

Aus der Abteilung für Hand-, Plastische
und Ästhetische Chirurgie
Klinik der Universität München
Direktor: Prof. Dr. med. Riccardo Giunta

**Erste Erfahrungen mit der
winkelstabilen Skaphoidplatte**

Dissertation
zum Erwerb des Doktorgrades der Medizin
an der Medizinischen Fakultät der
Ludwig-Maximilians-Universität zu München

**vorgelegt von
Ann-Katrin Dietl
aus München**

2023

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter: PD Dr. Elias Volkmer

Mitberichterstatter: PD Dr. Jörg Hausdorf

Dekan: Prof. Dr. med. Thomas Gudermann

Tag der mündlichen Prüfung: 20.07.2023

Gewidmet meinen Eltern

I. Inhaltsverzeichnis

II. Abkürzungsverzeichnis 9

1. Hintergrund und Ziele 11

2. Einleitung 12

2.1 Anatomie und Funktion des Os scaphoideum (Kahnbein/Skaphoid) 12

2.1.1 Osteologie..... 12

2.1.2 Ligamentäre Strukturen..... 15

2.1.3 Vaskularisation..... 17

2.1.4 Funktion 19

2.2 Frakturen des Skaphoids..... 20

2.2.1 Allgemeines..... 20

2.2.2 Unfallmechanismus 21

2.2.3 Klassifikation 22

2.2.4 Symptome und Diagnostik 23

2.3 Die Skaphoidpseudarthrose 25

2.3.1 Allgemeines..... 25

2.3.2 Definition 25

2.3.3 Ätiologie und Pathogenese..... 25

2.3.4 Klassifikationen..... 27

2.3.5 Symptome und Diagnostik 28

2.3.6 Verlauf der Pseudarthrose und Folgen..... 29

2.4	Therapie von Skaphoidfrakturen und Skaphoidpseudarthrosen.....	30
2.4.1	Konservative Therapie der Kahnbeinfraktur.....	30
2.4.2	Operative Therapie der Kahnbeinfraktur und Kahnbeinpseudarthrose.....	32
2.4.3	Prognose	36
2.5	Die winkelstabile Skaphoidplatte.....	36
2.5.1	Das Prinzip der Winkelstabilität	37
2.5.2	Bisherige Erfahrungen mit der winkelstabilen Skaphoidplatte.....	38
2.5.3	Potenzielle Einsatzgebiete der winkelstabilen Kahnbeinplatte	39
3.	Material und Methoden	40
3.1	Patientenkollektiv.....	40
3.1.1	Einschlusskriterien	40
3.1.2	Ausschlusskriterien	42
3.2	Präoperative Diagnostik	42
3.3	Operationstechnik.....	42
3.3.1	Frakturversorgung	42
3.3.2	Versorgung mit einem Knochentransplantat.....	45
3.4	Postoperatives Verhalten.....	46
3.4.1	Immobilisation	46
3.4.2	Antibiose	46
3.5	Postoperative Nachuntersuchung.....	46
3.5.1	Fragebogen.....	47
3.5.2	Klinische Untersuchung	47
3.6	Radiologische Beurteilung.....	51
3.7	Fünfjahres-Follow-Up Patientenbefragung.....	52

3.8	Dokumentation und statistische Auswertung	52
4.	Ergebnisse	53
4.1	Soziometrische Daten	53
4.1.1	Geschlecht	53
4.1.2	Altersstruktur.....	53
4.2	Präoperativer Status	54
4.2.1	Unfallhergang.....	55
4.2.2	Begleitfrakturen.....	55
4.3	Lokalisation der Fraktur	56
4.3.1	Betroffene Seite der Hand	56
4.3.2	Fraktureinteilung	56
4.3.3	Vorangegangene Therapie.....	58
4.3.4	Verwendung eines Knochentransplantates.....	59
4.4	Klinische Untersuchung	59
4.4.1	Ergebnisse des Bewegungsumfanges.....	60
4.4.2	Griffstärke	61
4.5	Metallentfernung	62
4.6	Patientenbefragung	63
4.6.1	Nach Plattenosteosynthese	63
4.6.2	Nach Plattenentfernung	64
4.7	Knöchernerne Konsolidierung	66
4.8	Fünfjahres-Follow-Up	68
4.9	Besonderheiten	69
4.9.1	Morbus Preiser	69

4.9.2	Material	69
5.	Fallbeispiele	70
5.1	Die mehrfragmentäre Fraktur	70
5.2	Die Humpback-Deformität	73
5.3	Die ausbleibende Heilung	75
6.	Diskussion	77
6.1	Patientengut	77
6.1.1	Alter und Geschlecht	77
6.1.2	Frakturlokalisierung	78
6.2	Klinische Ergebnisse	79
6.2.1	Auswertung der Scores	79
6.2.2	Schmerz	80
6.2.3	Bewegungsumfang	80
6.2.4	Griffstärke	82
6.3	Knöcherner Konsolidierung	82
6.3.1	Knochen-Transplantat	85
6.3.2	Plattenentfernung	87
6.4	Komplikationen	88
6.5	Chancen und Limitationen der Arbeit	88
7.	Zusammenfassung	90
III	Literaturverzeichnis	92
IV.	Abbildungsverzeichnis	101

V. Tabellenverzeichnis	104
VI. Anhang.....	105
VII. Danksagung	106
VIII. Eidesstattliche Erklärung.....	107

II. Abkürzungsverzeichnis

A.	arteria
AO	Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen
BMI	Biometrisches Institut
bzw.	beziehungsweise
cm	Zentimeter
CT	Computertomographie
d.h.	das heißt
DISI	dorsal intercalated segment instability
<i>FCR</i>	flexor carpi radialis
g	Gramm
K-Drähte	Kirschner-Drähte
kg	Kilogramm
Lig.	Ligamentum
LMU	Ludwig-Maximilians-Universität
LT	lunotriquetral
mm	Millimeter
MRT	Magnetresonanztomographie
Nr.	Nummer
NRS	Numerische Analogskala
<i>PACS</i>	Picture Archiving and Communication System
Pat.	Patient
PROM	patient-reported outcome measure
ROM	Range of Motion
s.	siehe

SL skapholunär
SNACscaphoid non-union advanced collapse
V. vena
VAS..... Visuelle Analogskala
vs. versus
z.B. zum Beispiel

1. Hintergrund und Ziele

Die Skaphoidfraktur ist der häufigste Bruch im Bereich der Handwurzelknochen (Schadel-Hopfner et al., 2016, Langer et al., 2016, Geissler et al., 2012). Sie wird nicht selten übersehen und betrifft vor allem junge, aktive Patienten (Schmidt et al., 2001). Selbst bei korrekter Diagnose kann es zu einer Kahnbeinpseudarthrose kommen, welche unbehandelt in aller Regel in eine Handgelenksarthrose mündet. Übersehene Frakturen hingegen resultieren regelhaft in einer Pseudarthrose, von deren korrekter Diagnose und Behandlung die schmerzfreie Belastbarkeit des Handgelenks abhängt. Obwohl die Einführung der Herbert-Schraube die Ergebnisse nach Kahnbeinfrakturen- und Pseudarthrosen deutlich verbessert hat, stellen komplexe Frakturen und Pseudarthrosen den Handchirurgen nach wie vor erhebliche Herausforderungen. Insbesondere die knöcherne Heilung der komplizierten Kahnbeinfraktur und der Kahnbeinpseudarthrose stellt weiterhin ein nicht zu unterschätzendes Problemfeld dar, welchem die Herbertschraube alleine nicht immer gerecht werden konnte. Aus diesem Grund wurde eine winkelstabile Platte speziell für das os scaphoideum entwickelt, die insbesondere in Problemfällen wie Pseudarthrosen, komplexen Frakturen oder in Fällen mit reduzierter Knochenqualität zum Einsatz kommen soll.

In dieser Arbeit sollen anhand des eigenen Patientenguts in der Abteilung Hand-, Plastischen und Ästhetischen Chirurgie der Chirurgischen Klinik der Ludwig-Maximilians- Universität (LMU) die ersten Erfahrungen der Versorgung von Skaphoidfrakturen bzw. Skaphoidpseudarthrosen mittels winkelstabiler Platte dokumentiert werden. Ziel ist es, anhand von 25 inkludierten Patienten, die Vor- und Nachteile, Chancen und Grenzen dieses Implantates aufzuzeigen. Unsere Ergebnisse werden in der hier folgenden Arbeit zusammengefasst und mit der bekannten Literatur verglichen. Diese Studie steht in keinem Zusammenhang mit der Herstellerfirma Medartis.

2. Einleitung

2.1 Anatomie und Funktion des Os scaphoideum (Kahnbein/Skaphoid)

Das Kahnbein liegt in der Handwurzel radialseitig und grenzt distal an das Os trapezium sowie das Os trapezoideum, ulnarseitig an das Os capitatum und Os lunatum sowie proximal an die Speiche. Dem Skaphoid wird in der Bewegung der Handwurzelknochen eine zentrale Funktion zugesprochen. Es verbindet die distale mit der proximalen Handwurzelreihe und hat so anatomisch-funktionell eine Schlüsselrolle inne (Lichtman et al., 1981).

2.1.1 Osteologie

Die Handwurzel besitzt acht Handwurzelknochen, die sich anatomisch in eine proximale und distale Reihe gliedern lassen (Eschweiler et al., 2014). In der proximalen Reihe liegen von radial nach ulnar das Os scaphoideum, Os lunatum, und Os triquetrum. Dem Os triquetrum liegt das Os pisiforme an, das der Sehne des M. flexor carpi ulnaris als Sesambein dient. Die distale Reihe, die mit den Mittelhandknochen artikuliert, setzt sich aus Os trapezium, Os trapezoideum, Os capitatum und Os hamatum zusammen (Paulsen F, 2010).

Die beiden Handwurzelreihen sind ein entscheidender Bestandteil der beiden Handgelenke. Das Articulatio radiocarpalis ist das proximale Handgelenk und verbindet die Unterarmknochen Radius und Ulna mit den proximal gelegenen Handwurzelknochen. Im distalen Handgelenk, Articulatio mediocarpalis, kommunizieren die proximale und distale Reihe der Handwurzelknochen über einen S-förmigen Gelenkspalt miteinander (Ronald, 1987). Das distale und das proximale Handgelenk (s. Abbildung 1) sind Ellipsoidgelenke, die für die Bewegungsachsen ausschlaggebend sind (Paulsen F, 2010). Die Ulnar- und Radialabduktion sowie Palmarflexion finden vor allem über das proximale Handgelenk statt, die Dorsalextension dahingegen überwiegend über das distale Handgelenk.

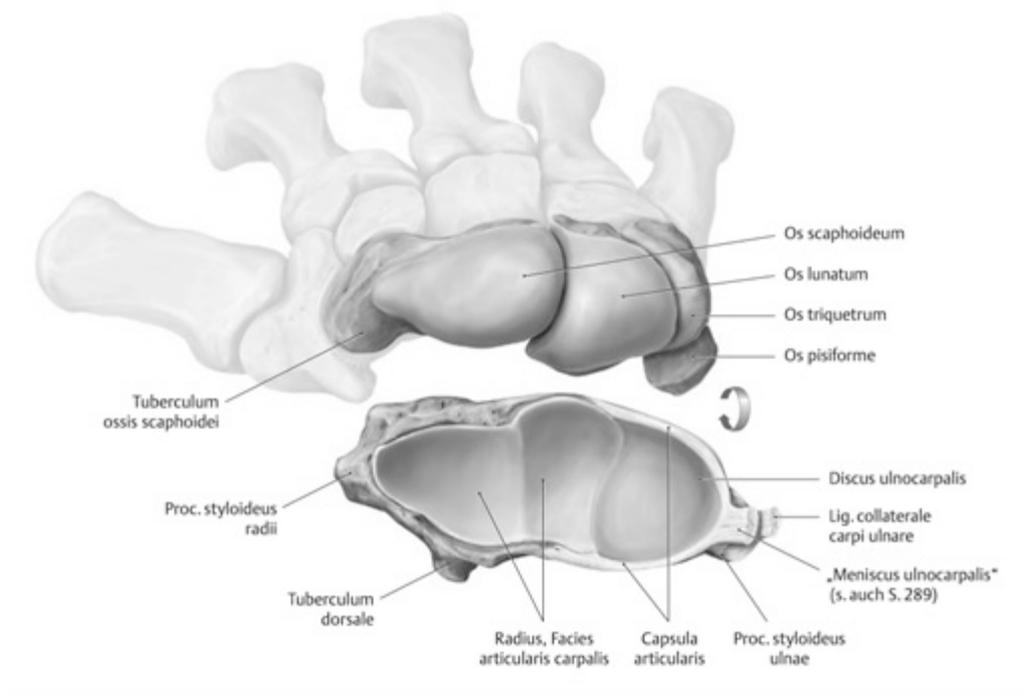


Abbildung 1: Artikulierende Gelenkflächen des proximalen Handgelenks einer rechten Hand (Articulatio radiocarpalis) (Schünke M, 2018).

Die Articulationes intercarpales werden als karpale Nebengelenke bezeichnet und verbinden die einzelnen Handwurzelknochen untereinander. Die Gelenkflächen der Knochen sind jeweils schräg gestellt, um eine Rotation der Knochen bei Bewegung zu ermöglichen. Dabei kommuniziert das Skaphoid mit folgenden Knochen: Am proximalen Pol artikuliert das Skaphoid hauptsächlich mit dem Radius, dem Os lunatum sowie dem Os capitatum. Der distale Pol besteht aus den Gelenkflächen zum Os trapezium und Os trapezoideum sowie dem distalen Abschnitt der Gelenkfläche zum Os capitatum (s. Abbildung 2) (Langer et al., 2016).

Das Skaphoid hat eine komplexe dreidimensionale Form, die leicht s-förmig verdreht ist und sich in der Längsachse von dorsozentral proximal nach distal palmar radial zieht. Klinisch-anatomisch kann es in ein proximales Drittel, ein mittleres Drittel mit Taille und ein distales Drittel mit Tuberkulum unterteilt werden. Die Form des Kahnbeins kann stark variieren, was eine Herausforderung für die operative Versorgung darstellen kann (Compson et al., 1993, Langer et al., 2016, Dönicke et al., 2014).

Auch die mechanische Belastung des Knochens im Hinblick auf die gesamte Handwurzel spielt beim Verständnis des Skaphoids eine Rolle.

L. Romdhane veröffentlichte 1990 als erster in der Literatur eine experimentelle Studie, in der er die Belastung des Kahnbeins während des Bewegungsprozesses anhand Dehnungsmessstreifen und eines Elektrogoniometers erfasste. Dabei zeigte sich, dass das Skaphoid in der neutralen Flexion-Extensionstellung mit 15° Ulnardeviation die geringste Belastung erfährt (Romdhane et al., 1990).



Abbildung 2: Darstellung des Handskeletts aus Robert Janker, Röntgenbilder-Atlas der normierten Aufnahmen Röntgenaufnahme-technik Teil II, 8. Auflage, 1974, Verlag Johann Ambrosius Barth: 1) Radius; 2) Ulna; 3) Processus styloideus radii; 4) Processus styloideus ulnae; 5) Caput Ulnae; 6) Gegend des Discus articularis; 7) Articulatio radiocarpea; 8) Os scaphoideum; 9) Os lunatum; 10) Os triquetrum; 11) Os pisiforme; 12) Os trapezium; 13) Os trapezoideum; 14) Os capitatum; 15) Os hamatum; 16) Hamulus ossis hamati; 17) Articulatio intercarpea; 18) Articulatio carpometacarpea; 19-23) Ossa metacarpalia I bis V; 24-28) Basis der Ossa metacarpalia I bis V; 29-33) Capita der Ossa metacarpalia I-V; 34) Ossa sesamoidea; 35) Grenze des Daumenballens.

2.1.2 Ligamentäre Strukturen

Die karpalen Bänder dienen neben der Stabilisation der Handwurzelknochen der Bewegungsführung und Begrenzung von Bewegungsausschlägen. Am Handgelenk lässt sich der Bandapparat in ein tiefliegendes intrinsisches und ein oberflächliches extrinsisches System gliedern (Schünke et al., 2018, Taleisnik, 1976).

Funktionell lässt sich der karpale Bandapparat in eine tiefe, mittlere und oberflächliche Schicht einteilen:

Die tiefe Schicht entspricht den intrinsischen Bändern, die die Handwurzelknochen untereinander interossär (jeweils in der distalen oder proximalen Reihe) und interkarpal (distale und proximale Reihe) verbinden (s. Abbildung 3). Dazu zählen neben dem Ligamentum scaphotrapezium (Lig. scaphotrapezium), Lig. trapezotrapezoideum, Lig. trapezoideocapitatum, und Lig. hamatocapitatum, das skapholunäre Band (SL-Band) und das lunotriquetrale Band (LT-Band). Das SL-Band und LT-Band stabilisieren die proximale Handwurzelreihe maßgeblich. Das SL-Band setzt an der ulnaren Seite des proximalen Skaphoidpols an und zieht schräg zur radialen Seite des Lunatums. Bei Ruptur des SL-Bandes wird die palmare Subluxation des SL-Bandes initial noch durch sekundäre Stabilisatoren gehemmt. Dazu zählen das Lig. scaphotrapeziumtrapezoideum sowie die Sehne des M. flexor carpi radialis (Redeker et al., 2011). Bei fortbestehender Entkopplung von Skaphoid und Lunatum folgen beide Knochen ihren jeweiligen Eigenbewegungen. In diesem Fall kommt es bei der Röntgendiagnostik im seitlichen Strahlengang zu einer Verkippung des Lunatums in Extensionstellung nach palmar und einer Verschiebung der Skaphoids in Flexionsstellung. Dies wird als DISI-Fehlstellung (dorsal intercalated segment instability) bezeichnet und kann die karpale Stabilität gefährden (Prommersberger et al., 2014).

Das intrakapsuläre System stellt die ligamentären Verbindungen von Radius oder Ulna zu den Handwurzelknochen dar und wird in ein palmares und dorsales V-Band eingeteilt. Diese stabilisieren proximal das radiokarpale Gelenk und distal das mediokarpale Gelenk.

INTRINSIC LIGAMENTS

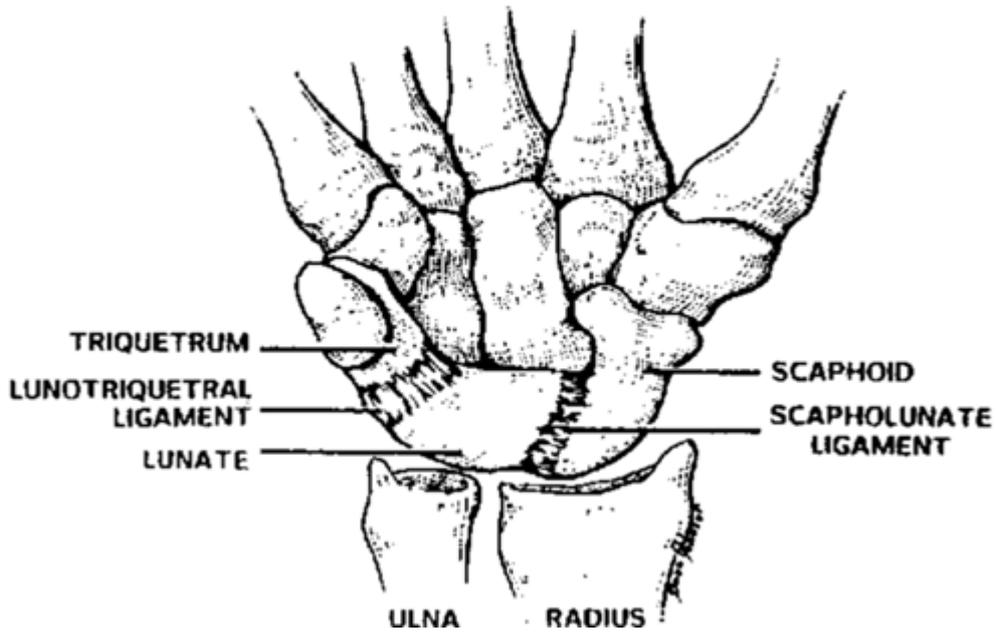


Abbildung 3: Intrinsischer Bandapparat (Johnston et al., 1995).

Der extrinsische Bandapparat verbindet die Handwurzel mit dem Metakarpalsystem und dem Unterarm (s. Abbildung 4).

Die mittlere Schicht besteht hauptsächlich aus extrinsischen Bändern: Lig. collaterale carpi radiale, Lig. radiocarpale palmare, Lig. radiocarpale dorsale sowie der ulnokarpale Komplex. Die Bänder sind stark mit der Gelenkkapsel verbunden und stabilisieren diese.

Die oberflächliche Schicht setzt sich aus Retinaculum flexorum und Retinaculum extensorum zusammen. Diese zügeln die Sehnen und halten sie in ihrer richtigen Position (Taleisnik, 1976).

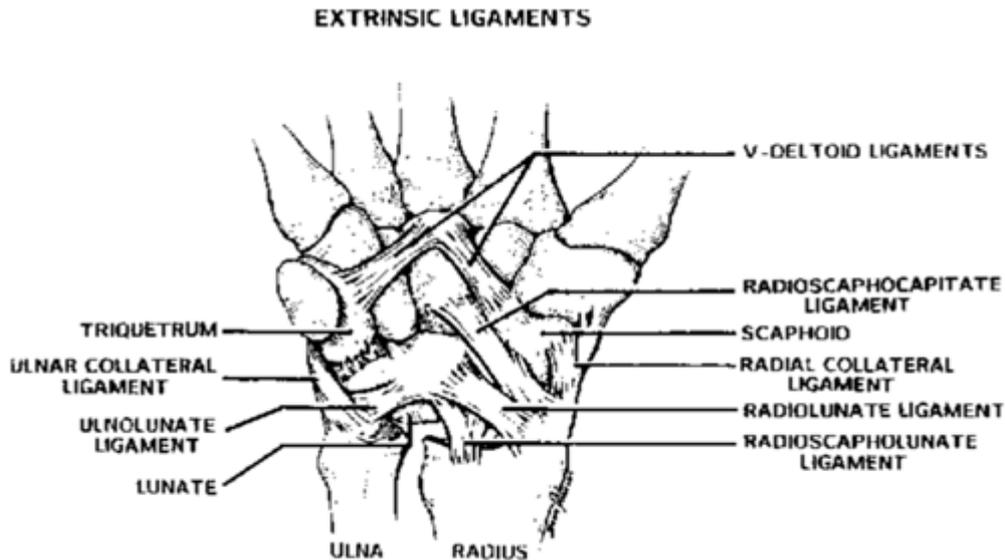


Abbildung 4: Extrinsischer Bandapparat (Johnston et al., 1995).

2.1.3 Vaskularisation

Die Gefäßversorgung des Skaphoids ist mitentscheidend für die Heilungsrate nach Frakturen und hat daher einen hohen Stellenwert (Gelberman et al., 1980).

Das radial gelegene Skaphoid wird hauptsächlich von der Arteria radialis (A. radialis) vaskularisiert. Dabei verläuft diese von proximal palmar kommend radiallyseitig am Kahnbein vorbei nach distal, um den Arcus palmaris profundus zu bilden. Auf dieser Strecke gehen mehrere kleiner Äste palmarseitig und dorsalseitig der A. radialis ab. Die radiallyseitig abgehenden Äste speisen das Tuberkulum scaphoidei.

Langer et al. sieht den Ramus dorsalis scaphoidei arteriae radialis und kleinere Äste aus dem Arcus intercarpalis palmaris als wichtigste Blutversorgung des Kahnbeins an (Langer et al., 2016).

Ca. 80% des proximalen Skaphoids werden durch die dorsalen Äste der A. radialis versorgt. Diese treten dorsalseitig auf Höhe der Taille durch die Foramina nutricia ein. Die distalen 20% des Kahnbeins werden durch die palmaren Äste versorgt, die durch das Tuberkulum scaphoidei in den distalen Pol eintreten (s. Abbildung 5). Nach Gelberman und Menon gibt es keine intraossären Anastomosen zwischen palmaren und dorsalen Ästen, die die Vaskularisation verbessern könnten.

In der Literatur wird der knorpelbedeckte Anteil des Kahnbeins mit 70-80% beschrieben, die Regionen in denen Blutgefäße in den Knochen ziehen können sind somit begrenzt (Langer et al., 2016, Geissler et al., 2012). Der proximale Anteil des Skaphoids ist allseitig von Knorpel bedeckt und wird ausschließlich endarteriell versorgt. Desto proximaler der Frakturspalt liegt, desto höher ist das Risiko für die Ausbildung einer Pseudarthrose oder Nekrose (Dönicke et al., 2014).

Abweichend dazu beschreibt Oehmke et al. 2009 die durchaus suffiziente Gefäßversorgung des Kahnbeins mit Anastomosen der dorsalen und palmaren Äste der A. radialis. Dabei wird der palmare proximale Pol vor allem durch den Ramus carpalis palmaris der A. radialis versorgt, das mittlere Drittel über die A. palmaris superficialis. In einigen Fällen waren auch Äste der A. metacarpalis dorsalis I an der Versorgung mitbeteiligt. Die Blutversorgung als Grund für vermehrte Nekrosen im proximalen Skaphoidpol anzugeben, wird in der Studie von 2009 als unwahrscheinlich beschrieben (Oehmke et al., 2009).

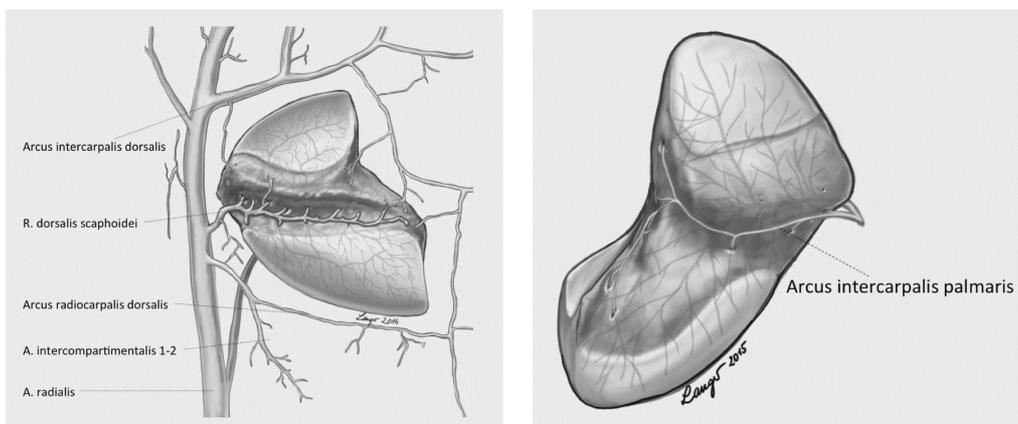


Abbildung 5: Blutversorgung des Kahnbeins. Links: Ansicht von dorsal. Rechts: Ansicht von palmar (Langer et al., 2016).

Der venöse Abfluss des Skaphoids, mitsamt des proximalen Pols, erfolgt über den dorsalen Kamm und mündet entweder in die tiefen Venae comitantes der A. radialis oder in das oberflächliche rete venosum dorsale manus, das die Vena cephalica (V. cephalica) oder V. basilica speist (Handley et al., 1991).

2.1.4 Funktion

Im Säulenmodell nach Navarro wird die Handwurzel in drei longitudinale Säulen, die die Beweglichkeit steuern, aufgeteilt (Navarro, 1935). Das Skaphoid ist Teil der lateralen Säule und nimmt vor allem an rotatorischen Bewegungen teil. Zusätzlich hält es eine die überbrückende Funktion zwischen distaler und proximaler Handwurzelreihe inne (Eschweiler et al., 2014).

Auch im modifizierten Reihen-Säulen-Modell nach Taleisnik wird dem Skaphoid die Rolle einer „beweglichen Säule“ zugesprochen (Taleisnik, 1976).

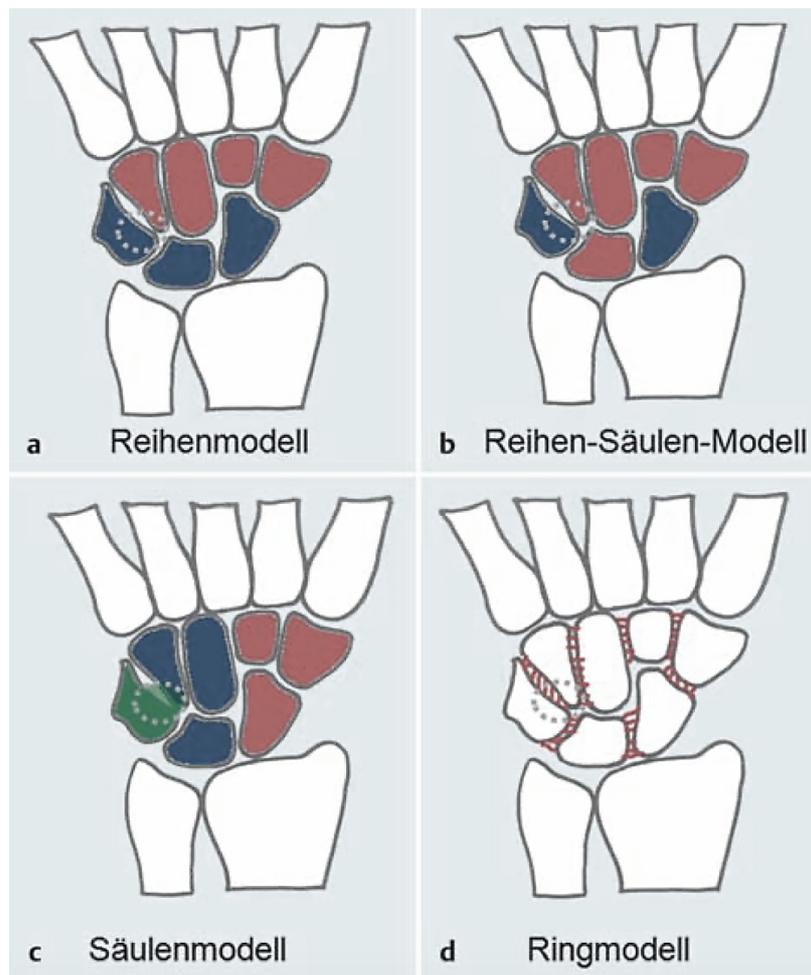


Abbildung 6: a-d: Verschiedene Modellansichten der rechten Handwurzel: a Reihenmodell, b Reihen-Säulenmodell, c Säulenmodell, d Ringmodell. Nach Eschweiler J. et al., Biomechanische Modellierung der Handwurzel, Z Orthop Unfall. 2014 Apr;152(2):161-9.

Lichtman et al. beschreibt 1981 die Beziehung der Handwurzelknochen untereinander zusammen mit dem intrinsischen Bandapparat als einen mobilen Ring (s. Abbildung 6). Für die präzisen Bewegungen des Handgelenkes sind die feinen Interaktionen der Knochen untereinander

die Voraussetzung. Jegliche Veränderung dieses mobilen Ringes kann somit zu eingeschränkter Beweglichkeit und karpaler Instabilität führen (Lichtman et al., 1981).

