

Aus dem Zentrum für Orthopädie und Unfallchirurgie (ZOU)
der Universitätsmedizin der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

**Radiologische Verlaufskontrolle nach ESIN-Osteosynthese
bei Unterarmschaftfrakturen von Kindern**

Inauguraldissertation
zur Erlangung des Doktorgrades der Medizin
der Universitätsmedizin
der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

Vorgelegt von

Nora Henriette Laubach
aus Freiburg im Breisgau

Mainz, 2025

Wissenschaftlicher Vorstand: Univ.-Prof. Dr. Hansjörg Schild

1. Gutachter: [REDACTED]

2. Gutachter: [REDACTED]

Tag der Promotion: 18.06.2025

Für meine Großeltern

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VI
1 Einleitung / Ziel der Dissertation	1
2 Literaturdiskussion	2
2.1 <i>Anatomie des Unterarms</i>	2
2.1.1 Knöcherner Aufbau	2
2.1.2 Gelenke des Unterarms	3
2.1.3 Muskulatur des Unterarms (8)	4
2.2 <i>Frakturheilung</i>	8
2.2.1 Sekundäre Frakturheilung	8
2.2.2 Primäre Frakturheilung	8
2.2.3 Absolute und relative Stabilität der Osteosyntheseverfahren	8
2.2.4 Besonderheiten im Knochenstoffwechsel von Kindern	9
2.3 <i>Unterarmschaftfraktur</i>	9
2.3.1 Epidemiologie und Ätiologie der Unterarmschaftfraktur	9
2.3.2 Klinik und Diagnostik	10
2.3.3 AO-Klassifikation für Frakturen im Kindesalter (PCCF) (36, 37)	10
2.4 <i>Elastisch-stabile Marknagelung</i>	12
2.4.1 Geschichte	12
2.4.2 Indikationen und Kontraindikationen zur ESIN von Unterarmschaftfrakturen	12
2.4.3 Operation	13
2.4.4 Biomechanik und Material	13
2.5 <i>ESIN im Vergleich zu alternativen Methoden</i>	14
2.5.1 Vor- und Nachteile der ESIN	14
2.5.2 Alternative Therapieoptionen einer Unterarmschaftfraktur von Kindern	15
2.6 <i>Mögliche Einflussfaktoren auf den klinischen Verlauf</i>	16
2.6.1 Prä- und perioperative Risikofaktoren	16
2.6.2 Postoperative Komplikationen	18
2.7 <i>Bestehende Leitlinie und Umsetzung in den klinischen Alltag</i>	21
2.7.1 Bestehende AWMF-Leitlinie (aktuell in Überarbeitung) (4)	21
2.7.2 Behandlung der Unterarmschaftfraktur an der Universitätsmedizin Mainz – Standardprotokoll	22
3 Material und Methoden	23
3.1 <i>Rahmenbedingungen und Patientenkollektiv</i>	23
3.2 <i>Datenerhebung</i>	23
3.3 <i>Statistik</i>	24
4 Ergebnisse	26
4.1 <i>Patienten</i>	26
4.1.1 Epidemiologische Daten	26
4.1.2 Daten zum Frakturzeitpunkt	28
4.1.3 Daten des stationären Aufenthaltes und der Operation	30
4.2 <i>Klinischer Verlauf</i>	31
4.2.1 Dokumentierte Auffälligkeiten	31

4.2.2	Pathologische Röntgenkontrolle	32
4.2.3	Änderung des Standardprozederes	33
4.2.4	Dokumentierte Auffälligkeiten und deren Auswirkungen	34
5	Diskussion	39
5.1	<i>Vergleich mit der Literatur</i>	39
5.1.1	Epidemiologische Betrachtung des Patientenguts	39
5.1.2	Klinischer Verlauf	40
5.2	<i>Diskussion der Ergebnisse</i>	44
5.3	<i>Limitationen der Studie</i>	46
6	Zusammenfassung – Ausblick	47
7	Literaturverzeichnis	48
8	Danksagung	54
9	Tabellarischer Lebenslauf	55

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Skelett der oberen Extremität, rechts, Ansicht von ventral (S007-1-23)
- Abbildung 2: Ellenbogengelenk, rechts, Ansicht von ventral (S007-1-23)
- Abbildung 3: Ventrale Muskeln Arm, rechts (S007-1-23)
- Abbildung 4: Dorsale Muskeln Arm, rechts (S007-1-23)
- Abbildung 5: Arterien Unterarm, rechts (S007-1-23)
- Abbildung 6: Nerven des Arms rechts, Ansicht von ventral (S007-1-23)

Abbildung 1-6 aus: Koch, Kürten, Schulze-Tanzil, Spittau, Waschke, Kurzlehrbuch Anatomie, 1. Auflage 2017 © Elsevier GmbH, Urban & Fischer, München

- Abbildung 7: Standardprotokoll UM Mainz
- Abbildung 8: Radiologische Verlaufskontrolle eines 8-jährigen Mädchens, 4 Wochen nach ESIN-Osteosynthese mit regelrechter Kallusbildung (A) a.p. (B) lateral
- Abbildung 9: Geschlechterverteilung der Patienten
- Abbildung 10: Alter zum Frakturzeitpunkt beider Geschlechter
- Abbildung 11: Geschlechtsspezifische Altersverteilung
- Abbildung 12: Anzahl der Frakturen im Jahresverlauf
- Abbildung 13: Stationärer Aufenthalt in Tagen
- Abbildung 14: Operationsdauer in Minuten

Abkürzungsverzeichnis

4W-VK – 4 Wochen-Verlaufskontrolle

A. – Arteria

AO – Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen

Art. – Articulatio

AWMF – Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften

BMI – Body Mass Index

cm – Zentimeter

DMS – Durchblutung, Motorik, Sensibilität

ESIN – Elastische stabile intramedulläre Nagelosteosynthese

FGF – Fibroblast Growth Factor

h – Stunde

ICD – international Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems

IGF-1 – Insulin-like growth factor 1

IMBEI – Institut für medizinische Biometrie, Epidemiologie und Informatik

Inc. – Incisura

IQR – Interquartilsabstand

KI – Konfidenzintervall

kg – Kilogramm

Lig. – Ligamentum

M. – Musculus

N. – Nervus

PDGF – Platelet-derived growth factor

PCCF – Pediatric Comprehensive Classification of Long-Bone Fractures

Proc. – Processus

R. – Ramus

r – radius

RB – Röntgenbild

RIS – Radiologie-Informationssystem

SAP – Systemanalyse Programmentwicklung

S1-Leitlinie – Leitlinie der Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften, Stufe 1

SPSS – Statistical Package for the Social Sciences

TEN – titanium elastic nail

Th. – Thorakal

TNF- β – Tumor Necrosis Factor Beta

t – tibia

u – ulna

UV – Ultraviolett

V. – Vena

VAS – Visuelle Analog Skala

VEGF – Vascular Endothelial Growth Factor

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Ein- und Ausschlusskriterien
Tabelle 2:	Epidemiologische Daten
Tabelle 3:	Daten zum Frakturzeitpunkt
Tabelle 4:	Daten des stationären Aufenthaltes und der Operation
Tabelle 5:	Zeitliche Abstände
Tabelle 6:	Klinischer Verlauf
Tabelle 7:	Dokumentierte Auffälligkeiten
Tabelle 8:	Pathologische Röntgenkontrolle
Tabelle 9:	Änderung des Standardprozederes
Tabelle 10-15:	Dokumentierte Auffälligkeiten und deren Auswirkungen

Zur besseren Lesbarkeit wird in dieser Arbeit das generische Maskulinum verwendet. Alle Personenbezeichnungen beziehen sich - sofern nicht anders angegeben - auf alle Geschlechter.

1 Einleitung / Ziel der Dissertation

Eine Unterarmschaftfraktur bezeichnet eine Fraktur beider Knochen des Unterarms, Radius und Ulna, im mittleren Drittel des Schaftes. Unterarmschaftfrakturen machen etwa 5 bis 10 Prozent aller Frakturen im Kindesalter aus (2, 3). Sie entstehen meist durch indirekte Traumata, wie einen Sturz auf die ausgestreckte Hand und treten häufig bei Freizeit- oder Sportaktivitäten sowie häuslichen Unfällen auf. Unter bestimmten Voraussetzungen kann eine konservative Therapie mittels Gipsruhigstellung erfolgen, oftmals ist jedoch eine operative Versorgung notwendig (4).

Als Standardverfahren zur operativen Behandlung von Unterarmschaftfrakturen bei Kindern hat sich in den letzten Jahrzehnten die „elastisch-stabile intramedulläre Nagel“ (ESIN)-Osteosynthese etabliert (5). Dieses Verfahren bietet den Vorteil einer minimalinvasiven Stabilisierung mit kurzer Hospitalisierung sowie schneller postoperativer Belastbarkeit und Mobilisierung. Die elastischen Nägel werden minimalinvasiv frakturfern eingebracht und verspannen sich über eine Drei-Punkt-Abstützung im Knochen. Dabei wird pro Knochen je ein Nagel verwendet. Die Nägel werden entweder beide ascendierend oder gegenläufig (Radius ascendierend, Ulna descendierend) implantiert (6).

Die postoperative Nachsorge ist ein entscheidender Bestandteil des Behandlungsprozesses, um die Frakturheilung zu überwachen, Auffälligkeiten und Pathologien rechtzeitig zu erkennen und Empfehlungen zur Belastung und Sportfreigabe geben zu können. Aufgrund fehlender evidenzbasierter Richtlinien bezüglich der Nachuntersuchungen nach ESIN-Osteosynthese von Unterarmschaftfrakturen, werden derzeit eine Vielzahl von postoperativen Röntgenuntersuchungen durchgeführt. Das Nachsorgeprotokoll der AWMF-Leitlinie (letzte Aktualisierung: 04/2016), welche sich derzeit in Überarbeitung befindet, empfiehlt regelmäßige postoperative radiologische Nachkontrollen. So soll 4 Wochen nach der ESIN-Osteosynthese eine klinische und radiologische Verlaufskontrolle erfolgen (4). Ziel dieser Verlaufskontrolle nach 28 Tagen ist es, den Konsolidierungsprozess der Fraktur zu bewerten und sicherzustellen, dass der betroffene Knochen wieder vollständig belastbar ist und eine Sportfreigabe erteilt werden kann. In der Universitätsmedizin Mainz wird dieses standardisierte Nachsorgeprotokoll derzeit routinemäßig bei allen jungen Patienten nach ESIN einer Unterarmschaftfraktur angewendet.

Es stellt sich jedoch die Frage, ob diese standardisierte Herangehensweise in jedem Fall notwendig ist, oder ob eine individualisierte Nachsorge, basierend auf spezifischen anamnestischen und klinischen Befunden, sinnvoller wäre. Insbesondere bei Patienten, die einen unauffälligen Verlauf ohne Komplikationen und Risikofaktoren aufweisen, könnte eine individuelle Nachsorge mit weniger radiologischen Verlaufskontrollen möglicherweise dazu beitragen, überflüssige Strahlenbelastungen zu vermeiden und kosteneffizienter zu agieren. Die vorliegende Dissertation untersucht mittels einer retrospektiven Analyse von 219 Kindern mit Unterarmschaftfrakturen und ESIN-Osteosynthese die Notwendigkeit und Konsequenz der routinemäßigen Röntgenuntersuchung 28 Tage nach erfolgter ESIN bei Kindern mit Unterarmschaftfrakturen. Ziel ist es zu ermitteln, ob diese radiologische Untersuchung erforderlich ist, um eine Sportfreigabe zu erteilen, oder ob bei bestimmten Patientengruppen ohne Komplikationen und Risikofaktoren darauf verzichtet werden kann. Dabei wird ein besonderer Fokus auf die Identifikation von möglichen Risikofaktoren gelegt, die eine engmaschigere Nachsorge rechtfertigen könnten. Durch eine detaillierte Analyse der Nachsorgeuntersuchung nach 28 Tagen und eine Bewertung der klinischen und radiologischen Befunde soll ermittelt werden, ob Anpassungen des Nachsorgeprotokolls notwendig sind, um die Patientenversorgung in Zukunft zu optimieren.

2 Literaturdiskussion

2.1 Anatomie des Unterarms

2.1.1 Knöcherner Aufbau

Das Skelett des Unterarms besteht aus den beiden langen Röhrenknochen Radius und Ulna. Das Caput radii ist nach proximal gerichtet, das Caput ulnae nach distal. Das Caput radii hat zwei Gelenkflächen für das Ellenbogengelenk. Als Ansatzstelle des M. biceps brachii befindet sich ventral am Collum radii die Tuberositas radii. Die distale Radiusepiphyse trägt jeweils eine Gelenkfläche für das distale Radioulnargelenk und für das proximale Handgelenk. Die Ulna besitzt proximal 3 Apophysen: Ventral liegen der Proc. coronoideus und die Tuberositas ulnae sowie auf der Dorsalseite das Olecranon, an welchem der M. triceps brachii ansetzt (7). Die Unterarmknochen sind durch die stabile, bindegewebige Membrana interossea antebrachii verbunden, deren Faserzüge überwiegend von proximal am Radius nach distal zur Ulna ziehen. Proximal wird sie durch die Chorda obliqua ergänzt, welche entgegen der eigentlichen Faserrichtung verläuft. Zusammen dienen sie der Stabilisation und wirken einer Längsverschiebung der Unterarmknochen entgegen. Die Membrana interossea antebrachii ist im mittleren Drittel am stärksten ausgeprägt und dient als breite Muskelursprungsfläche (8, 9).

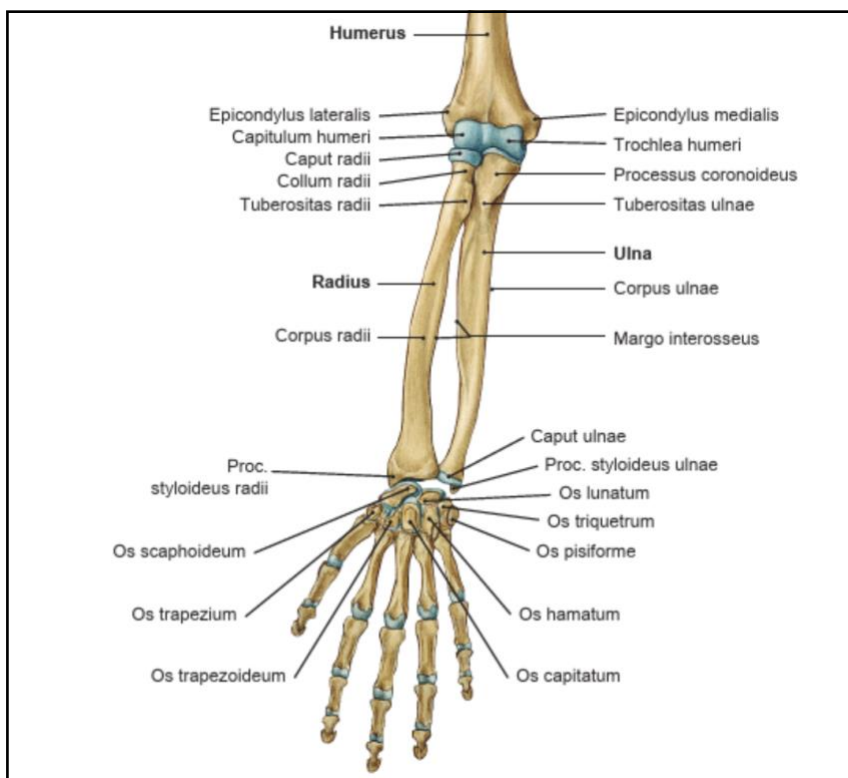


Abbildung 1: Skelett der oberen Extremität, rechts; Ansicht von ventral (S007-1-23) (10)

2.1.2 Gelenke des Unterarms

2.1.2.1 Radioulnargelenke

Ulna und Radius sind durch zwei Radioulnargelenke miteinander verbunden: das proximale und das distale Radioulnargelenk. Diese Gelenke sind für die Pronation und Supination des Unterarms unerlässlich, bei denen der Radius um die Ulna rotiert. Das proximale Radioulnargelenk, ein Radgelenk, ist Teil des Ellenbogengelenks. Ebenso zählt das distale Radioulnargelenk zu den Radgelenken und grenzt an das proximale Handgelenk. Es wird durch das Caput ulnae und die Incisura ulnaris des Radius gebildet (8, 11).

2.1.2.2 Ellenbogengelenk

Der Unterarm wird proximal durch das Ellenbogengelenk begrenzt. Das Ellenbogengelenk besteht aus drei kongruenten Gelenkpartnern (Humerus, Ulna, Radius). Es artikulieren 3 Teilgelenke: Die Articulatio humeroulnaris, die Articulatio humeroradialis und die Articulatio radioulnaris proximalis. Das humeroulnare Gelenk koppelt die Trochlea humeri als Gelenkkopf und die Incisura trochlearis der proximalen Ulna als Gelenkpfanne. Es stellt ein Scharniergelenk mit einem Freiheitsgrad dar. Im Humeroradialgelenk artikulieren das Capitulum humeri des distalen Humerus als Gelenkkopf und die Fovea articularis radii als Gelenkpfanne. Das Humeroradialgelenk ist biomechanisch ein Kugelgelenk mit drei Freiheitsgraden. Das proximale Radioulnargelenk wird durch die Circumferentia articularis des Caput radii als Gelenkkopf und der Incisura radialis der Ulna als Gelenkpfanne gebildet (8). Die Gelenkkapsel umfasst die knorpeligen Gelenkflächen aller drei Knochen. Die Kapsel wird durch einen kräftigen Bandapparat verstärkt. Die beiden Kollateralbänder stabilisieren das Ellenbogengelenk medial und lateral. Für zusätzliche Stabilität sorgt das Lig. anulare radii. Im Ellenbogengelenk werden Scharnierbewegungen (zwischen Humerus und Ulna und zwischen Humerus und Radius) und Drehbewegungen (zwischen Humerus und Radius und zwischen Radius und Ulna) ausgeführt. Daher verhalten sich die Teilgelenke zusammen wie ein Drehscharniergelenk (8, 12, 13).

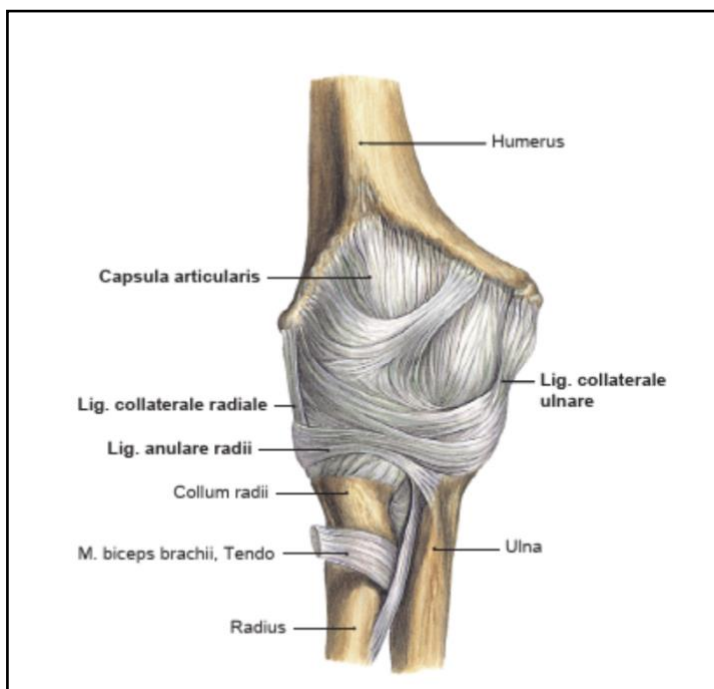


Abbildung 2 Ellenbogengelenk, rechts; Ansicht von ventral (S007-1-23) (14)

2.1.2.3 Proximales Handgelenk (8)

Das proximale Handgelenk (Articulatio radiocarpalis) begrenzt den Unterarm nach distal. Es verbindet die Unterarmknochen mit der proximalen Reihe der Handwurzelknochen. Die Articulatio radiocarpale wird aus Radius, Ulna und den Handwurzelknochen (Os Scaphoideum, Os Lunatum und Os Triquetrum) gebildet. Die Gelenkpfanne bildet die Facies articularis carpalis des Radius und der Discus articularis. Der Discus articularis trennt die Ulna vom Os triquetrum. Die proximale Handwurzelknochenreihe bildet den Gelenkkopf. Es handelt sich um ein Ellipsoidgelenk mit zwei Freiheitsgraden, welches durch eine Kapsel und straffe Bänder stabilisiert wird (8).

2.1.3 Muskulatur des Unterarms (8)

Die Muskulatur des Unterarms lässt sich ihrer Lage entsprechend in funktionelle Gruppen einteilen. Sie werden in Flexoren (Beuger) an der Ventralseite und Extensoren (Strecker) an der Dorsal- und Radialseite des Unterarms unterteilt. Beide Gruppen können zusätzlich in oberflächliche und tiefe Muskelgruppen eingeteilt werden (8).

2.1.3.1 Ventrale Muskulatur des Unterarms

Oberflächliche Schicht der ventralen Muskulatur (15)

In der oberflächlichen Schicht der ventralen Muskulatur befindet sich der M. flexor carpi radialis, der vom Epicondylus medialis humeri zum Os metacarpale II zieht und die Beugung sowie Radialabduktion im Handgelenk ermöglicht. Zudem der M. flexor carpi ulnaris, der am Epicondylus medialis humeri und am Olecranon beginnt und am Os pisiforme, Hamulus ossis hamati und der Basis des Os metacarpale V ansetzt, um Beugung und Ulnarabduktion im Handgelenk zu bewirken. Der M. palmaris longus entspringt am Epicondylus medialis humeri und endet in der Palmaraponeurose. Der M. pronator teres mit seinen zwei Ursprüngen am Epicondylus medialis humeri und der Ulna setzt am Radius an und unterstützt die Pronation sowie die Beugung im Ellenbogengelenk (15).

Mittlere Schicht der ventralen Muskeln (15)

Die mittlere Schicht wird von den vier Bäuchen des M. flexor digitorum superficialis gebildet, welcher die Beugung der proximalen Interphalangealgelenke und der Metakarpophalangealgelenke ermöglicht. Der M. flexor digitorum superficialis entspringt mit seinem Caput humeroulnare vom Epicondylus medialis des Humerus und vom Proc. coronoideus der Ulna. Das Caput radiale hat seinen Ursprung an der Vorderfläche des Radius (15).

Tiefe Schicht der ventralen Muskeln (15)

Hierzu gehört der M. flexor digitorum profundus, der von der Vorderseite der Ulna und der Membrana interossea antebrachii entspringt und an den Endphalangen der Finger II bis V ansetzt, um eine Beugung aller Fingergelenke zu ermöglichen. Der M. flexor pollicis longus nimmt seinen Ursprung an der Vorderfläche des Radius und endet an der Basis der Endphalanx des Daumens, was die Beugung im Daumengrund- und Endgelenk unterstützt. Der M. pronator quadratus, zieht auf der Vorderfläche der beiden Unterarmknochen von der Ulna zum Radius und fördert die Pronation des Unterarms (15).

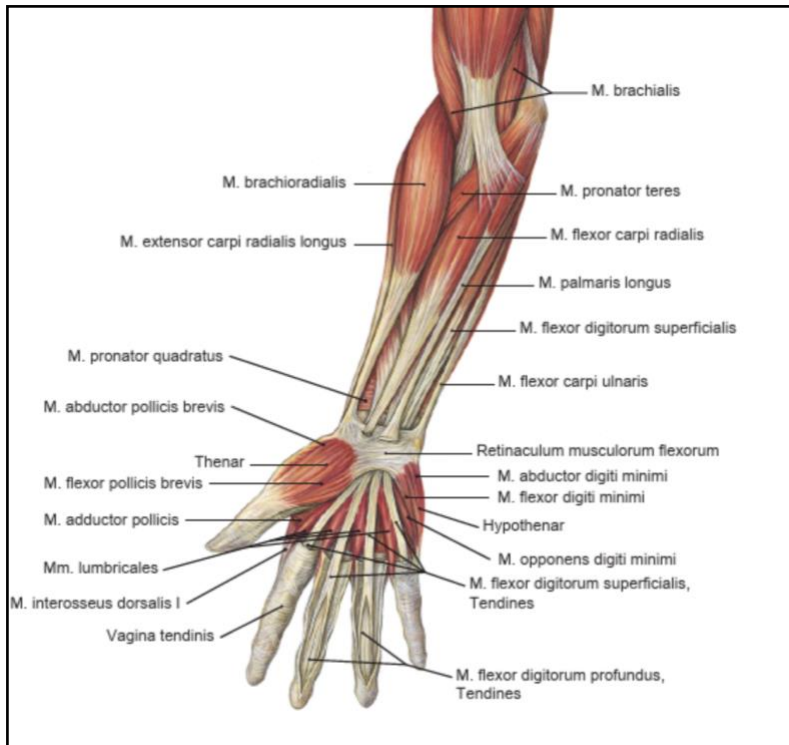


Abbildung 3 Ventrale Muskeln Arm, rechts. (S007-1-23) (16)

2.1.3.2 Radiale Muskulatur des Unterarms (15)

Zur radialen Muskelgruppe gehören von proximal nach distal der M. brachioradialis, welcher sowohl die Pronation als auch die Supination des Unterarms unterstützen kann, und die Mm. extensores carpi radialis longus und brevis, welche der Radialabduktion und der Streckung des Handgelenks dienen (15).

2.1.3.3 Dorsale Muskulatur des Unterarms

Oberflächliche Schicht der dorsalen Muskulatur (15)

Die oberflächliche Schicht der dorsalen Muskeln hat den gemeinsamen Ursprung am Epicondylus lateralis. Von radial nach ulnar (rechter Arm) zählen zu den oberflächlichen Streckern der M. extensor digitorum, der M. extensor digiti minimi sowie der M. extensor carpi ulnaris. Sie sind an der Streckung des Handgelenks sowie der Extension der Grund- und Mittelgelenke der Finger beteiligt (15).

Tiefe Schicht der dorsalen Muskulatur (15)

Von radial nach ulnar (rechter Arm) finden sich der M. abductor pollicis longus (Abduktion im Daumensattelgelenk), der M. extensor pollicis brevis, der M. extensor pollicis longus sowie der M. extensor indicis. Die tiefe Schicht der Strecker im Handgelenk besteht proximal aus dem M. supinator, welcher sich um den Radius windet und die Supination bei gestrecktem Ellenbogengelenk unterstützt (15).

