

Diplomarbeit

**Elastisch stabile intramedulläre Nagelung (ESIN)
von Unterarmschaftfrakturen bei Jugendlichen
zwischen 12 und 18 Jahren**

eingereicht von

Raphael Andreas Marginter

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor(in) der gesamten Heilkunde
(Dr. med. univ.)**

an der

Medizinischen Universität Graz

ausgeführt am

Institut / Klinik für Kinder und Jugendchirurgie

unter der Anleitung von

Univ.-Ass. Dr. med. univ. Helmut Wegmann

Assoz.-Prof. Priv.-Doz. Dr. med. univ. Georg Singer

Graz, 20.04.2015

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe, andere als die angegebenen Quellen nicht verwendet habe und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 20.04.2015

Raphael Andreas Marginter eh

„Zwei Dinge sind zu unserer Arbeit nötig: Unermüdliche Ausdauer und die Bereitschaft, etwas, in das man viel Zeit und Arbeit gesteckt hat, wieder wegzuwerfen.“

Albert Einstein (1879-1955)

Danksagungen

Zu Beginn möchte ich meinen Eltern Monika und Wolfgang danken, da sie einen großen Anteil am Abschluss meines Studiums tragen, und ohne ihre Unterstützung ein solches nicht möglich gewesen wäre.

Des Weiteren danke ich meinen Betreuern Univ.-Ass. Dr. med. univ. Helmut Wegmann und Assoz.-Prof. Priv.-Doz. Dr. med. univ. Georg Singer für die ausgezeichnete Betreuung und schnelle Beantwortung bestehender Fragen. Sie haben mir mit ihrer Genauigkeit und ihrem Humor das Erstellen der Arbeit wesentlich erleichtert.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Freundin Christina bedanken, da sie immer ein offenes Ohr und eine stützende Schulter bereit hatte, um mir die Tage der Erstellung der Arbeit zu erleichtern. Zusätzlich gilt ihr mein besonderer Dank für das viele Korrekturlesen und die Hilfestellung bei Formulierungen.

Zusammenfassung

Einleitung

Die elastisch stabile intramedulläre Nagelung ist derzeit der Goldstandard in der operativen Versorgung von kindlichen Unterarmschaftbrüchen. Die elastische Marknagelung führt bei Kindern und Jugendlichen zu guten Ergebnissen mit Zunahme von Komplikationen über dem zehnten Lebensjahr. Bei erwachsenen Patienten werden Unterarmschaftfrakturen offen reponiert und mittels Plattenosteosynthese stabil versorgt um Pseudoarthrosen zu vermeiden. Bei älteren Kindern und Jugendlichen ist nicht eindeutig geklärt, welche Versorgungsmethode bevorzugt anzuwenden ist. Diese Arbeit versucht nun das Outcome von Patientinnen und Patienten ab dem 12 Lebensjahr mit Unterarmschaftfrakturen zu erfassen, welche mit elastischer stabiler intramedullärer Nagelung versorgt wurden, um daraus Rückschlüsse über die Anwendbarkeit der Technik in diesem Altersabschnitt zu ziehen.

Patientinnen, Patienten und Methoden

Insgesamt wurden 24 Patientinnen und Patienten mit Unterarmschaftfrakturen, welche zwischen 2004 und 2014 mittels elastisch stabiler intramedullärer Nagelung an der Universitätsklinik für Kinder- und Jugendchirurgie behandelt wurden, in die Studie eingeschlossen. Die Patientinnen und Patienten wurden eingeladen, an einer funktionellen Nachuntersuchung teilzunehmen. Hier wurden die Bewegungsumfänge des Ellenbogens, des Handgelenks und der Pro- und Supinationsbewegungen gemeinsam mit der Griffstärke und der Pro- und Supinationsstärke beidseits gemessen. Die erhobenen Werte wurden statistisch ausgewertet und miteinander verglichen. Zusätzlich wurden der Mayo Wrist und der Cooney Bussey Score erhoben. Anschließend wurden der DASH Score erhoben. Insgesamt erklärten sich 8 Patientinnen und Patienten zur Nachuntersuchung bereit, und 2 stimmten einer telefonischen Befragung zur Erhebung des DASH Scores zu.

Ergebnisse

Insgesamt erklärten sich 8 Patientinnen und Patienten zur Nachuntersuchung bereit, davon eine weibliche Patientin und 7 männliche Patienten. 2 männliche Patienten stimmten einer telefonischen Befragung zur Erhebung des Disability of Shoulder, Arm and Hand Scores zu. Das Durchschnittsalter zum Zeitpunkt der operativen Versorgung betrug 13,25 Jahre, bei einem Maximalalter von 16 und einem Minimalalter von 12 Jahren. Die durchschnittliche Dauer bis zur follow-up Untersuchung betrug 5 Jahre und 5,4 Monate. Die längste Zeitspanne bis zur Nachuntersuchung betrug 10 Jahre und 6 Monate und die kürzeste Zeit betrug 1 Jahr und 8 Monate. In allen untersuchten Bereichen konnte kein statistisch signifikanter Unterschied bezüglich der beobachteten Seite nachgewiesen werden. Die Ermittlung des Mayo Wrist Scores ergab zu 50% ein ausgezeichnetes Ergebnis und zu 50% ein gutes Ergebnis. Die Evaluation des Cooney Bussey Scores ergab ebenfalls zu 50% ein sehr gutes und zu 50% ein gutes Ergebnis. Insgesamt erreichten bei beiden Werten 2 Patienten den Spitzenwert von 100 Punkten. Der geringste erhobene Scorewert lag bei 80 Punkten. Der DASH Score ergab bei 80% der befragten Patientinnen und Patienten den Topwert von 0 Punkten. Der höchste Disability Score lag bei 4,3 Punkten.

Diskussion

Insgesamt kann aufgrund der Ergebnisse der Nachuntersuchungen von einem guten Langzeitoutcome nach elastisch stabiler Nagelung von Unterarmschaftfrakturen in diesem Patientinnen- und Patientenkollektiv gesprochen werden. Diese Methode zeichnet sich durch Minimalinvasivität aus und lässt einen kurzen postoperativen Krankenhausaufenthalt sowie frühe funktionelle Nachbehandlung zu. Bei korrekter Anwendung ist die elastische stabile intramedulläre Nagelung auch bei adoleszenten Patienten ein sicheres Verfahren.

Abstract

Introduction

The elastic stable intramedullary nailing method is currently the therapeutic gold standard for the surgical care of forearm shaft fractures in children and adolescents until the age of 10 years. Due to remodelling processes in young patients this relatively stable technique is applicable, in contrast to the surgical care of adults. Above the age of 18, plate osteosynthesis is recommended, because the forearm shaft is seen as a joint, and therefore has to be treated under absolute stable conditions. In older children and adolescents it is not distinct which treatment is most suitable. This survey evaluates the outcome of patients with forearm fractures between 12 and 18 years of age, treated with elastic stable intramedullary nailing, and draws conclusions from applying this technique at this age.

Patients and Methods

In total 24 patients with forearm fractures treated with elastic stable intramedullary nailing between 2004 and 2014 at the Department of Pediatric and Adolescent Surgery were included. The Patients were invited to participate in a functional follow-up examination. The range of motion of the elbow joint, the wrist joint and the pronation and supination of both sides were measured as well as the the grip strength and the strength of Pronation and Supination. Data were compared to the contralateral side. Additionally the Mayo Wrist Score, the Cooney Bussey Score, both ranging between 0 and 100 points, and the DASH score were assessed.

Results

In total 8 Patients, one female Patient and 7 male Patients, participated in the follow-up examination and in addition with 2 male Patients the DASH Score was performed by telephone. The mean age of the patients was 13.25 ranging from 12 to 18 years. The follow-up time ranged from 10 years and 6 months to 1 year and 8 months, with a mean of 5 years and 5.4 months. At follow-up, the range of motion of the elbow and wrist joints was not significantly different when compared

to the contralateral uninjured side. Likewise, the grip strength did not show any differences between the two measured sides. The Mayo Wrist Score yielded an excellent outcome in 50% and a good outcome in the other half of the patients, applying the Cooney Bussey Score, the outcome ranged between 100 and 80 points, with 50% of the Patients achieving a very good outcome and 50% a good outcome. 2 Patients achieved the peak score of 100 points in both scores. The lowest score was 80 points in both scores. All together 8 Patients participated in the follow-up examination, and additionally with 2 Patients the Disability Score was assessed by phone. In 80% of the patients the Disability of Shoulder, Arm and Hand Score was 0 points. The highest assessed score was 4.3 points.

Discussion

Considering the results of the follow-up examinations of the present study, elastic stable intramedullary nailing of forearm fractures provides good overall results for adolescent patients. The technique should be considered as an alternative to plateosteosynthesis in patients older than 10 years of age, especially respecting the minimal invasive manner, the shorter postoperative hospital stay and the earlier possible functional aftercare.

Inhaltsverzeichnis

<u>Eidesstattliche Erklärung</u>	<u>I</u>
<u>Danksagungen</u>	<u>III</u>
<u>Zusammenfassung</u>	<u>IV</u>
<u>Abstract</u>	<u>VII</u>
<u>Inhaltsverzeichnis</u>	<u>VIII</u>
<u>Glossar und Abkürzungen</u>	<u>XI</u>
<u>Abbildungsverzeichnis</u>	<u>XII</u>
<u>Tabellen und Graphikverzeichnis</u>	<u>XVII</u>

1. Allgemeiner Teil **1**

1.1.	Anatomie der Regiones antibrachii	1
1.1.1.	Speiche, Radius	1
1.1.1.1.	Ossifikation des Radius	2
1.1.2.	Elle, Ulna	2
1.1.2.1.	Ossifikation der Ulna	4
1.1.3.	Unterarmmuskulatur und operativer Zugang	5
1.1.3.1.	Ventrale Flexorengruppe	5
1.1.3.2.	Dorsale Extensorengruppe	5
1.1.3.3.	Brachioradiale Gruppe	6
1.1.3.4.	Operative Zugänge	6
1.1.3.4.1.	Operative Radiuszugänge	6
1.1.3.4.1.1.	Anteriorer Zugang nach Henry	6
1.1.3.4.1.2.	Posterolateraler Zugang nach Thompson	9
1.1.3.4.2.	Operative Ulnazugänge	11
1.1.3.4.3.	Zugänge zur intramedullären Nagelung	12
1.1.4.	Blutversorgung	13
1.1.4.1.	Arteria radialis	13
1.1.4.2.	Arteria ulnaris	14

1.1.4.3.	Arteria interossea communis	15
1.1.4.4.	Venöser Abfluss	15
1.1.5.	Innervation	16
1.1.5.1.	Nervus medianus	16
1.1.5.2.	Nervus radialis	16
1.1.5.3.	Nervus ulnaris	17
1.2.	Frakturbehandlung	17
1.2.1.	Frakturklassifikation	17
1.2.1.1.	Frakturlokalisierung	18
1.2.1.2.	Frakturmorphologie	19
1.2.2.	Frakturbehandlung und Stabilisierung	22
1.2.2.1.	Nicht operative Frakturbehandlung	22
1.2.2.1.1.	Heilung ohne Behandlung	22
1.2.2.1.2.	Konservative Frakturbehandlung	22
1.2.2.2.	Operative Frakturbehandlung	23
1.2.2.2.1.	Fixation mit relativer Stabilität	23
1.2.2.2.2.	Fixation mit absoluter Stabilität	26
1.2.2.2.3.	Frakturen des Unterarmeschaftes	28
1.2.3.	Frakturheilung und Blutversorgung	29
1.2.3.1.	Primäre Knochenheilung	29
1.2.3.2.	Blutversorgung bei primärer Heilung	30
1.2.3.3.	Sekundäre Knochenheilung	31
1.2.3.4.	Blutversorgung bei sekundärer Heilung	33
1.3.	Komplikationen der Frakturbehandlung	34
1.3.1.	Pseudoarthrosen	34
1.3.1.1.	Verzögerte Heilung	35
1.3.1.2.	Hypertrophe Pseudoarthrose	36
1.3.1.3.	Avaskuläre Pseudoarthrose	37
1.3.1.4.	Atrophische Pseudoarthrose	37
1.3.2.	Infektionen	38
1.3.2.1.	Akute Infektion	38
1.3.2.1.1.	Infektionsklassifikation akuter Infektionen	39
1.3.2.1.2.	Frühe Manifestationen einer Infektion	40
1.3.2.1.3.	Späte und verzögerte Manifestationen einer Infektion	40

1.3.2.2.	Chronische Infektion	41
1.3.2.2.1.	Infektionsklassifikation chronischen Infektionen	42
1.4	Die ESIN als operative Methode bei Kindern	42
1.4.1.	Indikation und Epidemiologie	44
1.4.2.	Operative Methode	44
1.4.3.	Komplikationen	45
1.4.4.	Technik und Biomechanik	47
1.4.5.	Postoperatives Outcome	48
1.4.6.	Ökonomische Aspekte	50
2.	Spezieller Teil	51
2.1.	Patientinnen, Patienten und Methoden	51
2.1.1.	Ethikkommission	51
2.1.2.	Retrospektive Datenanalyse und Kollektiv	51
2.1.3.	Patientinnen- und Patientenuntersuchung	52
2.2.	Ergebnisse	55
2.2.1.	Ergebnisse der retrospektiven Analyse	55
2.2.2.	Ergebnisse der Patientinnen- und Patientennachuntersuchung	59
2.3.	Diskussion	65
2.3.1.	Diskussion der retrospektiven Analyse	65
2.3.2.	Diskussion der Patientinnen- und Patientennachuntersuchung	66
3.	Literaturverzeichnis	69

Glossar und Abkürzungen

M.	Musculus
Mm.	Musculi
A.	Arteria
Aa.	Arteriae
V.	Vena
Vv.	Venae
N.	Nervus
R.	Ramus
et al.	et alii
AO	Arbeitsgruppe Osteosynthese
ESIN	elastisch stabile intramedulläre Nagelung
DASH	Disability of the Arm, Shoulder and Hand
%	Prozent

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1.) Radius und Ulna in der Ansicht von palmar und dorsal
Quelle: Andreas Prescher, Hans-Martin Schmidt. Arm, obere Gliedmaße, Membrum superius. In: J. Fanghänel, F. Pera, F. Anderhuber, R. Nitsch, Hrsg. Waldeyer Anatomie des Menschen. 17. Auflage. Berlin: De Gruyter; 2003: 665
- Abb. 2.) Lage des N. radialis superficialis bei einem Zugang nach Henry
Quelle: Dominik Heim, Shai Luria, Rami Mosheiff, Yoram Weil. Forearm shaft, Approach, Anterior approach (Henry) [Internet]. Version 2.0. 2013.07.09 [zitiert am 29.03.2015]. URL: https://www2.aofoundation.org/wps/portal!/ut/p/a1/jU_JDolwFPyaXukD4xJvPShxSYjBBXsxJZZCgm3zWiT69SjnxOY2k5nJDOU0o1yLe6WEr4wW9ZvzySVKAOJVCpsk2YfA0kUYH5cAsBt3hvMXA5v-l4cPYPArv6Zc1Sbvp56ZzkczRTnKQqLEoMFOLr23bk6AQNu2USBM YRp97Q8GBIUnW0fAGvSiJuAaVBIfQ22lcZ5mgyXU3g7ZcytPLx5X3uM!/dl5/d5/L2dJQSEvUUt3QS80SmIFL1o2XzJPMDBHSVMwS09PVDEwQVNFMUdWRjAwMFE1/?approach=Approach%20to%20the%20ulna&bone=Radius&classification=&contentUrl=%2Fsrc%2F22%2F04-Approaches%2F2012%2F22_A20-appr_to_ulna.jsp&implantstype=&method=&redfix_url=&segment=Shaft&showPage=approach&treatment
- Abb. 3.) Modifizierter Zugang nach Henry
Quelle: Dominik Heim, Shai Luria, Rami Mosheiff, Yoram Weil. Forearm shaft, Approach, Anterior approach (Henry) [Internet]. Version 2.0. 2013.07.09 [zitiert am 29.03.2015]. URL: https://www2.aofoundation.org/wps/portal!/ut/p/a1/jU_JDolwFPyaXukD4xJvPShxSYjBBXsxJZZCgm3zWiT69SjnxOY2k5nJDOU0o1yLe6WEr4wW9ZvzySVKAOJVCpsk2YfA0kUYH5cAsBt3hvMXA5v-l4cPYPArv6Zc1Sbvp56ZzkczRTnKQqLEoMFOLr23bk6AQNu2USBM YRp97Q8GBIUnW0fAGvSiJuAaVBIfQ22lcZ5mgyXU3g7ZcytPLx5X3uM!/dl5/d5/L2dJQSEvUUt3QS80SmIFL1o2XzJPMDBHSVMwS09PVDEwQVNFMUdWRjAwMFE1/?approach=Approach%20to%20the%20ulna&bone=Radius&classification=&contentUrl=%2Fsrc%2F22%2F04-Approaches%2F2012%2F22_A20-appr_to_ulna.jsp&implantstype=&method=&redfix_url=&segment=Shaft&showPage=approach&treatment
- Abb. 4.) Teilung des M. Pronator teres bei Zugang nach Thompson
Quelle: Dominik Heim, Shai Luria, Rami Mosheiff, Yoram Weil. Forearm shaft, Approach, Posterolateral approach (Thompson) [Internet]. Version 2.0. 2013.07.09 [zitiert am 29.03.2015]. URL: https://www2.aofoundation.org/wps/portal!/ut/p/a1/jU_JDolwFPyaXukD4xJvPShxSYjBBXsxJZZCgm3zWiT69SjnxOY2k5nJDOU0o1yLe6WEr4wW9ZvzySVKAOJVCpsk2YfA0kUYH5cAsBt3hvMXA5v-l4cPYPArv6Zc1Sbvp56ZzkczRTnKQqLEoMFOLr23bk6AQNu2USBM

YRp97Q8GBIUnW0fAGvSiJuAaVBlfQ22lcZ5mgyXU3g7ZcytPLx5X3
uM!/dl5/d5/L2dJQSEvUUt3QS80SmlFL1o2XzJPMDBHSVMwS09PV
DEwQVNFMUdWRjAwMFE1/?approach=Posterolateral%20approac
h%20(Thompson)&bone=Radius&classification=&contentUrl=%2Fsr
g%2F22%2F04-Approaches%2F2012%2F22_A30-dorsolateral-appr
Thompson.jsp&implantstype=&method=&redfix_url=&segment=Shaft
&showPage=approach&treatment=

- Abb. 5.) Zugang zur Nagelinsertion bei Versorgung des Radius
Quelle: Dominik Heim, Shai Luria, Rami Mosheiff, Yoram Weil.
Forearm shaft, Approach, Approaches to the radius for intramedullary
nailing [Internet]. Version 2.0. 2013.07.09 [zitiert am 29.03.2015].
URL:
https://www2.aofoundation.org/wps/portal!/ut/p/a1/jU_JDolwFPyaXukD4xJvPShxSYjBBXsxJZZCgm3zWiT69SjNXYOY2k5nJDOU0o1yLe6WEr4wW9ZvzySVKAOJVCpsk2YfA0kUYH5cAsBt3hvMXA5v-l4cPYPArv6Zc1Sbvp56ZzkczRTnKQqLEoMFOLr23bk6AQNu2USBM YRp97Q8GBIUnW0fAGvSiJuAaVBlfQ22lcZ5mgyXU3g7ZcytPLx5X3uM!/dl5/d5/L2dJQSEvUUt3QS80SmlFL1o2XzJPMDBHSVMwS09PVDEwQVNFMUdWRjAwMFE1/?approach=Approaches%20to%20the%20radius%20for%20intramedullary%20nailing&bone=Radius&classification=&contentUrl=%2Fsr%2F22%2F04-Approaches%2F2012%2F22_A70_Nailing_appr_radius.jsp&implants type=&method=&redfix_url=&segment=Shaft&showPage=approach&treatment=
- Abb. 6.) Orthopaedic Trauma Association-System zur Nummerncodierung
von Knochen
Quelle: James F. Kellam, Laurent Audigé. Frakturklassifikation. In:
Thomas P. Rüedi, Richard E. Buckley, Christopher G. Moran, Hrsg.
AO-Prinzipien des Frakturmanagements: Band 1- Prinzipien. 2.
Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2008: 70
- Abb. 7.) Segmentlokalisierung langer Röhrenknochen
Quelle: James F. Kellam, Laurent Audigé. Frakturklassifikation. In:
Thomas P. Rüedi, Richard E. Buckley, Christopher G. Moran, Hrsg.
AO-Prinzipien des Frakturmanagements: Band 1- Prinzipien. 2.
Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2008: 73
- Abb. 8.) Adaptierte Salter-Harris Klassifikation
Quelle: Theddy F. Slongo, James B. Hunter. Frakturen bei Kindern.
In: Thomas P. Rüedi, Richard E. Buckley, Christopher G. Moran,
Hrsg. AO-Prinzipien des Frakturmanagements: Band 1- Prinzipien. 2.
Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2008: 396
- Abb. 9.) AO-Codierung für Frakturen langer Röhrenknochen bei Kindern
Quelle: James F. Kellam, Laurent Audigé. Frakturklassifikation. In:
Thomas P. Rüedi, Richard E. Buckley, Christopher G. Moran, Hrsg.
AO-Prinzipien des Frakturmanagements: Band 1- Prinzipien. 2.
Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2008: 74

- Abb. 10.) Interfragmentäre Bewegung und Dehnung im Kallusgewebe im Zeitverlauf
Quelle: Keita Ito, Stephan M. Perren. Biologie und Biomechanik der Frakturheilung. In: Thomas P. Rüedi, Richard E. Buckley, Christopher G. Moran, Hrsg. AO- Prinzipien des Frakturmanagements. 2. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2008: 21
- Abb. 11.) Die entstehung intrafragmentärer Reibung und Friktion
Quelle: Keita Ito, Stephan M. Perren. Biologie und Biomechanik der Frakturheilung. In : Thomas P. Rüedi, Richard E. Buckley, Christopher G. Moran, Hrsg. AO- Prinzipien des Frakturmanagements. 2. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2008: 24
- Abb. 12.) Schematische Darstellung des Havers-Systems
Quelle: Keita Ito, Stephan M. Perren. Biologie und Biomechanik der Frakturheilung. In : Thomas P. Rüedi, Richard E. Buckley, Christopher G. Moran, Hrsg. AO- Prinzipien des Frakturmanagements. 2. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2008: 28
- Abb. 13.) Heilungsphase des weichen Kallus bei relativ stabiler Versorgung
Quelle: Keita Ito, Stephan M. Perren. Biologie und Biomechanik der Frakturheilung. In : Thomas P. Rüedi, Richard E. Buckley, Christopher G. Moran, Hrsg. AO- Prinzipien des Frakturmanagements. 2. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2008: 15
- Abb. 14.) Heilungsphase des osteonalen Umbaus bei relative stabiler Versorgung
Quelle: Keita Ito, Stephan M. Perren. Biologie und Biomechanik der Frakturheilung. In : Thomas P. Rüedi, Richard E. Buckley, Christopher G. Moran, Hrsg. AO- Prinzipien des Frakturmanagements. 2. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2008: 16
- Abb. 15.) Elefantenfußartige Veränderungen bei hypertropher Pseudoarthrose
Quelle: Michael D. McKee, Peter E. Ochsner. Nicht infizierte Pseudoarthrosen. In: Thomas P. Rüedi, Richard E. Buckley, Christopher G. Moran, Hrsg. AO- Prinzipien des Frakturmanagements. 2. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2008: 509
- Abb. 16.) Resorption der Fraktarenden bei atrophischer Pseudoarthrose
Quelle: Michael D. McKee, Peter E. Ochsner. Nicht infizierte Pseudoarthrosen. In: Thomas P. Rüedi, Richard E. Buckley, Christopher G. Moran, Hrsg. AO- Prinzipien des

Frakturmanagements. 2. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag;
2008: 509

Abb. 17.) Medulläre Osteomyelitis

Quelle: Eric E. Johnson, Richard E. Buckley. Chronische Infektion und infizierte Pseudoarthrose In: Thomas P. Rüedi, Richard E. Buckley, Christopher G. Moran, Hrsg. AO- Prinzipien des Frakturmanagements. 2. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2008: 544

Abb. 18.) Oberflächliche Osteomyelitis

Quelle: Eric E. Johnson, Richard E. Buckley. Chronische Infektion und infizierte Pseudoarthrose In: Thomas P. Rüedi, Richard E. Buckley, Christopher G. Moran, Hrsg. AO- Prinzipien des Frakturmanagements. 2. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2008: 544

Abb. 19.) Lokalisierte Osteomyelitis

Quelle: Eric E. Johnson, Richard E. Buckley. Chronische Infektion und infizierte Pseudoarthrose In: Thomas P. Rüedi, Richard E. Buckley, Christopher G. Moran, Hrsg. AO- Prinzipien des Frakturmanagements. 2. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2008: 544

Abb. 20.) Diffuse Osteomyelitis

Quelle: Eric E. Johnson, Richard E. Buckley. Chronische Infektion und infizierte Pseudoarthrose In: Thomas P. Rüedi, Richard E. Buckley, Christopher G. Moran, Hrsg. AO- Prinzipien des Frakturmanagements. 2. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2008: 544

Abb. 21.) Versorgung des Unterarmschaftes mit 2 elastischen Nägeln

Quelle: Theddy F. Slongo, James B. Hunter. Frakturen bei Kindern. In: Thomas P. Rüedi, Richard E. Buckley, Christopher G. Moran, Hrsg. AO- Prinzipien des Frakturmanagements. 2. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2008: 411

Abb. 22.) Postoperative Deviation um 13° des Radius bei einem 13-jährigem Jungen 7 Monate nach Operation

Abb. 23.) Heilungszeiten im Bezug auf verwendete Nagelstärken bei Radiusversorgung

Abb. 24.) Heilungszeiten im Bezug auf verwendete Nagelstärken bei Ulnaversorgung

Abb. 25.) Messungsergebnis des durchschnittlich möglichen Bewegungsumfanges im Ellenbogengelenk

Abb. 26.) Messungsergebnis des durchschnittlich möglichen Bewegungsumfanges im Handgelenk

Abb. 27.) Messungsergebnis der durchschnittlich möglichen Griffstärke

Abb. 28.) Verteilung der Mayo Wrist Scorergebnisse

Abb. 29.) Verteilung der Cooney Bussey Scorergebnisse

Tabellenverzeichnis

- Tabelle 1.) Übersicht über Scorekategorien
- Tabelle 2.) Übersicht über Komplikationsvorkommen im Patientinnen- und Patientenkollektiv
- Tabelle 3.) Übersicht über alle erhobenen Bewegungsumfangswerte
- Tabelle 4.) Übersicht über alle erhobenen Kraftwerte

1. Allgemeiner Teil

1.1. Anatomie der Regiones antebrachii

1.1.1. Speiche, Radius

Die knöchernen Strukturen des Unterarmes bestehen aus Ulna und Radius, beides sind Röhrenknochen mit Metaphyse, Epiphyse und Diaphyse. Der Radius liegt in Supination lateral im Unterarm. Der Knochen kann in ein proximales und distales Ende sowie den Schaft unterteilt werden. Die epiphysären Enden stellen den breitesten Teil des Knochens dar (1,2).

Der Kopf, der Hals und die Tuberositas für den Ansatz der Bizepssehne bilden das proximale Ende. Das Caput radii bildet eine konkave Gelenksfläche, welche mit dem Capitulum humeri artikuliert. Die Gelenksfläche umgebend liegt die Circumferentia articularis, eine ringförmige Kontaktfläche, welche mit der Incisura radialis ulnae artikuliert. Am distalen Ende des Halses, ulnarseitig aufsitzend, befindet sich die Tuberositas radii, welche dem Bizeps brachii als Ansatz dient (1,2).

Der Radiuschaft folgt einer nach lateral leicht konvexen Biegung. Seine Schnittfläche ist annähernd dreieckig, und lässt drei Kanten erkennen, einen Margo anterior, posterior, sowie interosseus. Im Bereich der distalen drei Viertel ist der Radius über eine interossäre Membran, die Membrana interossea, mit der Elle verbunden. Diese Membran findet ihren Ursprung am Margo interosseus. Die drei Kanten unterteilen weiters die Oberfläche der Speiche in drei Teile, eine palmare, dorsale und radiale Fläche (1).