Bis heute existiert laut Eschweiler et al. noch kein einheitliches und für die Bewegung der gesunden oder kranken Hand validiertes biomechanisches Modell (Eschweiler et al., 2014).

Garcia-Elias betont 2013, dass nicht nur die Stellung des Kahnbeins oder die Interaktion der proximalen und distalen Handwurzelreihe für die karpale Stabilität ausschlaggebend sind. Im Laufe der Jahre habe man gesehen, dass neben diesen beiden Faktoren auch die ligamentären Strukturen, die, wie man später herausfand, mit Mechanorezeptoren versehen sind. Dadurch ist die Rolle der neuromuskulären Kontrolle bzw. Reflexe, mit entscheidend (Garcia-Elias, 2013). Man ist sich aber einig, dass das Skaphoid eine wichtige Rolle für die Handgelenks- und Handwurzelfunktion hat. Chang und Grewal sehen eine uneingeschränkte Funktion des Skaphoids als essentiell für die einwandfreie Biomechanik des gesamten Handgelenkes an (Chang et al., 2020).

2.2 Frakturen des Skaphoids

Mit der Entwicklung der Röntgendiagnostik konnte erstmals 1895 die bereits vermutete Skaphoidfraktur bewiesen werden (Haferkamp, 2002).

2.2.1 Allgemeines

Die Inzidenz der Frakturen der Hand und des Handgelenks nehmen in der Bevölkerung kontinuierlich zu, was zum Großteil dem aktiveren Lebensstil und sportlichen Aktivitäten geschuldet ist (Jorgsholm et al., 2020, Schaefer et al., 2002).

Mit ca. 60-80% ist die Skaphoidfraktur der häufigste Bruch der Handwurzelknochen. Dabei besteht das Patientengut vor allem aus jungen Erwachsenen, zumeist Männern (Chang et al., 2020, Arsalan-Werner et al., 2016a, Schadel-Hopfner et al., 2010, Geissler et al., 2012, Jurkowitsch et al., 2016a). Bleibt die primäre Frakturheilung länger als 3 Monate aus bezeichnet man dies definitionsgemäß als „delayed union“. Tritt auch nach 6 Monaten keine knöcherne Konsolidierung ein spricht man von einer Pseudarthrose (Reeh et al., 2022).

Begleitfrakturen der Handwurzelknochen sind selten. Am häufigsten kommt mit ca. 6% die distale Radiusfraktur als zusätzliche Verletzung vor. Nicht selten kommt es bei ausgeprägten Traumata des Handgelenks zu komplexeren Verletzungen. In 6-7% kommt es neben dem Kahnbeinbruch auch zur perilunären Luxation, der sogenannten *De-Quervain*-Luxationsfraktur (Dönicke et al., 2014).

2.2.2 Unfallmechanismus

Frakturen der Handwurzelknochen sowie perilunäre Luxationen entstehen oft im Rahmen von Sportverletzungen oder Stürzen. Hierbei lassen sich ein Hyperextensionstrauma von einem Flexionstrauma oder auch Hochrasanztrauma unterscheiden.

Am häufigsten ist das Hyperextensionstrauma, bei dem es zu einer axialen Krafteinwirkung auf die radiale Handfläche bei dorsalextendiertem Handgelenk kommt (Eisenschenk et al., 1999, Rudigier J, 2014). Der Kraftvektor verläuft vom Metakarpale III über das Kapitatum, zum Skaphoid und schließlich zum Radius. Das Skaphoid wird dabei zwischen der Aufprallfläche und dem Radius eingeklemmt. Der proximale Kahnbeinabschnitt befindet sich hier in einer stabilen Position zwischen Radius und Lig. radioscaphocapitatum. Der distale Kahnbeinabschnitt ist dabei in einer instabilen Position. Der palmare Bandapparat steht unter starker Spannung und kann das distale Kahnbein nicht stabilisieren. Aus den bestehenden Druck- und Spanungskräften resultieren Scherkräfte, die schließlich zu einem Bruch der palmaren Kortikalis führen (s. Abbildung 7) (Schaefer et al., 2002).

Bei einem Hyperextensionstrauma ist zusätzlich auch die Radial- bzw. Ulnardeviation für die Frakturlokalisierung von Bedeutung. Dabei fand man heraus, dass bei einem Sturz auf das dorsalextendierte Handgelenk eine zusätzliche Ulnardeviation eher zu einem Bruch des proximalen Kahnbeindrittels führt. Dem gegenüber steht die Radialdeviation, die vermehrt Brüche im distalen Kahnbeindrittels bewirkt.

Beim selteneren Flexionstrauma kommt es zum Sturz auf die flektierte Hand und führt zu Abscherfrakturen des Tuberkulums (*tuberculum ossis scaphoidei*).

Zusätzlich können Frakturen durch das seltener auftretende Hochrasanztrauma, das oft mit Kombinationsverletzungen am Handgelenk einhergeht, entstehen. 12 % der Skaphoidfrakturen entstehen zum Beispiel durch Kurbelrückschläge.

Der Großteil der Kahnbeinbrüche ist mit 70% im mittleren Drittel lokalisiert. In 20% der Fälle kommt es zu einer Fraktur im proximalen Anteil des Kahnbeins, nur in 10% im distalen (Arsalan-Werner et al., 2016a).

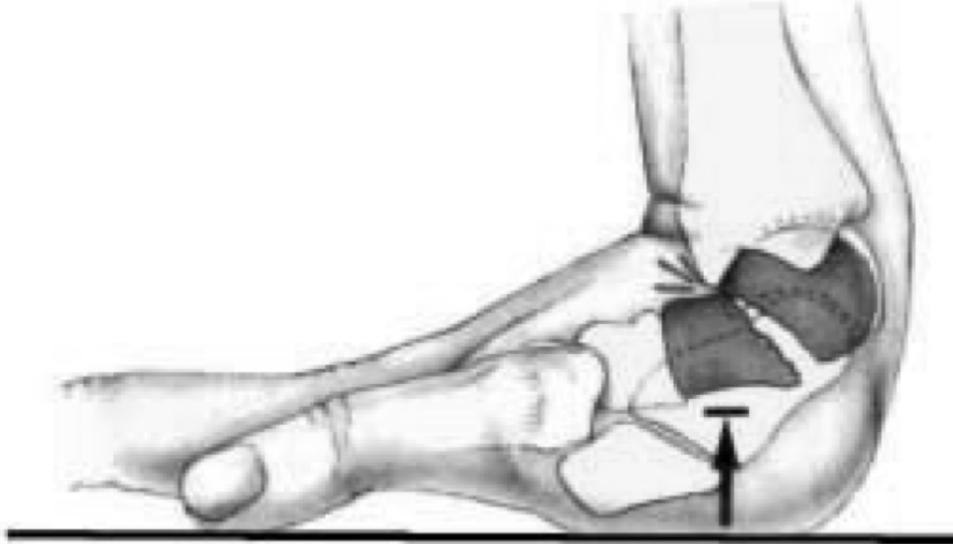


Abbildung 7: Sturz auf die dorsalextendierte Hand. Modell nach Herbert 1990.

2.2.3 Klassifikation

Für ein optimales Behandlungskonzept des Kahnbeinbruchs ist die Frakturbeschaffenheit und die Stabilität des Kahnbeins von entscheidender Bedeutung (Arsalan-Werner et al., 2016a). Zur besseren Differenzierung sind in der Literatur viele verschiedene Einteilungen des frakturierten Skaphoids beschrieben. Neben der klassischen Unterteilung der Fraktur in distales, mittleres und proximales Drittel hat sich die von Herbert und Fisher 1984 entworfene Klassifikation durchgesetzt (Herbert et al., 1984). Dabei wird der Bruch anhand der radiologischen Röntgenuntersuchung analysiert. Die Untergruppen *A* und *B* gelten als frische Frakturen, darunter gilt *A* als stabil und *B* als instabil. „Delayed unions“ mit verzögerte Frakturheilung fallen der Untergruppe *C* zu sowie Pseudarthrosen der Gruppe *D* zugeordnet werden. 2000 wurde die Einteilung durch H. Krimmer modifiziert und die Röntgenuntersuchung durch eine Computertomographie ersetzt, s. Abbildung 8 (Krimmer et al., 2000b).

Tuberkelfrakturen werden als *A1* klassifiziert und gelten als stabil. Die *A2* Fraktur wurde bei Herbert et al. als inkomplette Fraktur der Kahnbeintaille beschrieben. Mittels Computertomographie (CT) konnte bewiesen werden, dass es sich dabei immer um eine durchgehende Frakturlinie handelt (Dönicke et al., 2014, Rudigier J, 2014).

In der Untergruppe *B* werden frische instabile Frakturen zusammengefasst. *B1* stellt einen schräg verlaufenden Bruch dar, *B2* den dislozierten Bruch im mittleren Drittel des Kahnbeins. Unter *B3* fallen die Frakturen des proximalen Skaphoidpols, diese gelten stets als instabil. Als *B4* gilt die transskaphoidale perilunäre Luxationsfraktur (De-Quervain-Luxationsfraktur). Das größte Risiko für instabile Skaphoidfrakturen des proximalen Pols birgt die Durchblutungssituation. In 15-50% der Fälle kann es zu avaskulären Nekrosen des proximalen Skaphoidpols kommen (Yarar-Schlickewei et al., 2019).

Während die stabilen Frakturen vorwiegend konservativ mittels Ruhigstellung in einer Unterarmgipsschiene (*A1*) bzw. in minimal-invasiver Technik (*A2*) versorgt werden können, bedarf es bei instabilen Frakturen (*B1-4*) einer operativen Stabilisierung (Krimmer et al., 2000b).

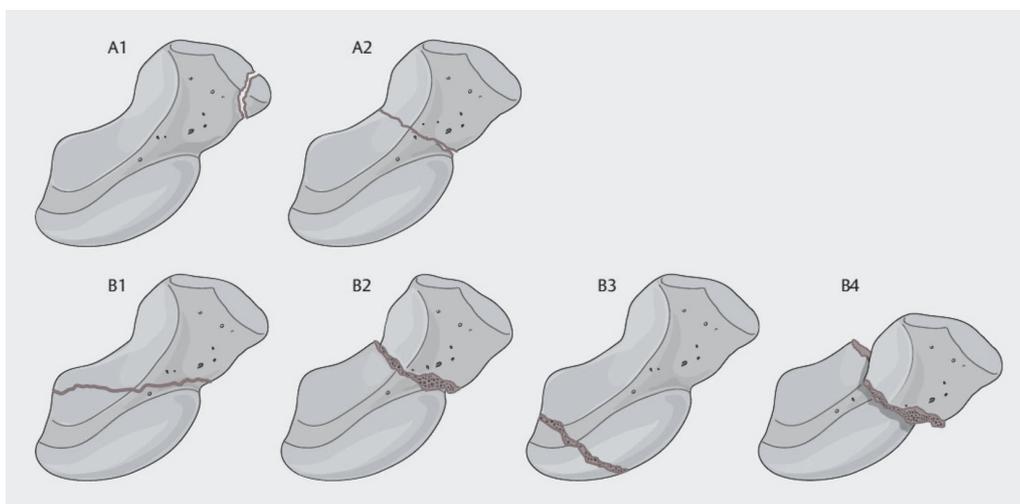


Abbildung 8: Modifizierte Klassifikation der Skaphoidfraktur nach Krimmer/Herbert 2000:

Typ A: stabile Frakturen: *A1* Fraktur des Tuberculum ossis scaphoidei, *A2* nicht dislozierte oder inkomplette Fraktur im mittleren/distalen Drittel.

Typ B: instabile Frakturen: *B1* Schrägfraktur, *B2* dislozierte Fraktur, *B3* Fraktur im proximalen Drittel, *B4* transskaphoidale perilunäre Luxationsfraktur (Arsalan-Werner et al., 2016b).

2.2.4 Symptome und Diagnostik

Bei Kahnbeinfrakturen können die klinischen Symptome relativ diskret sein, so dass nicht selten eine einfache Verstauchung nach einem Sturz auf die dorsalextendierte Hand vermutet wird. Dönicke und Friedel weisen auf die Ungenauigkeit klinischer Symptome im Akutzustand der Skaphoidfraktur hin, da diese genauso gut ligamentären Ursprungs sein könnten (Dönicke et al., 2014).

Bei der klinischen Untersuchung kann eine leichte Schwellung und ein lokalisierter Druckschmerz in der Tabatière vorhanden sein (Rudigier Jürgen und Meier Reinhard, 2015). Außerdem wird über eine Zunahme eines radialeseitigen Schmerzes bei Handgelenksflexion/Extension berichtet. Weitere Hinweise können ein axialer Stauchungsschmerz des Daumenstrahls und ein Druckschmerz über dem Tuberculum scaphoideum sein (Mehling et al., 2013).

Eine genaue radiologische Diagnostik ist obligat. Meistens werden Frakturen des Kahnbeins mittels konventionellem Röntgen, jeweils mit einem dorsopalmaren und lateralen Strahlengang diagnostiziert. Zur vollständigen Skaphoideinsicht ist zusätzlich die Aufnahme nach Stecher mit Faustschluss und Ulnarduktion hilfreich (Mehling et al., 2013, Fodor et al., 2020).

Die röntgenologischen Kriterien einer Fraktur sind Kontinuitätsunterbrechungen der Knochenkontur, Zerstörung der trabekulären Zeichnung, Abtrennung, Überlagerung und Verkeilung von Knochenanteilen, Dislokation der Fragmente sowie Winkelbildungen der Longitudinalachse des Knochenschaftes (Thurn et al., 1979). Zeigt sich in den konventionellen Röntgenbildern kein Hinweis auf eine Fraktur, trotz eindeutiger klinischer Symptomatik, so ist eine Untersuchung mittels CT indiziert. Nach S3-Leitlinie hat die Computertomographie zur Frakturdetektion mit 86% bis 95% eine höhere Sensitivität gegenüber der Projektionsradiographie. Durch die Einführung der Computertomographie hat sich die Diagnostik von Kahnbeinbrüchen entscheidend verbessert, da so dislozierte Brüche und Trümmerfrakturen weniger übersehen werden (Karle et al., 2005). Die CT gilt heute als Goldstandard sowohl für die Klassifikation der Kahnbeinfraktur als auch für die Planung der operativen Versorgung (Arsalan-Werner et al., 2016a).

Des Weiteren kann auch eine Magnetresonanztomographie (MRT) zum Nachweis einer Kahnbeinfraktur zum Einsatz kommen. Vor allem im akuten Zustand nach Trauma zeigt sich ein Knochenmarködem signalintensiviert. Dieses kann jedoch nicht immer von einer vollständigen Fraktur unterschieden werden. Daher sollte zur Diagnosestellung die CT-Untersuchung stets vorgezogen werden (Mehling et al., 2013).

2.3 Die Skaphoidpseudarthrose

2.3.1 Allgemeines

Die Pseudarthrose des Kahnbeins gilt als bedeutsamste Folge einer Skaphoidfraktur, resultierend durch knöcherner Heilungsstörungen (Schadel-Hopfner et al., 2016). Das Nicht-Erkennen der Kahnbeinfraktur ist der Hauptgrund für die Entstehung der Kahnbeinpseudarthrose (Karle et al., 2005). Bei ausgebliebener Therapie kann es in bis zu 60% der Fälle zu einer Kahnbeinpseudarthrose kommen. Und auch trotz adäquater Versorgung von frischen Kahnbeinfrakturen kommt es in 2-12% der Fälle zur Entstehung einer Pseudarthrose (Dönicke et al., 2014). Der Kahnbeinpseudarthrose wird eine Schlüsselrolle hinsichtlich der Biomechanik des Karpus zugeschrieben, da es bei fehlender Behandlung zur karpalen Instabilität, Ausbildung eines *SNAC wrist* (scaphoid non-union collapse) und darüber hinaus auch zur Handgelenkspanarthrose kommen kann.

2.3.2 Definition

Eine verzögerte Knochenbruchheilung liegt vor, wenn nach 3 Monaten keine Frakturheilung stattgefunden hat (Thurn et al., 1979). In diesem Fall spricht man von einer „delayed union“.

Wenn die knöcherner Heilung nach 6 Monaten noch nicht eingetreten ist, spricht man von einer Skaphoidpseudarthrose, sogenannte „non-union“. (Orthopädie, 2002, Reeh et al., 2022).

2.3.3 Ätiologie und Pathogenese

Nach Towfigh et al. kommt es bei Skaphoidfrakturen in 2-12% zur Ausbildung einer Skaphoidpseudarthrose, abhängig von der Frakturlokalisation (Towfigh, 2011). Jurkowitsch et al. beschreibt die Entstehung einer „Non-union“ mit 5-10%, bei dislozierten Frakturen sogar noch höher (Jurkowitsch et al., 2016a).

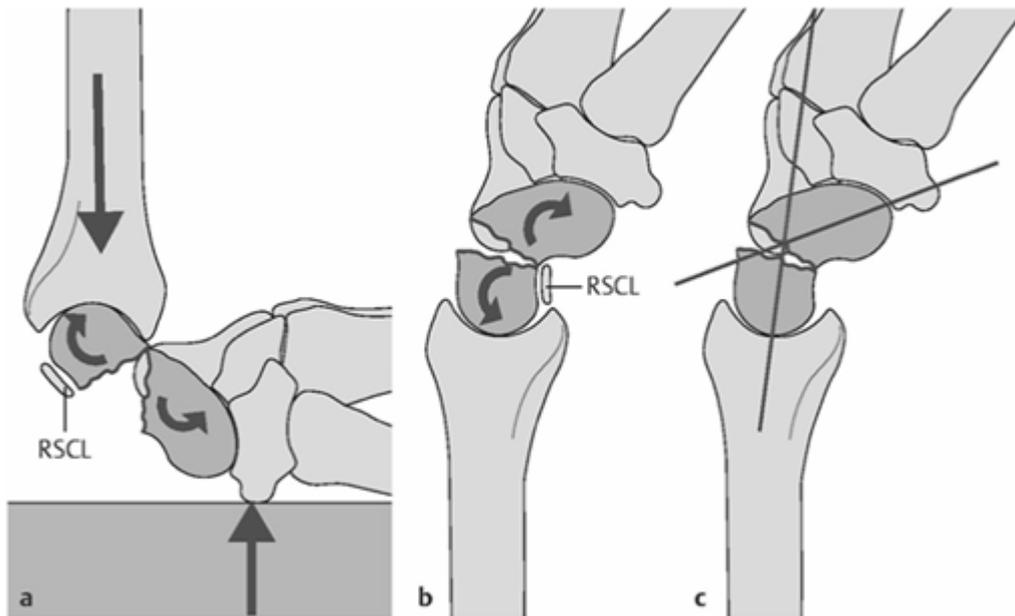


Abbildung 9: Traumatologie der Skaphoidfrakturen.

a) Beim Sturz auf die extendierte Hand nimmt der proximale Kahnbeinabschnitt eine fixierte Position zwischen Radius und Lig. Radioscaphocapitatum (RSCL) ein, während auf den distalen Kahnbeinabschnitt ein nach dorsal gerichteter Kraftvektor einwirkt (Pfeile). Der Frakturspalt klappt palmar während des Unfallhergangs.

b) Später führen die ligamentäre Spannung sowie die Geometrie der karpalen Gelenkflächen zur Drehung des proximalen Fragments nach dorsal sowie des distalen Fragments nach palmar. Es resultiert eine Humpback-Deformität.

c) Die „Humpback“-Deformität kann mit einem Winkelmaß quantifiziert werden. Die Winkellinien gehen durch die artikulären Scheitelpunkte und die Frakturspaltmitte. (Schmitt, Rainer et al.: 2015 Bildgebende Diagnostik der Hand, 3. Auflage, Stuttgart, Georg Thieme Verlag).

Ursächlich für die Entwicklung einer Kahnbeinpseudarthrose werden in der Literatur vermehrt ein Verkennen bzw. verspätetes Erkennen der Fraktur und eine unzureichende Ruhigstellung genannt (Eisenschenk et al., 1999). Unter diesen Umständen kann die Entstehungsrate auf bis zu 60% steigen. Auch die Vaskularisation spielt beim Kahnbein eine entscheidende Rolle. Der proximale Anteil wird retrograd von distal nach proximal versorgt. Je weiter proximal die Skaphoidfraktur also lokalisiert ist, desto eher kommt es zu einer Osteonekrose des proximalen Fragments (Breitenseher, 2015). Darüber hinaus können fehlerhafte Diagnostik und nicht erfolgreiche konservative oder operative Therapien ursächlich für die Pseudarthrose sein (Schadel-Hopfner et al., 2016). Auch radiokarpale oder interkarpale Begleitverletzungen können zu ligamentärer Instabilität und Heilungsstörungen führen. So ist zum Beispiel bekannt, dass eine zusätzlich bestehende skapholunäre-Band-Ruptur zu einer erhöhten Instabilität des Karpus und Verschlechterung der Durchblutung des proximalen Kahnbeinfragmentes beiträgt

(Langer et al., 2016). In vielen Fällen zeigen Skaphoidpseudarthrosen Dislokationsformen wie die Humpback-Deformität (siehe Abbildung 11), die eine Buckelbildung des Kahnbeins beschreibt, oder eine DISI-Fehlstellung auf (Moog et al., 2021). Bei letztgenannter kommt es bei zusätzlich bestehender SL-Band Ruptur zur Verkippung des Kahnbeins nach palmar und des Mondbeins nach dorsal in eine Extensionsstellung. Im lateralen Strahlengang wird dies am besten sichtbar (Redeker et al., 2011). Diese Fehlstellungen werden nach Langer et al. als einer der wichtigsten Gründe für Entstehung einer Kahnbeinpseudarthrose angesehen.

Bei der Ausbildung der Pseudarthrose wird zunächst der frakturnahe Knochen resorbiert, was zum einen in einer Erweiterung des Frakturspaltes sowie der Ausbildung von posttraumatischer Pseudozysten resultiert. Darüber hinaus verdichten sich die Frakturflächen und die Sklerosierung erfolgt.

2.3.4 Klassifikationen

Anlehnend an die Klassifikation der Kahnbeinfrakturen entwickelte Timothy James Herbert zunächst bereits 1984 eine Klassifikation zur Einteilung älterer Frakturen mit ausbleibender Heilung, welche er 1996 nochmals modifizierte und die bis zum heutigen Tag angewendet wird (Filan et al., 1996), siehe Abbildung 12 und Tabelle 1.

Die Klassifikation kombiniert die Anatomie des Bruchs mit der Stabilität des Kahnbeins.

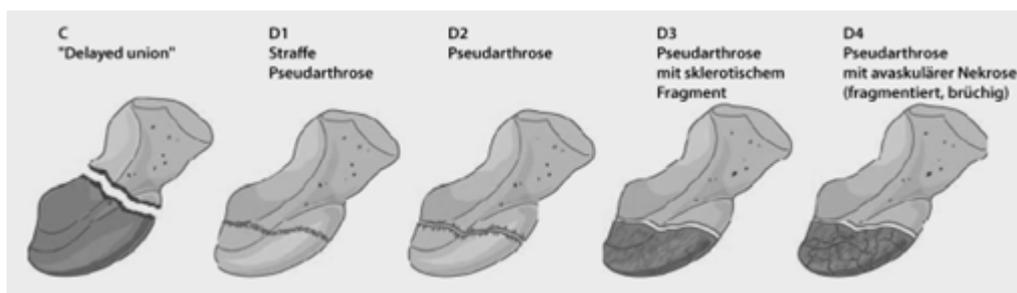


Abbildung 10: Klassifikation der Skaphoidpseudarthrose (Mod. nach Herbert und Filan 1996)(Arsalan-Werner et al., 2016b).

Unter Typ *C* werden „delayed unions“ zusammengefasst, die 20 Wochen nach primärem Frakturereignis noch immer keine knöchernen Heilung zeigen. In den Untertypen *D1-D4* wird die Pseudarthrose beschrieben und anhand ihrer Stabilität, Knochendeformität und Vitalität des proximalen Pols unterschieden. Dabei lassen sich bereits Rückschlüsse auf das Therapiekonzept und die Prognose stellen (Dönicke et al., 2014).

Pseudarthrosetyp	Beschreibung
C	„delayed union“, keine knöcherne Konsolidierung 20 Wochen nach Frakturereignis
D1	Straffe Pseudarthrose mit fibröser Überbrückung, kein karpaler Kollaps, keine Arthrosezeichen
D2	Mobile Pseudarthrose mit diskreter Kahnbeindeformierung, beginnender karpaler Kollaps, keine Arthrosezeichen
D3	Mobile Pseudarthrose mit fortgeschrittener Kahnbeindeformierung und Fragmentsklerose, deutlicher karpaler Kollaps, manifeste Arthrosezeichen
D4	Mobile Pseudarthrose mit erheblicher Kahnbeindeformierung und nekrotischem Zerfall des proximalen Fragmentes, fixierter karpaler Kollaps, fortgeschrittene Arthrose

Tabelle 1: Modifizierte Klassifikation der Pseudarthrose nach Herbert und Filan 1996.

2.3.5 Symptome und Diagnostik

Im frühen Stadium können Skaphoidpseudarthrosen klinisch asymptomatisch sein. Erst bei stärkerer Belastung der Handgelenke oder bestimmten Bewegungen können Schmerzen oder Bewegungseinschränkungen auftreten. Dabei gilt ein radialseitiger Schmerz im Bereich der Tabatière sowohl anamnestisch als auch klinisch als Leitsymptom. Im späteren Stadium führt eine Kahnbeinpseudarthrose dann meist zu dauerhaften Schmerzen im Handgelenks- und Handwurzelbereich. Zurückzuführen sind diese dann auf bereits bestehende arthrotische Veränderungen (SNAC-wrist) (Rudigier J, 2014).

Viele Pseudarthrosen des Kahnbeins werden als Zufallsbefund durch ein erneutes Trauma oder bei fortbestehenden Beschwerden nach einem länger zurückliegenden Ereignis diagnostiziert. Wie auch bei der frischen Kahnbeinfraktur ist die Röntgenaufnahme in zwei Ebenen sowie die Aufnahme nach Stecher der radiologische Standard. Oft wird zur Komplettierung der Diagnostik und Beurteilung der Vitalität der Fragmente auf eine zusätzliche CT-graphische Untersuchung, in manchen Fällen sogar auch magnetresonanztomographisch, zurückgegriffen. Als radiologische Kriterien der Pseudarthrose gelten (Dönicke et al., 2014):

- Resorptionszonen entlang des Frakturspaltes
- Resorptionszysten mit Randsklerose
- Sklerosierung und Abdeckelung der Spaltränder sowie Randosteophyten
- Aufweitung des Pseudarthrosenspalts
- Sklerose eines Fragments (meist proximal)
- Karpale Gefügestörungen (DISI-Fehlstellung)
- Periskaphoidale Arthrose

2.3.6 Verlauf der Pseudarthrose und Folgen

Die unbehandelte Skaphoidpseudarthrose führt im Verlauf zu einer zunehmenden Instabilität des Handgelenkes, was nach Jahren in einem karpalen Kollaps und schließlich *SNAC-wrist* resultiert. Wie bereits in früheren Kapiteln beschrieben hält das Skaphoid eine stabilisierende Rolle als Verbindung zwischen distaler und proximaler Handwurzelreihe inne. Wird das karpale Gefüge z.B. im Rahmen einer Kahnbeinpseudarthrose aufgebrochen, so kommen die natürlichen Bewegungstendenzen der einzelnen Handwurzelknochen zum Tragen und Arthrose und karpale Fehlstellungen sind die Folge.

Vor allem bei Frakturen des mittleren Drittels und des proximalen Pols entwickelt sich die Arthrose im Rahmen einer „Schleifarthritis“ zuerst in den dem Skaphoid angrenzenden Gelenken wie z.B. Skaphostyloidal-, Skaphotrapezial- und ggfs. dem Skaphocapitalgelenk. Von dort aus breitet sich im weiteren Verlauf, meist über 20 Jahre, eine Mediokarpalarthrose und schließlich eine das gesamte Handgelenk betreffende Panarthrose aus, bis hin zum karpalen Kollaps (*SNAC-Wrist*) (Martini, 1994, Martini et al., 1995, Moritomo et al., 1999).

Die Dringlichkeit der Wiederherstellung der anatomischen und funktionellen Form des Skaphoids betont Mathoulin et al. 2017 ausführlich. Zum einen ist eine Skaphoidfraktur unter DISI-Fehlstellung anfälliger für eine ausbleibende Heilung. Zum anderen unterbricht die Deformität die normalen Bewegungsabläufe des Handgelenkes, was zu einer eingeschränkten Beweglichkeit und langfristig zu arthrotischen Veränderungen führt (Mathoulin et al., 2018).

2.4 Therapie von Skaphoidfrakturen und Skaphoidpseudarthrosen

Nach dem Beweis der Skaphoidfraktur durch Röntgendiagnostik 1895 wurde für viele Jahre keine Form der Therapie angewendet. Dies hatte erhebliche Folgen, die meist in Exstirpation des Kahnbeins endeten. Mit Lorenz Böhler wurde Anfang der 40er Jahre die Immobilisation in einer ungepolsterten Gipsschiene für 6-16 Wochen die Therapie der Wahl (Schmidt et al., 2001, Bohler et al., 1954). Mc Laughlin stellte später die operative Stabilisierung der Skaphoidfraktur anhand von intraossären Schrauben vor (McLaughlin, 1954, Haferkamp, 2002, Leixnering et al., 2011).

2.4.1 Konservative Therapie der Kahnbeinfraktur

Entsprechend der Klassifikation nach Herbert/Krimmer kann die Indikation bezüglich der geeigneten Therapie anhand der Computertomographie gestellt werden. Stabile Frakturen der Gruppe A1 (Tuberkelfrakturen) und nicht dislozierte Frakturen des mittleren Drittels (A2) oder Brüche des distalen Pols, die laut Chang et al. 2020 zusammen rund 85% der Kahnbeinfrakturen ausmachen, sind für eine konservative Therapie geeignet (Chang et al., 2020). Instabile Frakturen, die mehr als 1mm disloziert sind, einen schrägen oder vertikalen Frakturverlauf ausweisen und Mitbeteiligung der ligamentären Strukturen zeigen, werden dagegen nicht konservativ behandelt.

Die primäre Immobilisation sollte mittels Schiene oder Unterarmgips erfolgen, die definitive Ruhigstellung dann in einem zirkulären Unterarmgips oder Kunststoffverband. Der Verband sollte in einer leicht extendierten Stellung des Handgelenkes angelegt werden. Dabei sollten sowohl das Ellenbogengelenk, als auch Fingerendgelenke und Daumenendgelenk ausgespart werden (Schädel-Höpfner et al., 2016). Bei A1-Frakturen kann eine Ruhigstellung von 4 Wochen bereits ausreichen. Bei ausbleibender Heilung kann es auch zu längeren Zeitintervallen kommen. Bei A2-Frakturen ist von einer Immobilisation von 6-8 Wochen auszugehen. Die knöcherne Heilung wird durch regelmäßige radiologische Kontrolluntersuchungen validiert. Zeigen sich mehr als 50% Kontinuität der trabekulären Strukturen, so kann der Unterarmgips entfernt und die passive Beübung begonnen werden. Besteht das Ausbleiben der knöchernen Konsolidierung, so sollte nach Schädel-Höpfner et al. frühestens nach 9 Wochen eine Computertomographie zur besseren Evaluation durchgeführt werden. Ein Überschreiten der Ruhigstellung von 12 Wochen sollte nach S3-Leitlinie vermieden werden (AWMF-Leitlinien-Register

et al.). Ist bis dahin keine knöcherne Durchbauung nachweisbar, spricht man von einer „delayed union“ und es wird zu einem Therapiewechsel geraten.

