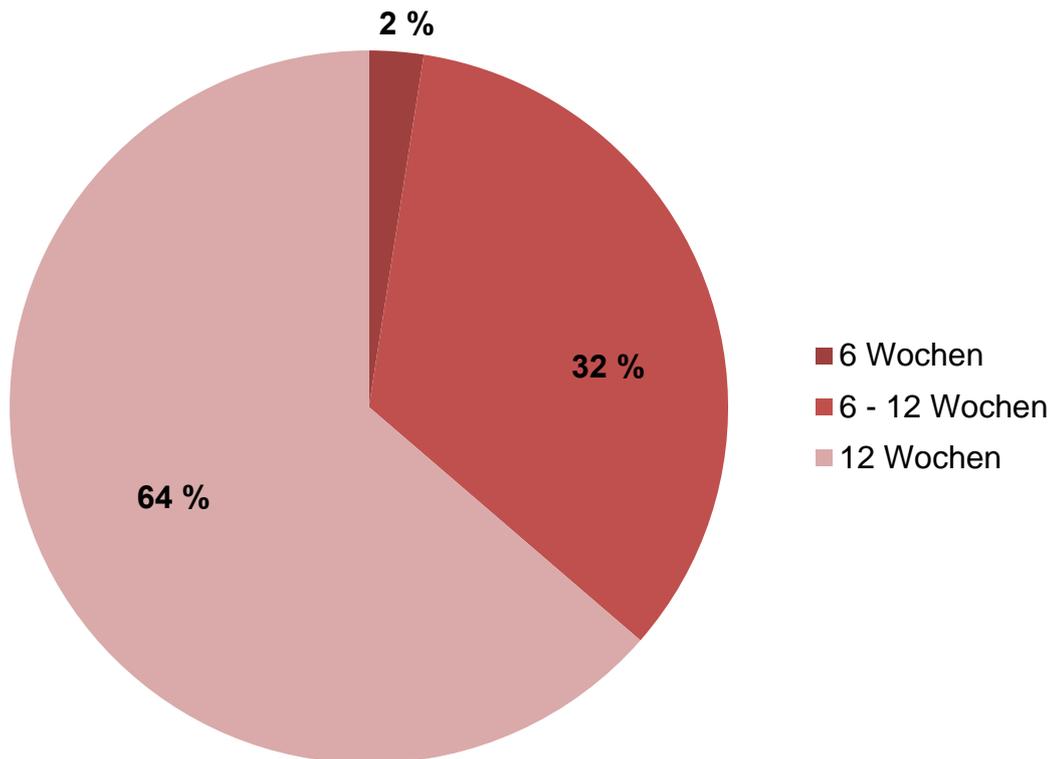


Abbildung 12: Ruhigstellungszeit gesamt für alle Lokalisationen

Lokalisation

In Abbildung 13 ist die Aufteilung nach der Lokalisation der Kahnbeinpseudarthrose dargestellt. Bei 130 der Patienten befand sich die Kahnbeinpseudarthrose im mittleren, bei 30 im distalen und bei 126 Patienten im proximalen Kahnbeindrittel.

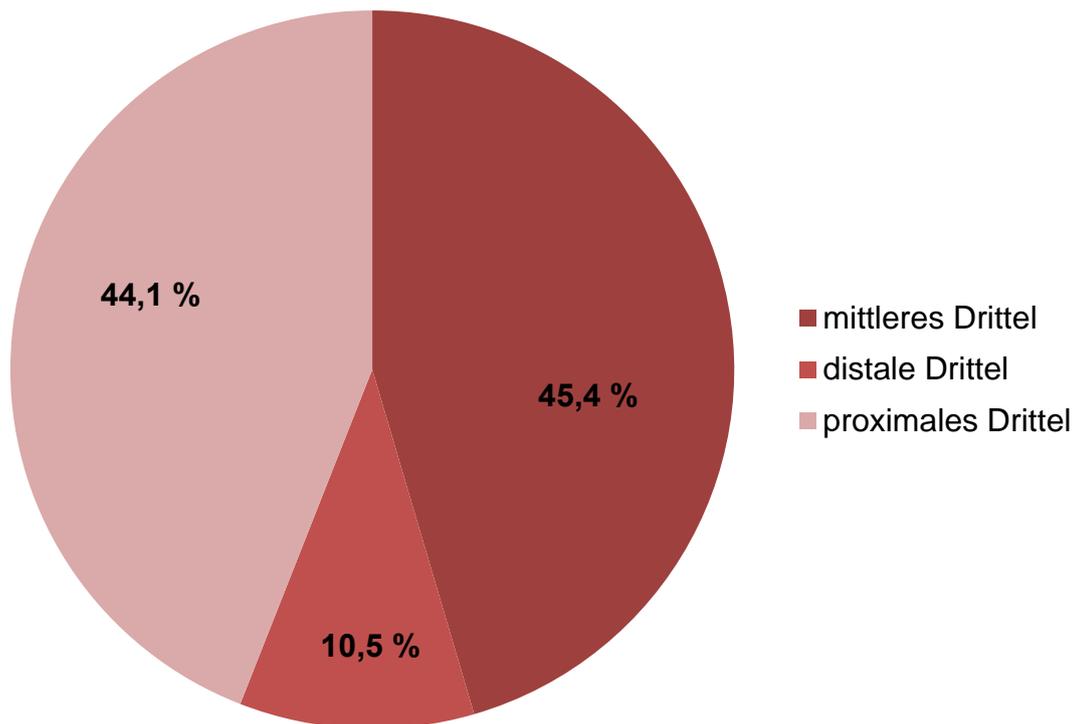


Abbildung 13 : Kahnbeinpseudarthrosen, aufgeschlüsselt nach Lokalisation

Die Auswertung der Ergebnisse auf die Durchbauungsrate und Ruhigstellungszeit wurde nach der Lokalisation der Kahnbeinpseudarthrose (Abbildung 5) aufgeteilt und wird nachfolgend entsprechend präsentiert.

Eine genaue Übersicht über die Lokalisation der Pseudarthrosen mit entsprechend zugehöriger Herbert-Klassifikation gibt Tabelle 2.

Tabelle 2: Patientengut mit Lokalisation und Herbert-Klassifikation

Lokalisation aller Kahnbeinpseudarthrosen im Patientengut (n=286) mit entsprechender Klassifikation nach Herbert		
Lokalisation	Patienten (n)	Klassifikation nach Herbert
Mittleres Drittel	130	30 Typ D1; 62 Typ D2; 38 Typ D3
Distales Drittel	30	6 Typ D1; 24 Typ D2
Proximales Drittel	126	45 Typ D2; 26 Typ D3; 55 Typ D4

Mittleres Drittel

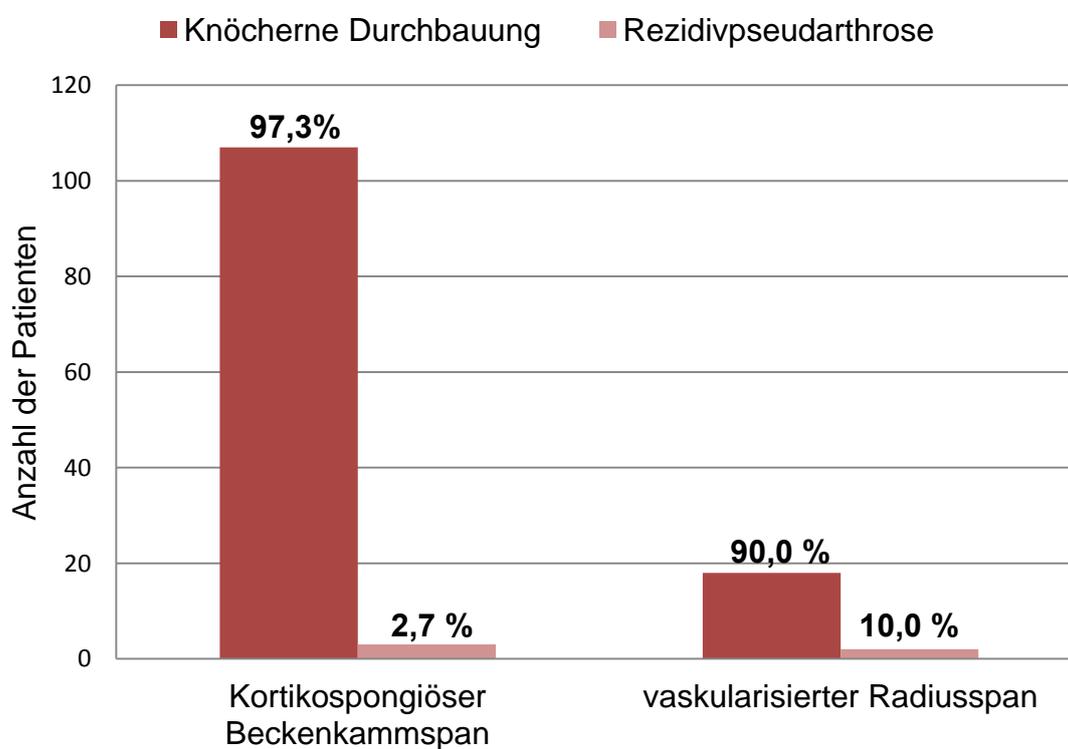


Abbildung 14: Ergebnisse von Patienten mit Kahnbeinpseudarthrose des mittleren Drittels

Bei 130 Patienten wurde die Kahnbeinpseudarthrose im mittleren Drittel diagnostiziert. 110 Patienten aus dieser Gruppe wurden primär durch Einsetzen eines kortikospongiösen Beckenkammspanns nach radikaler Resektion der Pseudarthrose behandelt. Hierbei wurde eine knöcherne Durchbauung bei 97,3 % festgestellt (Abbildung 14). Nach dieser Therapie waren 45,6 % nach 6 Wochen und 55,4 % nach 12 Wochen Ruhigstellungszeit knöchern konsolidiert (Abbildung 15).