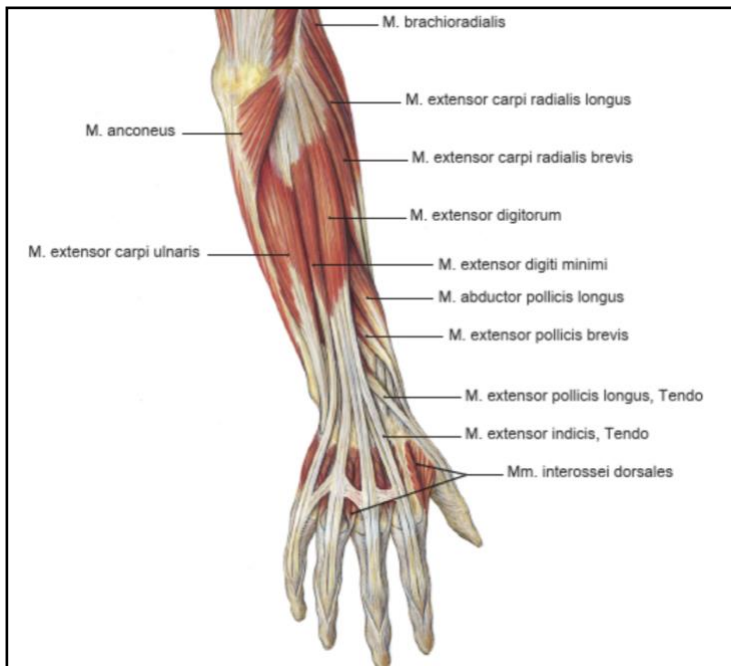


Abbildung 4 Dorsale Muskeln Arm, rechts (S007-1-23)(17)

2.1.3.4 Die Leitungsbahnen des Unterarms

Arterielle Versorgung des Unterarms (18)

Die Arteria radialis ist neben der Arteria ulnaris die wichtigste Arterie des Unterarms. Sie nimmt ihren Ursprung zusammen mit der A. ulnaris nach der Bifurkation der A. brachialis in der Fossa cubitalis. Die A. radialis verläuft lateral im Sulcus antebrachii radialis entlang des Radius in Richtung Handgelenk. Sie versorgt die radialen Anteile der Extensor- und Flexormuskulatur sowie die Handwurzel und die Hand. Die A. ulnaris hingegen verläuft entlang der medialen Seite des Unterarms, versorgt die ulnaren Anteile der Extensor- und Flexormuskulatur sowie die ulnare Seite der Hand und bildet in der Handfläche den oberflächlichen und tiefen Hohlhandbogen. Beide Arterien sind durch ein Netzwerk von Anastomosen miteinander verbunden, was eine kollaterale Blutversorgung ermöglicht und eine effiziente Versorgung der Unterarmstrukturen sicherstellt (18).

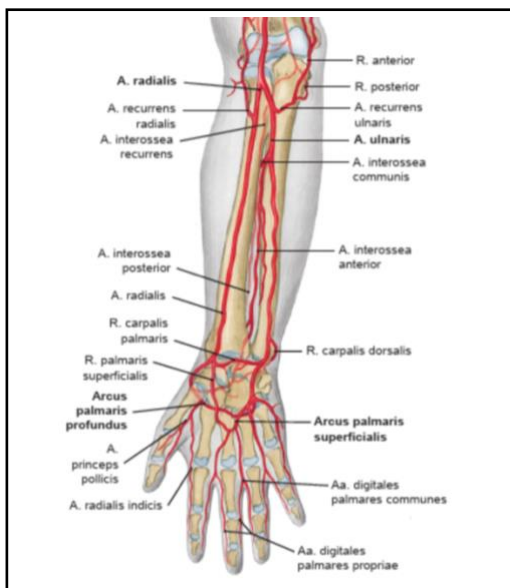


Abbildung 5 Arterien Unterarm, rechts (S007-1-23) (19)

Venöse Versorgung des Unterarms (18)

Der venöse Abfluss des Arms erfolgt sowohl über die oberflächlichen als auch über die tiefen Venen, welche durch Vv. perforantes miteinander verbunden sind. Die epifaszialen Venen, die oberflächlich verlaufen, drainieren in zwei Hauptgefäße: die V. basilica, die in die ulnare V. brachialis mündet, und die V. cephalica, die in die V. axillaris mündet. In der Ellenbeuge werden diese beiden Venen durch die V. mediana cubiti verbunden, welche häufig für Blutentnahmen genutzt wird. Der exakte Verlauf der Venen kann individuell variieren. Die tiefen Venen verlaufen subfaszial und sind paarige Begleitvenen der Armarterien, deren Verlauf und Bezeichnungen den jeweiligen Arterien entsprechen. In der Axilla vereinen sich die Vv. brachiales und bilden die V. axillaris (18).

Die Nerven des Unterarms (18)

Die wichtigsten Nerven des Unterarms sind der Nervus medianus, Nervus ulnaris und Nervus radialis. Der N. medianus, ausgehend vom Plexus brachialis (C5-Th1), verläuft durch den Karpaltunnel und versorgt motorisch die meisten Flexoren des Unterarms und alle Pronatoren, sowie sensorisch die palmare Seite der radialen 3½ Finger. Der N. ulnaris, ebenfalls aus dem Plexus brachialis (C8-Th1), zieht hinter dem Epicondylus medialis des Humerus in die Hand und innerviert motorisch den M. flexor carpi ulnaris und den ulnaren Teil des M. flexor digitorum profundus sowie sensorisch die ulnaren 1½ Finger. Der N. radialis, aus dem Plexus brachialis (C5-Th1), teilt sich oberhalb des Ellenbogens in einen motorischen Ast (R. profundus) und einen sensorischen Ast (R. superficialis), wobei der R. profundus die Extensoren des Unterarms und der R. superficialis die Haut des dorsalen Bereichs der radialen 3½ Finger versorgt.

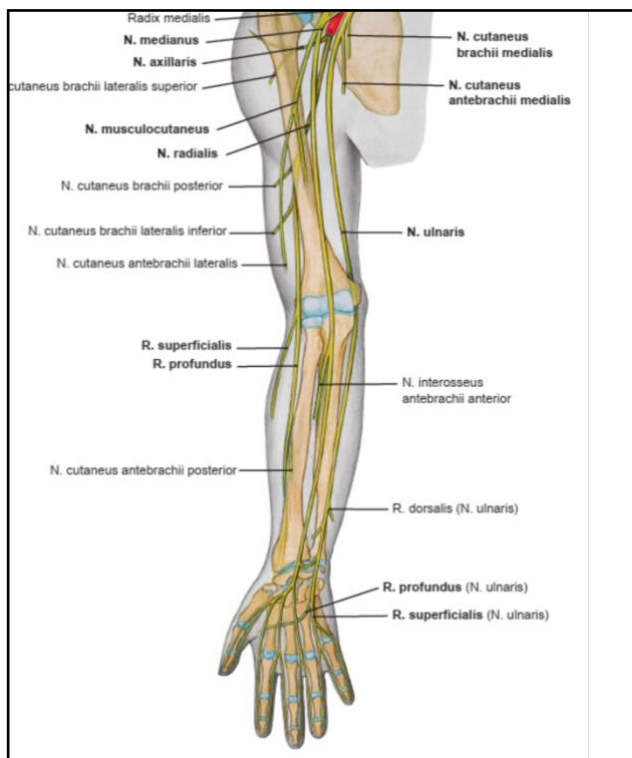


Abbildung 6, Nerven des Arms rechts, Ansicht von ventral. (S007-1-23) (1)

2.2 Frakturheilung

Das Ziel der Frakturheilung ist es, die Funktion und Form des zuvor intakten Knochens vollständig wiederherzustellen. Dieser Prozess resultiert in der Bildung von neuem Knochengewebe, welches den biomechanischen Eigenschaften des ursprünglichen Knochens entspricht. Knochen kann entweder über eine Vorstufe von Knorpelgewebe (sekundäre Frakturheilung) oder unter bestimmten Voraussetzungen ohne diese Zwischenstufe (primäre Frakturheilung) entstehen. Trotz der scharfen Trennung beider Arten der Frakturheilung in der klinischen Behandlung besteht die physiologische Knochenbruchheilung am ehesten aus einer Kombination beider Mechanismen, in der eine der Heilungsarten dominiert (20).

2.2.1 Sekundäre Frakturheilung

Durch Gewalteinwirkung auf den Knochen entsteht eine Fraktur. Im Frakturspalt bildet sich aufgrund verletzter Gefäße und Kapillaren des Peri- und Endosteums ein fibrinreiches Frakturhämatom. Thrombozyten werden aktiviert und setzen aktive Faktoren wie PDGF, VEGF, TNF- β , FGF, oder IGF-1 frei (21). Im bindegewebigen Frakturhämatom hypertrophieren lokale Chondrozyten, mineralisieren und werden durch Osteozyten ersetzt. Zunächst entsteht so ein von Chondrozyten dominierter weicher Kallus. Dieser wird anschließend schrittweise in harten Kallus umgebaut, der durch Anpassungsvorgänge im weiteren Verlauf dem ursprünglichen Knochen gleicht. Hierdurch gewinnt die ehemalige Frakturzone an Stabilität. Zuletzt wird durch Abbau- und Umbauprozesse (Remodeling) der fibröse Knochen abgebaut und durch die ursprüngliche Lamellenstruktur ersetzt. Der vollständige Umbauprozess des Knochens kann beim Menschen Jahre in Anspruch nehmen. Eine bewegungsstabile Konsolidierung wird jedoch schon weitaus früher erreicht (20).

Die sekundäre Frakturheilung umfasst also folgende Phasen:

- Entzündungsphase: Bildung eines fibrinreichen Frakturhämatoms und Freisetzung von Wachstumsfaktoren.
- Reparationsphase: Hypertrophie und Mineralisierung von Chondrozyten, Bildung von weichem Kallus, der dann in harten Kallus umgebaut wird.
- Remodeling-Phase: Abbau des fibrösen Kallus und Ersatz durch die ursprüngliche Lamellenstruktur des Knochens.

2.2.2 Primäre Frakturheilung

Die verschiedenen Phasen, wie wir sie bei der sekundären Heilung finden, werden bei der primären Knochenheilung übersprungen. Der neue Knochen entsteht hierbei also direkt aus mesenchymalen Zellen ohne eine Zwischenstufe über Knorpelbildung. Die primäre Knochenheilung ist sehr selten und findet im natürlichen Prozess einer Frakturheilung im Allgemeinen nicht statt. Sie erfordert eine absolut korrekte anatomische Reposition, nahezu ohne Spaltbildung und eine absolut stabile Fixation. Dies kann nur durch eine entsprechende Osteosynthese (Zugschraube, Zuggurtung oder Kompressionsplatte) erfolgen; eine Gipsruhigstellung ist nicht ausreichend (22, 23).

2.2.3 Absolute und relative Stabilität der Osteosyntheseverfahren

Grundsätzlich wird zwischen Osteosyntheseverfahren mit absoluter Stabilität und solchen mit relativer Stabilität unterschieden, was direkte Auswirkungen auf den Heilungsprozess hat. Osteosyntheseverfahren mit absoluter Stabilität, wie beispielsweise Zugschrauben oder Kompressionsplatten, ermöglichen eine primäre Frakturheilung. Bei dieser Methode werden die Frakturfragmente so fixiert, dass keine Beweglichkeit im Frakturspalt besteht. Dies führt zu einer direkten Knochenneubildung ohne sichtbare Kallusformation. Im Kindesalter wird dieses Verfahren vor allem bei Frakturen eingesetzt, die eine präzise anatomische Reposition

erfordern, um Fehlstellungen oder Wachstumsstörungen zu vermeiden, wie beispielsweise bei epiphysären Frakturen (23).

Im Gegensatz dazu führen Osteosyntheseverfahren mit relativer Stabilität wie die ESIN, zu einer sekundären Frakturheilung. Hierbei bleibt eine gewisse Mikrobeweglichkeit am Frakturspalt erhalten, was die Kallusbildung fördert und den natürlichen Heilungsprozess unterstützt (23, 24).

2.2.4 Besonderheiten im Knochenstoffwechsel von Kindern

Das reifende Skelett und die Frakturheilung im Kindesalter weisen altersabhängige Unterschiede zum Erwachsenen auf. So ist das Periost im Kindesalter dicker, fester und meist auch stärker vaskularisiert. Zudem ist es weniger fest mit dem Knochen verwachsen und bleibt beim Trauma häufig intakt (25). Der Heilungsprozess gestaltet sich im Allgemeinen schneller, zudem verfügen Kinder über eine sehr gute Remodellierungs-Kapazität (26). Das Ausmaß des Korrekturpotentials nach einer Fraktur ist variabel und hängt von mehreren Faktoren ab: der Fraktur, ihrer Lokalisation, der funktionellen Beanspruchung der angrenzenden Gelenke, dem Patientenalter sowie der statischen Belastung. Generell ist das Potenzial für eine Spontankorrektur bis zum Erreichen des zehnten Lebensjahres höher als danach, mit einer stärkeren Tendenz zur Spontankorrektur an der oberen Extremität im Vergleich zur Unteren. An der oberen Extremität ist das Korrekturpotential vor allem nahe der potenten Wachstumsfugen des proximalen Humerus und des distalen Unterarms ausgeprägt. Typischerweise zeigen Frakturen von Kindern bei einer Achsenabweichung von bis zu 10° ein Potential zur Spontankorrektur, dies gilt jedoch nicht für Rotationsfehlstellungen. Um eine stabile Frakturheilung zu erreichen, sind bei pädiatrischen Patienten in der Regel weniger Anfangsstabilität und weniger Kallusbildung erforderlich. Die meist bessere vaskuläre Versorgung des Knochengewebes unterstützt den Heilungsprozess zusätzlich. Zudem tragen das größere subperiostale Hämatom sowie das stärkere Periost zu einer rascheren Kallusbildung bei, die stark genug ist, eine rasche Frakturheilung zu ermöglichen (27). Der Knochen verfügt im Kindesalter über eine enorme Elastizität und einen kräftigen Band- und Kapselapparat. Dies kann zu inkompletten Frakturen wie Grünholz- und Wulstfrakturen, einer geringeren Häufigkeit von Fragmentverschiebungen (z.B. Toddler-Fraktur) sowie Verletzungen von Bändern mit knöchernen oder periostalen Ausrissen führen.

Die Epiphysenfuge stellt im Wachstumsalter den Übergang zwischen der Metaphyse und Epiphyse dar. Während die Epiphyse initial rein knorpelig angelegt ist, ist die Metaphyse aufgrund ihrer Elastizität anfällig für Wulstfrakturen. Wenn das Stratum germinativum durch ein Trauma geschädigt wird, kann dies das Knochenwachstum beeinträchtigen. Darüber hinaus kann eine Dislokation der Bruchfragmente zu einer Stufenbildung im betroffenen Gelenk führen. Epiphysenfrakturen erfordern daher eine besonders sorgfältige Reposition und Fixierung (25).

2.3 Unterarmschaftfraktur

2.3.1 Epidemiologie und Ätiologie der Unterarmschaftfraktur

Laut Kraus et al. wird die Prävalenz aller kindlichen Frakturen in Mitteleuropa mit 21-25 Frakturen pro 1000 Kinder jährlich angegeben (28). Das Risiko, bis zum Abschluss des Wachstumsalters eine Fraktur zu erleiden, liegt schätzungsweise zwischen 15 und 45 Prozent (28). Unterarmfrakturen sind mit 23 Prozent die häufigste Frakturform im Kindesalter (29). Die Diskontinuität beider Unterarmknochen im mittleren Drittel bezeichnet man als Unterarmschaftfraktur. Unterarmschaftfrakturen machen mit etwa 5 - 10 Prozent einen großen Teil aller Frakturen im Kindesalter aus (2, 30). Die Inzidenz von Unterarmschaftfrakturen und auch die operative Versorgungshäufigkeit stieg innerhalb der letzten Jahre stetig an (2). Sinikumpu et al. berichten über eine hohe Inzidenz während der Sommermonate (2). Beobachtungsstudien zeigen in der geschlechtsspezifischen Verteilung ein häufigeres

Auftreten von Unterarmschaftfrakturen beim männlichen Geschlecht (3, 31). Die Ätiologie gestaltet sich vielfältig: Zur Mehrzahl der Frakturen kommt es aufgrund von Stürzen während der Freizeit, insbesondere durch sportliche Aktivität oder bei Spielplatzunfällen. Einige Verletzungen ereignen sich im häuslichen Umfeld. Seltene Ursachen sind Verkehrsunfälle oder Kindesmisshandlung (31, 32). Unterarmschaftfrakturen treten in der Regel nach einem indirekten Trauma auf. Der Schaft besteht überwiegend aus dicker Kortikalis. Somit ist im Vergleich zur Metaphyse eine große Trauma-Energie erforderlich, um den stabilen Schaft zu schädigen (2). Meist schützt sich das Kind beim Sturz, indem es sich mit ausgestrecktem Arm abfängt (31). Hierbei wird die Hand in der Regel zunächst proniert, was nach der Landung in einer schnellen Supination des Unterarms endet. Der Radius bricht meistens zuerst, da die Belastungskraft beim Aufprall zuerst über den Radius übertragen wird (2, 31).

2.3.2 Klinik und Diagnostik

Zur Indikationsstellung erfolgt nach der Anamnese in der Regel eine klinische Untersuchung und eine Röntgenaufnahme. Die klinische Untersuchung ist aufgrund des Schmerzes der jungen Patienten häufig nur eingeschränkt möglich. Die Inspektion dient der Detektion von sichtbaren Fehlstellungen, Weichteilschäden, Schwellungen, Begleitverletzungen und Asymmetrien (33). Die Prüfung von peripherer Durchblutung, Motorik und Sensibilität ist obligat, um Nerven- und Gefäßläsionen detektieren zu können (33, 34). Wichtig ist die Beurteilung der klinischen Situation (Schmerz, Schwellung, Muskelkonsistenz, Muskeldehnungsschmerz, Kompartement-Syndrom) (34). Nach umfassender klinischer Untersuchung kann die Indikation zur Röntgenaufnahme gestellt werden. Hierbei wird meist eine anterior - posteriore und seitliche Bildgebung durchgeführt (35). Die Röntgenaufnahme erfolgt mit den angrenzenden Gelenken (34, 35). Röntgenaufnahmen der Gegenseite sind nicht indiziert (33, 34).

2.3.3 AO-Klassifikation für Frakturen im Kindesalter (PCCF) (36, 37)

Im Folgenden wird eine kurze Übersicht über die AO Pediatric Comprehensive Classification of Long-Bone Fractures (PCCF) gegeben. Dieses Klassifikationssystem berücksichtigt die besonderen Merkmale von Frakturen im Kindesalter und basiert auf der Müller-AO-Klassifikation für Erwachsene. Der vollständige Frakturcode besteht aus fünf oder sechs Positionen, abhängig davon, ob ein Zusatz- bzw. Ausnahme-Code verwendet wird. Die ersten drei Positionen dienen der groben Lokalisation, während die Positionen vier bis sechs kindermorphologische Besonderheiten beschreiben. Die detaillierte und standardisierte Codierung erleichtert die Analyse und den Vergleich von Behandlungsergebnissen.

An der 1. Position erfolgt die Nummerierung der einzelnen Knochen gemäß ihrer Position im Skelett:

- 1 - Humerus
- 2 - Radius/Ulna
- 3 - Femur
- 4 - Tibia/Fibula

Paarige Knochen mit identischem Verletzungsmuster werden durch einen Frakturcode klassifiziert. Wenn nur ein Knochen betroffen ist, wird dies durch einen Buchstaben (r, u, t, f) angezeigt. Bei unterschiedlichem Verletzungsmuster beider Knochen muss jeder Knochen separat kodiert werden.

An 2. Position findet sich der Segmentcode:

- Segment 1 - proximale Fraktur (proximale Epiphyse und Metaphyse)
- Segment 2 - diaphysäre Fraktur (Diaphyse)
- Segment 3 - distale Fraktur (distale Metaphyse und Epiphyse)

An 3. Position wird differenziert nach:

- E - Epiphyse
- M - Metaphyse
- D - Diaphyse

Die Metaphyse wird hierbei durch ein Quadrat definiert, dessen Seitenlänge der breitesten Stelle der sichtbaren epiphysären Wachstumsfuge entspricht. Das Zentrum der Fraktur muss in diesem Quadrat liegen. Für Radius/Ulna und Tibia/Fibula müssen beide Knochen in das Quadrat einbezogen werden.

Als 4. Position wurde der Kinder-Code eingeführt, bei dem standortabhängig (E-M-D) spezifische Frakturmuster erfasst werden.

Dabei erfolgt eine Unterscheidung zwischen 9 verschiedenen epiphysären Frakturen:

- E 1-4: Salter Harris 1-4
- E 5: Two Plane Fraktur (Übergangsfaktur)
- E 6: Tri Plane Fraktur (Übergangsfaktur)
- E 7: epiphysärer Bandausriss
- E 8: Flake Fraktur
- E 9: sonstige epiphysäre Frakturen

Im Bereich der Metaphyse unterscheidet man 4 verschiedene Frakturen:

- M 2: Grünholz-, Wulst- und Spiralfaktur
- M 3: komplette Fraktur
- M 7: osteo- oder muskuloligamentäre Avulsionen, einfache Avulsionsverletzungen
- M 9: sonstige metaphysäre Frakturen

Im Bereich der Diaphyse wird zwischen 9 verschiedenen Frakturen differenziert:

- D 1: Bowing Frakturen
- D 2: Grünholz Frakturen
- D 3: Toddler's Fraktur
- D 4: komplette Querfraktur (Winkel zwischen Lot zu Kortikalis und Frakturspalt < 30°)
- D 5: Schräg- und Spiralfaktur (Winkel > 30°)
- D 6: Monteggia Fraktur
- D 7: Galeazzi Fraktur
- D 9: andere diaphysäre Frakturen

Die 5. Position dient der Kategorisierung der Frakturkomplexität.

- .1: einfache Fraktur
- .2: Keilfrakturen bzw. partiell instabile Frakturen mit drei Fragmenten einschließlich eines vollständig dislozierten Fragmentes
- .3: vollständig instabile Fraktur mit mehr als drei Fragmenten

An Position 6 findet sich die Ausnahmeziffer/ der Zusatzcode. Dieser Code wird für besondere Frakturen verwendet, die eine spezielle Klassifizierung erfordern:

- suprakondyläre Humerusfraktur (13-M/3)
- Radiushalsfrakturen (21-M/2 oder /3; 21-E/1 oder /2)
- Schenkelhalsfrakturen
- Epiphysenlösungen des Schenkelhalses

Ein Beispiel für eine vollständige Klassifikation einer Unterarmschaftfraktur könnte nach der oben beschriebenen Klassifikation wie folgt aussehen:

Diaphysäre, komplette, einfache Querfraktur von Radius und Ulna ohne spezielle Klassifizierung: 22D4.1

2.4 Elastisch-stabile Marknagelung

2.4.1 Geschichte

Bereits Mitte des 19. Jahrhunderts erfolgten erste Versuche der intramedullären Fixierung von Frakturen mit Implantaten aus Elfenbein oder Rinderknochen (38). Weitere Experimente der intramedullären Fixation führte der Chirurg Nicholas Senn im Jahre 1893 durch (39). 1937 begannen die Gebrüder Rush lange, dünne und flexible Stahldrähte zur Stabilisation von Röhrenknochenfrakturen zu verwenden (39). Als Pionier und Erfinder der intramedullären Marknagelung gilt jedoch der deutsche Chirurg Gerhard Küntscher. Er führte 1939 die erste Nagelung einer subtrocantären Fraktur durch. Zu seinen wichtigsten Innovationen zählen der von der Frakturstelle entfernte Eintrittspunkt des Nagels, sowie die Verwendung eines Implantats mit ausreichendem Kaliber über die volle Länge der Markhöhle. Küntscher-Nägel wurden aus Metall gefertigt und dienten insbesondere der Frakturbehandlung von Soldaten während des Zweiten Weltkriegs (40).

Die Arbeitsgruppe um Jean Prevot und Jean Paul Metaizeau am Kinderkrankenhaus von Nancy in Frankreich trug Ende der 70er Jahre einen wesentlichen Teil zur Weiterentwicklung und Verbreitung der ESIN bei (41). Sie weiteten ihre Anwendung auf das Kindesalter aus. Als Synonyme für eine ESIN werden deswegen auch die Begriffe Nancy-Nagelung, Prevot-Nagelung, oder ECMES (Embrogage centromedullaire elastique stable) gebraucht. Der entscheidende Unterschied zu den bisherigen Verfahren lag in der Elastizität der verwendeten Nägel. Zudem liegen die elastisch-stabilen intramedullären Nägel flexibel am Kortex an, während bei der intramedullären Nagelung nach Küntscher der Nagel mittels Pressdruck am Knochen fixiert wurde. Die Weiterentwicklung und Verbreitung der ESIN in den 1980er Jahren wurde maßgeblich durch die Arbeiten von Prof. Pierre Lascombes geprägt. Er arbeitete ebenfalls an der Universitätsklinik in Nancy und veröffentlichte zahlreiche Arbeiten zur Anwendung der ESIN und den Vorteilen gegenüber bestehenden Methoden. Indem er Protokolle und Instrumente entwickelte, die weltweit angewendet werden konnten, trug er zur weiteren Standardisierung der ESIN-Technik bei (42).

2.4.2 Indikationen und Kontraindikationen zur ESIN von Unterarmschaftfrakturen

Unter bestimmten Voraussetzungen können Unterarmschaftfrakturen konservativ mittels Gipsruhigstellung behandelt werden (4). Bei diaphysären, dislozierten oder instabilen Frakturen wird jedoch die Indikation zur operativen ESIN gestellt (34, 35, 43-45). Derartige Frakturen weisen entweder eine Verkürzungsfehlstellung oder einen Fragmentkontakt von weniger als der halben Schaftbreite auf. Eine weitere Indikation sind Refrakturen und Brüche mit Verletzungen von Gefäßen, Nerven oder Sehnen (34). Auch bei Achsenfehlstellungen ist eine operative Versorgung indiziert. Hierzu zählen die radiale Achsenfehlstellung der Ulna und die ulnare Achsenfehlstellung des Radius. Auch die palmare Achsenfehlstellung, insbesondere die des Radius von mehr als 10 Grad, sollte operativ behandelt werden (34, 35, 46). Die Indikation zur intramedullären Nagelung wird auch bei einer Achsenabweichung mit einhergehender Einengung des interossären Raums gestellt (46, 47). Relative Indikationen zum Einsatz der operativen ESIN sind offene Frakturen (II.-III. Grades) (35, 48, 49), dislozierte Grünholzfrakturen (46) und metaphysäre Frakturen am Übergang zur Diaphyse. Bei offenen Frakturen III. Grades ist beispielsweise eine Versorgung mittels Fixateur externe möglich (49). Bei Frakturen mit bereits geschlossener Epiphysenfuge kann die ESIN erwogen werden, hier ist auch die Kombination mit einer Plattenosteosynthese möglich (46). Bei dislozierten Frakturen mit einem Fragmentkontakt von weniger als der halben Schaftbreite ohne Achsenabweichung besteht eine relative Indikation. Undislozierte, instabile Frakturen ohne Repositionsbedarf stellen keine Indikation dar (50). Auch bei stabilen Grünholzfrakturen von Kindern unter 5 Jahren und distalen, metaphysären Frakturen erfolgt in der Regel keine Therapie mittels ESIN (49).