Die distale Epiphyse, ähnelt im axialen Schnitt einem Viereck. An der radialen Seite überstehend befindet sich ein Fortsatz, der Processus styloideus. Der Radius bildet mit seinem distalen Ende die Verbindung zur Handwurzel. Die hierfür vorgesehene Gelenksfläche wird von einer Trennleiste, in eine ulnare und eine radiale Fläche getrennt. Das ulnare Areal ist viereckig und dient dem Os lunatum der Handwurzel als Gelenkspartner. Das radiale Areal ist in seiner Form dreieckig und setzt sich etwas auf den Processus styloideus fort. Dieses dient dem Os scaphoideum der Handwurzel als Gelenkspartner (1,2).

Auf der ulnaren Seite des distalen Endes befindet sich die anteroposterior konkave Gelenksfläche zum Kopf der Elle. Das Radiusende wird weiters an seiner dorsalen Seite von vielen Rinnen für die Extensorensehnen unterteilt. Besonders hervorzuheben ist hier das Tuberculum dorsale radii Lister. Diese Struktur dient der Sehne des M. extensor pollicis longus als Führung und trennt sie von der Sehne des M. extensor carpi radialis (1,2).

1.1.1.1. Ossifikation des Radius

Die Verknöcherung der Speiche geht von drei Zentren aus, eines im proximalen Teil, eines im distalen Teil und eines im Schaft. Im Schaftzentrum beginnt die Ossifikation bereits in der 8. Fetalwoche. In der distalen Epiphyse beginnt die Ossifikation am Ende des ersten postnatalen Jahres. Im proximalen Teil des Radius beginnt sie bei Mädchen im vierten Lebensjahr und bei Jungen im fünften. Der Abschluss der Ossifikation findet im proximalen Ende bei Mädchen im 14. Lebensjahr, und bei Jungen im 17. Lebensjahr statt. Das distale Ende benötigt hierfür etwas länger, bei Mädchen bis ins 17. und bei Jungen bis ins 19. Lebensjahr (1).

1.1.2 Elle, Ulna

Die Ulna liegt im supinierten Unterarm medial. Man kann diesen Knochen ähnlich dem Radius wieder in einen Schaft und zwei Enden unterteilen. Das proximale Ende weist im Bereich des Olecranon den größten Querschnitt auf. Nach distal verschmälert sich die Ulna immer weiter, bis schließlich wieder eine kleine Verdickung auftritt, der Ellenkopf. Die Ulna ist in ihrer proximalen Hälfte etwas nach radial konkav gebogen, wobei das distale Ende nach ulnar konkav gebogen ist (1).

Das proximale Ende ähnelt einem nach vorne konkavem großen Haken, die Incisura trochlearis, gebildet durch das Olecranon und den Processus coronoideus. Ersteres liegt weiter proximal und biegt, in Streckung, an seiner Spitze wie ein Schnabel in eine dafür vorgesehene Grube am Oberarm, die Fossa olecrani, ein. Die proximale Grenze des Olecranon kann bei gestrecktem Arm in einer Linie, genannt Hueter Linie, mit den Condylen des Humerus getastet

werden. In Beugung senkt sich dieser Punkt etwas und es bildet sich ein gedachtes Dreieck mit den Condylen, das Hueter Dreieck. Das Olecranon bildet zusammen mit dem Processus coronoideus eine konkave Fläche zur Artikulation mit der Trochlea humeri. Diese umschließt die Trochlea des Humerus, wobei Olecranon und Processus coronoideus die Trochlea förmlich umgreifen. Es handelt sich hierbei um ein Scharniergelenk, dessen Gelenksfläche von einer zarten Kante in einen medialen und einen lateralen Teil unterteilt werden. Diese Kante passt in eine kleine Rinne der Trochlea und dient als Führungsleiste. Getrennt von der Gelenksfläche zum Humerus durch eine weitere kleine Kante, liegt an der radialen Seite des Processus coronoideus eine Einbuchtung, die dem Kopf des Radius zu Gelenksbildung dient, die Incisura radialis. Distal zu dieser Einbuchtung ist ein Teil des Processus ausgespart, um für die Tuberositas radii bei Pronationsbewegungen den nötigen Platz zu schaffen. Distal auf dem Processus coronoideus liegend befindet sich die Tuberositas ulnae (1,3).

Der Schaft der Ulna ist im axialen Schnitt in den proximalen drei Vierteln dreieckig und nimmt im distalsten Viertel eine fast zylindrische Form an. Sie besitzt gleich dem Radius drei Kanten, Margo interosseus, anterior und posterior und ebenso drei Flächen, Facies palmaris, ulnaris und dorsalis. Der Margo interosseus ist nur in den mittleren zwei Vierteln eindeutig zu erkennen. Nach distal läuft der Margo interosseus aus und verschwindet schließlich. Der abgerundete Margo anterior beginnt medial der Tuberositas ulnae und läuft nach distal bis zum Processus styloideus des Ulnakopfes. Der Margo posterior läuft vom Olecranon ebenso zum Processus styloideus. Die Facies posterior wird in drei Teile unterteilt, einen proximalen, einen distalmedialen und einen distallateralen Teil (1). Die Kanten der Ulna sowie des Radius sind in der Abbildung 1 gut zu erkennen.

Das distale Ende der Ulna verbreitert sich wieder etwas und bildet das Caput ulnae mit seinem Processus styloideus ulnae. Das Caput ulnae bildet die Circumferentia articularis, welche dem Radius als Gelenkspartner dient. Die glatte distale Gelenksfläche des Kopfes ist von den Handwurzelknochen durch eine Knorpelscheibe getrennt. Die Spitze dieser Scheibe ist an einer rauen Fläche, zwischen Processus styloideus ulnae und Gelenksfläche befestigt (1,2).

Die Knorpelscheibe ist funktionell ein Teil des triangulären fibrocartilaginären Komplexes. Dieser erstreckt sich unter Einbeziehung der fibrösen Sehnenscheide des Musculus extensor carpi ulnaris bis zur Basis des Os metacarpale V.

Zusätzlich beteiligt an diesem Komplex sind das Ligamentum ulnolunatum, die Ligamenta radioulnare palmare und dorsale, das Ligamentum ulnotriquetrum sowie ulnokarpale Faserzüge. Gesamtheitlich dient der trianguläre fibrokartilaginäre Komplex der Druckübertragung und Flächenadaptation zwischen Mittelhand und Ulna. Zusätzlich begrenzt er die Radialduktion (4).

1.1.2.1. Ossifikation

Die Verknöcherung der Elle beginnt in vier Zentren, jeweils eines im Schaft und distalen Ende und zwei im Olecranon. Die Schaftossifikation beginnt in der 8. Fetalwoche. Im fünften Lebensjahr bei Mädchen und im sechsten Lebensjahr bei Jungen entsteht ein Verknöcherungszentrum im distalen Ende der Ulna, welches sich bis in den Processus styloideus ausbreitet. Die knöcherne Verbindung zum Schaft, der Epiphysenschluss, findet bei Mädchen im 17. Lebensjahr und bei Jungen im 18. Lebensjahr statt. Der distale Teil des Olecranon wird aus dem Zentrum des Schaftes verknöchert. Die Verknöcherung des restlichen Teiles wird von zwei Zentren aus vorangetrieben. Der Epiphysenschluss der proximalen Epiphyse erfolgt im 14. Lebensjahr bei Mädchen und im 16. Lebensjahr bei Jungen (1).

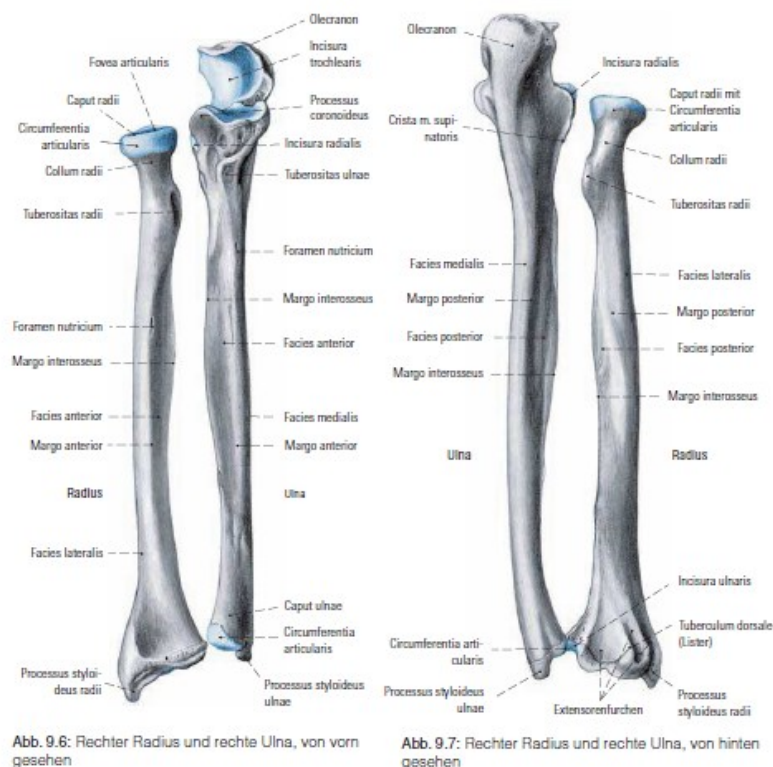


Abb. 1: Radius und Ulna Ansicht von palmar und dorsal

1.1.3. Unterarmmuskulatur und operativer Zugang

Im Gesamten finden sich am Unterarm 19 Muskeln. Distal findet ein Übergang der Muskeln zu feinen Sehnen statt, welche an Unterarm, Handwurzel, Mittelhandknochen und Fingern ansetzen. Diese Bauweise gestaltet das Handgelenk zart. Die Hand wird somit zum Greif- und Tastorgan, und nicht zum bloßen Kraftinstrument. Die Muskeln werden in drei Gruppen eingeteilt, eine ventrale Flexorengruppe, eine dorsale Extensorengruppe und eine radiale Muskelgruppe auch brachioradiale Gruppe genannt (5).

1.1.3.1. Ventrale Flexorengruppe

Die Flexoren an der palmaren Seite des Unterarms liegen in vier Schichten angeordnet. In der oberflächlichen Schicht beginnend finden sich der M. pronator teres, M. flexor carpi radialis, M. palmaris longus und der M. flexor carpi ulnaris. Darunter bildet der M. flexor digitorum superficialis die zweite Schicht. Gefolgt von der dritten Schicht bestehend aus M. flexor digitorum profundus und M. flexor pollicis longus. Als unterste Schicht findet sich der M. pronator quadratus (5).

1.1.3.2. Dorsale Extensorengruppe

Die Strecker am Unterarm können wie die Beuger in Schichten eingeteilt werden. Hier gibt es allerdings nur zwei Schichten, wobei die Oberflächliche eher gerade und die Tiefe eher schräg verläuft (5).

Die oberflächliche Schicht besteht aus dem M. extensor digitorum, dem M. extensor digiti minimi, der M. extensor carpi ulnaris und der M. anconaeus (5).

Die tiefe Schicht der Strecker am Unterarm besteht aus vier Muskeln, dem M. abductor pollicis longus, dem M. extensor pollicis brevis, dem M. extensor pollicis longus und dem M. extensor indicis (5).

1.1.3.3. Brachioradiale Gruppe

Während der Phylogenese verlagerten sich einige, ursprünglich dorsal gelegene, Extensoren nach ventral und sind somit zu Beugern im Ellenbogengelenk geworden. Zwei dieser Muskeln erhielten sich die streckende Wirkung im Handgelenk und können somit als Radialextensoren bezeichnet werden, es handelt sich hierbei um die Musculi extensor carpi radialis longus et brevis. Die ganze brachioradiale Gruppe als Radialextensoren zu bezeichnen, ist jedoch nicht zulässig. Die gesamte Gruppe der brachioradialen Muskeln besteht aus einer oberflächlichen und einer tiefen Schicht. Drei Muskeln zählen zu Ersterer, der M. brachioradialis, der M. extensor carpi radialis longus und der M. extensor carpi radialis brevis. Die tiefe Schicht bildet schließlich der M. supinator (5).

1.1.3.4 Operative Zugänge

Für die Chirurgin oder den Chirurgen ist die genaue Kenntnis der Anatomie Voraussetzung, um einen sicheren Zugangsweg zu den zu versorgenden Knochen zu finden. Je nach betroffenem Knochen gibt es am Unterarm verschiedene Zugangswege (6).

1.1.3.4.1. Operative Radiuszugänge

1.1.3.4.1.1. Anteriorer Zugang nach Henry

Der operative Zugang nach Henry führt zu einer guten Freilegung des Radius über seine gesamte Länge. Die Ausdehnung der Inzision hängt dabei von der benötigten freizulegenden Knochenoberfläche ab. Größere Inzisionen und besonders der Zugang zum proximalen Teil des Radius mittels der Methode nach Henry resultiert öfter in ausgeprägteren Narbenbildungen (6).

An der Haut gibt es bestimmte Landmarken, welche die Hautinzision markieren. Von proximal, im Bereich der Bizepssehne beginnend, verläuft der Schnitt weiter im mittleren Teil entlang des M. brachioradialis. Das distale Ende des Schnittes findet sich schließlich am Processus styloideus radii. Je nachdem welcher Bereich

des Radius freigelegt werden muss, ist der Schnitt in seiner Länge anzupassen (6).

Anschließend folgt die Präparation der oberflächlichen Muskelschicht. Diese gestaltet sich bei allen drei Teilbereichen gleich. Zwischen dem M. brachioradialis und dem M. flexor carpi radialis wird vorpräpariert und eingegangen. Die Arteria radialis liegt im mittleren Drittel in der Tiefe unter dem M. brachioradialis und weiter distal zwischen den Sehnen des M. brachioradialis und des M. flexor carpi radialis. Die Arterie wird von zwei Vv. comitantes begleitet, wodurch sie leichter zu identifizieren ist. Indem man einen Finger lateral der Arterie vorsichtig vorschiebt, kann man die abgehenden Äste der A. radialis leichter darstellen. Diese können ligiert werden um die Arterie nach medial zu mobilisieren. Der Ramus superficialis des Nervus radialis verläuft, wie in Abbildung 2 zu sehen, lateral der Arterie unter dem M. brachioradialis und sollte nach lateral verlagert werden (6).

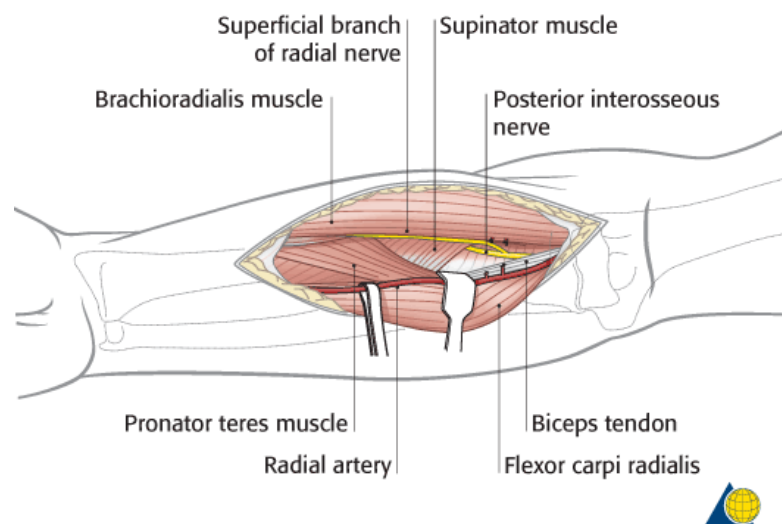


Abb. 2: Verlauf des R. superficialis n. radialis

Ist die oberflächliche Schicht in dieser Art präpariert worden, wird weiter zur tiefen Schicht vorgedrungen. Hier finden sich in der Art des Zugangsweges Unterschiede in den verschiedenen Dritteln des Radius. Im proximalen Drittel wird der Radius palmar, lateral und streckseitig vom M. supinator bedeckt. Der R. profundus n. radialis liegt im Muskelgewebe des M. supinator und kann durch volle Supination des Armes aus dem chirurgischen Arbeitsfeld verdrängt werden. Der Muskel wird dann entlang seiner am weitesten medialen Grenze inzidiert und

subperiostal von der Knochenoberfläche gelöst. Die abgelöste Fläche sollte dabei so klein wie möglich gehalten werden (6).

Beim Präparieren der tiefen Schichten im mittleren Drittel des Radius ist eine volle Pronation wichtig, da so der laterale Rand und der Ansatz des M. pronator teres frei liegt. Manchmal ist es nötig den Muskel teilweise vom Knochen abzulösen. Es sollte aber zumindest immer ein Teil des Ansatzes erhalten bleiben (6).

Tiefer liegend finden sich im distalen Teil noch der M. flexor pollicis longus und der M. pronator quadratus, welche bei Supination sichtbar werden. Die Freilegung des Knochens wird nun durch eventuelles Abheben des M. flexor pollicis longus und weiter distal des M. pronator quadratus vom Knochen abgeschlossen. Dieser Präparationsweg im distalen Drittel wird auch als klassischer Zugang nach Henry bezeichnet (6).

Der M. pronator quadratus wird oftmals lateral durchtrennt, und streng subperiostal nach medial vom Knochen abgehoben, um ihn anschließend wieder gut vernähen zu können. Es gibt verschiedene Ansichten, ob eine genaue Rekonstruktion des Muskels notwendig ist (7,8).

Ahsan et alii beschreiben in ihrer Arbeit 110 Patientinnen und Patienten nach offener Reposition und Plattenosteosynthese im distalen Bereich des Unterarmschaftes (7). Die Patientinnen und Patienten wurden in 2 Gruppen eingeteilt. Bei einer Gruppe wurde eine Rekonstruktion durchgeführt, bei der anderen wurde darauf verzichtet. Anschließend erfolgte eine Auswertung von Griffstärke, Bewegungsumfang und postoperativen Komplikationen. Ihre Ergebnisse zeigen keinen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den beiden Gruppen. Ahsan et al. empfehlen aber dennoch, die distalen Aspekte der Platte möglichst mit dem M. pronator quadratus zu decken (7).

Fan et al. zeigen in einer ähnlichen Arbeit allerdings ein anderes Ergebnis (8). Unterschiede in den zwei analysierten Gruppen bezüglich Griffstärke, Bewegungsumfang und Handgelenksschmerz fielen hier statistisch signifikant aus. Eine, zwei und sechs Wochen nach Operation zeigten sich diese Unterschiede. Nach sechs bis zwölf Monaten zeigte sich kein signifikanter Unterschied mehr. Die Autoren gehen folglich davon aus, dass eine Rekonstruktion des Muskels nötig ist, um möglichst frühe eine gute Funktionalität des Handgelenkes zu erreichen, und somit die Rehabilitationszeit zu verkürzen (8). Falls sich die Freilegung des Knochens nur auf den distalen Radius allein beschränkt, wird oft nach einem

modifizierten Zugang nach Henry eingegangen. Hier wird im Gegensatz zum klassischen Weg nicht zwischen A. radialis und M. brachioradialis vorgedrungen, sondern in dem Raum zwischen der Sehne des M. flexor carpi radialis und der A. radialis (6). Die modifizierte Methode findet, wie in Abbildung 3 dargestellt, ihren Zugang also medial der Arterie und nicht wie im klassischen Weg lateral. Der palmare Ast des N. medianus und die A. radialis sind bei diesem Zugang einer größeren Verletzungsgefahr ausgesetzt. Wenn die Arterie nach lateral und der M. flexor carpi radialis, sowie der Muskelbauch des M. flexor pollicis longus nach medial verschoben werden, kann man den M. pronator quadratus gut darstellen.

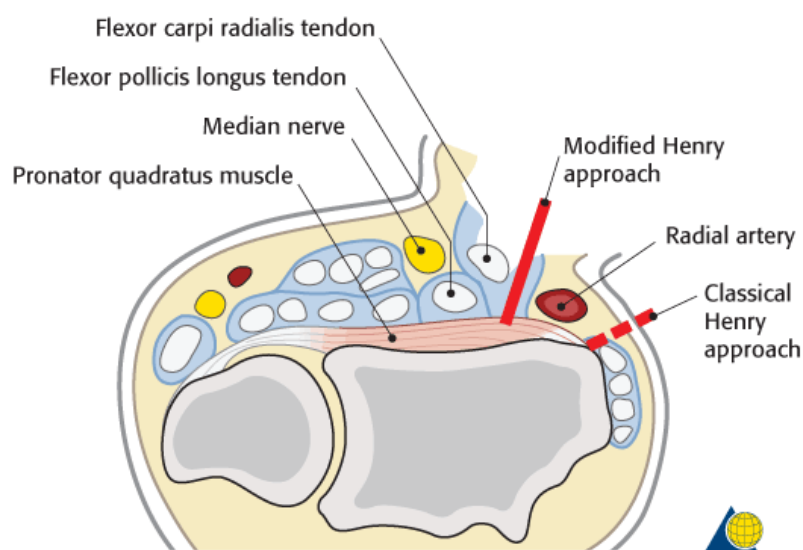


Abb. 3: Modifizierter Zugang nach Henry

Die Freilegung des Knochens wird abgeschlossen, indem man auch beim modifizierten Zugang den freigelegten Muskel an seinen lateralen und distalen Rändern inzidiert und einen schmalen lateralen Teil für spätere chirurgische Wiederherstellung belässt. Somit kann man den Muskelbauch vom anterioren Teil streng subperiostal des distalen Radius abheben. Abgesehen von einer Wiederbefestigung des M. pronator quadratus bleiben die vorderen tiefen Gewebsanteile anschließend nicht chirurgisch versorgt (6).

1.1.3.4.1.2. Posterolateral Zugang nach Thompson

Der posterolaterale Zugang nach Thompson bietet eine gute Darstellung des mittleren und distalen Drittels des Radius. Die Landmarken der Hautinzision sind

proximal der Epicondylus lateralis und distal das Tuberculum Listeri. Der Hautschnitt wird allerdings nicht direkt über dem Epicondylus lateralis geführt, sondern beginnt distal davon. Der R. superficialis des N. radialis und die Vena cephalica müssen im distalen Anteil des Zugangs geschont werden (9).

Die weitere Freilegung der Strukturen erfolgt im mittleren Drittel und kann falls nötig nach proximal beziehungsweise nach distal ausgedehnt werden. Der proximale Rand der queren Kreuzung des M. abductor pollicis longus über die dorsale Fläche des Radius markiert den distalen Beginn der Präparation. Nach proximal fortgesetzt wird sie zwischen dem M. extensor carpi radialis brevis, welcher nach lateral verschoben wird, und dem M. extensor digitorum communis, welcher nach medial verdrängt wird. Dadurch wird der darunterliegende M. supinator, sowie der Rest des M. abductor pollicis longus sichtbar. Durch Drehung des Armes in volle Supinationshaltung wird der Ansatz des M. supinator sichtbar und der R. profundus n. radialis rückt aus dem Dissektionsgebiet. Üblicherweise ist eine Anhebung des Supinators an seinem Radiusansatz nötig, um den darunterliegenden Schaftbereich freizulegen. Falls nötig sollte auch noch der M. pronator teres in einer Weise geteilt werden, welche eine spätere chirurgische Versorgung zulässt (9).

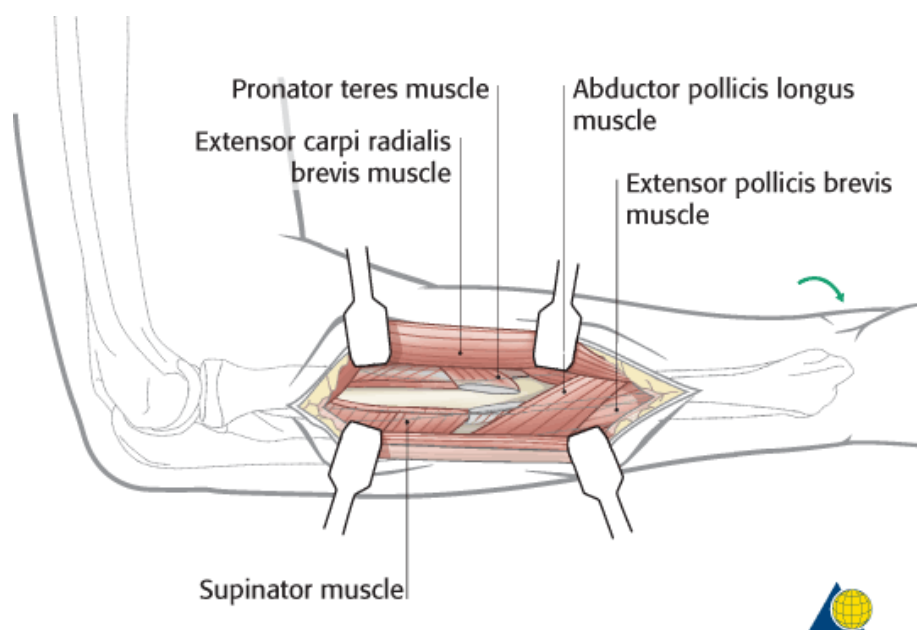


Abb. 4: Teilung des M. Pronator teres bei Zugang nach Thompson

Eine Erweiterung des dargestellten Bereiches nach proximal geht mit einer erhöhten Verletzungsgefahr des R. profundus n. radialis einher, weshalb dieser sorgsam im Verlauf des M. supinator präpariert werden muss. Um seine Position im Muskel zu verifizieren, kann das Muskelgewebe gefenstert werden. Oft ist der Nerv auch als Resistenz im Muskel tastbar. Nach Sicherung des Nervs kann der Muskel ulnarseitig vom Radius abgehoben werden. Dies sollte in maximaler Supinationsbewegung erfolgen, um den Nerv aus dem Operationsgebiet zu halten (9).

Um den Radius nach distal darzustellen, muss der Hautschnitt bis zum Tuberculum Listeri geführt werden. Der dargestellte M. abductor pollicis longus und der Muskulus extensor pollicis brevis werden unterminiert und angeschlungen. Im Bereich des Tuberculum Listeri wird die Sehne des M. extensor carpi radialis longus nach lateral weggehalten. An der medialen Seite des Tuberculum ist besonders auf die Sehnen des M. extensor pollicis longus zu achten. Eine Teilinzision des Retinaculum extensorum ist oft notwendig um genügend Raum zu schaffen (9).

1.1.3.4.2. Operative Ulnazugänge

Die Lagerung des Unterarmes, zur Versorgung einer Ulnafraktur, hängt von einer Frakturmitbeteiligung des Radius ab. Bei Monoverletzungen der Ulna wird der Arm entweder auf einem Zusatztisch über dem Brustkorb der Patientin oder des Patienten gelagert, oder der Oberarm ruht auf einem Nebentisch, während der Unterarm vertikal nach oben gehalten wird (10).

Bei Beteiligung des Radius an der Verletzung liegt der Arm flach auf einem Nebentisch, oder der Armstütze um den Zugang zum Radius zu ermöglichen. Der Unterarm wird dann, ähnlich der Methode bei singulären Frakturen der Ulna, vertikal nach oben gehalten, um zur Ulna zu gelangen. Je nach Verletzungsmuster wird zuerst der Radius oder die Ulna versorgt (10).

Die Hautinzision über der Ulna erfolgt im Intervall zwischen Unterarmbeuger- und -strecker-muskulatur. Dies entspricht einer gedachten Linie zwischen der Spitze des Olecranon und dem Processus styloideus ulnae. Bei starker Schwellung des Unterarmes, kann es schwierig sein, den Hautschnitt nach dem Eingriff chirurgisch zu versorgen. Unter diesen Umständen ist es besser, den Zugang über das

angrenzende Extensorenkompartiment zu planen, sodass die Inzision auf einem muskulären Bett ruht, um genügend Weichteildeckung für das Implantat zu gewährleisten (10).

Die weitere Präparation erfolgt im Raum zwischen dem M. flexor carpi ulnaris und dem M. extensor carpi ulnaris. Die Länge der Inzision kann bei Bedarf nach proximal und distal erweitert werden. Besonders distal ist Vorsicht geboten, da hier die dorsalen Äste des N. ulnaris geschont werden müssen, welche zum Rücken der Hand ziehen (10).

1.1.3.4.3. Zugänge zur intramedullären Nagelung

Beim ulnaren Zugang wird die Patientin oder der Patient in Rückenlage, mit ihrem oder seinem Arm in Pronationsstellung auf einem Nebentisch gelagert. Es erfolgt ein longitudinaler, ungefähr einen Zentimeter, langer Schnitt über der Spitze des Olecranon (11).

Der korrekte Nagelungszugang zum Radius hängt vom verwendeten Nageltyp ab. Der konventionellste Zugang ist jener an der radialen Seite des Tuberculum Listeri, zwischen dem zweiten und dritten Sehnenfach. Der Hautschnitt erfolgt über dem Tuberculum Listeri an dessen radialer Seite (12).