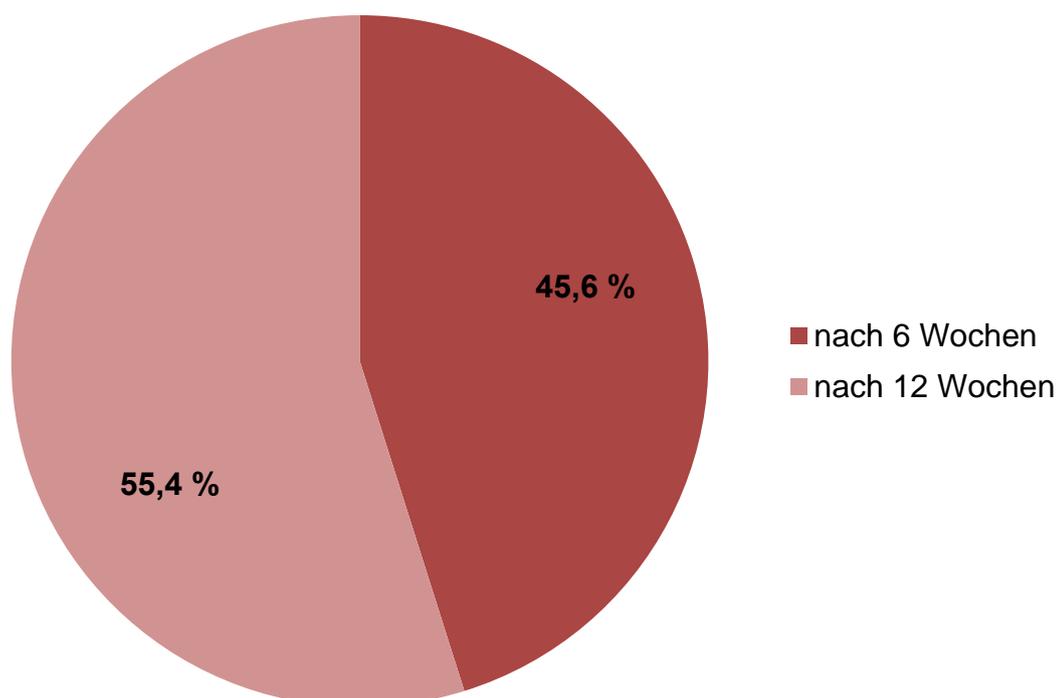


Abbildung 15 : Ruhigstellungszeit nach Therapie mit kortikospongiösem Beckenkammspann bei Kahnbeinpseudarthrosen des mittleren Drittels

20 Patienten aus dieser Gruppe litten an einer Rezidivpseudarthrose nach einem voraus gegangenen operativen Eingriff am Kahnbein. Diese Pseudarthrosen wurden durch Einsetzen eines kortikospongiösen Beckenkammspanns oder Spongiosa rekonstruiert und zusätzlich die Durchblutungssituation durch Auflegen eines beugeseitig gehobenen vaskularisierten Radiusspanns verbessert. Hierbei wurde eine Heilungsrate von 88,9 % nach 12 Wochen bei 16 der Patienten erzielt (Abbildung 14).

Distales Drittel

Bei 30 Patienten wurde die Kahnbeinpseudarthrose im distalen Drittel diagnostiziert. 27 Patienten aus dieser Gruppe wurden primär durch Einsetzen eines kortikospongiösen Beckenkammspan nach radikaler Resektion der Pseudarthrose behandelt.

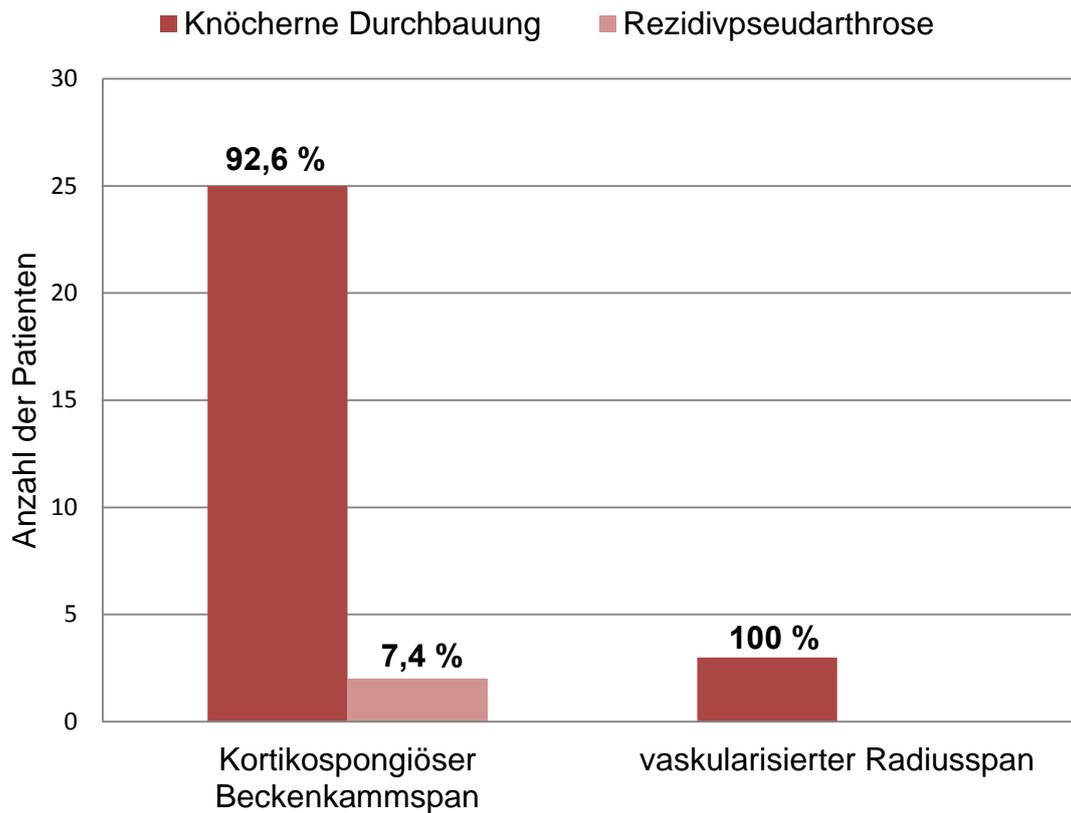


Abbildung 16: Ergebnisse von Patienten mit Kahnbeinpseudarthrose des distalen Drittels

Es wurde hierbei eine Heilungsrate von 92,9% erzielt, wobei 35,7% nach 6 Wochen und 64,3% nach 12 Wochen Ruhigstellungszeit knöchern durchbaut waren (Abbildung 17).

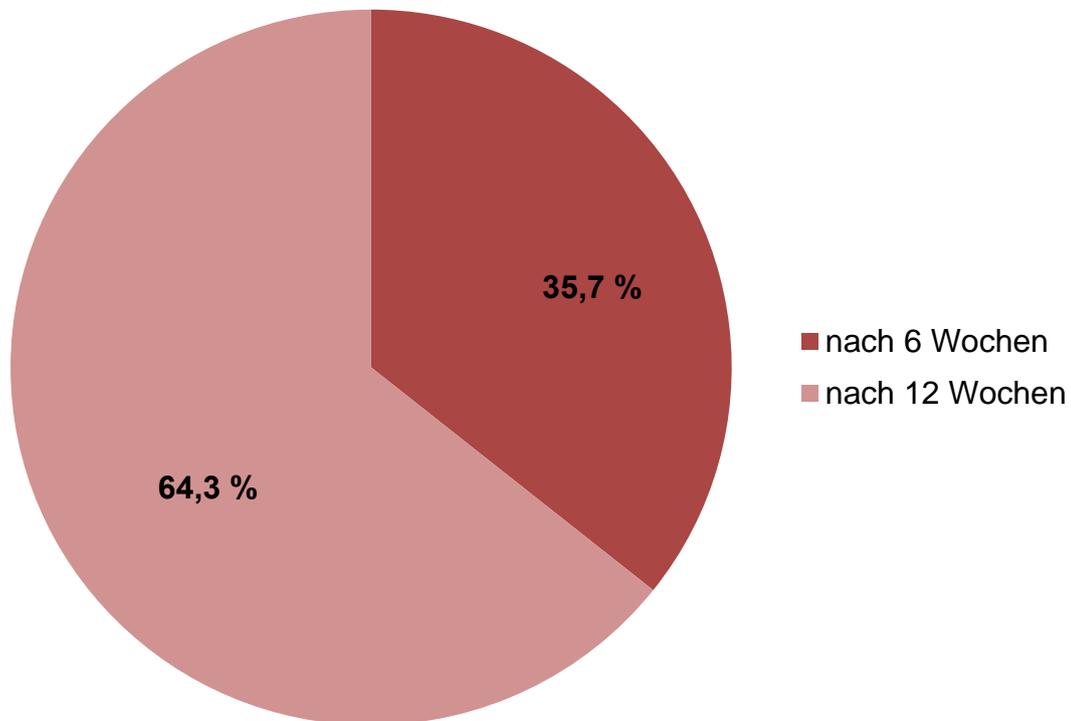


Abbildung 17: Ruhigstellungszeit nach Therapie mit kortikospongiösem Beckenkammspan bei Kahnbeinpseudarthrosen des distalen Drittels

Bei den verbleibenden 3 Patienten dieser Gruppe, die an einer Rezidivpseudarthrose nach vorausgegangener Operation litten, wurde durch Einsetzen eines kortikospöngiösen Beckenkammspanns und durch Auflegen eines beugeseitig gehobenen vaskularisierten Radiusspanns die knöcherne Durchbauung nach 12 Wochen Ruhigstellungszeit im gesamten Kollektiv dieser Gruppe erreicht (Abbildung 16).

Proximales Drittel

Bei 126 Patienten wurde die Kahnbeinpseudarthrose im proximalen Drittel diagnostiziert. Bei 67 Patienten dieser Gruppe wurde, nachdem intraoperativ die Durchblutungssituation am proximalen Fragment für gut befunden wurde, ein kortikospongiöser Beckenkammspan eingesetzt.