2.4.3 Operation

Die elastisch-stabile intramedulläre Marknagelung (ESIN) ist ein operativer Eingriff, der in Vollnarkose unter sterilen Bedingungen unter Bildwandler-Kontrolle durchgeführt wird (51). Die Indikationsstellung erfolgt nach klinischer Untersuchung und Röntgenkontrolle. Präoperativ wird möglichst eine anteroposteriore und seitliche (einschließlich der angrenzenden Gelenke) radiologische Bildgebung durchgeführt (35). Wenn sich präoperativ bereits aus einer Röntgenebene die OP-Indikation ergibt, kann die zweite Ebene im OP unter Narkose nachgeholt werden. Während der Operation befindet sich der Patient in Rückenlage. Der frakturierte Arm wird auf einen Röntgenstrahl-durchlässigen Armtisch ausgelagert. Die Nägel werden unter Schonung der Epiphysenfugen über einen minimalinvasiven Zugang eingebracht (52). Hierbei hat der Operateur verschiedene Zugangsmöglichkeiten. Es besteht die Möglichkeit, die Nägel über einen antegraden oder retrograden Zugang einzubringen. Zunächst wird der schwieriger zu reponierende Knochen, in der Regel der Radius, versorgt (35). Der Nagel des Radius wird gewöhnlich ascendierend, d. h. von distal nach proximal eingebracht. Meist erfolgt der radiale Zugang dorsal über dem Tuberculum dorsale radii circa 2 cm proximal der Epiphysenfuge, um den oberflächlichen Ast des Nervus radialis zu schonen (52). Zur anterograden Schienung der Ulna wird die Haut in der Regel dorsolateral unter Schonung der Olekranonapophyse inzidiert. Der Pfriem wird anschließend etwa 2 cm distal der Apophysenfuge eingebracht (35). Bei sehr weit proximal gelegenen Ulnafrakturen oder bei Komplikationswunden am Ellenbogen kann jedoch auch eine ascendierende Schienung indiziert sein. In diesen Fällen wird eine Inzision über der distalen Ulnametaphyse ulnarseitig durchgeführt (52). Nach dem Hautschnitt erfolgt die stumpfe Präparation bis zum Knochen in Längsrichtung der Weichteile und die Eröffnung der Kortikalis mittels Pfriem unter radiologischer Sicht (35, 52). Hierzu wird der Pfriem zuerst senkrecht zum Schaft bis auf den Knochen eingebracht und dieser markiert. Anschließend wird der Pfriem unter Drehbewegungen in den Knochen und unter weiteren rotierenden Bewegungen bis zum Frakturspalt vorgeschoben (35, 52). Durch leichten Druck und Drehen des Nagels kann das Frakturfragment anschließend reponiert und aufgeädelt werden (35). Radial kann der Nagel bis zur Tuberositas radii vorgeschoben werden (35, 52). In der Ulna wird der ESIN bei anterograden Schienung bis in den distalen Abschnitt der Metaphyse eingebracht. Um die physiologische Aufspannung der Membrana interossea zu gewährleisten, sollten die Nagelspitzen in Ulna und Radius aufeinander zugekehrt liegen (35, 52). Sind beide Nägel in die gegenüberliegende Metaphyse eingebracht, können sie zunächst mit ca. 1 cm Abstand zum Knochen abgeschnitten werden. Anschließend werden sie mit Hilfe eines Einschlagbolzens in die finale Position gebracht, sodass sie am Ende noch ca. 5 mm aus der Kortikalis herausragen. Um Weichteilirritationen und Sehnenverletzungen vorzubeugen, besteht die Option, Verschlusskappen zu verwenden. Nach dem Einbringen und Kürzen der Nägel wird intraoperativ die Unterarmpronation und Supination überprüft, um eine mögliche Rotationsfehlstellung zu vermeiden (53). Nach zwei bis drei misslungenen Repositionsversuchen sollte eine offene Reposition erfolgen. Hierzu wird über der Fraktur des betroffenen Knochens inzidiert und unter Sicht reponiert (35). Postoperativ wird der Arm elastisch gewickelt (52). Nach erfolgter ESIN ist keine zusätzliche Gipsanlage indiziert.

2.4.4 Biomechanik und Material

Für die elastisch-stabile intramedulläre Nagelung werden Implantate aus Stahl oder Titan verwendet. Beide Materialien haben unterschiedliche Eigenschaften. Nägel aus Stahl weisen eine größere Steifheit auf, während Nägel aus Titan flexibler sind. Die intramedulläre Markraumschienung beruht auf dem Prinzip einer 3-Punkte-Abstützung zweier gegenläufiger Kraftträger (54). Jeder dieser Kraftträger stützt sich idealerweise an drei Punkten ab, an der Kortikalis der Eintrittsstelle, an der Kortikalis auf Frakturhöhe und an der metaphysären Spongiosa des Gegenfragments (29, 54). Zur weiteren Stabilisierung trägt die Aufspannung der Membrana interossea über die divergierenden Nägel in Radius und Ulna bei (54). Für Mann et al. scheint jedoch in erster Linie die achsgerechte intramedulläre Stellung mit der damit einhergehenden Aufspannung der Membrana interossea und erst in zweiter Linie die

gegenläufige Dreipunktstützung von Bedeutung zu sein (3). Diese Schlussfolgerung beruht auf der Analyse postoperativer Röntgenbilder nach ESIN. Hierbei war bei 14,8% der Patienten auf den Röntgenbildern keine gegenläufige Dreipunktstützung (zu kräftige Implantate und fehlerhafte Implantatausrichtung) darstellbar, ohne dass sich hieraus Komplikationen ergaben (3).

Die Elastizität und Aufspannung der Implantate bewirkt eine Stabilität und Rückstellkraft in allen räumlichen Ebenen. Die längs des Frakturspalts einwirkenden Zug- und Scherkräfte werden in axiale Kompressionskräfte umgewandelt (55). Zudem bestehen Mikrobewegungen im Frakturbereich. Diese führen zu einer Förderung der Kallusbildung und zu einer beschleunigten Frakturheilung (29, 56). Voraussetzung für das Verfahren ist ein Weichteilmantel mit intakter Muskulatur, da das Prinzip der elastischen Schienung durch den Muskelzug realisiert wird (57). Um unterschiedliche biomechanische Kräfte zu vermeiden, sollten Implantate mit identischem Durchmesser verwendet werden (52). Der empfohlene Durchmesser der intramedullären Implantate sollte nach Slongo 60% des engsten Markraumdurchmessers betragen (58). Auch Dietz et al. empfehlen die intramedullären Implantate so zu wählen, dass 2/3 des Markraums ausgefüllt werden (59). Mann et al. berichten jedoch über die komplikationslose Verwendung dünnerer Nägel (1/3 des engsten Markraumdurchmessers). Die dünneren Implantate ließen sich einfacher einführen und ermöglichten leichtere Stellungskorrekturen im Frakturbereich (3). Laut Sinikumpu et al. werden in der Praxis häufig die Nägel mit einem Durchmesser von etwa 40 % im Vergleich zum kleinsten Durchmesser des Markraums gewählt (2).

2.5 ESIN im Vergleich zu alternativen Methoden

2.5.1 Vor- und Nachteile der ESIN

Die ESIN erfordert als minimalinvasive Technik nur kleine Inzisionen, was zu einem geringen Weichteilschaden führt und die postoperative Schmerzintensität reduzieren kann (60). Die Narben nach der Operation sind klein und führen meist zu einem zufriedenstellenden kosmetischen Ergebnis. Der minimalinvasive chirurgische Zugang reduziert im Vergleich zu offeneren chirurgischen Verfahren zudem das Infektionsrisiko. Ferner zeichnet sich die ESIN durch eine kurze Operationsdauer mit nur kurzer Hospitalisierung und geringer Komplikationsrate aus. Durch die intramedulläre Platzierung der Nägel bleibt die periostale Blutversorgung weitgehend unbeeinträchtigt, was eine gute Frakturheilung begünstigt. Die Wachstumsfugen werden bei korrekter Anwendung nicht tangiert, wodurch das Risiko für spätere Wachstumsstörungen der jungen Patienten minimiert wird. Gegenüber anderen operativen Verfahren gestaltet sich die Metallentfernung meist schnell und unkompliziert und wird ambulant durchgeführt. Ein weiterer Vorteil stellt die schnelle postoperative Belastbarkeit und Mobilisierung dar (61). Im Vergleich zur konservativen Therapie besteht ein geringeres Risiko für eine sekundäre Dislokation. Eine Gipsruhigstellung nach ESIN ist nicht indiziert. Dies verhindert durch den Gips ausgelöste Komplikationen wie Druckschäden, Weichteilirritationen, Hautreizungen, Muskelschwund, Sensibilitäts- oder Durchblutungsstörungen.

Obwohl die ESIN ein komplikationsarmes Verfahren darstellt, müssen bei Indikationsstellung die Vorteile stets gegen potenzielle Risiken und Komplikationen abgewogen werden. Hierzu zählen neben den Risiken einer Operation in Intubationsnarkose unter anderem Refrakturen, Nervenläsionen, Weichteilirritationen, Osteomyelitis, Wundheilungsstörungen, verzögerte Frakturheilung, Achsenabweichungen oder postoperative Bewegungseinschränkungen (5, 35, 62). Lascombes et al. sehen technische Fehler wie die Verwendung zu dünner Nägel oder eine falsche Ausrichtung der Implantate als Hauptursache für spätere Komplikationen an (63). Dies unterstreicht die Bedeutung eines tiefen Verständnisses der biomechanischen Prinzipien der ESIN-Technik durch den Operateur. Für einige Kinder stellt die ESIN jedoch kein optimales Operationsverfahren dar. Kinder mit pathologischen Frakturen, welche beispielsweise durch Tumore verursacht werden, sowie Kinder mit Knochendysplasien oder anderen angeborenen Knochenanomalien könnten von speziellen Behandlungsansätzen profitieren, die über die

Möglichkeiten der ESIN hinausgehen. Auch offene Frakturen (Grad 2-3), Mehrfragmentfrakturen oder gelenksnahe Frakturen können eine andere Art der Fixation erforderlich machen. Die Anwendung von ESIN bei adipösen Kindern oder Patienten in der Adoleszenz kann herausfordernd sein, ist aber nicht grundsätzlich ausgeschlossen (64).

2.5.2 Alternative Therapieoptionen einer Unterarmschaftfraktur von Kindern

2.5.2.1 Fixateur externe

Hierbei handelt es sich um eine winkelstabile Überbrückung über perkutan oder minimal-invasiv eingebrachte Gewindestäbe (Pins) und einen oberhalb des Hautniveaus extern angebrachten Träger (65). Bei Frakturen mit drohendem Kompartmentsyndrom oder Trümmerfrakturen bzw. Mehrfragmentfrakturen ist die Behandlung mittels Fixateur externe indiziert. Auch offene Frakturen (Grad 2-3) und ausgedehnte Weichteilschäden können eine Indikation darstellen (65). Bei instabilen distalen diaphysären Frakturen von Patienten mit nahezu abgeschlossenem Wachstum sollte ebenfalls die Osteosynthese mittels Fixateur externe erwogen werden (24).

2.5.2.2 Plattenosteosynthese

Bei der Plattenosteosynthese handelt es sich um ein universal einsetzbares Verfahren. Hierbei werden vorgefertigte Platten, welche den Frakturspalt überbrücken, zur Stabilisierung und Fixierung der Fraktur eingesetzt. Die Plattenosteosynthese hat seit der Einführung der ESIN an Bedeutung abgenommen und stellt in der Behandlung von Unterarmschaftfrakturen im Kindesalter nur noch eine Ausnahmeindikation dar (34, 62). Indikationen für die Plattenosteosynthese können eine geschlossene, nicht reponierbare instabile Unterarmfraktur, eine Korrekturosteotomie, revisionspflichtigen Nerven- und Gefäßläsionen, offene Frakturen sowie Refrakturen und Pseudarthrosen darstellen (57, 66). Ferner kann die Plattenosteosynthese bei Patienten in der Adoleszenz mit bereits geschlossenen Wachstumsfugen zur Osteosynthese instabiler Frakturen indiziert sein (34, 52). Auch bei übergewichtigen Kindern stellt sie eine Behandlungsalternative dar. Bei korrekter Indikationsstellung berichtet die Mehrheit der Autoren über zufriedenstellende Behandlungsergebnisse (61, 66-68). Jedoch ist die Plattenosteosynthese im Vergleich zur ESIN das invasivere Verfahren. Sie geht mit einem größerem Weichteiltrauma und der möglichen Entfernung des für die Heilung wichtigen Frakturhämatoms einher (69). Mikrobewegungen im Frakturspalt, welche sich positiv auf die Frakturheilung auswirken (29), sind bei der Plattenosteosynthese, die ein rigides Verfahren darstellt, nicht möglich. Auch die Metallentfernung, welche üblicherweise nach Ablauf eines Jahres durchgeführt wird, ist meist aufwändiger und mit einem größeren Weichteiltrauma verbunden (62). Fernandez et al. berichten über signifikant schlechtere Ergebnisse der Plattenosteosynthese hinsichtlich des chirurgischen Zugangs, der Operationszeiten, der Häufigkeit und Dauer der Krankenhauseinweisungen und des kosmetischen Ergebnisses im Vergleich zur ESIN (69).

2.5.2.3 Konservative Therapie

Als Alternative zur operativen Behandlung besteht in einigen Fällen die Indikation zur konservativen Behandlung. Da keine Inzision erfolgt, besteht ein geringes Infektionsrisiko, Belastungen durch die Operation und Narkose werden für die jungen Patienten verhindert. Insbesondere bei Frakturen, die stabil, nicht disloziert, unvollständig oder achsengerecht stehend sind, sollte eine konservative Behandlung in Betracht gezogen werden. Auch tolerabel dislozierte meta- und diaphysäre Frakturen können konservativ therapiert werden, wobei „tolerabel“ alters- und lokalisationsabhängig zu definieren ist (70). Zu beachten ist hierbei das erhebliche Korrekturpotenzial des wachsenden Knochens. Es wurde beschrieben, dass nicht nur Achsenfehlstellungen, sondern auch Seit-zu-Seit-Verschiebungen bis zur vollen Schaftbreite erfolgreich korrigiert werden können. Rotationsfehler können jedoch nicht durch Wachstum korrigiert werden (71). Auch Grünholzfrakturen können unter gewissen Voraussetzungen konservativ behandelt werden (72).

2.6 Mögliche Einflussfaktoren auf den klinischen Verlauf

2.6.1 Prä- und perioperative Risikofaktoren

2.6.1.1 Bestehende Vorerkrankungen / Medikation

Eine verzögerte Frakturheilung bei Kindern kann durch eine Vielzahl von Faktoren bedingt sein. Beispielsweise durch diverse bestehende Vorerkrankungen bzw. Syndrome und Medikation der Patienten. Im Folgenden finden sich einige Erkrankungen, die mit einer verzögerten Knochenheilung einher gehen können.

Die Osteogenesis Imperfecta ist eine hereditäre seltene Erkrankung der Kollagensynthese, die sich durch zahlreiche extraskeletale Manifestationen sowie durch eine unvollständige Knochenbildung mit erhöhter Brüchigkeit der Knochen und häufigen Frakturen auszeichnet (73). Die operative Versorgung ist anspruchsvoll und die Frakturheilung kann bei betroffenen Patienten verzögert sein.

Die Rachitis repräsentiert eine Störung des Knochenstoffwechsels von Kindern und führt zu einer insuffizienten Mineralisation bzw. Demineralisation der Knochen (74). Ursächlich ist meist ein Vitamin-D-Mangel als Folge mangelnder UV-Exposition, unzureichender Vitamin-D-Supplementierung, inadäquater diätetischer Vitamin-D-Zufuhr oder Malassimilation. Als Komplikation kann es zu pathologischen Frakturen und zur verzögerten Frakturheilung kommen.

Auch die Einnahme von Medikamenten, wie zum Beispiel Immunsuppressiva, kann die Knochenheilung beeinträchtigen oder mit einem erhöhten Risiko für postoperative Wundheilungsstörungen und Infektionen einhergehen. Obwohl eine kurzzeitige Anwendung von Steroiden in der Regel gut toleriert wird und keinen negativen Einfluss auf die Knochenheilung zu haben scheint, kann eine langfristige Einnahme teils mit erheblichen Verzögerungen der Knochenheilung einhergehen (75). Tierexperimentell konnten Liu et al. zeigen, dass die Einnahme von Prednisolon über einen Zeitraum von drei Monaten eine reduzierte Bildung von hartem Kallus und eine Verlangsamung des Knochenumbaus zur Folge hatte (75, 76).

2.6.1.2 Offene Frakturen - Kontamination

Offene Frakturen und Kontamination stellen ein erhöhtes Risiko für Komplikationen dar. Das Infektionsrisiko ist bei offenen Frakturen deutlich erhöht (77). Neben einer möglichst zeitnahen operativen Versorgung und Weichteilrekonstruktion ist eine Lavage und ein chirurgisches Debridement notwendig (78). Nach derzeitigen Erkenntnissen wird die Verabreichung einer prophylaktischen systemischen antibiotischen Therapie bei Patienten mit offenen Frakturen empfohlen, um die bereits eingedrungenen Mikroorganismen zu eradizieren, bevor es zu einer klinisch manifesten Infektion kommt (79). Hierbei hängt die Wahl des geeigneten Antibiotikums auch von dem Grad der offenen Fraktur und der Ausprägung der Kontamination zusammen. Im Gegensatz zu den meisten orthopädischen Infektionen bei intakter Haut ist das Keimpektrum der traumabedingten tiefen Kolonisation deutlich breiter und resistenter (79,

80). Bezüglich der Dauer und Substanzwahl herrscht aktuell innerhalb der verschiedenen Zentren keine einheitliche Vorgehensweise (77, 79). Dies unterstreicht die Wichtigkeit standardisierter, evidenzbasierter Protokolle. Offene Frakturen gehen oft mit erheblichen Weichteilverletzungen einher, was die Stabilität und die Heilungsfähigkeit des Gewebes zusätzlich beeinträchtigen kann und teils aufwändige Defektrekonstruktionen erforderlich macht. Ferner kann durch die Schädigung der Weichteile die Blutversorgung gestört sein, was die Frakturheilung zusätzlich behindert. Die Komplexität der Fraktur spielt ebenfalls eine Rolle. Offene Frakturen sind häufig komplexer und instabiler als geschlossene Frakturen, was die Durchführung der ESIN-Technik erschwert und das Risiko für intra- und postoperative Komplikationen erhöht.

Eine bekannte Klassifikation zur Einteilung des Schweregrades der Weichteilverletzung bei offenen und geschlossenen Frakturen ist die Klassifikation nach Tscherny und Oestern. Es existieren auch weitere Klassifikationen wie beispielsweise die Einteilung von Anderson und Gustilo (77).

Klassifikation nach Tscherny und Oestern (81, 82)

Geschlossene Frakturen

Grad 0 Einfache Frakturformen - keine oder unbedeutende Weichteilverletzung

Grad I Einfache bis mittelschwere Frakturformen - oberflächliche Hautabschürfung

Grad II Mittelschwere bis schwere Frakturformen - tieferreichende bzw. verschmutzte Hautabschürfung, drohendes Kompartmentsyndrom

Grad III Schwere Frakturformen - ausgedehnte Weichteilverletzung, eventuell Zerstörung der Muskulatur, subkutanes Decollement, manifestes Kompartmentsyndrom, Verletzung eines Hauptgefäßes

Offene Frakturen

Grad I Minimale Weichteilverletzung, Durchspießung der Haut von innen, unbedeutende Kontamination

Grad II Durchtrennung der Haut, umschriebene Weichteilverletzung, mittelschwere Kontamination

Grad III Ausgedehnte Weichteilzerstörung, offene, freiliegende Fraktur, häufig Gefäß- und Nervenverletzung, starke Wundkontamination

Grad IV Totale oder subtotale Amputationsverletzung (weniger als 1/4 des Weichteilmantels intakt + Durchtrennungen der wichtigsten Nerven und Blutgefäßen), vollständige Ischämie

2.6.1.3 Offene Reposition

Nach Weinberg et al. sollte nach zwei bis drei erfolglosen Versuchen der geschlossenen Reposition eine offene Reposition erfolgen (35). Hierbei erfolgt eine Inzision über der Fraktur. Anschließend wird die Fraktur unter Sicht reponiert. Die Zugänge der offenen Reposition sind identisch mit denen, die bei einer Plattenosteosynthese verwendet werden (35). Ähnlich wie bei den offenen Frakturen kommt es auch bei der offenen Reposition zu einer Schädigung bzw. einer Beeinträchtigung des Periost-Gewebes, der Blutversorgung und des Frakturhämatoms, was die Entstehung einer Pseudarthrose begünstigen kann (5). So berichten Fernandez et al. über 6 von 592 Kindern, welche nach ESIN einer Unterarmschaftfraktur eine Pseudarthrose entwickelten. 5 der 6 Kindern (83%) hatten zuvor eine offene Reposition, ein Kind hatte zusätzlich eine offene Fraktur (5). In einer von Schmittbecher et al. durchgeführten multizentrischen Studie mit 532 Patienten zeigten 10 Kinder eine verzögerte Frakturheilung. Bei 6 der 10 Kinder (60%) erfolgte zuvor eine offene Reposition (24).

2.6.1.4 Refrakturen

Auch die Versorgung einer Refraktur mittels ESIN kann aufgrund einer potenziell bereits bestehenden Gewebeschädigung, einer Beeinträchtigung der lokalen Blutversorgung, einer strukturellen Schwächung des Knochens oder Narbengewebe ein höheres Risiko für Komplikationen darstellen. In der oben erwähnten Publikation von Fernandez et al. hatten 3 der 6 Kinder (50%), welche eine Pseudarthrose entwickelten, zuvor eine mittels ESIN

versorgte Refraktur (5). In der Publikation von Schmittbecher et al. wurde über einen von zehn Patienten (10%) mit verzögerter Knochenheilung berichtet, bei dem es sich um eine operative Versorgung einer Refraktur mittels ESIN handelte (24).

2.6.2 Postoperative Komplikationen

2.6.2.1 Läsion des Ramus superficialis nervi radialis

Schädigungen des Ramus superficialis nervi radialis mit einhergehenden Parästhesien im Daumengrundgelenk sind eine Komplikation bei mit ESIN behandelten Unterarmschaftfrakturen (5, 62). In der Regel handelt es sich jedoch nur um eine temporäre Schädigung und es kommt im weiteren Verlauf zu einem spontanen Rückgang der Parästhesie (35, 62). Die Läsion kann sowohl bei der primären Frakturbehandlung als auch bei der Metallentfernung auftreten (5). Um eine Läsion des Ramus superficialis nervi radialis zu vermeiden, rät die Mehrzahl der Autoren zur intraoperativen Darstellung des Nervs (35). Die Notwendigkeit hierzu wird in der Literatur kontrovers diskutiert (3, 5). So finden sich auch Publikationen, in denen der radiale Marknagel ohne explizite Nervendarstellung über eine einfache Stichinzision eingebracht wurde (3). Mann et al. berichten über den operativen Zugang ohne den Nerv extra darzustellen. Die Autoren halten das Verletzungsrisiko während des Primäreingriffs für gering, sofern nach dem Hautschnitt im Subkutangewebe nur stumpf präpariert wird (3). Im Rahmen der ESIN-Metallentfernung sei die Gefahr der Nervenschädigung laut Mann et al. größer, da der Nerv bei Narbenbildung stärker fixiert sei. Zur Vermeidung von Schädigungen im Zuge der Metallentfernung könne ein größerer Zugang gewählt werden (3).

2.6.2.2 Hautperforation und Weichteilirritation

Ein typisches postoperatives Problem nach der ESIN-Osteosynthese sind schmerzhafte Haut- und Weichteilirritationen durch überstehende Nagelenden (35, 62, 83). In einigen Fällen kann es sogar zur Perforation der Haut kommen. Jubel et al. berichten über postoperative Weichteilirritationen durch überstehende Nagelenden bei 8 von 51 Kindern. In 3 Fällen war eine sekundäre Kürzung des Nagels erforderlich (62). Um Weichteilirritationen zu vermeiden, ist das korrekte Kürzen und Platzieren der Nagelenden von essenzieller Bedeutung (83). Nach Auffassung von Fernandez et al. sind vor allem technische Fehler wie die mangelnde Biegung der Endstücke und die langen scharfen Kanten der TENs als ursächlich anzusehen (83). Auch zu dünne oder nicht ausreichend vorgebogene Nägel können zu deren Migration mit anschließenden Weichteilirritationen führen (83). Zur Prävention derartiger Komplikationen ist die Verwendung von Nägeln mit einem abgerundeten, olivenartigen Ende (84) oder aufsteckbaren Verschlusskappen (45) möglich, welche die scharfe Kante des abgeschnittenen Nagelendes bedecken sollen. Intraoperativ ist es notwendig, Haut, Subkutan-Gewebe und Faszie ausreichend weit (1-2 cm) zu spalten (62). Außerdem können die Nägel nach der Platzierung in Radius und Ulna noch einmal 1 - 2 cm zurückgezogen werden, um sie zu kürzen und anschließend mit einem Stößel ausreichend weit zu versenken (62). Leiden die Patienten dennoch an Weichteilirritationen oder Hautperforationen, kann in einigen Fällen eine Inzision über der Narbe mit sekundärer Kürzung des Nagels erforderlich sein. Bei ausgeheilten Frakturen ist eine frühzeitige Implantatentfernung zu erwägen (35).

2.6.2.3 Wundheilungsstörung und Infektion

In den Publikationen werden Wundinfektionen selten beschrieben. So berichten Fernandez et al. über 5 oberflächliche Infektionen bei 553 Kindern (83), Mann et al. über 7 oberflächliche Infektionen bei 54 Patienten (3) und Griffet et al. über 7 oberflächliche Infektionen bei 80 Patienten (85). Fernandez et al. sehen die Belastung des Weichteilgewebes beim Öffnen der Kortikalis mit dem Bohrer bzw. beim Einbringen des Nagels als mögliche Ursache an (83). Durch die notwendige Abwinkelung des Bohrers oder Nagels kann es zur Quetschung des Weichteilgewebes kommen. Gemäß den Empfehlungen von Fernandez et al. ist es ratsam, übermäßige Minimalzugänge zu vermeiden. Die Inzision sollte auf der radialen Seite etwa 1,5 cm betragen. Wenn bereits Hautkontusionen erkennbar sind, sollte die geschädigte Haut vor der Naht entfernt werden (83).