Die konservative Therapie hat als nicht-invasive Methode mit Ausbleiben operativer Komplikationen einen Vorteil. Das Risiko der konservativen Therapie birgt jedoch die Ausbildung von Muskelatrophien durch die langen Immobilisationszeiten, Versteifung der Gelenke und persistierende Schmerzen. Außerdem wird ein verlängerter Krankheitsverlauf mit verspäteter Rückkehr der Patienten in ihr alltägliches Berufsleben beschrieben (Arsalan-Werner et al., 2016a).

2.4.2 Operative Therapie der Kahnbeinfraktur und Kahnbeinpseudarthrose

Nach S3-Leitlinie gilt stets eine zeitnahe Versorgung nach dem Unfall anzustreben. Frische instabile B-Frakturen (B1-4), insbesondere Frakturen des proximalen Pols, sollten operativ versorgt werden. Dabei stellt die Blutversorgung des Kahnbeins eine besondere Herausforderung für die Therapie dar: das Kahnbein wird in großen Teilen über einen von distal einstrahlenden Ast der A. radialis versorgt. Im Falle einer Fraktur des proximalen Pols kommt es durch das Ausbleiben der vaskulären Versorgung gehäuft zu Knochennekrosen, was eine operative Versorgung unumgänglich macht (Eisenschenk et al., 1999).

Kalb et al. definiert 2019 die wichtigsten Ziele der Behandlung von Skaphoidpseudarthrosen. Dazu zählt die Wiederherstellung der Form des Kahnbeins (z.B. bei einer Humpback-Deformität), die Wiederausrichtung der proximalen Handwurzelreihe und Wiederherstellung der karpalen Stabilität sowie die knöcherne Durchbauung des Skaphoids (Kalb et al., 2019).

Die operative Therapie der Kahnbeinfraktur richtet sich nach Frakturlokalisation, Dislokation sowie gegebenenfalls bestehende Begleitverletzungen. Eine zentrale Verschraubung des Kahnbeins, eine ventrale Stabilisierung mittels speziellen Mini-Platten nach Ender, oder auch in Ausnahmefällen eine Kirschner-Draht-Stabilisierung, machen die operative Versorgung von Skaphoidfrakturen möglich (Rudigier J, 2014).

In der Versorgung von Skaphoidpseudarthrosen kommt zusätzlich die Resektion des Pseudarthrosengewebes, die Korrektur von Fehlstellungen sowie das Auffüllen von Knochendefekten mittels Knochentransplantat hinzu.

Unterschieden werden die verschiedenen Operationsmethoden in der Art der osteosynthetischen Versorgung, der Art des Knochentransplantates (Spongiosa vs. vaskularisierter Knochen-span) und der Spenderregion (Beckenkamm vs. Radius) sowie der operative Zugangsweg, der palmar oder dorsal gewählt werden kann (Kalb et al., 2019, Daly K., 1996, Krimmer et al., 1999, Kremling et al., 2001).

Die Herbertschraube

Für die Osteosynthese der Kahnbeinfrakturen setzte sich die Verwendung einer von Herbert und Fisher 1984 entwickelten selbstschneidenden Doppelgewindeschraube, die intraossär versenkt wird, durch (s. Abbildung 9). Die heute kanülierte Schraube gilt aktuell als Goldstandard. In Fällen von reduzierter Knochensubstanz kommt es zusätzlich zur Implantation von Spongiosa oder Knochenspänen z.B. aus dem Beckenkamm (Schaefer et al., 2002).

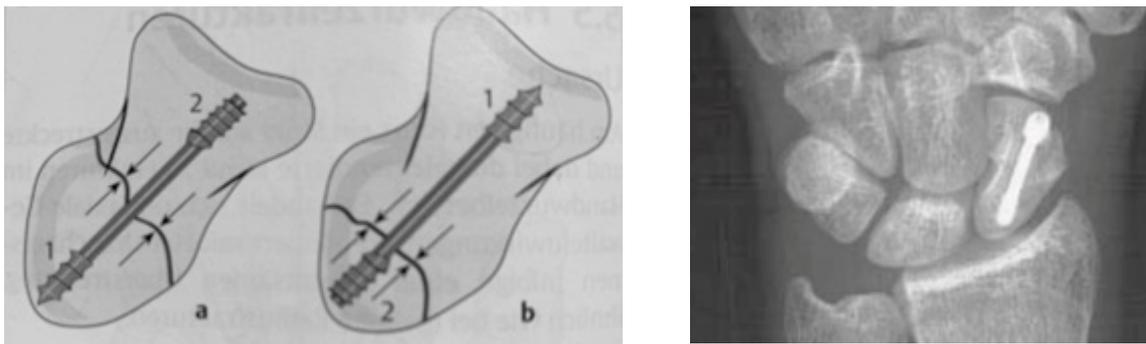


Abbildung 11: Links: Prinzip der Herbertschraube (1. steiles, 2. flaches Gewinde) bei Kahnbeinfrakturen. a) Vorgehen von peripher nach proximal bei großem proximalem Fragment. b) Vorgehen von proximal nach peripher bei kleinem proximalem Polfragment (Rudigier J, 2014).

Rechts: Kahnbeinfraktur des mittleren Drittels mit intraossärer Herbert-Schraube (Krimmer et al., 2000b).

Dabei hat die Schraube statt einem Schraubenkopf an beiden Enden ein selbstschneidendes Gewinde. Diese ermöglichen eine intraossäre Kompression auf die Frakturfragmente. Bei komplikationslosem Heilungsverlauf ist ein Entfernen der Schraube nicht nötig. Zahlreiche Variationen, darunter auch der Gebrauch von Mini-Herbertschrauben kommen zum Einsatz (s. Abbildung 10) (Brauer et al., 1997, Hegazy et al., 2020).

Die Herbertschraube gilt aktuell als Therapie der Wahl für die operative Versorgung von Skaphoidfrakturen (Leixnering et al., 2011, Quadlbauer et al., 2019).

Im Folgenden werden weitere operative Verfahren beschrieben, die heutzutage allerdings als historisch zu werten sind bzw. nur in Einzelfällen verwendet werden:

Die *AO-Schraube* mit intraossärer Unterlegscheibe ist eine kanülierte Zugschraube, die über einen Führungsdraht eingebracht wird. Die Unterlegscheibe („*Washer*“) dient dem

Schraubenkopf intraossär als Auflagefläche, um so eine höhere interfragmentäre Kompression zu erzielen (Bickert et al., 2000). Sie wird heute nur noch in Ausnahmefällen eingesetzt.



Abbildung 12: Verschiedene Formen der Herbert-Schraube: v.l.n.r.: Original, kanüliert für 1,0-mm-Führungsdraht (HBS-System) und Mini-Schraube (Krimmer et al., 2000b).

Kirschner-Drähte (K-Drähte), 1920 von Martin Kirschner entwickelt, dienen der minimal-invasiven Reposition und Fixierung von metaphysären Frakturen sowie Frakturen der Hand- und Fußknochen. Die K-Draht-Osteosynthese gehört zu den ältesten und regelmäßig angewendeten Verfahren. Der geringe operative Aufwand, die minimale Invasivität sowie der günstige Kostenfaktor stehen der Unfähigkeit der interfragmentären Kompression sowie einer verlängerten Immobilisationsdauer gegenüber (Schaefer et al., 2002).

Als ältestes Standardverfahren gilt die operative Spanverblockung nach Matti-Russe. Erstmals 1937 stabilisierte Matti nach dorsaler Pseudarthrosenresektion das Kahnbein mittels autologer Spongiosaplastik. 1951 modifizierte Russe die Methode mit Durchführung einer palmaren Knochenspanplastik (Russe, 1951). Durch das rinneförmige Aushöhlen des proximalen und distalen Frakturfragments und Einpassen eines kortikospongiösen Spanes aus dem Beckenkamm sowie Einpressen von kleinen Spongiosastückchen kommt es zur Verblockung (Rudigier J, 2014).

Eine weitere Möglichkeit der Therapie von Skaphoidpseudarthrosen ist die Verwendung von vaskulär gestielten Knochenspänen. Dabei wird ein Knochenspan aus dem distalen Radius mit Arterienästen aus dem Rete articulare des Handgelenks verwendet. Sowohl ein palmarer als auch dorsaler Zugangsweg wird beschrieben. Diese Methode wird vermehrt bei problematischen Durchblutungsverhältnissen des proximalen Kahnbeinpols oder bei bereits erfolglos durchgeführter operativer Versorgung indiziert.

In fortgeschrittenen Fällen der Arthrose und bei ausgeprägten Handwurzelgefügestörungen, die für keine Rekonstruktion in Frage kommen bzw. nur eine insuffiziente Rekonstruktion erreicht wurde, gibt es sogenannte „Rückzugsverfahren“. Dabei steht die Schmerzreduktion bei möglichst geringem Funktionsverlust stets im Vordergrund.

Das operative Verfahren ist abhängig von dem Grad der SNAC-Klassifikation, eine Stadieneinteilung die von Watson und Ryu 1986 erstmals vorgestellt wurde (Krimmer et al., 2000a). In Stadium I besteht eine lokale Arthrose und die skaphoidrekonstruierenden Therapieoptionen stehen im Vordergrund (siehe weiter oben).

Ab dem SNAC-Stadium II, das die fortschreitende Arthrose von Radius bis in den Pseudarthrosenspalt des Kahnbeins beschreibt, verbleiben nur noch Rettungsoperationen wie die Proximal-Row-Carpectomy (PCR – Resektion der proximalen Handwurzelreihe) oder die mediokarpale Teilversteifung. Bei Zerstörung der radiokarpalen Gelenkfläche kann mittels radiokarpaler Teilarthrodese (radioskapholunäre Fusion = RSL-Fusion) eine Restbeweglichkeit bis zu jeweils 30° Extension/Flexion im Mediokarpalgelenk aufrechterhalten werden (Fodor et al., 2020, Krimmer, 2014). Eine Teilarthrodese zwischen Skaphoid und Kapitatum ist ebenso eine Therapieoption (Leung et al., 2001, Eisenschenk et al., 1999).

Eine weitere Möglichkeit für das SNAC-Stadium II-III stellt die Kahnbeinexstirpation mit anschließender Teilfusion der umliegenden Handwurzelknochen, sog. *Four corner fusion*, dar (Enna et al., 2005, Dráč et al., 2014).

Als palliative Maßnahme gilt die Denervierung nach Wilhelm kombiniert mit einer Styloidektomie, die bei karpalem Kollaps mit ausgeprägter Arthrose der Schmerzreduktion dient (Orthopädie, 2002, Beutel et al., 1999).

Die komplette Versteifung des Handgelenkes oder Handgelenkendprothesen steht als *Ultima ratio* der operativen Maßnahmen zur Verfügung (Meier, 2019)

2.4.3 Prognose

Nach konservativer Therapie und Osteosynthesen muss die Heilung sowie die Fragmentadaptation anhand regelmäßiger radiologischer Untersuchungen geprüft und dokumentiert werden. Es geht um die Feststellung des Heilungsprozesses, sowie im weiteren Verlauf um die Aufdeckung von Komplikationen wie Lockerung, Verschiebung oder Frakturierung der Metallteile, und die Objektivierung von entzündlichen Knochenveränderungen oder sekundärer Folgeschäden der Osteosynthese am Skelett (Thurn et al., 1979).

Eine knöcherne Durchbauung, also Frakturheilung wird als erachtet gesehen, wenn es zur Überbrückung der ehemaligen Frakturlinie durch Knochen, Kallusbildung oder trabekulären Strukturen kommt, Durchbauung an drei der vier Kortikalis, Verschwinden der Frakturlinie oder aber auch Kontinuitätsdarstellung der Kortikales (Fisher et al., 2018).

Konservativ versorgte nichtdislozierte Skaphoidfrakturen zeigen durch eine Immobilisation nach 3 Monaten in bis zu 90-95% der Fälle eine knöcherne Konsolidierung (Flury et al., 2020). Bei osteosynthetisch versorgten frischen Kahnbeinfrakturen ist in der Literatur die knöcherne Konsolidierung, je nach Verfahren, zwischen 90-100% beschrieben (TJ et al., 1984, Lohmann et al., 1987, Bunker et al., 1987, DeMaagd et al., 1989).

Für eine optimale Frakturheilung nach Osteosynthese verließ man postoperativ die starre Immobilisation im Gips. Es zeigte sich, dass eine früheinsetzende sichere Beübung der Handgelenksbeweglichkeit Prozesse der knöchernen Heilung steigert (LaStayo et al., 2003).

Eine Besonderheit stellt „Morbus Preiser“ dar. Nach dem Erstbeschreiber benannt, handelt es sich hier um eine seltene, spontan aufgetretene Osteonekrose des Kahnbeins, welche bisweilen mit einer Pseudarthrose verwechselt werden kann (Breitenseher, 2015). Die Abgrenzung ist allerdings wichtig, da sich die Therapie nicht unerheblich unterscheidet. Sie lehnt sich im Frühstadium an die Therapie der Mondbeinnekrose an, im fortgeschrittenen Stadium mit eingetretener Arthrose leitet das Ausmaß der Arthrose die Therapieentscheidung.

2.5 Die winkelstabile Skaphoidplatte

Bereits 1977 entwickelte Ender et al. eine Platte zur osteosynthetischen Versorgung von knöchernen Pathologien des Kahnbeins (Ender, 1977). Diese kam vor allem in Fällen von Nekrosen des proximalen Kahnbeinpols sowie bei bereits fortgeschrittenen Degenerationen des

Frakturspaltes zum Einsatz. Die Platte wurde mittels einer Schraube intraossär fixiert, zusätzlich hatte sie einen Haken, um eine Kompression mit dem zweiten Fragment herzustellen. Aufgrund von Knorpelschäden im Radiokaphoidalgelenk musste die Platte meist nach knöcherner Durchbauung entfernt werden (Leixnering et al., 2011, Huene et al., 1991).

Dieser Prototyp als Grundlage, gepaart mit dem aus der Unfallchirurgie bekannten Prinzip der Winkelstabilität, begünstigte weitere Fortschritte in der Entwicklung einer winkelstabilen Plattenosteosynthese des Kahnbeins. Die hier verwendete winkelstabile Platte wurde von der schweizer Firma Medartis (APTUS® TriLock 1.5, Medartis, Basel, Schweiz) entwickelt. Dabei handelt es sich um eine anatomisch vorgeformte Platte mit 6 Schraubenlöcher, jeweils drei auf einer Seite (Abb. 13). Ihr Einsatz ist vorrangig für mehrfragmentären Frakturen, Pseudarthrosen und Humpback-Deformitäten des Kahnbeins vorgesehen.



Abbildung 13: Die winkelstabile Scaphoidplatte TriLock 1.5 von Medartis (Produktkatalog © 06.2012, Medartis AG, Switzerland).

2.5.1 Das Prinzip der Winkelstabilität

Das Prinzip der Winkelstabilität ist vor allem aus der Unfallchirurgie und der Versorgung distaler Radiusfrakturen sowie diaphysären Frakturen mittels Plattenosteosynthese bekannt. Kurz vor der Jahrtausendwende etablierte die *Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen* (AO) die moderne winkelstabile Plattenosteosynthese, ursprünglich zur Versorgung von osteoporotischem Knochen mit geringer Stabilität (Wagner, 2003, Frigg, 2001). Dabei wird das Gewinde am Kopf der winkelstabilen Schraube direkt in der Platte fixiert und somit kommt es zu einer Verblockung der Schraube mit der Platte. Folglich wird die Kraft nicht wie bisher über die

Platte, sondern über die Schrauben auf den Knochen ausgeübt. Man spricht auch von einem frakturüberbrückenden Kraftträger, der steif genug ist, um die Knochenheilung zu ermöglichen, aber dennoch geringfügige interfragmentäre Bewegungen in Form von Schwingungen zulässt, um so durch mechanische Stimulation die Knochenheilung zu fördern.

Durch die verringerte Kompression der Platte auf den Knochen gilt die Vaskularisierung und die knöcherne Durchbauung als verbessert (Wagner, 2010). Aufgrund der deutlich verbesserten Primärstabilität der Platten haben sie sich heute auch bei Frakturen ohne Knochensubstanzminderung als Standardimplantat durchgesetzt.

2.5.2 Bisherige Erfahrungen mit der winkelstabilen Skaphoidplatte

Die optimale Behandlung von Skaphoidpseudarthrosen bleibt bis heute eine Herausforderung. Wu et al. sieht vor allem die Versorgung von bereits operativ versorgten Frakturen, avaskulären Nekrosen des proximalen Kahnbeinpols sowie Pseudarthrosen als komplex an. In der Vergangenheit wurde bei ausgeprägten arthrotischen Veränderungen des Handgelenkes eine Kahnbeinexstirpation mit Teilversteifung von Handwurzelknochen (Four corner fusion) oder eine Entfernung der gesamten proximalen Handwurzelreihe (Kahnbein, Mondbein und Triquetrum) durchgeführt. Neuere Entwicklungen brachten die Plattenosteosynthese des Kahnbeins hervor (Wu et al., 2019).

Ender legte 1977 den Grundstein für die heutige Plattenosteosynthese des Skaphoids. Die von ihm entworfene Platte wurde mit einem Haken an den proximalen Pol des Kahnbeins gehängt und zusätzlich mit einer Schraube mit dem distalen Knochenfragment verbunden (Ender, 1977).

Die Weiterentwicklungen führten zu dem seit 2007 verwendeten Modell.

Leixnering et al. versorgte von 2007 bis 2011 11 Fälle von Skaphoidpseudarthrosen mit einer anpassbaren Skaphoidplatte der Firma Medartis. Dabei handelte es sich in 9 Fällen um Revisionen von bereits operativ versorgten Brüchen. In allen Fällen wurde eine knöcherne Konsolidierung und Besserung der klinischen Beschwerden der Patienten beschrieben. Die Indikation zur Verwendung einer winkelstabilen Plattenosteosynthese sieht Leixnering et al. vor allem in bereits mit einer Schraube versorgten Kahnbeinbrüchen, die eine ausbleibende Heilung aufzeigen (Leixnering et al., 2011).

Die amerikanischen Kollegen Dodds et al. veröffentlichten 2018 eine retrospektive Studie. Darin wurden 20 Patienten mit Humpback-Deformitäten, avaskulären Nekrosen und Pseudarthrosen mit einem gestielten vaskularisierten Knochentransplantat aus dem distalen Radius und einer winkelstabilen Platte versorgt. Im postoperativen Verlauf wurde routinemäßig eine Ultraschallknochenstimulation zusätzlich angewendet. Die Auswertung hierzu wurde bis dato noch nicht publiziert. In 18 Fällen wurde eine knöcherne Heilung beobachtet. In 4 Fällen wurde die Platte ein Jahr postoperativ bei eingeschränkter Flexion und zunehmendem Anstoßen im radioskaphoidalen Gelenk entfernt (Dodds et al., 2018). Die Vorteile der winkelstabilen Platte sehen Dodds et al. vor allem in der bereits vorgeformten, dem Kahnbein angepassten Form der Platte sowie der Materialbeschaffenheit. Die aus Titan hergestellte Platte lässt sich nach gewünschter Form biegen und weist dennoch eine Stabilität der ulnaren und radialen Säule auf.

Paul Tavakolian fasste 2021 die Vorteile der winkelstabilen Skaphoidplatte im Gegensatz zur bislang als Goldstandard geltender Schraubenosteosynthese folgendermaßen zusammen (Tavakolian et al., 2021):

- 1) Erhaltung der intraossären Vaskularisation des Kahnbeins sowie der dorsalen Blutversorgung
- 2) Maximierung des Oberflächenkontaktes zur knöchernen Konsolidierung
- 3) Einfache Verwendung eines nicht-vaskularisierten Knochentransplantates mittels Spongiosa
- 4) Direkte Abstützung der deformierenden Kräfte

2.5.3 Potenzielle Einsatzgebiete der winkelstabilen Kahnbeinplatte

Mit langwierigen und häufig komplikationsreichen Behandlungsprozessen stellt die Kahnbeinpseudarthrose heute immer noch eine Herausforderung dar (Reeh et al., 2022). Mit der winkelstabilen Skaphoidplatte steht nun ein ausgereiftes Implantat für die Versorgung von Pseudarthrosen, mehrfragmentären Frakturen sowie komplizierten Frakturen zur Verfügung. Auch die Humpback-Deformität kann durch die winkelstabile Platte korrigiert werden (Dodds et al., 2018). Die mögliche Interferenz des Implantates mit dem radiokarpalen Gelenk und eine daraus resultierende Arthrose stellt einen Nachteil der Platte dar. Dem gegenüber stehen die Vorteile der Winkelstabilität und die genaue Positionierung und Erfassung mehrerer

Frakturfragmente durch die sechs Schrauben. Die Beschaffenheit der Platte aus Titan und individuelle Verformbarkeit gibt ausreichend knöchernen Stabilität. Das einfache Einbringen von autologer Spongiosa in den Frakturspalt ist ebenso nennenswert. Ziel der hier vorliegenden Untersuchung ist es, die ersten Erfahrungen mit der winkelstabilen Skaphoidplatte festzuhalten, die möglichen Vor- und Nachteile zu beschreiben und die Relevanz der osteosynthetischen Versorgung von Skaphoidfrakturen bzw. Skaphoidpseudarthrosen mittels Skaphoidplatte zu unterstreichen.

3. Material und Methoden

In der retrospektiv angelegten Untersuchung wurden 25 Patienten inkludiert, die in dem Zeitraum von 2014 bis 2017 mit der winkelstabilen Skaphoidplatte von Medartis behandelt wurden. Alle Patienten wurden in der Abteilung für Hand-, Plastische- und Ästhetische Chirurgie am Klinikum der LMU München operiert. Die Nachuntersuchung erfolgte im Durchschnitt nach 19 Wochen postoperativ. Alle Operationen wurden von einem Facharzt für Orthopädie und Unfallchirurgie mit Zusatzbezeichnung Handchirurgie durchgeführt.

3.1 Patientenkollektiv

3.1.1 Einschlusskriterien

Alle Patienten beschrieben einen radialseitigen Druckschmerz und hatten eine radiologisch gesicherte Skaphoidfraktur oder eine Skaphoidpseudarthrose. Die Indikation zur Plattenosteosynthese wurde vor allem bei komplizierteren Fällen wie mehrfragmentären Frakturen, Pseudarthrosen und Humpback-Deformitäten gestellt (s. Abbildung 14-16).

Unter den 25 beschriebenen Fällen wurde folgende Diagnose festgestellt: 18 Frakturen, 5 Pseudarthrosen und 2 verzögerte Frakturheilungen. Die beiden Fälle der „delayed union“ wurde bei der Auswertung der Gruppe der Pseudarthrosen zugeordnet. Fünf Patienten zeigten eine Humpback-Deformität.

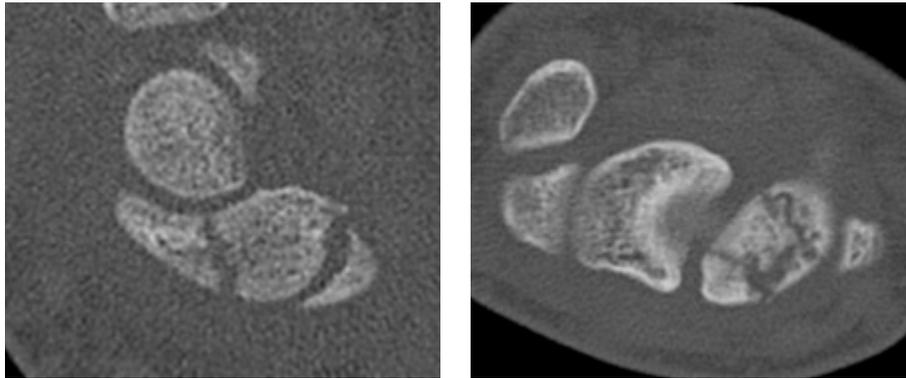


Abbildung 14: Beispiel einer mehrfragmentären Kahnbeinfraktur.

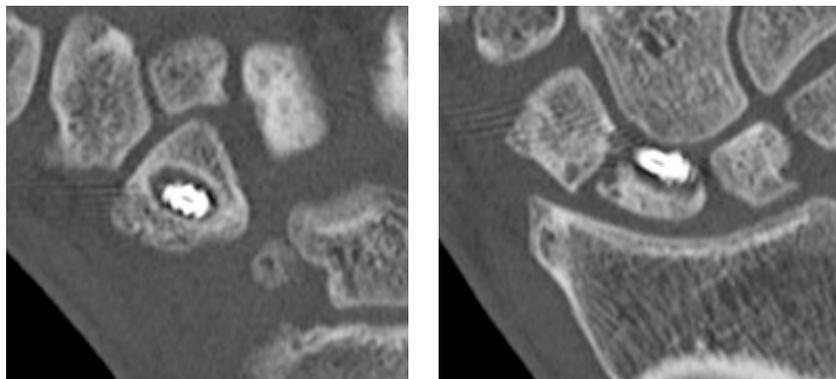


Abbildung 15: Pseudarthrose des Kahnbeins nach gescheiterter Herbertschraubenosteosynthese mit zystischen Knochendefekten bei Schraubenlockerung mit Fehllage, beginnende Arthrosezeichen (SNAC-wrist).



Abbildung 16: Pseudarthrose des Kahnbeins mit Humpback-Deformität im CT.

3.1.2 Ausschlusskriterien

Patienten unter 16 Jahren wurden nicht mit einer winkelstabilen Skaphoidplatte versorgt und somit von dieser Studie ausgeschlossen.

3.2 Präoperative Diagnostik

Im Rahmen der ambulanten Erstvorstellung der Patienten in der handchirurgischen Ambulanz wurden zum einen die Intensität der Schmerzen anhand der visuellen Analogskala (VAS), zum anderen die Lokalisation der Schmerzen sowie der Lokalbefund und Begleitverletzungen erhoben. Der Unfallmechanismus wurde erfragt und protokolliert.

Standardmäßig wurde eine Röntgenaufnahme in zwei Ebenen durchgeführt. Bei 15 Patienten (60%), bei denen der Verdacht auf Pseudarthrose oder „delayed union“ bestand, wurde der Status ergänzend mittels CT abgeklärt.

3.3 Operationstechnik

Perioperativ erhielten alle Patienten eine einmalige intravenöse antimikrobielle Prophylaxe mit 1,5 Gramm (g) Cefuroxim. Alle inkludierten Patienten wurden in Vollnarkose operiert.

3.3.1 Frakturversorgung

Nach erfolgter OP-Aufklärung wurde standardmäßig folgendes operatives Vorgehen durchgeführt:

Der Patient wurde in Rückenlage positioniert und der betroffene Arm auf einem Handtisch ausgelagert. Eine Blutsperre wurde angelegt und auf 250 mmHg aufgeblasen. Stets wurde ein palmarer Zugangsweg gewählt. Dabei erfolgte eine S-förmige Inzision über dem Skaphoid palmarseitig nach distal bis zum Skaphoidpol (s. Abbildung 17). Zunächst wurde stumpf-spitz auf die Sehnenscheide des Musculus flexor carpi radialis (*FCR*) präpariert. Dabei wurde der *R. carpalis* der *A. radialis* üblicherweise geschont. Schließlich wurde die Sehnenscheide der *FCR*-Sehne längs eröffnet. Danach folgte die Längseröffnung der Handgelenkscapsel und die Darstellung des Kahnbeins. Der Frakturbereich bzw. der Pseudarthrosenbereich wurde gereinigt

und angefrischt. Wenn erforderlich, wurde einliegendes Osteosynthesematerial entfernt. Im Falle einer Pseudarthrose wurde nun akribisch das gesamte pseudarthrotische Gewebe entfernt, bis beide Knochenanteile frisch bluteten. Die Reposition erfolgte in der Regel in Dorsalexension unter Zuhilfenahme eines Hypomochlions. In zwei Fällen wurde zur temporären Fixierung und Reposition der Frakturlemente ein Kirschner-Draht verwendet. Für Pseudarthrosen wurde nun frische Beckenkammpongiosa oder Radiuspongiosa ipsilateral gewonnen und der gesamte Defekt mit spongiösem Knochen aufgefüllt. Anschließend folgte das Auflegen und Anpassen der winkelstabilen Kahnbeinplatte (Firma Medartis) auf das reponierte Skaphoid. Diese Kontrolle wurde mittels Bildwandler durchgeführt. Die Platte wurde mit je einer nicht-winkelstabilen Schraube proximal und distal fixiert. Die Schraubenlänge variierte in der Regel zwischen 8-10mm, der Schraubendurchmesser betrug 1,5mm. Die restlichen vier Schraubenlöcher wurden mit winkelstabilen Schrauben belegt. Die Schraubenlänge betrug hier zwischen 9 und 13mm. Unter Röntgenkontrolle erfolgte nun erneut die Überprüfung der Frakturstellung und Schraubenpositionen (s. Abbildung 18). Nach Bestätigung der korrekten Schrauben- und Plattenlage sowie Reposition der Fraktur wurde die Kapsel verschlossen. Nachfolgend wurde das Operationsgebiet ausgiebig gespült und ein schichtweiser Wundverschluss durchgeführt. Die Kapsel wurde hierbei stets mittels einer 2-0 Vicryl Naht verschlossen.