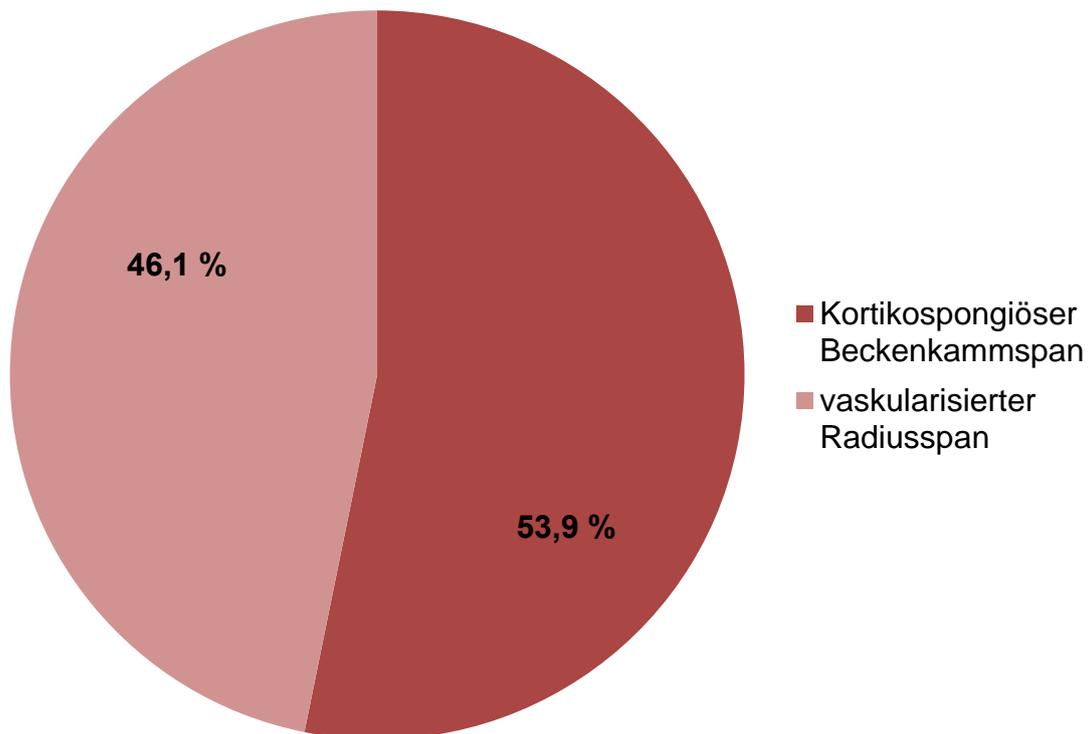


Abbildung 18: Einteilung zwischen kortikospongiöser Beckenkammspan und vaskularisierter Radiusspan

Durch Einsetzen eines kortikospongiösen Beckenkammspans bei gut durchblutetem proximalem Fragment wurde eine Heilungsrate von 82,1 % bei diesen Patienten erzielt.

Die Heilungsrate ist in Bezug auf die verwendeten Behandlungsmethoden in Abbildung 19 verdeutlicht dargestellt.

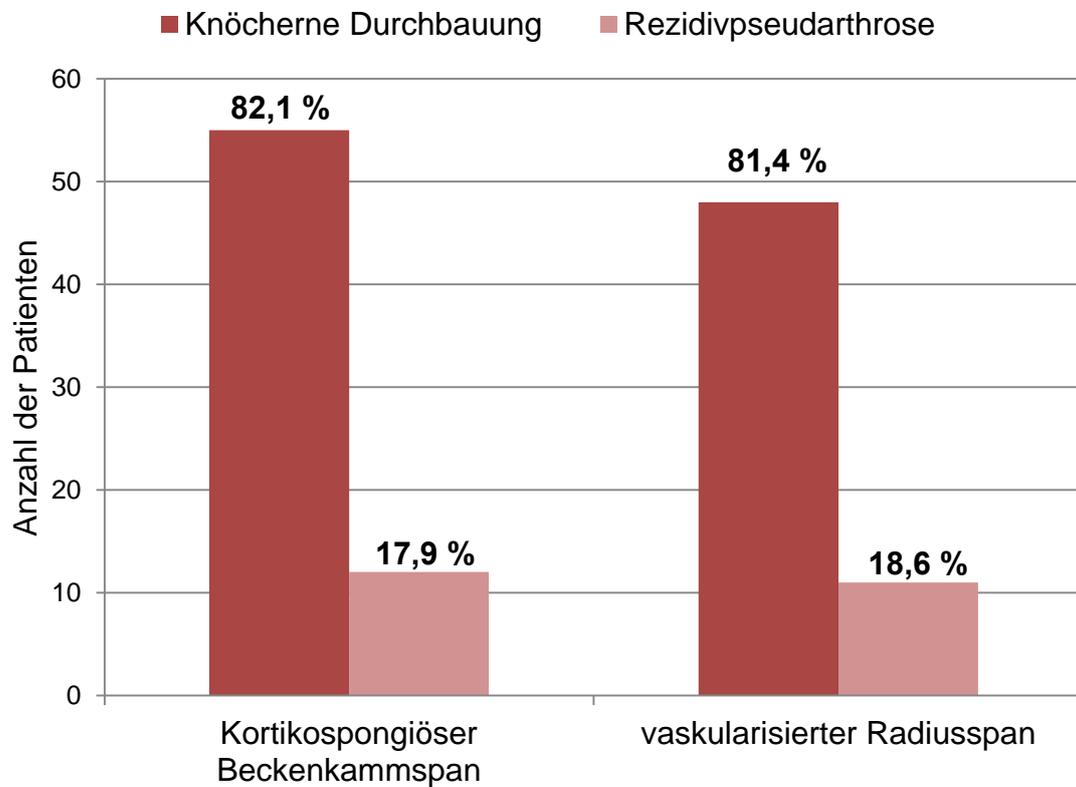


Abbildung 19: Ergebnisse von Patienten mit Kahnbeinpseudarthrose des proximalen Drittels

Hiervon waren 45,7 % nach 6 Wochen und 54,3 % nach 12 Wochen Ruhigstellungszeit knöchern konsolidiert (Abbildung 20).

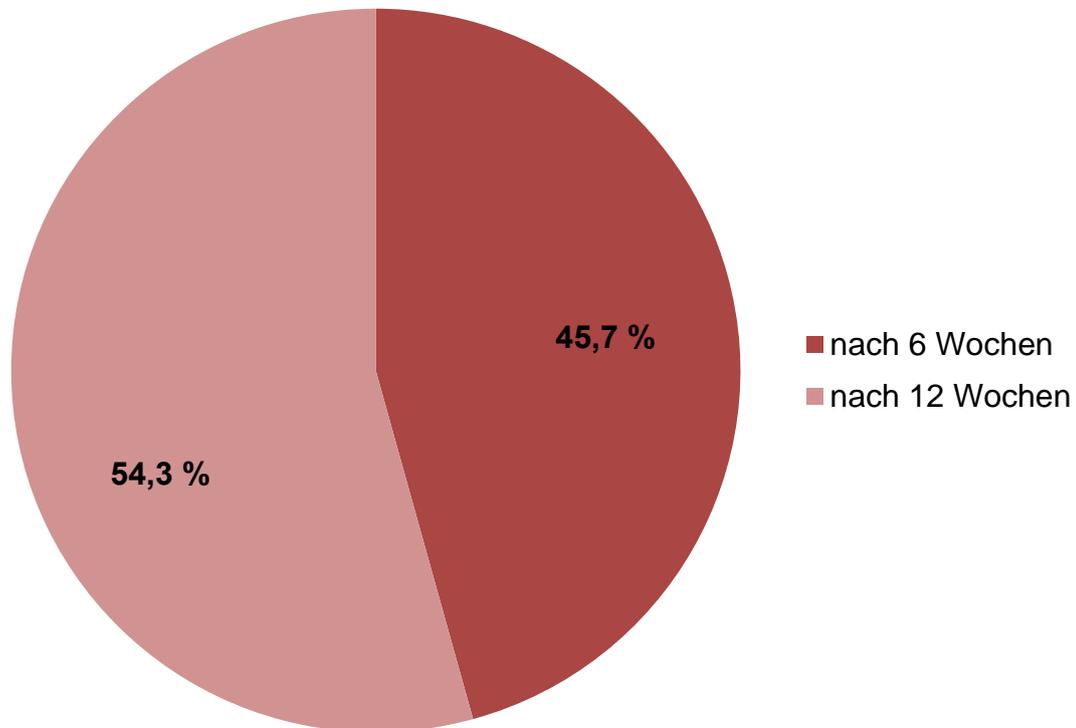


Abbildung 20: Ruhigstellungszeit der Therapie mit vaskularisiertem Radiusspan als Zusatzverfahren bei Kahnbeinpseudarthrosen des proximalen Drittels

Konnten intraoperativ keine kleinen, punktförmigen Blutungen aus dem proximalen Fragment nach Debridement festgestellt werden oder handelte sich es um eine Rezidivpseudarthrose des proximalen Drittels, so wurde das Kahnbein bei 59 Patienten dieser Gruppe durch Einsetzen eines kortikospongiösem Beckenkammspanns oder Spongiosa rekonstruiert. Die Durchblutungssituation wurde zusätzlich durch Interposition eines vaskularisierten Radiusspanns optimiert.

Bei insgesamt 47 Patienten handelte es sich um ein avaskuläres proximales Fragment und insgesamt 12 Patienten dieser Gruppe litten an einer Rezidivpseudarthrose (Abbildung 21).