2.6.2.4 Osteomyelitis

Als „Osteomyelitis“ wird die Entzündung des Knochenmarks bezeichnet. Der Begriff „Osteitis“ beschreibt eine Beteiligung des gesamten Organs einschließlich der Kortikalis. Im angloamerikanischen Sprachraum findet der Terminus "osteomyelitis" im klinischen Alltag oft eine synonyme Verwendung (86). Zwar kommt eine Osteomyelitis bei Kindern seltener vor als bei Erwachsenen, jedoch betrug die Inzidenzrate der Osteomyelitis im Jahr 2019 in Deutschland 9,2 Fälle pro 100.000 Kinder (87). Der häufigste Erreger ist *Staphylococcus aureus*. Aber auch Koagulase-negative Staphylokokken, Streptokokken (vorrangig bei Kindern in Fällen von hämatogener Osteomyelitis), gramnegative Bakterien (z.B. Enterobakterien, Pseudomonaden), Anaerobier, selten auch *Mycobacterium tuberculosis* oder Pilze können ursächlich sein (86). Ein Keimgewinn durch eine Knochenbiopsie ist für eine gezielte antibiotische Therapie essenziell. Die Osteomyelitis kann nach Ätiologie, zeitlichem Verlauf sowie dem Infektionsweg in verschiedene Kategorien unterteilt werden. Die exogene Osteomyelitis entsteht durch eine direkte Inokulation des Erregers in den Knochen infolge von Traumata, chirurgischen Eingriffen oder offenen Frakturen. Die hämatogene Osteomyelitis resultiert aus der hämatogenen Aussaat aus einem manifestationsfernen Infektionsherd und macht etwa 20 % der Erkrankungen aus (86). Die endogene (hämatogene) Form der Osteomyelitis tritt überwiegend bei Kindern auf, während exogene Formen der Osteomyelitis vornehmlich das erwachsene Patientenkollektiv betrifft. Ferner kann zwischen einer akuten Osteomyelitis und einer chronischen Osteomyelitis (Erregerpersistenz und Verlauf > 6 Wochen) unterschieden werden. Bei der chronischen Osteomyelitis kann es zur Ausbildung von Knochensequestern kommen (88). Hämatogene Osteomyelitiden können meist konservativ mittels antibiotischer Therapie behandelt werden. Bei Abszessen, infiziertem Fremdmaterial, Fisteln und/oder Sequestern besteht jedoch die Indikation zur operativen Sanierung.

Die Osteomyelitis ist eine seltene Komplikation nach ESIN-Operationen bei Unterarmfrakturen von Kindern. In der Literatur finden sich nur vereinzelte Fälle. Fernandez et al. berichten über einen Fall bei 553 Patienten (83), Cullen et al. über einen bei 20 Patienten (89) und Schmitzenbecher et al. über einen Casus bei 300 Kindern (90). Bei dem von Cullen et al. beschriebenen Fall handelte es sich um eine offene (Grad II) Unterarmschaftfraktur. Bei Kontamination mit Schmutz im Bereich des Ulnarschaftes erfolgte eine intraoperative Spülung sowie ein Debridement. 3 Monate postoperativ präsentierten sich radiologisch Sequester. Es erfolgte eine resistogramm gerechte antibiotische Therapie sowie ein operatives Debridement mit Spülung und Entfernung der radialen ESIN (89). In allen drei Fällen handelte es sich um eine offene Fraktur. Während Cullen et al. und Schmitzenbecher et al. die ESIN entfernten, wurde das Material bei Fernandez et al. nach Debridement und Vakuumversiegelung belassen.

2.6.2.5 Postoperative Refraktur

Das Risiko einer Unterarmschaft-Refraktur liegt bei etwa 3-8 % (83). In vielen Fällen wird die Refraktur durch ein sekundäres Trauma verursacht (91). Ein erhöhtes Risiko für eine Refraktur besteht bei der Grünholzfraktur, da hier die Konsolidierung des Knochens oftmals verzögert ist (90). Es wird häufig berichtet, dass Refrakturen nach der Entfernung des Osteosynthesematerials auftreten (83). Einige Experten sind zudem der Meinung, dass eine zu frühe Entfernung des Osteosynthesematerials mit einem erhöhten Risiko für eine Refraktur einhergeht (83).

2.6.2.6 Verzögerte Frakturheilung - Pseudarthrose

Viele Autoren sprechen von verzögerter Frakturheilung bei einer Frakturheilung zwischen dem vierten und sechsten Monat nach erfolgtem Trauma (5, 92). Frakturen, die nicht 6 Monate nach adäquater Frakturbehandlung konsolidiert sind, werden als Pseudarthrosen bezeichnet (5). Es kann hierbei zwischen hypertropher und atropher Pseudarthrose unterschieden werden. Dies ist für die weitere Therapie von Relevanz. Die hypertrophe Pseudarthrose zeichnet sich durch eine gute Vaskularisation sowie eine umfangreiche Zone aus Faserknorpel aus und verfügt über die Fähigkeit der Knochenneubildung. Primär sind mechanische Faktoren als ursächlich für ihre Entstehung anzusehen. So manifestiert sie sich häufig nach instabiler Frakturversorgung. Fernandez et al. berichten über 2 Fälle einer hypertrophen Pseudarthrose

nach ESIN, beide Frakturen waren nach 10 Monaten ohne weitere chirurgische Intervention konsolidiert. Nach Fernandez et al. kann bei Fällen einer hypertrophen Pseudarthrose ohne Bewegungseinschränkungen oder anderen Symptomen somit zunächst ein abwartendes Prozedere ohne chirurgische Intervention erwogen werden. Besteht bei der hypertrophen Pseudarthrose jedoch eine Achsenfehlstellung, was meist mit Einschränkungen in der Pronation und Supination einhergeht, wird eine chirurgische Intervention empfohlen (5). Im Falle einer atrophischen Pseudarthrose ist die Blutversorgung der Frakturfragmente deutlich reduziert. Nekrotische Fragmente innerhalb des Frakturspaltes verhindern die Revaskularisation, was die Indikation für eine Revisionsoperation nahelegt (5).

In der Literatur finden sich nur wenige Berichte über eine verzögerte Knochenheilung oder Pseudarthrose nach ESIN-Behandlung des Unterarms (83). Lieber et al. berichten in einer multizentrischen Studie mit 400 Patienten über 2 Fälle von verzögerter Frakturheilung, hier gab es keinen Fall einer Pseudarthrose (93). In einer von Schmittbecher et al. durchgeführten multizentrischen Studie mit 532 Patienten zeigen 10 Patienten eine verzögerter Frakturheilung (7 Fälle der Ulna und 3 Fälle des Radius), ein Fall einer Pseudarthrose wurde nicht beschrieben (94). Ogonda et al. beschreiben 2 Patienten mit verzögerter Frakturheilung und einen Fall einer Pseudarthrose. In allen Fällen war hierbei die Ulna im mittleren Drittel betroffen (95). Fernandez et al. beobachten, dass das mittlere Drittel der Ulna besonders anfällig für die Entwicklung einer Pseudarthrose zu sein scheint. Von den insgesamt 7 Fällen einer Ulna-Pseudarthrose war in 6 Fällen das mittlere Drittel betroffen (83). Folgende weitere Faktoren scheinen laut Fernandez et al. eine verzögerte Knochenheilung bzw. die Ausbildung von Pseudarthrosen zu begünstigen: offene Frakturen, offene Repositionen, Refrakturen, hypotrophe Knochenheilung, instabile Osteosynthese, vorzeitige Materialentfernung und Infektionen (5, 83).

2.6.2.7 Achsenabweichung und Bewegungseinschränkung

Nicht in jedem Fall ist eine Achsenfehlstellung mit einer Bewegungseinschränkung assoziiert. Bei postoperativen Achsenfehlstellungen ohne relevante Bewegungseinschränkung besteht häufig keine akute Notwendigkeit zur Intervention. Aufgrund des ausgeprägten Korrekturpotentials des Knochens im Kindesalter kann in Abhängigkeit des zu erwartenden Restwachstums oft eine Spontankorrektur der Achsenabweichung abgewartet werden. Persistierende Bewegungseinschränkungen nach ESIN-Osteosynthese von Unterarmschaftfrakturen von Kindern sind eine eher seltene postoperative Komplikation. So finden sich in einer Vielzahl von Publikationen keine postoperativen Bewegungseinschränkungen im beschriebenen Patientenkollektiv (3, 96-98). Im Studienkollektiv von Jubel et al. wurden in der Follow-Up Kontrolle nach 38 ± 21 Monaten 43 Kinder untersucht, es fanden sich bei 4 Patienten eine Bewegungseinschränkung von $10-30^\circ$ bei Pronation und Supination, ein Patient litt nach 3-wöchiger Immobilisation unter einem 29 Monate persistierendem Streckdefizit des Ellenbogengelenks von 10° (62). Van der Reis et al. berichteten von insgesamt 23 Patienten, darunter ein Patient mit einer Bewegungseinschränkung von 80° und ein anderer mit einer Einschränkung von 40° , jeweils in der Pronation (61).

Zur Detektion von Bewegungseinschränkungen wird als Standard die Neutral-Null-Methode verwendet. Es handelt sich hierbei um ein einheitliches Verfahren zur Messung und Dokumentation der Bewegungsumfänge in Gelenken. Sie kann helfen, Einschränkungen der Gelenkbeweglichkeit zu identifizieren, Fortschritte im Rahmen einer physiotherapeutischen Behandlung zu dokumentieren oder festzustellen, inwieweit der Patient zu seiner ursprünglichen Gelenkfunktion zurückkehren kann.

2.7 Bestehende Leitlinie und Umsetzung in den klinischen Alltag

2.7.1 Bestehende AWMF-Leitlinie (aktuell in Überarbeitung) (4)

Zum derzeitigen Zeitpunkt fehlen aktuelle, evidenzbasierte Handlungsempfehlungen zur postoperativen Nachsorge nach ESIN-Osteosynthese von Unterarmschaftfrakturen. Die zuletzt in Deutschland publizierte S1-Leitlinie mit dem Titel „Unterarmschaftfrakturen im Kindesalter“ war bis zum 29.04.2021 gültig und befindet sich seither in Überarbeitung (4). Darin wird die klinische Versorgung von Unterarmschaftfrakturen schrittweise beschrieben:

„In der Klinik ist zunächst die Überprüfung von peripherer Durchblutung, Motorik, Sensibilität (DMS), die Evaluierung von Weichteilschäden, der Ausschluss eines Kompartmentsyndroms sowie weiterer Frakturen und Verletzungen essenziell. Zur weiteren Diagnostik sollte zudem eine konventionelle Röntgenaufnahme in zwei Ebenen unter Einschluss der angrenzenden Gelenke durchgeführt werden. Bei Indikation zur operativen Intervention mittels ESIN muss eine umfassende Aufklärung über potenzielle Risiken wie Blutungen, Infektionen, Gefäß-, Sehnen- und Nervenverletzungen, die Notwendigkeit einer offenen Reposition, mögliche dauerhafte Fehlstellungen, Bewegungseinschränkungen, verzögerte Heilung und die Möglichkeit einer Refraktur erfolgen. Meist handelt es sich um eine elektive Operation, (abhängig von der Schmerzsituation und einer adäquaten Ruhigstellung).“

Eine notfallmäßige Versorgung ist laut der Leitlinie in der Regel nicht erforderlich. Entsprechend der Leitlinie ist keine zusätzliche postoperative Retention im Gipsverband notwendig, ggf. kann eine Schlinge oder Schiene zur Analgesie für wenige Tage angelegt werden. Die Spontanmobilisation ist bei Schmerzfreiheit angezeigt.

Folgende Röntgenuntersuchungen sind empfohlen:

- Röntgen an Tag 1 (Zur Dokumentation des OP-Resultats)
- Röntgen an Tag 28 (Konsolidierung, Sportfreigabe)
- Röntgen an Tag 90 plus X (vor der Metallentfernung)

Die Materialentfernung wird nach radiologisch dokumentierter vollständiger Durchbauung und abgeschlossenem Remodelling (≥ 3 Monaten) empfohlen. Frühere Metallentfernungen scheinen das Risiko von Refrakturen zu erhöhen. Weitere Nachkontrollen sollten bei bestehender Bewegungsstörung bis zur freien Beweglichkeit individuell stattfinden.

2.7.2 Behandlung der Unterarmschaftfraktur an der Universitätsmedizin Mainz – Standardprotokoll

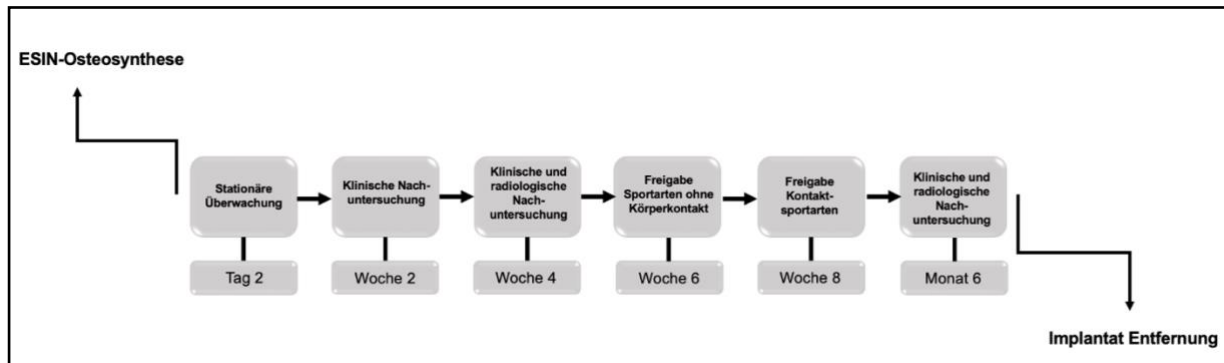


Abbildung 7 Standardprotokoll UM Mainz

Im folgenden Abschnitt wird das derzeitige Standardprozedere des Zentrums für Orthopädie und Unfallchirurgie der Universitätsmedizin Mainz dargestellt. Bei Diagnose einer Unterarmschaftfraktur und Indikationsstellung zur ESIN-Osteosynthese erfolgt die operative Versorgung in der Regel am selben Tag, spätestens jedoch innerhalb von 24 Stunden nach Eintreffen in der Klinik. Hierzu werden Titanium Implantate (Depuy Synthes[®], Umkirch, Germany) verwendet. Auf eine postoperative Gipsruhigstellung wird verzichtet, um eine schnelle Mobilisierung zu ermöglichen. Bei komplikationslosem Verlauf werden die Patienten am zweiten bis dritten postoperativen Tag entlassen.

Die 1. radiologische Nachuntersuchung (a.p. und lateral) findet nach ca. 28 Tagen statt. Hierbei wird zudem eine umfassende klinische Untersuchung durchgeführt. Die Freigabe von Sportarten ohne Körperkontakt erfolgt in der Regel am Ende der 6. postoperativen Woche, die von Kontaktsportarten am Ende der 8. postoperativen Woche. Die Metallentfernung wird ca. 5-6 Monate nach der Operation ambulant durchgeführt. Zuvor erfolgt, der Leitlinie entsprechend, eine erneute radiologische und klinische Untersuchung.

In der vorliegenden Studie wurde bei allen Patienten geprüft, ob eine Behandlung nach Mainzer Standardprotokoll erfolgte. Alle Änderungen am Verfahren, wie in Abbildung 7 beschrieben, werden in der Ergebnisauswertung als Abweichungen vom postoperativen Standardprotokoll definiert.



Abbildung 8 Radiologische Verlaufskontrolle eines 8-jährigen Mädchens, 4 Wochen nach ESIN-Osteosynthese mit regelrechter Kallusbildung (A) a.p. (B) lateral

3 Material und Methoden

3.1 Rahmenbedingungen und Patientenkollektiv

Für diese retrospektive, monozentrische Studie wurden Patienten der Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie der Universitätsmedizin Mainz zwischen April 2010 und November 2018 eingeschlossen. Als Einschlusskriterien lagen das Patientenalter zwischen 2 und 14 Jahren sowie eine radiologisch diagnostizierte, instabile Unterarmschaftfraktur von Ulna und Radius vor. Zudem musste eine Frakturversorgung mittels ESIN beider Knochen und eine vollständig dokumentierte Nachbeobachtungszeit bis zur Implantatentfernung im selben Kinder-Traumazentrum gegeben sein. Die Nachuntersuchung in Woche 4 musste eine standardisierte Röntgenaufnahme des betroffenen Arms in zwei Ebenen umfassen. Vom Patientenkollektiv mit insgesamt 300 Kindern erfüllten 219 die Einschlusskriterien. Ausgeschlossen von der Auswertung waren Kinder mit Polytrauma, isolierten Frakturen von Radius oder Ulna, Patienten mit extern durchgeführter Operation oder Nachsorge und Frakturen, welche mittels alternativen Therapieverfahren behandelt wurden. Die Ein- und Ausschlusskriterien sind in Tabelle 1 aufgeführt. Diese Studie wurde in Übereinstimmung mit der Deklaration von Helsinki durchgeführt und von der Ethikkommission Rheinland-Pfalz, Deutschland, genehmigt (2020-14844-retrospektiv).

Einschlusskriterien	Ausschlusskriterien
Vorliegen einer Unterarmschaftfraktur	Polytrauma
Alter zwischen 2 und 14 Jahren zum Zeitpunkt der Fraktur	Isolierte Frakturen von Radius oder Ulna
Operative Behandlung mittels ESIN	Behandlung mittels alternativen Therapiemöglichkeiten (z.B. Plattenosteosynthese, konservativ)
Durchgeführte ESIN OP durch das Zentrum für Orthopädie und Unfallchirurgie der Universitätsmedizin Mainz	Extern durchgeführte ESIN-Operation
Lückenlose Dokumentation der klinischen und radiologischen Kontrolle nach ca. 4 Wochen	Fehlende Daten zur Verlaufskontrolle nach ca. 4 Wochen

Tabelle 1 Ein- und Ausschlusskriterien

3.2 Datenerhebung

Zu Beginn der Datenerfassung wurde die Datenbank des SAP i.s.h.med nach der Diagnose Unterarmschaftfraktur anhand der ICD-Kodierung S52.4 (Fraktur des Ulna- und Radiuschaftes, kombiniert) abgefragt. Als Zeitraum wurde der 01.04.2010 bis zum 01.11.2018 gewählt. Anschließend wurde die korrekte ICD-Kodierung sowie das Erfüllen der Ein- und Ausschlusskriterien bei jedem Patienten überprüft. Für die Erfassung relevanter Daten über den Krankheitsverlauf sowie die Laborwerte wurde das SAP-Krankenhausinformationssystem der Universitätsmedizin Mainz verwendet. Weiterhin bestand Zugang zu Bildgebungen und radiologischen Befunden der Patienten über das Radiologie-Informationssystem (RIS, iSOFT, i-SOLUTIONS, Siegen) der Klinik und Poliklinik für Radiologie.

Folgende Patientendaten wurden zum Zeitpunkt der Fraktur erhoben: Geschlecht, Alter [Jahre], Größe [cm], Gewicht [kg], BMI [kg/m²]. Ferner erfolgte eine Dokumentation von Details zur Fraktur und Begleitverletzungen: Frakturzeitpunkt [Monat], Seite der Fraktur [links/rechts/beidseits], weitere Verletzungen und Weichteilschäden. Bezüglich der Operation und dem stationären Aufenthalt wurden folgende Daten erhoben: Zeit zwischen Fraktur und OP [<24h, >24h], Dauer des stationären Aufenthaltes [Tage], Operationsdauer [Minuten], Intraoperativer TEN-Wechsel, Antibiotikagabe.

Für diese Arbeit war der Röntgenbefund zum Zeitpunkt der 4 Wochen-Verlaufskontrolle von wesentlicher Bedeutung. Hierbei wurde zwischen pathologischem Röntgenbefund und nicht pathologischem Röntgenbefund unterschieden. Als pathologisch wurden Röntgenbilder gewertet, die mindestens eines der folgenden Kriterien erfüllten: Dislokation der Frakturfragmente, Anzeichen einer Infektion, unzureichende oder überschießende Kallusbildung, fehlerhafte Position der Nägel oder Anzeichen einer verzögerten Frakturheilung mit noch deutlich sichtbarem Frakturspalt. Zudem wurde erfasst, ob es nach der 2. Verlaufskontrolle zu einer Abweichung vom hausinternen Standardprozederes kam. Des Weiteren wurde festgehalten, ob bei den Patienten anamnestische oder klinische Auffälligkeiten im Rahmen der 2. Verlaufskontrolle bestanden.

3.3 Statistik

Die Daten wurden zunächst in Microsoft Excel (Version 16.33, Microsoft Corporation, Redmond, USA) erfasst. Die statistische Auswertung und Visualisierung wurde mittels IBM SPSS Statistics für Windows (Version 22 und 23, IBM, Armonk, NY, USA) durchgeführt. Die statistische Auswertung erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Institut für medizinische Biometrie, Epidemiologie und Informatik (IMBEI) der Universitätsmedizin Mainz.

Nominale Werte, also jene Daten, bei denen zwischen unterschiedlichen Ausprägungen unterschieden werden kann, jedoch keine Wertung/Rangfolge möglich ist (z.B. Geschlecht), wurden mit absoluter [Anzahl, n] und relativer [%] Häufigkeit angegeben. Um die Werte miteinander zu vergleichen, wurde der *Chi-Quadrat-Test* verwendet.

Ordinale Werte sind Daten, bei denen eine Rangfolge erstellt werden kann, die Abstände zwischen den Werten jedoch nicht quantifizierbar sind. (z.B. Weichteilschaden Grad I-Grad III) Für diese Daten wurden jeweils Median und Interquartilsabstand (IQR) errechnet. Überprüft wurden sie ebenfalls mit dem *Chi-Quadrat-Test*.

Verhältnisskalierte Werte weisen gleichmäßige Abstände zwischen den Messwerten und einen absoluten Nullpunkt auf, was bedeutet, dass Addition, Multiplikation und Division sowie das Bilden von Verhältnissen möglich sind (z.B. Alter, Gewicht, BMI, Größe). Statistische Maße wie Mittelwert, Standardabweichung und Varianz sind anwendbar.

Die Ergebnisse der metrischen Daten wurden zunächst in Histogrammen dargestellt. Zudem wurde der *Kolmogorov-Smirnov-Test* angewandt für die Einschätzung, ob es sich um eine Gauß-Typ Normalverteilung handelte:

- Sofern eine Normalverteilung vorlag, wurden Mittelwert und Standardabweichung errechnet. Mit Hilfe von *t-Tests* wurden die Werte verglichen.
- Zeigten die Histogramme jedoch eine beliebige Verteilung, wurden Median und Interquartilsabstand verwendet. Getestet wurde mit dem *Mann-Whitney-U-Test*.

Chi-Quadrat Test

Zur Auswertung der Auffälligkeiten und deren Auswirkungen auf den weiteren klinischen und radiologischen Verlauf wurden in der Arbeit zahlreiche Null-Hypothesen aufgestellt. Zur Überprüfung der Null-Hypothese bezüglich zweier kategorialer Variablen kam zunächst der Chi-Quadrat Test nach Pearson zur Anwendung. Hierbei handelt es sich um ein statistisches Verfahren zur Überprüfung von Hypothesen über die Unabhängigkeit bzw. Abhängigkeit

zweier kategorialer Variablen. Hierzu bedarf es der Definition einer Nullhypothese (H0) und einer Alternativhypothese (H1).

Nullhypothese (H0): Es besteht keine signifikante Beziehung (Unabhängigkeit) zwischen den betrachteten Variablen, oder die beobachteten Häufigkeiten entsprechen den erwarteten Häufigkeiten.

Alternativhypothese (H1): Es besteht eine signifikante Beziehung (Abhängigkeit) zwischen den Variablen, oder die beobachteten Häufigkeiten weichen signifikant von den erwarteten ab.

Die Chi-Quadrat-Statistik berechnet sich anhand folgender Formel, wobei O_i die beobachtete Häufigkeit und E_i die erwartete Häufigkeit für jede Zelle oder Kategorie ist. Die Summierung erfolgt über alle Zellen der Kontingenztafel.

$$\chi^2 = \sum \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$$

Der errechnete Wert von χ^2 wird mit einem kritischen Wert aus der Chi-Quadrat-Verteilung verglichen, der von der gewünschten Signifikanzstufe (0,05 für ein 95%-Konfidenzniveau) und den Freiheitsgraden der Verteilung abhängt. Wenn der berechnete Chi-Quadrat-Wert größer als der kritische Wert ist, wird die Nullhypothese abgelehnt, was bedeutet, dass signifikante Unterschiede zwischen den erwarteten und beobachteten Häufigkeiten bestehen.

Binär logistische Regression

Zur genaueren Prüfung, inwieweit das Vorliegen diverser Prädiktoren dazu beiträgt, dass ein Patient im weiteren Verlauf bestimmte Ergebnisse (wie beispielsweise ein pathologisches Röntgenbild in der 4 Wochen-Verlaufskontrolle) aufweist, wurde die binäre logistische Regression angewandt. Demographischen Kontrollvariablen wie „Geschlecht“ und „Alter“ wurden hierbei jeweils mitaufgenommen. Das binär logistische Regressionsmodell ist eine statistische Methode, welche verwendet wird, um die Wahrscheinlichkeit eines binären Ergebnisses (Zielvariable) auf der Grundlage einer oder mehrerer unabhängiger Variablen (Prädiktoren) vorherzusagen.

Abhängige Variable (Zielvariable): Die abhängige Variable in einem binär logistischen Regressionsmodell ist immer eine binäre Variable, das heißt, sie hat zwei Kategorien (0 und 1) zum Beispiel pathologisches Röntgenbild vorhanden = 0, kein pathologisches Röntgenbild vorhanden = 1.

Unabhängige Variablen (Prädiktoren): Diese können kontinuierlich (z.B. Alter) oder kategorisch (z.B. Geschlecht m/w, Auffälligkeiten vorhanden ja/nein) sein. Die unabhängigen Variablen werden verwendet, um die Logit der Wahrscheinlichkeit, dass die abhängige Variable gleich 1 ist, zu modellieren.

Nagelkerkes R-Quadrat

Um die Güte der Anpassung des logistischen Regressionsmodelles zu beurteilen, kam die Varianzaufklärung von Nagelkerkes R^2 gemäß den Empfehlungen von Backhaus et al. (2003) zur Anwendung. Diese Maße geben an, wie gut das logistische Regressionsmodell im Vergleich zu einem Modell ohne Prädiktoren (nur mit einer Konstanten) die abhängige Variable erklärt. Nagelkerkes R-Quadrat bietet eine von 0 bis 1 skalierte Maßzahl, was eine leichtere Interpretation ermöglicht und eine direkte Einschätzung darüber erlaubt, welcher Anteil der Varianz in der abhängigen Variablen durch das Modell erklärt wird.

Hosmer-Lemeshow-Test

Die Bewertung der Anpassungsgüte des logistischen Regressionsmodells erfolgte mittels Hosmer-Lemeshow-Test. Dieser Test vergleicht die beobachteten und erwarteten Häufigkeiten über alle Gruppen hinweg, um zu sehen, ob signifikante Unterschiede bestehen. Ein niedriger p-Wert (<0,05) deutet darauf hin, dass es signifikante Unterschiede zwischen den beobachteten und den modellierten (erwarteten) Werten gibt, was bedeutet, dass das Modell die Daten nicht gut anpasst. Ein hoher p-Wert bedeutet, dass keine signifikanten Unterschiede vorliegen, was darauf hinweist, dass das Modell eine gute Anpassung an die Daten zeigt.