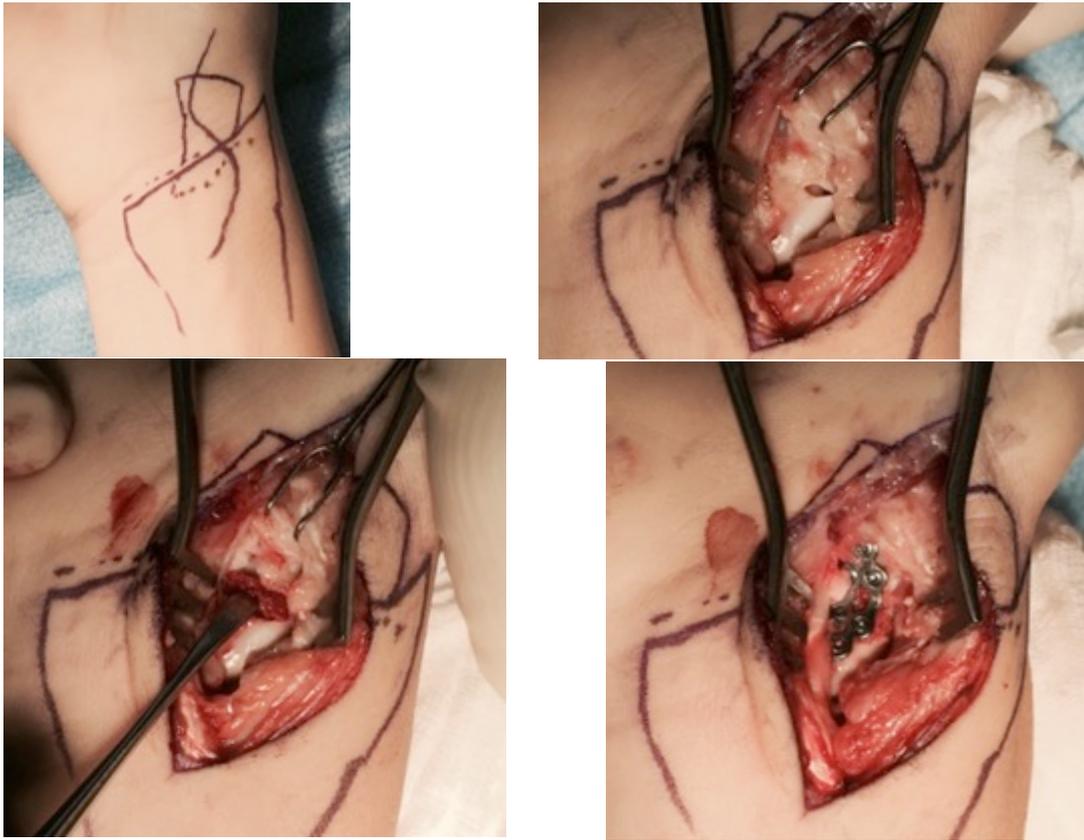


Abbildung 17: Implantation der winkelstabilen Skaphoidplatte über einen palmaren Zugangsweg.

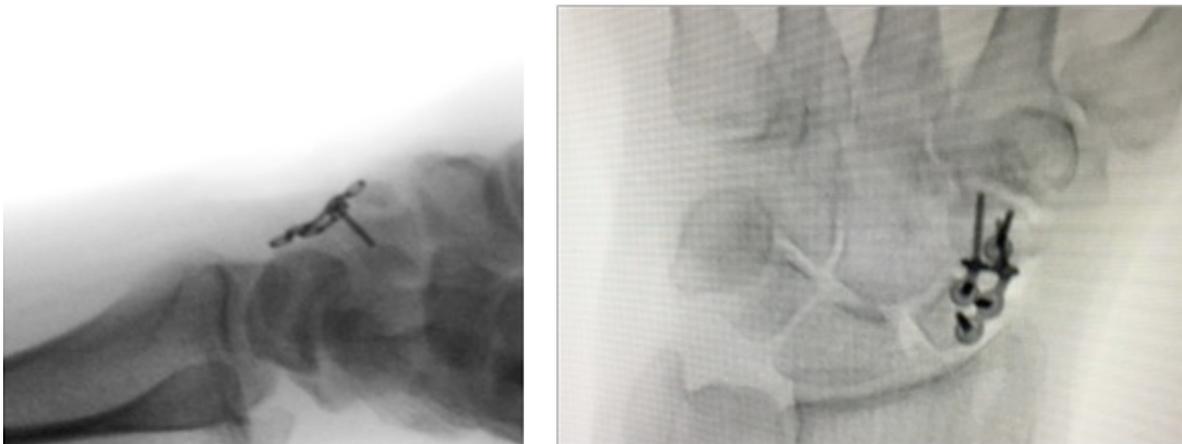


Abbildung 18: Intraoperative Lagekontrolle im lateralen und anterior-posterioren Strahlengang mittels C-Bogen.

3.3.2 Versorgung mit einem Knochentransplantat

Bekanntermaßen bedürfen Frakturen oder Pseudarthrosen mit ausgeprägter Trümmerzone und koserkutivem Defekt, randständiger Sklerose oder erweitertem Frakturspalt (>2mm) einer Spongiosaplastik. Dabei werden frische autologe Spongiosaspäne verwendet, um den knöchernen Defekt aufzufüllen. Als Entnahmestelle der Spongiosa kommen hierbei der Beckenkamm sowie der distale Radius in Betracht (Schmidt et al., 2003).

Bei 14 Patienten wurde ein Knochentransplantat verwendet. Davon erfolgte bei 11 Patienten die Spongiosaentnahme aus dem Beckenkamm, bei 3 Patienten aus dem distalen Radius.

Beckenkamm

Zur Entnahme von Spongiosa aus dem Beckenkamm wurde eine 3cm lange Hautinzision etwa 4cm dorsal der Spina iliaca anterior superior durchgeführt. Nach Präparation auf die Muskelfaszie und sparsamen Ablösen derselben vom Beckenkamm wurde ein kleines, 1x1cm messendes Knochenfenster mit dem Meißel erzeugt. Der Kortikalis-deckel wurde vorsichtig angehoben und vor Ort belassen. Die Spongiosa wurde nun mittels scharfem Löffel entnommen. Vor dem Wundverschluss wurde ein Naropin-getränktes Gelitta-Schwämmchen in den Defekt eingelegt, der kortikale Knochendeckel wieder zugeklappt, darüber die Faszie verschlossen und die Wunde schichtweise vernäht.

Bei bestehender Pseudarthrose oder „delayed union“ erfolgte die Präparation des Frakturspaltes bzw. der Pseudarthrose unter akribischer Anfrischung der Frakturänder bis zum Erkennen kleiner Blutungsareale im angefrischten Knochen. Zur Korrektur der Humpback-Deformität wurde eine ausreichend große Rolle unter das Handgelenk gelegt und die Hand stark extendiert. Dadurch kam es zu einem palmarseitigen Aufklappen des Kahnbeins. Die aus dem Beckenkamm entnommene Spongiosa wurde unter Kompression eingebracht und die Kahnbeinplatte zur Stabilisierung der Reposition aufgelegt. Analog der oben beschriebenen Frakturversorgung wurde die Platte zunächst am distalen und proximalen Pol mittels einer Kortikalisschraube fixiert. Das weitere Vorgehen war identisch dem der Frakturversorgung (siehe 3.2.1). Die Spülung erfolgte hier allerdings immer erst nach dem Kapselverschluss.

Radius

In 3 Fällen wurde die Spongiosa aus dem benachbarten distalen Radius entnommen. Hierzu wurde der Hautschnitt nach proximal erweitert. Es folgte die Längsinzision des Musculus pronator quadratus und Eingehen auf den distalen Radius. Anschließend wurde ein Knochenfenster von ca. 0,7cm Seitenlänge gemeißelt und die Radiuspongiosa mit einem scharfen Löffel gewonnen. Es folgte das Einlegen eines in Naropin-getränktem Gelitta-Schwämmchens zur Blutstillung, das Zuklappen der Kortikalis und die Einzelkopfnahnt des Musculus pronator quadratus.

3.4 Postoperatives Verhalten

3.4.1 Immobilisation

Postoperativ wurden alle Skaphoidfrakturen- und Pseudarthrosen für 6 Wochen in einer Daumengibsschiene ruhiggestellt. Danach wurde zunächst mit der passiven Beübung aus der Schiene heraus begonnen, dem folgte die aktive Physiotherapie für weitere 6-12 Wochen.

3.4.2 Antibiose

Bei 5 Patienten (20%) wurde die Antibiose postoperativ für die Dauer des stationären Aufenthaltes (2 Tage) intravenös fortgeführt. Bei 3 von diesen Patienten handelte es sich um Fälle mit multiplen Begleitverletzungen. Ein Patient hatte eine begleitende offene distale Radiusfraktur und wurde primär mit einem Fixateur extern versorgt.

3.5 Postoperative Nachuntersuchung

Im Rahmen eines standardisierten Nachuntersuchungsverfahrens wurden die Patienten regelmäßig, frühestens jedoch nach 6 Wochen postoperativ untersucht. Der Zeitpunkt der Nachuntersuchung variierte jedoch stark bis zu durchschnittlich 19,2 Wochen. Dabei beinhaltet das Verfahren der Nachuntersuchung stets einen handspezifischen Fragebogen sowie eine Bildgebung mittels Röntgenbildern und in 9 Fällen auch mittels CT. Zusätzlich wurden folgende „Patient-

reported outcome measures“ (PROMs), die obere Extremität betreffend, erhoben: „DASH Score“, „Green and O’Brien Score“, „Mayo Wrist Score“ und „Cooney und Bussey Score“.

3.5.1 Fragebogen

Mit einem, an der Ludwig-Maximilians Universität entwickelten, spezifisch handchirurgischen Anamnesebogen wurden die Patienten postoperativ evaluiert (siehe Anhang). Dabei wurde die betroffene/ operierte Seite sowie die dominante Seite erfasst. Außerdem wurden die postoperativen Beschwerden notiert. Es erfolgte die Befragung der Patienten und Begutachtung der Hand auf Schwellung, Rötung, Wetterfühligkeit, Zustand der Narbe und Sensibilitätsstörungen.

3.5.2 Klinische Untersuchung

In der klinischen Untersuchung wurden die Parameter Schmerz, Griff- und Druckkraft, Beweglichkeit sowie funktionelle Scores erfasst.

Schmerzen

Mit Hilfe der Visuellen Analogskala (VAS) (Bond et al., 1966) konnte die Schmerzintensität in Ruhe und bei Belastung von 0 bis 10 dokumentiert werden. Die Einnahme von oralen Analgetika für die tägliche Schmerzfreiheit wurde notiert.

Griff- und Druckkraft

Mittels eines Hand Dynamometers (s. Abbildung 19) wurde die Griffstärke in Kilogramm (kg) im Vergleich zur Gegenseite ermittelt. Bei der Messung steht oder sitzt der Patient aufrecht mit rechtwinklig flektiertem Ellenbogen. Dabei wurden je Seite drei Messungen durchgeführt und der errechnete Mittelwert verwendet. Die Gegenseite, und somit unverletzte Hand, galt als 100%, sowohl bei dominanter, als auch nicht-dominanter Seite. Außerdem wurde eine Kraftmessung des Daumens mittels Fingerkuppen-Spitzgriffs mit einem Pinch-Gauge Dynamometer durchgeführt. Dabei erfolgte erneut eine Dreifachmessung pro Seite mit Errechnung des Mittelwertes im Vergleich zur Gegenseite (s. Abbildung 20).



Abbildung 19: Prüfung der Kraft für den Grobgriff mit dem Jamar-Dynamometer (links) und für den Fingerkuppenspitzengriff mit dem Pinch-Gauge-Dynamometer (rechts) © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011.

Beweglichkeit

Des Weiteren wurden an beiden Handgelenken die ROM (*Range of Motion*), also die aktive Beweglichkeit nach der Neutral-Null-Methode gemessen: Palmarflexion, Dorsalextension, Radialabduktion und Ulnardeviation sowie Pronation und Supination (s. Abbildung 21) (Schünke et al., 2018).

Als Normwerte dienten die gemessenen Werte der gesunden Hand bzw. der Gegenseite.

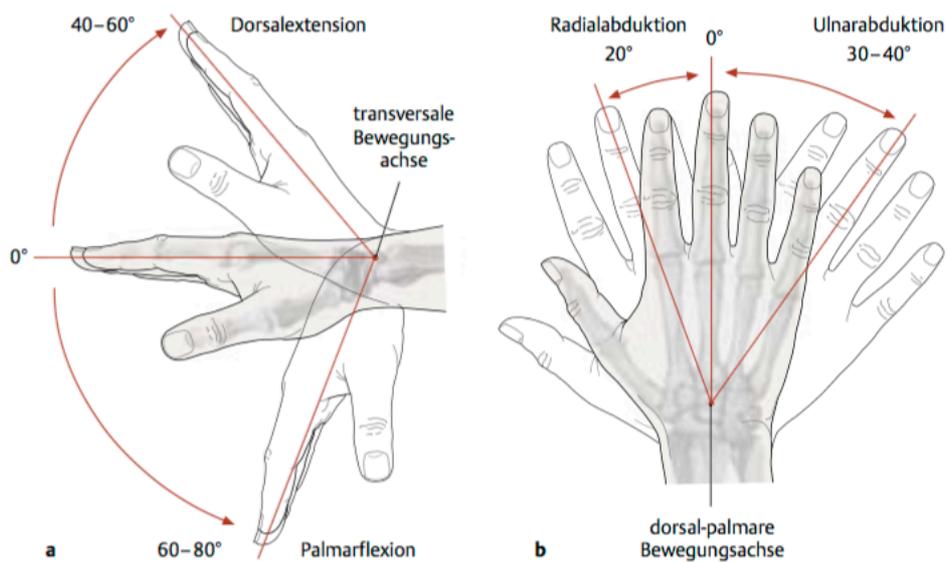


Abbildung 20: Bewegungen und Bewegungsachsen des proximalen und distalen Handgelenkes.

Klinische Parameter

Zur postoperativen Evaluation und Auswertung wurden funktionelle Scores, die für Verletzungen der oberen Extremität entwickelt wurden, verwendet. Dabei lassen sich die Bewertungsbögen in zwei Gruppen gliedern. Zum einen die, die von der ärztlichen Seite anhand der erzielten Werte ausgefüllt werden, und somit objektiv sind, zum anderen die subjektiven, vom Patienten auszufüllende Fragebögen (Slutsky, 2013).

Folgende PROMs wurden verwendet:

Einer der häufig verwendeten Patientenfragebögen ist der „**DASH Score**“ (The Disabilities of Arm, Shoulder, Hand)(Slutsky, 2013, Hudak et al., 1996).

Entwickelt wurde dieser 1996 von der Council of Musculoskeletal Specialty Societies, American Academy of Orthopaedic Surgeons und vom Institute for Work and Health Canada. Er findet große Verwendung bei Verletzungen an der gesamten oberen Extremität. Dieser konfrontiert die Patienten mit insgesamt 30 Fragen mit jeglichen Alltagsproblemen, die mit einer Note von 1-5 bewertet werden. Dabei gilt 1 als „keine Schwierigkeiten“ und 5 als „nicht möglich“. Durch die Anzahl der beantworteten Fragen und der jeweiligen Punktvergabe ergibt sich eine Punktzahl, die von 30 bis 100 reicht und Aufschluss über die Funktionseinschränkung der oberen Extremität gibt. Dabei bedeutet „30“ keinerlei Einschränkungen und „100“ maximale Einschränkung. Der Bewegungsumfang und die Griffstärke werden in dieser subjektiven Evaluation nicht mit einbezogen (Beirer et al., 2016). Bei Eingriffen am Handgelenk besticht der DASH Score durch seine Spezifität und Zuverlässigkeit und ist ein wesentlicher Bestandteil der Validierung (Krimmer H, 2000 Nov;32(6)).

Als einer der ersten funktionellen Bewertungsmethoden gilt der „**Green and O'Brien Score**“ (Dacombe et al., 2016). Erstellt von Green et al 1978, wurde dieser mit seinen Parametern Schmerzen, Arbeitsfähigkeit, Beweglichkeit, Griffkraft und radiologisches Ergebnis bei den Nachuntersuchungen angewendet (siehe Abbildung). Er dient der Beurteilung von distalen Radiusfrakturen sowie Handwurzelverletzungen und erlaubt über ein Punktesystem Aussagen

über die Funktionsfähigkeit der Hand zu machen. Eine erreichte Punktzahl über 70 wird als zufriedenstellendes Ergebnis gewertet.

Sehr ähnlich dazu ist der „**Mayo Wrist Score**“, der aus der Modifizierung des Green and O’Brien Scores von Cooney et al 1987 entstand. Dabei handelt es sich um ein Schema, bei dem für jeden Parameter maximal 25 Punkte erzielt werden können. Anhand der erreichten Summe ergibt sich eine der 4 möglichen Ergebnisse: „mangelhaft“, „ausreichend“, „gut“ oder „ausgezeichnet“. Anstelle der Arbeitsfähigkeit wird die Patientenzufriedenheit miterfasst und das radiologische Ergebnis außen vorgelassen.

Der „**Cooney und Bussey Score**“ lehnt sich an den „Mayo Wrist Score“ an und untersucht Schmerz, Bewegungsumfang, Arbeitsfähigkeit und Griffstärke (Cooney et al., 1987).

Zusätzlich wurde der „**Sukul Scaphoid Score**“ verwendet (Sukul et al., 1990). In Tabelle 2 wird dargestellt, wie das subjektive, das klinische und das radiologische Ergebnis jeweils in 4 Grade (0-3) eingeteilt werden kann.

Grad	Subjektiv	Klinisch	Radiologisch
0	Sehr zufrieden und asymptomatisch	Normale Funktion und uneingeschränkte Benutzung	Gute Fusion und fehlende Gelenkveränderungen
1	Verbessert, mit minimalen Symptomen (Schmerzen bei schwerer Arbeit)	Minimaler funktioneller Verlust, uneingeschränkte Benutzung (Verlust der Flexion oder Extension <15°)	Wahrscheinliche Fusion mit minimalen Gelenkveränderungen
2	Unverändert, mit mäßigen Symptomen (Schmerzen bei Bewegung)	Mäßiger funktioneller Verlust, wenig eingeschränkte Benutzung (Verlust der Flexion oder Extension 15°-30°)	Zweifelhafte Fusion mit offensichtlichen Gelenkveränderungen
3	Schlechter, mit schweren Symptomen (Schmerzen in Ruhe)	Deutliche eingeschränkter Verlust, eingeschränkte Benutzung (Verlust der Flexion oder Extension >30°)	Keine Fusion mit schwerer Gelenkdegeneration

Tabelle 2: Sukul Scaphoid Score.

Alle 5 Bewertungsschemata haben zum Ziel, die Heilung und die Gebrauchsfähigkeit der operierten Hand anhand der Betrachtung aus unterschiedlichen Perspektiven bzw. durch Erhebung verschiedener Parameter zu beurteilen. Werden beim „DASH-Bogen“ nur subjektive Empfindungen des Patienten aufgrund von vorgegebenen Fragen mit dazugehöriger Notenskala von 1 bis 5 beschrieben, so wird beim „Cooney und Bussey Score“ neben der subjektiven Empfindung auch die Beweglichkeit und die Kraft der operierten Hand, gemessen durch den Arzt, im Vergleich zur gesunden Hand bewertet.

Alle Scores wurden hinsichtlich des Gesamtkollektivs bewertet und zusätzlich innerhalb der zwei Gruppen (Frakturen und Pseudarthrosen) ausgewertet.

3.6 Radiologische Beurteilung

Intraoperativ wurden zur Kontrolle der Frakturposition sowie Lage der winkelstabilen Platte und eingebrachten Schrauben Röntgenbilder mittels mobilen C-Bogen durchgeführt.

Regelhaft wurden jeweils nach 6 und 12 Wochen postoperativ Röntgenkontrollen durchgeführt. Hierbei wurde der Zustand der knöchernen Durchbauung, Lage des Fremdmaterials, mögliche Fehlstellungen der Handwurzelknochen sowie beginnende Sklerosierung oder Arthrosezeichen dokumentiert. Standardmäßig wurde ein Röntgenbild der Hand in zwei Ebenen gemacht. In 9 Fällen wurde zusätzlich eine Computertomographie zur Evaluierung der knöchernen Durchbauung durchgeführt.

Bei weiteren Folgeterminen wurde diese wiederholt, ohne eine weitere zeitliche Abfolge einzuhalten. Spätestens vor geplanter Metallentfernung erfolgte eine erneute radiologische Beurteilung, um die vollständige knöcherne Durchbauung des einstigen Frakturspaltes zu gewährleisten. Als Bildarchiv diente das Picture Archiving and Communication System (*PACS*). Die Bildgebung wurde stets durch einen Facharzt der Radiologie befundet.

3.7 Fünfjahres-Follow-Up Patientenbefragung

Es wurde ein Follow-Up Gespräch 5 Jahre postoperativ mit den Patienten telefonisch durchgeführt. Im Durchschnitt wurde das Gespräch 4,9 Jahren nach stattgehabter Operation geführt. Dabei wurden nach aktuell bestehenden Beschwerden, Einschränkung der Beweglichkeit im Vergleich zur Gegenseite, Wetterfühligkeit und die Arbeitsfähigkeit dokumentiert. Die Schmerzen in Ruhe und bei Belastung wurden mittels numerischer Analogskala (NRS), angelehnt an die VAS, festgehalten. Die subjektive Zufriedenheit der Patienten wurde von „sehr zufrieden“, „mäßig zufrieden“, „nicht zufrieden aber arbeitsfähig“ bis „nicht zufrieden arbeitsunfähig“ (Analog Mayo Wrist Score) erfasst.

Bei noch nicht erfolgter operativer Plattenentfernung wurden die Beweggründe hierfür dokumentiert.

3.8 Dokumentation und statistische Auswertung

Die in der Nachuntersuchung evaluierten Daten und radiologischen Befunde der Kontrolluntersuchung wurden in einer Excel-Tabelle zusammengeführt.

Die statistische Auswertung wurde in Zusammenarbeit mit dem BMI (Biometrisches Institut) der Ludwig-Maximilians-Universität durchgeführt. Die Auswertung wurde mittels Windows Excel-Programmes (Version 16.55) gemacht.

Für die deskriptive Statistik wurden die Ergebnisse als Mittelwert angegeben. Das Konfidenzintervall wurde bei 95% angesetzt. Des Weiteren wurde ein Signifikanzniveau von 5 % definiert, was bedeutet, dass die Nullhypothese mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% zugunsten der Alternativhypothese abgelehnt wurde.

Zur analytischen Exploration der Daten wurden folgende Tests angewendet. Der Fisher's exact Test untersuchte einen möglichen signifikanten Unterschied der knöchernen Konsolidierung von Skaphoidfrakturen und Skaphoidpseudarthrosen.

Die Ergebnisse des „DASH Scores“ wurden auf Normalverteilung geprüft

Die Griffkraft wurde in Bezug auf die Händigkeit mittels T-Test auf Signifikanz geprüft.

4. Ergebnisse

4.1 Soziometrische Daten

Insgesamt wurden 25 Patienten mit Skaphoidfrakturen oder Skaphoidpseudarthrosen mit einer winkelstabilen Skaphoidplatte versorgt.

4.1.1 Geschlecht

Von den 25 erfassten Patienten waren 22 männlich und 3 weiblich, was einer Verteilung von 88% versus 12% entspricht (s. Abbildung 22).

Geschlechterverteilung

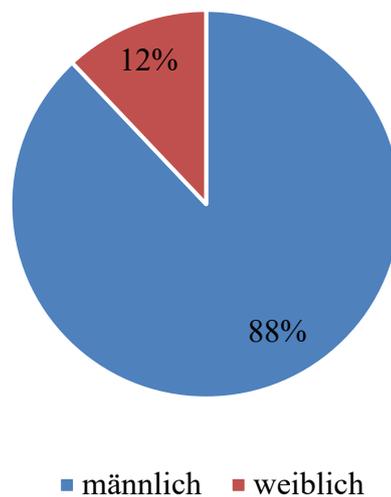


Abbildung 21: Geschlechterverteilung des Patientenguts.

4.1.2 Altersstruktur

Die Aufschlüsselung der Altersstruktur bei Traumata des Kahnbeins zeigte mit 40% ein Maximum bei den 20-30-Jährigen (Abb. 23). Der jüngste Patient war zum Unfallzeitpunkt 17 Jahre alt, der älteste 79 Jahre. Der Altersdurchschnitt betrug 37 Jahre.

In Zusammenschau mit der Geschlechterverteilung zeigte sich eine deutliche Dominanz der männlichen Patienten in den jüngeren Altersgruppen, vor allem innerhalb der 20–30-Jährigen (40%). Die weiblichen Patienten waren vermehrt in den höheren Altersgruppen vertreten. Die

Gruppe der 70–80-Jährigen (8%) bestand nur aus weiblichen Patienten (N=2), wohingegen interessanterweise die Altersgruppen bis zum 50. Lebensjahr nur aus männlichen Patienten bestand.

Altersstruktur

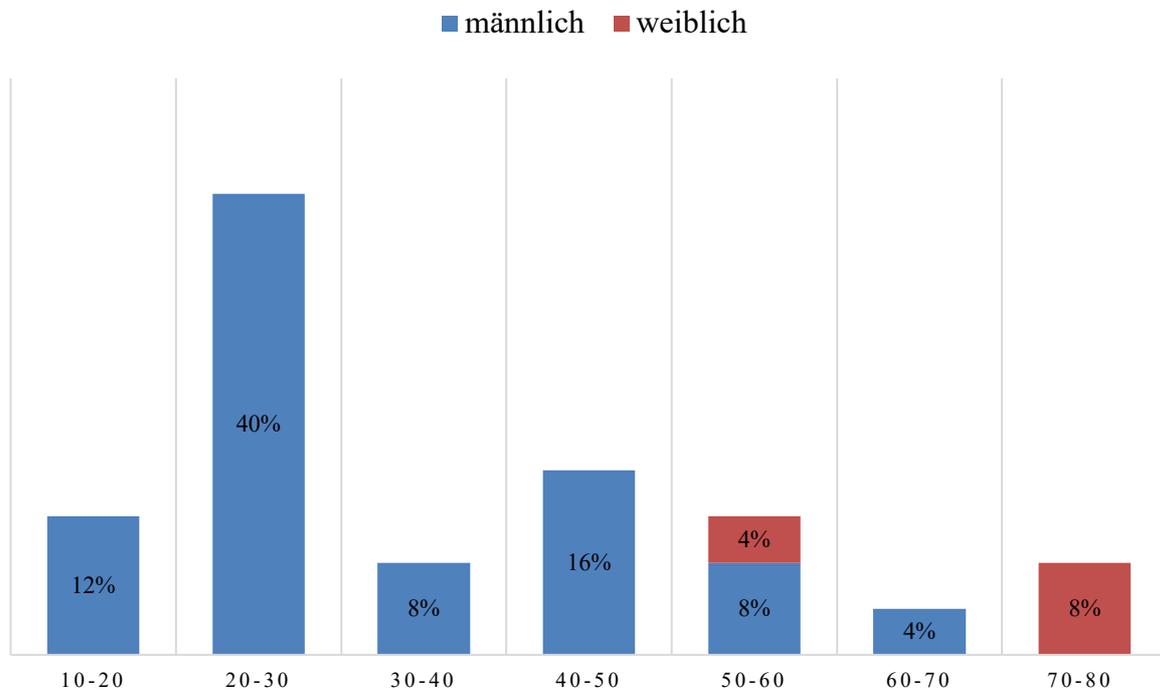


Abbildung 22: Prozentuale Altersverteilung zum Zeitpunkt des Skaphoid-Traumas.

4.2 Präoperativer Status

Die Beschwerdesymptomatik, die die Patienten zum Aufsuchen der handchirurgischen Ambulanz veranlasste, lässt sich in Schmerzen in der Tabatière (Foveola radialis), lokaler Schwellung, Kraftminderung sowie Bewegungseinschränkung zusammenfassen.

19 Patienten gaben hier eine Druckschmerzhaftigkeit in der Tabatière oder Belastungsschmerzen der Hand als Hauptbeschwerden an. Darüber hinaus wurde in 8 Fällen eine Schwellung am Handgelenk angegeben. Eine Kraftminderung und Bewegungseinschränkung des Handgelenkes wurden in jeweils 3 Fällen beschrieben.

Präoperativ gaben die Patienten anhand der VAS eine durchschnittliche Schmerzintensität von 5,4 (\pm 1,6) an.

4.2.1 Unfallhergang

In der Auswertung des Unfallherganges lassen sich zwei Hauptursachen abgrenzen (siehe Abbildung 24):

Zum einen treten Kahnbeinfrakturen vermehrt im Rahmen von Sportverletzungen auf (44%) wie zum Beispiel beim Fußballspielen, Ski- oder Snowboardfahren. In unserem Patientengut waren davon 11 Patienten betroffen. An zweiter Stelle (10 Patienten) stehen Verkehrsunfälle oder Stürze mit Verkehrsmitteln (40%), wie z.B. Rollerunfälle (N=5) und Fahrradstürze (N=4) und andere Verkehrsunfälle (N=1).

Ein Patient (4%) erlitt sein Skaphoidtrauma im Rahmen eines Arbeitsunfalles (Quetschung der Hand). Bei zwei Patienten (8%) kam es im Rahmen von Haushaltsunfällen zur Skaphoidfraktur. Ein Patient (4%) zog sich die Verletzung im Rahmen von körperlicher Gewalt zu.

Unfallhergang

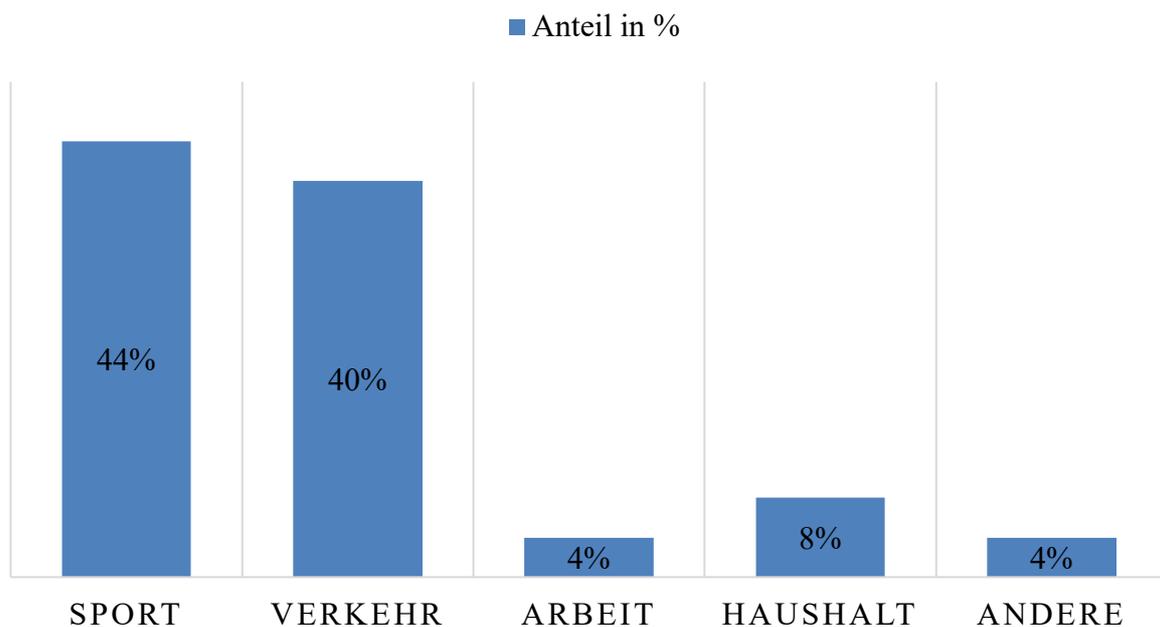


Abbildung 23: Prozentuale Verteilung des Unfallherganges auf Sport, Verkehr, Arbeit Haushalt und Andere.

4.2.2 Begleitfrakturen

Bei 7 Patienten (28%) kam es im gleichen Unfallgeschehen neben Skaphoidfrakturen zu Begleitverletzungen an der gleichen Hand. Am häufigsten waren dabei Frakturen anderer Handwurzelknochen wie zum Beispiel (z. B.) Os capitatum, Os lunatum und Os trapezium oder auch

Frakturen der Mittelhandknochen zu verzeichnen. Bei zwei dieser Patienten kam es zusätzlich zu Frakturen der unteren Extremität.