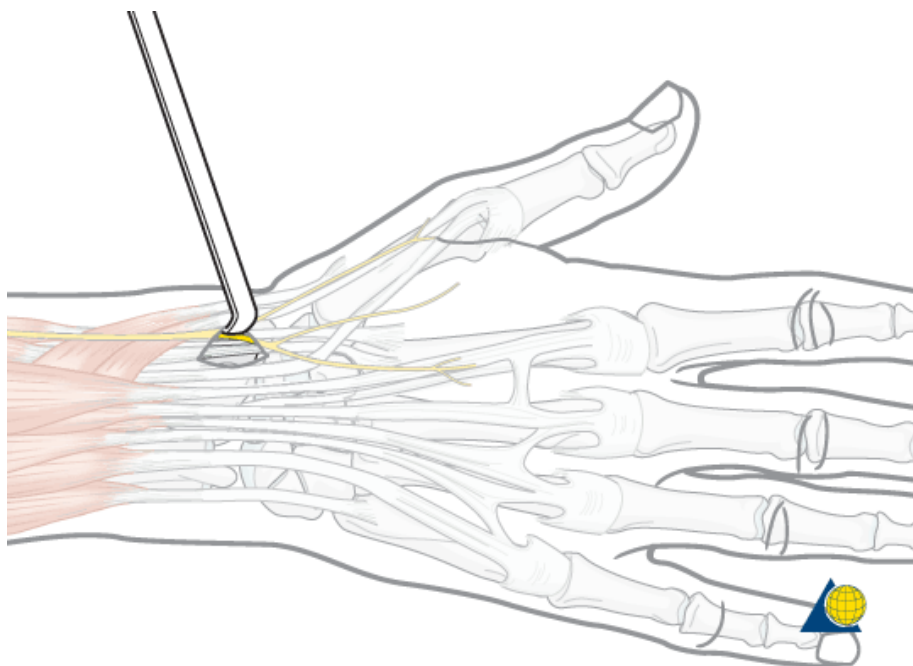


Abb. 5: Zugang zur Nagelinsertion bei Versorgung des Radius

Die weitere tiefe Präparation des subkutanen Gewebes sollte stumpf erfolgen, um Verletzungen der dorsalen Äste des R. superficialis n. radialis zu verhindern. Durch stumpfes Vorpräparieren durch beispielsweise das Öffnen einer Klemme, wird der Hautschnitt vertieft, bis der Knochen erreicht wird. Es ist unter Umständen nötig, das Retinaculum musculorum extensorum etwas zu inzidieren (12). An jeder Eintrittsstelle des Nagels in den Knochen, nahe dem Tuberculum Listeri, können Verletzungen der Sehnen des zweiten und dritten Faches auftreten, vor allem wenn der Nagel noch aus dem Knochen herausragt. Eine vollständige Teilung des Retinaculum musculorum extensorum kann mit einer Sehnenluxation enden, was auch als Bowstringing bekannt ist (12).

1.1.4. Blutversorgung

1.1.4.1. Arteria radialis

Die A. radialis besitzt einen geringeren Lumendurchmesser als die A. ulnaris, kann aber trotzdem als Fortsetzung der Oberarmarterie betrachtet werden. Sie beginnt etwa auf Höhe des Radiushalses und steigt lateral am Unterarm zum Handgelenk ab. Hier ist sie zwischen dem M. flexor carpi radialis medial und dem hervorspringenden Margo anterior des Radius zu tasten. Sie windet sich dann posterolateral um die Mittelhand, und liegt hierbei unter den Sehnen des M. abductor pollicis longus und Mm. extensor pollicis brevis et longus, bis sie zum proximalen Ende des ersten Metacarpalzwischenraumes gelangt. Hier gelangt sie zwischen den Köpfen des ersten M. interosseus dorsalis zur palmaren Seite um den tiefen Hohlhandbogen zu bilden. Am Unterarm liegt die A. radialis meist sehr oberflächlich, nur teilweise von einigen Muskeln bedeckt. Im proximalen Teil ist sie palmar vom Bauch des M. brachioradialis überlappt. Unter ihr liegen von proximal nach distal die Bizepssehne, der M. supinator, der distale Ansatz des M. pronator teres, der radiale Kopf des M. flexor digitorum superficialis, der M. flexor pollicis longus, der M. pronator quadratus und schließlich ganz distal am Unterarm nur noch der Radius, weshalb diese Stelle zum Tasten des Radiuspulses besonders geeignet ist. Die mediale Begrenzung des Arterienverlaufs bildet proximal der M. pronator teres und distal die Sehne des M. flexor carpi radialis. Die Begrenzung

lateral besteht proximal aus dem M. brachioradialis und distal aus dessen Sehne (13,14).

Das Versorgungsgebiet der A. radialis liegt entlang ihres Verlaufes und die Arterie anastomosiert mit anderen umliegenden Gefäßsystemen. Eine der Anastomosen ist die A. recurrens radialis welche, neben dem N. radialis zurück zum Oberarm laufend, in das Rete articulare cubiti einfließt. Die A. radialis trägt somit zur Versorgung des Gefäßnetzes am Ellenbogen bei. Im Bereich der Hand gibt die Speichenarterie weitere Äste ab, die unter anderem zum oberflächlichen Hohlhandbogen, zu den Mm. interossei, zum Daumen oder zum Zeigefinger laufen (13,14).

1.1.4.2. Arteria ulnaris

Die Ellenarterie ist der zweite und dickere Endast der A. brachialis. In ihrem Verlauf taucht das Gefäß unter den M. pronator teres und gelangt zwischen oberflächlichen und tiefen Beugern zur ulnaren Seite des Unterarms. Hier verläuft die Arterie zusammen mit dem N. ulnaris an der radialen Seite des M. flexor carpi ulnaris, welcher ihr als Leitmuskel dient, in Richtung der Handwurzel. Die distale Hälfte der A. ulnaris liegt sehr oberflächlich und wird nur von Haut und Muskelfaszien bedeckt. Sie zieht dann über das Retinaculum flexorum hinweg, aber noch unter der Palmaraponeurose bleibend, und bildet an der Hand den oberflächlichen Hohlhandbogen (13,14).

Während ihres Verlaufes in Richtung Hand gibt die A. ulnaris viele Gefäße direkt an die sie begleitenden Muskeln ab. Zusätzlich speist sie mit zwei zurücklaufenden Ästen, einem anterioren und einem posterioren Ast, das Rete articulare cubiti, welches somit von beiden Endästen der A. brachialis versorgt wird. Die gemeinsame Zwischenknochenarterie, die A. interossea communis, entspringt ebenso aus der Ellenarterie, etwas distal der Tuberositas radii. An der Hand bildet die A. ulnaris den bereits erwähnten oberflächlichen Hohlhandbogen, und gibt zusätzlich ein kleines Gefäß, den R. palmaris profundus, ab. Dieses trägt zur Versorgung des tiefen Hohlhandbogens bei. Zusätzlich entspringen aus der Ellenarterie noch Gefäße für die Finger und für das Rete carpale palmare et dorsale. Ein besonderer Ast ist noch zu erwähnen, die A. comitans nervi mediani. Gelegentlich erst aus der A. interossea anterior entspringend, begleitet sie als

zartes Gefäß den N. medianus. Sie kann als Rest einer ehemals großen Arterie angesehen werden. In manchen Fällen bleibt diese erhalten, woraufhin sie A. mediana genannt wird und die A. radialis ersetzt (13,14).

1.1.4.3. Arteria interossea communis

Dieses große aus der A. ulnaris entspringende Gefäß teilt sich sehr früh in eine A. interossea anterior, sowie eine A. interossea posterior (15).

Erstere verläuft der Membrana interossea aufliegend bis zum M. pronator quadratus, hier durchbohrt sie die Zwischenknochenmembran und speist das Rete carpale dorsale (14).

Die A. interossea posterior tritt sofort durch die Membrana interossea zur Streckseite des Unterarms. Dort angekommen durchbohrt sie den M. supinator, gibt die A. interossea recurrens ab und zieht weiter nach distal um ebenfalls im Rete carpale dorsale zu enden. Die entsprungene, rückläufige Arterie zieht lateral des Olecranon unter dem M. anconaeus zum Rete articulare cubiti (14).

1.1.4.4. Venöser Abfluss

Das venöse Blut des Unterarmes wird über zwei Systeme zum Herzen zurückgeleitet. Einerseits besteht ein oberflächlicher Ableitungsweg über die Venae superficiales, andererseits ein subfascial liegendes tiefes Netz, die Vv. profundae. Beide Systeme besitzen Venenklappen und stehen über Verbindungsgefäße, die Vv. perforantes, in Verbindung (14).

Die Vv. superficiales bildet sehr variable Gefäßnetze, welche sich epifascial befinden. Aus dem Rete venosum dorsale manus entwickeln sich am Unterarm zwei nennenswerte Venenstämme. Auf der ulnaren Seite nach proximal ziehend und am Oberarm in die V. brachialis mündend, liegt die V. basilica. An der radialen Seite des Unterarmes zieht die V. cephalica Richtung Ellenbeuge, um am Oberarm zwischen M. deltoideus und M. pectoralis major zum Trigonum deltoideopectorale zu gelangen. Nach Durchstoßung der Fascia clavipectoralis mündet sie in die V. axillaris. In der Ellenbeuge werden beide Stämme durch eine von radial distal nach ulnar proximal laufende V. mediana cubiti verbunden. Optional besteht noch eine V. mediana antebrachii. Sofern sie entwickelt ist, teilt

sie sich in der Ellenbeuge Y-förmig in eine V. mediana basilica, welche die V. mediana cubiti ersetzt, und eine V. mediana cephalica (14).

Die subfascial liegenden Vv. profundae begleiten ihre Arterien und teilen sich eine gemeinsame Gefäßscheide. Am Unterarm liegen diese tiefen Venen paarweise vor. Sie bilden untereinander zahlreiche Anastomosen, wodurch ein langmaschiges Netz entsteht (14).

1.1.4. Innervation

1.1.5.1 .Nervus medianus

Der N. medianus passiert in der Ellenbeuge den Medianustunnel im M. pronator teres und verläuft am Unterarm zwischen den Musculi flexor digitorum superficialis et profundus nach distal, um unter dem Retinaculum flexorum die Hohlhand zu erreichen. In drei Prozent der Fälle verläuft der Nerv nicht durch den Pronatorschlitz sondern perforiert das Caput humerale des Muskels. Bei zwei Prozent der Patientinnen und Patienten verläuft er unter dem Caput ulnare (15).

Zum Versorgungsgebiet des N. medianus zählen motorisch am Unterarm alle Beuger, mit Ausnahme des M. flexor carpi ulnaris, welcher dem N. ulnaris als Leitmuskel dient, und des ulnaren Teils des M. flexor digitorum profundus. Sensibel versorgt er die Haut über der Handwurzel, der Palma manus und der Beugefläche der dreieinhalb radialen Finger. Sein Autonomgebiet enthält die Haut der mittleren und distalen Phalanx von Digitus II und III (15).

1.1.5.2. Nervus radialis

Dieser Nerv des Armes gelangt zwischen M. brachioradialis und M. brachialis in die Ellenbeuge, in welcher er sich in seine beiden Endäste, den R. superficialis und den R. profundus, aufteilt. Ersterer verläuft radial der A. radialis, überdeckt vom M. brachioradialis, welcher ihm als Leitmuskel dient. Im distalen Drittel des Unterarmes wendet er sich unter dem M. brachioradialis zur Haut der Streckseite der Hand. Der R. profundus des N. radialis durchbohrt den M. supinator und gelangt so zur dorsalen Gruppe der Unterarmmuskeln (15). Das Versorgungsbereich des N. radialis am Unterarm beinhaltet motorisch alle radialen

und dorsalen Unterarmmuskeln. Sensibel Innerviert er die Streckseite des Unterarmes, sowie den radialen Handrücken und die radialen zweieinhalb Finger. Der N. radialis besitzt kein Autonomgebiet (15).

1.1.5.3. Nervus ulnaris

Der N. ulnaris liegt im Sulcus nervi ulnaris, hinter dem Epicondylus medialis. Zwischen den Köpfen des M. flexor carpi ulnaris gelangt er auf die Beugeseite des Unterarms, an der er ulnar der A. ulnaris unter genanntem Muskel bis zur Handwurzel zieht. Der Muskel dient ihm hier als Leitstruktur. Durch die Guyon'sche Loge gelangt er außerhalb des Carpaltunnels zur Hohlhand (15).

Alle Muskeln an der Beugeseite des Unterarms, welche nicht vom N. medianus innerviert sind zählen zu seinem Versorgungsgebiet. Sensibel innerviert er die Haut an der ulnaren Seite der Hand inklusive der zwei ein halb Finger dorsal und eineinhalb Finger palmar. Der Nerv versorgt in allen Fällen die Haut des kleinen Fingers, dies stellt somit sein Autonomgebiet dar (15).

1.2. Frakturbehandlung

1.2.1. Frakturklassifikation

Die Frakturlokalisierung und Frakturmorphologie sind entscheidend für die therapeutische Indikationsstellung, und das Outcome der Patientinnen und Patienten. Eine Methode der Frakturbeschreibung, welche große Akzeptanz gefunden hat, ist die Arbeitsgruppe Osteosynthese-Klassifikation der Frakturen für lange Röhrenknochen nach Müller, welche zuletzt 1996 als umfassende Publikation erschien. Diese beschreibt Frakturen von Erwachsenen, wobei auch eine Adaptation für Kinder entwickelt wurde. Jede Fraktur wird durch einen fünfstelligen Nummerncode beschrieben. Diese beschreibt im ersten Teil des Codes die Lokalisation der Fraktur sowie im zweiten Teil die genaue Frakturmorphologie (16).

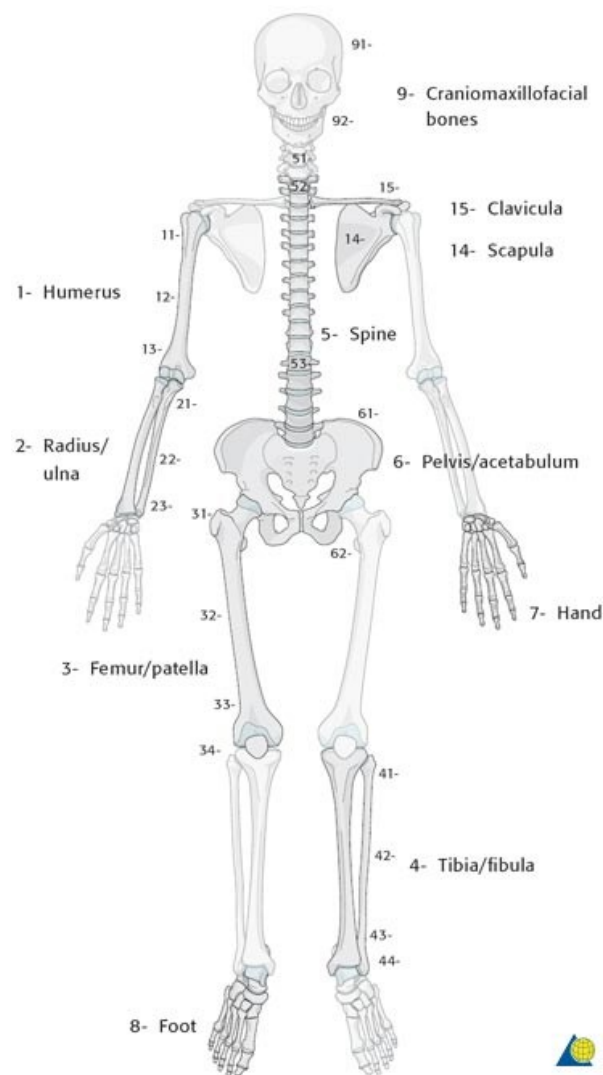


Abb. 6: OTA-System zur Lokalisationnummerierung

1.2.1.1. Frakturlokalisierung

Der Ort der Fraktur wird in den ersten beiden Zahlen des Codes ausgedrückt. Jeder Knochen in der Einteilung wurde, nach dem Orthopaedic Trauma Association-System, mit einer Nummer versehen, wobei die Unterarmknochen als ein Knochen angesehen werden und mit der Nummer Zwei versehen sind. Des Weiteren sind die langen Röhrenknochen noch in drei Segmente unterteilt, proximales, diaphysäres und distales Segment, welche von proximal nach distal mit den Nummern eins bis drei nummeriert sind. Die genaue und umfassende Nummerierung der Knochen ist in Abbildung 6 dargestellt. Im Gegensatz zur Klassifikation des Erwachsenen werden bei Kindern Epiphyse und Metaphyse getrennt betrachtet. Die Abgrenzung des metaphysären Bereichs ist hier durch ein, in Abbildung 7 gezeigtes, Quadrat definiert, dessen Seitenlänge der breitesten

Stelle der Epiphysenfuge entspricht und dessen Grundlinie über der Fuge liegt (16,17). Bei paarigen Knochen wie im Unterarm müssen beide Fugen zusammengenommen werden. Um eine Fraktur als metaphysär zu klassifizieren, muss das Bruchzentrum in diesem Quadrat liegen. Bei spiralförmigen, schrägen oder queren Frakturen von einfacher Gestalt liegt das Zentrum immer in der Mitte der Bruchlinie. Bei Keilfrakturen definiert die breiteste Stelle des Keils das Zentrum. Bei komplexen Mehrfragmentfrakturen kann das Zentrum oft erst nach Reposition ermittelt werden, wenn die Ausdehnung erfasst werden konnte (16,17).

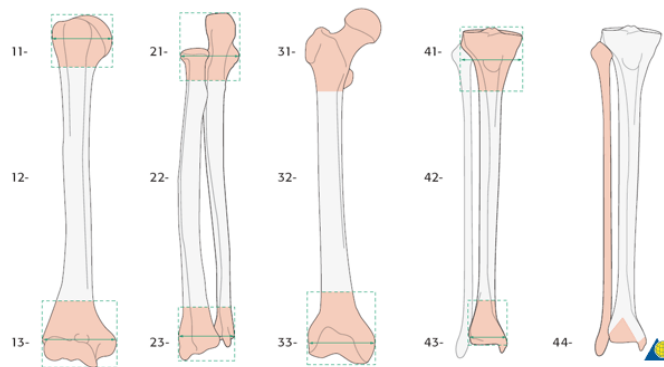


Abb. 7: Segmentlokalisierung langer Röhrenknochen (2)

Frakturen mit Gelenksbeteiligung werden immer als epiphysär eingestuft, da die Gelenksverletzung bezüglich des Therapieoutcomes die schwerwiegendere ist. Die Lokalisationsangabe bei Kindern wird anschließend an die beiden Nummern, welche Knochen und Segment angeben, um den Buchstaben E für Epiphyse, M für Metaphyse oder D für Diaphyse erweitert. Ein Bruch der Diaphyse des Unterarms wäre demnach mit dem Code 2.2.D. beschrieben. Diese Terminologie ist weltweit akzeptiert (16,17).

1.2.1.2. Frakturmorphologie

Frakturen langer Röhrenknochen erwachsener Patientinnen und Patienten können prinzipiell in drei Hauptgruppen eingeteilt werden. Die Frakturmorphologie hängt jedoch von der Lokalisation am Knochen, diaphysär oder gelenksnah, ab. Die Frakturen werden, ihrem Schweregrad entsprechend, in drei Gruppen unterteilt. Bei Schafffrakturen wird mit dem Buchstaben A eine einfache Fraktur, mit B eine Keilfraktur und mit C eine komplexe Fraktur codiert. Bei distalen oder proximalen Geschehen codiert A immer extraartikuläre, B teilweise intraartikuläre und C

vollständig intraartikuläre Frakturen. Eine so den Typen zugeordnete Fraktur kann weiter in drei Gruppen unterteilt werden, welche wieder in drei Untergruppen aufgeteilt sind. Zusammengefasst ergeben sich also für jedes Segment 27 Untergruppen, oder 81 für den gesamten Knochen. Bei besonders komplexen Vorgängen kann diese Klassifikation noch um Modifikatoren erweitert werden (16). Die bekannteste Klassifikation bei Kindern ist jene nach Salter-Harris. Sie unterscheidet fünf Typen, beschreibt allerdings nur die Frakturen um die Epiphysenfuge. Deshalb wurde von der Paediatric Expert Group der AO eine spezielle Beschreibung kindlicher Frakturen der langen Röhrenknochen entwickelt. Diese integriert die Salter-Harris Klassifikation in die oben beschriebene Klassifikation für Erwachsene (17).









E/1		Salter-Harris type I	E/6		Triplane fractures
E/2		Salter-Harris type II	E/7		Ligament avulsions
E/3		Salter-Harris type III	E/8		Flake fractures
E/4		Salter-Harris type IV	E/9		Other fractures, eg, abrasive injury
E/5		Tillaux (two-plane) fractures			

Abb. 8: Adaptierte Salter-Harris Klassifikation (3)

Die Morphologie der Frakturen im Kindesalter wird hier durch eine typenspezifische Kindercodierung, welche um einen Zusatz über Schweregrad und Ausnahmen erweitert wird, angegeben. Um die kinderbezogenen Eigenheiten klarer darzustellen, wird in der Codierung ein Schrägstrich gesetzt. Diese

Eigenheiten sind den einzelnen Typen der Fraktur im Kindesalter E, M und D eindeutig zugeordnet. So bezeichnet beispielsweise die Kindercodenummer eins nicht immer die gleiche Frakturmorphologie, sondern ist abhängig von der Lokalisation. Eine Fraktur E/1 bezeichnet eine Salter-Harris Typ I Verletzung bei Epiphysenlösung, wohingegen eine Fraktur D/1 eine Bowing-Fraktur der Diaphyse beschreibt. Die Codenummer E/4 bezeichnet epiphysäre Frakturen nach Salter-Harris Typ IV, wobei der Frakturspalt alle Schichten der Wachstumsfuge komplett durchquert und von der Gelenksfläche bis zur Metaphyse reicht. Die Codierungsnummer vier bezogen auf einen diaphysären Bruch, D/4, bezeichnet einen kompletten Querbruch des Schaftes (17).

Bei der Einteilung nach Schweregrad kindlicher Frakturen wird eine Zweiteilung vorgenommen. Die Codenummer eins klassifiziert einen Bruch als einfache Fraktur mit maximal zwei Hauptfragmenten. Die Nummer zwei beschreibt Keilfrakturen oder Mehrfragmentfrakturen (17).

Nicht jede Fraktur im Kindesalter kann mit beschriebener Codierung klassifiziert werden. Deshalb sind für spezielle Frakturen zusätzliche Klassifikationsbezeichnungen notwendig. Im Fall des Unterarmes betrifft dies Frakturen des Radiuskopfes oder des Radiushalses. Sie werden mit dem Zusatzcode I für keine Abkippung, II für Abkippung um halbe Schaftbreite oder III für Abkippung um mehr als halbe Schaftbreite definiert. Für eine Vielzahl von anderen Frakturen existieren ähnliche Ausnahmecodes, zum Beispiel für Apophysenabrisse, intraartikuläre Bandausrisse oder suprakondyläre Humerusfrakturen (17). Am Ende ergibt sich bei Kindern ein fünf bis sechsstelliger Code, je nachdem ob eine Ausnahmeangabe nötig ist oder nicht. Ein Beispielcode für einen einfachen kompletten Querbruch des diaphysären Unterarms bei Kindern, würde dem Schema in Abbildung 9 folgend, 2.2.D/4.1 lauten(17).

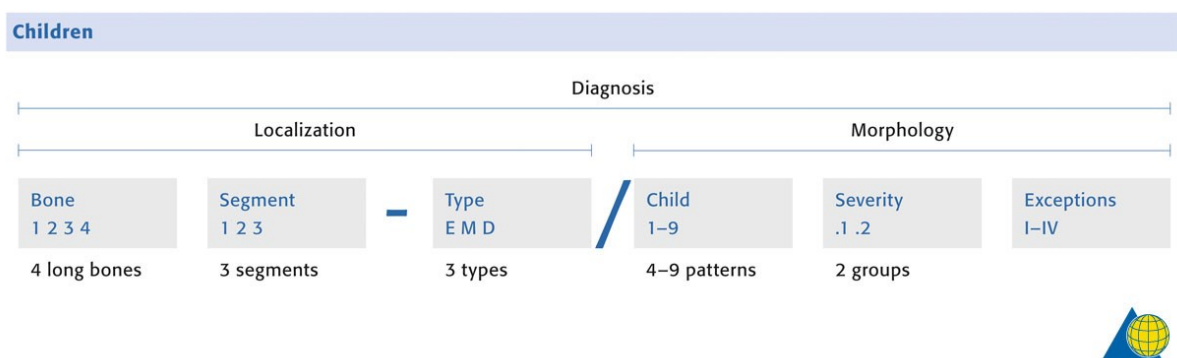


Abb. 9: Codierung kindlicher Frakturen (4)

1.2.2. Frakturbehandlung und Stabilisierung

Die Definition des Wortes Stabilität in der Chirurgie ist nicht einheitlich mit jener aus dem Ingenieurwesen. Als Stabilität wird in der Versorgung einer Fraktur das Maß der Verschiebung im Bruchspalt, welche durch einwirkende Lasten erzeugt wird, beschrieben. Eine stabile Fraktur ist somit dadurch charakterisiert, dass sie sich unter physiologischer Belastung nicht verschiebt. Der Grad der Stabilität bestimmt maßgeblich die Art der Frakturheilung. Die Aufgaben der Bruchstabilisierung sind einerseits die Erhaltung der Reposition und eine Erhöhung der Festigkeit, um eine gewisse Funktionstüchtigkeit zu erreichen, andererseits eine Minimierung der Schmerzen, welche durch Instabilitäten der Fraktur bedingt sind. Die Behandlung einer Fraktur kann nichtoperativ oder operativ erfolgen (18).

1.2.2.1. Nichtoperative Frakturbehandlung

1.2.2.1.1. Heilung ohne Behandlung

Ohne Intervention stabilisiert sich die Fraktur durch schmerzhaftes Zusammenziehen der umgebenden Muskulatur. Dies führt in weiterer Folge oft zu Fehlstellungen oder Längenunterschieden im Vergleich zur Gegenseite. Begleitende Hämatome oder Gewebsschwellungen führen kurzzeitig ebenfalls zu einer Stabilisierung des Bruches (18).

1.2.2.1.2. Konservative Frakturbehandlung

Eine geschlossene Reposition mit Fehlstellungskorrektur ist der Grundstein für eine konservative Behandlung. Die anschließende Stabilisierung erhält das Repositionsergebnis, vermindert die Beweglichkeit der Fragmente und führt zu indirekter Heilung durch Kallusbildung. Die nötige Stabilität kann hierbei durch zwei Arten erreicht werden, durch Zug oder durch externe Schienung (18).

Ersterer kann von außen über die Haut, oder durch Einbringen eines perkutanen Metallstiftes distal des Bruches erreicht werden, über welchen dann eine

Extension durchgeführt werden kann. Zug in der natürlichen Längsachse des Knochens bewirkt durch Ligamentotaxis eine Stellungskorrektur, sowie eine Reduktion der Beweglichkeit, was an sich einen stabilisierenden Effekt ausübt (18).

Externe Schienung bewirkt eine gewisse Stabilisierung. Die Abmessungen der Schiene sind hier die maßgebenden mechanischen Elemente. Der Effekt der Schienung ist dadurch begrenzt, dass, bedingt durch dazwischen liegende Weichteile, kein direkter Kontakt zum Knochen besteht. Auf eine Drei-Punkt-Auflage ist bei Anpassung der Schiene besonders zu achten, da nur so der stabilisierende Effekt erreicht werden kann (18).

1.2.2.2. Operative Frakturbehandlung

Die Vielzahl der operativen Eingriffe und Implantate kann in zwei übergreifende Gruppen eingeteilt werden, Fixierung mit absoluter Stabilität oder relativer Stabilität (18).

1.2.2.2.1. Fixierung mit relativer Stabilität

Diese Methoden haben das Ziel, eine Reposition zu erhalten und dennoch die mechanisch induzierte Bildung eines Kallus nicht zu behindern. Eine Voraussetzung für eine gelungene relative Stabilisierung ist eine elastische, das heißt reversible, Verformung unter Lasteinwirkung. Das Ausmaß der Mikrobewegungen im Frakturspalt hängt sehr von der verwendeten Stabilisierungsart ab. Kallus bildet sich nicht ohne Bewegung, weshalb eine zu straffe Fixation in einer verzögerten Heilung resultiert. Bei zu großer Verformung oder einer Instabilität der Fraktur tritt dies jedoch genauso ein. Folgen können die Bildung von hypertrophen Pseudoarthrosen sein. Korrekt angewendet führen alle Methoden der relativen Stabilität zu einer Heilung mit Kallusbildung ohne verzögerte Heilung (18).