4 Ergebnisse

4.1. Patienten

4.1.1 Epidemiologische Daten

Patienten Anzahl [n=]	219
Geschlecht [n], Anzahl (%)	männlich 128 (58,4%) weiblich 91 (41,6%)
Alter [Jahre], Median (IQR)	7 (5-9)
Alter nach Geschlecht [Jahre], Median (IQR)	männlich 7 (5-10) weiblich 7 (4-9)
Größe [cm], Median (IQR) (nicht dokumentiert: 29)	127,5 (115-145)
Gewicht [kg], Median (IQR) (nicht dokumentiert: 19)	25 (20-35)
BMI [kg/m ²], Median (IQR) (nicht dokumentiert: 30)	15,81 (14,30-17,36)
Percentile > 90	20 (9,1%)

Tabelle 2 Epidemiologische Daten

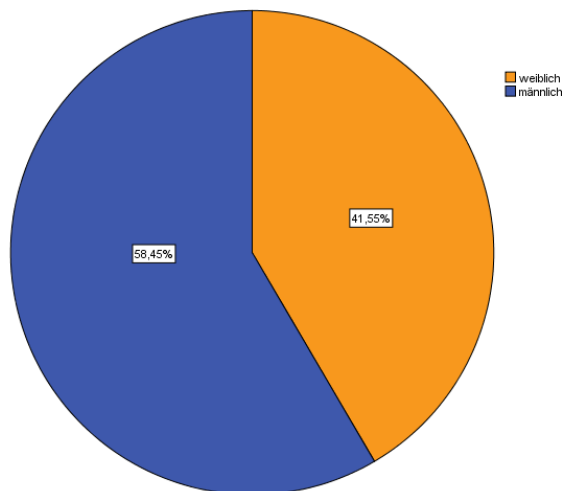


Abbildung 9 Geschlechterverteilung der Patienten

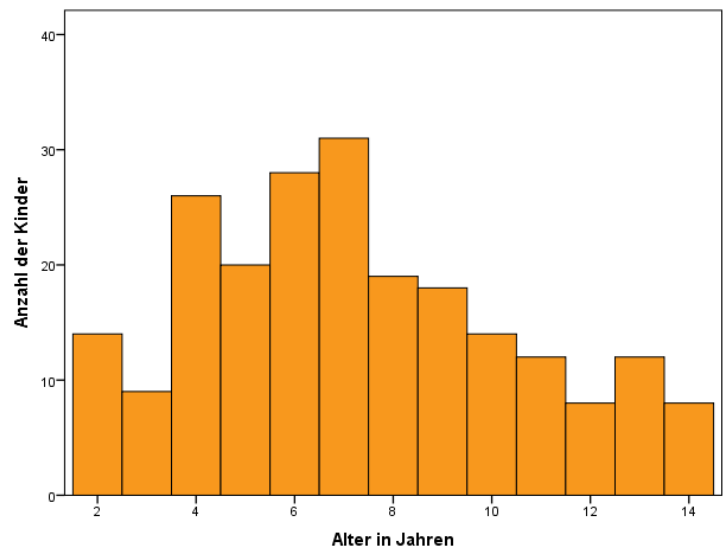


Abbildung 10 Alter zum Frakturzeitpunkt beider Geschlechter

Es wurden die Daten von 300 Kindern mit Unterarmschaftfraktur im Zeitraum von April 2010 bis November 2018 erhoben. 81 Probanden mussten ausgeschlossen werden, da sie die Einschlusskriterien der Studie nicht erfüllten. Gründe hierfür waren beispielsweise die Behandlung mittels alternativer Therapieoptionen oder extern durchgeführte ESIN-Operationen. Somit wurden für die hier vorliegende Auswertung die Daten von 219 Patienten verwendet. Bei 23 der insgesamt 300 Kinder wurde die Metallentfernung extern durchgeführt. Von den 219 Kindern, die in der vorliegenden Arbeit ausgewertet wurden, erfolgte bei 3 Kindern eine externe Metallentfernung.

Die Patientengruppe bestand aus 128 (=58,4%) männlichen und 91 (=41,6%) weiblichen Personen, die Geschlechterverteilung ist in Abbildung 9 dargestellt. Das mediane Lebensalter aller eingeschlossenen Kinder zum Frakturzeitpunkt lag bei 7 Jahren (IQR 5-9), die genaue Altersverteilung ist Abb. 10 zu entnehmen. Die Altersverteilung getrennt nach Geschlecht ist in Abbildung 11 zu sehen. Bei den männlichen Patienten betrug das mediane Alter 7 Jahre

(IQR 5-10), bei den weiblichen Patientinnen ebenfalls 7 Jahre (IQR 4-9). In der vorliegenden Studie wurde mit Hilfe von Größe und Gewicht (zum Zeitpunkt der Fraktur) der BMI-Wert errechnet. Im Kindesalter ist der BMI-Wert alters- und geschlechtsabhängig. Für die bessere Einordnung des BMI-Wertes wurden daher die Perzentilen der Patienten ausgerechnet. Kinder deren BMI über der 90. Perzentile lag, wurden als übergewichtig gewertet. In der vorliegenden Studienpopulation fanden sich demnach 20 übergewichtige Kinder. Bei keinem dieser Kinder kam es zu Komplikationen.

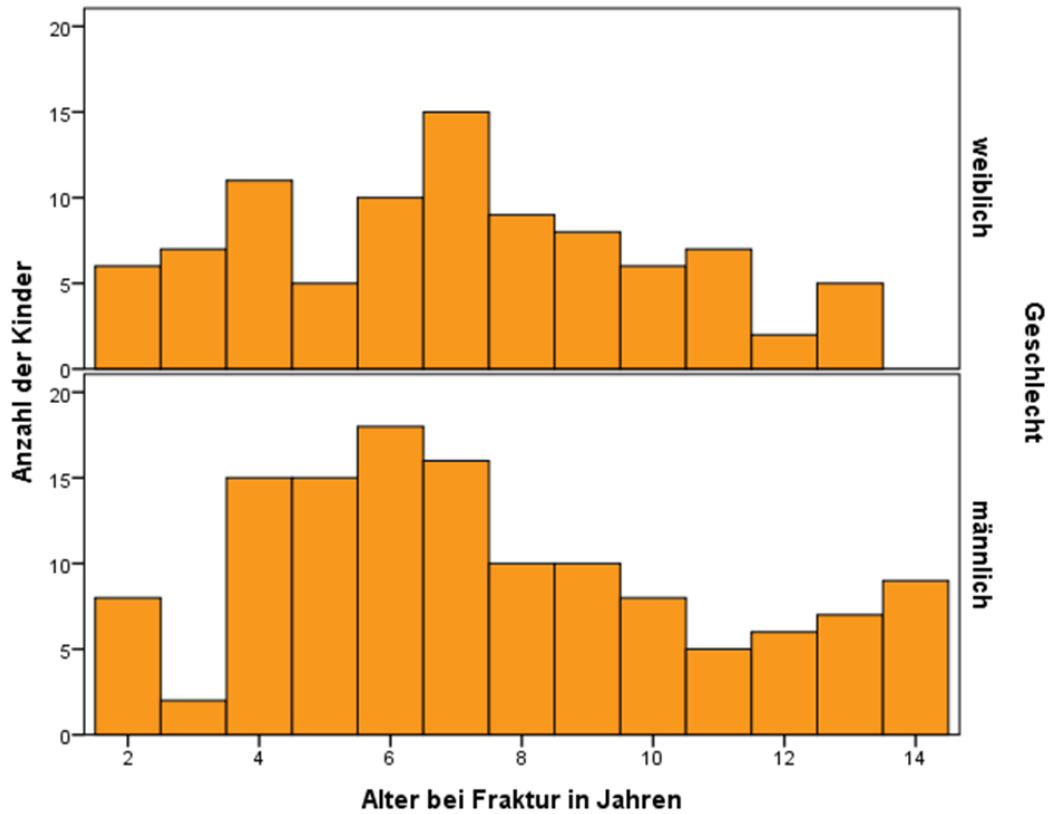


Abbildung 11 Geschlechtsspezifische Altersverteilung

4.1.2 Daten zum Frakturzeitpunkt

Auftreten [Monat], Anzahl (Prozent)	Januar Februar März April Mai Juni Juli August September Oktober November Dezember	12 (5,5%) 10 (4,6%) 5 (2,3%) 22 (10,0%) 23 (10,5%) 29 (13,2%) 22 (10,0%) 22 (10,0%) 30 (13,7%) 15 (6,8%) 16 (7,3%) 13 (5,9%)
Seite der Fraktur, Anzahl (Prozent)	links rechts beide Seiten	118 (53,9%) 100 (45,7%) 1 (0,5%)
Weitere Verletzungen, Anzahl (Prozent)	Keine weiteren Verletzungen Kribbelparästhesien Weitere Frakturen Prellungen/ Schürfwunden Commotio cerebri / V.a. Commotio cerebri Durchspießungsverletzung PSU-Abriß Drohendes UA Kompartmentsyndrom	203 (92,7%) 5 (2,3%) 4 (1,8%) 2 (0,9%) 2 (0,9%) 1 (0,5%) 1 (0,5%) 1 (0,5%)
Weichteilschäden (Klassifikation nach Tscherne und Oestern), Anzahl (Prozent)	Keine Weichteilschäden WS Grad I bei geschlossener Fraktur WS Grad II bei geschlossener Fraktur WS Grad I bei offener Fraktur WS Grad II bei offener Fraktur	97 (44,3%) 94 (42,9%) 17 (7,8%) 9 (4,1%) 2 (0,9%)

Tabelle 3 Daten zum Frakturzeitpunkt

Bei der Anzahl der Unterarmfrakturen zeigt sich ein vermehrtes Auftreten während der Frühlings- und Sommermonate. 67,6% der Frakturen ereigneten sich in der Zeit von April bis September und nur 32,4% von Oktober bis März. Im September wurden mit 30 Frakturen (13,7%) die meisten Kinder operiert, im März mit 5 Frakturen (2,3%) die wenigsten. Bei 118 (53,9%) Kindern war der linke Unterarm frakturiert, bei 100 (45,7%) Patienten war die rechte Seite betroffen. Bei einem Kind zeigte sich auf beiden Seiten eine Fraktur des Unterarmes.

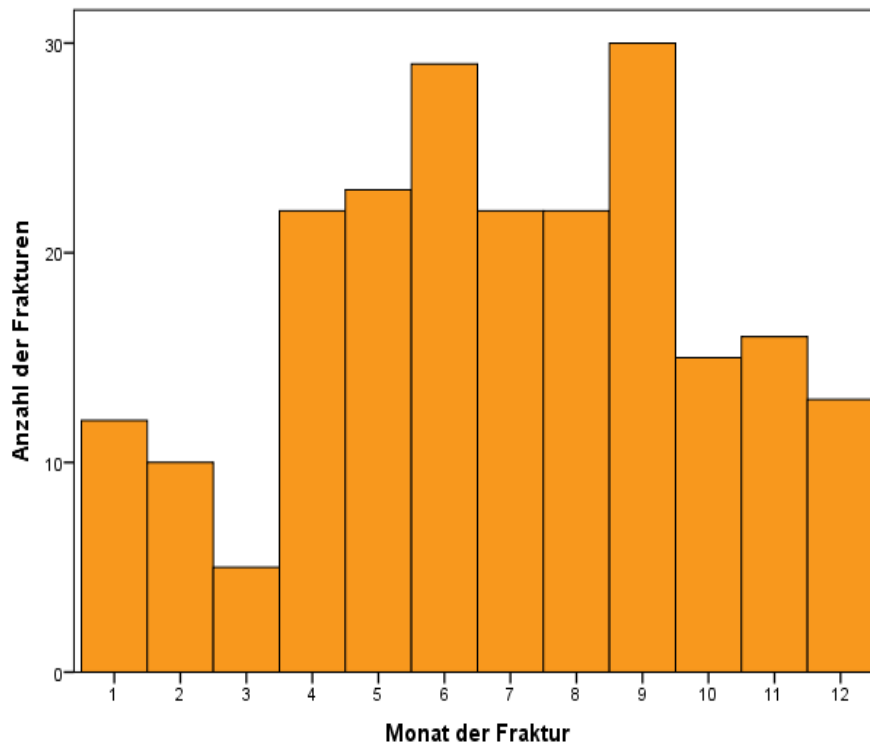


Abbildung 12 Anzahl der Frakturen im Jahresverlauf

Die große Mehrheit der Kinder (92,7%) litt bei Aufnahme weder unter Begleit- noch unter Verletzungen an anderen Lokalisationen. 5 Kinder gaben an, unter Kribbelparästhesien zu leiden. Bei 5 Patienten bestanden weitere Frakturen. Hiervon hatten 3 Kinder neben der Unterarmschaftfraktur eine suprakondyläre Humerusfraktur Typ II nach von Laer und ein Kind eine Fraktur des Epikondylus ulnaris. Ein Patient hatte eine zusätzliche Fraktur des Olecranon, diese wurde jedoch erst in der 4 Wochen-Verlaufskontrolle detektiert und war zum Diagnosezeitpunkt bereits nahezu vollständig konsolidiert. 2 Kinder erlitten Prellungen und Schürfwunden, bei 2 Patienten bestand der Verdacht einer Commotio cerebri. Bei einem Kind drohte ein Kompartmentsyndrom des Unterarms. Postoperativ kam es bei diesem Patienten neben Parästhesien durch die Irritation des N. radialis zu einer erheblichen Schwellung im Bereich des proximalen Unterarmes. Der Patient wurde für insgesamt 5 Tage stationär überwacht, die Schwellung zeigte sich im Verlauf ohne weitere Intervention rückläufig. Ein Kind litt unter einem zusätzlichen Abriss des Processus styloideus ulnae. Dieser wurde operativ nicht zusätzlich versorgt, der weitere Heilungsverlauf gestaltete sich unauffällig.

Bei 97 Patienten (44,3%) ergab sich in der klinischen Untersuchung kein Hinweis auf einen Weichteilschaden. 94 Kinder (42,9%) hatten eine geschlossene Fraktur mit einem Weichteilschaden I. Grades und 17 Patienten (7,8%) einen Weichteilschaden II. Grades bei geschlossener Fraktur. Von den 11 Kindern mit offener Fraktur wurde bei 9 Patienten (4,1%) ein Weichteilschaden Grad I und bei 2 Patienten (0,9%) ein Weichteilschaden Grad II dokumentiert (Klassifikation nach Tscherne und Oestern).

4.1.3 Daten des stationären Aufenthaltes und der Operation

Zeit zwischen Fraktur und OP, Anzahl (Prozent)	Unter 24h	201 (91,8%)
	Über 24h	18 (8,2%)
Stationärer Aufenthalt [Tage], Median (IQR)		3 (2-3)
Operationsdauer [Minuten], Median (IQR)		27 (20-37)
Intraoperativer ESIN Wechsel bei engem Markraum, Anzahl (Prozent)	kein intraoperativer ESIN-Wechsel	209 (95,4%)
	intraoperativer ESIN-Wechsel	10 (4,6%)
Antibiotikagabe, Anzahl (Prozent)	Keine Antibiotikagabe	206 (94,1%)
	Gabe einer Single-Shot Antibiose	7 (3,2)
	Mehrtägige i.v.-Antibiose	6 (2,7)

Tabelle 4 Daten des stationären Aufenthaltes und der Operation

201 Patienten (91,8%) wurden binnen 24 Stunden nach dem Frakturereignis operiert. Bei 18 Kindern (8,2%) betrug die Zeit zwischen Trauma und Operation über 24 Stunden. Grund hierfür waren meist der primär konservative Therapieversuch oder Traumata, die sich während eines Urlaubs ereigneten und erst in der Heimat an der Universitätsmedizin Mainz operativ versorgt wurden. Bei einem Kind ergab sich eine Divergenz zwischen der Aussage der Eltern bezüglich des Frakturzeitpunktes und der radiologischen Bildgebung. Laut Eltern handelte es sich um eine frische Fraktur, radiologisch erhärtete sich jedoch bei deutlicher Kallusbildung der Verdacht eines länger zurückliegenden Traumas, die Kinderschutzgruppe wurde aktiviert.

Der stationäre Aufenthalt der meisten Patienten (90,4%) lag zwischen 2 und 3 Tagen. Bei 6 Kindern (2,8%) betrug der stationäre Aufenthalt 6 bis 8 Tage. Grund hierfür war in 3 Fällen eine intravenöse stationäre Antibiotikagabe. Ein Kind litt unter einer postoperativen Bronchitis mit Sättigungsschwankungen und zusätzlichem O₂ Bedarf, bei einer Patientin war der verlängerte stationäre Aufenthalt durch die Aktivierung der Kinderschutzgruppe bei V.a. Kindswohlfährdung begründet. Ein Junge wurde nach einer postoperativen supraventrikulären Tachykardie bei V.a. Präexzitationssyndrom und sekundäres Leitungsbündel zur Überwachung und weiteren Abklärung auf die Kinderintensivstation verlegt. 6 Kinder (2,7%) erhielten eine mehrtägige intravenöse Antibiotikagabe. Der stationäre Aufenthalt betrug im Median 3 Tage (IQR 2-3), siehe Abbildung 13. Die Operationsdauer betrug im Median 27 Minuten (IQR 20-37), dargestellt ist dies in Abbildung 14. Bei 10 Kindern (4,6%) wurde aufgrund eines engen Markraumes intraoperativ auf einen kleineren ESIN gewechselt.

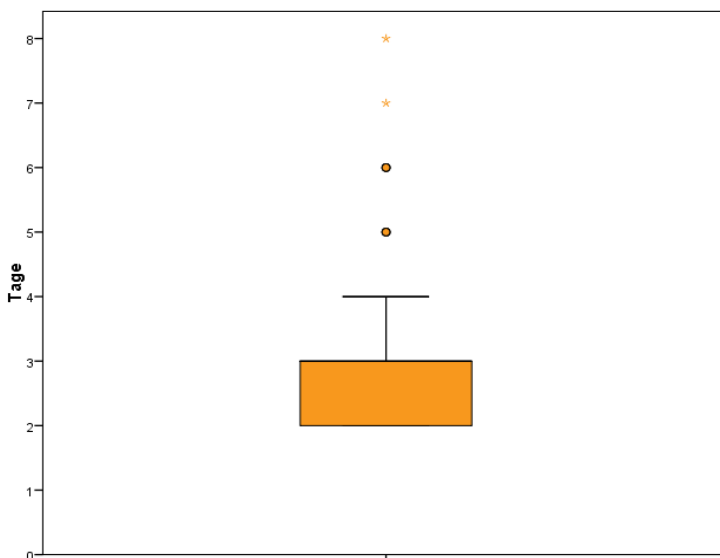


Abbildung 13 Stationärer Aufenthalt in Tagen

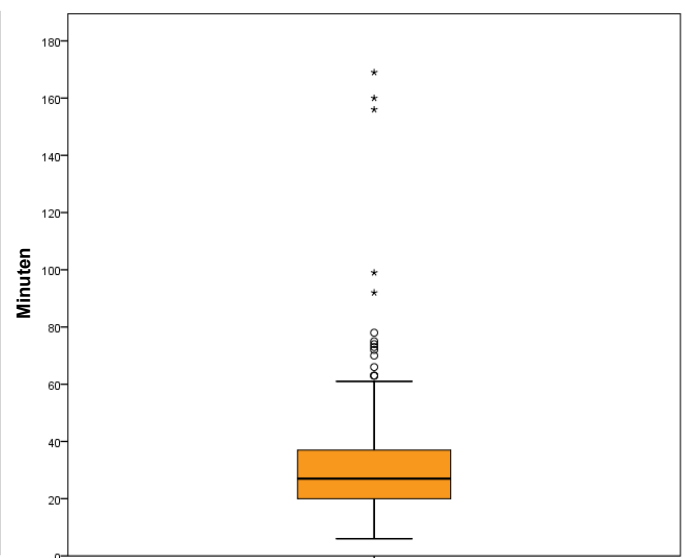


Abbildung 14 Operationsdauer in Minuten

4.1.3 Zeitliche Abstände

Zeit zwischen Operation und 4W-VK [Tage], Median (IQR)	29 (27-34)
Zeit zwischen Operation und Metallentfernung [Tage], Median (IQR)	150 (126-175)
Fehlende Daten: 2	

Tabelle 5 Zeitliche Abstände

Die Zeit zwischen der Operation und der 4 Wochen-Verlaufskontrolle (= 4W-VK) betrug im Median 29 Tage (IQR 27-34). Die Metallentfernung wurde im Median 150 Tage (IQR 126-175) nach der Operation durchgeführt. Bei 3 Patienten erfolgte die Metallentfernung extern, somit konnten hier keine Daten erhoben werden.

4.2 Klinischer Verlauf

Pathologischer Röntgenbefund in der 4W-VK	12 (5,5%)
Kein Pathologischer Röntgenbefund in der 4W-VK, Anzahl (Prozent)	207 (94,5%)
Änderung des Prozederes nach der 4W-VK, Anzahl (Prozent)	26 (11,9%)
Keine Änderung des Prozederes nach der 4W-VK, Anzahl (Prozent)	193 (88,1%)

Tabelle 6 Klinischer Verlauf

In der AWMF-Leitlinie wird eine Röntgenuntersuchung am 28. postoperativen Tag zur Prüfung der Konsolidierung und Sportfreigabe empfohlen (4). In der Universitätsmedizin Mainz erfolgt im Rahmen der 4 Wochen-Verlaufskontrolle eine klinische Untersuchung mit Anamnese, Inspektion, neurologischer Untersuchung, Palpation sowie Überprüfung der Freiheits- und Kraftgerade. Zudem wird eine Röntgenuntersuchung des betroffenen Unterarms in 2 Ebenen durchgeführt. Sofern sich die klinische und radiologische Untersuchung unauffällig zeigt, wird die Sportfreigabe für low-impact-Sportarten erteilt. Ziel dieser Arbeit war es unter anderem, die Konsequenzen der 4 Wochen-Verlaufskontrolle zu untersuchen.

Der Radiologische Befund in der 4 Wochen-Verlaufskontrolle wurde bei mangelnder Konsolidierung oder Kallusbildung, Refraktur, progredienter Fraktur-Dislokation und bei ESIN-Dislokation bzw. Lockerung als pathologisch gewertet. Neben den Röntgenbildern wurden auch die Änderungen des Standardprozederes im Rahmen der 4 Wochen-Verlaufskontrolle erfasst. 12 Kinder (5,5%) zeigten in der 4W-VK einen pathologischen Röntgenbefund. Bei 26 Kindern (11,9%) kam es nach der 4W-VK zu einer Änderung des Standardprozederes.

4.2.1 Dokumentierte Auffälligkeiten

Patienten insgesamt	219 (100%)
Dokumentierte Auffälligkeit, Anzahl (Prozent)	96 (43,8%)
Keine dokumentierte Auffälligkeit, Anzahl (Prozent)	123 (56,2%)
Anamnestische Auffälligkeit vorhanden, Anzahl (Prozent)	59 (26,9%)
Keine anamnestische Auffälligkeit Anzahl, (Prozent).	160 (73,1%)
Anamnestische Auffälligkeiten, Anzahl (Prozentualer Anteil an Gesamtpopulation):	
Vorerkrankung mit pot. Einfluss auf den Knochenstoffwechsel / syndromale Erkrankung	11 (5,0%)
Aktuelle Fraktur ist eine Refraktur	19 (8,7%)
Offene Fraktur	16 (7,3%)
Offene Reposition	17 (7,8%)
Postoperatives Sturzereignis	10 (4,6%)
Mehrfachnennung mögl.	
Klinische Auffälligkeit vorhanden, Anzahl (Prozent)	51 (23,3%)
Keine Klinische Auffälligkeit, Anzahl (Prozent)	168 (76,7%)
Klinische Auffälligkeiten in der 4W-VK, Anzahl (Prozentualer Anteil an Gesamtpopulation):	
Parästhesie, Nervenläsion, motorische Ausfälle	6 (2,7%)
Infektion, Wundheilungsstörung	3 (1,4%)
Irritation, Perforation	6 (2,7%)
Ausgeprägte Bewegungseinschränkung	21 (9,6%)
Deutlicher Druckschmerz	21 (9,6%)
Mehrfachnennung mögl.	

Tabelle 7 Dokumentierte Auffälligkeiten

Insgesamt wurden bei 96 Patienten (43,8%) Auffälligkeiten dokumentiert. Um die dokumentierten Auffälligkeiten weiter zu spezifizieren, wurden sie in klinische und anamnestische Auffälligkeiten unterteilt, wobei hier Mehrfachnennungen möglich waren. Zu

den klinischen Auffälligkeiten wurden jene Besonderheiten gezählt, die im Rahmen der klinischen Untersuchung während der 4W-VK dokumentiert wurden: Deutlicher Druckschmerz, Parästhesien, motorische Ausfälle, ESIN-Perforationen, Weichteilirritationen durch die ESIN, Wundheilungsstörungen, Infektionen und ausgeprägte Bewegungseinschränkungen. Zu den anamnestischen Auffälligkeiten zählten alle Besonderheiten, die in der Anamnese der Patienten auffällig waren: Vorerkrankungen mit potenziellem Einfluss auf den Knochenstoffwechsel bzw. syndromale Erkrankungen, offene Frakturen, Refrakturen und offene Repositionen der Frakturen. Anamnestische Auffälligkeiten fanden sich bei 59 Kindern (26,9%), klinische Auffälligkeiten bei 51 Patienten (23,3%). Die genaue Verteilung ist Tabelle 7 zu entnehmen.

4.2.2 Pathologische Röntgenkontrolle

	Patienten ohne pathologischem Röntgenbefund	Patienten mit pathologischem Röntgenbefund
Patienten insgesamt	207	12
davon mit dokumentierten Auffälligkeiten, Anzahl (Prozent)	85 (41,1%)	11 (91,7%)
davon ohne dokumentierte Auffälligkeiten, Anzahl (Prozent)	122 (58,9%)	1 (8,3%)
Anamnestische Auffälligkeit vorhanden, Anzahl (Prozent)	50 (24,2%)	9 (75,0%)
Keine anamnestische Auffälligkeit, Anzahl (Prozent)	157 (75,8%)	3 (25,0%)
Anamnestische Auffälligkeiten Anzahl		
Vorerkrankung mit pot. Einfluss auf den Knochenstoffwechsel / syndromale Erkrankung	8	3
Aktuelle Fraktur ist eine Refraktur	16	3
Offene Fraktur	14	2
Offene Reposition	13	4
Postoperatives Sturzereignis	6	4
Mehrfachnennung mögl.		
Klinische Auffälligkeit vorhanden, Anzahl (Prozent)	46 (22,2%)	5 (41,7%)
Keine Klinische Auffälligkeit Anzahl (Prozent)	161 (77,8)	7 (58,3%)
Klinische Auffälligkeiten in der 4W-VK, Anzahl		
Parästhesie, Nervenläsion, motorische Ausfälle	6	0
Infektion, Wundheilungsstörung	2	1
Irritation, Perforation	4	2
Ausgeprägte Bewegungseinschränkung	20	1
Deutlicher Druckschmerz	18	3
Mehrfachnennung mögl.		

Tabelle 8 Pathologische Röntgenkontrolle

Insgesamt fand sich nur bei 12 Kindern ein pathologischer Röntgenbefund in der 4 Wochen-Verlaufskontrolle. Bei den Patienten ohne pathologischen Röntgenbefund hatten 85 Kinder (41%) eine dokumentierte Auffälligkeit. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich insbesondere mit Patienten, die in der 4 Wochen-Verlaufskontrolle einen pathologischen Röntgenbefund aufwiesen: Von den Patienten mit pathologischem Röntgenbefund war bei 11 der 12 Kinder eine Auffälligkeit dokumentiert. Dies entspricht einem prozentualen Anteil von 91,7%. Bei 9 Kindern (75,0%) wurden anamnestische Auffälligkeiten dokumentiert, dabei waren postoperative Sturzereignisse und die offene Reposition mit je 4 Fällen am häufigsten. Bei 5 Kindern (41,7%) wurden klinische Auffälligkeiten dokumentiert. Weitere Details finden sich in Tabelle 8.