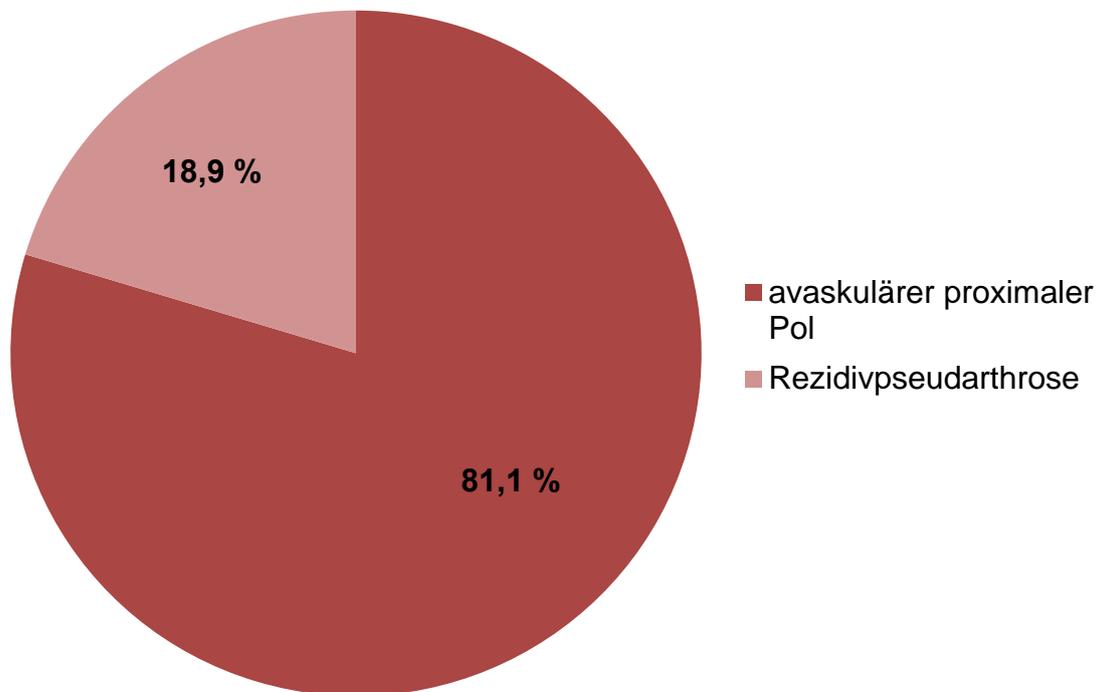


Abbildung 21: Aufteilung der Indikation zum vaskularisierten Radiusspan als therapeutisches Zusatzverfahren bei Kahnbeinspseudarthrosen des proximalen Drittels

Hierbei wurde bei 81,4 % der Patienten nach 12 Wochen Ruhigstellungszeit eine knöcherne Durchbauung erzielt (Abbildung 19).

3.1 Anwendungsgebiete des vaskularisierten Radiusspanns

Bei insgesamt 82 Patienten wurde ein vaskularisierter Radiusspan zur Verbesserung der lokalen Durchblutung angewandt. Diese Technik erfolgte ausschließlich bei Vorliegen eines avaskulären proximalen Fragments oder bei Vorhandensein einer Rezidivpseudarthrose (Tabelle 3). Insgesamt 35 Patienten litten an einer Rezidivpseudarthrose.

Schaut man sich alle 82 Patienten an, bei welchen ein vaskularisierter Radiusspan interponiert wurde, zeigt sich zusammenfassend trotz Vorliegen von Rezidivpseudarthrosen und avaskulären proximalen Polen insgesamt eine Heilungsrate von 83,7 % (Abbildung 22).

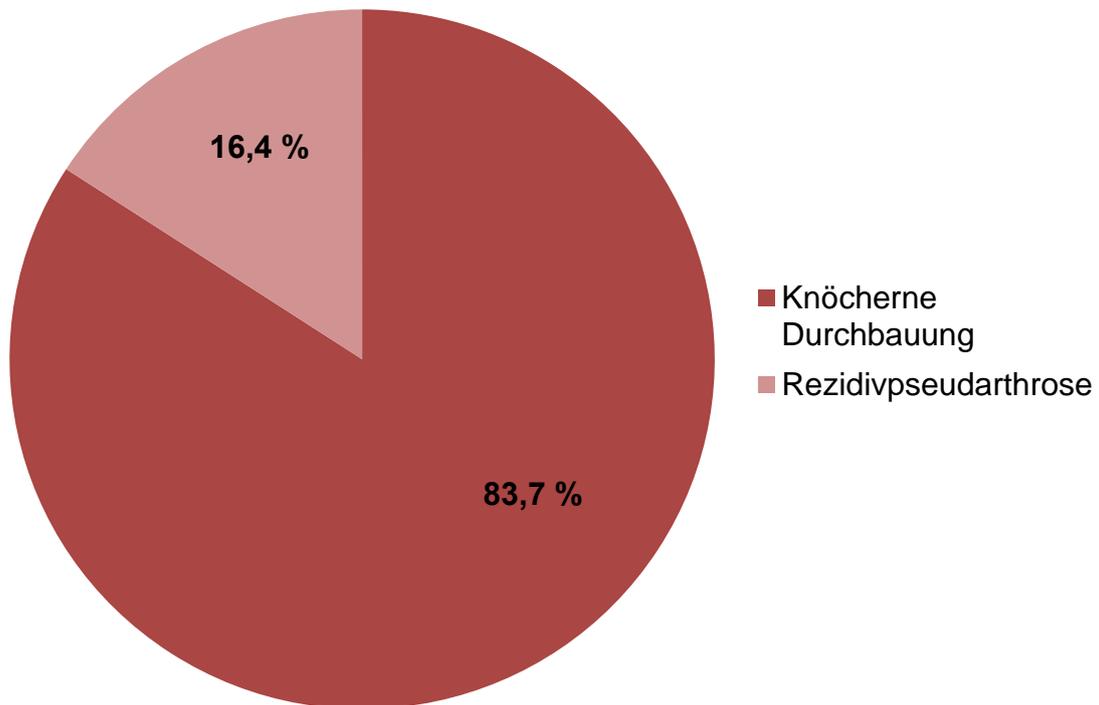


Abbildung 22: Ergebnisse nach Interposition eines vaskularisierten Radiusspanns bei Kahnbeinpseudarthrosen unabhängig von der Lokalisation

Eine gezielte Nachuntersuchung der Vitalität des proximalen Fragments oder der Durchblutungssituation des vaskularisierten Radiusspans erfolgte nicht. Bei knöcherner Durchbauung wurde von einer Revaskularisation des proximalen Fragments und einer ausreichenden Vaskularisation des Radiusspans ausgegangen, da sie die Voraussetzung für Knochenheilung sind.

Tabelle 3: Anwendungsgebiete des vaskularisierten Radiusspans

Anwendungsgebiete des vaskularisierten Radiusspans (n= 82)			
Pseudarthrose	Rezidivpseudarthrose		
proximaler Pol	mittleres Drittel	proximales Drittel	distales Drittel
47	20	12	3

3.2 Vorschlag eines Algorithmus zur Behandlung der Kahnbeinpseudarthrose

Zusammenfassend kann man aus diesen Ergebnissen über 10 Jahre einen Algorithmus zur optimalen und individuellen Behandlung nach Art und Alter der Kahnbeinpseudarthrose entwickeln (Jaminet, Werdin et al. 2012).

Zunächst ausgehend von der Lokalisation der Kahnbeinspeudarthrose prüft man die Situation hinsichtlich Erstdiagnose oder Rezidiv einer Kahnbeinpseudarthrose. Daraufhin ergibt sich für die Erstdiagnose der Kahnbeinpseudarthrose im mittleren und distalen Drittel die Therapie mit Interposition eines kortikospongiösen Beckenkammspans und Osteosynthese mittels Herbertschraube.

Für eine Rezidivpseudarthrose dieser Lokalisationen zeigt sich die zusätzliche Apposition eines vaskularisierten Radiusspanns als optimale Therapie.

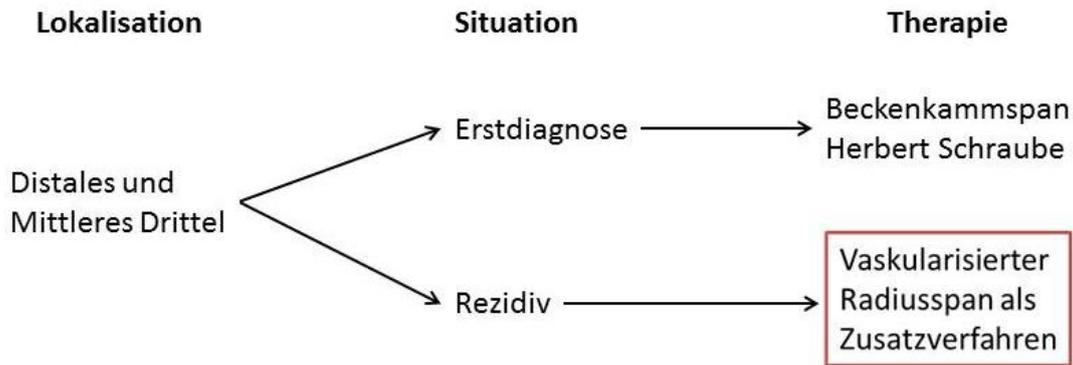


Abbildung 23: Behandlungsalgorithmus der Kahnbeinpseudarthrosen des distalen und mittleren Drittels

Im Bereich des proximalen Drittels ist bei Erstdiagnose und bei fraglicher Durchblutungssituation des proximalen Fragments eine zusätzliche Diagnostik mittels MRT durchaus indiziert. Zeigt sich der proximale Pol im MRT oder intraoperativ noch suffizient durchblutet, so ist das Einbringen eines Beckenkammspanns oder Spongiosa mit anschließender Osteosynthese ausreichend. Präsentiert sich dieser jedoch im MRT oder intraoperativ als avaskulär, so ist die zusätzliche Apposition eines vaskularisierten Radiusspanns indiziert. Diese Therapie ist ebenso das Verfahren der Wahl bei Rezidivpseudarthrosen des proximalen Drittels.