4.3 Lokalisation der Fraktur

4.3.1 Betroffene Seite der Hand

In 14 Fällen war die linke Hand (56%) und in 11 Fällen die rechte Hand (44%) betroffen. Die linke Seite ist dabei mit 56% die etwas häufiger verletzte Seite (Abbildung 25).

Im Gegensatz dazu war bei den Kahnbeinversorgungen der linken Hand stets die rechte Hand die dominante Seite.

Betroffene Seite der Hand

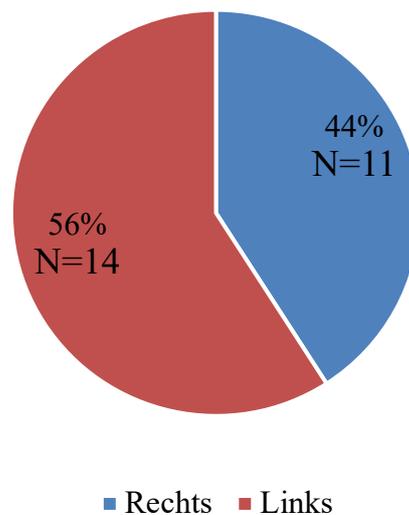


Abbildung 24: Betroffene Seite der Hand.

4.3.2 Fraktуреinteilung

Die Zuordnung der Lokalisation der Kahnbeinfrakturen bzw. Pseudarthrosen wurde analog der Stadieneinteilung nach Krimmer/Herbert 2000 durchgeführt (Abbildung 8).

In Abbildung 26 ist die Verteilung ersichtlich. Am häufigsten ist bei 10 Patienten und somit in 40% das mittlere Drittel des Skaphoids betroffen und gemäß der B2 Klassifikation durch eine Dislokation als instabil zu werten. Bei 5 Patienten kam es zu nicht-dislozierten Frakturen des mittleren Drittels des Kahnbeins im Sinne einer A2-Fraktur (20%). Außerdem gibt es zwei Schrägfrakturen (B1). Eine transskaphoidale perilunäre Luxationsfraktur (B4) kam in diesem Patientengut nicht vor. Es gab 2 Fälle einer „delayed union“ (C) und 5 Fälle von Pseudarthrosen (D), darunter eine mit bereits bestehender Sklerosierung und eine mit avaskulärer Nekrose.

Frakturlokalisation

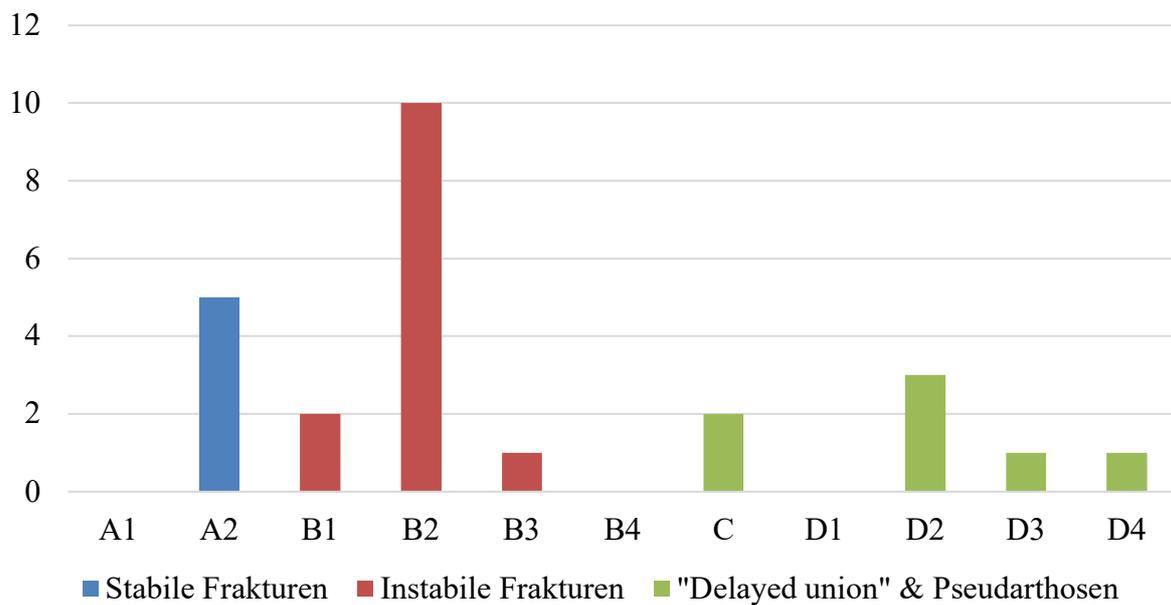


Abbildung 25: Verteilung der Frakturlokalisation analog der Einteilung Krimmer/Herbert.

Im Durchschnitt vergingen zwischen Unfalltag und endgültiger operativer Versorgung von Skaphoidfrakturen 4,9 Wochen (4-47 Tage). Die operative Therapie der Skaphoidpseudarthrosen wurde durchschnittlich nach 23 Wochen (76-837 Tage) durchgeführt.

Die durchschnittliche Operationszeit betrug in der Gruppe der Frakturen 73 Minuten (50-116 Minuten) und in der Gruppe der Pseudarthrosen 90 Minuten (51-136 Minuten).

4.3.3 Vorangegangene Therapie

Bei 6 (24%) Patienten wurde die Skaphoidfraktur initial in der primären extern durchgeführten Röntgenuntersuchung übersehen. Aufgrund von persistierenden Schmerzen und infolgedessen der erneut durchgeführten Bildgebung mittels Computertomographie konnte eine Skaphoidfraktur diagnostiziert werden. Bei zwei von diesen Fällen entwickelte sich aus der Kahnbeinfraktur eine Pseudarthrose.

Aufgrund von lang persistierenden Schmerzen stellten sich zwei andere Patienten in der handchirurgischen Ambulanz vor. Bei der gezielten Anamnese konnte ein lang zurückliegendes Trauma evaluiert werden. Letztlich entwickelte sich in diesen beiden Fällen eine Skaphoidpseudarthrose.

Ein Patient aus der Frakturgruppe wurde im Vorfeld bereits mit einer Herbertschraube behandelt. Bei extraossärer Schraubenlage wurde nach 4 Wochen die erneute Indikation zur operativen Versorgung gestellt.

Ein weiterer Patient aus der Pseudarthrosengruppe wurde ebenfalls bereits extern operativ mittels Herbertschraube behandelt. Die Operation lag 15 Monate zurück.

Bei einem weiteren Patienten erfolgte bei offener distaler Radiusfraktur als Begleitverletzung vorerst eine Stabilisierung mittels Fixateur extern für 3 Wochen und eine zweizeitige Versorgung mittels Plattenosteosynthese.

4.3.4 Verwendung eines Knochentransplantates

Es wurden insgesamt 14 Patienten (56%) mit einem autologen Knochentransplantat versorgt.

Dabei wurde bei 11 (79%) Patienten ein Spongiosatransplantat aus dem gleichseitigen Beckenkamm entnommen, bei 3 (21%) Patienten kam es zur Spongiosaplastik vom gleichseitigen Radius (Abbildung 27).

Knochentransplantat

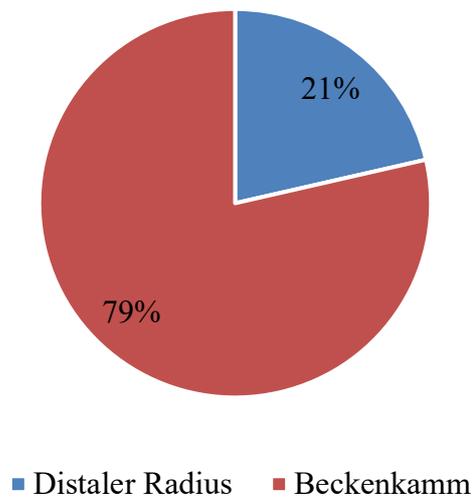


Abbildung 26: Prozentuale Verteilung der Entnahmestelle eines Knochentransplantates.

4.4 Klinische Untersuchung

Von den 25 inkludierten Patienten nahmen 21 Patienten nach durchschnittlich 19,2 Wochen an einer standardisierten Nachuntersuchung teil. 3 Patienten konnten durch geänderte Adressdaten nicht mehr erreicht werden. Ein Patient wollte an der Studie nicht teilnehmen. Die nachfolgenden Ergebnisse wurden daher aus den 21 miteingeschlossenen Patienten ermittelt.

4.4.1 Ergebnisse des Bewegungsumfanges

In Abbildung 28 wurde das Bewegungsausmaß des Handgelenkes nach der Neutral-Null Methode (Abbildung 20) gemessen und im Vergleich zur Gegenseite dargestellt. Dabei zeigt sich das größte Defizit mit 15° (37%) in der Ulnardeviation und mit 25 ° in der Palmarflexion, was 31% entspricht. Die geringsten Einbußen der Beweglichkeit sind postoperativ in der Pronation mit 8% und Supination mit 9% zu beobachten. Durchschnittlich zeigt sich in der Flexion/Extension ein Bewegungsausmaß von 96°, in der Supination/Pronation 162° und in der Ulnardeviation/Radialabduktion 41°. Im Durchschnitt wurden 71% ($\pm 18\%$) der Beweglichkeit im Vergleich zur Gegenseite postoperativ erreicht.

Bewegungsausmaß im Vergleich zur Gegenseite

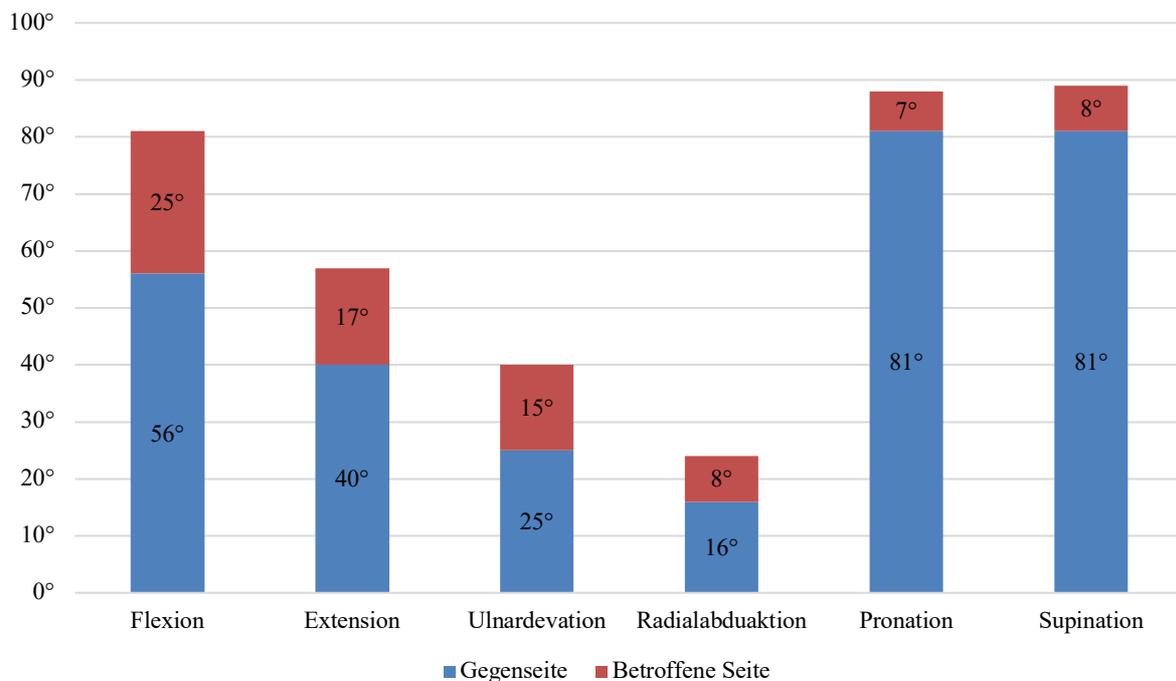


Abbildung 27: Bewegungsumfang der betroffenen Hand im Vergleich zur Gegenseite.

4.4.2 Griffstärke

Bei der Messung der Griffstärke konnte bei einem Patienten (5%) eine vollständige Wiedererlangung der Kraft (100% im Vergleich zur Gegenseite) erzielt werden. Bei 6 Patienten (28%) wird eine geringgradige Kraftminderung (80-99% der Gegenseite) dokumentiert, bei 11 Patienten (52%) eine mäßige Kraftminderung (50-79% der Gegenseite). Bei 3 Patienten (14%) waren die gemessenen Werte <50% im Vergleich zur Gegenseite (s. Abbildung 29).

Der Mittelwert der Griffstärke des gesamten nachuntersuchten Patientenkollektivs beträgt 71% im Vergleich zur Gegenseite und 33 kg ($\pm 12,8$ kg). Dabei wurde ein Maximalwert von 98,5% und ein Minimalwert von 21% im Vergleich zur Gegenseite berechnet.

Griffstärke im Vergleich zur Gegenseite

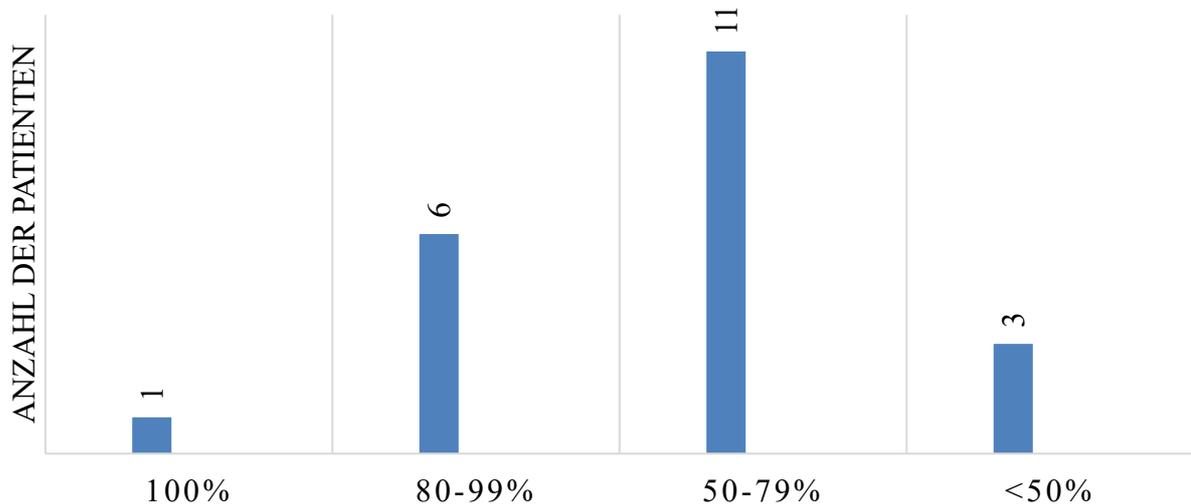


Abbildung 28: Griffstärke (angegeben in %) im Vergleich zur Gegenseite mit jeweiliger Patientenanzahl.

In der Differenzierung der Griffstärke der Untersuchungsgruppen „Verletzung der dominanten Hand“ (78%) bzw. „Verletzung an der nicht-dominanten Hand“ (68%) zeigte sich kein signifikanter Unterschied zu oben genanntem Mittelwert.

4.5 Metallentfernung

Bei 16 Patientin (64%) erfolgte eine operative Metallentfernung der Skaphoidplatte in der Abteilung Hand-und Plastische Chirurgie der Chirurgischen Klinik der LMU, in zwei Fällen wurde diese auswärts durchgeführt. Durchschnittlich wurde diese nach 10,3 Monaten durchgeführt (163-606 Tage), die früheste Metallentfernung erfolgte nach 163 Tagen.

Wird das Patientengut in Skaphoidfrakturen und Skaphoidpseudarthrosen unterschieden, ergeben sich für die Frakturen durchschnittlich 269 Tage bis zur Metallentfernung, für die Pseudarthrosen 341 Tage. Abbildung 29 macht diese Differenz mitsamt ihrer Standardabweichungen sichtbar.

Die durchschnittliche Operationszeit der Metallentfernung betrug 39 Minuten (18-66 Minuten).

Intervall der Metallentfernung

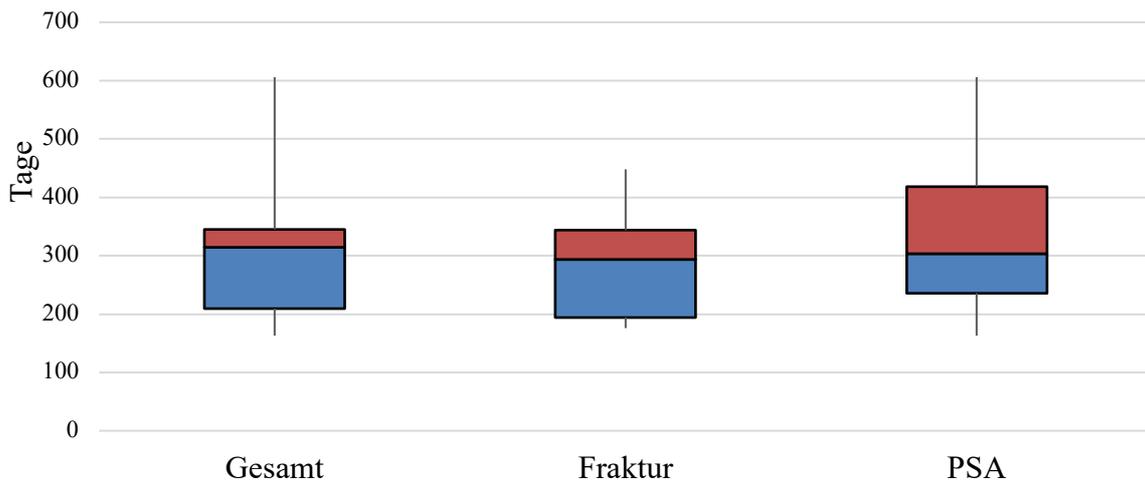


Abbildung 29: Zeitliche Differenz (in Tagen) der Metallentfernung in den Gruppen Fraktur und Pseudarthrose (PSA) im Vergleich zur Gesamtzahl.

4.6 Patientenbefragung

4.6.1 Nach Plattenosteosynthese

Im Rahmen der klinischen Nachuntersuchungen und postoperativen Befragungen nach durchschnittlich 19,2 Wochen wurden die Scores nach „DASH“, „Mayo Wrist Score“, „Green and O'Brien Score“, „Sukul Scaphoid Score“ sowie „Cooney und Bussey Score“ erhoben und ausgewertet. Dabei wurde sowohl das gesamte Patientengut sowie jeweils die Gruppe Skaphoidfraktur bzw. Skaphoidpseudarthrose berechnet, siehe Tabelle 3.

Score	Gesamt	Fraktur	Pseudarthrose
Dash	45,8	45,5	49,9
Green and O'Brien	76,4	75	78,8
Mayo	65	65,8	64,4
Cooney&Bussey	67,1	66,9	67,5

Tabelle 3: Durchschnittswerte der erhobenen Scores in Bezug auf das gesamte Patientengut sowie Skaphoidfrakturen bzw. Pseudarthrosen.

Die Ergebnisse des DASH Scores wurden auf Normalverteilung geprüft. Durchschnittlich wurden 45,8 Punkte erzielt, mit einer Spanne von 23-87 Punkten.

Im Score nach Green and O'Brien konnte ein zufriedenstellender Durchschnittswert von 76 Punkten, von 30-100 Punkten reichend, erzielt werden. Werte > 70 werden laut Score Auswertung als „zufriedenstellend“ betrachtet.

In unserem Patientengut wurden im Mayo Wrist Score 65 Punkte erreicht, was nach Score-Legende einem „befriedigenden“ Ergebnis entspricht (65-79 Punkte).

Im Score nach Cooney und Bussey wurde ein Durchschnittswert von 67 erreicht, was der Score-Legende nach für ein „ausreichendes“ Ergebnis (65-80 Punkte) steht.

Im Sukul Skaphoid Score zeigt sich kein signifikanter Unterschied zwischen der Frakturgruppe und der Pseudarthrosengruppe.

In beiden Gruppen wurde in der *subjektiven* Bewertung durchschnittlich Grad 1 erreicht (Frakturgruppe: 0,8; Pseudarthrosengruppe: 0,75), was für „verbessert, mit minimalen Symptomen (Schmerzen bei der Arbeit)“ steht. In der *klinischen* Bewertung gaben die Patienten durchschnittlich einen „minimalen funktionellen Verlust, uneingeschränkte Benutzung (Verlust der Flexion oder Extension $<15^\circ$)“ an, was einem Grad 1 (Frakturgruppe: 0,7, Pseudarthrosengruppe: 0,9) entspricht. Die *radiologische Bewertung* entspricht einem Grad 2: „Zweifelhafte Fusion mit minimalen Gelenkveränderungen“ (Frakturgruppe: 1,9, Pseudarthrosengruppe: 1,8).

Anhand der VAS wurde die postoperative Schmerzintensität ermittelt. In Ruhe gaben die Patienten einen Durchschnittswert von 0,4 ($\pm 0,8$) und unter Belastung einen Wert von 3,8 ($\pm 2,4$) an.

4.6.2 Nach Plattenentfernung

Nach erfolgter Plattenentfernung an der LMU stellten sich insgesamt 11 Patienten (52%) der ursprünglichen Patientengruppe, einer erneuten postoperativen Evaluation zur Verfügung. Dabei wurden die gleichen klinischen Parameter und Scores analog der ersten Nachuntersuchung verwendet. Die Ergebnisse der 11 Patienten, die vor und nach Metallentfernung erhoben wurden, werden nun im Vergleich dargestellt.

Abb. 30 zeigt das Ausmaß der Beweglichkeit vor und nach Metallentfernung.

Wurde vor der Metallentfernung eine Beweglichkeit durchschnittlich von 71 % im Vergleich zur Gegenseite erzielt, verbesserte sich die Beweglichkeit nach Metallentfernung um 17% auf insgesamt 87% im Vergleich zur Gegenseite. Dabei verbesserte sich die Flexion durchschnittlich um 15° , die Extension um 13° . Bei der Ulnardeviation und Radialdeviation erhöhte sich die Beweglichkeit um jeweils 7° . Bei Supination und Pronation zeigten sich geringe Veränderungen durch die Plattenentfernung, mit 5-8° erhöhtem Bewegungsumfang.

Vergleich des Bewegungsumfanges

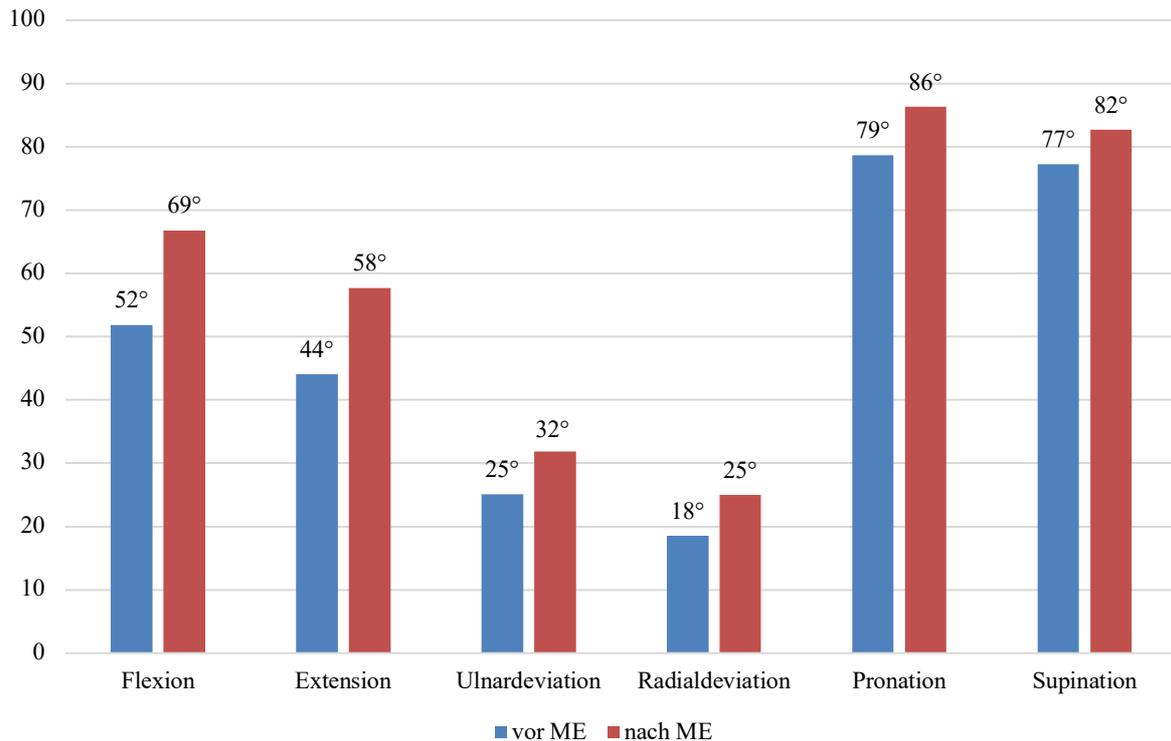


Abbildung 30: Vergleich des Bewegungsumfanges in ° der betroffenen Hand vor und nach ME bei nachuntersuchten Patienten (N=11).

Griffstärke

Nach Plattenentfernung wurden durchschnittlich 90% der Griffstärke im Vergleich zur Gegenseite gemessen. Dies entspricht einer durchschnittlichen Verbesserung der Griffkraft von 26%.

Vergleich der klinischen Scores

In den bereits erwähnten postoperativen Scores zeigte sich nach Plattenentfernung ebenfalls eine Verbesserung durchschnittlich um 14,6%. So verringerte sich der Wert des „DASH-Scores“ um 7 Punkte (45 auf 38), was einer Verbesserung entspricht.

Das Outcome des „Green and O’Brien Score“ erzielte mit einem Wert >70 bereits vor Metallentfernung ein zufriedenstellendes Ergebnis. Nach Plattenentfernung konnte dieses um 18% gesteigert werden.

Das Endergebnis des „Mayo Wrist Scores“ besserte sich um 11% und war stets im befriedigenden Bereich.

Das Punkteergebnis des „Cooney und Bussey Score“ besserte sich um 15%, von einem ausreichenden zu einem guten Ergebnis (s. Tabelle 4).

Score	Vor ME	Nach ME
Dash	45,82	38,41
Green&O'Brien	76,42	96,42
Mayo	64,05	75,71
Cooney&Bussey	67,17	82,85

Tabelle 4: Durchschnittswerte der erhobenen Scores im Vergleich vor und nach Metallentfernung (ME).

4.7 Knöcherne Konsolidierung

Anhand der durchgeführten Bildgebungen mittels CT und Röntgenuntersuchung, in 6 und 12 Wochen Abständen, wurde der Fortschritt der knöchernen Konsolidierung festgehalten.

Das radiologische Ergebnis einer operativ versorgten Skaphoidfraktur bzw. Skaphoidpseudarthrose wurde frühestens nach 6 Wochen, spätestens jedoch nach 6 Monaten als durchbaut oder nicht durchbaut angesehen.

Die Auswertung der radiologischen Befunde, die jeweils durch einen Oberarzt der Abteilung Radiologie der Ludwig-Maximilians-Universität validiert wurden, ergaben, dass es bei 18 Patienten zur einer knöchernen Durchbauung, das heißt (d.h.) Heilung des ehemaligen Frakturspaltes, kam. Bei 7 Patienten blieb eine knöcherne Konsolidierung, d.h. eine vollständige Heilung aus. Die aufgeschlüsselten Ergebnisse der Ausheilung bei Frakturen bzw. Pseudarthrosen sind in Abbildung 31 dargestellt.

Im Durchschnitt kam es bei 72% (18 Patienten) nach 4,7 Monaten zur knöchernen Durchbauung. Die Heilungsrate der Skaphoidfrakturen ist mit 84% (N=15) der Heilungsrate der Pseudarthrosen von 43% (N=3) deutlich überlegen. Hierbei zu berücksichtigen sei die verringerte Fallzahl der Gruppe der Pseudarthrosen.

Die Hypothese, dass sich die Wahrscheinlichkeit der knöchernen Durchbauung bei frischen Skaphoidfrakturen und Skaphoidpseudarthrosen nicht unterscheidet, wurde mittels Fisher's exact Test auf Signifikanz geprüft.

In Bezug auf die Korrelation von knöcherner Ausgangslage (Fraktur vs. Pseudarthrose) und knöcherner Durchbauung nach Plattenosteosynthese konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden.

Knöcherne Durchbauung

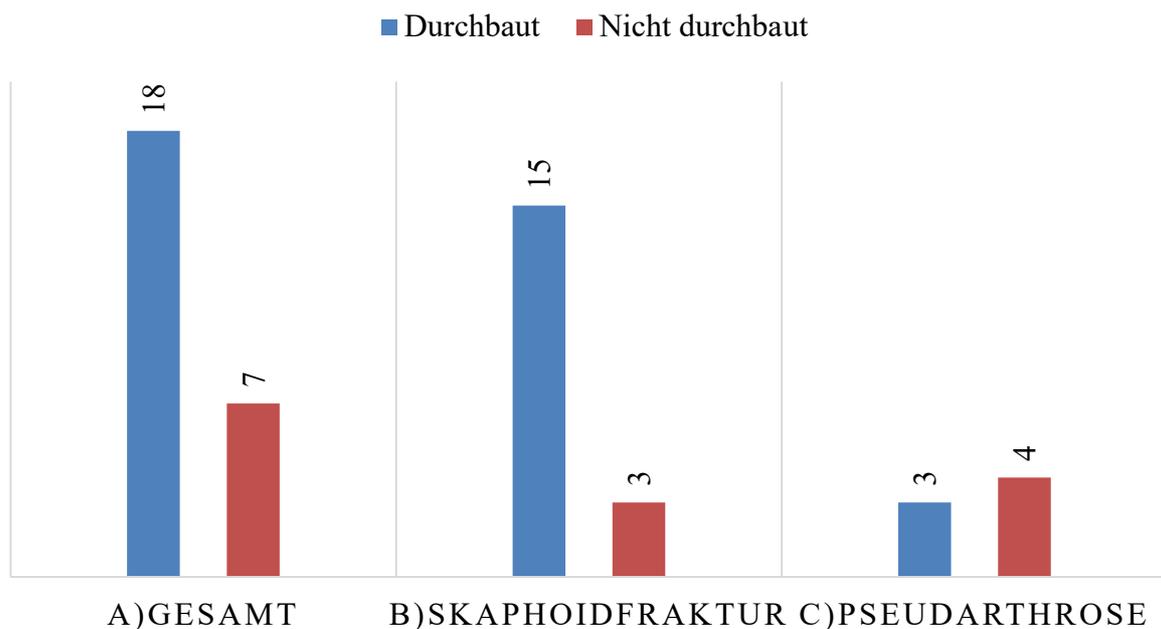


Abbildung 31: Verteilung der knöchernen Durchbauung der gesamten Fallzahl, Skaphoidfrakturen und Skaphoidpseudarthrosen.