4.2.3 Änderung des Standardprozederes

	Patienten ohne Änderung des Standardprozederes	Patienten mit Änderung des Standardprozederes
Patienten insgesamt	193	26
davon dokumentierte Auffälligkeit, Anzahl (Prozent)	72 (37,3%)	24 (92,3%)
davon keine dokumentierte Auffälligkeit, Anzahl (Prozent)	121 (62,7%)	2 (7,7%)
Anamnestische Auffälligkeit vorhanden, Anzahl (Prozent)	42 (21,8%)	17 (65,4%)
Keine anamnestische Auffälligkeit, Anzahl (Prozent)	151 (78,2%)	9 (34,6%)
Anamnestische Auffälligkeiten Anzahl		
Vorerkrankung mit pot. Einfluss auf den Knochenstoffwechsel / syndromale Erkrankung	7	4
Aktuelle Fraktur ist eine Refraktur	15	4
Offene Fraktur	11	5
Offene Reposition	12	5
Postoperatives Sturzereignis	3	7
Mehrfachnennung mögl.		
Klinische Auffälligkeit vorhanden, Anzahl (Prozent)	39 (20,2%)	12 (46,2%)
Keine Klinische Auffälligkeit Anzahl (Prozent)	154 (79,8%)	14 (53,8%)
Klinische Auffälligkeiten in der 4W-VK, Anzahl		
Parästhesie, Nervenläsion, motorische Ausfälle	5	1
Infektion, Wundheilungsstörung	0	3
Irritation, Perforation	3	3
Ausgeprägte Bewegungseinschränkung	17	4
Deutlicher Druckschmerz	17	4
Mehrfachnennung mögl.		

Tabelle 9 Änderung des Standardprozederes

Bei 26 Kindern (11,9%) kam es im Rahmen der 4 Wochen-Verlaufskontrolle zu einer therapeutischen Konsequenz, also zu einer Änderung des Standardprozederes.

Hierzu zählten:

- Verordnung zusätzlicher klinischer bzw. radiologischer Kontrollen
- Zusätzliche Wundversorgung
- Antibiotikatherapie
- Zusätzliche Oberarm Cast Anlage
- Reosteosynthese
- Vorzeitige Metallentfernung
- Verschreibung von Physiotherapie
- Überweisung an Spezialzentren

Hiervon waren bei 24 Patienten (92,3%) klinische bzw. anamnestische Auffälligkeiten dokumentiert. Der Anteil an anamnestischen Auffälligkeiten lag mit 17 Kindern bei 66,4%, der Anteil an klinischen Auffälligkeiten mit 12 Patienten bei 46,2%.

4.2.4 Dokumentierte Auffälligkeiten und deren Auswirkungen

Die dokumentierten Auffälligkeiten und deren Auswirkungen auf den weiteren klinischen Verlauf der Patienten ist Hauptbestandteil dieser Arbeit. Dabei wurden 6 Hypothesen bearbeitet, die im Folgenden vorgestellt werden.

Hypothese 1: Die Wahrscheinlichkeit, in der 4W-VK einen pathologischen Röntgenbefund aufzuweisen, unterscheidet sich zwischen der Gruppe mit dokumentierten Auffälligkeiten und der Gruppe ohne dokumentierten Auffälligkeiten nicht.

	Kein pathologischer Röntgenbefund	Pathologischer Röntgenbefund	
Pat. ohne Auffälligkeit, Anzahl (Prozent)	122 (99,2%)	1 (0,8%)	123 (100%)
Pat. mit Auffälligkeit, Anzahl (Prozent)	85 (88,5%)	11 (11,5%)	96 (100%)
	207 (94,5%)	12 (5,5%)	219 (100%)

Tabelle 10 Dokumentierte Auffälligkeiten und deren Auswirkungen

Von den 219 Patienten in der Auswertung hatten 12 Kinder (5,5%) einen pathologischen Röntgenbefund und 207 Kinder (94,5%) keine pathologische radiologische Bildgebung. Bei 96 Patienten (43,8%) waren klinische und/oder anamnestische Auffälligkeiten dokumentiert. In dieser Gruppe wiesen 85 Kinder (88,5%) keinen pathologischen Röntgenbefund auf und 11 Kinder (11,5%) einen pathologischen Röntgenbefund in der 4 Wochen-Verlaufskontrolle. In der Gruppe ohne dokumentierte Auffälligkeiten lag der Anteil nicht-pathologischer Röntgenbefunde mit 122 Kindern bei 99,2% und der Anteil an pathologischen Röntgenaufnahmen mit nur einem Kind bei 0,8%. Der Chi-Quadrat nach Pearson ergab, dass sich die Wahrscheinlichkeit in der 4W-VK einen pathologischen Röntgenbefund aufzuweisen zwischen den beiden Gruppen signifikant ($p = 0,001$) unterscheidet. Somit kann die Nullhypothese abgelehnt werden.

Fazit: Die Wahrscheinlichkeit, in der 4W-VK einen Pathologischen Röntgenbefund aufzuweisen, unterscheidet sich zwischen Patienten mit dokumentierten Auffälligkeiten und Patienten ohne dokumentierte Auffälligkeiten statistisch signifikant ($p = 0,001$).

Hypothese 2: Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines pathologischen Röntgenbefundes in der 4W-VK erhöht sich mit dem Vorhandensein von dokumentierten Auffälligkeiten. Hat die unabhängige Variable „Auffälligkeit vorhanden“ einen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit, dass die abhängige Variable „pathologisches R“ den Wert 1 annimmt? Wie stark ist deren Einfluss?

	Regressionskoeffizient B	Standardfehler	Wald	df	Sig.	Exp(B)	95% Konfidenzintervall für EXP(B)	
							Unterer Wert	Oberer Wert
Auffälligkeit vorhanden	2,678	1,060	6,384	1	0,012	14,553	1,823	116,163
Geschlecht	0,785	0,705	1,240	1	0,266	2,193	0,550	8,736
Alter zum Frakturzeitpunkt	0,169	0,098	3,015	1	0,083	1,185	0,978	1,434

Tabelle 11 Dokumentierte Auffälligkeiten und deren Auswirkungen

Eine binäre logistische Regression wurde berechnet, um zu überprüfen, inwieweit der Faktor „Auffälligkeit vorhanden“ dazu beiträgt, in der 4 Wochen-Verlaufskontrolle einen pathologischen Röntgenbefund aufzuweisen. Die demographischen Kontrollvariablen „Geschlecht“ und „Alter“ wurden mitaufgenommen. Das Regressionsmodell war statistisch signifikant, $\chi^2(3) = 17,861$ $p < 0,001$, mit einer akzeptablen Varianzaufklärung von Nagelkerkes $R^2 = 0,226$, gemäß der Empfehlungen von Backhaus et al. (2003). Die

Anpassungsgüte wurde mit dem Hosmer-Lemeshow-Test überprüft, der eine hohe Anpassungsgüte zeigte, $\chi^2(8) = 5,116$, $p > 0,05$. Von den drei Variablen, die in das Modell aufgenommen wurden, übte die Variable „Auffälligkeit vorhanden“ ($p = 0,012$) einen statistisch signifikanten Einfluss auf das Auftreten eines pathologischen Röntgenbildes in der 4W-VK aus, während die Variablen „Geschlecht“ ($p = 0,266$) und „Alter“ ($p = 0,083$) keinen statistisch signifikanten Einfluss auf die prädiktive Leistung des Modells aufwiesen. Sobald ein Kind eine dokumentierte Auffälligkeit aufweist, steigt die Wahrscheinlichkeit eines pathologischen Röntgenbildes in der 4W-VK um den Faktor 14,554 (95%-KI[1,823-116,163]). Alle Modellkoeffizienten und Odds können Tabelle 11 entnommen werden.

Fazit: Das Vorhandensein dokumentierter Auffälligkeiten übt einen statistisch signifikanten Einfluss auf das Auftreten pathologischer Röntgenbilder in der 4W-VK aus.

Wie bereits oben aufgeführt, erfolgte die Unterteilung der Auffälligkeiten in klinische und anamnestische Auffälligkeiten. Es erfolgte daher die genauere Analyse dieser zwei Subgruppen mit den folgenden Hypothesen:

Hypothese 3.1.: Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines pathologischen Röntgenbefundes in der 4W-VK erhöht sich mit dem Vorhandensein von dokumentierten klinischen Auffälligkeiten bzw. hat die unabhängige Variable „klinische Auffälligkeit vorhanden“ einen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit, dass die abhängige Variable „pathologisches RB“ den Wert 1 annimmt?

Hypothese 3.2.: Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines pathologischen Röntgenbefundes in der 4W-VK erhöht sich mit dem Vorhandensein von dokumentierten anamnestischen Auffälligkeiten bzw. hat die unabhängige Variable „anamnestische Auffälligkeit vorhanden“ einen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit, dass die abhängige Variable „pathologisches RB“ den Wert 1 annimmt?

	Regressionskoeffizient B	Standardfehler	Wald	df	Sig	Exp (B)	95% Konfidenzintervall für EXP(B)	
							Unterer Wert	Oberer Wert
Anamnestische Auffälligkeit vorhanden	2,096	0,700	8,955	1	0,003	8,134	2,061	32,104
Klinische Auffälligkeit vorhanden	0,855	0,657	1,695	1	0,193	2,352	0,649	8,524
Geschlecht	0,599	0,715	0,700	1	0,403	1,820	0,448	7,395
Alter zum Frakturzeitpunkt	0,148	0,101	2,168	1	0,141	1,160	0,952	1,413

Tabelle 12 Dokumentierte Auffälligkeiten und deren Auswirkungen

Eine binäre logistische Regression wurde berechnet, um zu überprüfen, inwieweit die Faktoren „klinische Auffälligkeit vorhanden“ und „anamnestische Auffälligkeit vorhanden“ dazu beitragen, in der 4 Wochen-Verlaufskontrolle einen pathologischen Röntgenbefund aufzuweisen. Die demographischen Kontrollvariablen „Geschlecht“ und „Alter“ wurden erneut in das Modell aufgenommen. Das Regressionsmodell war statistisch signifikant, $\chi^2(4) = 18,410$ $p < 0,001$, mit einer akzeptablen Varianzaufklärung von Nagelkerkes $R^2 = 0,233$, gemäß den Empfehlungen von Backhaus et al. (2003). Die Anpassungsgüte wurde mit dem Hosmer-Lemeshow-Test überprüft, der eine hohe Anpassungsgüte zeigte, $\chi^2(8) = 4,087$ $p > 0,05$. Von den vier Variablen, die in das Modell aufgenommen wurden, zeigte nur die Variable „anamnestische Auffälligkeit vorhanden“

($p=0,003$) einen statistisch signifikanten Einfluss, während die Variablen „klinische Auffälligkeit vorhanden“ ($p=0,193$), „Geschlecht“ ($p=0,403$) und „Alter zum Frakturzeitpunkt“ ($p=0,141$) keinen statistisch signifikanten Einfluss auf die prädiktive Leistung des Modells ausübten. Sobald ein Kind eine dokumentierte anamnestische Auffälligkeit aufweist, steigt die Chance auf ein pathologisches Röntgenbild um den Faktor 8,134 (95%-KI [2,061-32,104]). Alle Modellkoeffizienten und Odds können Tabelle 12 entnommen werden.

Fazit: Der Faktor „dokumentierte anamnestische Auffälligkeiten“ übt einen statistisch signifikanten Einfluss auf das Auftreten pathologischer Röntgenbilder in der 4W-VK aus. Das Vorhandensein dokumentierter klinischer Auffälligkeiten übt keinen statistisch signifikanten Einfluss auf das Auftreten pathologischer Röntgenbilder in der 4W-VK aus.

Hypothese 4: Die Wahrscheinlichkeit nach der 4W-VK vom Standardprozedere abzuweichen unterscheidet sich zwischen der Gruppe mit dokumentierten Auffälligkeiten und der Gruppe ohne Auffälligkeiten nicht.

	Keine Änderung des Standardprozederes nach der 4W-VK	Änderung des Standardprozederes nach der 4W-VK	gesamt
Pat. mit Auffälligkeit, Anzahl (Prozent)	72 (75,0%)	24 (25,0%)	96 (100%)
Pat. ohne Auffälligkeit, Anzahl (Prozent)	121 (98,37%)	2 (1,62%)	123 (100%)
gesamt	193 (88,13)	26 (11,87%)	219 (100%)

Tabelle 13 Dokumentierte Auffälligkeiten und deren Auswirkungen

Von den 219 Patienten in der Auswertung kam es bei 26 Kindern (11,87%) zu einer Änderung des Standardprozederes nach der 4 Wochen-Verlaufskontrolle und bei 193 Patienten (88,13%) zu keiner Änderung. Insgesamt wurden bei 96 Patienten (43,8%) klinische und/oder anamnestische Auffälligkeiten dokumentiert. In dieser Gruppe kam es bei 72 Kindern (75,0%) zu keiner Änderung nach der 4W-VK und bei 24 Kindern (25,0%) zu einer Änderung des Standards nach der 4W-VK. Bei 123 Kindern (56,16%) wurde keine Auffälligkeit dokumentiert. In dieser Gruppe kam es bei 121 Patienten (98,37%) zu keiner Änderung und in 2 Fällen (1,62%) zu einer Änderung des Prozederes. Der Chi-Quadrat nach Pearson ergab, dass sich die Wahrscheinlichkeit, das Standardprozedere nach der 4W-VK zu ändern, zwischen beiden Gruppen statistisch signifikant ($p=0,001$) unterscheidet. Alle Modellkoeffizienten und Odds können Tabelle 13 entnommen werden.

Fazit: Die Wahrscheinlichkeit, das Standardprozedere nach der 4W-VK zu ändern, unterscheidet sich zwischen Patienten mit dokumentierten Auffälligkeiten und Patienten ohne dokumentierte Auffälligkeiten statistisch signifikant ($p<0,001$), die Nullhypothese kann abgelehnt werden.

Hypothese 5: Die Wahrscheinlichkeit, das Standardprozedere nach der 4W-VK zu ändern, erhöht sich mit dem Vorhandensein von dokumentierten Auffälligkeiten.

	Regressionskoeffizient B	Standardfehler	Wald	df	Sig.	Exp(B)	95% Konfidenzintervall für EXP(B)	
							Unterer Wert	Oberer Wert
Auffälligkeit vorhanden	2,960	0,753	15,467	1	0,000	19,297	4,414	84,363
Geschlecht	0,064	0,069	0,859	1	0,354	1,066	0,931	1,221
Alter zum Frakturzeitpunkt	0,152	0,461	0,109	1	0,741	1,165	0,472	2,873

Tabelle 14 Dokumentierte Auffälligkeiten und deren Auswirkungen

Eine binäre logistische Regression wurde berechnet, um zu überprüfen, inwieweit der Faktor „Auffälligkeit vorhanden“ dazu beiträgt, dass es nach der 4W-VK zu einer Änderung des Standardprozederes kommt. Die demographischen Variablen „Geschlecht“ und „Alter“ wurden als Kontrollvariablen in das Modell aufgenommen, um mögliche Störfaktoren zu berücksichtigen. Das Regressionsmodell war statistisch signifikant, $\chi^2(3) = 32,188$ $p < 0,001$, mit einer akzeptablen Varianzaufklärung von Nagelkerkes $R^2 = 0,264$, gemäß den Empfehlungen von Backhaus et al. (2003). Die Anpassungsgüte wurde mit dem Hosmer-Lemeshow-Test überprüft, der eine hohe Anpassungsgüte zeigte, $\chi^2(8) = 5,564$, $p > 0,05$. Von den drei Variablen, die in das Modell aufgenommen wurden, zeigte nur die Variable „Auffälligkeit vorhanden“ ($p < 0,001$) einen statistisch signifikanten Einfluss auf die Änderung des Standardprozederes, während die Variablen „Geschlecht“ ($p = 0,354$) und „Alter“ ($p = 0,741$) keinen signifikanten Einfluss ausübten. Hat das Kind eine dokumentierte Auffälligkeit, so vergrößert sich die Chance auf eine Änderung des Standardprozederes nach der 4W-VK mit einem Odds von 19,297 (95%-KI [4,41-84,36]). Alle Modellkoeffizienten und Odds können Tabelle 14 entnommen werden.

Fazit: Das Vorhandensein dokumentierter Auffälligkeiten übt einen statistisch signifikanten Einfluss auf die Änderung des Standardprozederes nach der 4W-VK aus.

Hypothese 6: Haben die unabhängigen Variablen „klinische Auffälligkeit vorhanden“ und „anamnestische Auffälligkeit vorhanden“ einen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit, dass es nach der 4W-VK zu einer Änderung des Standardprozederes kommt?

	Regressions- koeffizientB	Standardfehler	Wald	df	Sig.	Exp(B)	95% Konfidenzintervall für EXP(B)	
							Unterer Wert	Oberer Wert
Anamnestische Auffälligkeit vorhanden	1,968	0,474	17,273	1	0,000	7,157	2,829	18,107
Klinische Auffälligkeit vorhanden	1,357	0,476	8,121	1	0,004	3,883	1,527	9,872
Geschlecht	0,003	0,467	0,000	1	0,995	1,003	0,402	2,505
Alter zum Frakturzeitpunkt	0,049	0,071	0,467	1	0,494	1,050	0,913	1,207

Tabelle 15 Dokumentierte Auffälligkeiten und deren Auswirkungen

Zur genaueren Beantwortung der Fragestellung wurden die Auffälligkeiten erneut in klinische und anamnestische Auffälligkeiten unterteilt. Eine binäre logistische Regression wurde berechnet, um zu überprüfen, inwieweit die Faktoren „anamnestische Auffälligkeiten“ und „klinische Auffälligkeiten“ dazu beitragen, dass es nach der 4W-VK zu einer Änderung des Standardprozederes kommt. Die demographischen Kontrollvariablen „Geschlecht“ und „Alter zum Frakturzeitpunkt“ wurden mit in das Modell aufgenommen. Im jenem durchgeführten binär logistischen Regressionsmodell zeigt sich, dass dieses einen signifikanten Beitrag zur Varianzaufklärung leisten kann, $\chi^2(4) = 28,3$, $p < 0,001$. Die Korrelationen zwischen den Prädiktoren waren gering ($r < 0,2$), was darauf hindeutet, dass Multikollinearität die Analyse nicht konfundiert hat. Gemäß den Empfehlungen von Backhaus et al (2003) handelt es sich um eine akzeptable Varianzaufklärung von Nagelkerkes $R^2 = 0,234$. Die Anpassungsgüte wurde mit dem Hosmer-Lemeshow-Test überprüft, der eine hohe Anpassungsgüte zeigte, $\chi^2(8) = 10,014$ $p > 0,05$. Von den vier Variablen, die in das Modell aufgenommen wurden, waren sowohl die Variable „anamnestische Auffälligkeit vorhanden“ ($p < 0,001$) als auch die Variable „klinische Auffälligkeit vorhanden“ ($p = 0,004$) statistisch signifikant, während die

demographischen Kontrollvariablen „Geschlecht“ ($p = 0,995$) und „Alter zum Frakturzeitpunkt“ ($p = 0,494$) keinen signifikanten Einfluss auf die prädiktive Leistung des Modells ausübten. Steigt die Variable zur Erfassung der dokumentierten anamnestischen Auffälligkeiten um eine Einheit, so vergrößert sich die Chance auf eine Änderung des Standardprozederes mit einem Odds von 7,157 (95%-KI [2,829-18,107]). Hat das Kind eine dokumentierte klinische Auffälligkeit, so vergrößert sich die Chance, das Standardprozedere zu ändern mit einem Odds von 3,883 (95%-KI [1,527-9,872]). Alle Modellkoeffizienten und Odds können der Tabelle 15 entnommen werden.

Fazit: Sowohl der Faktor „dokumentierte anamnestische Auffälligkeiten“ als auch der Faktor „dokumentierte klinische Auffälligkeiten“ üben einen statistisch signifikanten Einfluss auf die Änderung des Standardprozederes nach der 4W-VK aus.

5 Diskussion

5.1 Vergleich mit der Literatur

Diese Arbeit beruht auf der retrospektiven Analyse von 219 Patienten im Wachstumsalter mit Unterarmschaftfraktur. Sowohl patientenspezifische Angaben wie Alter und Geschlecht als auch Daten zum individuellen Therapieverlauf werden deskriptiv dargestellt und ein möglicher Zusammenhang für das Auftreten pathologischer Röntgenbilder in der postoperativen 4 Wochen-Kontrolle untersucht. Ein wichtiger Aspekt dieser Arbeit ist, mögliche Risikofaktoren für einen komplizierten Verlauf zu identifizieren. Die erhobenen Ergebnisse werden in den folgenden Abschnitten diskutiert und mit bestehender Literatur verglichen.

5.1.1 Epidemiologische Betrachtung des Patientenguts

5.1.1.1 Altersgruppe und Geschlechtsverteilung

Publikationen zeigen in der geschlechtsspezifischen Verteilung ein häufigeres Auftreten von Unterarmschaftfrakturen beim männlichen Geschlecht (3, 4, 28, 31, 62). Die in der vorliegenden Arbeit erhobenen Daten stimmen hiermit überein: Jungen sind mit 58,4% häufiger vertreten. Dies könnte möglicherweise durch ein etwas höheres Risikoverhalten oder auch das vermehrte Ausüben von risikobehafteten Sportarten wie beispielsweise Fußball bedingt sein.

Für die hier vorliegende Studie wurden Patienten im Alter von 2-14 Jahren eingeschlossen. Sowohl beim männlichen als auch beim weiblichen Geschlecht liegt der Median des Alters zum Frakturzeitpunkt in der vorliegenden Studie bei 7 Jahren. In der Literatur finden sich diesbezüglich unterschiedliche Angaben. So ist in der deutschen Leitlinie eine zweigipflige Altersverteilung mit höchster Inzidenz im 8. und 12. Lebensjahr beschrieben (4). Das Alter zum Zeitpunkt der Fraktur ist ein wichtiger Parameter für die weitere Therapieplanung. So ist das Potenzial für eine Spontankorrektur bis zum Erreichen des zehnten Lebensjahres höher als danach. Generell lässt sich sagen, dass Frakturen bei Kleinkindern (Alter < 3 Jahre) seltener vorkommen als im Kindergarten- und Schulalter. Die Knochen von Kleinkindern sind weicher und flexibler als die von älteren Kindern. Da sich ihre motorischen Fähigkeiten noch in der Entwicklung befinden, lassen sie sich möglicherweise weniger auf Aktivitäten ein, die ein hohes Verletzungsrisiko bergen und führen in der Regel weniger aktivitätsintensive und risikoreiche Spiele oder Sportarten durch. Ferner sind das Gewicht und die Muskelkraft bei Kindern unter drei Jahren noch relativ gering, was dazu führt, dass die bei einem Sturz oder Unfall auf die Knochen wirkenden Kräfte kleiner sind. Auch dies kann das Risiko von Frakturen im Vergleich zu älteren Kindern begrenzen.

Ebenso wichtig wie das Alter der Patienten ist es, auch das Gewicht und die Größe des Kindes im Zuge der Therapieplanung zu beachten, um die bestmöglichen Heilungsergebnisse zu erzielen und das Risiko von Komplikationen zu minimieren. Slongo weist darauf hin, dass Frakturen von großen und schweren Kindern in der Adoleszenz eher wie die von Erwachsenen behandelt werden sollten (78). Auch Sommerfeldt et al. berichten, dass Kinder mit einem hohen BMI möglicherweise nicht für eine Therapie mittels ESIN geeignet sind (79). Die erhöhte Weichteildicke adipöser Patienten kann eine präzise Positionierung der Nägel erschweren, was zur Instabilität der Osteosynthese führen kann. Die ausgeprägte mechanische Belastung durch das höhere Körpergewicht schwerer Kinder kann zu einer übermäßigen Beanspruchung der Implantate führen, mit einem potenziellen Risiko der Deformierung oder Migration. In der vorliegenden Studie wurde anhand der Größe und des Gewichts (zum Zeitpunkt der Fraktur) der BMI-Wert bestimmt und die geschlechterspezifischen BMI-Perzentile des jeweiligen Kindes ermittelt. Kinder oberhalb der 90. Perzentile wurden als übergewichtig gewertet. Es fanden sich demnach 20 übergewichtige Kinder in der Studienpopulation. Bei keinem dieser Kinder traten postoperative Komplikationen auf.

Die Inzidenz von Unterarmschaftfrakturen bei Kindern zeigt in der Literatur saisonale Unterschiede mit einer meist höheren Häufigkeit im Sommer. So berichten Sinikumpu et al. über eine besonders hohe Inzidenz der Unterarmschaftfrakturen während der Sommermonate (2). Dies stimmt mit den in der vorliegenden Studie erhobenen Daten überein. So zeigt sich ein vermehrtes Auftreten während der Frühlings- und Sommermonate. 67,6% der Frakturen ereigneten sich in der Zeit von April bis September und nur 32,4% von Oktober bis März. Im September wurden mit 30 Frakturen (13,7%) die meisten Kinder operiert, im März mit 5 Frakturen (2,3%) die wenigsten. Dieses Phänomen kann auf diverse Faktoren zurückgeführt werden: In den Frühling- und Sommermonaten verbringen Kinder oftmals mehr Zeit im Freien und beteiligen sich häufiger an Sportaktivitäten und anderen Formen körperlicher Betätigung. Diese Aktivitäten bergen ein erhöhtes Risiko für Stürze und Verletzungen, was zu einem Anstieg der Frakturraten führen kann. Durch die längeren Tageslichtstunden und das in Deutschland oft warme und trockene Wetter im Sommer erhöht sich häufig die Zeit, die Kinder im Freien spielen und sportlichen Aktivitäten nachgehen. Die Sommermonate sind in Rheinland-Pfalz mit Schulferien (Sommerferien Rheinland-Pfalz von Mitte Juli bis Ende August) und Familienurlaube verbunden, während denen Kinder häufig ebenfalls an einer Vielzahl von Outdoor-Aktivitäten oder Sport Camps teilnehmen.

In der vorliegenden Studie war bei 53,9% der Kinder der linke Unterarm frakturiert und bei 45,7% der rechte Unterarm. In der Literatur finden sich keine eindeutigen Unterschiede zwischen den Häufigkeiten. Prinzipiell lässt sich vermuten, dass Unterarmfrakturen potenziell häufiger auf der Seite der dominanten Hand auftreten könnten, da diese vermehrt in Aktivitäten involviert ist, die zu Verletzungen führen können. Dies hängt jedoch stark von den individuellen Aktivitäten und dem Verletzungsmechanismus ab, sodass sich hierüber keine eindeutige Aussage treffen lässt.