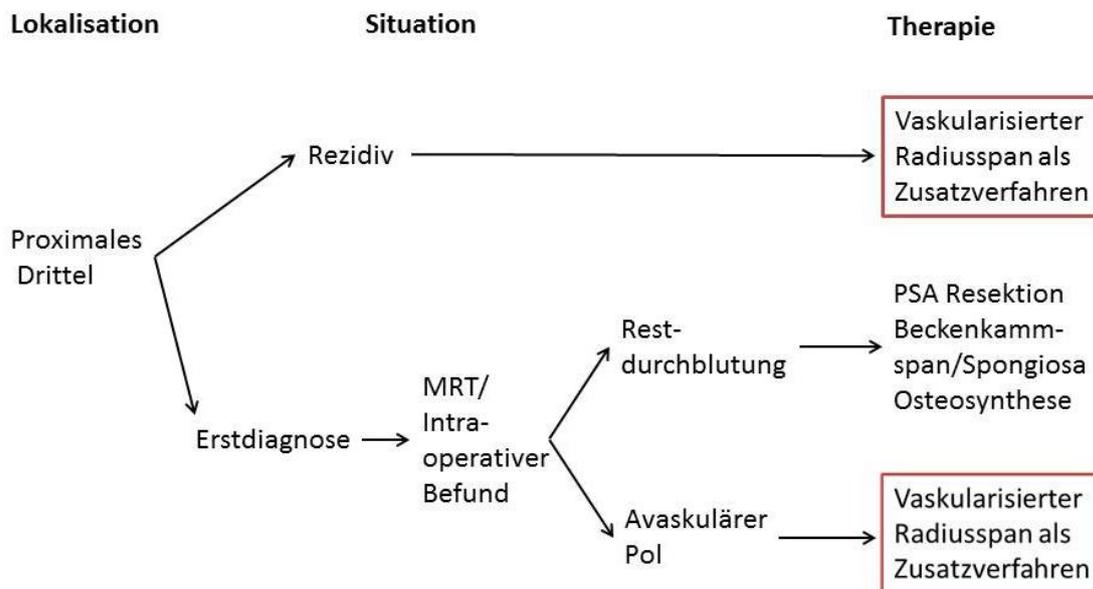


Abbildung 24: Behandlungsalgorithmus für Kahnbeinspeudarthrosen des proximalen Drittels

Dieser Behandlungsalgorithmus ermöglicht eine optimale Therapieanpassung auf die individuelle Situation des Patienten und auf die Lokalisation der Kahnbeinspeudarthrose.

3.3 Gesamtergebnisse

In Abbildung 25 sind die Gesamtergebnisse aller Patienten aufgeschlüsselt nach Lokalisation und erfolgreicher knöcherner Durchbauung (schwarz) oder Rezidivpseudarthrose (rot) dargestellt.

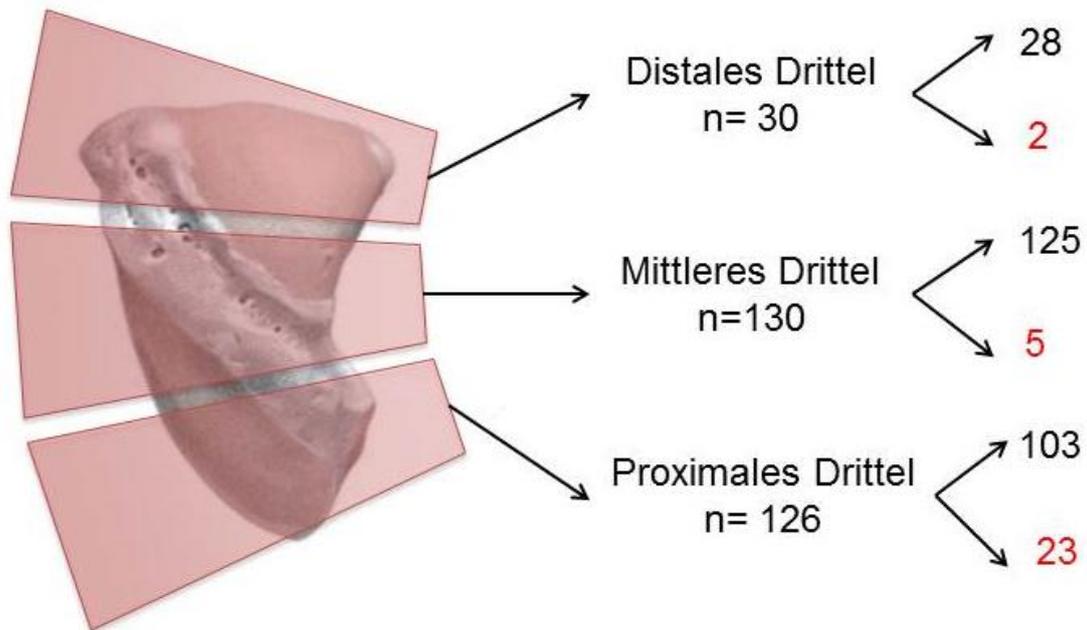


Abbildung 25: Ergebnisse aller Lokalisationen der Kahnbeinpseudarthrosen bei 286 Patienten

Betrachtet man die gesamten Ergebnisse bei allen 286 Patienten mit Kahnbeinpseudarthrosen, so ergibt sich eine knöcherner Durchbauungsrate von 89,9% und 10,1% Rezidivpseudarthrosen (Abbildung 26).

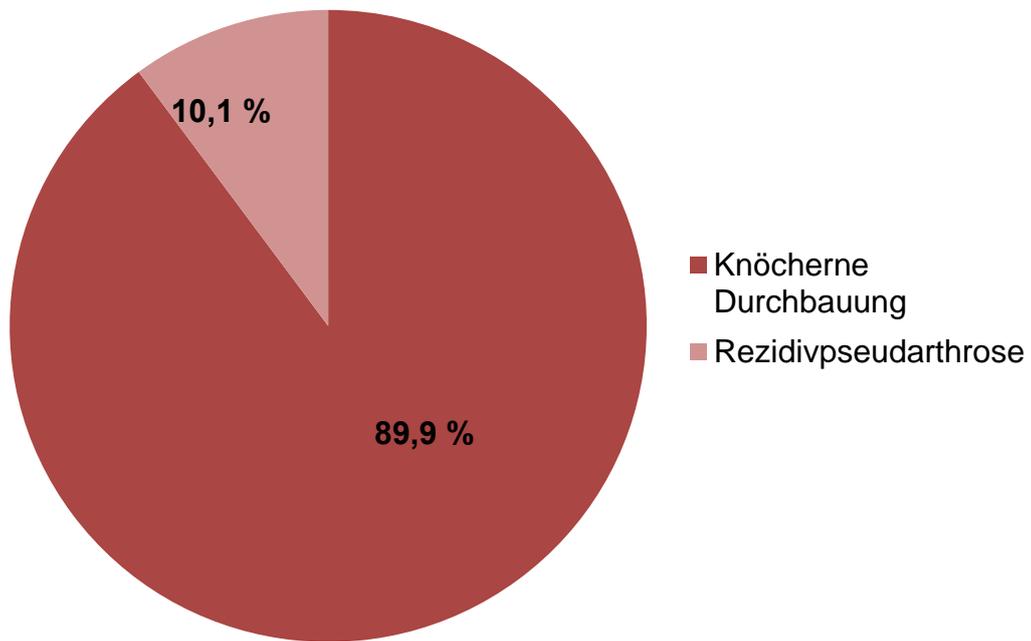


Abbildung 26: Gesamtergebnisse aller 286 Patienten mit Kniegelenkspseudarthrosen

4 Diskussion

Die optimale Behandlung der Kahnbeinpseudarthrose stellt nach wie vor eine handchirurgische Herausforderung dar. Die Ausheilungsraten sind abhängig vom Alter der Pseudarthrose, deren Lokalisation, bereits stattgehabter Operation, der Stabilität und der vaskulären Situation bei Pseudarthrosen des proximalen Pols. Die klassische Therapie der Pseudarthrosenresektion mit Beckenkammspaninterposition und Herbert-Schraubenosteosynthese geht laut Literatur mit einer Heilungsrate von 74- 84 % einher (Merrell GA 2002; Munk and Larsen 2004). Dahingegen wird das Einsetzen nicht-vaskularisierter Knochenspäne bei instabilen Kahnbeinpseudarthrosen und solchen, mit kleinem proximalem Fragment mit einer schlechteren Heilungsrate assoziiert (Hull, House et al. 1976; Cooney, Dobyns et al. 1980; Fernandez and Eggli 1995). Eine der Hauptursachen dafür ist die Besonderheit der Gefäßversorgung für das proximale Drittel des Kahnbeins (Herbert 1990; Boyer, von Schroeder et al. 1998). Green konnte mit der Technik nach Matti-Russe eine Heilungsrate von 92 % erzielen, wenn der proximale Pol intraoperativ punktförmige Blutungen zeigte (Green 1985). Stellte sich dieser als avaskulär dar, betrug die Heilungsrate in seinem Patientenkollektiv 0 %. Daher stellen sowohl der avaskuläre proximale Pol als auch die Rezidivpseudarthrose ein nicht zu unterschätzendes Problem dar (Steinmann, Bishop et al. 2002). Für diese Patienten wurden in den letzten Jahren alternative Operationsverfahren in Form von gefäßgestielten Knochenspänen entwickelt. Es werden eine ganze Reihe unterschiedlicher Techniken in der Literatur beschrieben und von Heilungsraten bis zu 100 % berichtet (Kawai and Yamamoto 1988; Zaidenberg, Siebert et al. 1991; Schaller, Lassner et al. 1993; Sheetz, Bishop et al. 1995; Yuceturk, Isiklar et al. 1997; Mathoulin and Haerle 1998; Sauerbier and Bishop 2001; Haerle 2002; Steinmann, Bishop et al. 2002; Sawaizumi, Nanno et al. 2003; Chen, Chao et al. 2006; Malizos, Zachos et al. 2007).