4.8 Fünfjahres-Follow-Up

Zur Bewertung des mittelfristigen Outcomes wurden die Patienten durchschnittlich nach 5 Jahren telefonisch befragt. Bei 16 Patienten konnte ein **5-Jahres Follow-Up** Gespräch durchgeführt werden. 4 Patienten waren weder telefonisch noch schriftlich zu erreichen, eine Patientin ist in einem Pflegeheim in demenztem Zustand. Bei 4 Patienten erfolgte bisher noch keine Metallentfernung. Gründe dafür seien allgemeine Zufriedenheit und Beschwerdefreiheit. Bei einem Patienten ist eine Metallentfernung in Planung, ein weiterer Patient lehnt eine erneute Operation ab. Zwei Patienten ließen die Entfernung der winkelstabile Skaphoidplatte in einer anderen chirurgischen Abteilung durchführen.

Bei der Patientenbefragung bezüglich Intensität der Schmerzen gaben 8 Patienten (50%) an, noch leichte Schmerzen (VAS 0-3) bei starker körperlicher Arbeit zu haben. 7 Patienten (43,75%) haben mittelgradige Schmerzen (VAS 4-6) bei körperlicher Arbeit und ein Patient (6,25%) habe mittelgradige Schmerzen im Alltag. 10 Patienten (62,5%) sagten aus, insgesamt sehr zufrieden zu sein. 5 Befragte (31,25%) seien mittelmäßig zufrieden und ein Patient (6,25%) sei nicht zufrieden, jedoch arbeitsfähig.

Der Großteil der Patienten (N=13, 81,25%) konnte nach abgeschlossener Behandlung zu ihrer beruflichen Tätigkeit ohne Veränderungen zurückkehren. 2 Patienten üben den gleichen Beruf aus, jedoch mit Einschränkungen. Ein Patient musste seine frühere berufliche Tätigkeit als KFZ-Mechatroniker aufgeben und zu einer Computer-Tätigkeit wechseln (Pat. Nr. 4). 25% (4 Patienten) der Interviewten beschrieben eine Wetterfühligkeit.

4.9 Besonderheiten

4.9.1 Morbus Preiser

Bei einem Patienten, der mit einer Skaphoidpseudarthrose rechts vorstellig wurde, ergab das pathologische Ergebnis des eingesendeten Knorpel-Knochenfragments einen Morbus Preiser, einer aseptische Knochennekrose entsprechend. Dieser Patient nahm an keiner der postoperativen Nachuntersuchungen teil. Bei der radiologischen Kontrolluntersuchungen mittels Computertomographie nach 14 Wochen zeigte sich bis dahin keine fortschreitende Ausheilung der Pseudarthrose.

4.9.2 Material

In den oben beschriebenen 25 Fällen kam es zu keinem Materialversagen. Weder Plattenbrüche noch Schraubenbrüche wurden beobachtet.

5. Fallbeispiele

5.1 Die mehrfragmentäre Fraktur

Ein 25-jähriger männlicher Hobbyboxer zog sich im Oktober 2014 bei einem Faustschlag auf den Boxsack eine Handgelenksdistorsion sowie eine mehrfragmentäre Skaphoidfraktur der rechten nicht-dominanten Seite zu. Zwei Wochen zuvor sei er außerdem bereits auf die rechte Hand gestürzt, ohne dass eine weitere Diagnostik erfolgt sei. Der Patient ist Nichtraucher und arbeitet als Verkäufer.

Aufgrund von persistierenden Schmerzen bei Handgelenksflexion und -extension erfolgte die Erstvorstellung über die Notaufnahme. Es besteht ein positiver Druckschmerz in der Tabatière. Eine diagnostische Bildgebung mittels Röntgen und Computertomographie wurde durchgeführt (s. Abbildung 33-34) und zeigte eine mehrfragmentäre Skaphoidfraktur der rechten Seite.



Abbildung 32: Präoperatives Röntgenbild im anteriorposterior und lateralen Strahlengang von Patient Nr.2.

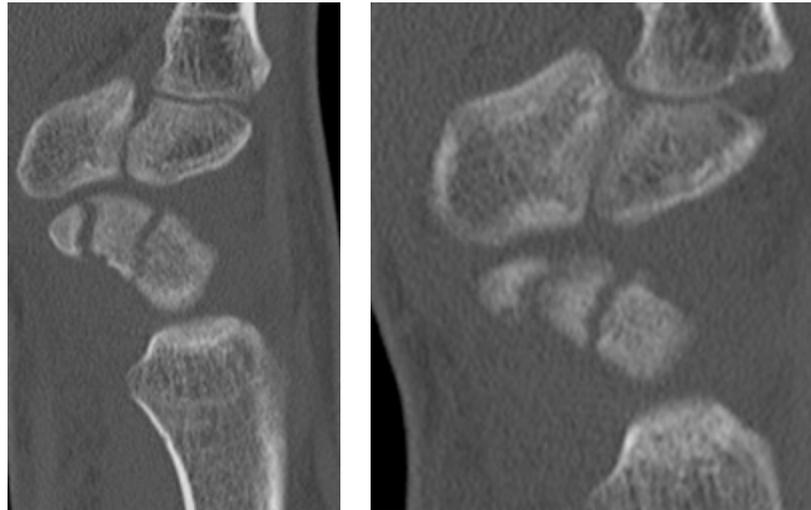


Abbildung 33: Präoperative CT-Aufnahmen Handgelenk rechts mit einer mehrfragmentären Skaphoidfraktur (Pat. Nr.2).

Nach Anlage einer Gipsschiene für 2 Wochen wurde 30 Tage nach Trauma, im November 2014, der operative Eingriff durchgeführt. Aufgrund des Vorliegens einer mehrfragmentären Fraktur wurde das Verfahren der winkelstabilen Plattenosteosynthese gewählt (s. Abbildung 35).

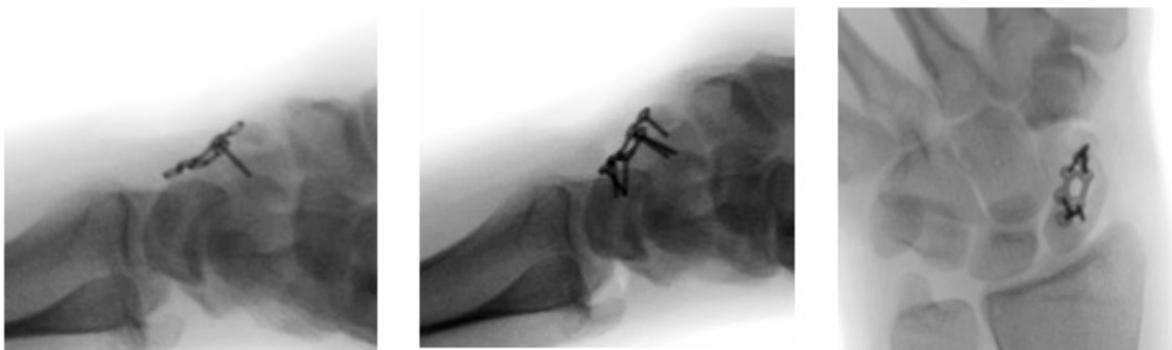


Abbildung 34: Intraoperative Stellungs-und Implantatkontrolle.

Der postoperative Verlauf war geprägt von persistierenden Schmerzen bei Ulnarabduktion und einem Schwächegefühl im Daumen. In einer nach 6 Wochen postoperativ durchgeführten CT zeigte sich neben korrekter Implantatlage eine knöcherne Durchbauung (s. Abbildung 36).



Abbildung 35: Computertomographie 6 Wochen postoperativ Handgelenk rechts (Patient Nr.2).

Zum Zeitpunkt der standardisierten Nachuntersuchung, 9 Monate (39 Wochen) postoperativ, gab der Patient bei Belastung eine Schmerzintensität von 2 (VAS) und in Ruhe 0 an. Außerdem gab er nur wenig Schmerzen bei starker Arbeit an (20 Punkte Mayo Wrist Score). In der Beweglichkeit wurden im Vergleich zur Gegenseite 82% erzielt (s. Abbildung 37), in der Griffkraft im Vergleich zur Gegenseite 87%.

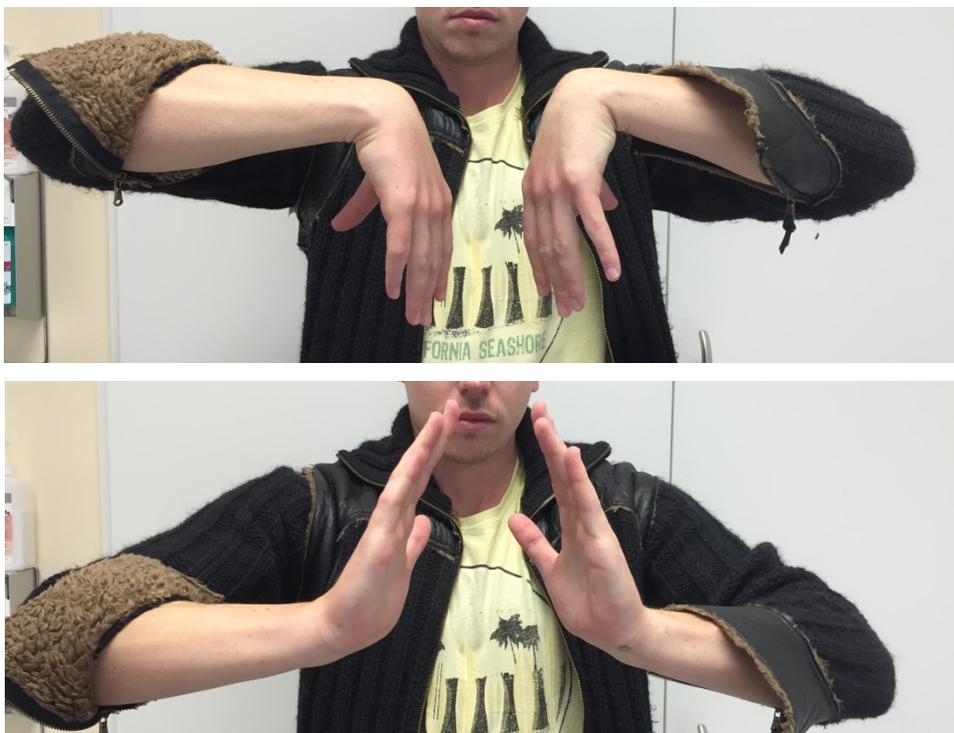


Abbildung 36: Klinisches Outcome: Beweglichkeit im Vergleich zur Gegenseite (Pat. Nr. 2).

Insgesamt ergaben die Angaben des Patienten zusammen mit den klinischen Untersuchungen ein exzellentes Ergebnis im Green and O'Brien Score (90 Punkte) sowie ein, aufgrund der Bewegungseinschränkung im Vergleich zur Gegenseite, befriedigendes Ergebnis im Mayo Wrist Score (75 Punkte). Im subjektiven DASH Score wurden 30 Punkte erzielt.

5.2 Die Humpback-Deformität

Ein 55-jähriger Patient erlitt im Rahmen eines Motorradunfalles eine Skaphoidfraktur der rechten Hand. Initial zeigte sich die Fraktur im mittleren Drittel nicht disloziert, dass auswärts eine konservative Therapie mittels Gippschiene eingeschlagen wurde. Nach 4 Wochen zeigte sich in der Computertomographie keine knöcherne Heilung und das Bild einer Humpback-Deformität, sodass die Indikation zur winkelstabilen Plattenosteosynthese mit Spongiosatransplantat aus dem Beckenkamm gestellt wurde (s. Abbildung 38-39).

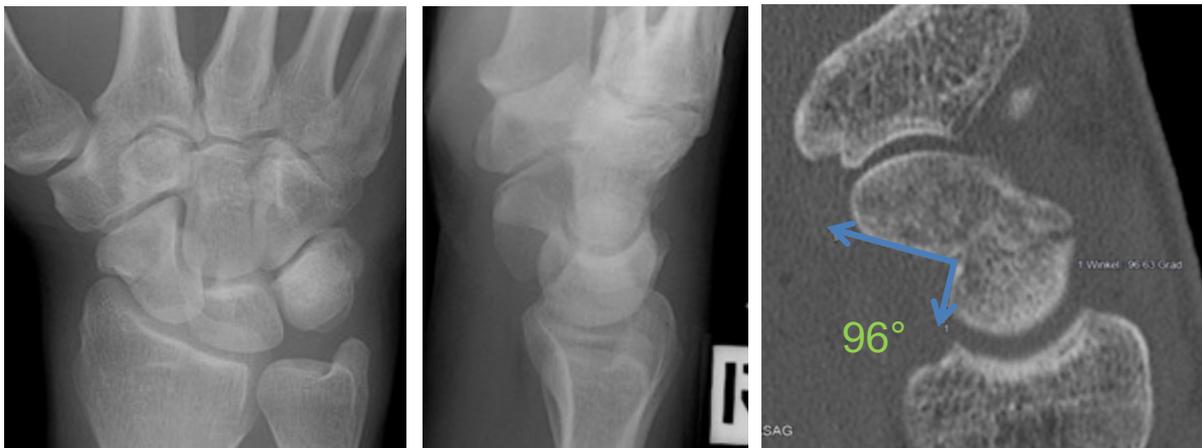


Abbildung 37: Präoperative Röntgen- und CT Bilder: Humpback-Deformität mit 96° Skaphoid rechts (Patient Nr. 10).



Abbildung 38: Postoperatives Röntgenbild zur Implantat- und Stellungskontrolle (Patient Nr. 10).

Im Rahmen der standardisierten Nachuntersuchung gab der Patient keine Schmerzen in Ruhe (VAS 0) oder in Belastung (VAS 1) an. Jedoch beschrieb er ein Gefühl einer eingeschränkten Beweglichkeit in Handgelenksflexion und Extension.

Nach 9 Monaten erfolgte nach radiologisch gesicherter knöcherner Durchbauung die Metallentfernung.

Subjektiv verbesserte sich durch die Plattenentfernung die Beweglichkeit und die Griffkraft. Dies spiegelte sich auch in den jeweils postoperativ erhobenen Scores wider. So reduzierte sich der „DASH Score“ von 47 auf 43 Punkte. Im Score nach „Cooney und Bussey“ verbesserte sich das ausreichende Ergebnis (70 Punkte) auf ein gutes Ergebnis (85 Punkte). In der Beweglichkeit im Vergleich zur Gegenseite kam es zu einer Steigerung von 70% auf 79% (s. Abbildung 40-41), in der Griffkraft im Vergleich zur Gegenseite sogar von 79% auf 111%.

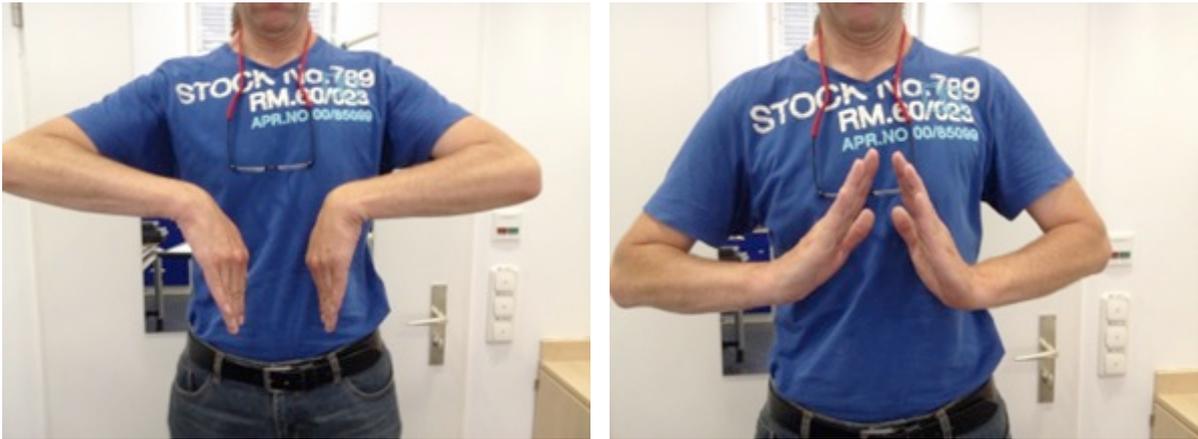


Abbildung 39: Beweglichkeit im Vergleich zur Gegenseite vor Metallentfernung (Patient Nr. 10).



Abbildung 40: Beweglichkeit im Vergleich zur Gegenseite nach Metallentfernung (Patient Nr. 10).

5.3 Die ausbleibende Heilung

Ein 23-jähriger männlicher Kfz-Mechaniker zog sich im Juni 2014 beim Fußballspielen eine Skaphoidfraktur der rechten dominanten Seite zu. Auswärts wurde diese mittels Herbertschraube versorgt. Der Patient ist Raucher.

Im September 2015 stellte sich der Patient aufgrund persistierender Schmerzen, vor allem bei Belastung, in der handchirurgischen Ambulanz der LMU vor. In der diagnostischen

Computertomographie zeigt sich neben einer Skaphoidpseudarthrose im distalen Drittel sowie eine inkorrekte Lage der implantierten Herbertschraube. Der Schraubenkopf lag im Frakturspalt und das proximale Fragment wurde kaum erfasst (s. Abbildung 42). Zwei Wochen nach Erstvorstellung erfolgte die Revision mit komplikationsloser Entfernung der Herbertschraube und Resektion der Pseudarthrose sowie Implantation einer winkelstabilen Plattenosteosynthese mit Spongiosaplastik aus dem Beckenkamm.



Abbildung 41: Präoperative Röntgenbilder: Skaphoidpseudarthrose mit implantierte Herbertschraube rechts (Patient Nr. 17).

Im weiteren Verlauf berichtete der Patient über eine Blockade in der Beweglichkeit, vor allem in der Handgelenksexension. Zusätzlich berichtete er über Schmerzen beim Schreiben. In der klinischen Nachuntersuchung 14 Wochen postoperativ ergab sich ein befriedigendes Ergebnis mit 65 Punkten im „Mayo Wrist Score“ und mit 65 Punkten ein „Ausreichend“ im Score nach Cooney und Bussey. Die Beweglichkeit im Vergleich zur Gegenseite war postoperativ mit 67% eingeschränkt. Radiologisch zeigte sich ein Substanzdefekt im distalen Skaphoidpol sowie eine ausbleibende progrediente knöcherne Integration der Spongiosaplastik. Der Patient stellte sich zu keinem weiteren Nachuntersuchungstermin vor. Im 5-Jahres Follow-Up berichtet er über eine auswärts durchgeführte Plattenentfernung und erneuten Revision der Pseudarthrose.

6. Diskussion

Viele Jahre lang galt die Herbert-Schraube als Therapie der Wahl zur Osteosynthese des Kahnbeins, sowohl bei frischen Frakturen als auch bei Pseudarthrosen mit Spongiosa-Transplantation oder Knochen-Spänen. Mit der winkelstabilen Platte ist eine weitere Möglichkeit hinzugekommen, die nicht nur für gering dislozierte Skaphoidfrakturen sondern gerade auch für herausfordernde Fälle von mehrfragmentären Frakturen, Skaphoidpseudarthrosen und erneuten Osteosyntheseversuchen eine gute Therapie darstellt.

In der vorliegenden retrospektiven Studie werden über einen Zeitraum von drei Jahren die Symptome und Diagnostik von Skaphoidfrakturen- und Pseudarthrosen in der handchirurgischen Ambulanz der LMU erläutert und die Ergebnisse der osteosynthetischen Versorgung mit winkelstabiler Platte dargestellt. Die Nachuntersuchung zeigt, dass sowohl in der radiologisch untersuchten Knochenkonsolidierung als auch klinisch-funktionell gute Ergebnisse mit der winkelstabilen Skaphoidplatte erzielt werden können und diese in der Therapieauswahl eine wichtige Option darstellt.

6.1 Patientengut

6.1.1 Alter und Geschlecht

Das Patientengut war in unserer Studie mit 88% überwiegend männlich. Dies korreliert auch mit den Ergebnissen von Dodds et al., hier lag der Anteil männlicher Patienten bei 90% und bei Quadlbauer et al. sogar bei 95 % (Quadlbauer et al., 2019, Dodds et al., 2018).

Skaphoidfrakturen und daraus entstehende Skaphoidpseudarthrosen betreffen vorwiegend junge und sportlich aktive Patienten. In der Literatur wird ein Durchschnittsalter zwischen 15-40 Jahren beschrieben (Dodds et al., 2018, Eisenschenk et al., 1999, Arsalan-Werner et al., 2016a, Muirhead et al., 2021). Leixnering et al. berichtet bei einem kleineren Patientenkollektiv über einen etwas höheren Altersdurchschnitt von 37 Jahren (22-53 Jahren) (Leixnering et al., 2011). Unsere Ergebnisse mit einer deutlich erhöhten Inzidenz (40%) in der Gruppe der 20-30-Jährigen (Durchschnittsalter 37 Jahre) sind im Vergleich mit anderen Publikationen im oberen Altersspektrum einzuordnen. Dabei zu erwähnen sei die verbreiterte Altersspanne von 17-79 Jahre. Es zeigte sich außerdem ein zweiter Peak im Altersspektrum der 40-50-Jährigen mit

16%. Interessanterweise korrelieren Frakturen im höheren Alter mit einem vermehrten weiblichen Patientengut (Ahlborg et al., 2003), so auch in unseren Daten. Die Gruppe der 70-80-Jährigen wird nur von weiblichen Patienten gebildet (N=2).

Dem liegt mitunter die Unfallursache zu Grunde. Während in den jüngeren Altersgruppen hauptsächlich Sport- und Verkehrsunfälle ursächlich für das Skaphoidtrauma sind, sind es in den älteren Altersgruppen Stürze auf die Hand. Generell haben Frauen aufgrund der osteoporotischen Umbauprozesse im höheren Alter ein verstärktes Frakturrisiko (Manolopoulos et al., 2003, Lippuner et al., 2011). Obwohl es bei Stürzen auf die dorsalextendierte Hand im höheren Alter vermehrt zu distalen Radiusfrakturen, als zu Kahnbeinfrakturen kommt (Winckler et al., 1991), ist eine Korrelation von Alter, Geschlecht und Sturzursache nicht zu verkennen. Bei unseren Patienten waren in den jüngeren Altersgruppen die dominierenden Traumaursachen Sportverletzungen (44%) und Verkehrsunfälle (40%), und das Patientengut darunter zu 95% männlich. Dies deckt sich mit den Angaben in der Literatur (Esteban-Feliu et al., 2018, Geissler et al., 2012). Zum Teil werden Begründungen wie ein aggressiverer Fahrstil im Verkehr oder auch die vermehrte sportliche Betätigung von männlichen Patienten angegeben, dies gilt es aber weiterhin zu diskutieren (Strassmair et al., 2001).

6.1.2 Frakturlokalisierung

In unserem Patientenkollektiv war in 56% die linke Hand betroffen. Interessanterweise war nur in insgesamt 32% (N=8) die dominante Hand verletzt, die hier stets die rechte Seite war. Linkshänder erlitten in unserer Studie also keine Kahnbeinfraktur auf der linken Seite. In den 11 Fällen, in denen die rechte Hand versorgt wurde, war in 8 Fällen die rechte Hand auch die dominante Seite.

Das Gegensätzliche ist in der Literatur beschrieben, hier ist mit durchschnittlich 61% die dominante Hand die Betroffene (Martini et al., 1995).

In unserer Arbeit zeigt sich eine vermehrte Lokalisation der instabilen Frakturen im mittleren Skaphoiddrittel (40%), gemäß einer B2-Fraktur. Dies deckt sich mit den Angaben von anderen Autoren. Hier werden sogar höhere Werte von bis zu 80% beschrieben. (Dönicke et al., 2014).

6.2 Klinische Ergebnisse

Um die klinischen Ergebnisse besser einordnen zu können, ist eine parallele Verwendung von patientenorientiertem und traditionellem objektivem Bewertungsschema zur Beurteilung notwendig (Krimmer et al., 2000b). Dies spiegelt sich in den meisten hier verglichenen klinischen Studien nieder.

6.2.1 Auswertung der Scores

In unserem Patientenkollektiv wurde durchschnittlich ein postoperativer DASH Score von 45 (23-87) angegeben. In der Gruppe der Pseudarthrosen lag der Durchschnittswert bei 49. Verglichen mit anderen Studien ist das Ergebnis deutlich höher, also schlechter, und nur bedingt zufriedenstellend einzuordnen. Quadlbauer et al. haben in ihrer retrospektiven Studie von 2018 ein ähnliches Patientenkollektiv, das mit der winkelstabilen Skaphoidplatte versorgt wurde. Hier wurde bei insgesamt 20 Patienten ein DASH Score im Mittel von 15 angegeben (Quadlbauer et al., 2019). Leixnering et al. gaben in ihrer Studie mit einem kleinerem Patientenkollektiv (N=11) einen etwas höheren DASH Score von 28 an (Leixnering et al., 2011). Beide liegen aber deutlich unter unseren erhobenen Daten.

Betrachtet man die sieben Patientenfälle, welche die höchsten DASH-Scores angaben genauer (57,5-87), gibt es folgende Überlegungen, die den relativ hohen Wert erklären könnten; Unter den hier genannten Patienten sind 2 Fälle einer Skaphoidpseudarthrose, ein Fall einer „delayed union“ und ein Fall einer Humpback-Deformität.

In einem weiteren Fall wurde die Skaphoidfraktur in der vorausgegangenen Röntgenuntersuchung für 6 Wochen übersehen und erst bei persistierenden Schmerzen im CT festgestellt. Zwei andere Fälle sind Skaphoidfrakturen des mittleren Drittels.

In 6 von diesen 7 Fällen kam es zur knöchernen Konsolidierung, bei einem Patienten, der zuvor bereits erfolglos mit der Herbertschraube versorgt wurde, blieb diese aus.

Bei bestehender Pseudarthrose oder „delayed union“ kann von einer erschwerten Ausgangslage gesprochen werden. Auch übersehene Frakturen können hier dazu gezählt werden. Die vergangene Zeit zwischen Trauma und operativer Versorgung mittels winkelstabiler Skaphoidplatte liegt in einer Zeitspanne von 76-837 Tagen. Es können sich z.B. arthrotische Veränderungen

des Karpus entwickelt haben, die die subjektive Zufriedenheit und Funktionalität bereits einschränken.

Wie Amadio et al. 1989 bereits erwähnte, ist ein gutes Konsolidierungsergebnis nicht immer mit einer guten postoperativen Funktion und subjektiver Zufriedenheit der Patienten gleichzusetzen (Asmus et al., 2016).

In den objektiven Scores, zu denen der nach Green and O'Brien modifizierte „Mayo Wrist Score“ und Score nach „Cooney und Bussey“ zählen, wurden zufriedenstellende Ergebnisse erzielt. Im Score nach „Green and O'Brien“ zeigt sich das Ergebnis von 76 Punkten vergleichbar mit der Studie von Quadlbauer et al. mit 80 Punkten. Im Folgenden wird zwischen den einzelnen Unterpunkten unterschieden.

6.2.2 Schmerz

Die Lokalisation der Schmerzsymptomatik in der Tabatière, sowie Schmerzprogredienz unter Belastung, v.a. in Dorsalextension wurde ebenso von vielen anderen Autoren beobachtet. Des Weiteren wurde in den meisten Studien die Schmerzsymptomatik nach Osteosynthese des Kahnbeins im Vergleich zu präoperativ als verringert angegeben (Mirrer et al., 2016, Kremling et al., 2001). Auch in unserem Patientenkollektiv reduzierte sich die präoperative Schmerzsymptomatik signifikant, erfasst mittels VAS, von durchschnittlich 5,4 ($\pm 1,6$) auf 0,4 ($\pm 0,8$) postoperativ. Zu erklären ist dies am ehesten durch die erfolgte interne Stabilisierung des Kahnbeins mittels Osteosynthese.

Postoperativ gaben unsere Patienten durchschnittlich eine sehr geringe Schmerzintensität von 0,4 in Ruhe und 3,8 unter Belastung an. In den meisten Studien wird jeweils nur der Wert in Ruhe verwendet. In der retrospektiven Studie von Sander et al., in der zwei Patientenkohorten mit kopfloser Kompressionsschraube oder Mini-Plattenosteosynthese (1.5 mm mini Condylar Plate Synthes GmbH, Oberdorf, Switzerland) versorgt wurden, wird ein Wert von 0,3 in Ruhe beschrieben. In weiteren Studien ist die Angabe von 1,9 in Ruhe zu finden (Sander et al., 2018, Quadlbauer et al., 2019).

6.2.3 Bewegungsumfang

Die postoperativen Messungen des Bewegungsumfanges unserer Patienten ergaben durchschnittlich 71% ($\pm 18\%$) im Vergleich zur Gegenseite. Ein Patient erreichte das volle Bewegungsausmaß im Vergleich zu Gegenseite (100%). Die geringste Beweglichkeit zeigte ein

Patient mit Skaphoidfraktur 6 Wochen postoperativ mit lediglich 35% im Vergleich zur Gegenseite. In der Bewegungsfreiheit von Flexion/Extension wurden durchschnittlich ein Ausmaß von 96° gemessen. Unsere Ergebnisse ähneln denen von Schormans et al. nur bedingt. In der prospektiven Studie wurden zwischen 2013 und 2016 insgesamt 21 Patienten mit instabilen Skaphoidfrakturen und bestehender „Nonunion“ mit der winkelstabilen Skaphoidplatte versorgt. Hier wurde postoperativ ein Bewegungsumfang von 106° erreicht (Schormans et al., 2018), in anderen Studien teilweise ein deutlich besseres Ergebnis mit bis zu 144° (Quadlbauer et al., 2019), 129°, 91% im Vergleich zur Gegenseite (Sander et al., 2018), oder 85% (Mirrer et al., 2016). Als Grund für diesen Unterschied zur Literatur können die Ergebnisse von 4 Patienten ursächlich sein, die als „Ausreißer“ nur weniger als 50% im Vergleich zur Gegenseite erreichten, 3 sogar weniger als 40% und bei geringer Fallzahl somit den Gesamtdurchschnitt deutlich reduzieren.

Nach Plattenentfernung verbesserte sich der Bewegungsumfang von 71% auf 87% im Vergleich zur Gegenseite auf ein gutes Ergebnis. Daraus kann auf eine eventuelle Steifigkeit durch das Prinzip der Winkelstabilität oder auch bei in situ belassenem Osteosynthesematerial geschlossen werden. In der Literatur waren keine Angaben zur ROM (*Range of Motion*) nach Metallentfernung zu finden. Eine frühelektive Materialentfernung sollte somit stets erwogen werden, wenn Probleme nach Operation mit Platte bestehen.

Das Vorliegen einer Pseudarthrose oder Fehlstellungen des Skaphoids (z.B. Humpback-Deformität) beeinflussten weder die funktionelle Beweglichkeit unserer Patienten noch die funktionelle Beweglichkeit der Patienten anderer Autoren (Preisser et al., 1998). In der Literatur wurde ein unterschiedliches Ergebnis der ROM abhängig von der Immobilisationsdauer angegeben. So berichtet Inoue et al. über einen geringeren Bewegungsumfang bei einer Ruhigstellung von mehr als 6 Wochen. Wird die Immobilisation von 6 Wochen dagegen nicht überschritten, zeigen sich verbesserte Werte von bis zu 93% im Vergleich zur Gegenseite (Inoue et al., 1997). In unserem Patientenkollektiv erfolgte postoperativ eine Immobilisation von Skaphoidfrakturen und Skaphoidpseudarthrosen für jeweils 6 Wochen, daher können wir anhand unserer Daten keinen Vergleich ziehen.