5.1.2 Klinischer Verlauf

5.1.2.1 Operation

Die Dringlichkeit der Operation ist von diversen Faktoren wie beispielsweise Begleitverletzungen, der Stabilität der Fraktur und dem allgemeinen Zustand des Patienten abhängig. Offene Frakturen erfordern generell eine dringliche chirurgische Intervention, um das Infektionsrisiko und das Risiko für weitere Gewebsschäden zu minimieren. Geschlossene Frakturen sollten mindestens innerhalb von 24 bis 48 Stunden operativ behandelt werden, sofern keine anderen medizinischen Umstände eine sofortige Intervention erfordern. Im Zentrum für Orthopädie und Unfallchirurgie der Universitätsmedizin Mainz werden die Patienten in der Regel innerhalb von 24 Stunden nach Eintreffen in der Klinik operiert. In der vorliegenden Studie lagen bei 91,8% der Patienten weniger als 24 Stunden zwischen Fraktur und Operation. Gründe für einen längeren Zeitraum zwischen Fraktur und Operation waren beispielsweise ein primär konservativer Therapieversuch oder ein Sturzereignis im Ausland mit anschließender Anreise nach Mainz. Die mediane Operationsdauer lag in der vorliegenden Studie bei 27 Minuten (IQR 20-37). Hiermit liegt sie etwas unter den in der Literatur publizierten Operationszeiten. So berichten Mann et al. von einer mittleren Operationsdauer von 36 Minuten (IQR 21-75) (18), Fernandez et al. von 48 Minuten \pm 20,25 (IQR 19-90) (69) und Jubel et al. von einer mittleren Operationsdauer von 49 \pm 23 Minuten (62). Die Dauer des stationären Aufenthaltes lag in der vorliegenden Studie im Median bei 3 Tagen (IQR 2-3)). Bei komplikationslosem Verlauf werden die Patienten in Mainz am ersten postoperativen Tag entlassen. In der Literatur wurden ähnliche Zahlen publiziert. So betrug die Krankenhausverweildauer nach ESIN-Osteosynthese von Unterarmschaftfrakturen bei Hertlein et al. 3,3 \pm 0,2 Tage. (99), bei Jubel et al. 2 \pm 1,4 Tage (IQR 0-7) (62) und bei Mann et al. im Mittel 4 Tage (IQR 1-12) (3). Zusammenfassend zeigt sowohl die Literatur, als auch die in der Studie erhobenen Daten, dass es sich bei der ESIN-Osteosynthese von Unterarmschaftfrakturen im Kindesalter um einen vergleichsweise kurzen Eingriff mit anschließender rascher Entlassung handelt.

5.1.2.2 Postoperativer Verlauf und Metallentfernung

In der AWMF-Leitlinie, die sich in Überarbeitung befindet, ist eine Röntgenuntersuchung am 28. postoperativem Tag zur Prüfung der Konsolidierung und Sportfreigabe empfohlen (4). Auch im Zentrum für Orthopädie und Unfallchirurgie der Universitätsmedizin Mainz wird derzeit bei allen Patienten 4 Wochen nach der ESIN-Osteosynthese eine radiologische und klinische Nachsorgeuntersuchung durchgeführt. Die Freigabe für kontaktlosen Sportarten erfolgt in der Regel am Ende der 6. postoperativen Woche, die von Kontaktsportarten am Ende der 8. postoperativen Woche. Die Metallentfernung sollte gemäß der AWMF-Leitlinie nach radiologisch dokumentierter vollständiger Durchbauung und abgeschlossenem Remodelling, frühestens 3 Monate nach der operativen Frakturversorgung durchgeführt werden. Eine frühere Metallentfernung scheint das Risiko von Refrakturen zu erhöhen (4). Es gibt jedoch Fälle, in denen die Metallentfernung beispielsweise aufgrund einer lokalen Reizung, Infektion, Perforationsgefahr oder Bewegungseinschränkungen früher durchgeführt wird. Genauere Vorgaben bezüglich des Zeitpunktes der Metallentfernung existieren nicht, was die Unterschiede in den jeweiligen Publikationen erklärt. Im vorliegenden Patientenkollektiv wurde die Metallentfernung im Median 150 Tage (IQR 126-175) nach der Operation durchgeführt. Bei Hertlein et al. erfolgte die Metallentfernung im Mittel nach 73 Tagen (IQR 50-89) (99). Calder et al. entfernten die Nägel im Mittel nach 4,1 Monaten (IQR 1,2-12,7) (96), Jubel et al. im Mittel nach $5,4 \pm 2,7$ Monaten (62). In der vorliegenden Studie erfolgt die Metallentfernung ambulant, einige Krankenhäuser führen die Metallentfernung jedoch auch stationär durch. In der Universitätsmedizin in Mainz ist die elektive fachärztliche Anbindung nach komplikationsloser Metallentfernung beendet. Eine Wiedervorstellung erfolgt nur nach Bedarf. Weiterführende follow-up Kontrollen auch nach der Implantat-Entfernung werden von anderen Zentren berichtet (69).

5.1.2.3 Mögliche Risikofaktoren in der Anamnese

Im Rahmen der Verlaufskontrolle nach 4 Wochen findet eine klinische sowie eine radiologische Untersuchung statt, um mögliche Komplikationen oder Auffälligkeiten zu detektieren. Im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit wurden daher sowohl die klinischen als auch anamnestischen Auffälligkeiten getrennt voneinander erfasst und ihre Auswirkungen und Konsequenzen auf den weiteren Verlauf genauer untersucht. Anhand der Literatur wurden in der vorliegenden Studie die wichtigsten Risikofaktoren, welche möglicherweise mit einem komplikationsträchtigen postoperativen Verlauf einhergehen können, dokumentiert. Hierzu gehörten Vorerkrankungen/Syndrome mit potenziellem Einfluss auf den Knochenstoffwechsel, die operative Versorgung einer Refraktur oder offenen Fraktur, eine offene Reposition und ein postoperatives Sturzereignis. Mit Ausnahme des postoperativen Sturzereignisses sind alle diese Risikofaktoren bereits im Rahmen des 1. Stationären Aufenthaltes zu erfassen.

5.1.2.4 Postoperative Komplikationen in der klinischen Untersuchung und Vergleich mit der Literatur

Zu den klinischen Auffälligkeiten wurden jene Auffälligkeiten bzw. Komplikationen gezählt, die im Rahmen der 2. Verlaufskontrolle im Rahmen der klinischen Untersuchung dokumentiert wurden:

- Parästhesie, Nervenläsion, motorische Ausfälle: 6 Kinder (2,7%)
- Infektion, Wundheilungsstörung: 3 Kinder (1,3%)
- Weichteilirritation, Perforation: 6 Kinder (2,7%)
- Ausgeprägte Bewegungseinschränkung: 21 Kinder (9,5%)
- Deutlicher Druckschmerz: 21 Kinder (9,5%)

(siehe Kapitel 4.2.1 Tabelle 7)

Ähnliche postoperative Auffälligkeiten bzw. Komplikationen sind auch in der Literatur beschrieben (3, 62, 83, 89). Die Vergleichbarkeit gestaltet sich aufgrund der insgesamt geringen Anzahl der Komplikationen schwierig, was den komplikationsarmen Verlauf nach ESIN-Osteosynthese von Unterarmschaftfrakturen unterstreicht. In den verschiedenen Publikationen findet sich keine standardisierte, einheitliche Dokumentation. Auch die hier vorliegenden Daten wurden retrospektiv aus nicht-standardisierter klinischer

Verlaufsdokumentation erhoben. Untersucherabhängige Differenzen in der Beschreibung und Gewichtung der Auffälligkeiten sind hier dementsprechend zu berücksichtigen. Im Zuge dessen ist auch zu erwähnen, dass in der vorliegenden Arbeit lediglich die klinischen Auffälligkeiten und Komplikationen im Rahmen der 4 Wochen-Verlaufskontrolle erfasst wurden, nicht aber solche, die davor oder danach auftraten. Dies schränkt die Vergleichbarkeit mit anderen Publikationen zusätzlich ein.

Eine der häufigsten postoperativen Komplikationen sind Weichteilirritationen durch die Nagelenden. Im vorliegenden Patientenkollektiv ist dies bei 6 von 219 (2,7 %) der Patienten aufgetreten. Jubel et al. berichten über postoperative Weichteilirritation bei 8 von 51 Kindern (15,6 %), wobei in 3 Fällen eine sekundäre Kürzung des Nagels erforderlich war (62). Ligier et al. beschreiben lokale Hautirritationen an den Eintrittsstellen der Pins bei 7 der 62 Patienten (11,3%) (98). Um das Risiko für Weichteilirritationen zu minimieren, ist neben einer ausreichenden Spaltung von Haut und Subkutangewebe eine präzise Kürzung und die korrekte Positionierung der Nagelenden unabdingbar. Fernandez et al. postulieren, dass insbesondere technische Fehler, wie inadäquate Biegungen der Endstücke und das Vorhandensein langer, scharfer Kanten ursächlich für diese Komplikationen sind (61). Lieber et al. weisen darauf hin, dass auch die Verwendung ungeeigneter Instrumente zu scharfen Kanten führen kann (93). Ferner kann die Anwendung von zu dünnen Nägeln zu deren Migration mit anschließenden Weichteilirritationen führen (61). Bei ausgeprägten Weichteilirritationen kann eine frühzeitige Implantat-Entfernung erwogen werden, sofern die Frakturen ausreichend konsolidiert sind (35). Die Verwendung von Nägeln mit einem abgerundeten olivenartigen Ende (84) oder aufsteckbaren Verschlusskappen (45) zur Prävention von Weichteilirritationen wird in der Literatur kontrovers diskutiert. In der vorliegenden Studie kamen keine Verschlusskappen zur Anwendung.

Auch Nervenschädigungen, insbesondere des N. radialis superficialis, mit einhergehenden Parästhesien sind eine mögliche Komplikation nach ESIN-Osteosynthese. Meist handelt es sich nur um eine temporäre Schädigung mit spontanem Rückgang der Parästhesie im Verlauf (35, 62). Die Läsion kann sowohl bei der primären Frakturbehandlung als auch bei der Metallentfernung auftreten (5). In dem vorliegenden Patientenkollektiv zeigten 6 der 219 Kinder (2,7%) eine postoperative Parästhesie. In der Literatur finden sich diesbezüglich ähnliche Angaben. So beschreiben Ligier et al. eine Parästhesie des N. radialis bei einem von 62 Kindern (1,6%) (98). Mann et al. berichten über eine passagere Hyposensibilität im Bereich des R. superficialis des N. radialis bei 2 von 54 Patienten (3,7%) (3). Um eine Läsion des Ramus superficialis nervi radialis zu vermeiden, rät die Mehrzahl der Autoren zur intraoperativen Darstellung des Nervs (35, 93). Die Notwendigkeit hierzu wird in der Literatur kontrovers diskutiert (3, 5). So finden sich auch Publikationen, in denen der radiale Marknagel ohne explizite Nervendarstellung über eine einfache Stichinzision eingebracht wurde (3). Mann et al. halten das Verletzungsrisiko während des Primäreingriffs für gering, sofern nach dem Hautschnitt im Subkutangewebe nur stumpf präpariert wird (3). Zu beachten ist, dass es auch im Rahmen der Darstellung des Nervs zu dessen Schädigung mit anschließender Parästhesie kommen kann. Zudem führt die Präparation zu einer Verlängerung der Operationszeit.

In der vorliegenden Studie zeigten 3 der 219 Kinder (1,3%) Anzeichen einer oberflächlichen Infektion bzw. Wundheilungsstörung im Rahmen der 4 Wochen-Verlaufskontrolle. Eine Osteomyelitis trat bei keinem der Patienten auf. In der Literatur sind Wundinfektionen nach ESIN ebenfalls eher selten beschrieben. So berichten Fernandez et al. über 5 oberflächliche Infektionen bei 553 Kindern (83), Mann et al. über 7 oberflächliche Infektionen bei 54 Patienten (3) und Griffet et al. über 7 oberflächliche Infektionen bei 80 Patienten (85). Fernandez et al. sehen eine Schädigung des Weichteilgewebes beim Öffnen der Kortikalis mit dem Bohrer bzw. beim Einbringen des Nagels als mögliche Ursache an (83). Übermäßige Minimalzugänge seien zu vermeiden und sofern bereits Hautkontusionen erkennbar seien, sollte die geschädigte Haut vor der Naht exzidiert werden (83). Zur Vermeidung postoperativer Infektionen und Wundheilungsstörungen ist neben einer sterilen operativen Versorgung auch eine genaue Anleitung der Patienten bezüglich der korrekten postoperativen Wundpflege

wichtig. Insbesondere das Vorliegen einer offenen, kontaminierten Fraktur scheint das Risiko einer späteren Osteomyelitis zu erhöhen (45, 83, 90).

In der vorliegenden Studie wurde ebenfalls das Kriterium Druckschmerz erfasst. Im Zentrum für Orthopädie und Unfallchirurgie der Universitätsmedizin Mainz wird dieser in der Regel im Rahmen der 2. Verlaufskontrolle geprüft und dokumentiert. In der Literatur findet man eine explizite Dokumentation von postoperativem Druckschmerz eher selten. Es gilt hierbei zu erwähnen, dass Schmerz ein subjektives Gefühl ist, dessen Wahrnehmung stark von individuellen Faktoren beeinflusst wird und somit sehr unterschiedlich wahrgenommen werden kann. Auch Emotionen wie Angst können gerade im Kindesalter eine wesentliche Rolle bei der Schmerzwahrnehmung spielen und die Intensität des empfundenen Schmerzes möglicherweise verstärken. Um eine standardisierte Dokumentation und bessere Vergleichbarkeit zu schaffen, sollte klar dokumentiert werden, an welchen anatomischen Lokalisationen der Druckschmerz geprüft wird. Ferner können verschiedene Schmerzskaleten angewendet werden, um Schmerz in der klinischen Praxis objektiver zu erfassen. Häufig verwendete Skalen sind beispielsweise die Visuelle Analogskala oder die Numerische Ratingskala (100). Gerade im Kindesalter kann auch die Faces Pain Scale – Revised verwendet werden (101). Diese wurde speziell für Kinder entwickelt und zeigt eine Reihe von Gesichtern, die verschiedene Schmerzstufen repräsentieren, von einem lächelnden Gesicht (kein Schmerz) bis zu einem weinenden Gesicht (schlimmster Schmerz). Die jungen Patienten können dann das Gesicht wählen, welches den aktuellen Zustand am besten beschreibt.

Die Prüfung des Bewegungsumfanges zur Detektion postoperativer Bewegungseinschränkungen ist für die Beurteilung des Heilungsverlaufes nach ESIN-Osteosynthese von essenzieller Bedeutung. Hierbei kommt die Neutral-Null Methode als standardisiertes Verfahren zur Messung des Bewegungsumfanges von Gelenken zur Anwendung. In der Literatur zeigt sich, dass persistierende Bewegungseinschränkungen nach ESIN-Osteosynthese von Unterarmschaftfrakturen eine eher seltene postoperative Komplikation darstellen. So berichten Mann et al. in der Verlaufskontrolle 3 Monate nach der ESIN-Operation über keinen Patienten mit einer postoperativen Bewegungseinschränkung. Insgesamt wurden hier 50 Patienten im Follow-up untersucht (3). Auch bei Verstrecken et al. fand sich bei 57 Patienten in der Verlaufskontrolle 14 Monate postoperativ kein Kind mit einer Bewegungseinschränkung (97). Van der Reis et al. berichten über einen Patienten mit einer postoperativen Bewegungseinschränkung von 80° (Pronation) und über einen Patienten mit einer Bewegungseinschränkung von 40° (Pronation) bei insgesamt 23 Patienten (61). Im Patientenkollektiv von Jubel et al. wurden in der Follow-Up nach 38 ± 21 Monaten 43 Kinder untersucht, es fanden sich bei 4 Patienten eine Bewegungseinschränkung von 10-30° bei Pronation und Supination (62). In der vorliegenden Studie fand sich bei 21 von 219 Kindern (9,5%) eine relevante Bewegungseinschränkung. Ein möglicher Grund für die eher hohe Anzahl könnte sein, dass in der vorliegenden Studie bereits Bewegungseinschränkungen von >10° als relevante Bewegungseinschränkungen erfasst wurden. Es ist fraglich, ob derart geringe Bewegungseinschränkungen in anderen Publikationen explizit erfasst wurden. Zudem ist der Zeitpunkt der Follow-up Untersuchung zu beachten. Während in der vorliegenden Studie die Bewegungseinschränkungen 4 Wochen nach der Operation erfasst wurden, wurden in den meisten Publikationen die Bewegungseinschränkungen, welche noch mehrere Monate nach der Operation persistierten, erwähnt. Bei einem Großteil der Patienten mit Bewegungseinschränkungen 4 Wochen postoperativ, ist von einer Verbesserung im weiteren Verlauf ohne Persistenz auszugehen. Im Sinne einer besseren Vergleichbarkeit könnten die postoperativen Bewegungsumfänge in einer prospektiven Datenerhebung in festgelegten zeitlichen Abständen erfasst und nach einem standardisierten Schema genauer klassifiziert werden (Bsp.: keine, leichte, mittlere, schwere Bewegungseinschränkung).

Als weiterer möglicher Risikofaktor für einen sekundären Korrekturverlust nach ESIN sind in der Literatur zudem Frakturen des distalen Drittels des Unterarmschaftes beschrieben (83). Ursächlich hierfür ist meist eine Instabilität des kurzen radialen Fragments. In der vorliegenden Studie wurde dieser mögliche Risikofaktor nicht erfasst. Dies wäre jedoch bei einer

zukünftigen prospektiven Studie ein relevanter zu untersuchender Faktor. Fernandez et al. empfehlen bei Patienten mit ESIN des distalen Drittels eine postoperative Gipsanlage für 2-4 Wochen (83). Seit einigen Jahren hat sich bei diesen Frakturen die Versorgung mittels antegrader Nagelung etabliert. Bei dieser Technik ist keine postoperative Gipsruhigstellung erforderlich (102).

Bezüglich der postoperativen Ruhigstellung nach ESIN-Osteosynthese von Unterarmschaftfrakturen gibt es aktuell kein einheitliches Vorgehen. Während in einigen Publikationen auf eine postoperative Gipsbehandlung verzichtet wird, berichten andere Autoren über eine postoperative Ruhigstellung (62, 96). Eine postoperative Gipsruhigstellung ist entsprechend der deutschen Leitlinie nicht notwendig, ggf. kann in Einzelfällen eine Schlinge oder Schiene über wenige Tage angelegt werden (4). Die Anwendung eines Gipsverbandes kann sich durch längere Immobilisierung und eventuelle Muskelatrophie negativ auf den postoperativen Bewegungsumfang auswirken. Zudem ist das Prinzip der dynamischen Stabilität der ESIN, welche Mikrobewegungen im Frakturspalt ermöglicht, zu beachten. Diese Mikrobewegungen stimulieren die Kallusbildung und unterstützen somit die Knochenheilung. Im Zentrum für Orthopädie und Unfallchirurgie der Universitätsmedizin Mainz erfolgt keine routinemäßige Gipsruhigstellung nach erfolgter ESIN von Unterarmschaftfrakturen. Auch die Sektion Kindertraumatologie der Deutschen Gesellschaft für Unfallchirurgie empfiehlt, nach einer ESIN-Osteosynthese von Unterarmschaftfrakturen im Wachstumsalter auf eine Ruhigstellung im Gips zu verzichten.

5.2 Diskussion der Ergebnisse

Die Standardempfehlung der AWMF-Leitlinie, eine Röntgenuntersuchung am 28. postoperativen Tag nach der ESIN-Operation durchzuführen, um die Konsolidierung der Fraktur vor einer möglichen Sportfreigabe zu überprüfen, wird von der Universitätsmedizin Mainz derzeit bei allen Patienten ausgeführt und durch eine umfassende klinische Untersuchung ergänzt. Bei unauffälligem klinischem und radiologischem Befund wird die Sportfreigabe für Woche 6 (kontaktlose Sportarten) bzw. Woche 8 (Kontaktsportarten) erteilt.

Die Analyse der postoperativen Verlaufskontrolle nach 4 Wochen bietet wichtige Erkenntnisse hinsichtlich der Effektivität der bestehenden Nachsorgeprotokolle und der möglichen Notwendigkeit ihrer Anpassung. Ein besonderer Fokus lag bei der Auswertung möglicher Zusammenhänge zwischen anamnestischen und klinischen Auffälligkeiten sowie dem Auftreten pathologischer Röntgenbefunde und der Entscheidung, vom Standardprozedere der Klinik abzuweichen.

Interessanterweise hat das Vorhandensein klinischer Auffälligkeiten in der vorliegenden Studie keinen signifikanten Einfluss auf das Auftreten pathologischer Röntgenbefunde. Das Auftreten von deutlichem Druckschmerz, Parästhesien, Infektionen, Wundheilungsstörungen, Weichteilirritationen, ESIN-Perforationen oder ausgeprägten Bewegungseinschränkungen geht also nicht mit einer erhöhten Wahrscheinlichkeit einher, dass auch das Röntgenbild einen pathologischen Befund erbringt. Allerdings wirken sich diese Faktoren signifikant auf die Entscheidung aus, das Standardprozedere zu ändern. Dies legt nahe, dass Auffälligkeiten in der klinischen Nachsorgeuntersuchung, die auch ohne radiologische Diagnostik unmittelbar sichtbar bzw. messbar sind, einen unmittelbaren Einfluss auf klinische Entscheidungen haben und unterstreicht die Bedeutung einer guten klinischen Untersuchung. Eine fachärztliche Vorstellung an Tag 28 mit standardisierter Erfassung möglicher klinischer Auffälligkeiten scheint unabdingbar zu sein.

Die statistische Auswertung zeigt eindrücklich, dass das Vorhandensein anamnestischer Auffälligkeiten einen signifikanten Einfluss auf das Vorliegen pathologischer Röntgenbefunde in der 4 Wochen-Verlaufskontrolle hat. Sobald ein Patient eine anamnestische Auffälligkeit (wie komplexe Vorerkrankungen, eine frühere Fraktur des gleichen Unterarms, eine offene Fraktur, eine offene Reposition oder ein postoperatives Sturzereignis) aufweist, steigt in der

vorliegenden Studie das Risiko in der 28-Tage-Verlaufskontrolle einen pathologischen Röntgenbefund aufzuweisen um den Faktor 8,13. Dies unterstreicht die Bedeutung einer gründlichen Anamnese und Dokumentation zur Detektion möglicher Risikofaktoren. Hierbei ist zu erwähnen, dass bis auf das postoperative Sturzereignis, alle erfassten Risikofaktoren bereits zum Zeitpunkt der Entlassung des Patienten aus der stationären Überwachung ermittelt werden können. Somit wäre es zukünftig möglich, Patienten mit möglichen Risikofaktoren bereits zu diesem Zeitpunkt in ein engmaschigeres Nachsorgeschema einzubinden oder individuelle Maßnahmen wie eine temporäre Gipsruhigstellung zu initiieren.

Im vorliegenden Patientenkollektiv wiesen nur 5,5 % der Kinder einen pathologischen Röntgenbefund in der 4 Wochen-Kontrolle auf. Bei 94,5 % der Patienten wurde hingegen ein radiologischer Befund ohne Pathologien erhoben. Zudem zeigt sich eine deutliche Korrelation zwischen Risikofaktoren in der Anamnese und einem pathologischen Röntgenbefund. Dies wirft die Frage auf, ob die radiologische Verlaufskontrolle nach 4 Wochen standardisiert bei allen Patienten durchgeführt werden sollte, oder nur bei Patienten mit möglichen Risikofaktoren in der Anamnese oder bei individueller klinischer Indikation.

Ein rationaler, indikationsgerechter Einsatz von Röntgenuntersuchungen in der Nachsorge von Kindern mit ESIN-behandelten Unterarmschaftfrakturen ist aus strahlenhygienischer, ökonomischer und ressourcenbezogener Sicht sinnvoll. Die Diskussion über die Notwendigkeit eines Röntgenbildes vor Erteilung der Sportfreigabe erfordert eine kritische Abwägung. Ein Grund für die Durchführung eines Röntgenbildes nach 4 Wochen besteht im objektiven Nachweis einer regelrechten Konsolidierung und Kallusbildung. Dies kann das Risiko für Komplikationen durch eine zu frühe Sportfreigabe bei möglicherweise unzureichend verheilten Knochen minimieren. Außerdem kann ein Röntgenbefund eventuell subtile Komplikationen aufzeigen, welche klinisch möglicherweise nicht ersichtlich sind, wie z.B. eine verzögerte Kallusbildung oder geringe Fehlstellungen. Auf der anderen Seite sind Kinder besonders empfindlich gegenüber ionisierender Strahlung. Die kumulative Strahlendosis kann langfristig das Risiko für strahleninduzierte Erkrankungen erhöhen. Durch den Verzicht auf unnötige Röntgenaufnahmen wird die Strahlenexposition minimiert, was einen wichtigen Beitrag zum Strahlenschutz leistet. Auch können radiologische Untersuchungen bei jungen Patienten und deren Eltern möglicherweise zusätzlichen Stress verursachen und den nötigen Zeitaufwand der Nachsorgeuntersuchung verlängern. Röntgenaufnahmen sind zudem mit Kosten für das Gesundheitssystem verbunden. Diese Kosten umfassen nicht nur die eigentliche Bildgebung, sondern auch die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse durch Fachpersonal. Durch den Verzicht auf unnötige Röntgenbilder können erhebliche finanzielle Ressourcen eingespart werden, die stattdessen in andere Bereiche der Gesundheitsversorgung investiert werden könnten. Kliniken verfügen über begrenzte Ressourcen, einschließlich der Verfügbarkeit von Röntgengeräten und von Fachpersonal. Unnötige Röntgenaufnahmen binden diese Ressourcen, die möglicherweise besser für Patienten mit akuten oder schwerwiegenden Gesundheitsproblemen genutzt werden könnten. Durch eine zurückhaltende Indikationsstellung für Röntgenaufnahmen wird zudem das Risiko von Überdiagnosen und der daraus möglicherweise resultierenden Übertherapie reduziert.

In Anbetracht der in dieser Studie erhobenen Daten ist zu diskutieren, ob man bei Patienten ohne Risikofaktoren mit einer unauffälligen klinischen Nachsorgeuntersuchung zukünftig auf die Durchführung eines Röntgenbildes 4 Wochen nach der Operation verzichten kann und die Sportfreigabe bei diesen Patienten ohne vorherige Röntgenuntersuchung erteilt werden kann. Dies setzt jedoch in jedem Fall eine sorgfältige klinische Untersuchung durch den behandelnden Arzt voraus. Zudem sollten die spezifischen Anforderungen und Risiken der jeweiligen Sportart berücksichtigt werden und gegebenenfalls eine stufenweise Wiederaufnahme der sportlichen Aktivität empfohlen werden. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass trotz der Implementierung von standardisierten postoperativen Protokollen eine individualisierte Nachsorge notwendig sein kann, um optimale Behandlungsergebnisse zu erzielen. Diese Erkenntnis könnte zu einer verbesserten und effektiveren Patientenversorgung beitragen, indem Risikopatienten frühzeitig identifiziert und möglicherweise engmaschiger mittels radiologischer Verlaufskontrollen überwacht werden als Patienten ohne potenzielle

Risikofaktoren. Generell müssen die Vorteile der genauen postoperativen Überwachung gegen die potenziellen Risiken der Strahlenexposition, Kosten und organisatorischem Aufwand abgewogen werden.