Zwei wesentliche Faktoren begünstigen die Knochenheilungsraten. Diese sind die Vaskularisierung und die Anreicherung an osteogenen Zellen. Sowohl beu-

ge- als auch streckseitige Knochenspäne sind beschrieben worden. Am häufigsten wird wohl der beugeseitige Span benutzt, welcher an der A. carpi transversa palmare, einem Ast der A. radialis, gestielt ist (Kuhlmann JN 1987; Mathoulin and Haerle 1998; Haerle 2002). Sowohl die technische Praktikabilität als auch die guten postoperativen Ergebnisse mit Heilungsraten bis zu 92 % sprechen für das Verfahren. Ein streckseitiger Span, welcher an der 1,2 ICSRA gestielt ist und Heilungsraten bis 90 % erzielte, wurde von Zaidenberg et al. beschrieben (Zaidenberg, Siebert et al. 1991). Malizos et al. konnten, unabhängig von der Entnahmestelle des Spans (palmar oder dorsal), eine Heilungsrate von 100 % erreichen, wobei in dieser Studie alle Kahnbeinpseudarthrosen unabhängig von der Dauer und Lokalisation einbezogen wurden (Malizos, Zachos et al. 2007). Bei bereits vorliegender schwerer Handgelenksarthrose und fortgeschrittenem karpalen Kollaps kommen oftmals nur noch eine medio-karpale Teilarthrodese, eine „proximal row carpectomy“, eine Handgelenksdenervierung oder eine totale Handgelenksversteifung in Frage (Krimmer, Krapohl et al. 1997; Zeplin and Kuhfuss 2009).

Ziel dieser Studie war es festzulegen, mit welchem Therapieverfahren zu welchem Zeitpunkt ein möglichst günstiges Ergebnis zu erreichen ist. Wir wählten das klassische Therapieverfahren der Pseudarthrosenresektion mit Beckenkammspaninterposition und Herbert-Schraubenosteosynthese bei Kahnbeinpseudarthrosen im distalen und mittleren Drittel, die nicht voroperiert waren, und bei Kahnbeinpseudarthrosen im proximalen Drittel, wenn sich intraoperativ punktförmige Blutungen aus dem proximalen Pol zeigten. Wir konnten dabei Heilungsraten von 97,3 % im mittleren Drittel, 92,9 % im distalen Drittel und 82,8 % im proximalen Drittel erzielen. Bei intraoperativer Darstellung von punktförmigen Blutungen erreichten wir bei 82,8 % der Patienten eine knöcherne Konsolidierung. Green et al. hingegen beschrieben eine Heilungsrate von 92 %, wenn sich intraoperativ punktförmige Blutungen aus dem proximalen Pol zeigten (Green 1985). Megerle et al. berichten davon, die Kahnbeinpseudarthrosen des proximalen Drittels mit dem klassischen Verfahren der Knochenspaninterposition mit Mini-Herbert-Schraubenosteosynthese ohne Einbezug der Durchblutungssituation am proximalen Pol behandelt zu haben (Megerle, Keutgen et

al. 2008). Sie erreichten damit bei einer Gesamtzahl von 31 Patienten eine knöchernen Durchbauung in 21 Fällen (67,7 %).

Bei Patienten mit Rezidivkahnbeinpseudarthrosen des mittleren und distalen Drittels nach einem ersten auswärtig durchgeführten Eingriff mit dem oben genannten Standardverfahren, wurde das Kahnbein durch Einsetzen eines vaskularisierten palmaren Radiusspans rekonstruiert. Dadurch wurde in dieser Gruppe von 23 Patienten insgesamt eine Heilungsrate von 90,5 % erzielt. In der Studie von Mathoulin und Haerle wurde von einer Heilungsrate bei 100 % der insgesamt 17 Patienten berichtet, wobei davon nur 10 an einer Rezidivpseudarthrose litten, was wiederum die sehr guten Heilungsraten teilweise erklären könnte.

Konnten intraoperativ keine punktförmigen Blutungen aus dem proximalen Pol festgestellt werden, wurde das Kahnbein durch Einsetzen eines vaskularisierten Radiusspans rekonstruiert, der entweder an der 1,2 ICSRA (Straw, Davis et al. 2002) oder an einem Ast der A.radialis vom Boden des ersten oder zweiten Strecksehnenfaches (Zaidenberg, Siebert et al. 1991; Boyer, von Schroeder et al. 1998) gestielt war. Hierbei konnten Heilungsraten von 81,4 % erzielt werden, die im Vergleich mit den in der Literatur beschriebenen Heilungsraten besser abschneiden. Straw et al beschreibt bei 16 Patienten mit avaskulärem Pol eine knöchernen Konsolidierung bei 2 Patienten, dies entspricht einer Heilungsrate von 12,5 % (Straw, Davis et al. 2002). Die Heilungsrate bei Boyer et al. wurde mit 60 % bei 6 erfolgten knöchernen Durchbauungen in einer Gruppe von 10 Patienten beschrieben (Boyer, von Schroeder et al. 1998). Beide Autoren zeigten sich unzufrieden mit den Ergebnissen und gingen sogar soweit, diese Technik nicht für die Therapie einer Nekrose des proximalen Pols zu empfehlen. Zaidenberg et al. verwendeten den dorsalen vaskularisierten Radiusspan bei 11 Patienten mit Kahnbeinpseudarthrose, ohne die Lokalisation dieser genauer zu definieren (Zaidenberg, Siebert et al. 1991). Malizos et al. berichten über 20 Kahnbeinpseudarthrosen des proximalen Drittels, die mit einem dorsalen vaskularisierten Radiusspan behandelt wurden und über 10 des mittleren Drittels, bei denen ein palmarer vaskularisierter Radiusspan angewandt wurde (Malizos,

Zachos et al. 2007). Hierbei berichteten sie von einer Heilungsrate von insgesamt 100 % und ziehen das Fazit, das Verfahren der palmar und dorsal gehobenen vaskularisierten Radiusspäne sei bewährt und effizient.

Betrachtet man das gesamte Patientenkollektiv von 286 Patienten unserer Studie, so konnten wir eine Ausheilungsrate von 89,9 % erreichen. Dies ist, verglichen mit anderen Studien, eine verhältnismäßig hohe Ausheilungsrate, wobei diese die 126 Kahnbeinpseudarthrosen des proximalen Drittels schon miteinschließt. 47 dieser 126 Kahnbeinpseudarthrosen des proximalen Drittels wurden als avaskuläre Nekrose des proximalen Pols gewertet, da sich intraoperativ keine punktförmigen Blutungen zeigten. Die Hauptfaktoren, die die Heilung einer Kahnbeinpseudarthrose positiv beeinflussen, sind die Stabilität der Osteosynthese und die gute Durchblutung der Fragmente. Beiden Faktoren maßen wir in unserem Patientenkollektiv große Bedeutung zu, so dass wir insgesamt in 82 Fällen einen vaskularisierten Radiusspan angewandt haben. In dieser Gruppe ist es bei 81,4 % zu einer Ausheilung gekommen. Wir können also selbst für diese schwierigen Fälle mit dem vaskularisierten Radiusspan eine sehr hohe Durchbauungsrate erreichen. Ein prä- oder postoperatives MRT zur Beurteilung der Vitalität und Durchblutung wurde nicht standardisiert durchgeführt, da das Hauptaugenmerk auf die intraoperative Beurteilung der Durchblutungssituation gelegt wurde.

Nicht mit in die Studie einbezogen wurden die Transplantationen eines mikrovasculär reanastomosierten Knochenspans vom Femur. Mit dieser aufwendigen Methode wurden in der Literatur gute Ausheilungsraten erzielt (Gabl, Reinhart et al. 1999; Doi, Oda et al. 2000; Kalicke, Burger et al. 2008; Burger, Gaggl et al. 2009).

Ein wesentlicher Nachteil dieser Studie ist das Fehlen klinischer Parameter, die im Rahmen von Nachuntersuchungen erfasst werden konnten. Bei der retrospektiven Studie meldeten sich nur ca. 10 % der Patienten zur klinischen Nachuntersuchung oder waren an einer Befragung interessiert. Dies mag zum einen an der lange zurückliegenden Operation liegen oder aber an dem mangelnden

Interesse, da die Patienten größtenteils beschwerdefrei waren. Aus unserer Erfahrung nehmen die Beschwerden der Patienten ab dem Zeitpunkt der knöchernen Konsolidierung rasch ab. Eine klinische Nachuntersuchung rein nach Aktenlage war ebenfalls nicht möglich, weil die meisten der Patienten nach Gipsabnahme und bestätigter knöcherner Durchbauung in der ambulanten Weiterbehandlung „verschwunden“ sind.

Aus den vorliegenden Daten bestätigt sich unser Algorithmus zur Behandlung der Kahnbeinpseudarthrose (Abbildung 27), der gezielt auf die Lokalisation der Pseudarthrose und mögliche Rezidivpseudarthrosen aus erfolglosen, vorausgegangen Eingriffen eingeht. Bei der Rezidivpseudarthrose und bei Vorliegen eines avaskulären proximalen Pols können wir mithilfe des vaskularisierten Radiusspanns als additives Verfahren sehr gute Durchbauungsraten erzielen. Diese Technik soll die bisherigen Operationsverfahren nicht verdrängen, sondern in sinnvoller Art und Weise ergänzen. Auf der Grundlage der vorliegenden Ergebnisse lohnt sich sowohl der erhöhte technische als auch der zeitliche Mehraufwand (Schmidt 2004). Es muss jedoch eine sorgfältige prä- und intraoperative Bewertung der Situation erfolgen. Des Weiteren darf die subtile Operationstechnik nicht unterschätzt werden, um für die Patienten und schlussendlich auch für sich selbst ein günstiges Ergebnis zu erreichen.