Bei einwirkender physiologischer Last verschieben sich die Fragmente des Bruches gegeneinander. Der Grad der Verschiebung steigt mit zunehmender Last, und sinkt mit zunehmender Steifigkeit der Fixation. Eine genaue Definition bezüglich erlaubter oder notwendiger Elastizität existiert nicht. Im Allgemeinen

kann jede Methode der Fixierung als elastisch bezeichnet werden, wenn sie unter Belastung eine kontrollierte interfragmentäre Bewegung zulässt. Mit Ausnahme von Methoden, welche auf Kompressionskräfte zurückgreifen, können demnach alle als flexible Fixationen mit relativer Stabilität beschrieben werden. Externe Fixateure, Marknägel und Überbrückungsplatten zählen zu den am häufigsten angewandten (18).

Unilaterale externe Fixateure werden exzentrisch angebracht und sind asymmetrisch in ihrem mechanischen Verhalten. Ringfixateure zeigen ubiquitär ein uniformes Lastverhalten. Die Behandlung mittels Fixateure externe, lässt als einzige Methode der Ärztin oder dem Arzt die Möglichkeit, die Elastizität der Fixierung zu verändern, ohne dass ein zusätzlicher Eingriff notwendig ist. Diese Technik wird als Dynamisierung bezeichnet und kann während der Frakturheilungsphase genutzt werden, um Belastungen im Frakturspalt zu variieren (18).

Die klassischen Marknägel nach Küntscher besitzen gute Eigenschaften bezüglich Biegung und Scherung senkrecht zur Längsachse. Instabil reagieren sie jedoch auf Rotationskräfte und sie besitzen nur wenig Potential, um axiale Verschiebungskräfte aufzunehmen. Mit der Einführung der Verriegelungstechnik in Kombination mit soliden oder hohlen Nägeln, konnten viele dieser Einschränkungen aufgehoben werden (18).

Schandelmaier et al. konnten durch Leichenversuche an Schienbeinknochen zeigen, dass Nägel größerer Dicke, welche mit stärkeren Verriegelungsstiften versehen werden, eine signifikant höhere Steifigkeit aufweisen. Insgesamt wurden neun verriegelbare Tibianägel getestet. Auch bezüglich von Biegungskräften in Varus-Valgusrichtung zeigten Nägel von größerem Durchmesser höhere Steifigkeitswerte (19).

Platten, welche ähnlich einem Fixateure externe eine Mehrfragmentfraktur überbrücken können, sorgen für elastische Schienung. Die Ausmaße des Implantats, die Anzahl und Position der verwendeten Schrauben, die Koppelungsqualität zwischen Schraube und Platte und die Koppelungsqualität zwischen Schraube und Knochen beeinflussen die Steifigkeit der Überbrückungsplatte (20).

Das Maß der Beweglichkeit im Frakturspalt ändert sich im Verlauf des Heilungsprozesses. Während in der ersten Phase der Heilung mehrheitlich

weiches Gewebe vorherrscht und so größere Dehnungen toleriert werden können, besteht der Kallus gegen Ende aus kalzifiziertem Gewebe, welches bedeutend weniger Dehnung zulässt, wie es in Abbildung 10 erläutert ist. Die Art und Weise wie mechanische Faktoren die Heilung beeinflussen, beschreibt die Dehnungstheorie nach Perren. Dehnung wird hier als Deformation eines Materials unter Last definiert, gemessen an der relativen Änderung der Länge im Vergleich zur Ursprungslänge, wenn eine bestimmte Kraft einwirkt. Oft wird ein Prozentbetrag angegeben, da die Änderung der Länge hier dimensionslos ist. Intakter Knochen toleriert eine Dehnung von zwei Prozent bevor eine Fraktur eintritt. Granulationsgewebe hingegen bis zu 100 Prozent. Sofern die lokale Dehnung niedriger ist als jene, welche Geflechtknochen tolerieren kann, ist eine knöcherner Überbrückung möglich. Deshalb kann knöcherner Kallus den Bruchspalt nicht direkt überbrücken. Die vorläufige Bildung des weichen Kallus ist nötig, um die lokale Dehnung so weit zu verringern, dass eine Kalzifizierung und somit eine knöcherner Überbauung möglich ist (18).

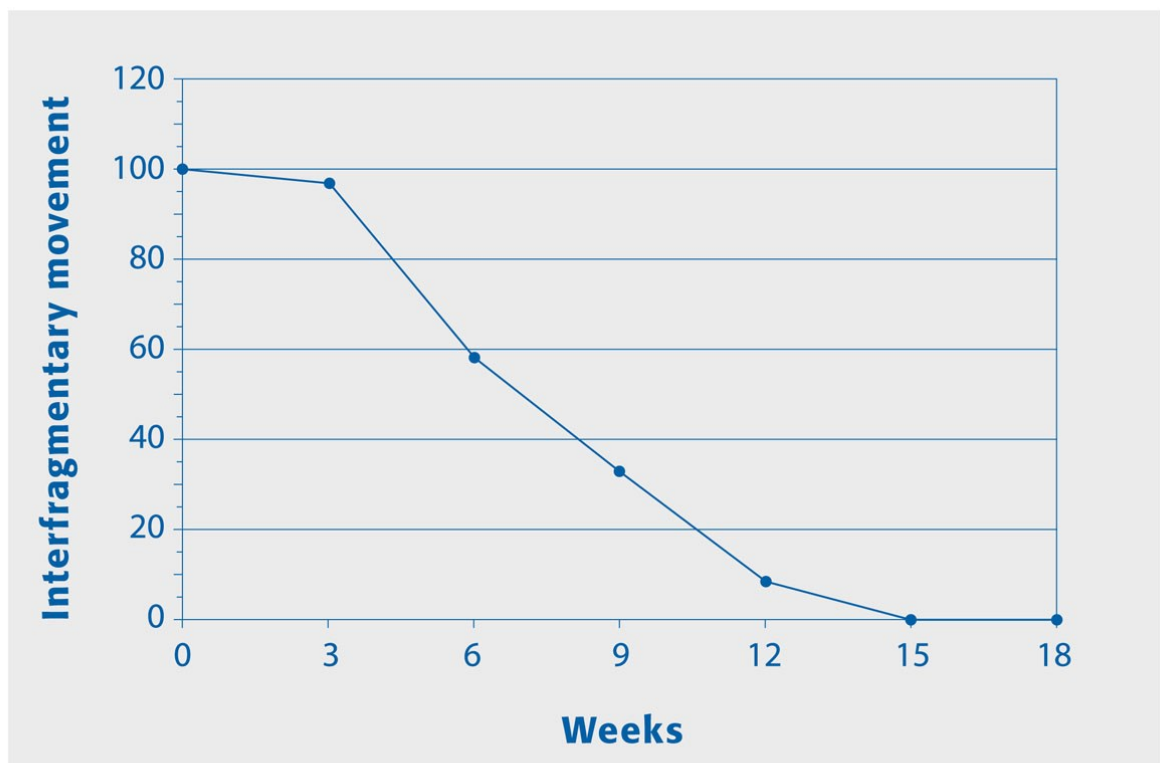


Abb. 10: Dehnungsverhalten und interfragmentäre Bewegungen innerhalb des Kallus

Claes et al. beschreiben in ihrer Arbeit die Theorie, dass das Ausmaß der Dehnung und des hydrostatischen Druckes entlang von bestehenden kalzifizierten Oberflächen im Kallus, die Differenzierung des Kallusgewebes bestimmt. Ihren Ergebnissen nach ist endochondrale Ossifikation mit Dehnungen von weniger als 15 Prozent und Drücken von $-0,15$ MPa vergesellschaftet (20).

Mehrfragmentfrakturen erlauben größere Bewegungen zwischen den Hauptfragmenten. Die Summe der Bewegung verteilt sich über mehrere Frakturebenen, wodurch die Dehnung im Frakturspalt verringert wird (18).

Die zelluläre Ebene, auf der die entscheidenden Prozesse der Knochenheilung gesteuert werden, ist komplexer strukturiert. Dehnung und Flüssigkeitsdrücke sind im Kallus unregelmäßig verteilt. Es entsteht eine Rückkopplungsschleife, in der mechanische Last Signale generiert, welche vom Kallusgewebe moduliert werden. Diese Stimuli können den Phänotyp, die Zellteilung und die Apoptose regulieren. Bei normaler Frakturheilung erreicht der Rückkopplungsmechanismus einen stabilen Zustand, sobald der Kallus verknöchert ist und sich der ursprüngliche Kortex neu gebildet hat. Die Signale und das genaue Zusammenspiel der biologischen Reaktionen sind noch Gegenstand der Forschung (18).

Ford et al. konnten mit histologischen und immunhistochemischen Untersuchungen an Hasentibiae zeigen, dass innerhalb des kartilaginären Kallus vaskuläre Strukturen vorzufinden sind. Diese wurden über die Transmembranproteine CD 31 und CD 34 identifiziert. Zusätzlich wurden häufig Hohlräume im Kallus erkennbar. Diese wurden durch Zellen von osteoblastischer Natur ausgekleidet, mit positiver Testung auf Osteocalcin und dem Adhäsionsproteinen CD 31 und CD 34. Ford et al. vermuten, dass diese Auskleidungszellen eine wichtige Rolle im Umbau des Knorpels zu Knochen, während des Frakturheilungsprozesses spielen (21).

1.2.2.2.2. Fixierung mit absoluter Stabilität

Fixierung mit absoluter Stabilität bieten der Fraktur ein mechanisch neutrales Umfeld. Bewegungen im Frakturspalt werden verhindert, wodurch auch die mechanisch induzierte Kallusbildung reduziert wird (18). Auch wenn Brüche mit Schienen zusätzlich stabilisiert werden und die Steifigkeit des Implantates zur erhöhten Stabilität beiträgt, ist die einzige Möglichkeit Bewegung im Frakturspalt

zu verhindern, die interfragmentäre Kompression. Absolut stabile Fixierungsmethoden verhindern auch unter Belastung Dehnung im Bruchspalt. Dies führt zu einer direkten Knochenheilung. In Umgebungen mit geringer Dehnung heilt Knochengewebe durch osteonale Umbauprozesse, also denselben homöostatischen Vorgang der für den normalen physiologischen Knochenumbau verantwortlich ist. Dieser Mechanismus wird auch primäre Knochenheilung genannt (18).

Absolute Stabilität wird durch eine Vorspannung in Kompression und durch konsequente Reibung erreicht. Kompression führt zu engem Kontakt der Bruchfragmente. Voraussetzung hierfür ist, dass die Kompressionskräfte die Zugkräfte, die an den Fragmenten wirken, übersteigen. Drucknekrosen sind nicht zu befürchten (18). Die Arbeit von Perren et al. zeigte, dass Nekrosen weder durch Zugschrauben noch durch Platten, die eine axiale Kompression bewirken, entstehen. Sofern absolute Stabilität gewährleistet ist, zeigt auch überlasteter Knochen keine Nekrosen (22). Häufig verwendete Implantate zur absoluten Stabilisierung sind Zugschrauben, Platten und unter Umständen auch der externe Fixateur (18). Ein Ringfixateur nach Ilizarov erlaubt vollständige Länglenkontrolle, Ausrichtungskontrolle und Rotationskontrolle. Die Nutzung solcher Rahmenkonstruktionen erlaubt absolut stabile Fixierung (18).

Durch das Zusammenpressen der Bruchenden entsteht Reibung, oder auch Friktion genannt. Die Entstehung dieser Kräfte wird in Abbildung 11 verdeutlicht. Friktion ist wichtig, da sie Scherkräften entgegenwirken soll, um eine gleitende Verschiebung zu verhindern. Vor allem einwirkende Drehkräfte sind die Ursache entstehender Scherkräfte. Die Widerstandskraft gegen Scherkräfte hängt einerseits von der durch die Kompressionskraft entstehenden Reibung, und andererseits von der Oberflächengeometrie der miteinander in Kontakt stehenden Frakturrenden ab. Rauere Oberflächen erlauben eine stabilere Fixation, aufgrund einer Verzahnung der Fragmente (18).

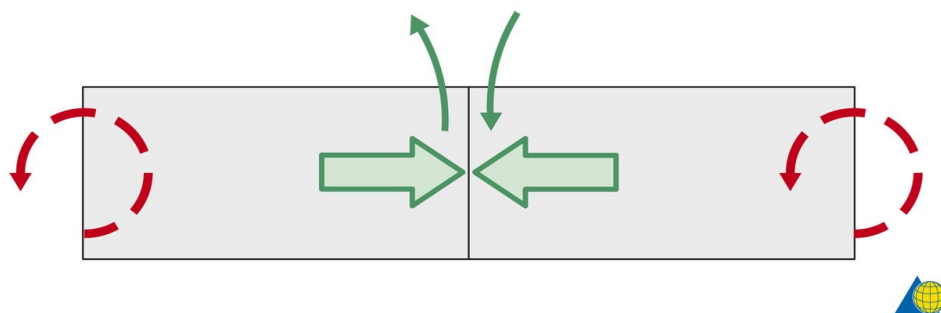


Abb. 11: Interfragmentäre Reibung, Friktion

Bei diaphysären Frakturen erreicht man mittels absoluter Stabilität eine permanente Fixierung der Fragmente und somit ein rasches Abklingen der Schmerzen mit einer früheren funktionellen Nachbehandlung. Radiologisch ist unter absolut stabiler Versorgung lediglich ein feiner Spalt sichtbar. Allmähliches Verschwinden der Frakturlinie, eventuell mit Trabekeln ist ein Zeichen für Heilung. Aufweitungen des Spaltes, beziehungsweise die Bildung eines Reizkallus sind Anzeichen für ein Therapieversagen (18).

Frakturen der Metaphyse ermöglichen eine gute Fixierung im Bezug auf Biegung und Torsion, weshalb hier Frakturen oft schneller heilen als an der Diaphyse. Die radiologische Beurteilung wird durch die komplexe, dreidimensionale Geometrie des trabekulären, spongiösen Knochens allerdings erschwert. Ein weiterer Vorteil der absoluten Stabilität in diesem Bereich ist, dass Gelenksflächen genau aneinander angepasst versorgt werden können. Der interne Havers-Umbau beginnt allerdings später und dauert länger, da keine Kallusbildung angeregt wird. Deshalb muss das Implantat alleine die stabile Fixierung über einen längeren Zeitraum sichern, und nicht nur unmittelbar wie bei relativ stabiler Versorgung (18).

1.2.2.2.3. Frakturen des Unterarmschaftes

Die Versorgung von Unterarmschaftfrakturen im Erwachsenenalter stellt eine Besonderheit dar. Eine Fraktur mit dieser Lokalisation, muss trotz Vorliegens eines diaphysären Bruches, aufgrund der besonderen funktionellen und anatomischen Charakteristik, wie eine intraartikuläre Fraktur behandelt werden (23). Intraartikuläre Inkongruenzen indizieren eine operative Korrektur, da sie zu fortschreitenden arthrotischen Veränderungen und Ausbildung von Instabilitäten führen (24).

Wird im Erwachsenenalter die Unterarmschaftfraktur nicht mit absoluter Stabilität versorgt, kommt es zu einer erhöhten Rate an Komplikationen, wie zum Beispiel Pseudoarthrosen. Deshalb ist derzeit eine absolut stabile Versorgung, mit Plattenosteosynthese die anerkannte Versorgungsweise von Unterarmschaftfrakturen im Erwachsenenalter (23).

Im Kindesalter hingegen genügen relativ stabile Versorgungsweisen am Unterarmschaft (25). Immobilisation mit Gips ist ausreichend um die meisten

Unterarmschaftfrakturen im Kindesalter zu versorgen. 85% der Patientinnen und Patienten mit Unterarmschaftfraktur erreichen zufriedenstellende Ergebnisse nach geschlossener Reposition (26,27). Die hohen Erfolgsraten sind auf das Remodelingpotential im Kindesalter zurückzuführen, wodurch postoperativ verbleibende Deformitäten kompensiert werden können (25).

Allerdings sind Achsenabweichungen größer als zehn Grad, oder Rotationsfehlstellungen um mehr als 45 Grad auch im Kindesalter nicht akzeptabel (28). Studien zeigen dass die Auswirkungen des kindlichen Remodelings hier nicht abschätzbar sind (25).

Die elastisch stabile intramedulläre Nagelung hat sich schnell als State-of-the-Art Behandlung für die chirurgische Versorgung von Unterarmschaftfrakturen im Kindesalter etabliert, falls die Indikation zur operativen Therapie gestellt wird (29,30). Bei Kindern unter 10 Jahren sind geringe Komplikationsraten zu beobachten. Über dem zehnten Lebensjahr ist laut einigen Autoren allerdings ein Anstieg der Komplikationsrate zu erwarten (28,31). Bei Kindern über dieser Altersgrenze wird daher von den Autoren eine Plattenosteosynthese empfohlen (28,31).

1.2.3. Frakturheilung und Bultversorgung

Die Heilung einer Fraktur findet je nach gewählter Stabilisierungsmethode auf unterschiedliche Weise statt. Bei absolut stabilen Verhältnissen heilt der Knochen direkt, oder primär, durch osteonalen internen Umbau. Relativ stabile Fixierung resultiert in indirekter, oder sekundärer, Heilung. Diese gleicht der embryonalen Knochenentwicklung und umfasst desmale sowie chondrale Ossifikation. Bei diaphysären Brüchen ist sekundäre Heilung durch die Ausbildung eines Kallus gekennzeichnet (32).

1.2.3.1. Primäre Knochenheilung

Der Heilungsprozess der primären Heilung unter absoluter Stabilität beginnt in den ersten Tagen nach der Operation. Die Aktivität an der Frakturstelle ist in der Anfangszeit nur gering. Wenn die Anschwellung beginnt ist das Hämatom in Resorption begriffen oder wird durch Granulationsgewebe ersetzt. Nach einigen

Wochen beginnt das Havers-System mit der Remodelierung des Knochens (32). Schenk und Willenegger beschrieben diesen Vorgang bereits in ihrer Arbeit von 1963 (33).

Schematisch wird das Havers-System in Abbildung 12 gezeigt. Es kann begriffen werden, als ein durch Osteoklasten geschaffener Hohlraum. Simultan zur Osteolyse durch die Osteoklasten, formen Osteoblasten neuen Knochen mit Verbindungen zu den im Haverskanal laufenden Blutgefäßen. Während dieses Umbaus schließen sich Fugen zwischen ungenau passenden Fragmenten mit lamellären Knochen. In den folgenden Wochen erreichen die Osteone die Fraktur, welche überschritten wird, sofern der Abstand klein genug ist, oder direkter Kontakt besteht. Diese, die Fraktur übertretenden Osteone, bilden eine Art Mikroüberbrückung oder Mikroverzahnungen (18).

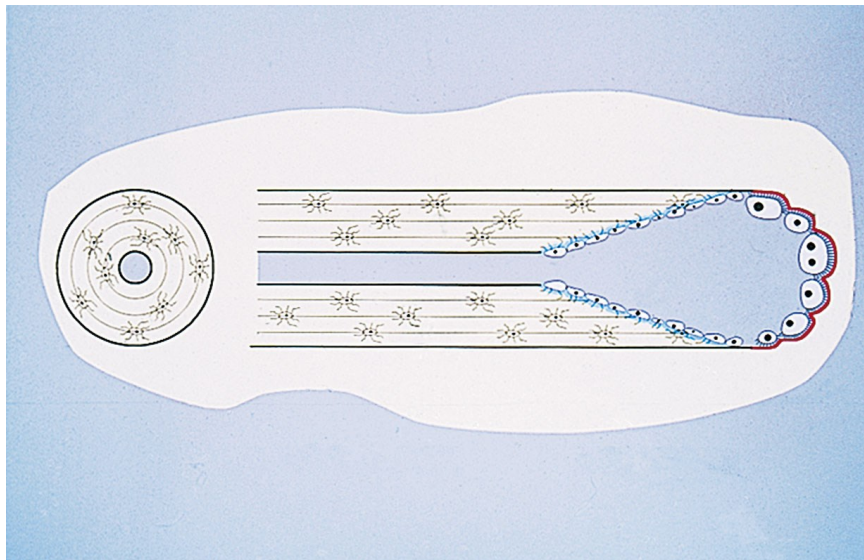


Abb. 12: Schematische Darstellung des Havers-Systems

1.2.3.2. Blutversorgung bei primärer Heilung

Absolute Stabilität bewirkt positive Effekte auf die Blutversorgung. Gefäße können unter stabilen Voraussetzungen leichter eine Fraktur durchdringen. Obwohl der operative Zugang zur Erreichung absolut stabiler Fixation mit einer Schädigung der Vaskularisation einhergeht, unterstützt der Eingriff das Einwachsen von neuen Blutgefäßen (18).

Eine Besonderheit gilt es bei Verwendung von Platten zur Osteosynthese zu beachten. Häufig wird die große Anpresszone von konventionellen Platten als

Nachteil angesehen. Knochen erlaubt große mechanische Belastung und wirkt schützend auf innere Gefäße. Die periostale und endostale Vaskularisation reagiert jedoch empfindlich auf jeden Kontakt von außen. Ausgedehnte, andauernde Reibung und Berührung zwischen Implantat und Knochen resultiert in den Bereichen direkt unter der Platte in Knochennekrosen. Folgekomplikationen dieser Nekrosen können temporäre Osteoporose und in Ausnahmefällen die Bildung von Sequestern sein. Eine Verkleinerung der Auflagefläche senkt das Infektrisiko und beschleunigt die Heilung (18).

1.2.3.3. Sekundäre Knochenheilung

Die Vorgänge während dieser Heilungsart können grob in vier Phasen unterteilt werden. Jede Phase besitzt seine eigenen Kennzeichen, jedoch treten sie nahtlos ineinander über (32).

- Entzündungsphase
- Bildung des weichen Kallus
- Bildung des harten Kallus
- Umbauphase

Die Entzündungsphase beginnt nur kurz nach der Fraktur und erstreckt sich bis zur Ausbildung von Faserbündeln, Knorpelgewebe oder Knochenneubildung. In etwa dauert die erste Phase einen bis sieben Tage. Am Anfang bildet sich ein Hämatom, was die weitere Entzündungsreaktion unterstützt. Fortschreitende Nekrotisierung des Knochengewebes und Weichteilschäden setzen Zytokine frei, die verantwortlich sind für die typische Ausbildung der Entzündungssymptome, sowie die Einwanderung und Proliferation von Makrophagen und polymorphkernigen Granulozyten. Im weiteren Verlauf wird das Hämatom von einem fibrinösen Netzwerk, retikulären sowie kollagenen Fibrillen durchzogen und schrittweise durch Granulationsgewebe ersetzt. Osteoklasten bauen nekrotische Knochenanteile langsam ab (32).

Mit einem Rückgang der Schwellung klingen die Schmerzen langsam ab und Kallusgewebe bildet sich. Zu dieser Zeit, etwa zwei bis drei Wochen nach dem Frakturereignis, sind die Frakturrenden nicht mehr frei beweglich. Kalluswachstum bestimmt dieses Stadium der Frakturheilung, welches jetzt als Stadium des

weichen Kallus bezeichnet wird. Vorläuferzellen werden angeregt und bilden Osteoblasten. Frakturfern beginnt die intramembranöse Knochenneubildung und führt zu einer Umhüllung der Frakturzone, ebenso wie zu einer Auffüllung der Markhöhle mit Geflechtknochen. Kapillaren wachsen in den Kallus ein. Frakturnah entwickeln sich mesenchymale Vorläuferzellen, migrieren in den Kallus und bilden Fibroblasten und Chondrozyten. Das Hämatom wird weiter langsam resorbiert (32).

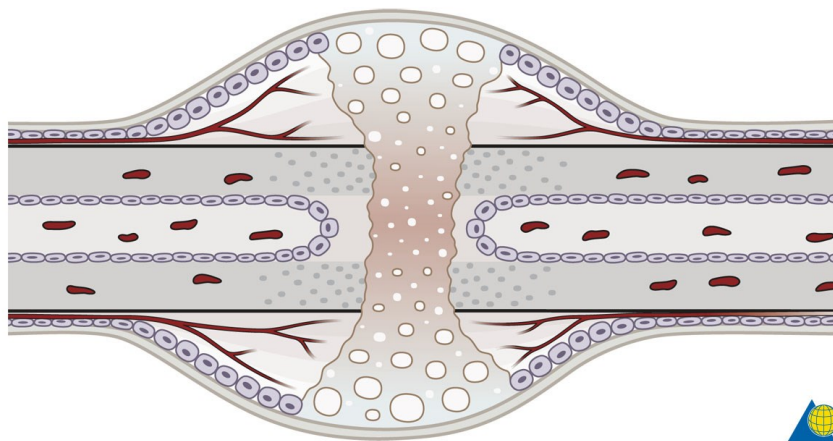


Abb. 13: Heilungsphase des weichen Kallus bei relativ stabiler Versorgung

Sobald der weiche Kallus die Fragmente überbrückt hat, beginnt die Phase des harten Kallus. Diese endet, wenn alle Fragmente durch neugebildetes Knochengewebe fest miteinander verbunden sind, welches in etwa dem Zeitpunkt drei bis vier Monate nach dem Frakturereignis entspricht. Die intramembranöse Knochenneubildung setzt sich in diese Phase fort und das fibröse Gewebe des weichen Kallus wird mittels enchondraler Ossifikation in kalzifiziertes hartes Gewebe, Geflechtknochen, umgebaut. Dieser Prozess beginnt an der Peripherie der Bruchzone, an den Stellen der geringsten Dehnung. Dies führt zu einer konsekutiven Verringerung der Dehnung in den zentralen Bereichen, wodurch die Verknöcherung auch hier fortschreiten kann. So entsteht vorerst eine Knochenbrücke am Rand oder in der Markhöhle, entfernt vom ursprünglichen Kortex. Restliche Faserbündel werden durch enchondrale Ossifikation umgebaut, und so wird die Lücke zum ehemaligen Kortex geschlossen (32).

Die Stabilisierung des Bruches durch Geflechtknochen leitet die letzte Phase ein. Durch Remodelingprozesse der Geflechtknochen in lamellären Knochen überführt.

Dieser Vorgang kann einige Monate bis Jahre in Anspruch nehmen. Als abgeschlossen kann diese Phase und damit die gesamte Heilung angesehen werden, wenn der ursprüngliche Zustand des Knochens wiederhergestellt ist, inklusive der Bildung der Markhöhle (32).

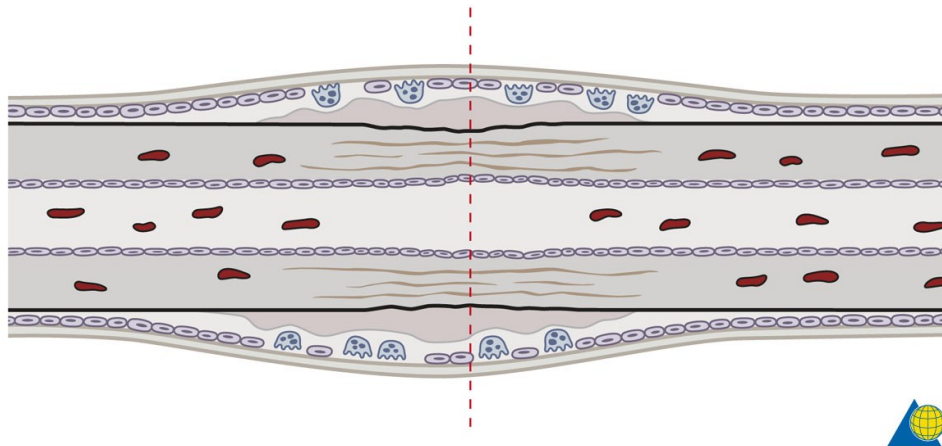


Abb. 14: Heilungsstadium des osteonalen Umbaus

Bei der indirekten Heilung von Knochengewebe bestehen Unterschiede zwischen kortikalem und spongiosen Knochen. Zweiterer heilt merklich ohne externe Kallusbildung. Dies geschieht einerseits durch das erhöhte angiogene Potential des trabekulären Knochens und andererseits durch die oft angewendeten stabileren Fixationsweisen (32).

1.2.3.4. Blutversorgung bei sekundärer Heilung

Die Versorgung des Kallus mit Blut ist von höchster Wichtigkeit und bestimmt letztendlich den Erfolg der Heilung. Nur ein gut ausgebildetes vaskuläres Netz kann eine Knochenneubildung unterstützen. Chirurgische Behandlungsstrategien und mechanische Gegebenheiten bestimmen maßgeblich die Angiogenese (32). Das vermehrte Einsprossen von Gefäßen scheint durch ein höheres Volumen des Kallus bei flexibler Fixation bedingt zu sein. Instabilität hingegen bedingt hohe Dehnung im Gewebe, was zu reduzierter Durchblutung führt, vor allem bei vergrößertem Abstand zwischen den Frakturrenden (32).