5.3 Limitationen der Studie

Die vorliegende retrospektive Arbeit untersuchte bereits bestehende Daten, welche aus vergangenen Behandlungen, Diagnosen und Patientenverläufen gesammelt wurden. Diesbezüglich entstehen mehrere Limitationen, welche die Aussagekraft und Zuverlässigkeit der Ergebnisse beeinträchtigen können. Beispielsweise konnten nur Kinder mit vollständig dokumentierten Verlaufskontrollen eingeschlossen werden, während Patienten mit unvollständigen Daten oder extern durchgeführten Verlaufskontrollen ausgeschlossen wurden. Zudem handelt es sich um eine monozentrische Studie, ohne überregionale Datenerhebung, es wurden lediglich die Daten einer Klinik erhoben. Dies kann im Sinne von Selection Bias möglicherweise dazu führen, dass die erhobenen Daten nicht repräsentativ für die Gesamtpopulation sind. Ferner ist die retrospektive Datenerhebung auf bereits existierende Aufzeichnungen angewiesen, welche möglicherweise nicht so genau sind, wie prospektiv erhobene Daten. Zudem kann es vorkommen, dass nicht alle relevanten Daten dokumentiert worden sind. So führt die teilweise noch nicht vollständige Digitalisierung aller Patientenakten möglicherweise zu einem Verlust von Daten. Fehlende Informationen durch unvollständige medizinische Aufzeichnungen können die Analyse beeinträchtigen und die Validität der Ergebnisse mindern. Die Daten wurden anhand nicht standardisierter Verlaufsdocumentationen, radiologischer Befunde und Arztbriefe erhoben. Im retrospektiven Studiensetting besteht keine Kontrolle über den Prozess der Datenerhebung. Die Möglichkeit zusätzliche Daten, welche möglicherweise für die Analyse nützlich sein könnten, zu erheben, besteht nicht. Im Vergleich zur aktuell bestehenden Literatur umfasst die vorliegende retrospektive Studie eine ähnliche Fallzahl. Erst mit Durchführung einer prospektiven Studie mit höherer Fallzahl wird sich zeigen, inwieweit die aktuellen Ergebnisse, die bisher insbesondere Tendenzen erkennen lassen, sich auch bestätigen. Die Datenerhebung endete mit der Metallentfernung. Es wäre interessant, die Patienten auch längerfristig zu begleiten, um weitere klinische Daten zu erheben, insbesondere mit der Frage, ob die Kinder mit pathologischen Röntgenbefunden Unterschiede in den Langzeitergebnissen aufweisen. Zur weiteren Prüfung der in dieser Studie gewonnenen Erkenntnisse ist die Durchführung einer prospektiven, multizentrischen Studie erforderlich.

6 Zusammenfassung – Ausblick

Die vorliegende Dissertation untersucht die postoperative Nachsorge von Unterarmschaftfrakturen bei Kindern, die mittels elastisch-stabiler intramedullärer Nagelung (ESIN) versorgt wurden. Ziel dieser Arbeit ist es, die Notwendigkeit der routinemäßigen radiologischen Verlaufskontrolle vier Wochen nach der Operation zu hinterfragen. Es soll geprüft werden, ob eine individualisierte Nachsorge, basierend auf klinischen und anamnestischen Befunden, als Alternative dienen kann, um unnötige Röntgenuntersuchungen zu vermeiden.

Hierzu wurden die Daten von 219 Kindern mit Unterarmschaftfrakturen, die mittels ESIN behandelt wurden, retrospektiv ausgewertet. Erfasst wurden insbesondere die klinischen und radiologischen Befunde vier Wochen postoperativ. Die Ergebnisse zeigten, dass nur 5,5 % der Patienten in der 4 Wochen-Kontrolle pathologische Röntgenbefunde aufwiesen. Risikofaktoren in der Anamnese wie offene Frakturen, Refrakturen oder postoperative Sturzereignisse erwiesen sich als signifikante Indikatoren für das Vorliegen pathologischer Röntgenbefunde. Patienten ohne klinische oder anamnestische Auffälligkeiten zeigten hingegen überwiegend unauffällige Röntgenbefunde.

Die Ergebnisse dieser Arbeit deuten darauf hin, dass eine standardisierte radiologische Kontrolle nach 28 Tagen bei Kindern ohne klinische oder anamnestische Risikofaktoren möglicherweise nicht erforderlich ist. Zukünftig sollte eine differenzierte und individualisierte Nachsorge in Betracht gezogen werden. Bei Patienten ohne Risikofaktoren könnte die postoperative Nachsorge in der 4 Wochen-Kontrolle künftig auf eine ausführliche klinische Untersuchung beschränkt werden, ohne routinemäßig Röntgenaufnahmen durchzuführen. Bei Risikopatienten bleibt eine engmaschigere radiologische Überwachung jedoch weiterhin sinnvoll.

Die Entwicklung individueller Nachsorgeprotokolle, basierend auf klinischen und anamnestischen Befunden, könnte dazu beitragen, die Patientenversorgung zukünftig zu optimieren, Ressourcen effizienter zu nutzen und die Strahlenbelastung junger Patienten zu reduzieren. Eine prospektive multizentrische Studie ist notwendig, um die Erkenntnisse dieser Arbeit weiter zu validieren und zu evaluieren, inwieweit individualisierte Nachsorgeprotokolle in die klinische Praxis integriert werden können.

7 Literaturverzeichnis

1. M Koch SK, G Schulze-Tanzil, B Spittau. Kurzlehrbuch Anatomie. Waschke ebJ, editor. München, Deutschland: Urban & Fischer Verlag GmbH & Co. KG; 2017. (S007-1-23) = Paulsen. F/ Waschke. J: Sobotta Atlas der Anatomie des Menschen, Band 1. Elsevier/ Urban & Fischer, 23. Aufl. 2010, 87 p.
2. Sinikumpu JJ, Serlo W. The shaft fractures of the radius and ulna in children: current concepts. *J Pediatr Orthop B*. 2015;24(3):200-6.
3. Mann D, Schnabel M, Baacke M, Gotzen L. [Results of elastic stable intramedullary nailing (ESIN) in forearm fractures in childhood]. *Unfallchirurg*. 2003;106(2):102-9.
4. P.P. FGS. Unterarmschaftfrakturen im Kindesalter [Leitlinie]. Deutsche Gesellschaft für Kinderchirurgie; zuletzt aktualisiert 04/2016 [Available from: https://register.awmf.org/assets/guidelines/006-062l_S1_Unterarmschaftfraktur-2016-05-abgelaufen.pdf].
5. Fernandez FF, Eberhardt O, Langendörfer M, Wirth T. Nonunion of forearm shaft fractures in children after intramedullary nailing. *J Pediatr Orthop B*. 2009;18(6):289-95.
6. Marzi I. *Kindertraumatologie*. 3 ed. Heidelberg: Springer Berlin; 02 June 2016. XV, 570 p.
7. Koch M, Kürten S, Schulze-Tanzil G, Spittau B, Waschke J. Kurzlehrbuch Anatomie. Philadelphia, GERMANY: Urban & Fischer Verlag GmbH & Co. KG; 2017.
8. Prof. Dr. Friedrich Paulsen PDJW. Sobotta Atlas der Anatomie des Menschen 23. Auflage ed: Urban & Fischer (Elsevier); 2010. 150-61 p.
9. LaStayo PC, Lee MJ. The forearm complex: anatomy, biomechanics and clinical considerations. *J Hand Ther*. 2006;19(2):137-44.
10. M Koch SK, G Schulze-Tanzil, B Spittau. Kurzlehrbuch Anatomie. Waschke ebJ, editor. München, Deutschland: Urban & Fischer Verlag GmbH & Co. KG; 2017. (S007-1-23) = Paulsen. F/ Waschke. J: Sobotta Atlas der Anatomie des Menschen, Band 1. Elsevier/ Urban & Fischer, 23. Aufl. 2010, 60 p.
11. Haugstvedt JR, Langer MF, Berger RA. Distal radioulnar joint: functional anatomy, including pathomechanics. *J Hand Surg Eur Vol*. 2017;42(4):338-45.
12. Gierer P, Rocher S, Wichelhaus A, Rotter R. [Typical fractures and dislocations of the elbow joint and their treatment]. *Radiologe*. 2018;58(11):976-84.
13. Baeßler B. Ellenbogen. In: Burkhart K, Hollinger B, Müller LP, editors. *Expertise Orthopädie und Unfallchirurgie*. Stuttgart 2016.
14. M Koch SK, G Schulze-Tanzil, B Spittau. Kurzlehrbuch Anatomie. Waschke ebJ, editor. München, Deutschland: Urban & Fischer Verlag GmbH & Co. KG; 2017. (S007-1-23) = Paulsen. F/ Waschke. J: Sobotta Atlas der Anatomie des Menschen, Band 1. Elsevier/ Urban & Fischer, 23. Aufl. 2010, 66 p.
15. Waschke FPUJ. Sobotta Atlas der Anatomie des Menschen. München: Urban & Fischer Verlag/Elsevier GmbH; 23. Edition; 2010. 10 p.
16. M Koch SK, G Schulze-Tanzil, B Spittau. Kurzlehrbuch Anatomie. Waschke ebJ, editor. München, Deutschland: Urban & Fischer Verlag GmbH & Co. KG; 2017. (S007-1-23) = Paulsen. F/ Waschke. J: Sobotta Atlas der Anatomie des Menschen, Band 1. Elsevier/ Urban & Fischer, 23. Aufl. 2010 75 p.
17. M Koch SK, G Schulze-Tanzil, B Spittau. Kurzlehrbuch Anatomie. Waschke ebJ, editor. München, Deutschland: Urban & Fischer Verlag GmbH & Co. KG; 2017. (S007-1-23) = Paulsen. F/ Waschke. J: Sobotta Atlas der Anatomie des Menschen, Band 1. Elsevier/ Urban & Fischer, 23. Aufl. 2010 76 p.

18. Waschke FPuJ. Sobotta Atlas der Anatomie des Menschen. München: Urban & Fischer Verlag/Elsevier GmbH; 23. Edition 2010. 208-17 p.
19. M Koch SK, G Schulze-Tanzil, B Spittau. Kurzlehrbuch Anatomie. Waschke ebJ, editor. München, Deutschland: Urban & Fischer Verlag GmbH & Co. KG; 2017. (S007-1-23) = Paulsen. F/ Waschke. J: Sobotta Atlas der Anatomie des Menschen, Band 1. Elsevier/ Urban & Fischer, 23. Aufl. 2010, 94 p.
20. Rausch V, Seybold D, Königshausen M, Köller M, Schildhauer TA, Geßmann J. [Basic principles of fracture healing]. Orthopade. 2017;46(8):640-7.
21. Alsousou J, Thompson M, Hulley P, Noble A, Willett K. The biology of platelet-rich plasma and its application in trauma and orthopaedic surgery: a review of the literature. J Bone Joint Surg Br. 2009;91(8):987-96.
22. Marsell R, Einhorn TA. The biology of fracture healing. Injury. 2011;42(6):551-5.
23. Rußow G, Heyland M, Märdian S, Duda GN. Knochenbruchheilung und klinische Belastungsstabilität. OP-Journal. 2019;35(01):12-9.
24. Schmitzenbecher PP. State-of-the-art treatment of forearm shaft fractures. Injury. 2005;36 Suppl 1:A25-34.
25. Riccabona M, Lindbichler F. Traumaradiologie beim Kind. Radiologe. 2002;42:195-209.
26. Wilkins KE. Principles of fracture remodeling in children. Injury. 2005;36 Suppl 1:A3-11.
27. Lindaman LM. Bone healing in children. Clin Podiatr Med Surg. 2001;18(1):97-108.
28. Kraus RS, Dorien; Röder, Christoph. Häufigkeit von Frakturen der langen Röhrenknochen im Wachstumsalter. Dtsch Arztebl 2005; 102: A 838–842 [Heft 12]. 2005.
29. Pamela Aidelsburger KG, Alois Huber, Hans Hertlein, Jürgen Wasem. Die elastisch stabile intramedulläre Nagelung bei instabilen kindlichen Unterarmschaftfrakturen. Deutsche Agentur für Health Technology Assessment des Deutschen Instituts für Medizinische Dokumentation und Information. 2006.
30. von Laer L KR, Linhart W. Frakturen und Luxationen im Wachstumsalter. 6., überarb. und erw. Auflage ed. Stuttgart: Thieme; 2012.
31. Herman MJ, Marshall ST. Forearm fractures in children and adolescents: a practical approach. Hand Clin. 2006;22(1):55-67.
32. King J, Diefendorf D, Apthorp J, Negrete VF, Carlson M. Analysis of 429 fractures in 189 battered children. J Pediatr Orthop. 1988;8(5):585-9.
33. von Laer L, Schneidmüller D, Hell A-K. Grundsätzliches zur Diagnostik. In: von Laer L, Schneidmüller D, Hell A-K, editors. Frakturen und Luxationen im Wachstumsalter. 7., vollständig überarbeitete Auflage ed: Georg Thieme Verlag; 2020.
34. Hahn MP RD, Muhr G, et al. Kindliche Unterarmfrakturen. Diagnostik, Therapie und Komplikationsmöglichkeiten. Unfallchirurg 1997.
35. Weinberg AM, Castellani C, Amerstorfer F. [Elastic Stable Intramedullary Nailing (ESIN) of forearm fractures]. Oper Orthop Traumatol. 2008;20(4-5):285-96.
36. Slongo T, Audigé L, Schlickewei W, Clavert JM, Hunter J. Development and validation of the AO pediatric comprehensive classification of long bone fractures by the Pediatric Expert Group of the AO Foundation in collaboration with AO Clinical Investigation and Documentation and the International Association for Pediatric Traumatology. J Pediatr Orthop. 2006;26(1):43-9.

37. Joeris A, Lutz N, Blumenthal A, Slongo T, Audigé L. The AO Pediatric Comprehensive Classification of Long Bone Fractures (PCCF). *Acta Orthop.* 2017;88(2):123-8.
38. Szostakowski B, DeMaio M. Ideal xenograft or a perfect bone substitute?-A retrospective review and analysis of the historical concept of ivory implants in orthopaedics. *Int Orthop.* 2020;44(5):1003-9.
39. Seligson D. History of Intramedullary Nailing. In: Rommens PM, Hessmann MH, editors. *Intramedullary Nailing: A Comprehensive Guide.* London: Springer London; 2015. p. 3-12.
40. Küntscher G. The intramedullary nailing of fractures. *J Orthop Trauma.* 2014;28 Suppl 8:S3-10.
41. Ligier JN, Metaizeau JP, Prévot J, Lascombes P. Elastic stable intramedullary nailing of femoral shaft fractures in children. *J Bone Joint Surg Br.* 1988;70(1):74-7.
42. Lascombes P, Huber H, Fay R, Popkov D, Haumont T, Journeau P. Flexible intramedullary nailing in children: nail to medullary canal diameters optimal ratio. *J Pediatr Orthop.* 2013;33(4):403-8.
43. Hunter JB. The principles of elastic stable intramedullary nailing in children. *Injury.* 2005;36 Suppl 1:A20-4.
44. Mittal R, Hafez MA, Templeton PA. "Failure" of forearm intramedullary elastic nails. *Injury.* 2004;35(12):1319-21.
45. Schmittenebecher PP. [Complications and errors in use of intramedullary nailing in shaft fractures in childhood]. *Kongressbd Dtsch Ges Chir Kongr.* 2001;118:435-7.
46. Weckbach A, Blattert TR, Weisser C. Interlocking nailing of forearm fractures. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2006;126(5):309-15.
47. Weinberg A-M KP, Castellani C, et al. . Which axial deviation results in limitations of pro- and supination following diaphyseal lower arm fracture in childhood? . *Eur J Trauma* 2001;27:309–16.
48. Haasbeek JF, Cole WG. Open fractures of the arm in children. *J Bone Joint Surg Br.* 1995;77(4):576-81.
49. Pugh DM, Galpin RD, Carey TP. Intramedullary Steinmann pin fixation of forearm fractures in children. Long-term results. *Clin Orthop Relat Res.* 2000(376):39-48.
50. Schmittenebecher PP. [Osteosynthesis in proximal forearm fractures in children]. *Oper Orthop Traumatol.* 2008;20(4-5):321-33.
51. Aidelsburger P, Grabein K, Huber A, Hertlein H, Wasem J. Elastic robust intramedullary nailing for forearm fracture in children. *GMS Health Technol Assess.* 2006;2:Doc01.
52. Oberle M, Schlickewei W. Unterarm. In: Dietz HG, Illing P, Schmittenebecher PP, Slongo T, Sommerfeldt DW, editors. *Praxis der Kinder- und Jugendtraumatologie.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2011. p. 319-30.
53. Acharya BM, Devkota P, Thakur AK, Gyawali B. Intramedullary Flexible Nailing for Diaphyseal Fractures of Forearm Bones in Children. *Rev Bras Ortop (Sao Paulo).* 2019;54(5):503-8.
54. C. Klemm K-JE, F. Bonnaire, H. P. Friedl. Schafffrakturen am wachsenden Skelett (Kinder und Adoleszenten): Intramedulläre Stabilisierungsverfahren - State of the Art. *OP-JOURNAL,* (16/2). 2000:188-93.

55. Hahn MP, Richter D, Muhr G, Ostermann PA. [Pediatric forearm fractures. Diagnosis, therapy and possible complications]. Unfallchirurg. 1997;100(10):760-9.
56. Goodship AE, Kenwright J. The influence of induced micromovement upon the healing of experimental tibial fractures. J Bone Joint Surg Br. 1985;67(4):650-5.
57. Hahn MP, Richter D, Ostermann PA, Muhr G. [Elastic intramedullary nailing--a concept for treatment of unstable forearm fractures in childhood]. Chirurg. 1996;67(4):409-12.
58. Slongo TF. Complications and failures of the ESIN technique. Injury. 2005;36 Suppl 1:A78-85.
59. Dietz HGS, Peter P.; Illing, Peter. Intramedulläre Osteosynthese im Wachstumsalter : mit 8 Tabellen. München u.a.: Urban & Schwarzenberg; 1997.
60. Cosma D, Vasilescu DE. Elastic Stable Intramedullary Nailing for Fractures in Children - Specific Applications. Clujul Med. 2014;87(3):147-51.
61. Van der Reis WL, Otsuka NY, Moroz P, Mah J. Intramedullary nailing versus plate fixation for unstable forearm fractures in children. J Pediatr Orthop. 1998;18(1):9-13.
62. A. Jubel JA, J. Isenberg , H. Bergmann , A. Prokop , K. E. Rehm. Die elastisch stabile intramedulläre Nagelung (ESIN) instabiler kindlicher Unterarmfrakturen. Aktuelle Traumatol 34(3) Georg Thieme Verlag KG Stuttgart · New York. 2004:111-6.
63. Lascombes P, Haumont T, Journeau P. Use and abuse of flexible intramedullary nailing in children and adolescents. J Pediatr Orthop. 2006;26(6):827-34.
64. Sommerfeldt DW, Schmittenebecher PP. Elastic stable intramedullary nailing (ESIN) in the adolescent patient-perils, pearls, and pitfalls. Eur J Trauma Emerg Surg. 2014;40(1):3-13.
65. Pillukat T, Windolf J, van Schoonhoven J. [External fixator of the wrist-temporary fixation]. Oper Orthop Traumatol. 2020;32(5):396-409.
66. Wyrsh B, Mencio GA, Green NE. Open reduction and internal fixation of pediatric forearm fractures. J Pediatr Orthop. 1996;16(5):644-50.
67. Cremer P, Angelliaume A, Lalioui A, Cellarier G, Harper L, Lefevre Y. Functional and radiological outcome after forearm plating in children and adolescent fracture. Acta Orthop Belg. 2021;87(1):143-9.
68. Ortega R, Loder RT, Louis DS. Open reduction and internal fixation of forearm fractures in children. J Pediatr Orthop. 1996;16(5):651-4.
69. Fernandez FF, Egenolf M, Carsten C, Holz F, Schneider S, Wentzensen A. Unstable diaphyseal fractures of both bones of the forearm in children: plate fixation versus intramedullary nailing. Injury. 2005;36(10):1210-6.
70. 10 Grundsätzliches zur Therapie. 2012 2014/01/17. In: Frakturen und Luxationen im Wachstumsalter [Internet]. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG. 6., überarbeitete und erweiterte Auflage. Available from: <http://www.thieme-connect.de/products/ebooks/lookinside/10.1055/b-0034-11157>.
71. Sundermann B, Mörs K, Frank J, Marzi I. Unterarmfrakturen und distale Radiusfrakturen bei Kindern. OP-Journal. 2018;34(03):290-301.
72. von Laer L. Verletzungsformen. In: Marzi I, editor. Kindertraumatologie. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2016. p. 15-22.
73. Marini JC, Forlino A, Bächinger HP, Bishop NJ, Byers PH, Paepe A, et al. Osteogenesis imperfecta. Nat Rev Dis Primers. 2017;3:17052.
74. Carpenter TO, Shaw NJ, Portale AA, Ward LM, Abrams SA, Pettifor JM. Rickets. Nat Rev Dis Primers. 2017;3:17101.

75. Horn D, Klaas C, Raschke M, Stange R. [Immunosuppressive treatment and bone healing]. *Unfallchirurg*. 2019;122(7):518-25.
76. Liu YZ, Akhter MP, Gao X, Wang XY, Wang XB, Zhao G, et al. Glucocorticoid-induced delayed fracture healing and impaired bone biomechanical properties in mice. *Clin Interv Aging*. 2018;13:1465-74.
77. Garner MR, Sethuraman SA, Schade MA, Boateng H. Antibiotic Prophylaxis in Open Fractures: Evidence, Evolving Issues, and Recommendations. *J Am Acad Orthop Surg*. 2020;28(8):309-15.
78. Diwan A, Eberlin KR, Smith RM. The principles and practice of open fracture care, 2018. *Chin J Traumatol*. 2018;21(4):187-92.
79. Ukay IS, Carol & Vogt, Markus & Clauss, Martin & Borens, Olivier & Sendi, Parham. . Antibiotikaprophylaxe / Präemptive Therapie bei offenen Frakturen in der Orthopädie. . *Swiss Medical Forum – Schweizerisches Medizin-Forum* (2023). ;10.4414/smf.2023.09299. .
80. Dunkel N, Pittet D, Tovmirzaeva L, Suvà D, Bernard L, Lew D, et al. Short duration of antibiotic prophylaxis in open fractures does not enhance risk of subsequent infection. *Bone Joint J*. 2013;95-b(6):831-7.
81. Ibrahim DA, Swenson A, Sassoon A, Fernando ND. Classifications In Brief: The Tscherne Classification of Soft Tissue Injury. *Clin Orthop Relat Res*. 2017;475(2):560-4.
82. Oestern HJ, Tscherne H. Pathophysiology and classification of soft tissue injuries associated with fractures. *Fractures with Soft Tissues Injuries (German)*. Berlin, Germany: Springer-Verlag; 1984. p. 1-9.
83. Fernandez FF, Langendörfer M, Wirth T, Eberhardt O. Failures and complications in intramedullary nailing of children's forearm fractures. *J Child Orthop*. 2010;4(2):159-67.
84. Parsch KD. Modern trends in internal fixation of femoral shaft fractures in children. A critical review. *J Pediatr Orthop B*. 1997;6(2):117-25.
85. Griffet J, el Hayek T, Baby M. Intramedullary nailing of forearm fractures in children. *J Pediatr Orthop B*. 1999;8(2):88-9.
86. Walter G KM, Kappler C, Hoffmann R. Treatment algorithms for chronic osteomyelitis. . *Dtsch Arztebl Int* 2012;109(14): 257–64. .
87. Walter N, Bärtl S, Alt V, Rupp M. The Epidemiology of Osteomyelitis in Children. *Children (Basel)*. 2021;8(11).
88. Lew DP, Waldvogel FA. Osteomyelitis. *Lancet*. 2004;364(9431):369-79.
89. Cullen MC, Roy DR, Giza E, Crawford AH. Complications of intramedullary fixation of pediatric forearm fractures. *J Pediatr Orthop*. 1998;18(1):14-21.
90. Schmittenebecher PP, Dietz HG, Linhart WE, Slongo T. Complications and Problems in Intramedullary Nailing of Children's Fractures. *European Journal of Trauma*. 2000;26(6):287-93.
91. Han B, Wang Z, Li Y, Xu Y, Cai H. Risk factors for refracture of the forearm in children treated with elastic stable intramedullary nailing. *International Orthopaedics*. 2019;43(9):2093-7.
92. Mehlmann CT, Weitssothraul B, JH KJ, editors. *Rockwood and Wilkinss' fractures in children*. 6th, ed. Philadelphia: Lippincott WWp. .
93. Lieber J, Joeris, A., Knorr, P. et al. . ESIN in Forearm Fractures. *Eur J Trauma* 31. 2005:3–11.
94. Schmittenebecher PP, Fitze G, Gödeke J, Kraus R, Schneidmüller D. Delayed Healing of Forearm Shaft Fractures in Children After Intramedullary Nailing. *Journal of Pediatric Orthopaedics*. 2008;28(3):303-6.

95. Ogonda L, Wong-Chung J, Wray R, Canavan B. Delayed union and non-union of the ulna following intramedullary nailing in children. *Journal of Pediatric Orthopaedics B*. 2004;13(5):330-3.
96. Calder PR, Achan P, Barry M. Diaphyseal forearm fractures in children treated with intramedullary fixation: outcome of K-wire versus elastic stable intramedullary nail. *Injury*. 2003;34(4):278-82.
97. Verstreken L, Delronge G, Lamoureux J. Shaft forearm fractures in children: intramedullary nailing with immediate motion: a preliminary report. *J Pediatr Orthop*. 1988;8(4):450-3.
98. Ligier JN, Métaizeau JP, Lascombes P, Poncelet T, Prévot J. [Treatment of diaphyseal fractures of both bones of the forearm in children using elastic stable pinning]. *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot*. 1987;73 Suppl 2:149-51.
99. Hertlein H, Aidelsburger P, Huber A, Hartl WH, Andress HJ. [Unstable pediatric femoral and forearm shaft fractures. Comparison between conservative treatment and stable intramedullary nailing]. *Zentralbl Chir*. 2000;125(9):756-62.
100. Hawker GA, Mian S, Kendzerska T, French M. Measures of adult pain: Visual Analog Scale for Pain (VAS Pain), Numeric Rating Scale for Pain (NRS Pain), McGill Pain Questionnaire (MPQ), Short-Form McGill Pain Questionnaire (SF-MPQ), Chronic Pain Grade Scale (CPGS), Short Form-36 Bodily Pain Scale (SF-36 BPS), and Measure of Intermittent and Constant Osteoarthritis Pain (ICOAP). *Arthritis Care Res (Hoboken)*. 2011;63 Suppl 11:S240-52.
101. Hicks CL, von Baeyer CL, Spafford PA, van Korlaar I, Goodenough B. The Faces Pain Scale-Revised: toward a common metric in pediatric pain measurement. *Pain*. 2001;93(2):173-83.
102. Dietzel M, Scherer S, Spogis J, Kirschner HJ, Fuchs J, Lieber J. Treatment of unstable forearm fractures at the metaphyseal-diaphyseal junction in children: antegrade ESIN vs. transepiphyseal intramedullary K-wire fixation. *Eur J Trauma Emerg Surg*. 2024.

8 Danksagung

9 Tabellarischer Lebenslauf

Nora Henriette Laubach