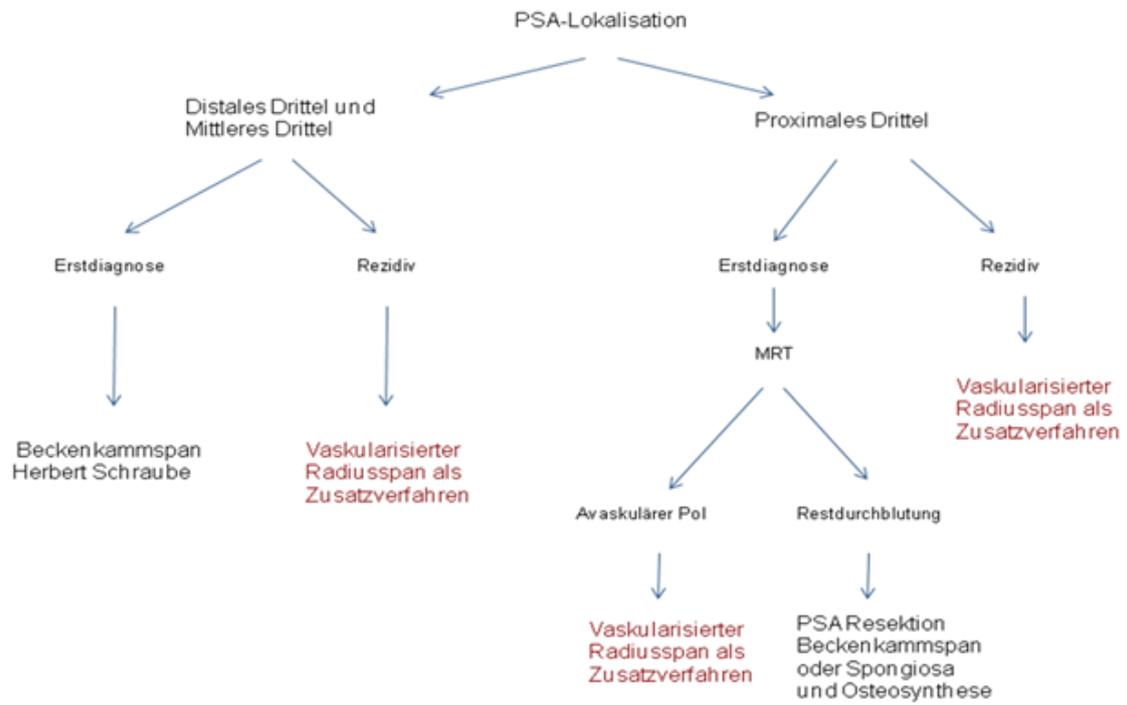


Abbildung 27: Behandlungsalgorithmus für Kahnbeinspeudarthrosen aller Lokalisationen

5 Zusammenfassung

Wir präsentieren eine retrospektive radiologische Fall-Kontrollstudie zur Behandlung der Kahnbeinpseudarthrose aus der Klinik für Hand-, Plastische, Rekonstruktive und Verbrennungschirurgie (HPRV) der Berufsgenossenschaftlichen Unfallklinik Tübingen, in der wir 286 Patienten in einem Zeitraum von 10 Jahren behandelt haben. Die Ergebnisse wurden mit der aktuellen Literatur verglichen und es wurde ein Behandlungsalgorithmus für die Kahnbeinpseudarthrose abhängig von der Lokalisation und eventuell vorausgegangenen Eingriffen entwickelt. Die Patienten wurden nach der Lokalisation der Kahnbeinpseudarthrose in 3 Gruppen eingeteilt: proximales Drittel mit 126 Fällen, mittleres Drittel mit 130 Fällen und distales Drittel mit 30 Fällen. In davon 82 Fällen wurde das Verfahren eines vaskularisierten Radiusspans angewandt, da es sich um ein avaskuläres proximales Fragment oder eine Rezidivpseudarthrose handelte. Die knöchernen Durchbauung des Kahnbeins wurde mittels standardisierten Röntgenaufnahmen und gegebenenfalls mittels CT evaluiert.

Wir können sehr gute Ausheilungsraten von 96,5 % für 127 Fälle mit Kahnbeinpseudarthrosen im mittleren und distalen Drittel nach Anwendung des Standardverfahrens mit Einsetzen eines kortikospongiösen Beckenkammspanns aufweisen. Des Weiteren betrug die Ausheilungsrate 90,5 % für 23 Fälle von Rezidivpseudarthrosen des distalen und mittleren Drittels, die mit einem vaskularisierten palmaren Radiusspan rekonstruiert wurden.

In 59 Fällen konnten wir durch das Verfahren des vaskularisierten Radiusspans bei Vorliegen von Rezidivpseudarthrosen und avaskulären proximalen Polen eine Ausheilungsrate von 81,4 % erreichen.

Die Prognose der Konsolidierung einer Kahnbeinpseudarthrose unter Anwendung differenzierter Operationstechniken wie zum Beispiel die des vaskularisierten Radiusspans ist sehr gut.

6 Literaturverzeichnis

- Barton, N. J. (1992). "Twenty questions about scaphoid fractures." Journal of hand surgery **17**(3): 289-310.
- Betsch, M., P. Jungbluth, et al. (2010). "[The primarily overlooked scaphoid fracture--a diagnostic challenge?]." Handchirurgie, Mikrochirurgie, plastische Chirurgie : Organ der Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft für Handchirurgie : Organ der Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft für Mikrochirurgie der Peripheren Nerven und Gefässe : Organ der Vereinigung der Deutschen Plastischen Chirurgen **42**(1): 71-74.
- Bohler, L., E. Trojan, et al. (1954). "[Treatment of 734 cases of fresh fracture of the scaphoid bone of the hand]." Wiederherstellungschirurgie und Traumatologie. Reconstruction surgery and traumatology II: 86-111.
- Boyer, M. I., H. P. von Schroeder, et al. (1998). "Scaphoid nonunion with avascular necrosis of the proximal pole. Treatment with a vascularized bone graft from the dorsum of the distal radius." Journal of hand surgery **23**(5): 686-690.
- Burger, K. H., A. J. Gaggl, et al. (2009). "[Free microvascular transfer of segmental corticocancellous femur for treatment of avascular scaphoid necrosis]." Handchirurgie, Mikrochirurgie, plastische Chirurgie : Organ der Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft für Handchirurgie : Organ der Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft für Mikrochirurgie der Peripheren Nerven und Gefässe : Organ der Vereinigung der Deutschen Plastischen Chirurgen **41**(1): 44-51.
- Chen, A. C. Y., E. K. Chao, et al. (2006). "Scaphoid nonunion treated with vascular bone grafts pedicled on the dorsal supra-retinacular artery of the distal radius." Journal of Trauma-Injury Infection and Critical Care **61**(5): 1192-1197.
- Cooney, W. P., 3rd, J. H. Dobyns, et al. (1980). "Nonunion of the scaphoid: analysis of the results from bone grafting." The Journal of hand surgery **5**(4): 343-354.
- Cooney, W. P., J. H. Dobyns, et al. (1980). "Fractures of the scaphoid: a rational approach to management." Clinical Orthopaedics and Related Research(149): 90-97.
- Cooney, W. P., R. L. Linscheid, et al. (1988). "Scaphoid Nonunion - Role of Anterior Interpositional Bone-Grafts." Journal of Hand Surgery-American Volume **13A**(5): 635-650.

- Dias, J. J., V. Dhukaram, et al. (2008). "Clinical and radiological outcome of cast immobilisation versus surgical treatment of acute scaphoid fractures at a mean follow-up of 93 months." Journal of Bone and Joint Surgery-British Volume 90B(7): 899-905.
- Doi, K., T. Oda, et al. (2000). "Free vascularized bone graft for nonunion of the scaphoid." The Journal of hand surgery 25(3): 507-519.
- Durmus, G. (2006). Behandlungsverfahren und Ergebnisse in der Therapie von Kahnbeinfrakturen und Kahnbeinpsudarthrosen der Hand von 1997 - 2000.
- Fernandez, D. L. (1984). "A technique for anterior wedge-shaped grafts for scaphoid nonunions with carpal instability." The Journal of hand surgery 9(5): 733-737.
- Fernandez, D. L. and S. Eggli (1995). "Nonunion of the Scaphoid - Revascularization of the Proximal Pole with Implantation of a Vascular Bundle and Bone-Grafting." Journal of Bone and Joint Surgery-American Volume 77A(6): 883-893.
- Gabl, M., C. Reinhart, et al. (1999). "Vascularized bone graft from the iliac crest for the treatment of nonunion of the proximal part of the scaphoid with an avascular fragment." Journal of Bone and Joint Surgery-American Volume 81A(10): 1414-1428.
- Gelberman, R. H. and J. Menon (1980). "The vascularity of the scaphoid bone." The Journal of hand surgery 5(5): 508-513.
- Green, D. P. (1985). "The effect of avascular necrosis on Russe bone grafting for scaphoid nonunion." The Journal of hand surgery 10(5): 597-605.
- Haerle, M., Schmidt, G., Schaller, H.-E., Mathoulin, Ch. (2002). "Gefäßgestielte Knochenspäne vom beugeseitigen Radius: Anatomische Grundlagen und Technik." Akt. Traumatol 32: 73-75.
- Herbert, T. (1990). The fractured scaphoid. St. Louis, Quality Medical.
- Herbert, T. J. and S. L. Filan (1999). "Proximal scaphoid nonunion-osteosynthesis." Handchirurgie, Mikrochirurgie, plastische Chirurgie : Organ der Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft für Handchirurgie : Organ der Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft für Mikrochirurgie der Peripheren Nerven und Gefässe : Organ der Vereinigung der Deutschen Plastischen Chirurgen 31(3): 169-173.
- Hull, W. J., J. H. House, et al. (1976). "The surgical approach and source of bone graft for symptomatic nonunion of the scaphoid." Clinical Orthopaedics and Related Research(115): 241-247.