Claes et al. konnten in ihrer Arbeit an Schafen nachweisen, dass Instabilitäten und größere Frakturspalten signifikant weniger Revaskularisation und weniger

Knochenbildung zulassen, als korrekt reponierte und angemessen stabil versorgte Frakturen. Zusätzlich fanden die Autoren bei instabilen Frakturen einen größeren Anteil an fibrocartilaginärem Gewebe, als bei angemessen stabil versorgten Brüchen, nach einer Zeitspanne von neun Wochen, was auf eine verzögerte Heilung hinweist (34).

Ebenso beeinflusst das operative Vorgehen die Vaskularisation. Moderates intramedulläres Aufbohren führt zu einer starken hyperämischen Reaktion. Die Blutversorgung des Kallus kann laut Pfister allerdings nicht durch Aufbohren beeinflusst werden, da dieser vorwiegend über die angrenzenden Weichteile versorgt wird (35).

Je größer der operative Zugang, und je breiter die benutzten Implantate dem Knochen aufliegen, desto geringer ist die Durchblutung, besonders die periostale Versorgung leidet darunter. Minimal invasive Techniken und ein Verzicht auf offene Freilegung der Fragmente minimieren die Schäden an den Blutgefäßen (32).

Farouk et al. beschreiben in ihrer Studie die Vorteile einer perkutanen minimal invasiven Plattenosteosynthese des Femurs. Diese Methode kompromittiert die femorale Blutversorgung weit weniger als die offene Methode mit interner Fixation, und ist den Autoren zufolge vorteilhafter bezüglich der Knochenheilung (36).

1.3. Komplikationen der Frakturbehandlung

1.3.1. Pseudoarthrosen

Der Fortbestand eines Kontinuitätsunterbruchs und die Unterbrechung des Heilungsvorganges werden als Pseudoarthrose bezeichnet. Eine knöcherne Konsolidierung tritt unter diesen Umständen ohne operative Sanierung nicht ein. Klinisches Zeichen einer Pseudoarthrose ist der Verbleib einer Restbeweglichkeit im Frakturbereich, oft im Zusammenspiel mit Schmerzen. Radiologische Hinweise können weiterhin erkennbare Frakturlinien, Fraktursklerosierung, Spaltbildungen oder hypertrophe oder ausbleibende Kallusbildungen sein. Acht Monate nach Frakturereignis ist, sofern kein Knochendefekt vorliegt, die Diagnose einer Pseudoarthrose zu stellen. Oft dominiert ein einzelner Faktor in der Ätiologie,

trotzdem ist die Ausbildung einer Pseudoarthrose ein multifaktorielles Geschehen. Mechanische Instabilität und lokale Durchblutungsstörungen sind die bedeutendsten Ursachen, neben anderen Faktoren wie Nikotinabusus, mangelnder Compliance oder Neuropathien (37).

Nikotinkonsum verzögert die Knochenheilung, dies wurde von Ueng et al. in Versuchen an Hasen gezeigt. Den Autorinnen und Autoren zufolge führt Nikotinkonsum zu signifikant verzögerter Knochenkonsolidation, allerdings konnte nicht nachgewiesen werden, dass Nikotinabusus zu einer vollständig ausbleibenden Heilung führt (38).

Lokale Gewebsschädigungen sind umso ausgeprägter, je größer eine traumaverursachende Kraft einwirkt. Chirurgische Reposition und das operative Vorgehen bestimmen zusätzlich das Ausmaß der Schädigung. Frakturen mit einem schlecht vaskularisiertem Hauptfragment heilen prinzipiell knöchern aus, bei einer Durchblutungsstörung beider Hauptfragmente kann eine Konsolidierung jedoch ausbleiben (37).

Mechanische Instabilität und fehlender Durchbau sind oft auf einen bestimmten Bereich beschränkt, unabhängig von der Klassifikation der Fraktur oder der initialen Behandlungsmethode. Dieses Phänomen kann durch die Perren'sche Dehnungskurve erklärt werden (37).

1.3.1.1. Verzögerte Heilung

Eine nicht im erwarteten Umfang und im geplanten Zeitraum eintretende Knochenbruchheilung wird als verzögerte Heilung bezeichnet. Der angestrebte Heilungszeitraum ist für Patientinnen und Patienten unterschiedlich und wird durch die Art der Fraktur und das Alter der Patientinnen und Patienten beeinflusst. Klinisch präsentiert sich eine Extremität in der Regel mit Schwellung, Rötung und Wärme bei zusätzlich bestehenden bewegungsabhängigen Schmerzen. Entzündungsparameter wie C-reaktives Protein und die Leukozytenzahl sind aber meist unauffällig. Radiologisch lassen sich meist Resorptionssäume um einzelne Komponenten oder Implantatlockerungen nachweisen. Bei absolut stabil versorgten Frakturen ist eine Verbreiterung des Frakturspalttes oder die Ausbildung eines Irritationskallus Zeichen einer Instabilität (37).

1.3.1.2. Hypertrophe Pseudoarthrose

Eine mechanische Instabilität bei gleichzeitiger ausreichender Blutversorgung bedingt in der Regel eine hypertrophe Pseudoarthrose. Hohe Dehnungen übersteigen die zulässige Dehnung des Granulationsgewebes. Eine unzureichende mechanische Stabilität verhindert eine Durchbauung der Fraktur. Klinisch können betroffene Patientinnen und Patienten oft eine Vollbelastung durchführen, klagen dabei aber eventuell über Schmerzen und Achsenabweichungen. Radiologisch lassen sich die typischen Zeichen wie elefantenfußartige oder pferdefußartige Veränderungen erkennen (37). Eine solche Veränderung zeigt, etwas vereinfacht, Abbildung 16.

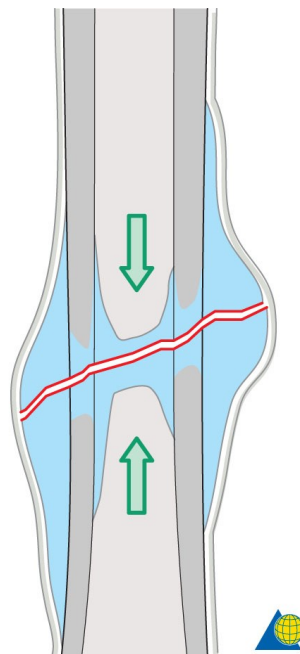


Abb. 16: Elefantenfußartige Veränderungen bei Hypertropher Pseudoarthrose

Eine Erhöhung der Stabilität durch Verriegelungsmarknägel mit Aufbohren oder die Anbringung einer Kompressionsplatte, erweisen sich als die besten Behandlungsmethoden einer hypertrophen Pseudoarthrose. Die verringerte Dehnungsbelastung des Kallus begünstigt eine einsetzende Mineralisierung des fibrocartilaginären Gewebes im Pseudoarthrosespalt (37).

Schenk et al. beschreiben in ihrer Arbeit die Einsprossung neuer Gefäße durch den Faserknorpel, welche die Bildung von neuen Knochenbälkchen ermöglichen, was schließlich zu einem Umbau der Pseudoarthrose führt (39).

Eine Resektion der Pseudoarthrose ist selten erforderlich, da vitaler und heilungsfähiger Knochen nicht entfernt werden soll. Nur bei zusätzlich notwendiger Korrektur einer Achsenabweichung ist eine partielle Resektion indiziert (37).

1.3.1.3. Avaskuläre Pseudoarthrose

Hier ist die mangelnde oder ausbleibende Heilung bedingt durch unzureichende oder fehlende Durchblutung. Gründe für den avaskulären Zustand können einerseits der Trauma bedingte Weichteilschaden, andererseits aber auch eine Folge zu extensiver Präparation sein. Knochenbruchstücke mit lediglich einem avaskulärem Fragment heilen prinzipiell trotzdem knöchern aus, bei zwei avitalen Fragmenten kommt es aber ohne zusätzliche Intervention in der Regel nicht zu einem Spontanheilungsprozess. Die Revitalisierung findet, ausgehend vom vitalen Teilstück der Fraktur, durch knöchernen Umbau statt. Gleichzeitig führen fortschreitende Resorptionsvorgänge nekrotischer Fragmente schließlich zu knöchernen Substanzverlusten. Unerkannt resultieren diese in Verkürzungen und Inaktivitätsosteopenien distal des Defektes aufgrund fehlender Belastung (37).

Der Zustand der Weichteile, lokale Umbauprozesse und ein eventueller Knochenverlust bestimmen das weitere Behandlungsvorgehen. Eine Verkürzung im Bereich der Pseudoarthrose in Kombination mit defektferner Kallusdistraction, oder zusammen mit kontralateraler Verkürzung sind gute Methoden, avitales Gewebe zu entfernen, und Längenunterschiede auszugleichen (37)

1.3.1.4. Atrophische Pseudoarthrose

In der Vergangenheit wurde angenommen, dass der wesentliche Prozess, welcher zur Ausbildung einer atrophischen Pseudoarthrose führt, im Gegensatz zu einer hypertrophen Pseudoarthrose, die fehlende Durchblutung sei. Es konnte allerdings durch histologische Untersuchungen von Reed et al. gezeigt werden, dass auch atrophe Pseudoarthrosen eine Blutgefäßversorgung besitzen. Es wird nun angenommen, dass im Verlauf jede avaskuläre Pseudoarthrose an der unteren Extremität in eine hypertrophe Form übergeht, während sich an der oberen Extremität ein atropher Zustand entwickelt (37,40). Die Frakturrenden tendieren aufgrund des Ausbleibens jeglicher Belastung und zusätzlicher Instabilität zur

Atrophie. Charakteristisch ist bei dieser Pseudoarthroseform eine Knochenresorption sowie fehlende Kallusbildung, trotz ausreichender Vaskularisierung, wie in Abbildung 16 dargestellt.

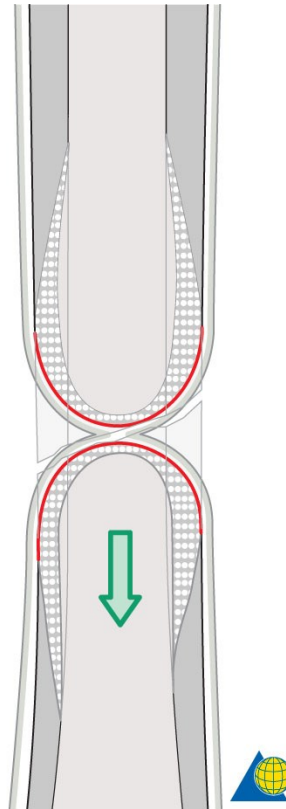


Abb. 16: Resorbierte Enden bei atrophischer Pseudoarthrose

Die Schaffung stabiler Fixierung Verhältnisse ist hier nur ein Teil der Therapie. Vor allem müssen osteoinduktive wie osteokonduktive Maßnahmen unterstützt werden. Knochentransplantation und Dekortikation in Kombination mit stabiler Plattenfixierung, sind das therapeutische Mittel der Wahl. Autogener Knochen als Transplantat ist der empfohlene Standard (37).

1.3.2. Infektionen

1.3.2.1. Akute Infektionen

Üblicherweise sind akute Infektionen nach Osteosynthesen bedingt durch eine exogene Ursache. Sie ist die Folge einer bakteriellen Kontamination, welche durch das Trauma, den operativen Eingriff oder durch postoperative gestörte Wundheilung bedingt ist (41).

In seltenen Fällen können sich Mikroorganismen über hämatogene oder lymphatische Streuung an Implantate anlagern. Implantatferne Infektionsquellen können kutanen, oralen oder respiratorischen Ursprungs sein. Sogenannte endogene Infektionen eines Implantates können auch Monate oder Jahre nach einer Osteosynthese auftreten. Nikotin und Alkoholkonsum begünstigen solche spät eintretenden Infektionen (42).

Im Gegensatz zu hämatogen gestreuten Infektionen, betreffen exogene akute posttraumatische Infektionen immer ein vorgeschädigtes Areal. In nekrotischem oder minderperfundiertem Gewebe können sich aus akuten Infektionsverläufen chronische Infektionen entwickeln. Alleinige antibiotische Therapie ohne chirurgische Intervention kann eine solche Entwicklung üblicherweise nicht verhindern (43).

Bei Implantaten zur Frakturstabilisierung mit vorliegender Infektion sind die Behandlungsziele vorwiegend die Erreichung einer Knochenbruchkonsolidierung und die Prävention der chronischen Osteitis. Somit ist im Gegensatz zu Infektionen bei Gelenkprothesen eine komplette Sanierung nicht immer das erste Ziel, da nach abgeschlossener Frakturheilung das infizierte Implantat entfernt werden kann (43).

Die chirurgische Interventionsmethode hängt laut Darouiche vom Implantattyp, der Stabilität zwischen Implantat und Knochen, dem Infektionserreger, der Qualität der Knochenheilung und dem klinischen Zustand der Patientinnen oder des Patienten ab. Nicht alle besiedelten Implantate führen zu einer Infektion. Erst bei Auftreten von klinischen Symptomen oder dokumentierten intraoperativen Zeichen einer lokalen Infektion, empfiehlt Darouiche eine Intervention (44).

1.3.2.1.1. Infektionsklassifikation akuter Infektionen

Die Klassifikation von Infektionen erfolgt nach Willenegger und Roth (45) anhand des Infektionsbeginns und des Infektionsweges. Die Erstmanifestation einer Infektion kann klinische, laborchemische, mikrobiologische und histologische Untersuchungen umfassen. Ein Rückschluss auf den genauen Kontaminationszeitpunkt, welcher der Erstmanifestation vorausgeht, kann so allerdings nicht gezogen werden. Späterer oder verzögerter Infektionsbeginn wird meist aufgrund der ähnlichen klinischen Erscheinungsform, Behandlung und

Prognose zusammengefasst. Die Einteilung erfolgt nach folgenden Kategorien (43,45).

- frühe Manifestation, innerhalb von zwei Wochen
- verzögerte Manifestation, nach drei bis zehn Wochen
- späte Manifestation, nach mehr als zehn Wochen

Nicht alle frühen Infektionen verlaufen akut. Symptome wie Rötung oder Sekretion können über unterschiedliche Zeiträume bestehen. Gelegentlich verläuft eine Osteitis langsam und ist mitunter zum Zeitpunkt der Osteosynthese bereits vorhanden (43,45).

1.3.2.1.2. Frühe Manifestation einer Infektion

Lokaler Schmerz, Rötung, Schwellung, gestörte Wundheilung und Fieber sind Anzeichen einer Infektion mit frühem Beginn. Meist verursacht durch Keime, wie *Staphylococcus aureus* oder gram-negativen Stäbchen, muss die frühe Infektion klar abgegrenzt werden von Störungen der Wundheilung, Nekrosen der Wundränder und posttraumatischen Hämatomen (43).

Ein verzögerter Wundverschluss ist generell vergesellschaftet mit einer lokalen bakteriellen Kontamination. Laborchemische Entzündungszeichen und Infektionssymptome bleiben aber bei ausreichender Immunabwehr aus. Devitalisierte Wundränder gehen nekrotisch unter, wodurch eine chirurgische Exzision mit Verbandwechsel erforderlich wird. Lokale Hämatome stellen einen idealen Nährboden für Keime dar. Ein operativer Eingriff mit bakteriologischer Untersuchung ist bei fluktuierenden oder schmerzhaften Hämatomen erforderlich. Besiedelte Hämatome können zu akuten Infektionen führen, sofern diese nicht frühzeitig postoperativ behandelt werden (43).

1.3.2.1.3. Späte und verzögerte Manifestation von Infektionen

Hier stehen unspezifische Symptome wie subfebrile Temperaturen im Vordergrund. Fistelbildung, Implantatlockerung oder zunehmender Schmerz sind klassische Zeichen einer verzögerten Infektion. In der Regel sind die

verursachenden Mikroorganismen nur in geringer Zahl vorhanden und besitzen nur eine geringe Virulenz, wie beispielsweise koagulasenegative Staphylokokken. Dies resultiert im verzögerten Beginn der Infektion, mitunter kann eine Manifestation auch völlig ausbleiben. Ineffiziente antibiotische Therapien begünstigen das Auftreten verzögerter Infektionen (43).

1.3.2.2. Chronische Infektionen

Devitalisierte Knochenfragmente entwickeln sich in einer infizierten Umgebung zu Sequestern, welche eine chronische Infektion verursachen beziehungsweise unterhalten (46).

Parsons et al. bezeichnen eine Infektion über sechs Wochen oder länger als chronische Infektion. Die Ursache liegt den Autorinnen und Autoren zufolge entweder in einer missachteten und fehltherapierten akuten Infektion oder in einer langsam fortschreitenden Entwicklung aus einer nicht bemerkten Infektion (47).

Entstehendes Granulationsgewebe bildet einen Wall aus dichtem fibrinösen Gewebe, welches die infizierte Region isoliert und so entsteht eine Barriere zu sequestriertem und avitalem Knochen. Periostale Knochenneubildung ummantelt den Sequester weiter und bildet ein sogenanntes Involucrum. Dies schottet das Gebiet weiter ab. Auch Fremdkörper führen über denselben Mechanismus zu chronischen Infektionen (46).

Während des Versuches des Körpers, vorhandene Bakterien zu bekämpfen, bilden diese einen Biofilm durch die Freisetzung einer Reihe von schützenden Faktoren. Die im Ruhezustand verbleibenden Erreger werden von dieser Glykokalixschicht geschützt, welche zusätzlich ihre Adhärenz erhöht und die Wirkung von Antibiotika verringert (46).

Gristina et al. konnten in ihrer Arbeit zeigen, dass die so gewonnene Widerstandsfähigkeit der Erreger um das 500-fache zunimmt. Diese Mechanismen erklären die Schwierigkeit einer alleinigen antibiotischen Therapie (48).

Bei chronischen Ostitiden werden vor allem *Staphylococcus aureus* und *Staphylococcus epidermidis* nachgewiesen, welche beide die Fähigkeit zur Glykokalixproduktion besitzen. Die chirurgische Behandlung stellt derzeit die einzige effektive Therapieoption dar, solche Infektionen zu beseitigen (46).

1.3.2.2.1. Infektionsklassifikation chronischer Infektionen

Die Klassifikation von chronischen Infektionen erfolgt nach der Einteilung von Cierny et al. nach ihrer Lokalisation (49).

Die Klassifikation nach Lokalisation stützt sich auf die Bedeutung der Knochennekrose bei günstigeren Prognosefaktoren einer Infektion im Markraum mit, im Allgemeinen, guter Vaskularisierung (46,49).

- Typ I: medulläre Osteomyelitis
- Typ II: oberflächliche Osteomyelitis
- Typ III: lokalisierte Osteomyelitis
- Typ IV: diffuse Osteomyelitis

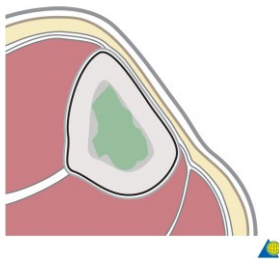


Abb. 17: Medulläre Osteomyelitis

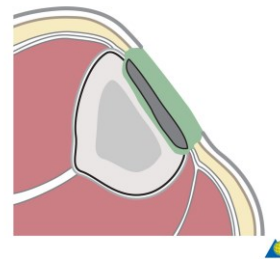


Abb. 18: Oberflächliche Osteomyelitis

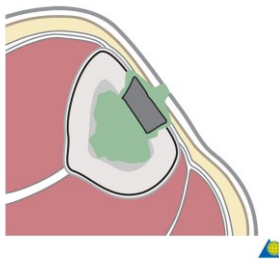


Abb. 19: lokalisierte Osteomyelitis

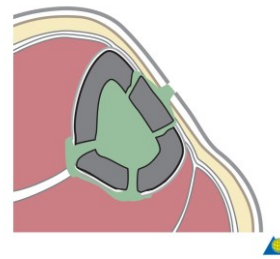


Abb. 20: Diffuse Osteomyelitis

1.4. Die ESIN als operative Methode bei Kindern

Der überwiegende Teil der Frakturen im Kindesalter kann geschlossen reponiert und anschließend mittels Gips behandelt werden. Unabhängig vom Alter der Patientinnen und Patienten sollten aber alle nicht reponierbaren Frakturen, aufgrund der dann oft unbefriedigenden Ergebnisse der konservativen Behandlung, operativ versorgt werden. Insbesondere trifft das auf instabile

Vorderarmfrakturen zu. Folgende Indikationen gelten für ein aktives chirurgisches Vorgehen (50).

- Offene Frakturen
- Instabile Vorderarmfrakturen
- Gelenks- beziehungsweise Wachstumsfugenverletzungen mit Dislokation von mehr als 2 mm
- Polytraumen
- Frakturen im Zusammenhang mit Verbrennungen oder anderen schweren Weichteilverletzungen

Bei instabilen Schaftfrakturen von Kindern unter 60 Kilogramm ist heute die elastische stabile intramedulläre Nagelung die Methode der Wahl (50).

Bei epiphysären oder metaphysären Frakturen gibt es verschiedenste Methoden der chirurgischen Versorgung, meist werden Kirschner-Drähte und kanülierte Schrauben verwendet. Plattenosteosynthesen sollten bei Patientinnen und Patienten unter 14 Jahren zurückhaltend angewandt werden, da eine Plattenentfernung einen zusätzlichen Eingriff darstellt, welcher aufgrund der zu erwartenden Wachstumsstimulation durchgeführt werden muss (50).

Die Technik der ESIN kann bei allen Schaftfrakturen im Kindesalter zwischen drei Jahren und der Pubertät angewendet werden. Zusätzliche äußere Fixation kann in zehn bis zwölf Prozent notwendig sein. Im Bereich des Unterarmschaftes hat die ESIN, aufgrund der minimalen Invasivität und der Möglichkeit zur meist gipsfreien funktionellen Nachbehandlung, die Technik der Plattenosteosynthese vollständig verdrängt (50).

Bereits 1949 wurde von Knight et al. auf die Möglichkeit einer intramedullären Fixation hingewiesen, um die Reposition und Knochenausrichtung zu erhalten (51). 1959 beschreibt Sage in seiner Arbeit, die Verwendung von, im Querschnitt dreieckigen, Nägeln (52).

Die Vorgänger der heutigen Methode der Unterarmschaftfraktur stabilisierung durch zwei elastische Metallnägeln wurde in Frankreich in den späten 1970er Jahren entwickelt und wurde auch Nancy Nagelung genannt. Daraus entwickelte sich in den U.S.A. der Titanium Elastic Nail, TEN (31).

1.4.1. Indikation und Epidemiologie

Mit sechs Prozent aller kindlichen Frakturen ist die Vorderarmschaftfraktur eine relativ häufige Verletzung im Kindesalter (53,54). Geschlossene Reposition und Immobilisation mittels Gips sind der derzeitige Goldstandard, um die meisten aller diaphysären Frakturen zu behandeln. 85 Prozent der Patientinnen und Patienten mit dislozierter Unterarmschaftfraktur erreichen zufriedenstellende Ergebnisse nach geschlossener Reposition (26,27).

Konservative Behandlungsansätze für instabile Unterarmschaftfrakturen können aber bei bis zu 50 Prozent der Patientinnen und Patienten zu schlechten Ergebnissen führen (56). Achsenfehlstellungen mit mehr als zehn Grad Abweichung, Dislokationen des Knochens oder Rotationsfehlstellungen hinterlassen schwerwiegende Einschränkungen des späteren Bewegungsumfanges (56).

Weitere Indikationen zum Einsatz der operativen Methode sind offene und pathologische Frakturen sowie Brüche mit schlechter Heilungstendenz oder neurovaskulärer Kompression (28).

Unter Berücksichtigung der Indikationen hat sich die elastisch stabile intramedulläre Nagelung schnell als State-of-the-Art Behandlung etabliert, da sie einfach zu lernen ist und gute Ergebnisse liefert (29,30). In den letzten Jahren war ein steigender Trend zu erkennen, einen größeren Anteil der diaphysären Unterarmfrakturen chirurgisch zu behandeln. Es konnte ein Anstieg der Rate der intramedullären Nagelung von 1,8 Prozent auf 22 Prozent, als Alternativbehandlung zur geschlossenen Reposition und Gipsimmobilisation, über die letzten zehn Jahre nachgewiesen werden. (56)

1.4.2. Operative Methode

Es handelt sich bei der ESIN um einen wenig invasiven und komplikationsarmen Eingriff in Vollnarkose, in dem unter Schonung der Epiphysenfugen zwei gebogene Pins über den Bruch hinweg in die Markhöhle eingebracht werden, wie es in Abbildung 21 gezeigt wird. So erzeugt man eine elastische Spannung. Die Nägel leiten, jeweils an drei Punkten des Knochens abstützend, Zug- und Druckkräfte in eine axiale Richtung und ermöglichen an der Frakturstelle geringe

Bewegungen, wodurch die Kallusbildung gefördert wird. Bereits am ersten postoperativen Tag ist die Mobilisation des Armes möglich. Im Großteil der Fälle können Patientinnen und Patienten auch am ersten postoperativen Tag entlassen werden (57).

Salonen A. et al. beschreiben in ihrer Arbeit eine Lagerung des Armes auf einem strahlendurchlässigen Tisch. Die Pins sollten zudem knapp über dem Knochenniveau gekürzt werden, um Hautirritationen zu verhindern (31).

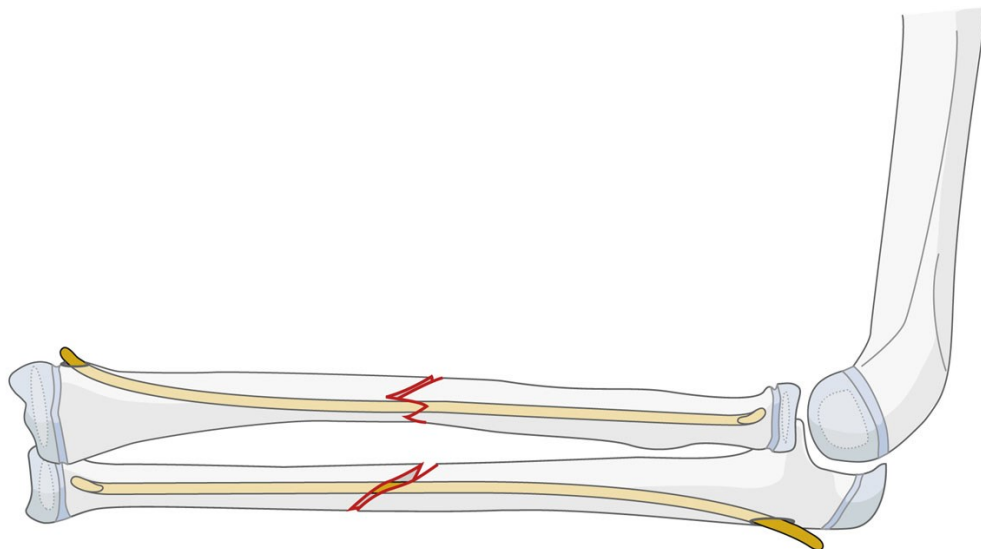


Abb. 21: Versorgung des Unterarmschaftes mit zwei elastischen Nägeln

1.4.3. Komplikationen

Die meisten pädiatrisch behandelten Unterarmschaftfrakturen weisen nach Behandlung ein exzellentes Outcome auf. Komplikationen wie verzögerte Frakturheilung sind bei Kindern selten, da bei Kindern durch ein erhöhtes Remodelingpotential die Heilung meist unkompliziert verläuft (58).

In der Arbeit von Fernandez et al.. zeigten sich bei 14 von 553 Patientinnen und Patienten eine verzögerte Konsolidation und bei sieben Patientinnen und Patienten die Ausbildung einer Pseudoarthrose nach Behandlung mit ESIN. Das Durchschnittsalter betrug hier 9,1 Jahre. Bei vier Kindern mit Pseudoarthroseausbildung war eine erneute Operation mit Plattenosteosynthese notwendig, bei drei kam es zur Spontanheilung (25).

Ausbleibende Konsolidation nach zwölf Wochen wurde als verzögerter Heilung klassifiziert. Frakturen ohne knöcherne Überbauung nach sechs Monaten wurden als Pseudoarthrose bezeichnet (25).

Alle sieben Fälle der Pseudoarthrose waren an der Ulna lokalisiert. Bei sechs Kindern im mittleren Schaftdrittel, bei einem im distalen Drittel (25).