6.2.4 Griffstärke

Die Untersuchung der Griffstärke erbrachte mit 71% im Vergleich zur Gegenseite ein gutes Ergebnis. Nach Metallentfernung verbesserte sich dieses bis zu 90% im Vergleich zur Gegenseite, dies spricht für die richtige Indikation zur Metallentfernung. In der Literatur variieren die Ergebnisse stark: beschrieben werden Ergebnisse zwischen 41%-94% im Vergleich zur Gegenseite (Schormans et al., 2018, Leixnering et al., 2011). Eine Korrelation mit demographischen Daten oder der knöchernen Konsolidierung konnte weder von anderen Autoren noch bei uns nachgewiesen werden.

Zusammenfassend lassen sich die oben beschriebenen klinischen Ergebnisse in der bekannten Literatur als befriedigend einordnen. Nicht unbeachtet sollte jedoch der Bedarf eines ausreichend großen Patientenkollektivs sein, um die Validität der Ergebnisschemata nicht durch mögliche Ausreißer zu gefährden (Krimmer H, 2000 Nov;32(6)).

Weder das Alter noch das Geschlecht korrelierte mit dem klinischen Outcome.

6.3 Knöcherne Konsolidierung

Sowohl bei konservativ als auch operativ versorgten Kahnbeinfrakturen werden in der Literatur Heilungschancen von bis zu 100% beschrieben. Obwohl stabile Frakturen durch Immobilisation gute Heilungsraten erzielen, hat die operative Versorgung, zum Teil auch von stabilen Frakturen, einen großen Stellenwert (Sander et al., 2018). Nichtsdestotrotz stellt die Versorgung von komplexen Skaphoidfrakturen und Pseudarthrosen bis heute weiterhin eine Herausforderung dar.

In den letzten Jahrzehnten wurden zahlreiche Therapieoptionen entwickelt, um zum einen die Beschwerdesymptomatik zu lindern und die knöcherne Heilung herbeizuführen, zum anderen aber auch das Bestehen von karpalen Deformitäten und das Voranschreiten von arthrotischen Veränderungen zu verhindern. Aufgrund von fragmentaler Instabilität sowie zum Teil unzureichender Fixierung von Knochentransplantaten gelang die Frakturheilung in den bisherigen Behandlungskonzepten nicht immer gänzlich (Leixnering et al., 2011).

Seit Matti und Russe die Therapie von Kahnbeinbrüchen, vor allem des proximalen Pols, mit autologen Knochentransplantaten 1937 und 1960 revolutionierten, folgten viele weitere

Behandlungsmethoden. Kortikospongiöser Knochen wurde sowohl vom Beckenkamm als auch aus dem distalen Radius entnommen und brachte Heilungsraten von 72%-87% hervor (Kołodziej et al., 2006). Es folgten die Verwendung von K-Drähten sowie verschiedene Schraubenosteosynthesen. 1977 wurde von Ender et al. die erste Plattenosteosynthese des Kahnbeins entwickelt. Dabei handelte es sich um eine Kompressionsplatte mit Haken, der das abgesprengte Fragment „heranziehen“ sollte. Die Platte wurde zum Teil intraartikulär fixiert, was zu Knorpelschäden und einer notwendigen Metallentfernung führte. (Stanković et al., 1993, Leixnering et al., 2011). Als Goldstandard manifestierte sich kurze Zeit später (1984) die Doppelgewindeschraube von Herbert und Fisher und die Ender-Platte galt zunehmend als Notlösung für wiederholend erfolglose Therapieversuche.

Zahlreiche Studien veröffentlichten gute funktionelle Ergebnisse mit der kopflosen, intraossär versenkbaren und heute kanülierten Herbertschraube, die für die akute Frakturversorgung sowie in Kombination eines Knochenspans für Pseudarthrosen gut geeignet ist. Knöcherne Konsolidierungen variieren bis heute je nach Studienlage von 60% bis 100% (Parajuli et al., 2011, Oduwole et al., 2012).

Trotz der guten Studienlänge konnte nicht immer eine vollständige knöcherne Heilung nach Kahnbeintrauma erreicht werden und die verringerte interfragmentäre Stabilität gegen Rotations- und Scherbewegungen gibt Anlass, weitere Osteosyntheseverfahren zu untersuchen (Schormans et al., 2018).

2011 führte Ghoneim eine retrospektive Studie mit 14 Patienten mit Skaphoid nonunion durch. Mittels anteriorem Keiltransplantat und palmarer Plattenosteosynthese sowie vereinzelter Schrauben wurde eine knöcherne Durchbauung von 93% erreicht (Ghoneim, 2011). Dodds et al. beschreibt bei 20 Patienten mit Skaphoid nonunion unter Verwendung der winkelstabilen Skaphoidplatte mit einem Knochentransplantat aus dem distalen Radius eine Heilungsrate von 86% nach durchschnittlich 4,7 Monaten (Dodds et al., 2018). Jurkowitsch et al. veröffentlichte 2016 eine biomechanische Studie an synthetischen Knochenmodellen zur Rotationsstabilität des Skaphoids. Dabei wurde bei B2-Frakturen des Skaphoids die Verwendung einer Kompressionsschraube, die Verwendung zweier Kompressionsschrauben sowie das Verfahren der winkelstabilen Plattenosteosynthese gegenübergestellt und in Bezug auf Handhabung und knöcherner Heilung untereinander verglichen. Unter Drehkräften und Rotation sind die Platte sowie die Verwendung zweier Kompressionsschrauben hinsichtlich der Stabilität der alleinigen Kompressionsschraube überlegen. Außerdem wird die einfachere Handhabung der

Plattenosteosynthese im Vergleich zu zweier Kompressionsschrauben betont (Jurkowitsch et al., 2016a, Quadlbauer et al., 2019).

In unserer Arbeit wurde mittels winkelstabiler Plattenosteosynthese und teilweise spongiösem Knochentransplantat in 72% (N=18 Fällen) nach durchschnittlich 4,7 Monaten eine knöcherne Konsolidierung erreicht. Wie bereits oben beschrieben beträgt die Heilungsrate der nachuntersuchten Skaphoidfrakturen 84% (N=15), der Skaphoidpseudarthrosen 43% (N=3). In der Behandlung von Humpback-Deformitäten konnte in 4 von 5 Fällen eine knöcherne Durchbauung verzeichnet werden. In zwei Fällen ging eine erfolglose Therapie mittels Herbert-Schraube voraus, durch die winkelstabile Plattenversorgung konnte die knöcherne Heilung hergestellt werden. Nennenswert sind außerdem die 7 Fälle von Skaphoidfrakturen, die bereits mittels vorausgegangener konservativer Therapie versorgt bzw. initial gar nicht erst diagnostiziert wurden. Durch die Behandlung mit der Plattenosteosynthese konnte hier eine knöcherne Konsolidierung erreicht werden.

Auffällig an den oben genannten Ergebnissen ist, dass vor allem die knöcherne Durchbauung der Skaphoidpseudarthrosen in unserem Patientenkollektiv mit 43% von der Literatur abweicht. Generell werden Nonunions des Kahnbeins in der Literatur nur selten in Frakturen und Pseudarthrosen differenziert. Stankovic et al. berichteten 1993 über 42 Fälle von Skaphoidpseudarthrosen, die mittels der Ender Platte versorgt wurden und in 95% der Fälle eine knöcherne Konsolidierung erreichten (Stanković et al., 1993). Cohen et al. beschrieb 2013 eine 100% knöcherne Heilung bei 12 Patienten mit Skaphoidpseudarthrosen die mittels Spongiosatransplantat und kopfloser Doppelgewindeschraube versorgt wurden (Yarar-Schlickewei et al., 2019).

Es sei anzumerken, dass die Selektion der Fälle für diese Studie hauptsächlich Problemfälle bzw. Fälle mit vorausgegangener gescheiteter Therapie waren. In der genaueren Analyse der Fälle von Skaphoidpseudarthrosen konnte in 4 von 7 Fällen keine knöcherne Konsolidierung erreicht werden (57%).

Darunter fällt ein damals 23-jähriger männlicher Patient, der bei bestehender Skaphoidfraktur auswärts mittels Herbertschraube erfolglos versorgt wurde. Nach einem Jahr zeigte sich im CT eine inkorrekte Lage der Schraube und eine Pseudarthrose, die sich daraus entwickelt hatte. Der Patient war außerdem Raucher.

Ein weiterer Fall von ausbleibender knöcherner Heilung wurde bei einem damals 21-jährigen männlichen Patienten mit sich entwickelter Skaphoidpseudarthrose nach Sturz und operativer

Versorgung mittels Platte und Spongiosatransplantat aus dem distalen Radius beobachtet. Anzumerken sei hier, dass die Operation 203 Tage nach Sturztrauma erfolgte. Der Patient war ebenfalls Raucher.

Eine ebenfalls ausbleibende knöcherne Konsolidierung trat bei einer 80-jährigen weiblichen Patientin mit für zwei Monate übersehener Skaphoidfraktur auf. Radiologisch zeigte sich neben der Skaphoidpseudarthrose eine ausgerpögte Osteopenie.

Ebenfalls konnte bei einem 37-jährigen männlichen Patienten mit Morbus Preiser keine knöcherne Konsolidierung mittels Plattenosteosynthese und Spongiosatransplantat aus dem Beckenkamm erzielt werden.

Unsere durchschnittliche postoperative Dauer von 4,7 Monaten bis die knöcherne Konsolidierung eintrat, deckt sich mit den Angaben in der Literatur. Dodds et al. und Sander et al. geben ebenfalls 4,7 Monate an. Andere Autoren berichten über eine durchschnittliche Dauer von 4,4-5,1 Monaten.

6.3.1 Knochentransplantat

Kalb et al. beschreibt in der Übersichtsarbeit zur Rekonstruktion von Skaphoidpseudarthrosen eine Heilungsrate mit nicht-vaskularisierten Knochenspan aus dem Beckenkamm von 60% im eigenen Patientengut (Kalb et al., 2019). In dem erarbeiteten Algorithmus von Skaphoidpseudarthrosen gibt es keine Überlegenheit von vaskularisierten Knochentransplantaten gegenüber nicht-vaskularisierten Transplantaten bei Erstversorgung. Vorteil des nicht-vaskularisierten Knochentransplantates aus dem Beckenkamm oder distalen Radius ist die einfache Anwendbarkeit und die in der Literatur beschriebenen Ausheilungsraten von 60-100%. Dem gegenüber steht die Übersichtsarbeit von Ferguson et al., der eine leichte Überlegenheit von vaskularisierten Knochentransplantaten in der Heilungsrate gegenüber nicht-vaskularisierten (84% vs. 80%) beschreibt (Ferguson et al., 2016). Bei der Entnahmestelle des Knochens von nicht-vaskularisierten Transplantaten erklären Pinder et al., dass es keinen signifikanten Unterschied der Konsolidierungsrate bei Entnahme aus dem Beckenkamm oder distalen Radius gibt (Pinder et al., 2015). Dies deckt sich nur bedingt mit unseren Ergebnissen. Wir verwendeten in 11 Fällen ein Knochentransplantat aus dem gleichseitigen Beckenkamm und in 3 Fällen aus dem distalen Radius. Auch wir konnten keinen signifikanten Unterschied nachweisen, dies kann aber durch die geringe Fallzahl sowie die unterschiedliche Gruppengröße begründet werden.

Der Einsatz der winkelstabilen Plattenosteosynthese in Fällen von komplexeren Frakturen, wie mehrfragmentäre Frakturen oder anatomische Deformitäten, wie der Humpback-Deformität, erscheint uns durchaus sinnvoll. Einzelne Frakturalemente können mit einer der 6 Schrauben erfasst und durch die erhöhte Stabilität auch während Rotationsbewegungen in der korrekten Stellung gehalten werden. Humpback-Deformitäten profitieren von der anatomisch vorgeformten Platte, die palmar aufliegt und somit ein Verkippen nach palmar verhindert. Ein ähnlicher Vorteil weist die Platte bei der Versorgung von Skaphoidpseudarthrosen mit größeren Knochendefekten und Verwendung von Knochentransplantaten auf. Durch die palmar aufliegende Platte und Fixierung mittels winkelstabiler Schrauben, ist das Risiko einer Dislokation des Knochentransplantates als gering einzustufen. Nichts desto trotz muss kritisch angemerkt werden, dass insbesondere bei den schwierigen Fällen mit putativ schlechter Durchblutungssituation des (Rest-) Kahnbeins möglicherweise ein vaskularisierter Knochenspan zu besseren Heilungsraten geführt hätte. Wir gehen nicht davon aus, dass die Platte beziehungsweise die Form der Osteosynthese in diesen Fällen für die schlechten Ergebnisse verantwortlich ist. Diskutiert werden muss aber natürlich, ob der chirurgische Zugangsweg die Durchblutung möglicherweise zusätzlich verschlechtert.

Letztendlich decken sich unsere Aussagen mit denen anderer Autoren (Jurkowitsch et al., 2016b, Quadlbauer et al., 2019, Schormans et al., 2018, Leixnering et al., 2011).

Es vergingen durchschnittlich 12 Wochen (4-837 Tage) von Skaphoidtrauma bis zur operativen Versorgung. Der deutlich längere Zeitraum bis zur Versorgung der Skaphoidpseudarthrosen (23 Wochen) korrelierte nicht mit der Rate der knöchernen Durchbauung.

Gründe hierfür wurden schon mehrmals in der Literatur diskutiert.

Amadio et al. weist 1989 darauf hin, dass der zeitliche Abstand zwischen Frakturereignis und knöcherner Durchbauung einen signifikanten Einfluss auf das klinische Ergebnis hat. Wird eine knöcherne Durchbauung innerhalb des ersten Jahres nach Trauma erzielt, so kann auch von einem besseren klinischen Ergebnis ausgegangen werden. Knöcherne Konsolidierung allein ist für die erfolgreiche Heilung nach Skaphoidfrakturen nicht genügend aussagekräftig. Dabei ist es wichtiger, eine möglichst zeitnahe Heilung für ein zufriedenstellendes Ergebnis anzustreben (Amadio et al., 1989).

Im Gegensatz dazu berichtet Daly et al 1996, dass nicht die zeitliche Spanne zwischen Trauma und operativer Versorgung, sondern das Bestehen von degenerativen Veränderungen ausschlaggebend für das Ergebnis ist (Daly K., 1996, Nakamura et al., 1993).

Um letztendlich eine valide Aussage über Heilungsraten zu machen, wird ein größeres Patientenkollektiv benötigt. Um einen signifikanten Unterschied (Signifikanzniveau $p=0,05$) zwischen 88% und 91% knöcherner Konsolidierung festzustellen, bedarf es mehr als 3000 Patienten (Quadlbauer et al., 2019).

6.3.2 Plattenentfernung

Für Patienten mit eingeschränkter Beweglichkeit oder Impingement der Platte im radioscaphoidalen Gelenk empfehlen Dodds et al. die Metallentfernung nach 9-12 Monaten, vorausgesetzt, die knöcherne Durchbauung ist erfolgt (Dodds et al., 2018). Nach Sander et al. sollte die Plattenentfernung bereits nach 4 Monaten durchgeführt werden (Schormans et al., 2018, Sander et al., 2018). Bei der Versorgung mittels Herbertschraube wird dagegen von einer Metallentfernung abgeraten. Im Gegensatz dazu bringt die Plattenosteosynthese einen erneuten operativen Eingriff mit sich und birgt die üblichen Operationsrisiken wie Blutung und Infektion.

Nur in Fällen der ausbleibenden Heilung und Planung eines erneuten operativen Eingriffes oder Interaktionen mit angrenzenden Gelenken empfiehlt Herbert et al. die Schraubenentfernung (Herbert et al., 1992). Ähnlich wie auch andere Autoren, erachten wir die mittelfristige Entfernung der Skaphoidplatte als notwendig. Eine Sehnenruptur des M. flexor pollicis longus, wie es Sander et al. beschreiben, gilt es zu vermeiden. Um nach erfolgreicher knöcherner Durchbauung, keine Knorpelschäden und ggfs. arthrotische Veränderungen durch radiokarpale Reibung zu entwickeln, empfehlen wir die Metallentfernung. Nach unserer Auffassung sollte diese nach 6 Monaten, frühestens aber - bei gesichertem Durchbau – nach 3 Monaten, erfolgen. In unserem Patientenkollektiv erfolgte nach durchschnittlich 10,3 Monaten (163-606 Tage) die Metallentfernung. Dies liegt über dem von uns empfohlenen Zeitraum. Es sei jedoch anzumerken, dass mit zunehmender Erfahrung und länger laufender Arbeit, die Indikation zur Plattenentfernung zeitlich früher gestellt wurde.

6.4 Komplikationen

In der hier vorgestellten Arbeit war kein Materialversagen zu beobachten. Weder Plattenbrüche noch Schraubendurchwanderungen sind computertomographisch oder klinisch aufgefallen.

Im Gegensatz dazu beschreibt Esteban-Feliu et al. in der Studie von 2018 einen Fall mit Bruch der Kahnbeinplatte 4 Monate nach Implantation, sowie Schraubendurchwanderung des Kahnbeins in 3 Fällen (Esteban-Feliu et al., 2018). Muirhead et al. beendeten aufgrund von Metallversagen ihre Studie in Australien vorzeitig. Bei zwei Patienten wurden Brüche der Skaphoidplatte (APTUS® TriLock 1.5, Medartis, Basel, Switzerland) beobachtet, bei einem der Patienten ging diese mit einer Re-Fraktur einher (Muirhead et al., 2021).

6.5 Chancen und Limitationen der Arbeit

Bei der Beurteilung der vorliegenden Studie gilt es einige Faktoren kritisch zu betrachten. Ein limitierender Faktor ist das vergleichsweise geringe Patientenkollektiv von 25 Patienten sowie die inhomogenen Fallzahlen der Gruppe Skaphoidfraktur mit 18 Fällen und Skaphoidpseudarthrose mit 7 Fällen. Die Aussagekraft der Heilungsrate je nach knöcherner Ausgangslage, die nach unseren Ergebnissen bei Skaphoidfrakturen nicht signifikant höher als bei Skaphoidpseudarthrosen ist, ist daher in dieser Studie nur bedingt bewertbar und vielmehr als eine Tendenz zu interpretieren.

Ein weiterer Punkt ist die Indikationsstellung zur Verwendung eines Spongiosatransplantates. In 14 Fällen wurde eine Spongiosaplastik aus dem Beckenkamm oder distalen Radius durchgeführt. Es wurden keine vorausgehende Diagnostik z.B. mittels präoperativer Ausmessung des Frakturspaltes durchgeführt.

Außerdem sei anzumerken, dass die Operationen stets durch den gleichen Operateur erfolgten. Eine erhöhte Diversität der Operateure würde durch eine Standardisierung des Verfahrens mit einer erhöhten Aussagekraft bezüglich der Sensitivität der Ergebnisse einhergehen. Andererseits kann so die operative Fähigkeit und Erfahrung als Störeinfluss ausgeschlossen werden.

Ein Vorteil dieser Operationsmethode ist die vergleichsweise einfache Technik sowohl bei Plattenimplantation als auch Metallentfernung (Jurkowitsch et al., 2016a). Das operative Vorgehen ist schnell zu erlernen und bietet dem Operateur eine steile Lernkurve.

Zusätzlich aufgefallen ist das standardisierte Material. Von der winkelstabilen TriLock 1.5 Skaphoidplatte der Firma Medartis aus Basel, Schweiz gibt es bislang nur ein Modell mit 6 Schraubenlöchern. Mit einer Länge von 17 mm und der anatomisch vorgebogenen Form zur Korrektur von Humpback-Deformitäten wird der Einsatzrahmen der Platte begrenzt. Anatomische Variationen der Platte könnten eine Weiterentwicklung darstellen.

Ein weiterer Kritikpunkt stellt das Studiendesign dar. Diese monoinstitutionell durchgeführte Kohorten-Studie ist retrospektiv angelegt und wurde ohne Kontrollgruppe durchgeführt.

Ebenfalls zu erwähnen sei der Informationsverlust. Durch die zum Teil ausbleibende Rückmeldung der Patienten oder auch Absage auf die Anfrage einer Nachuntersuchung mussten 4 Patienten von den insgesamt 25 Patienten ausgeschlossen werden. In der Kontrolluntersuchung nach Metallentfernung nahmen nur noch 11 Patienten (52%) teil, sodass ein erneuter Datenverlust entstand. Die hier ausgewerteten Ergebnisse haben daher nur eine eingeschränkte Aussagekraft. Insgesamt zeigt sich der Rücklauf und die dafür gegebenen Gründe allerdings vergleichbar mit denen aus anderen Studien (Inoue et al., 1997, Jones et al., 2009).

7. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden die ersten klinischen Erfahrungen der Versorgung von Skaphoidfrakturen und Skaphoidpseudarthrosen mit einer winkelstabilen Skaphoidplatte untersucht und bewertet. Ziel dieser retrospektiv angelegten Studie war es, die in einer standardisierten Nachuntersuchung erfassten klinischen und radiologischen Ergebnisse in die bekannte Literatur einzuordnen. Trotz einer Vielzahl an bereits beschriebener Therapiemöglichkeiten bleibt die Behandlung und vor allem die knöchernen Durchbauung von Skaphoidfrakturen und Skaphoidpseudarthrosen eine Herausforderung. Mit bis zu 60% stellt die Kahnbeinfraktur den häufigsten Bruch der Handwurzelknochen dar. Eine knöchernen Heilung mit funktionellem Erhalt des Karpus und sowie Verhinderung der Ausbildung von degenerativen Veränderungen sind die Hauptziele der Kahnbein-Osteosynthese.

Als Goldstandard der Osteosyntheseverfahren gilt heute die kanülierte Kompressionsschraube nach Herbert, bei Bedarf mit Verwendung eines Knochentransplantates. In der Literatur werden knöchernen Heilungen zwischen 60-100% angegeben.

In Fällen von mehrfragmentären Frakturen oder speziell konfigurierte Pseudarthrosen kann mit der Doppelgewindeschraube bisweilen keine ausreichend stabile Versorgung erreicht werden.

Unser Patientenkollektiv rekrutierte sich aus der Abteilung für Hand- und Plastische Chirurgie der Ludwig-Maximilians-Universität München. 25 Patienten mit Skaphoidfrakturen- und Pseudarthrosen wurden mittels palmarer winkelstabiler Plattenosteosynthese versorgt, 14 davon mit einem Knochentransplantat aus dem Beckenkamm bzw. distalen Radius. Anhand standardisierter Nachuntersuchungen, an denen 21 Patienten teilnahmen, wurden die Ergebnisse der postoperativen subjektiven Zufriedenheit, der klinischen Funktionalität sowie der radiologischen Konsolidierung ermittelt. Der subjektiv ermittelte DASH Score ergab einen durchschnittlichen Wert von 45, der Bewegungsumfang im Vergleich zur Gegenseite 69% und die Griffkraft im Vergleich zu Gegenseite 71%. In 72% der 25 Fälle kam es zur knöchernen Durchbauung, durchschnittlich nach 4,7 Monaten. Um radiokarpalen Knorpelschäden sowie Sehnenverletzungen vorzubeugen erfolgte durchschnittlich nach 10,3 Monaten und vorheriger verifizierten knöchernen Heilung die operative Plattenentfernung. Neben dem subjektiven Befinden besserten sich nach Metallentfernung der Bewegungsumfang auf 87% und die Griffkraft auf 91% jeweils im Vergleich zur Gegenseite.

Die Vorteile einer plattenosteosynthetischen Versorgung von Skaphoidfrakturen bzw. Pseudarthrosen sind die technisch relativ einfache und sehr stabile Versorgung von komplexen mehrfragmentären Frakturen, Humpback-Deformitäten sowie bereits erfolglos osteosynthetisch versorgten Frakturen. Die erhöhte Stabilität des Skaphoids in Rotations- und Scherbewegungen sowie das geringe Risiko einer Dislokation von Knochentransplantaten stehen dem größeren Operationstrauma sowie der empfohlenen Metallentfernung und möglichen Knorpelschäden im Radiokarpalgelenk bei zu proximaler Einbringung gegenüber.

Die winkelstabile Skaphoidplatte kann neben einer Rückzugsoption in schwierigen Fällen auch als primäre Osteosynthese von Skaphoidfrakturen sinnvoll sein. Neben der Stabilität der Versorgung muss allerdings stets auch die Durchblutungssituation des Kahnbeins berücksichtigt werden. Hier können vaskularisierte Transplantate einen Lösungsansatz darstellen.

III Literaturverzeichnis

- AHLBORG, H. G., JOHNELL, O., TURNER, C. H., RANNEVIK, G. & KARLSSON, M. K. 2003. Bone loss and bone size after menopause. *N Engl J Med*, 349, 327-34.
- AMADIO, P. C., BERQUIST, T. H., SMITH, D. K., ILSTRUP, D. M., COONEY, W. P., 3RD & LINSCHIED, R. L. 1989. Scaphoid malunion. *J Hand Surg Am*, 14, 679-87.
- ARSALAN-WERNER, A., SAUERBIER, M. & MEHLING, I. M. 2016a. Current concepts for the treatment of acute scaphoid fractures. *Eur J Trauma Emerg Surg*, 42, 3-10.
- ARSALAN-WERNER, A., SAUERBIER, M. & MEHLING, I. M. 2016b. Skaphoidfraktur und Skaphoidpseudarthrose. *Trauma und Berufskrankheit*, 18, 376-385.
- ASMUS, A., LAUTENBACH, M., SCHACHER, B., KIM, S. & EISENSCHENK, A. 2016. [Scaphoid pseudarthrosis : Indications for avascular iliac crest or radius bone grafts]. *Orthopade*, 45, 951-965.
- AWMF-LEITLINIEN-REGISTER & 012-016, N. S3-Leitlinie Skaphoidfraktur.
- BEIRER, M., SERLY, J., VESTER, H., PFORRINGER, D., CRONLEIN, M., DEILER, S., BIBERTHALER, P. & KIRCHHOFF, C. 2016. The Munich Wrist Questionnaire (MWQ) - development and validation of a new patient-reported outcome measurement tool for wrist disorders. *BMC Musculoskelet Disord*, 17, 167.
- BEUTEL, F. K., WELK, E. & MARTINI, A. K. 1999. [Long-term outcome of partial prosthesis management of proximal scaphoid pseudarthroses with a comparison of different follow-up protocols]. *Handchir Mikrochir Plast Chir*, 31, 162-6; discussion 167-8.
- BICKERT, B., BAUMEISTER, S., SAUERBIER, M. & GERMANN, G. 2000. [Use of a cannulated 3.0 mm AO screw with an intraosseous support washer in osteosynthesis of the scaphoid: results and analysis of problems in 28 cases]. *Handchir Mikrochir Plast Chir*, 32, 277-82.
- BOHLER, L., TROJAN, E. & JAHNA, H. 1954. [Treatment of 734 cases of fresh fracture of the scaphoid bone of the hand]. *Wiederherstellungschir Traumatol*, 2, 86-111.
- BOND, M. R. & PILOWSKY, I. 1966. Subjective assessment of pain and its relationship to the administration of analgesics in patients with advanced cancer. *J Psychosom Res*, 10, 203-8.
- BRAUER, R. B., DIERKING, M. & WERBER, K. D. 1997. [Use of the Herbert screw with the freehand method for osteosynthesis of acute scaphoid fracture]. *Unfallchirurg*, 100, 776-81.
- BREITENSEHER, M. 2015. *Der MR-Trainer: Obere Extremität*, Stuttgart, Georg Thieme Verlag.
- BUNKER, T. D., MCNAMEE, P. B. & SCOTT, T. D. 1987. The Herbert screw for scaphoid fractures. A multicentre study. *J Bone Joint Surg Br*, 69, 631-4.

- CHANG, N. & GREWAL, R. 2020. Conservative treatment for fractures of the scaphoid. *Handchir Mikrochir Plast Chir*, 52, 399-403.
- COMPSON, J. P. & HEATLEY, F. W. 1993. Imaging the Position of a Screw within the Scaphoid: A clinical, anatomical and radiological study. *Journal of Hand Surgery*, 18, 716-724.
- COONEY, W. P., BUSSEY, R., DOBYNS, J. H. & LINSCHIED, R. L. 1987. Difficult wrist fractures. Perilunate fracture-dislocations of the wrist. *Clin Orthop Relat Res*, 136-47.
- DACOMBE, P. J., AMIRFEYZ, R. & DAVIS, T. 2016. Patient-Reported Outcome Measures for Hand and Wrist Trauma: Is There Sufficient Evidence of Reliability, Validity, and Responsiveness? *Hand (N Y)*, 11, 11-21.
- DALY K., G. P., MAGNUSSEN P. A., SIMONIS R. B. 1996. Established nonunion of the scaphoid treated by volar wedge grafting and Herbert screw fixation *The Journal of Bone and Joint Surgery. British volume*, 78-B, 530-534.
- DEMAAGD, R. L. & ENGBER, W. D. 1989. Retrograde Herbert screw fixation for treatment of proximal pole scaphoid nonunions. *J Hand Surg Am*, 14, 996-1003.
- DODDS, S. D., WILLIAMS, J. B., SEITER, M. & CHEN, C. 2018. Lessons learned from volar plate fixation of scaphoid fracture nonunions. *J Hand Surg Eur Vol*, 43, 57-65.
- DÖNICKE, T. & FRIEDEL, R. 2014. Skaphoidfraktur und Skaphoidpseudarthrose. In: TOWFIGH, H., HIERNER, R., LANGER, M. & FRIEDEL, R. (eds.) *Frakturen und Luxationen der Hand*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- DRÁČ, P., ČIŽMÁŘ, I., HOMZA, M., PRÁŠIL, V. & ZAPLETALOVÁ, J. 2014. [Scaphoid excision and four-corner fusion using the variable angle locking intercarpal fusion plate for treatment of post-traumatic degenerative changes of the wrist]. *Acta Chir Orthop Traumatol Cech*, 81, 135-9.
- EISENSCHENK, A., LAUTENBACH, M. & WEBER, U. 1999. [Scaphoid fracture and scaphoid pseudarthrosis]. *Orthopade*, 28, 883-90.
- ENDER, H. G. 1977. [A new method of treating traumatic cysts and pseudoarthrosis of the scaphoid (author's transl)]. *Unfallheilkunde*, 80, 509-13.
- ENNA, M., HOEPFNER, P. & WEISS, A. P. 2005. Scaphoid excision with four-corner fusion. *Hand Clin*, 21, 531-8.
- ESCHWEILER, J., ALLMENDINGER, F., STROMPS, J. P., NICK, H. E., PALLUA, N. & RADERMACHER, K. 2014. [Biomechanical modelling of the wrist joint]. *Z Orthop Unfall*, 152, 161-9.
- ESTEBAN-FELIU, I., BARRERA-OCHOA, S., VIDAL-TARRASON, N., MIR-SIMON, B., LLUCH, A. & MIR-BULLO, X. 2018. Volar Plate Fixation to Treat Scaphoid Nonunion: A Case Series With Minimum 3 Years of Follow-Up. *J Hand Surg Am*, 43, 569.e1-569.e8.