- Jaminet, P., F. Werdin, et al. (2012). "[Treatment algorithm for scaphoid nonunion : retrospective case-control study of 208 patients]." Der Unfallchirurg **115**(11): 994-999.
- Kalicke, T., H. Burger, et al. (2008). "[A new vascularized cartilage-bone-graft for scaphoid nonunion with avascular necrosis of the proximal pole. Description of a new type of surgical procedure]." Der Unfallchirurg **111**(3): 201-205.
- Kawai, H. and K. Yamamoto (1988). "Pronator Quadratus Pedicled Bone-Graft for Old Scaphoid Fractures." Journal of Bone and Joint Surgery-British Volume **70**(5): 829-831.
- Kirkeby, L. and T. B. Hansen (2006). "Vascularised bone graft for the treatment of non-union of the scaphoid." Scandinavian Journal of Plastic and Reconstructive Surgery and Hand Surgery **40**(4): 240-243.
- Krimmer, H., B. Krapohl, et al. (1997). "[Post-traumatic carpal collapse (SLAC- and SNAC-wrist)--stage classification and therapeutic possibilities]." Handchirurgie, Mikrochirurgie, plastische Chirurgie : Organ der Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft für Handchirurgie : Organ der Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft für Mikrochirurgie der Peripheren Nerven und Gefässe : Organ der Vereinigung der Deutschen Plastischen Chirurgen **29**(5): 228-233.
- Krimmer, H., R. Schmitt, et al. (2000). "[Scaphoid fractures--diagnosis, classification and therapy]." Der Unfallchirurg **103**(10): 812-819.
- Kuhlmann JN, M. M., Boabighi A, Baux S (1987). "Vascularized bone graft pedicled on the volar carpal artery for non-union of the scaphoid." J Hand Surg [Br]. **12**(2):203-10.
- Kuntscher, M., M. Trankle, et al. (2001). "[Management of proximal scaphoid bone pseudarthroses and fractures with the mini-Herbert screw via a dorsal approach]." Der Unfallchirurg **104**(9): 813-819.
- Leslie, I. J. and R. A. Dickson (1981). "The fractured carpal scaphoid. Natural history and factors influencing outcome." The Journal of bone and joint surgery. British volume **63-B**(2): 225-230.
- Linscheid, R. L., J. H. Dobyns, et al. (1972). "Traumatic instability of the wrist. Diagnosis, classification, and pathomechanics." The Journal of bone and joint surgery. American volume **54**(8): 1612-1632.
- Malizos, K. N., V. Zachos, et al. (2007). "Scaphoid nonunions: Management with vascularized bone grafts from the distal radius: A clinical and functional outcome study." Plastic and reconstructive surgery **119**(5): 1513-1525.

- Mathoulin, C. and M. Haerle (1998). "Vascularized bone graft from the palmar carpal artery for treatment of scaphoid nonunion." Journal of Hand Surgery-British and European Volume 23B(3): 318-323.
- McQueen, M. M., M. K. Gelbke, et al. (2008). "Percutaneous screw fixation led to faster recovery and return to work than immobilization for fractures of the waist of the scaphoid." Journal of Bone and Joint Surgery-American Volume 90A(8): 1793-1793.
- Megerle, K., X. Keutgen, et al. (2008). "Treatment of scaphoid non-unions of the proximal third with conventional bone grafting and mini-Herbert screws: an analysis of clinical and radiological results." The Journal of hand surgery, European volume 33(2): 179-185.
- Merrell GA, W. S., Slade JF 3rd. (2002). "Treatment of scaphoid nonunions: quantitative meta-analysis of the literature." J Hand Surg [Am] 27(4):**685-91**.
- Munk, B. and C. F. Larsen (2004). "Bone grafting the scaphoid nonunion - A systematic review of 147 publications including 5246 cases of scaphoid nonunion." Acta Orthopaedica Scandinavica 75(5): 618-629.
- Nakamura, R. (2000). "Scaphoid mal-union--current concept and perspectives." Hand surgery : an international journal devoted to hand and upper limb surgery and related research : journal of the Asia-Pacific Federation of Societies for Surgery of the Hand 5(2): 155-160.
- Ring, D., J. B. Jupiter, et al. (2000). "Acute fractures of the scaphoid." The Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons 8(4): 225-231.
- Robbins, R. R., O. Ridge, et al. (1995). "Iliac Crest Bone-Grafting and Herbert Screw Fixation of Nonunions of the Scaphoid with Avascular Proximal Poles." Journal of Hand Surgery-American Volume 20A(5): 818-831.
- Russe, O. (1960). "Fracture of the carpal navicular. Diagnosis, non-operative treatment, and operative treatment." The Journal of bone and joint surgery. American volume 42-A: 759-768.
- Sauerbier, M. and A. T. Bishop (2001). "[Possible applications of pedicled vascularized bone transplants of the distal radius]." Handchirurgie, Mikrochirurgie, plastische Chirurgie : Organ der Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft für Handchirurgie : Organ der Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft für Mikrochirurgie der Peripheren Nerven und Gefässe : Organ der Vereinigung der Deutschen Plastischen Chirurgen 33(6): 387-400.

- Sawaizumi, T., M. Nanno, et al. (2003). "Vascularized second metacarpal-base bone graft in scaphoid non-union by the palmar approach." Journal of Reconstructive Microsurgery **19**(2): 99-105.
- Schaller, E., F. Lassner, et al. (1993). "[A comparison of different treatment methods of pseudarthroses and recurrent pseudarthroses of the scaphoid]." Handchirurgie, Mikrochirurgie, plastische Chirurgie : Organ der Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft für Handchirurgie : Organ der Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft für Mikrochirurgie der Peripheren Nerven und Gefässe : Organ der Vereinigung der Deutschen Plastischen Chirurgen **25**(4): 204-210.
- Schmidt, G. (2004). "Modern methods in hand and plastic surgery. Recent methods for the treatment of scaphoid fractures and pseudarthrosis." Trauma Berufkrank Retrieved Suppl 1, 6.
- Schmidt, H. and U. Lanz (1992). Chirurgische Anatomie der Hand. Stuttgart, Georg Thieme Verlag.
- Schubert, H. E. (2000). "Scaphoid fracture. Review of diagnostic tests and treatment." Canadian family physician Medecin de famille canadien **46**: 1825-1832.
- Sheetz, K. K., A. T. Bishop, et al. (1995). "The arterial blood supply of the distal radius and ulna and its potential use in vascularized pedicled bone grafts." The Journal of hand surgery **20**(6): 902-914.
- Smith, D. K., W. P. Cooney, 3rd, et al. (1989). "The effects of simulated unstable scaphoid fractures on carpal motion." The Journal of hand surgery **14**(2 Pt 1): 283-291.
- Steinmann, S. P., A. T. Bishop, et al. (2002). "Use of the 1,2 intercompartmental supraretinacular artery as a vascularized pedicle bone graft for difficult scaphoid nonunion." Journal of Hand Surgery-American Volume **27A**(3): 391-401.
- Straw, R. G., T. R. C. Davis, et al. (2002). "Scaphoid nonunion: treatment with a pedicled vascularized bone graft based on the 1,2 intercompartmental supraretinacular branch of the radial artery." Journal of Hand Surgery-British and European Volume **27B**(5): 413-416.
- Taleisnik, J. and P. J. Kelly (1966). "The extraosseous and intraosseous blood supply of the scaphoid bone." The Journal of bone and joint surgery. American volume **48**(6): 1125-1137.
- Tambe, A. D., I. Cutler, et al. (2006). "Scaphoid non-union: The role of vascularized grafting in recalcitrant non-unions of the scaphoid." Journal of Hand Surgery-British and European Volume **31B**(2): 185-190.

- Thompson, N. W., A. Kapoor, et al. (2008). "The use of a vascularised periosteal patch onlay graft in the management of nonunion of the proximal scaphoid." Journal of Bone and Joint Surgery-British Volume **90B**(12): 1597-1601.
- Yuceturk, A., Z. U. Isiklar, et al. (1997). "Treatment of scaphoid nonunions with a vascularized bone graft based on the first dorsal metacarpal artery." Journal of Hand Surgery-British and European Volume **22B**(3): 425-427.
- Zaidenberg, C., J. W. Siebert, et al. (1991). "A New Vascularized Bone-Graft for Scaphoid Nonunion." Journal of Hand Surgery-American Volume **16A**(3): 474-478.
- Zeplin, P. H. and I. Kuhfuss (2009). "[Midcarpal arthrodesis with cortical bolting chip for treatment of grade II/III scaphoid non-union and scapholunate advanced collapse]." Handchirurgie, Mikrochirurgie, plastische Chirurgie : Organ der Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft für Handchirurgie : Organ der Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft für Mikrochirurgie der Peripheren Nerven und Gefässe : Organ der Vereinigung der Deutschen Plastischen Chirurgen **41**(3): 183-185.

7 Veröffentlichung

Teile der vorliegenden Dissertationsschrift wurden bereits in der folgenden Publikation veröffentlicht:

Jaminet P, Werdin F, Pfau M, Götz M, Manoli T, Rahmanian-Schwarz A, Schaller HE. - Treatment algorithm for scaphoid nonunion: Retrospective case-control study of 208 patients – Unfallchirurg. 2012 Nov;115(11):994-9.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, den Antrag für die Annahme als Doktorandin erstmalig gestellt zu haben. Die Arbeit wurde von mir an keiner anderen Hochschule erstellt und selbstständig erstellt.

Stuttgart, den 30.11.2014

Marilena Götz

Danksagung

Ich möchte allen danken, die mich bei meiner Arbeit unterstützt haben.

Ich danke Herrn Professor Schaller für die Erlaubnis, zu diesem Thema meine Dissertation zu verfassen und für seine Betreuung als mein Doktorvater.

Mein herzlicher Dank gilt Herrn PD Dr. Jaminet, der mich immer ausgezeichnet betreut und beraten hat. Danke für die Unterstützung, Geduld und die erfahrenen, konstruktiven Ratschläge in vielen Situationen.

Außerdem möchte ich die Mitarbeiter des biometrischen Instituts der Universität Tübingen dankend erwähnen, die mir bei der statistischen Auswertung meiner Ergebnisse eine große Hilfe waren.

Mein besonderer Dank und meine Wertschätzung für all die Unterstützung und die Begleitung geht an meine Eltern und meine Familie, die immer für mich da sind und die maßgeblich an meinem Werdegang beteiligt waren.

Letztlich möchte ich Moritz Götz, Christiane Rauscher und Carl-Phillip Glauner für ihre kompetente und treue Unterstützung und Motivation von Herzen danken.