Wright und Glowczweskie beschreiben hier eine Wasserscheidezone, bezüglich des intraossären Blutflusses im Mitteldrittel der Ulna. Bei Schädigung der periostalen Blutversorgung durch offene Frakturen oder offene Repositionsmethoden, kommt es zu mangelnder Blutversorgung (59). Die beiden Gefäße A. interossea anterior und A. interossea posterior sind wichtig für die Versorgung der Ulnadiaphyse. Die Untersuchungen ergaben, dass die vordere A. interossea zwischen 3 und 11 Äste im

Abstand von zwei Zentimetern zum Ulnaschaft entsendet. Die hintere entsendet zwischen 9 und 14 Äste im Abstand von einem Zentimeter (59).

Zusammengefasst wurde nachgewiesen, dass die Blutversorgung der Ulna von den segmental abgegebenen Ästen der vorderen und hinteren A. interossea abhängt. Diese sollten geschont werden, wenn eine Fraktur der Ulna im Schaftbereich versorgt wird (59).

Bezüglich der verzögerten Heilung beschreiben Fernandez et al. eine definitive Konsolidation zwischen der elften und sechzehnten postoperativen Woche. In 13 Fällen war die Ulna betroffen und in zwei der Radius. Die Lokalisation der Fraktur mit verzögerter Heilung war 14-mal im mittleren Drittel und nur einmal im distalen Drittel (25).

Bei fehlenden funktionalen Defiziten ist es im jugendlichen Alter durchaus möglich, den natürlichen Verlauf von hypertrophen Pseudoarthrosen abzuwarten. In einigen Fällen kommt es zur sukzessiven Achsenabweichung. In diesen Fällen muss eine Revision mit Korrektur und Stabilisation durchgeführt werden, da permanenter Verlust der Funktion befürchtet werden muss, trotz sekundärem Remodeling (25).

Verschiedene Gründe für die Ausbildung von Pseudoarthrosen werden in Studien genannt. Wall et al. beschreiben häufigeres Auftreten bei Verwendung von Titannägeln bei Frakturversorgung von Femurschäften im Kindesalter. Die Pseudoarthroserate beträgt hier 23,2 Prozent, wohingegen bei Verwendung von rostfreien Stahlnägeln die Rate nur bei 6,3 Prozent liegt (60).

Auch die Durchmesser der Nägel im Vergleich zum Durchmesser des medullären Kanals sind entscheidend (61,62).

Lascombes et al. haben gezeigt, dass der Durchmesser des Nagels mindestens 40 Prozent des Durchmessers des Markraums betragen muss, um Komplikationen wie Achsenverschiebungen und verzögerte Heilung zu verhindern (62).

Die Art der Fraktur und ihre Stabilität lassen auch Rückschlüsse über die Rate an Komplikationen zu (25,63).

Andere in Studien beschriebene Komplikationen sind Hautirritationen und Infektionen an der Nageleintrittsstelle, Parästhesien oder leichte Rotationseinschränkungen. Diese werden in 14,6 bis 16 Prozent der Fälle berichtet (28,30).

Schwere Komplikationen wie Kompartmentsyndrome, permanente Nervenläsionen oder schlechte technische Ergebnisse resultierend in Reoperationen werden seltener gesehen (64).

1.4.4. Technik und Biomechanik

Ein Titannagel erreicht laut Salonen et al. eine angemessene Steifigkeit, um eine Fixierung im Knochen herzustellen, während zusätzlich eine ausreichende Elastizität erhalten bleibt. Die Methode bietet semistabile Frakturfixation mit schneller Knochenheilung (31).

Aufgrund des hohen Remodelingpotentials im Kindesalter werden postoperativ verbliebener Deformitäten gut korrigiert (25). Obwohl solche persistierende Abweichungen gut toleriert werden, scheint eine Einigung darüber zu bestehen, dass eine Winkeldeformität von mehr als zehn Grad und eine Rotationsfehlstellung von mehr als 45 Grad nicht akzeptabel sind (65,66). Studien zeigen, dass die Auswirkungen des kindlichen Remodelings hier nicht abschätzbar sind, weshalb wie bei Kindern über 10 Jahren eine genaue anatomische Reposition erforderlich ist (25). Tarr et al. beschreiben in ihrer Arbeit eine Beziehung zwischen Struktur des Knochens und der Funktion. Demnach können Achsenabweichungen von fünf bis zehn Grad im Mittelteil des Schaftes des Unterarmes einerseits in einem Pronationsdefizit von zehn bis 83 Prozent resultieren, andererseits in einem Supinationsdefizit von fünf bis 27 Prozent (67).

1.4.5. Postoperatives Outcome

Flynn et al. beschreiben in ihrer Arbeit drei wichtige Faktoren welche das Outcome nach Unterarmschaftfrakturen beeinflussen (28).

- Offene oder geschlossene Reposition
- Zeitraum von Verletzung bis zur operativen Versorgung
- Patientinnen- und Patientenalter

Die Frakturheilungszeit wird in der Arbeit als signifikant länger beschrieben, wenn die intramedulläre Nagelung in Kombination mit intraoperativer offener Reposition erfolgt. Im Durchschnitt betrug sie hier 8,6 Wochen im Vergleich zu 6,9 Wochen bei geschlossener Reposition. Noch längere Heilungszeiten wurden bei offenen Frakturen beobachtet. Im Mittel betrug die Zeit bis zur Konsolidierung hier 9,75 Wochen (28).

Die Zeit bis zur Versorgung wirkt sich laut Flynn et al. auf das Entstehen eines Kompartmentsyndroms aus. Bei zwei von 30, innerhalb von 24 Stunden nach Verletzung, behandelten Patientinnen und Patienten entwickelte sich diese Komplikation. Hingegen bei 73 Kindern und Jugendlichen, welche später als 24 Stunden nach Verletzung behandelt wurden, kein Kompartmentsyndrom auftrat (28).

Signifikant war der Unterschied in der Häufigkeit einer verzögerten Wundheilung, im Bezug auf das Alter der Patientinnen oder Patienten. Bei sechs (13%) Kindern von 47 im Alter von zehn Jahren oder jünger traten verzögerte Heilungen auf. In der Altersgruppe von zehn Jahren oder älter trat diese Komplikation bei 17 (30%) von 56 Patientinnen und Patienten auf. Die Rate der verzögerten Heilungen scheint also bei zunehmenden Patientinnen- und Patientenalter zu steigen (28).

Insgesamt hatte die Versorgung mittels intramedullärer Nagelung eine generelle Komplikationsrate von 14,6 % (28).

In der Studie von Salonen et al.. wurden 35 Kinder, mit einem Durchschnittsalter von 12,3 Jahren, nach ESIN Behandlung am Unterarm vorgestellt, wobei sich bei 23 (66 %) Patientinnen und Patienten keine postoperativen Komplikationen, bei elf (31 %) Patientinnen und Patienten wenig schwerwiegende Komplikationen, wie vorübergehende Nervenläsionen oder Hautläsionen aufgrund prominenter Nägel, und bei einem männlichen Patienten (0,3 %) eine schwere Komplikation, im Sinne einer Volkmann'schen ischämischen Kontraktur einstellte. Auch hier korrelierte die Komplikationsrate mit dem Patientinnen- und Patientenalter. 67% der Komplikationen ereigneten sich bei Patientinnen und Patienten über zehn Jahren, bei einem Durchschnittsalter von 14,1 Jahren. Bei den unter zehnjährigen Kindern wurden hingegen nur 33% der Komplikationen beobachtet. Hier belief sich der Altersschnitt auf 6,9 Jahre. Die Autoren schlussfolgern, dass bei Kindern über zehn Jahren die Plattenosteosynthese eine bessere Alternative zur ESIN sein könnte (31).

Fernandez et al. beschreiben zusätzlich noch eine erhöhte Rate an sekundären Korrekturverlust nach Versorgung mit Nagel, vor allem im distalen Drittel des Unterarmes, ähnlich wie es in Abbildung 22 in der Röntgenaufnahme eines 13-jährigen zu sehen ist. In vier von insgesamt sechs beschriebenen Fällen eines Korrekturverlustes, war dieser im distalen Drittel eingetreten. In zwei der sechs Fälle war laut Fernandez et al. allerdings ein technischer Fehler, im Sinne eines zu geringen Durchmessers des Nagels, der Grund für den Verlust (25). Das distale Drittel scheint eine nicht ideale Lokalisation für die Einbringung



Abb. 22: Postoperative Deviation um 13° des Radius bei einem 13-jährigem Jungen 7 Monate nach Operation

eines Nagels zu sein. Das distale Fragment ist laut Fernandez et al. zu kurz, und könne vom Nagel nicht richtig in Position gehalten werden (25). Ein Fixateur externe ist hier für einige Autoren eine bevorzugte Alternative (56,68). Fernandez et al. gehen aber davon aus, dass ein richtig angepasster Unterarmgips für zwei bis vier Wochen, in Kombination mit einer intramedullären Nagelung, ausreicht, um einen Korrekturverlust zu verhindern beziehungsweise signifikant zu vermindern (25). In manchen Arbeiten wird von einer Versorgung mit ESIN im distalen Drittel des Unterarmes abgeraten (56,68).

In der Studie von Fernandez et al. wird aber davon ausgegangen, dass bei adäquater Stabilität, welche durch Nägel von ausreichender Dicke erreicht werden soll, die Methode der intramedullären Nagelung auch im distalen Drittel den anderen operativen Methoden wie externem Fixateure oder Verplattung vorzuziehen ist (25).

Die Anwendung der ESIN bei Frakturen im Erwachsenenalter ist mit einer erhöhten Komplikationsrate vergesellschaftet. Laut Schulte et al. sollten Patientinnen und Patienten mit einfachen Unterarmschaftfrakturen im Erwachsenenalter mittels offener Reposition und Plattenosteosynthese versorgt werden. Die Hauptindikation dieser internen Versorgung besteht laut Schulte et al. in der Neigung zur verzögerten oder ausbleibenden Heilung bei Erwachsenen und konsekutivem Verlust von Rotationsumfang des Unterarmes. Bei komplexen Frakturen des Unterarmes besteht das Hauptziel in einer Kontrolle der Bewegungen im Frakturspalt, weniger in einer Elimination der Bewegungen (69).

1.4.6. Ökonomische Aspekte

Eine Kostenerhebung diverser Behandlungsoptionen hat gezeigt, dass die Methode der ESIN, unter Annahme eines komplikationslosen Verlaufs, im Vergleich zur konservativen Therapie, sowohl bei ambulanter als auch stationärer Leistungserbringung mit größeren Kosten vergesellschaftet ist. Unter konservativer Versorgung ist die Erreichung einer ausreichenden Stabilität aber oft nicht möglich. Damit verbundene weitere Interventionen sind kostenintensiv und belastend für die Patientinnen und Patienten (57).

2. Spezieller Teil

2.1. Patientinnen, Patienten und Methoden

2.1.1. Ethikkommission

Die Arbeit wurde von der Ethikkommission der Medizinischen Universität Graz bewilligt (EK Nummer 26-461 ex 13/14).

2.1.2. Retrospektive Datenanalyse und Kollektiv

In das Studienkollektiv aufgenommen wurden alle Kinder und Jugendlichen im Alter zwischen 12 und 18 Jahren, welche im Zeitraum von 2004 bis 2014 an der Universitätsklinik für Kinder- und Jugendchirurgie aufgrund einer Unterarmschaftfraktur mittels ESIN behandelt wurden. Patientinnen und Patienten mit unilateralem Frakturgeschehen wurden ausgeschlossen. Eine retrospektive Analyse aller behandelten Patientinnen und Patienten wurde im Dokumentationssystem MEDOCS, nach entsprechend eingeholter Erlaubnis und Zugangsberechtigung durchgeführt. Es wurde hierbei auf verschiedene Merkmale besondere Rücksicht genommen.

- Patientinnen- und Patientenalter
- Frakturlokalisierung
- Frakturmorphologie
- Frakturentstehung
- Verhältnis von Nageldurchmesser zum Isthmus des intramedullären Kanals
- Operationsdauer
- Konsolidierung/Heilungszeit
- Komplikationen
- Dauer des Krankenhausaufenthalt
- Zeitraum bis zur Entfernung der Implantate

Die Daten wurden entsprechend in Microsoft Excel zur weiteren Verwaltung und Bearbeitung exportiert.

2.1.3. Patientinnen- und Patientenuntersuchung

Anschließend an die Auswertung des Patientinnen- und Patientenkollektives wurden die Patientinnen und Patienten eingeladen, an einer funktionellen Nachuntersuchung teilzunehmen. Hierfür wurden einheitliche formelle Briefe ausgesandt und ein Antwortschreiben mit Einwilligungserklärung beigelegt. Die Untersuchungen fanden an der Universitätsklinik für Kinder- und Jugendchirurgie statt, waren freiwillig und konnten jederzeit ohne Angabe von Gründen verweigert werden. Es handelte sich um eine klinische Nachkontrolle ohne erneute Röntgenaufnahme, also ohne eine zusätzliche Strahlenbelastung. Während der Untersuchungen wurden die Patientinnen und Patienten hinsichtlich fünf Kriterien, immer im Seitenvergleich, beurteilt.

- Umfang der Handgelenksbeweglichkeit
- Umfang der Ellenbogenbeweglichkeit
- Umfang der Pro- und Supinationsbewegungen des Unterarms
- Griffstärke
- Pro- und Supinationsstärke

Der Bewegungsumfang im Handgelenk wurde unter zu Hilfenahme eines transparenten Plastikgoniometers beurteilt. Die Teilnehmer wurden gebeten, bei frei hängendem Arm eine maximale Extensionsstellung und anschließend eine maximale Flexionsstellung im Handgelenk einzunehmen. Festgehalten wurden die Daten in einer eigenen Microsoft Excel Tabelle mittels Neutral-Null-Methode. Beurteilt wurde hier der gesamte Bewegungsumfang, also Flexion plus Extension addiert und der Vergleich von gesunder Seite zu der mit ESIN behandelten Seite. Der Umfang der Ellenbogenbeweglichkeit wurde ebenfalls mittels Goniometer in hängender Armposition bestimmt. Auch hier war die Gesamtbeweglichkeit und der

Vergleich der Seiten Beurteilungskriterium. Die erhobenen Werte wurden nach Neutral-Null-Methode in selbige Microsoft Exceltabelle übertragen.

Pronations- und Supinationsbewegung wurden gemeinsam mit der Drehstärke im Unterarm beurteilt. Hierzu wurde ein analoges Dynamometerset für Handgelenks- und Unterarmbeurteilung von Baseline® (Baseline® 1015357) benutzt. Das Set enthielt einen Handgelenks-Inklinometer Baseline® und einen hydraulischen Handgelenks-Dynamometer Baseline® mit Türknauf. Der Inklinometer diente der Beurteilung des Bewegungsumfanges. Die Patientinnen und Patienten wurden gebeten, das Gerät bei 90-gradiger Flexion im Ellenbogengelenk und hängender Schulter, bei 0 Grad nach Neutral Null Methode, zu umfassen und aus dieser Position heraus die maximal mögliche Pro- beziehungsweise Supinationsbewegung durchzuführen. Die Werte wurden anschließend in die Microsoft Exceltabelle übernommen. Die maximal erreichbare Kraft wurde mit dem Dynamometer erhoben. Dazu wurde das Gerät auf einem Untersuchungstisch vom Untersucher fixiert und die Patientinnen und Patienten gebeten, bei 90-Grad Flexion im Ellenbogen den Türknauf in Neutralstellung zu fassen. Anschließend sollte eine Pronation mit maximaler Kraft, gefolgt von einer Supination in Maximalkraft durchgeführt werden. Die Kraftgradmessung wurde anschließend vier Mal wiederholt, um ein verwertbares Durchschnittsergebnis zu erzielen, welches in die Datentabelle übernommen wurde. Zur Ermittlung der Griffstärke wurde ein hydraulischer Handdynamometer Baseline® (Hydraulic Hand Dynamometer, Fabrication Enterprises, Inc., 3 Westchester Plaza STE 111; Elmsford, Ny 10523; USA) eingesetzt. Die Patientinnen und Patienten wurden gebeten, das Gerät bei 90-Grad Elevation im Schultergelenk und maximaler Extension im Ellenbogen stabil zu umfassen. Bei Bedarf wurde der Griffumfang des Gerätes auf die Patientinnen und Patienten angepasst. Anschließend wurde von den Patientinnen und Patienten verlangt mit maximal möglicher Kraft die Bewegung eines Faustschlusses durchzuführen. Insgesamt wurden fünf Messungen auf beiden Seiten durchgeführt, und die Ergebnisse in die Microsoft Excel Tabelle übertragen. Auch bei der Messung der Kraftgrade wurden die Werte der unverletzten Seite mit der operativ versorgten Seite verglichen. Die Ergebnisse wurden neben der Übertragung in die Microsoft Exceltabelle zusätzlich mit dem Statistikprogramm IBM SPSS (Version 22.0) ausgewertet. Hierbei wurden die erhobenen Werte wie beispielsweise Griffstärke, über die Kategorie der Seite

miteinander verglichen. Zuerst wurde mittels Kolmogorow-Smirnow-Test eine Normalverteilung der Ergebnisse ausgeschlossen. Anschließend wurde mittels Mann-Whitney-U-Test bei unabhängigen Stichproben die Nullhypothese überprüft. Als Nullhypothese wurde angenommen, dass die Verteilung der erhobenen Griffstärken beziehungsweise der Bewegungsumfänge, über die Kategorie Seite ident ist. Dementsprechend sollten die Patientinnen und Patienten auf der behandelten Seite dieselben Ergebnisse erzielen wie auf der unverletzten Seite. Das Niveau des p-Wertes für statistische Signifikanz und Verwerfung der Nullhypothese wurde bei $p=0,05$ festgelegt.

Zum besseren Verständnis der Ergebnisse wurden für jede Patientinnen und jeden Patienten anhand der erhobenen Untersuchungsbefunde des Weiteren individuelle Scorewerte erstellt. Es wurden dazu zwei Traumascores benutzt. Als erstes verwendet wurde der Mayo Wrist Score (70). Insgesamt liegt die zu erreichende Punktezahl dieses Scores bei 100, welche in insgesamt vier Kategorien unterteilt ist. Jeweils 25 Punkte sind in den Bereichen Schmerzassessment, postoperative Zufriedenheit, Bewegungsumfang und Griffstärke im Vergleich zur Gegenseite zu erreichen (70,71). Höhere Werte sprechen für ein besseres Outcome, wobei ein Scorewert vom 100 bis 90 als exzellent, ein Wert von 89-80 als gut, ein Wert von 79-65 als ausreichend und ein Wert von weniger als 64 als schlecht klassifiziert sind (70).

Zusätzlich wurde der Cooney Bussey Score erhoben (72). Dieser ähnelt dem Mayo Wrist Score, da hier ebenfalls 100 Punkte zu erreichen sind, unterteilt in die vier Kategorien Schmerz, Rückkehr zu normaler Arbeit, Bewegungsumfang und Griffstärke im Vergleich zur Gegenseite (72). Die Klassifizierung erfolgt nach den erreichten Punktwerten im Bereich von 100 bis 90 Punkten als ausgezeichnet, von 89-80 als gut, von 79-65 als ausreichend und im Bereich unter 65 als mangelhaft (72). Der Unterschied in den Scorewerten liegt in der Bewertung der subjektiven Zufriedenheit der Patientinnen und Patienten durch den Mayo Wrist Score einerseits, und andererseits durch die Bewertung der Arbeitsfähigkeit der Patientinnen und Patienten durch den Cooney Bussey Score. Die Scorekategorien sind in Tabelle 1 nochmals zusammengefasst.

Mayo Wrist Score	Cooney Bussey Score
Schmerz	Schmerz
Zufriedenheit	Arbeitsfähigkeit
Bewegungsumfang	Bewegungsumfang
Griffstärke	Griffstärke

Tab. 1: Übersicht über Scorekategorien

Am Ende der Untersuchungen wurde zusätzlich, gemeinsam mit den Patientinnen und Patienten ein 30 Fragen umfassender Disability of the Arm, Shoulder and Hand- Score, kurz DASH-Score, ausgewertet. Dieser ist laut Stürmer der empfohlene Score nach Radiusfrakturen (73). Hierbei handelte es sich um 30 Fragen zu Alltagssituationen, welche die Patientinnen und Patienten mit Werten von 1, ich habe keine Probleme, bis 5, ich bin dazu nicht fähig, bewerten sollten (74). Mindestens 27 der 30 Fragen müssen beantwortet werden, um ein verwertbares Ergebnis zu erhalten. Aus den Summen der Antwortwerte wird ein Durchschnittswert gebildet. Dieser liegt zwischen 1 und 5 und wird anschließend in einen Score zwischen 0 und 100 umgewandelt. Dazu wird vom Durchschnittswert der Wert 1 subtrahiert und darauf mit 25 multipliziert. Diese Umwandlung macht es nun leichter, den DASH Score mit den anderen Scores zwischen 0 und 100 zu vergleichen. Höhere Werte sprechen für größere Einschränkungen im Alltag (75). Der Scorewert wurde ebenfalls in die Microsoft Excel Tabelle übertragen.

Insgesamt meldeten sich auf die Einladungsschreiben acht Patientinnen und Patienten, mit denen eine funktionelle Nachuntersuchung durchgeführt wurde. Bei zwei weiteren war eine telefonische Erhebung des DASH- Scores möglich.

2.2. Ergebnisse

2.2.1. Ergebnisse der retrospektiven Analyse

Insgesamt belief sich die Zahl der inkludierten Patientinnen und Patienten auf 24, davon 3 (12,5 %) weibliche Patientinnen und 21 (87,5 %) männliche Patienten.

Das Durchschnittsalter des gesamten Kollektivs betrug 13,25 Jahre bei einem Medianalter von 13 Jahren. Das jüngste Kind war 12 Jahre alt, das älteste 16.

17 der 24 (70,7 %) Frakturen waren bedingt durch Sportunfälle, 4 (16,7 %) durch Unfälle im häuslichen Alltag, wie beispielsweise dem Umfallen mit einem Stuhl, eine (4,2 %) durch einen Verkehrsunfall und eine (4,2 %) durch einen Sturz in der Schule. Ein Fall (4,2 %) einer Refraktur nach Gipsimmobilisation wurde sekundär mittels ESIN behandelt und somit auch in die Studie aufgenommen.

6 von 24 (25 %) Frakturen des Radius wurden als Grünholzfraktur klassifiziert, 16 (66,7 %) als komplette Querfraktur und 2 von 24 (8,3 %) als 1-gradig offene Fraktur. Im Bereich der Ulna waren 7 von 24 (29,2 %) Brüchen Grünholzfrakturen, 15 (62,5 %) komplette Querfrakturen und 2 (8,3 %) 1-gradig offene Frakturen.

Am Radius befanden sich 18 von 24 (75 %) Frakturen in der Schaftmitte, 3 (12,5 %) am Übergang vom mittleren auf das distale Drittel, 2 (8,3 %) im distalen Drittel und eine (4,2 %) am Übergang vom proximalen auf das mittlere Drittel. An der Ulna waren 17 von 24 (70,8 %) Frakturen in der Schaftmitte, 3 (12,5 %) am Übergang von mittlerem auf das distale Drittel, 3 (12,5 %) im distalen Drittel und eine (4,2 %) am Übergang vom proximalen auf das mittlere Drittel lokalisiert.

Der Knochenzugang zur Nagelinsertion wurde am Radius in allen Fällen distal am Unterarm proximal der Wachstumsfuge im Bereich des Processus styloideus radii gewählt. An der Ulna erfolgte der Zugang in allen Fällen von proximal über das Olecranon. In 22 von 24 (91,7 %) Fällen wurde eine geschlossene Reposition durchgeführt, lediglich bei den zwei beschriebenen Fällen einer 1-gradig offenen Fraktur wurde offen reponiert.

Das gewählte Verhältnis von Nageldurchmesser zum Durchmesser des Knochenkanals lag radialseitig im Durchschnitt bei 66,7% bei einem Minimalwert von 50% und einem Maximalwert von 83%. Der mediane Durchmesser betrug 60%. Ulnarseitig belief sich das durchschnittliche Verhältnis auf 59,2% bei einem Minimalwert von 41% und einem Maximalwert von 83%. Hier betrug der mediane Durchmesser ebenso 60%.

Die mittlere Operationsdauer, gemessen vom Hautschnitt bis zur Hautnaht betrug 41 Minuten, bei einer Maximaldauer von 108 Minuten und einer Minimaldauer von 17 Minuten. Anschließend verbrachten die Patientinnen und Patienten im Durchschnitt 2,25 Tage im Krankenhaus, bei einer Maximaldauer von 4 Tagen und einer Minimaldauer von einem Tag. Die mediane Aufenthaltsdauer betrug 2 Tage.

Eine Entfernung der Implantate erfolgte im Schnitt nach 8,2 Monaten bei einer maximalen Residualdauer von 14 Monaten und einer Minimaldauer von 2 ½ Monaten. Die mediane Dauer betrug 8 Monate.

Die Auswertung der Daten der 24 in die Arbeit eingeschlossenen Patientinnen und Patienten ergab bei 15 (62,5%) Kindern und Jugendlichen keine postoperativen Komplikationen und bei 7 (29,1%) eine oder mehrere leichte Komplikationen. Ein (4,2%) Patient wies in der Nachuntersuchung eine postoperative Faszienlücke auf. Eine (4,2 %) Patientin wurde auswärts weiterversorgt und daher konnten keine Ergebnisse ausgewertet werden.

Bei den Komplikationen handelte es sich in 3 Fällen um vorübergehende Nervenläsionen. Davon kamen zweimal intermittierende Parästhesien im Bereich des R. superficialis n. radialis, aufgrund prominenter Nägel und einmal ein Sensibilitätsverlust im Bereich des vierten und fünften Fingers ulnar vor. Diese verschwanden allerdings ohne therapeutische Intervention nach Metallentfernung. In vier Fällen kam es zu einem Serom im Bereich der Operationwunde, welche keiner weiteren Behandlung bedurften. Postoperative Bewegungseinschränkungen waren die häufigsten Komplikationen. Drei Fälle von länger andauernder eingeschränkter Pro- und Supinationsfähigkeit waren auszumachen, wobei der volle Bewegungsumfang zum Zeitpunkt der Nagelentfernung wieder erreicht wurde. Bewegungseinschränkungen im Handgelenk waren bei einem Patienten zu beobachten, welche sich ebenfalls nach Metallentfernung normalisierten. Im Ellenbogengelenk waren keine andauernden Limitationen erkennbar. Bei einem Patienten zeigt sich in der funktionellen Nachuntersuchung eine postoperative Faszienlücke. Dieser fiel durch eine, etwa zwei cm im Durchmesser haltende, Hautvorwölbung, bei Muskelkontraktion auf und präsentierte sich in der Untersuchung schmerzlos und für den Patienten nicht weiter störend. Die genaue Komplikationsaufteilung über die verschiedenen Patienten ist in Tabelle 2 ersichtlich.

Patientinnen und Patienten	Alter	Komplikationen
1	15	Postoperativer Fasziendefekt, Läsion des R. superficialis n. radialis, eingeschränkte Pro-/Supination
2	12	Serom im Bereich der Operationswunde, eingeschränkte Pro-/Supination
3	14	Läsion des R. Superficialis n. radialis
4	12	Serom im Bereich der Operationswunde
5	15	Serom im Bereich der Operationswunde
6	14	eingeschränkte Pro-/Supination
7	16	Serom im Bereich der Operationswunde
8	14	Sensibilitätsverlust im Bereich des vierten und fünften Fingers ulnar

Tab. 2: Übersicht über Komplikationsvorkommen im Patientenkollektiv

Die Frakturheilungszeit wurde über vorhandene Röntgenbilder bestimmt. Als Heilungszeitpunkt wurde der Aufnahmetag des Röntgenbildes herangezogen, welches als erstes eine knöcherne Konsolidierung beider Knochen zeigte. Die Frakturheilungszeit lag in 4 von 24 Fällen zwischen 2 und 5 Monaten, in 17 von 24 Fällen zwischen 5 und 8 Monaten und in 2 Fällen zwischen 8 und 10 Monaten. Aufgrund der Nachsorge einer Patientin alio loco konnte die Frakturheilungszeit hier nicht ermittelt werden. In einer Überprüfung von Frakturheilungszeit im Bezug auf die verwendete Nageldicke der einzelnen Patientinnen und Patienten, konnte weder an der Ulna noch am Radius ein Zusammenhang zwischen Heilungsdauer und verwendetem Nageldurchmesser gezeigt werden. Die Patientinnen und Patienten wurden hierzu entsprechend ihrer Nageldurchmesser in drei Gruppen zusammengefasst, und anschließend anhand der Frakturheilungszeit analysiert, wie in Abbildung 23 und 24 dargestellt.