- FERGUSON, D. O., SHANBHAG, V., HEDLEY, H., REICHERT, I., LIPSCOMBE, S. & DAVIS, T. R. C. 2016. Scaphoid fracture non-union: a systematic review of surgical treatment using bone graft. *Journal of Hand Surgery (European Volume)*, 41, 492-500.
- FILAN, S. L. & HERBERT, T. J. 1996. Herbert screw fixation of scaphoid fractures. *J Bone Joint Surg Br*, 78, 519-29.
- FISHER, J. S., KAZAM, J. J., FUFA, D. & BARTOLOTTA, R. J. 2018. Radiologic evaluation of fracture healing. *Skeletal Radiology*, 48, 349-361.
- FLURY, A. & GÜNKEL, S. 2020. [Occult scaphoid fractures: current evidence and diagnostic algorithm]. *Unfallchirurg*, 123, 238-243.
- FODOR, S. G., CHRISTOPOULOS, G., LEHMKUHL, L., PROMMERSBERGER, K. J. & MÜHLENDORFER-FODOR, M. 2020. [Clinical and imaging methods in diagnostics of scaphoid fracture and non-union]. *Handchir Mikrochir Plast Chir*, 52, 382-391.
- FRIGG, R. 2001. Locking Compression Plate (LCP). An osteosynthesis plate based on the Dynamic Compression Plate and the Point Contact Fixator (PC-Fix). *Injury*, 32 Suppl 2, 63-6.
- GARCIA-ELIAS, M. 2013. Understanding wrist mechanics: a long and winding road. *J Wrist Surg*, 2, 5-12.
- GEISSLER, W. B., ADAMS, J. E., BINDRA, R. R., LANZINGER, W. D. & SLUTSKY, D. J. 2012. Scaphoid Fractures: What's Hot, What's Not. *JBJS*, 94, 169-181.
- GELBERMAN, R. H. & MENON, J. 1980. The vascularity of the scaphoid bone. *The Journal of Hand Surgery*, 5, 508-513.
- GHONEIM, A. 2011. The unstable nonunited scaphoid waist fracture: results of treatment by open reduction, anterior wedge grafting, and internal fixation by volar buttress plate. *J Hand Surg Am*, 36, 17-24.
- HAFERKAMP, H. 2002. Anmerkung zur Geschichte der Kahnbeinfraktur. *Aktuelle Traumatologie*, 190-197.
- HANDLEY, R. C. & POOLEY, J. 1991. The venous anatomy of the scaphoid. *J Anat*, 178, 115-8.
- HEGAZY, G., ALSHAL, E., ABDELAAL, M., ABDELAZIZ, M., MOAWAD, M., SAQR, Y. M., EL-SEBAEY, I., ABDELAZEEM, M. & EL-BARODY, M. 2020. Kirschner wire versus Herbert screw fixation for the treatment of unstable scaphoid waist fracture nonunion using corticocancellous iliac bone graft: randomized clinical trial. *Int Orthop*, 44, 2385-2393.
- HERBERT, T. J. & FISHER, W. E. 1984. Management of the fractured scaphoid using a new bone screw. *J Bone Joint Surg Br*, 66, 114-23.
- HERBERT, T. J., FISHER, W. E. & LEICESTER, A. W. 1992. The Herbert bone screw: a ten year perspective. *J Hand Surg Br*, 17, 415-9.

- HUDAK, P. L., AMADIO, P. C., BOMBARDIER, C., BEATON, D., COLE, D., DAVIS, A., HAWKER, G., KATZ, J. N., MAKELA, M., MARX, R. G., PUNNETT, L. & WRIGHT, J. 1996. Development of an upper extremity outcome measure: The DASH (disabilities of the arm, shoulder, and hand). *J Hand Surg Am*, 29, 602-608.
- HUENE, D. R. & HUENE, D. S. 1991. Treatment of nonunions of the scaphoid with the Ender compression blade plate system. *J Hand Surg Am*, 16, 913-22.
- INOUE, G., SHIONOYA, K. & KUWAHATA, Y. 1997. Herbert screw fixation for scaphoid nonunions. An analysis of factors influencing outcome. *Clin Orthop Relat Res*, 99-106.
- JOHNSTON, R. B., SEILER, J. G., MILLER, E. J. & DRVARIC, D. M. 1995. The intrinsic and extrinsic ligaments of the wrist. A correlation of collagen typing and histologic appearance. *J Hand Surg Br*, 20, 750-4.
- JONES, D. B. J., BÜRGER, H., BISHOP, A. T. & SHIN, A. Y. 2009. Treatment of Scaphoid Waist Nonunions with an Avascular Proximal Pole and Carpal Collapse: Surgical Technique. *JBJS*, 91, 169-183.
- JORGSHOLM, P., OSSOWSKI, D., THOMSEN, N. & BJORKMAN, A. 2020. Epidemiology of scaphoid fractures and non-unions: A systematic review. *Handchir Mikrochir Plast Chir*, 52, 374-381.
- JURKOWITSCH, J., DALL'ARA, E., QUADLBAUER, S., PEZZEI, C., JUNG, I., PAHR, D. & LEIXNERING, M. 2016a. Rotational stability in screw-fixed scaphoid fractures compared to plate-fixed scaphoid fractures. *Arch Orthop Trauma Surg*, 136, 1623-1628.
- JURKOWITSCH, J., DALL'ARA, E., QUADLBAUER, S., PEZZEI, C., JUNG, I., PAHR, D., LEIXNERING, M. J. A. O. O. & SURGERY, T. 2016b. Rotational stability in screw-fixed scaphoid fractures compared to plate-fixed scaphoid fractures. 136, 1623-1628.
- KALB, K. H., LANGER, M., WINDOLF, J., VAN SCHOONHOVEN, J. & PILLUKAT, T. 2019. [Scaphoid pseudarthrosis : Complex reconstruction using vascularized bone grafts]. *Unfallchirurg*, 122, 200-210.
- KARLE, B., MAYER, B., KITZINGER, H. B., FROHNER, S., SCHMITT, R. & KRIMMER, H. 2005. [Scaphoid fractures--operative or conservative treatment? A CT-based classification]. *Handchir Mikrochir Plast Chir*, 37, 260-6.
- KOŁODZIEJ, R. K., BLACHA, J., BOGACZ, A. & MAZURKIEWICZ, T. 2006. Long-term outcome of scaphoid nonunion treated by the Matti-Russe operation. *Ortop Traumatol Rehabil*, 8, 507-12.
- KREMLING, E., VAN SCHOONHOVEN, J., KRIMMER, H. & LANZ, U. 2001. Dorsale Verschraubung und Spongiosaplastik bei Skaphoidpseudarthrosen im proximalen Drittel. *Operative Orthopädie und Traumatologie*, 13, 17-26.
- KRIMMER, H. 2014. Teil- und Totalarthrodesen am Handgelenk. *Trauma und Berufskrankheit*, 16, 180-182.

- KRIMMER, H., KREMLING, E., VAN SCHOONHOVEN, J., PROMMERSBERGER, K. J. & HAHN, P. 1999. [Proximal scaphoid pseudarthrosis--reconstruction by dorsal bone screw and spongiosa transplantation]. *Handchir Mikrochir Plast Chir*, 31, 174-7.
- KRIMMER, H. & LANZ, U. 2000a. Der posttraumatische karpale KollapsVerlauf und Therapiekonzept. *Der Unfallchirurg*, 103, 260-266.
- KRIMMER, H., SCHMITT, R. & HERBERT, T. 2000b. Kahnbeinfrakturen – Diagnostik, Klassifikation und Therapie. *Der Unfallchirurg*, 103, 812-819.
- KRIMMER H, W. P., KALB K. 2000 Nov;32(6). Vergleichende Ergebnisbewertung am Handgelenk--mediokarpale Teilarthrodese und Totalarthrodese [Comparative outcome assessment of the wrist joint--mediocarpal partial arthrodesis and total arthrodesis]
- . *Handchir Mikrochir Plast Chir*. 2000 Nov;32(6):369-74., 32(6):369-74..
- LANGER, M. F., OECKENPÖHLER, S., BREITER, S., WÄHNERT, D. & WIESKÖTTER, B. 2016. Anatomie und Biomechanik des Kahnbeins. *Der Orthopäde*, 45, 926-937.
- LASTAYO, P. C., WINTERS, K. M. & HARDY, M. 2003. Fracture healing: bone healing, fracture management, and current concepts related to the hand. *J Hand Ther*, 16, 81-93.
- LEIXNERING, M., PEZZEI, C., WENINGER, P., MAYER, M., BOGNER, R., LEDERER, S., SCHAUER, J. & FIGL, M. 2011. First experiences with a new adjustable plate for osteosynthesis of scaphoid nonunions. *J Trauma*, 71, 933-8.
- LEUNG, Y. F., IP, S. P., CHEUK, C., SHEUNG, K. T. & WAI, Y. L. 2001. Trephine bone grafting technique for the treatment of scaphoid nonunion. *J Hand Surg Am*, 26, 893-900.
- LICHTMAN, D. M., SCHNEIDER, J. R., SWAFFORD, A. R. & MACK, G. R. 1981. Ulnar midcarpal instability—Clinical and laboratory analysis. *The Journal of Hand Surgery*, 6, 515-523.
- LIPPUNER, K., POPP, A. W., SCHWAB, P., GITLIN, M., SCHAUFLER, T., SENN, C. & PERRELET, R. 2011. Fracture hospitalizations between years 2000 and 2007 in Switzerland: a trend analysis. *Osteoporos Int*, 22, 2487-97.
- LOHMANN, H. & BUCK-GRAMCKO, D. 1987. [Alternative surgical procedure in pseudarthrosis of the scaphoid bone with a small proximal fragment]. *Handchir Mikrochir Plast Chir*, 19, 299-301.
- MANOLOPOULOS, K., STRACKE, H., LANG, U. & TINNEBERG, H.-R. 2003. Knochendichtemessung. *Gießener Gynäkologische Fortbildung 2003*. Springer.
- MARTINI, A. K. 1994. [Natural course in pseudarthrosis of the scaphoid]. *Orthopäde*, 23, 249-54.
- MARTINI, A. K. & SCHILTENWOLF, M. 1995. [Changes in the wrist joint in spontaneous course of scaphoid pseudarthrosis]. *Handchir Mikrochir Plast Chir*, 27, 201-7.

- MATHOULIN, C. L. & ARIANNI, M. 2018. Treatment of the scaphoid humpback deformity - is correction of the dorsal intercalated segment instability deformity critical? *J Hand Surg Eur Vol*, 43, 13-23.
- MCLAUGHLIN, H. 1954. Fracture of the carpal navicular (scaphoid) bone; some observations based on treatment by open reduction and internal fixation. *J Bone Joint Surg Am*, 36-a, 765-74.
- MEHLING, I. M. & SAUERBIER, M. 2013. [Scaphoid fractures and pseudarthrosis of the scaphoid]. *Z Orthop Unfall*, 151, 639-60.
- MEIER, R. 2019. [Treatment options for scaphoid nonunion advanced collapse]. *Unfallchirurg*, 122, 211-218.
- MIRREER, J., YEUNG, J. & SAPIENZA, A. 2016. Anatomic Locking Plate Fixation for Scaphoid Nonunion. *Case Rep Orthop*, 2016, 7374101.
- MOOG, P., CERNY, M. K., SCHMAUSS, D., BETZL, J., LÖW, S. & ERNE, H. 2021. Osteophytenbedingtes Impingement verringert die Beweglichkeit bei in „Humpback“-Deformität fehlverheilte Skaphoidrekonstruktion. *Der Unfallchirurg*, 124, 132-137.
- MORITOMO, H., TADA, K., YOSHIDA, T. & MASATOMI, T. 1999. The relationship between the site of nonunion of the scaphoid and scaphoid nonunion advanced collapse (SNAC). *J Bone Joint Surg Br*, 81, 871-6.
- MUIRHEAD, C., TALIA, A., FRAVAL, A., ROSS, A. & THAI, D. 2021. Early mobilization vs delayed mobilisation following the use of a volar locking plate with non-vascularized bone graft in scaphoid non-union. A multicentred randomised controlled-trial. *J Orthop*, 23, 203-207.
- NAKAMURA, R., HORII, E., WATANABE, K., TSUNODA, K. & MIURA, T. 1993. Scaphoid non-union: factors affecting the functional outcome of open reduction and wedge grafting with Herbert screw fixation. *J Hand Surg Br*, 18, 219-24.
- NAVARRO, A. 1935. *Anatomy and physiology of the carpus [in Spanish]*, Montevideo, Uruguay, imprenta Artistica de Dornaleche Hnos.
- ODUWOLE, K. O., CICHY, B., DILLON, J. P., WILSON, J. & O'BEIRNE, J. 2012. Acutrak versus Herbert screw fixation for scaphoid non-union and delayed union. *J Orthop Surg (Hong Kong)*, 20, 61-5.
- OEHMKE, M. J., PODRANSKI, T., KLAUS, R., KNOLLE, E., WEINDEL, S., REIN, S. & OEHMKE, H. J. 2009. The Blood Supply of the Scaphoid Bone. *Journal of Hand Surgery (European Volume)*, 34, 351-357.
- ORTHOPÄDIE, D. G. F. O. U. O. C. B. D. Ä. F. 2002. Leitlinien Skaphoidpseudarthrose. *Dt. Ärzte-Verlag*, 2002.

- PARAJULI, N. P., SHRESTHA, D., DHOJU, D., SHRESTHA, R. & SHARMA, V. 2011. Scaphoid fracture: functional outcome following fixation with Herbert Screw. *Kathmandu Univ Med J (KUMJ)*, 9, 267-73.
- PAULSEN F, W. J. 2010. *Sobotta Atlas der Anatomie des Menschen*, München, Urban&Fischer Verlag.
- PINDER, R. M., BRKLJAC, M., RIX, L., MUIR, L. & BREWSTER, M. 2015. Treatment of Scaphoid Nonunion: A Systematic Review of the Existing Evidence. *J Hand Surg Am*, 40, 1797-1805.e3.
- PREISSER, P., RUDOLF, K. D. & PARTECKE, B. D. 1998. [Surgical treatment of scaphoid pseudarthrosis--long term outcome with the Herbert screws]. *Handchir Mikrochir Plast Chir*, 30, 45-51.
- PROMMERSBERGER, K. J., MÜHLDOERFER-FODOR, M., KALB, K., SCHMITT, R. & VAN SCHOONHOVEN, J. 2014. [Scapholunate lesions]. *Unfallchirurg*, 117, 723-37; quiz 738-9.
- QUADLBAUER, S., PEZZEI, C., BEER, T., JURKOWITSCH, J., KEUCHEL, T., SCHLINTNER, C., SCHADEN, W., HAUSNER, T. & LEIXNERING, M. 2019. Treatment of scaphoid waist nonunion by one, two headless compression screws or plate with or without additional extracorporeal shockwave therapy. *Arch Orthop Trauma Surg*, 139, 281-293.
- REDEKER, J. & VOGT, P. M. 2011. [Carpal instability]. *Chirurg*, 82, 85-93; quiz 94.
- REEH, F. M., SACHSE, S., WEDEKIND, L., HOFMANN, G. O. & LENZ, M. 2022. Nonunions and Their Operative Treatment—A DRG-Based Epidemiological Analysis for the Years 2007-2019 in Germany. *Dtsch Arztebl Int*.
- ROMDHANE, L., CHIDGEY, L., MILLER, G. & DELL, P. 1990. Experimental investigation of the scaphoid strain during wrist motion. *J Biomech*, 23, 1277-84.
- RONALD, M. 1987. *Praxis der Frakturbehandlung*, Stuttgart, Gustav Fischer Verlag.
- RUDIGIER J, M. R. 2014. *Kurzgefasste Handchirurgie*, Stuttgart, Thieme.
- RUSSE, O. 1951. [Therapeutic results with cancellous bone filling in pseudoarthrosis of the navicular bone]. *Z Orthop Ihre Grenzgeb*, 81, 466-73.
- SANDER, A. L., SOMMER, K., SCHÄF, D., BRAUN, C., MARZI, I., POHLEMANN, T., FRANK, J. J. E. J. O. T. & SURGERY, E. 2018. Clinical outcome after alternative treatment of scaphoid fractures and nonunions. 44, 113-118.
- SCHADEL-HOPFNER, M., BICKERT, B., DUMONT, C., LAIER, P., MEIER, R., NUSCHE, A., PILLUKAT, T., ROSENTHAL, H., SCHMITT, R., SIEMERS, F., ZACH, A. & JUNG, M. 2016. [Acute scaphoid fractures : Management under consideration of the new S3-level guideline]. *Orthopade*, 45, 945-950.

- SCHADEL-HOPFNER, M., PROMMERSBERGER, K. J., EISENSCHENK, A. & WINDOLF, J. 2010. [Treatment of carpal fractures. Recommendations of the Hand Surgery Group of the German Trauma Society]. *Unfallchirurg*, 113, 741-54; quiz 755.
- SCHAEFER, M. & SIEBERT, H. R. 2002. [Fracture of the semilunar bone]. *Unfallchirurg*, 105, 540-52; quiz 52-3.
- SCHMIDT, J. & SCHNORR, W. 2003. Die Rolle der Spongiosaplastik und anderer augmentierender Verfahren. *OP-JOURNAL*, 19, 52-55.
- SCHMIDT, J. & WINKER, K. 2001. Die operative Behandlung von Skaphoidfrakturen *OP-Journal*, 17; 264-268.
- SCHORMANS, P. M. J., BRINK, P. R. G., POEZE, M. & HANNEMANN, P. F. W. 2018. Angular Stable Miniplate Fixation of Chronic Unstable Scaphoid Nonunion. *J Wrist Surg*, 7, 24-30.
- SCHÜNKE, M., SCHULTE, E., SCHUMACHER, U., VOLL, M. & WESKER, K. H. 2018. 1.29 Bewegungen in den Hand- und Fingergelenken. In: SCHÜNKE, M., SCHULTE, E., SCHUMACHER, U., VOLL, M. & WESKER, K. H. (eds.) *Prometheus LernAtlas - Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem*. 5., vollständig überarbeitete Auflage ed.: Georg Thieme Verlag.
- SCHÜNKE M, S. E., SCHUMACHER U ET AL. 2018. *Prometheus LernAtlas - Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem*. .
- SLUTSKY, D. J. 2013. Outcomes assessment in wrist surgery. *J Wrist Surg*, 2, 1-4.
- STANKOVIĆ, P. & BURCHHARDT, H. 1993. [Experience with the Ender hooked plate in the management of 42 scaphoid pseudarthroses]. *Handchir Mikrochir Plast Chir*, 25, 217-22.
- STRASSMAIR, M. & WILHELM, K. 2001. Entstehung einer Skaphoidpseudarthrose Diagnostische Unsicherheit und inkonsequente Therapie als Ursachen. *Deutsches Arzteblatt-Arztliche Mitteilungen-Ausgabe A*, 98, 2962-2963.
- SUKUL, D. M., JOHANNES, E. J. & MARTI, R. K. 1990. Corticocancellous grafting and an AO/ASIF lag screw for nonunion of the scaphoid. A retrospective analysis. *J Bone Joint Surg Br*, 72, 835-8.
- TALEISNIK, J. 1976. The ligaments of the wrist. *J Hand Surg Am*, 1, 110-8.
- TAVAKOLIAN, P. A., ADAMS, N. S. & EDWARDS, S. G. 2021. Scaphoid Nonunion Volar Plating with Pure Nonvascularized Cancellous Autograft. *JBJs Essent Surg Tech*, 11.
- THURN, P. & BÜCHELER, E. 1979. *Einführung in die Röntgendiagnostik: mit einem sonographischen Beitrag*, Thieme.
- TJ, H. & WE, F. 1984. Management of the fractured scaphoid using a new bone screw. 66-B, 114-123.

- TOWFIGH, H., HIERNER, R., LANGNER, M., FRIEDEL, R., 2011. Handchirurgie. 2. Auflage. Berlin/Heidelberg: Springer.
- WAGNER, M. 2003. General principles for the clinical use of the LCP. *Injury*, 34 Suppl 2, B31-42.
- WAGNER, M. 2010. [Advantages and disadvantages of locked plating]. *Orthopade*, 39, 149-59.
- WINCKLER, S. & BRUG, E. 1991. Frakturen der Handwurzelknochen unter besonderer Berücksichtigung der Kahnbeinfraktur. *Chir Praxis*, 43, 493-506.
- WU, F., NG, C. Y. & HAYTON, M. 2019. The Authors' Technique for Volar Plating of Scaphoid Nonunion. *Hand Clin*, 35, 281-286.
- YARAR-SCHLICKWEI, S., FROSCH, K. H. & SCHLICKWEI, C. 2019. [Scaphoid pseudarthrosis without circulatory disorder : Management and standard procedure for primary treatment]. *Unfallchirurg*, 122, 191-199.

IV. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Artikulierende Gelenkflächen des proximalen Handgelenks einer rechten Hand (Articulatio radiocarpalis) (Schünke M, 2018)	13
Abbildung 2: Darstellung des Handskeletts aus Robert Janker, Röntgenbilder-Atlas der normierten Aufnahmen Röntgenaufnahme-technik Teil II, 8. Auflage, 1974, Verlag Johann Ambrosius Barth: 1) Radius; 2) Ulna; 3) Processus styloideus radii; 4) Processus styloideus ulnae; 5) Caput Ulnae; 6) Gegend des Discus articularis; 7) Articulatio radiocarpea; 8) Os scaphoideum; 9) Os lunatum; 10) Os triquetrum; 11) Os pisiforme; 12) Os trapezium; 13) Os trapezoideum; 14) Os capitatum; 15) Os hamatum; 16) Hamulus ossis hamati; 17) Articulatio intercarpea; 18) Articulatio carpometacarpea; 19-23) Ossa metacarpalia I bis V; 24-28) Basis der Ossa metacarpalia I bis V; 29-33) Capita der Ossa metacarpalia I-V; 34) Ossa sesamoidea; 35) Grenze des Daumenballens	14
Abbildung 3: Intrinsischer Bandapparat (Johnston et al., 1995).....	16
Abbildung 4: Extrinsischer Bandapparat (Johnston et al., 1995).....	17
Abbildung 5: Blutversorgung des Kahnbeins. Links: Ansicht von dorsal. Rechts: Ansicht von palmar (Langer et al., 2016)	18
Abbildung 6: a-d: Verschiedene Modellansichten der rechten Handwurzel: a Reihenmodell, b Reihen-Säulenmodell, c Säulenmodell, d Ringmodell. Nach Eschweiler J. et al., Biomechanische Modellierung der Handwurzel, Z Orthop Unfall. 2014 Apr;152(2):161-9... 19	19
Abbildung 7: Sturz auf die dorsalextendierte Hand. Modell nach Herbert 1990	22
Abbildung 8: Modifizierte Klassifikation der Skaphoidfraktur nach Krimmer/Herbert 2000: 23	23
Abbildung 9: Traumatologie der Skaphoidfrakturen.	26
Abbildung 10: Klassifikation der Skaphoidpseudarthrose. (Mod. nach Herbert und Filan 1996)(Arsalan-Werner et al., 2016b)	27
Abbildung 11: Links: Prinzip der Herbertschraube (1. steiles, 2. Flaches Gewinde) bei Kahnbeinfrakturen. a) Vorgehen von peripher nach proximal bei großem proximalem Fragment. B) Vorgehen von proximal nach peripher bei kleinem proximalem Polfragment (Rudigier J, 2014) S. 120	33
Abbildung 12: Verschiedene Formen der Herbert-Schraube: v.l.n.r.: Original, kanüliert für 1,0-mm-Führungsdraht (HBS-System) und Mini-Schraube (Krimmer et al., 2000b)	34
Abbildung 13: Die winkelstabile Scaphoidplatte TriLock 1.5 von Medartis (Produktkatalog © 06.2012, Medartis AG, Switzerland.)	37
Abbildung 14: Beispiel einer mehrfragmentären Kahnbeinfraktur.....	41

Abbildung 15: Pseudarthrose des Kahnbeins nach gescheiterter Herbertschraubenosteosynthese.mit zystischen Knochendefekten bei Schraubenlockerung mit Fehllage, beginnende Arthrosezeichen (SNAC-wrist).....	41
Abbildung 16: Pseudarthrose des Kahnbeins mit Humpback-Deformität im CT.....	41
Abbildung 17: Implantation der winkelstabilen Skaphoidplatte über einen palmaren Zugangsweg.	44
Abbildung 18: Intraoperative Lagekontrolle im lateralen und anterior-posterioren Strahlengang mittels C-Bogen.	44
Abbildung 19: Prüfung der Kraft für den Grobgriff mit dem Jamar-Dynamometer (links) und für den Fingerkuppenspitze Griff mit dem Pinch-Gauge-Dynamometer (rechts) © Springer- Verlag Berlin Heidelberg 2011.	48
Abbildung 20: Bewegungen und Bewegungsachsen des proximalen und distalen Handgelenkes.	48
Abbildung 21: Geschlechterverteilung des Patientenguts.....	53
Abbildung 22: Prozentuale Altersverteilung zum Zeitpunkt des Skaphoid-Traumas.....	54
Abbildung 23: Prozentuale Verteilung des Unfallhergangs auf Sport, Verkehr, Arbeit Haushalt und Andere.	55
Abbildung 24: Betroffene Seite der Hand.....	56
Abbildung 25: Verteilung der Frakturlokalisierung analog der Einteilung Krimmer/Herbert...	57
Abbildung 26: Prozentuale Verteilung der Entnahmestelle eines Knochentransplantates.	59
Abbildung 27: Bewegungsumfang der betroffenen Hand im Vergleich zur Gegenseite.....	60
Abbildung 28: Griffstärke (angegeben in %) im Vergleich zur Gegenseite mit jeweiliger Patientenanzahl.....	61
Abbildung 29: Zeitliche Differenz (in Tagen) der Metallentfernung in den Gruppen Fraktur und Pseudarthrose (PSA) im Vergleich zur Gesamtzahl.	62
Abbildung 30: Vergleich des Bewegungsumfanges in ° der betroffenen Hand vor und nach ME bei nachuntersuchten Patienten (N=11).	65
Abbildung 31: Verteilung der knöchernen Durchbauung der gesamten Fallzahl, Skaphoidfrakturen und Skaphoidpseudarthrosen.....	67
Abbildung 32: Präoperatives Röntgenbild im anteriorposterior und lateralen Strahlengang von Patient Nr.2.....	70
Abbildung 33: Präoperative CT-Aufnahmen Handgelenk rechts mit einer mehrfragmentären Skaphoidfraktur (Pat. Nr.2).....	71

Abbildung 34: Intraoperative Stellungs-und Implantatkontrolle.	71
Abbildung 35: Computertomographie 6 Wochen postoperativ Handgelenk rechts (Patient Nr.2).	72
Abbildung 36: Klinisches Outcome: Beweglichkeit im Vergleich zur Gegenseite (Pat. Nr. 2).	72
Abbildung 37: Präoperative Röntgen-und CT Bilder: Humpback-Deformität mit 96° Skaphoid rechts (Patient Nr. 10)	73
Abbildung 38: Postoperatives Röntgenbild zur Implantat-und Stellungskontrolle (Patient Nr. 10).....	74
Abbildung 39: Beweglichkeit im Vergleich zur Gegenseite vor Metallentfernung (Patient Nr. 10).....	75
Abbildung 40: Beweglichkeit im Vergleich zur Gegenseite nach Metallentfernung (Patient Nr. 10)	75
Abbildung 41: Präoperative Röntgenbilder: Skaphoidpseudarthrose mit implantierter Herbertschraube rechts (Patient Nr. 17).....	76

V. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Modifizierte Klassifikation der Pseudarthrose nach Herbert und Filan 1996.....	28
Tabelle 2: Sukul Scaphoid Score	50
Tabelle 3: Durchschnittswerte der erhobenen Scores in Bezug auf das gesamte Patientengut sowie Skaphoidfrakturen bzw. Pseudarthrosen.....	63
Tabelle 4: Durchschnittswerte der erhobenen Scores im Vergleich vor und nach Metallentfernung (ME).	66

VI. Anhang

DASH-Fragebogen

<https://www.dahth.de/wp-content/uploads/2016/05/DASH-in-Deutsch-komplett.pdf>

Mayo Wrist Score

<https://medical-data-models.org/28730?lang=de&form-id=1>

Cooney and Bussey Score

<https://medical-data-models.org/28713>

VII. Danksagung

Mein herzlicher Dank gilt allen, die am Gelingen dieser Dissertation beteiligt waren. Dabei ist Herr Prof. Dr. med. univ. Riccardo Giunta zu nennen, dem ich für die Möglichkeit, meine Doktorarbeit in seiner Abteilung für Hand- und Plastische Chirurgie der LMU durchführen zu können, danken möchte.

Meinem Doktorvater, Herrn PD Dr. med. Elias Volkmer danke ich für die Überlassung des Themas sowie die uneingeschränkte Betreuung in der klinischen Durchführung und Präsentation der Ergebnisse. Vor allem aber bedanke ich mich für seine große Geduld und Motivation, diese Arbeit fertigzustellen.

Ebenfalls möchte ich mich bei Frau Dr. med. univ. Elisabeth Haas-Lützenberger und Frau Dr. med. Christine Hagen, für die freundliche Aufnahme in ihrem Team und ihre Ideen und Anregungen bedanken.

Ich danke meinen Eltern und meiner Schwester, denen diese Dissertation gewidmet ist. Danke für die uneingeschränkte Unterstützung und dauerhaften Rückhalt während meiner gesamten Ausbildung. Besonderer Dank gilt meinem Vater für sein konstantes liebevolles Fordern und Fördern.

Zu guter Letzt danke ich meinem Partner Cornelius Hartwig, der mich fortlaufend motiviert und unterstützt hat und viele Wochenenden für mich opferte. Danke für das uneingeschränkte Verständnis und die große Geduld. Ohne ihn würde es diese Dissertation nicht geben.

VIII. Eidesstattliche Erklärung

EIDESSTATTLICHE VERSICHERUNG

Dietl, Ann-Katrin

Ich erkläre hiermit an Eides statt,
dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Thema

Die ersten Erfahrungen mit der winkelstabilen Skaphoidplatte

selbständig verfasst, mich außer der angegebenen keiner weiteren Hilfsmittel bedient und alle Erkenntnisse, die aus dem Schrifttum ganz oder annähernd übernommen sind, als solche kenntlich gemacht und nach ihrer Herkunft unter Bezeichnung der Fundstelle einzeln nachgewiesen habe.

Ich erkläre des weiteren, dass die hier vorgelegte Dissertation nicht in gleicher oder in ähnlicher Form bei einer anderen Stelle zur Erlangung eines akademischen Grades eingereicht wurde.

München, 01.08.2023
Ort, Datum

Ann-Katrin Dietl
Unterschrift Doktorandin