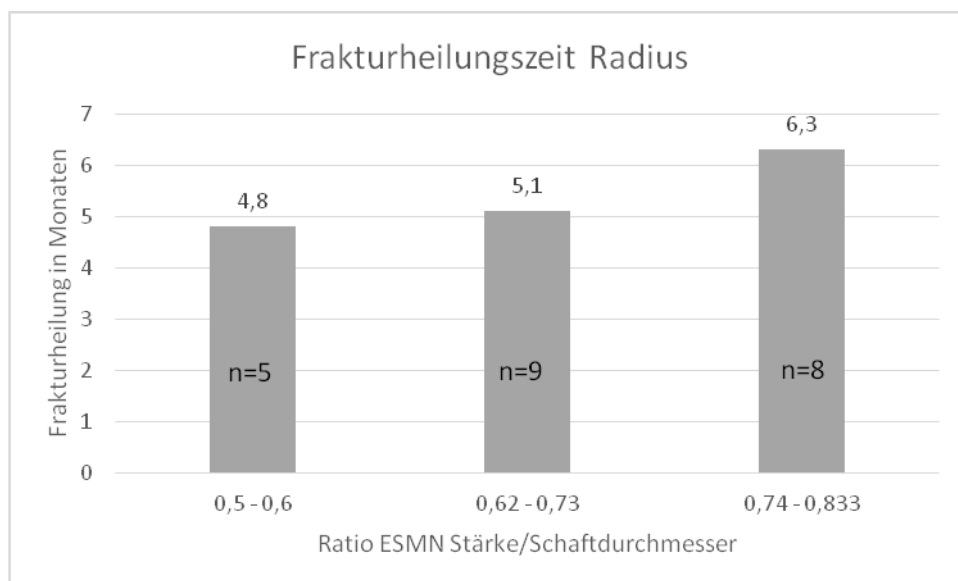


Abb. 23: Heilungszeiten im Bezug auf verwendete Nagelstärken bei Radiusversorgung

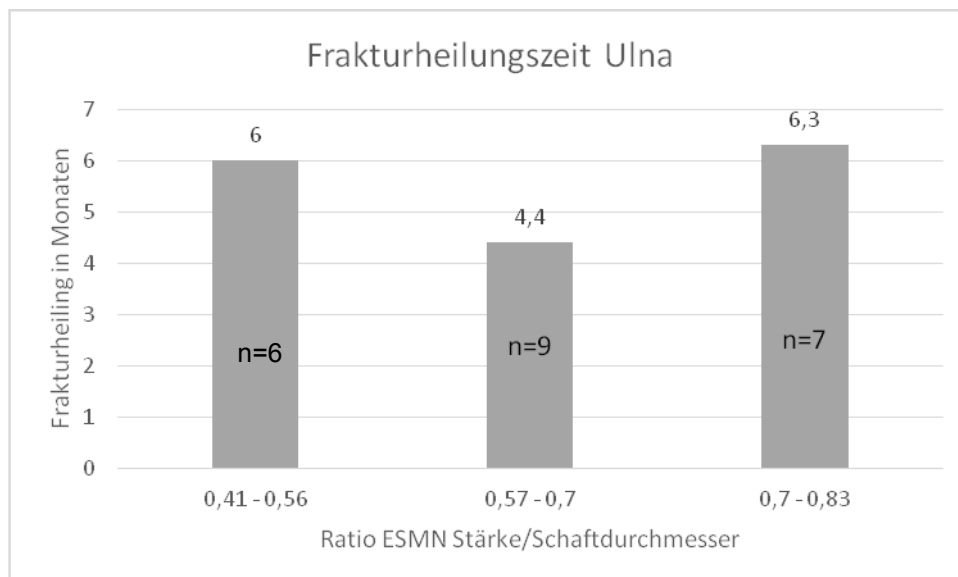


Abb. 24: Heilungszeiten im Bezug auf verwendete Nagelstärken bei Ulnaversorgung

2.2.2. Ergebnisse der Patientinnen- und Patientennachuntersuchung

Insgesamt erklärten sich 8 von 24 Patientinnen und Patienten zur Nachuntersuchung bereit, davon eine weibliche Patientin und 7 männliche Patienten. Das Durchschnittsalter der nachuntersuchten Patientinnen und Patienten betrug 13 Jahre, bei einem Altersbereich von maximal 15 bis minimal 12 Jahren. Die durchschnittliche Dauer bis zur follow-up Untersuchung betrug 5 Jahre und 5,4 Monate. Die längste Zeitspanne bis zur Nachuntersuchung betrug 10 Jahre und 6 Monate und die kürzeste Zeit betrug 1 Jahr und 8 Monate. Die statistische Auswertung der Ergebnisse mittels SPSS ergab in allen untersuchten Bereichen eine Bestätigung der Nullhypothese.

Im Durchschnitt erreichten die Patientinnen und Patienten in der Untersuchungskategorie Ellenbogenbeweglichkeit an der gesunden Seite einen Bewegungsumfang von 150,63 Grad bei einem Standardfehler von 3,196. Der Medianwert lag hier bei 150 Grad, der Maximalwert bei 170 Grad und die minimale Bewegungsumfang bei 140 Grad. Die behandelte Seite erreichte im Schnitt Umfänge von 148,75 Grad bei einem Standardfehler von 1,83. Der Medianwert lag hier wie auf der Gegenseite bei 150 Grad, mit einem Maximalwert von 155 Grad und einem Minimalwert von 140 Grad. Der Seitenvergleich ergab einen p Wert von 0.959. Es gab somit keinen statistisch signifikanten Unterschied im Bewegungsumfang, bezüglich der beobachteten Seite, die Nullhypothese wurde beibehalten.

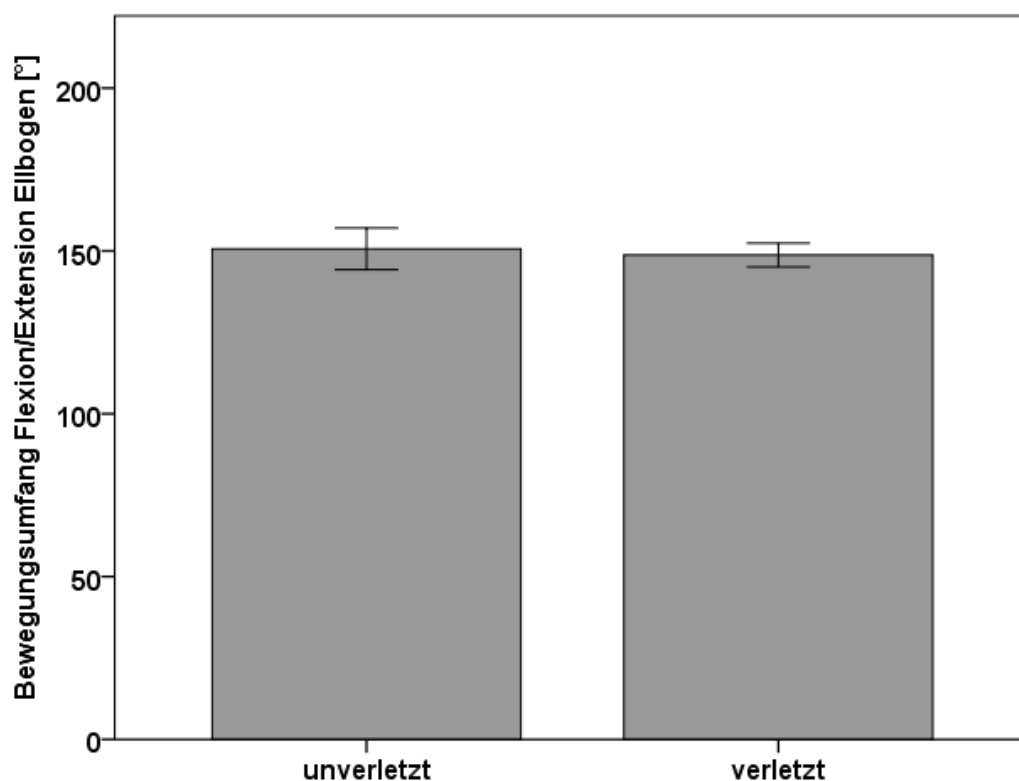


Abb. 25: Messungsergebnis des durchschnittlich möglichen Bewegungsumfanges im Ellenbogengelenk

Die Beweglichkeit im Handgelenk war im Durchschnitt an der gesunden Seite im Umfang von 146,88 Grad möglich bei bestehendem Standardfehler von 6,61. Der Medianwert lag bei 145 Grad, der maximale Bewegungsumfang betrug 170 Grad, der Minimalwert 120 Grad. Auf der Seite nach Frakturbehandlung war der durchschnittliche Bewegungsumfang bei 141,25 Grad bei einem Standardfehler von 5,067. Der ermittelte mediane Gesamtbewegungsgrad lag bei 140 Grad, der Maximalwert bei 160 Grad und der Minimalwert bei 120 Grad. Der für den Seitenvergleich der Handgelenksbeweglichkeit ermittelte p-Wert lag bei 0,574. Die Nullhypothese wurde beibehalten.

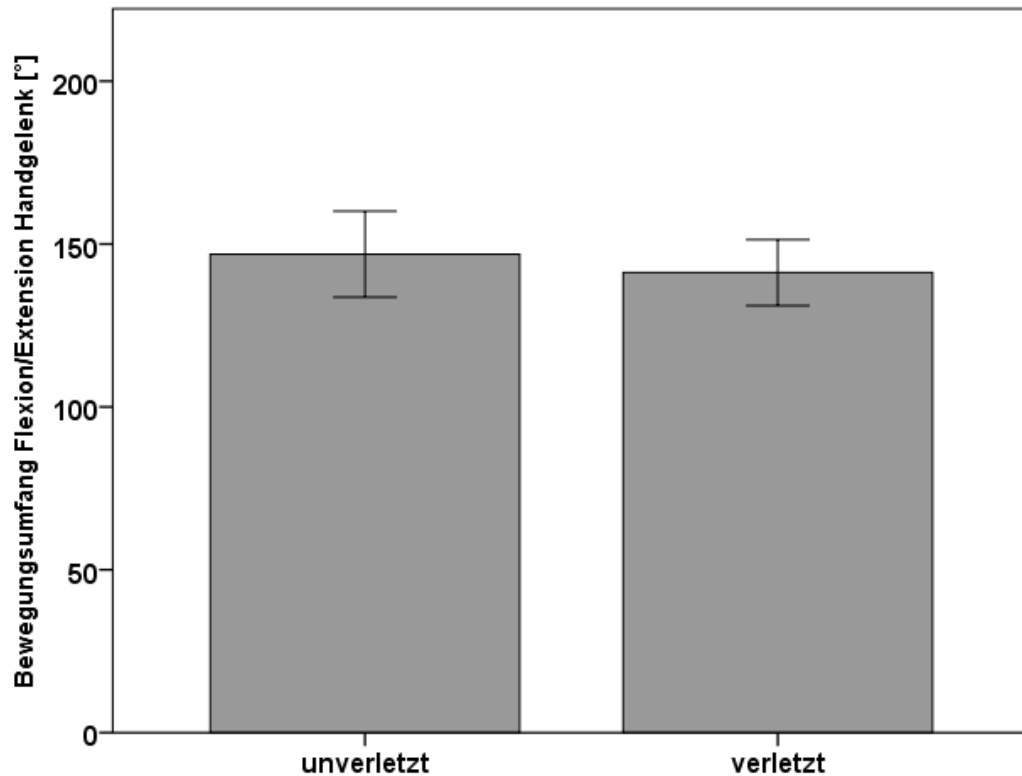


Abb. 26: Messungsergebnis des durchschnittlich möglichen Bewegungsumfanges im Handgelenk

Umwendbewegungen der Hand im Sinne einer Pro- und Supinationsbewegung waren an der gesunden Seite im Durchschnitt in einem Umfang von 205,63 Grad möglich, bei einem Standardfehler von 6,229. Der Medianumfang lag bei 200 Grad, der Maximalumfang bei 240 Grad und der Minimalumfang bei 190 Grad. Die Seite nach Fraktur ließ im Durchschnitt eine Bewegung um 208,13 Grad zu, bei einem Standardfehler von 4,002. Der mediane Wert betrug hier 207,5, der Maximalwert des Umwendeumfanges betrug 225 Grad, der Minimalwert 195 Grad. Der errechnete p-Wert betrug 0,505, somit wurde die Nullhypothese nicht verworfen. Alle erhobenen Werte, bezüglich der Bewegungsumfänge sind nochmals in Tabelle 3 zusammengefasst.

Bewegungsumfänge nicht versorgte Seite			
	Ellenbogen	Handgelenk	Pro-/Supination
Durchschnitt	150,63	146,88	205,63
Maximum	170	170	240
Minimum	140	120	190
Median	150	145	200
Bewegungsumfänge versorgte Seite			
	Ellenbogen	Handgelenk	Pro-/Supination
Durchschnitt	148,75	141,25	208,13
Maximum	155	160	225
Minimum	140	120	195
Median	150	140	207,5

Tab. 3: Übersicht über alle erhobenen Bewegungsumfangswerte

In der Kategorie Pronationsstärke war auf der gesunden Seite eine Durchschnittskraft von 81,13 Kilogramm bei einem Standardfehler von 9,663 zu erheben. Der mediane Stärkewert betrug 77,5 bei einem Maximalwert von 136 Kilogramm und einem Minimalwert von 53 Kilogramm. Auf der Seite nach Behandlung betrug die Durchschnittskraft 87,63 Kilogramm bei einem Standardfehler von 11,526. Die Mediankraft lag bei 94 Kilogramm, die Maximalkraft bei 140 Kilogramm und die Minimalkraft bei 37 Kilogramm. Auch hier war kein signifikanter Unterschied zu ermitteln, der p-Wert betrug 0,574.

Die durchschnittliche Kraft der Supinationsbewegung der Patientinnen und Patienten lag auf der gesunden Seite bei 87,38 Kilogramm, bei einem Standardfehler von 13,569. Die Mediankraft belief sich auf 87,5 Kilogramm, die Maximalkraft auf 161 Kilogramm und die Minimalkraft auf 34 Kilogramm. Auf der behandelten Seite erreichten die Patientinnen und Patienten eine Durchschnittsstärke von 94,5 Kilogramm bei einem Standardfehler von 13,019. Der erhobene mediane Kraftwert betrug 96, der Maximalwert 142 und der Minimalwert 36. Der p-Wert belief sich auf 0,505, weshalb kein signifikanter Unterschied zwischen den Seiten bestand.

Auf der gesunden Seite wurde eine durchschnittliche Griffstärke von 47,63 Kilogramm erreicht. Der mediane Kraftwert betrug 42 Kilogramm, bei einem Maximalwert von 108 Kilogramm und einem Minimalwert von 22 Kilogramm. Auf der ehemals osteosynthetisch versorgten Seite war die durchschnittliche Kraft 50 Kilogramm. Hier lag der mediane Kraftwert bei 45 Kilogramm, bei einem Maximalwert von 112 Kilogramm und einem Minimalwert von 28 Kilogramm. Bei einem p-Wert von 0,798 zeigte sich kein signifikanter Unterschied in der

Griffstärke über die zwei verschiedenen Seiten. Eine übersichtliche Darstellung der erhobenen Kraftwerte findet sich in Tabelle 4.

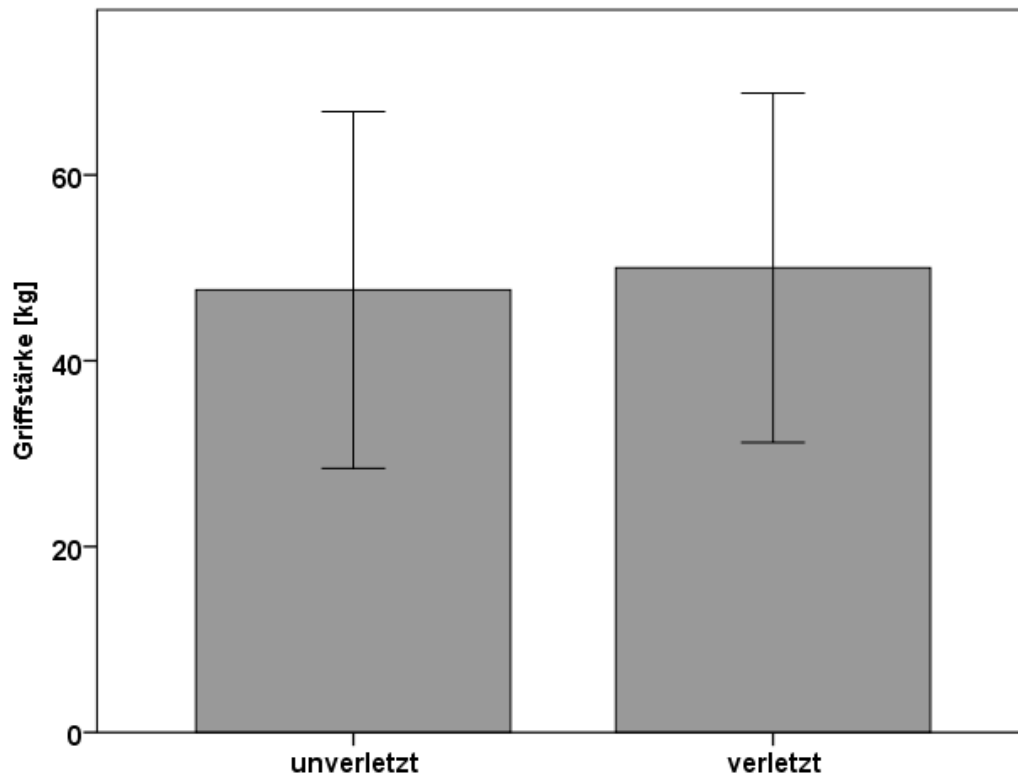


Abb. 27: Messungsergebnis der durchschnittlich möglichen Griffstärke

Kraftmessungen nicht versorgte Seite			
	Pronationstärke	Supinationstärke	Griffstärke
Durchschnitt	81,13	87,38	47,63
Maximum	136	161	108
Minimum	53	34	22
Median	77,5	87,5	42
Kraftmessungen versorgte Seite			
	Pronationstärke	Supinationstärke	Griffstärke
Durchschnitt	87,63	94,5	50
Maximum	140	142	112
Minimum	37	36	28
Median	94	96	45

Tab. 4: Übersicht über alle erhobenen Kraftwerte

Die Ausarbeitung des ermittelten Mayo Wrist Scores ergab bei 4 von 8 Patientinnen und Patienten ein exzellentes Ergebnis und 4 von 8 ein gutes Ergebnis. Die maximale Punktzahl von 100 wurde dabei von 2 (25 %) Patientinnen und Patienten erreicht. Der niedrigste berechnete Wert lag bei 80 Punkten und

wurde für 3 (37,5%) Patientinnen und Patienten ermittelt. In weiteren 2 (25 %) Fällen belief sich der Score auf 90 und ein (12,5 %) Patient erreichte einen Scorewert von 85.

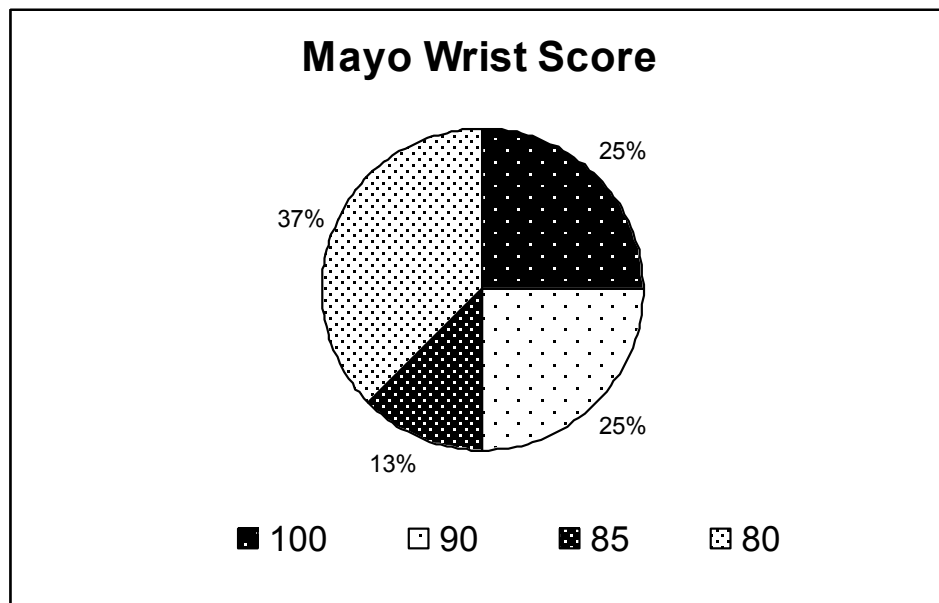


Abb. 28: Verteilung der Mayo Wrist Scorergebnisse

Bei der Einteilung mittels Cooney Bussey Score erreichten 4 von 8 Patientinnen und Patienten ein ausgezeichnetes Ergebnis und 4 ein gutes Ergebnis. Der Maximalscore von 100 Punkten wurde hier von 2 (25 %) Patientinnen und Patienten erreicht, bei 2 (25 %) belief der Scorewert auf 90 Punkten. Bei 2 (25 %) Patientinnen und Patienten ergaben die Untersuchungswerte einen Score von 85. Der kleinste Scorewert wurde bei 2 (25%) Patientinnen und Patienten ermittelt und lag bei 80 Punkten.

Die Auswertung des DASH Scores ergab bei 8 von 10 (80%) Befragten das Scoreergebnis 0. Bei einem Patienten wurde ein DASH-Score von 0,86 ermittelt. Der letzte der befragten Patientinnen und Patienten erreichte einen Wert von 4,3.

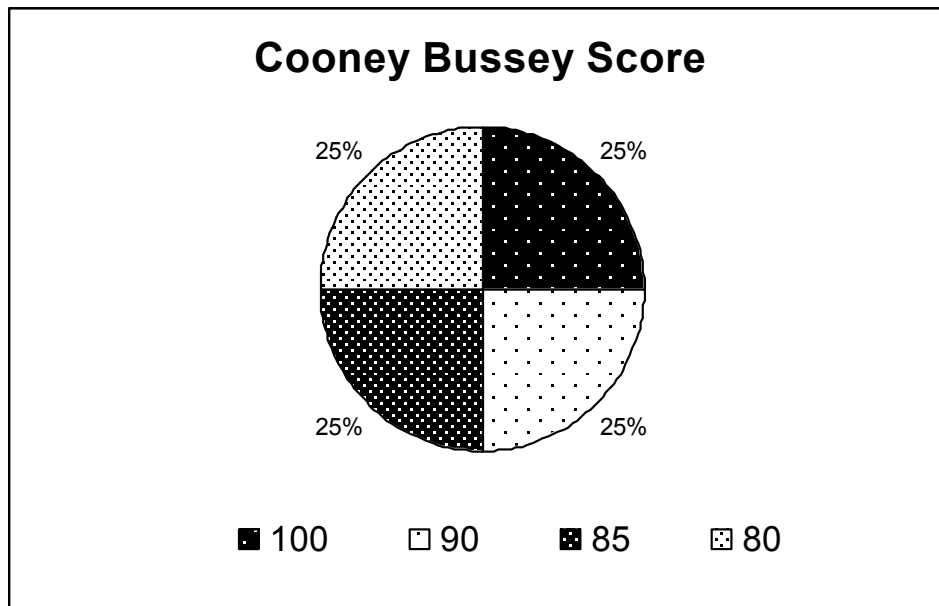


Abb. 29: Verteilung der Cooney Bussey Scorergebnisse

2.3. Diskussion

2.3.1. Diskussion der retrospektiven Analyse

Die angegebenen Frakturheilungszeiten sind in dieser Arbeit kritisch zu betrachten. Laut Fernandez et al. bestünde nach zwölf Wochen ausbleibender Konsolidation bereits eine verzögerte Heilung und nach sechs Monaten ohne Überbauung eine Pseudoarthrose (45). Nach dieser Definition hätten die in die Arbeit eingeschlossenen Patientinnen und Patienten in 8 von 24 (33,3 %) Fällen eine verzögerte Heilung und in 10 von 24 (41,7 %) Fällen eine Pseudoarthrose. Da es sich hierbei aber um eine retrospektive Analyse von klinischen Daten handelt, waren Röntgenaufnahmen in geregelten Abständen nicht vorhanden. In den beiden Fällen mit der längsten Heilungszeit von zehn Monaten, waren in früheren Röntgenaufnahmen bereits Zeichen der Konsolidierungen zu erkennen. Die Frakturheilungszeit liegt also im Zeitraum dazwischen, wohl aber näher an der drei Monatsgrenze. Eine Röntgenuntersuchung wurde bei den meisten Nachuntersuchungen nicht durchgeführt, um die Strahlendosis der Patientinnen und Patienten gering zu halten. Deshalb sind genaue Aussagen über die Heilungsdauer nach ESIN Behandlung in dieser Arbeit mit einer deutlichen

Unschärfe verbunden. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass die tatsächliche Heilungszeit wohl kürzer war als im Ergebnisteil angegeben.

Eine Korrelation zwischen verwendetem Nageldurchmesser und Frakturheilungszeit konnte nicht hergestellt werden. Lascombes et al. haben ihrerseits aber nachgewiesen, dass der Durchmesser des Nagels mindestens 40% des Durchmessers des Markraums betragen muss (62). In dieser Arbeit belief das geringste Verhältnis auf 50%, was den Vorgaben von Lascombes et al. entspricht (62). Eine exakte Aussage, über eine Korrelation zwischen Nagelstärke und Frakturheilungszeit, kann durch diese Arbeit allerdings nur schwer getroffen werden. Einerseits, da das Patientinnen- und Patientenkollektiv mit 24 eingeschlossenen Kindern und Jugendlichen sehr klein ist, andererseits da eine Einteilung in drei selbstdefinierte Gruppen nur eine ungenaue Verhältnismäßigkeit zwischen Nageldicke und Heilungszeit darstellt.

Die Arbeit zeigt allerdings, dass die ESIN bei richtiger Anwendung mit einer geringen Komplikationsrate und hohem Patientinnen- und Patientenkomfort vergesellschaftet ist. Es fanden sich zwar bei 70,8 Prozent leichte postoperative Komplikationen, allerdings persisierten diese nur bei 16,7 Prozent der Patientinnen und Patienten länger als bis zur ersten Nachuntersuchung. Nach Metallentfernung waren alle Patientinnen und Patienten beschwerdefrei. Der in einem Fall beschriebene Fasziendefekt am Unterarm ereignete sich bei einem 15-jährigen Patienten mit dislozierter Unterarmfraktur um Schaftbreite, nach offener Reposition. Ein konservativer Repositionsversuch war vorangehend gescheitert.

2.3.2. Diskussion der Patientinnen- und Patientennachuntersuchung

Die Nullhypothese mit der Annahme, dass der Bewegungsumfang beziehungsweise die Kraftgrade unabhängig von der untersuchten Seite sind, wurde in allen untersuchten Kategorien beibehalten. Den Ergebnissen dieser Arbeit nach, ist davon auszugehen, dass die Frakturbehandlung mittels ESIN, bei dem Patientinnen- und Patientenkollektiv, keine funktionellen Defizite hinterließ, trotz der Annahme einiger Autoren, dass die Methode der ESIN über einem Alter von zehn Jahren zu erhöhter Komplikationsrate führt, und somit eher eine Plattenversorgung anzustreben sei (28,31).

Die Analyse der Scorewerte nach Mayo Wrist und Cooney Bussey unterstützt weiter die Annahme, dass bei korrekt angewandter Technik die ESIN auch bei Patientinnen und Patienten älter als zwölf Jahre die ESIN ein sicheres Verfahren sein kann. Jeweils 4 der 8 bewerteten Patientinnen und Patienten erreichten exzellente beziehungsweise sehr gute Ergebnisse. Das schlechteste Outcome des Patientinnen- und Patientenkollektives lag bei 80 Punkten nach Mayo Wrist und Cooney Bussey, und entspricht somit immer noch einem guten Outcome.

Eine Limitation der Arbeit liegt allerdings darin, dass das Ergebnis der Untersuchungen immer im Vergleich zur Gegenseite beurteilt wurde. Dies verschlechterte die Resultate derjenigen Patientinnen und Patienten, welche sich als Rechtshänder den linken Unterarm verletzten und umgekehrt. Dies war bei 3 der 8 (37,5 %) nachuntersuchten Patientinnen und Patienten der Fall. Die Auswirkung machte sich vor allem in die Kategorie Griffstärke bemerkbar. Die Patientinnen und Patienten erreichten hier nur 85%, 89,1% und 90,5% der Griffstärke der gesunden Seite, was letztendlich auch die Mayo Wrist Scorewerte sowie die Cooney Bussey Scorewerte der Patientinnen und Patienten verringerte. Alle 3 Patientinnen und Patienten erreichten jeweils nur den Rang Gut in beiden Scoresystemen. Somit trifft die Limitierung der Untersuchungsweise auf 3 von 4 (75%) Patientinnen und Patienten zu, welche laut Traumascores Mayo Wrist und Cooney Bussey nur gute Ergebnisse erzielten.

Eine objektivere Beurteilung der Patientinnen und Patienten ist allerdings nur schwer möglich. Hierzu müsste man jede Seite getrennt voneinander, vor und nach der ESIN Behandlung untersuchen, was einer präventiven funktionellen Untersuchung aller Kinder und Jugendlicher zwischen zwölf und 18 Jahren des Einzugsgebietes der Universitätsklinik für Kinder- und Jugendchirurgie gleichkommen würde. Solche Untersuchungsumfänge waren im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich.

Bei der Ermittlung des DASH-Scores handelt es sich um einen rein subjektiv vom Patientinnen und Patienten selbst bestimmten Wert. Hier sollte die Zufriedenheit der Patientinnen und Patienten ermittelt werden und eventuelle Behinderungen des Alltages aufgedeckt werden. Die Ergebnisse sprechen für große subjektive Zufriedenheit der Patientinnen und Patienten ob der Ergebnisse. 8 von 10 (80%) erreichen nach Beantwortung der Fragen den Spitzenwert 0 von 100. Bei 2 von 10 (20%) ist ein minimal höherer Wert zu ermitteln, einmal 0,86 und einmal 4,3. Der

erste Wert entstand aufgrund der Angabe von leichten Schmerzen bei andauernder starker Belastung des behandelten Armes. Bei dem zweiten Patienten, mit DASH-Score von 4,3, handelt es sich um den Patient mit der postoperativ verbliebenen Faszienlücke. Der Patient gab an, bei starken Pro- und Supinationsbewegungen und bei Stoßbewegungen des Unterarmes, beispielsweise beim Öffnen einer schweren Türe, mittelgradig starke Schmerzen zu verspüren.

Insgesamt kann ob der Ergebnisse der klinischen funktionellen Nachuntersuchungen, festgehalten werden, dass die Methode der ESIN auch bei Kindern über zehn Jahren als Behandlungsoption in Betracht zu ziehen ist. Die Annahme einiger Autoren, bei Kindern sei ab zehn Jahren eine Plattenosteosynthese vorzuziehen, da es ab diesem Alter bei ESIN zu vermehrtem Auftreten von Komplikationen kommt, konnte nicht bestätigt werden (28,31). In der Arbeit von Salonen et al. ereigneten sich zwei Drittel aller beobachteten Komplikationen im Patientinnen- und Patientenkollektiv älter als zehn Jahre (31). Eine altersspezifische erhöhte Komplikationsrate konnte in dieser Arbeit nicht nachgewiesen werden.

Die genaue Definition einer Altersgrenze, bis zu welcher eine intramedulläre Nagelung anwendbar ist, kann allerdings in dieser Arbeit nicht gemacht werden. Im Erwachsenenalter gilt nach wie vor die Plattenosteosynthese als Therapie der Wahl, da in der Versorgung von Unterarmschaftfrakturen, die Vorderarmknochen in ihrer Funktion als Gelenk verstanden werden müssen (24). Mangelnde Stabilität führt im Heilungsprozess unter Umständen zu Verlusten des Rotationumfanges des Unterarmes (69).

Die ESIN kann also, die Ergebnisse dieser Arbeit berücksichtigend, auch bei älteren Kindern und Jugendlichen in der Versorgung von Unterarmschaftfrakturen in Betracht gezogen werden. Die minimal invasive Methode, die früher mögliche funktionelle Nachbehandlung und der kürzere Krankenhausaufenthalt nach ESIN (57) in Kombination mit den in dieser Arbeit erhobenen Scoreergebnissen, sollten ebenso berücksichtigt werden.

Literaturverzeichnis

- 1.) Roger W. Soames. Skeletal System. In: Lawrence H. Bannister, Martin M. Berry, Patricia Collins, Mary Dyson, Julian E. Dussek, Mark W. J. Ferguson, Hrsg. Gray's Anatomy: The anatomical basis of medicine and surgery. 38. Auflage. New York: Churchill Livingstone; 1995: 635-640
- 2.) Andreas Prescher, Hans-Martin Schmidt. Arm, obere Gliedmaße, Membrum superius. In: J. Fanghänel, F. Pera, F. Anderhuber, R. Nitsch, Hrsg. Waldeyer Anatomie des Menschen. 18. Auflage. Berlin: De Gruyter; 2009: 665-666
- 3.) Andreas Prescher, Hans-Martin Schmidt. Arm, obere Gliedmaße, Membrum superius. In: J. Fanghänel, F. Pera, F. Anderhuber, R. Nitsch, Hrsg. Waldeyer Anatomie des Menschen. 18. Auflage. Berlin: De Gruyter; 2009: 677-683
- 4.) B. Moriggl. Funktionelle Anatomie, Unterarm und Handgelenk. In: Carl Joachim Wirth, Wolf Mutschler, Hrsg. Praxis der Orthopädie und Unfallchirurgie. 2. überarbeitete und erweiterte Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2009: 872
- 5.) Andreas Prescher, Hans-Martin Schmidt. Arm, obere Gliedmaße, Membrum superius. In: J. Fanghänel, F. Pera, F. Anderhuber, R. Nitsch, Hrsg. Waldeyer Anatomie des Menschen. 18. Auflage. Berlin: De Gruyter; 2009: 703-714
- 6.) Dominik Heim, Shai Luria, Rami Mosheiff, Yoram Weil. Forearm shaft, Approach, Anterior approach (Henry) [Internet]. Version 2.0. 2013.07.09 [zitiert am 25.01.2015]. URL:
https://www2.aofoundation.org/wps/portal/!ut/p/a1/jU_JDolwFPyaXukD4xJvPShxSYjBBXsxJZZCgm3zWiT69SjXOY2k5nJDOU0o1yLe6WEr4wW9ZvzySVKAOJVCpsk2YfA0kUYH5cAsBt3hvMXA5v-I4cPYPARv6Zc1Sbvp56ZzkczRTnKQqLEoMFOLr23bk6AQNu2USBMYRp97Q8GBIUnW0fAGvSiJuAaVBIfQ22IcZ5mgYXU3g7ZcytPLx5X3uM!/dl5/d5/L2dJQSEvUUt3QS80SmIFL1o2XzJPMDbHsVMwS09PVDEwQVnFMUdWRjAwMFE1/?approach=Approach%20to%20the%20ulna&bone=Radius&classification=&contentUrl=%2Fsrc%2F22%2F04-Approaches%2F2012%2F22_A20-appr_to_ulna.jsp&implantstype=&method=&redfix_url=&segment=Shaft&showPage=approach&treatment=
- 7.) Z.S. Ahsan, J. Yao. The importance of pronator quadratus repair in the treatment of distal radius fractures with volar plating. Hand (NY). 2012 Sep; 7: 276-280

- 8.) J. Fan, K. Chen, H. Zhu, B. Jiang, F. Yuan, X. Zhu, J. Mei, G. Yu. Effect of fixing distal radius fracture with volar locking palmar plates while reserving pronator quadratus. Chinese Medical Journal (Engl).2014; 127: 2929-2933
- 9.) Dominik Heim, Shai Luria, Rami Mosheiff, Yoram Weil. Forearm shaft, Approach, Posterolateral approach (Thompson) [Internet]. Version 2.0. 2013.07.09 [zitiert am 25.01.2015]. URL: [https://www2.aofoundation.org/wps/portal!/ut/p/a1/jU_JDolwFPyaXukD4xJvPShxSYjBBXsxJZZCgm3zWiT69SjnxOY2k5nJDOU0o1yLe6WEr4wW9ZvzySVKAOJVCpsk2YfA0kUYH5cAsBt3hvMXA5v-l4cPYPARv6Zc1Sbvp56ZzkczRTnKQqLEoMFOLr23bk6AQNu2USBMYPp97Q8GBIUnW0fAGvSiJuAaVBIfQ22lcZ5mgyXU3g7ZcytPLx5X3uM!/dl5/d5/L2dJQSEvUUt3QS80SmIFL1o2XzJPMDbHsVMwS09PVDEwQVnFMUdWRjAwMFE1/?approach=Posterolateral%20approach%20\(Thompson\)&bone=Radius&classification=&contentUrl=%2Fsrc%2F22%2F04-Approaches%2F2012%2F22_A30-dorsolateral-appr-Thompson.jsp&implantstype=&method=&redfix_url=&segment=Shaft&showPage=approach&treatment=](https://www2.aofoundation.org/wps/portal!/ut/p/a1/jU_JDolwFPyaXukD4xJvPShxSYjBBXsxJZZCgm3zWiT69SjnxOY2k5nJDOU0o1yLe6WEr4wW9ZvzySVKAOJVCpsk2YfA0kUYH5cAsBt3hvMXA5v-l4cPYPARv6Zc1Sbvp56ZzkczRTnKQqLEoMFOLr23bk6AQNu2USBMYPp97Q8GBIUnW0fAGvSiJuAaVBIfQ22lcZ5mgyXU3g7ZcytPLx5X3uM!/dl5/d5/L2dJQSEvUUt3QS80SmIFL1o2XzJPMDbHsVMwS09PVDEwQVnFMUdWRjAwMFE1/?approach=Posterolateral%20approach%20(Thompson)&bone=Radius&classification=&contentUrl=%2Fsrc%2F22%2F04-Approaches%2F2012%2F22_A30-dorsolateral-appr-Thompson.jsp&implantstype=&method=&redfix_url=&segment=Shaft&showPage=approach&treatment=)
- 10.) Dominik Heim, Shai Luria, Rami Mosheiff, Yoram Weil. Forearm shaft, Approach, Approach to the ulna [Internet]. Version 2.0. 2013.07.09 [zitiert am 25.01.2015]. URL: https://www2.aofoundation.org/wps/portal!/ut/p/a1/jU_JDolwFPyaXukD4xJvPShxSYjBBXsxJZZCgm3zWiT69SjnxOY2k5nJDOU0o1yLe6WEr4wW9ZvzySVKAOJVCpsk2YfA0kUYH5cAsBt3hvMXA5v-l4cPYPARv6Zc1Sbvp56ZzkczRTnKQqLEoMFOLr23bk6AQNu2USBMYPp97Q8GBIUnW0fAGvSiJuAaVBIfQ22lcZ5mgyXU3g7ZcytPLx5X3uM!/dl5/d5/L2dJQSEvUUt3QS80SmIFL1o2XzJPMDbHsVMwS09PVDEwQVnFMUdWRjAwMFE1/?approach=Approach%20to%20the%20ulna&bone=Radius&classification=&contentUrl=%2Fsrc%2F22%2F04-Approaches%2F2012%2F22_A20-appr_to_ulna.jsp&implantstype=&method=&redfix_url=&segment=Shaft&showPage=approach&treatment=
- 11.) Dominik Heim, Shai Luria, Rami Mosheiff, Yoram Weil. Forearm shaft, Approach, Approach to the ulna for intramedullary nailing [Internet]. Version 2.0. 2013.07.09 [zitiert am 25.01.2015]. URL: https://www2.aofoundation.org/wps/portal!/ut/p/a1/jU_JDolwFPyaXukD4xJvPShxSYjBBXsxJZZCgm3zWiT69SjnxOY2k5nJDOU0o1yLe6WEr4wW9ZvzySVKAOJVCpsk2YfA0kUYH5cAsBt3hvMXA5v-l4cPYPARv6Zc1Sbvp56ZzkczRTnKQqLEoMFOLr23bk6AQNu2USBMYPp97Q8GBIUnW0fAGvSiJuAaVBIfQ22lcZ5mgyXU3g7ZcytPLx5X3uM!/dl5/d5/L2dJQSEvUUt3QS80SmIFL1o2XzJPMDbHsVMwS09PVDEwQVnFMUdWRjAwMFE1/?approach=Approach%20to%20the%20ulna%20for%20intramedullary%20nailing&bone=Radius&classification=&contentUrl=%2Fsrc%2F22%2F04-Approaches%2F2012%2F22_A60_Nailing_appr_ulna.jsp&implantstype=&method=&redfix_url=&segment=Shaft&showPage=approach&treatment=

- 12.) Dominik Heim, Shai Luria, Rami Mosheiff, Yoram Weil. Forearm shaft, Approach, Approaches to the radius for intramedullary nailing [Internet]. Version 2.0. 2013.07.09 [zitiert am 25.01.2015]. URL: https://www2.aofoundation.org/wps/portal/!ut/p/a1/jU_JDoIwFPyaXukD4xJvPShxSYjBBXsxJZZCgm3zWiT69S.JnXOY2k5nJDOU0o1yLe6WEr4wW9ZvzySVKAOJVCpsk2YfA0kUYH5cAsBt3hvMXA5v-l4cPYPARv6Zc1Sbvp56ZzkczRTnKQqLEoMFOLr23bk6AQNu2USBMYPp97Q8GBIUnW0fAGvSiJuAaVBIfQ22lcZ5mgYXU3g7ZcytPLx5X3uM!/dl5/d5/L2dJQSEvUUt3QS80SmIFL1o2XzJPMDbHSVMwS09PVDEwQVNFMUdWRjAwMFE1/?approach=Approaches%20to%20the%20radius%20for%20intramedullary%20nailing&bone=Radius&classification=&contentUrl=%2Fsrc%2F22%2F04-Approaches%2F2012%2F22_A70_Nailing_appr_radius.jsp&implantstype=&method=&redfix_url=&segment=Shaft&showPage=approach&treatment=
- 13.) Giorgio Gabella. Cardiovascular System. In: Lawrence H. Bannister, Martin M. Berry, Patricia Collins, Mary Dyson, Julian E. Dussek, Mark W. J. Ferguson, Hrsg. Gray' s Anatomy: The anatomical basis of medicine and surgery. 38. Auflage. New York: Churchill Livingstone; 1995: 1540-1544
- 14.) Andreas Prescher, Hans-Martin Schmidt. Arm, obere Gliedmaße, Membrum superius. In: J. Fanghänel, F. Pera, F. Anderhuber, R. Nitsch, Hrsg. Waldeyer Anatomie des Menschen. 18. Auflage. Berlin: De Gruyter; 2009: 722-727
- 15.) Andreas Prescher, Hans-Martin Schmidt. Arm, obere Gliedmaße, Membrum superius. In: J. Fanghänel, F. Pera, F. Anderhuber, R. Nitsch, Hrsg. Waldeyer Anatomie des Menschen. 18. Auflage. Berlin: De Gruyter; 2009: 729-736
- 16.) James F. Kellam, Laurent Audigé. Frakturklassifikation. In: Thomas P. Rüedi, Richard E. Buckley, Christopher G. Moran, Hrsg. AO-Prinzipien des Frakturmanagements: Band 1- Prinzipien. 2. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2008: 68-86
- 17.) Theddy F. Slongo, James B. Hunter. Frakturen bei Kindern. In: Thomas P. Rüedi, Richard E. Buckley, Christopher G. Moran, Hrsg. AO-Prinzipien des Frakturmanagements: Band 1- Prinzipien. 2. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2008: 395-404
- 18.) Keita Ito, Stephan M. Perren. Biologie und Biomechanik der Frakturheilung. In : Thomas P. Rüedi, Richard E. Buckley, Christopher G. Moran, Hrsg. AO- Prinzipien des Frakturmanagements. 2. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2008: 17-31
- 19.) P. Schandelmaier, C. Krettek, H. Tscherne. Biomechanical study of nine different tibia locking nails. Journal of Orthopaedic Trauma. 1996; 10: 37-44.

- 20.) L. E. Claes, C.A. Heigele. Magnitudes of local stress and strain along bony surfaces predict the course and type of fracture healing. *Journal of Biomechanics*. 1999 Mar; 32: 255-266
- 21.) J.L. Ford, D.E. Robinson, B.E. Scammell. Endochondral ossification in fracture callus during long bone repair: the localisation of 'cavity-lining cells' within the cartilage. *Journal of Orthopaedic Research*. 2004 Mar; 22: 368-375
- 22.) S.M. Perren, A. Huggler, M. Russenberger, M. Allgöwer, R. Mathys, R. Schenk, H. Willenegger, M.E. Müller. The reaction of cortical bone to compression. *Acta Orthopaedica Scandinavica*. 1969 Feb; 125: 19-29
- 23.) Ahmet Köse, Ali Aydın, Naci Ezirmik, Cahit Emre Can, Murat Topal, Tugay Tipi. Alternative treatment of forearm double fractures: new design intramedullary nail. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*. 2014 Oct; 134: 1387–1396
- 24.) René K. Marti. Fehlstellungen. In: Thomas P. Rüedi, Richard E. Buckley, Christopher G. Moran, Hrsg. *AO- Prinzipien des Frakturmanagements*. 2. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2008: 482-492
- 25.) F. F. Fernandez, M. Langendörfer, T. Wirth, O. Eberhardt. Failures and complications in intramedullary nailing of children's forearm fractures. *Journal of Children's Orthopaedics*. 2010; 4:159–167
- 26.) C. Creasman, D.J. Zaleske, M.G. Ehrlich. Analyzing forearm fractures in children. The more subtle signs of impending problems. *Clinical orthopaedics and related resaerch*. 1984 Sep; 188:40-53
- 27.) J.S. Daruwall. A study of radioulnar movements following fractures of the forearm in children. *Clinical orthopäedics and related research*. 1979 Mar-Apr; 139:114-120
- 28.) J.M. Flynn, K.J. Jones, M.R. Garner. Eleven years experience in the operative management of pediatric forearm fractures. *Journal of Pediatric Ortopaedics*. 2010 Jun; 30:313–319
- 29.) P.P. Schmittenebecher, H.G. Dietz, W.E. Linhart, T. Slongo. Complications and problems in intramedullary nailing of childrens' fractures. *European Journal of Trauma*. 2000 Dec; 26:287–293
- 30.) A. Jubel, J. Andermahr, J. Isenberg, A. Issavand, A. Prokop, K.E. Rehm. Outcomes and complications of elastic stable intramedullary nailing for forearm fractures in children. *Journal of Pediatric Orthopaedics*. 2005 Sep; 14:375–380
- 31.) A. Salonen, H. Salonen, O. Pajulo. A critical analysis of postoperative complications of antebrachium TEN-nailing in 35 children. *Scandinavian Journal of Surgery*. 2012; 101:216–221

- 32.) Keita Ito, Stephan M. Perren. Biologie und Biomechanik der Frakturheilung. In : Thomas P. Rüedi, Richard E. Buckley, Christopher G. Moran, Hrsg. AO- Prinzipien des Frakturmanagements. 2. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2008: 11-16
- 33.) R. Schenk, H. Willenegger. On the histological picture of so-called primary healing of pressure osteosynthesis in experimental osteotomies in the dog. *Experientia*. 1963 Nov; 19: 593-595
- 34.) L. Claes, K. Eckert-Hübner, P. Augat. The fracture gap size influences the local vascularization and tissue differentiation in callus healing. *Langenbeck's Archives of Surgery*. 2003 Oct; 388: 316-322
- 35.) U. Pfister. Biomechanical and histological studies following intramedullary nailing of the tibia. *Fortschritte der Medizin*. 1983 Oct; 101: 1652-1659
- 36.) O. Farouk, C. Krettek, T. Miclau, P. Schandelmaier, P. Guy, H. Tscherne. Minimal invasive plate osteosynthesis: does percutaneous plating disrupt femoral blood supply less than the traditional technique?. *Journal of Orthopaedic Trauma*. 1999 Aug; 13:401-406
- 37.) Michael D. McKee, Peter E. Ochsner. Nicht infizierte Pseudoarthrosen. In: Thomas P. Rüedi, Richard E. Buckley, Christopher G. Moran, Hrsg. AO-Prinzipien des Frakturmanagements. 2. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2008: 504-510
- 38.) S.W. Ueng, M.Y. Lee, A.F. Li, S.S. Lin, C.L. Tai, C.H. Shih. Effect of intermittent cigarette smoke inhalation on tibial lengthening: experimental study on rabbits. *Journal of Trauma*. 1997 Feb; 42: 231-238
- 39.) R.K. Schenk, J. Müller, H. Experimental histological contribution to the development and treatment of pseudarthrosis. *Hefte zur Unfallheilkunde*. 1968; 94: 15-24
- 40.) A.A.C. Reed, C.J. Joyner, S. Isefuku, H.C. Brownlow, A.H.R.W. Simpson. Vascularity in a new model of atrophic nonunion. *The Journal of Bone and Joint Surgery Br*. 2003 May; 85: 604-610
- 41.) S. Arens, M. Hansis, U. Schlegel, H. Eijer, G. Printzen, W.J. Ziegler, S.M. Perren. Infection after open reduction and internal fixation with dynamic compression plates--clinical and experimental data. *Injury*. 1996; 27: 27-33
- 42.) M.D. Law Jr, R.E. Stein. Late infection in healed fractures after open reduction and internal fixation. *Orthopaedic Review*. 1993 May; 22: 545-552.
- 43.) Peter E. Ochsner, Michael S. Sirkin, Andrej Trampuz. Akute Infektionen. In: Thomas P. Rüedi, Richard E. Buckley, Christopher G. Moran, Hrsg.

- AO- Prinzipien des Frakturmanagements. 2. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2008: 521-523
- 44.) R.O. Darouiche. Treatment of infections associated with surgical implants. *New England Journal of Medicine*. 2004 Apr; 350: 1422-1429
- 45.) H. Willenegger, B. Roth. Treatment tactics and late results in early infection following osteosynthesis. *Unfallchirurgie*. 1986 Oct; 12: 241-246
- 46.) Eric E. Johnson, Richard E. Buckley. Chronische Infektion und infizierte Pseudoarthrose In: Thomas P. Rüedi, Richard E. Buckley, Christopher G. Moran, Hrsg. AO- Prinzipien des Frakturmanagements. 2. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2008: 543-545
- 47.) B. Parsons, E. Strauss. Surgical management of chronic osteomyelitis. *American Journal of Surgery*. 2004 Jul; 188: 57–66
- 48.) A.G. Gristina, M. Oga, L.X. Webb, C.D. Hobgood. Adherent bacterial colonization in the pathogenesis of osteomyelitis. *Science*. 1985 May; 228: 990-993
- 49.) G. Cierny, J.T. Mader, J.J. Penninck. A clinical staging system for adult osteomyelitis. *Clinical Orthopaedics and Related Research*. 2003 Sep; 414: 7-24
- 50.) Theddy F. Slongo, James B. Hunter. Frakturen bei Kindern. In: Thomas P. Rüedi, Richard E. Buckley, Christopher G. Moran, Hrsg. AO- Prinzipien des Frakturmanagements. 2. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2008: 404-411
- 51.) R.A. Knight, G.D. Purvis. Fractures of both bones of the forearm in adults. *Journal of Bone and Joint Surgery*. 1949; 31:755–764.
- 52.) F.P. Sage. Medullary fixation of fractures of the forearm. A study of the medullary canal of the radius and a report of fifty fractures of the radius treated with a prebent triangular nail. *Journal of Bone and Joint Surgery Am*. 1959 Dec; 41:1489–1516
- 53.) D.C. Mann, S. Rajmaira. Distribution of physeal and non physeal fractures in 2.650 long-bone fractures in children aged 0–16 years. *Journal of Pediatric Ortopaedics*. 1990 Nov-Dec; 10:713–716
- 54.) P.P. Schmittenebecher. Analysis of Reinterventions in children's fractures- an aspect of quality control. *European Journal of Trauma*. 2004 April; 30:104-109
- 55.) D. Mann, M. Schnabel, M. Baacke, L. Gotzen. Results of elastic stable intramedullary nailing (ESIN) in forearm fractures in childhood. *Unfallchirurg*. 2003 Feb;106:102–109

- 56.) P.P. Schmittenebecher. State-of-the-art treatment of forearm shaft fractures. *International Journal of the Care of the Injured*. 2005 Feb; 36:25-34
- 57.) Pamela Aidelsburger, Kristin Grabein, Alois Huber, Hans Hertlein, Jürgen Wasem. Die elastisch stabile intramedulläre Nagelung bei instabilen kindlichen Unterarmschaftfrakturen. *GMS Health Technology Assessment*. 2006 Jan; 2: 1861-8863
- 58.) Abdul Halim Abd Rashid, Sharaf Ibrahim. Hypertrophic nonunion of the ulna in a child: treatment with an elastic stable intramedullary nail without bone graft. *Strategies Trauma Limb Reconstruction*. 2010 Dec; 5:145–147
- 59.) T.W. Wright, F. Glowczewskie. Vascular anatomy of the ulna. *Journal of Hand Surgery Am*. 1998 Sep; 23:800–804
- 60.) E.J. Wall, V. Jain, V. Vora, C.T. Mehlman , A.H. Crawford .Complications of titanium and stainless steel elastic nail fixation of pediatric femoral fractures. *Journal of Bone and Joint Surgery Am*. 2008 Jun; 90:1305-1313
- 61.) U.G. Narayanan , J.E. Hyman, A.M. Wainwright, M. Rang, B.A. Alman. Complications of elastic stable intramedullary nail fixation of pediatric femoral fractures, and how to avoid them. *Journal of Pediatric Orthopaedics*. 2004 Jul-Aug; 24: 363-369
- 62.) P. Lascombes, H. Huber, R. Fay, D. Popkov, T. Haumont, P. Journeau. Flexible intramedullary nailing in children: nail to medullary canal diameter s optimal ratio. *Journal of Pediatric Orthopaedics*. 2013 Jun; 33: 403-408
- 63.) J.M. Flynn, T. Hresko, R.A. Reynolds, R.D. Blasier, R. Davidson, J. Kasser. Titanium elastic nails for pediatric femur fractures: a multicenter study of early results with analysis of complications. *Journal of Pediatric Orthopaedics*. 2001 Jan-Feb; 21: 4-8
- 64.) D. Richter, P.A. Ostermann, A. Ekkernkamp. Elastic intramedullary nailing: A minimally invasive concept in the treatment of unstable forearm fractures in children. *Journal of Pediatric Orthopaedics*. 1998 Jul-Aug; 18: 457–461
- 65.) J.S. Daruwalla. A study of radioulnar movements following fractures of the forearm in children. *Clinical Orthopaedics and Related Research*. 1979 Mar-Apr; 139: 114–120
- 66.) C.T. Price, D.S. Scott, M.E. Kurzner, J.C. Flynn. Malunited forearm fractures in children. *Journal of Pediatric Orthopaedics*. 1990 Nov-Dec; 10: 705–712

- 67.) R. Tarr, A. Garfinkel, A. Sarmiento. The effects of angular and rotational deformities of both bones of the forearm. An in vitro study. *Journal of Bone and Joint Surgery Am.* 1984 Jan; 66: 65–70
- 68.) T. Slongo. Complications and failures of the ESIN technique. *International Journal of the Care of the Injured.* 2005 Feb; 36: 78–85
- 69.) L.M. Schulte, C.G. Meals, R.J. Neviasser. Management of adult diaphyseal both-bone forearm fractures. *Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons.* 2014 Jul; 22: 437-446
- 70.) David J. Slutsky. Outcomes Assessment in Wrist Surgery. *Journal of Wrist Surgery.* 2013 Feb; 2: 1–4
- 71.) Traumascores. Mayo Wrist Score [Internet]. 2015 [zitiert am 17.03.2015]. URL: <http://www.traumascores.com/index.php/scores2/27-handgelenk-und-hand/198-196>
- 72.) Traumascores. Cooney und Bussey Score [Internet]. 2015 [zitiert am 17.03.2015]. URL: <http://www.traumascores.com/index.php/scores2/27-handgelenk-und-hand/211-209>
- 73.) K.M. Stürmer, Hrsg. Leitlinien Unfallchirurgie. 2. Auflage. Stuttgart: Thieme; 1999: 84- 97
- 74.) Institute for Work and Health. Disabilities of the Arm, Shoulder and Hand [Internet]. 2006 [zitiert am 16.03.2015]. URL: http://dash.iwh.on.ca/system/files/dash_questionnaire_2010.pdf
- 75.) Institute for Work and Health. Disabilities of the Arm, Shoulder and Hand [Internet]. 2006 [zitiert am 18.03.2015]. URL: http://dash.iwh.on.ca/system/files/dash_scoring_2010.pdf

