

Kinderchirurgische Klinik und Poliklinik

im Dr. von Haunerschen Kinderspital

Klinik der Ludwig-Maximilians-Universität München

Vorstand: Prof. Dr. Dietrich von Schweinitz

Verletzungen des Os scaphoideum im Wachstumsalter

Dissertation

zum Erwerb des Doktorgrades der Medizin

an der Medizinischen Fakultät der

Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von

Lisa-Florentina Hammer

aus

Wien

2021

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter: Prof. Dr. med. Dr. h.c. Hans-Georg Dietz

promovierter Mitbetreuer: Dr. med. Florian Bergmann

Mitberichterstatter: PD Dr. med. Jörg Hausdorf

Dekan: Prof. Dr. med. dent. Reinhard Hickel

Tag der mündlichen Prüfung: 21.01.2021

Eidesstattliche Versicherung

Hammer, Lisa-Florentina

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

Verletzungen des Os scaphoideum im Wachstumsalter

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

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

Wien, 21.01.2021

Lisa-Florentina Hammer

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
1.1	Nomenklatur	8
1.2	Entwicklung	9
1.3	Anatomie	10
1.3.1	Biomechanik	11
1.3.2	Bänder	12
1.3.3	Blutversorgung	13
1.3.4	Anatomische Landmarken: die Tabatière	15
1.4	Ossifikation	16
1.5	Pathomechanismus	17
1.6	Klassifikation	18
1.7	Epidemiologie und Frakturlokalisierung	20
1.8	Diagnose	21
1.8.1	Körperliche Untersuchung	21
1.8.2	Röntgen	23
1.8.3	Magnetresonanztomographie	24
1.8.4	Weitere Bildgebende Verfahren	26
1.9	Therapie	27
1.9.1	Hintergrund	27
1.9.2	Konservative Therapie	27
1.9.3	Operative Therapie	30
1.9.4	Operationstechnik akuter Skaphoidfrakturen	31
1.9.5	Risiken	35
1.9.6	Nachbehandlung	36
1.9.7	Verlaufskontrolle und Sportfähigkeit	37
1.10	Komplikationen	37
1.10.1	Definition und Ursachen	37
1.10.2	Epidemiologie	39
1.10.3	Diagnostik	40
1.10.4	Differentialdiagnose	42
1.10.5	Therapie	43
1.10.6	Operationstechniken und Immobilisation	43
1.10.7	Spätfolgen	45
1.10.8	Andere Komplikationen	46
1.11	Begleitverletzungen	47

1.11.1	Knöchern	47
1.11.1.1	Radius	47
1.11.1.2	Handwurzelknochen	48
1.11.1.3	Andere knöcherne Verletzungen	49
1.11.2	Ligamentär	49
1.11.2.1	Triangulärer fibrokartilaginärer Komplex (TFCC).....	49
1.11.2.2	Skapholunäres Ligament (SL-Band)	50
2	Fragestellungen und Hypothesen	51
3	Patienten und Methoden	52
3.1	Datenerfassung	52
3.2	Patientenkollektiv und Methode	54
3.3	Nachuntersuchungen und Befragungen.....	55
3.4	Statistische Auswertung	57
3.5	Ethik	57
4	Ergebnisse	57
4.1	Patienten mit Skaphoidfraktur	60
4.1.1	Diagnostik.....	62
4.1.2	Frakturlokalisierung.....	63
4.1.3	Therapie	64
4.1.4	Begleitverletzungen	66
4.2	Vergleich von Patientengruppen	67
4.3	Vergleich von Röntgen- und MRT-Aufnahmen.....	68
4.3.1	Kahnbeinzielaufnahme	69
4.4	Nachuntersuchungen	70
4.4.1	Befragungen	70
4.4.2	Fallberichte	72
4.5	Statistische Auswertung	74
5	Diskussion.....	79
5.1	Inzidenz und Verletzungsursache	81
5.2	Geschlechterverteilung und Frakturlokalisierung.....	83
5.3	Diagnose	84
5.4	Therapie	91
5.5	Follow-up.....	96
5.6	Begleitverletzungen.....	98
5.7	Komplikationen.....	98
6	Zusammenfassung.....	102
7	Literaturverzeichnis	108
8	Abbildungsverzeichnis.....	119

9	Tabellenverzeichnis	120
10	Abkürzungsverzeichnis	121
11	Anhang 1 Diagnosealgorithmus	123
12	Anhang 2 Therapiealgorithmus	124
13	Anhang 3 Fragebogen.....	125
14	Anhang 4 Beschluss Ethikkommission.....	127
15	Danksagung.....	128

1 Einleitung

Das Skaphoid ist jener Handwurzelknochen, der am häufigsten von Frakturen betroffen ist [1-7]. Insgesamt sind solche Verletzungen im Kindes- und Jugendalter jedoch sehr selten [8-11]. Sie machen im Kindes- und Jugendalter etwa 0,4-0,5% aller Knochenbrüche [10-12] und 3% aller Frakturen im Bereich der Hand und des Handgelenks aus [3, 13].

Skaphoidfrakturen sind gerade im Wachstumsalter häufig schwierig zu diagnostizieren. Neben ihrer Seltenheit liegt dies zum einen an einer oft unspezifischen und diskreten Symptomatik bei der klinischen Untersuchung. Zum anderen lassen sich Verletzungen der Handwurzelknochen bei der initialen Röntgendiagnostik oft nicht nachweisen [14, 15]. Dies führt dazu, dass Frakturen des Skaphoids leicht übersehen werden [4]. Die frühzeitige und sichere Erkennung ist aber entscheidend, da Komplikationen wie Pseudarthrosen oder avaskuläre Nekrosen vor allem mit einer verzögerten oder verpassten Diagnosestellung verbunden sind [9, 16-18].

Das Wissen über die optimale Diagnostik sowie Therapie von Kahnbeinbrüchen basiert zum Großteil auf Erkenntnissen über ähnliche Verletzungen bei Erwachsenen [15]. Frakturen des Skaphoids bei Kindern und Jugendlichen weisen aber einige Besonderheiten auf. Die Handwurzelknochen sind bei Kindern zunächst knorpelig angelegt und verknöchern innerhalb des Zeitraums vom 1. bis zum 15. Lebensjahr [2, 12, 19]. Daher ergeben sich je nach Alter spezifische Frakturmuster, welche sich von denen bei Erwachsenen unterscheiden [1, 13, 20, 21]. Zudem erschwert die unvollständige Verknöcherung den Nachweis von Frakturen durch konventionelle Röntgenaufnahmen zusätzlich [12, 22].

Die Anzahl von Kindern und Jugendlichen, die sich mit posttraumatischen Schmerzen im Handgelenk in der chirurgischen Ambulanz vorstellen, ist in den letzten Jahren gestiegen [23-25]. Die genaue Lokalisation der Verletzung ist gerade bei Kindern auf Grund der kleinen anatomischen Größenverhältnisse bei der klinischen Untersuchung jedoch oft schwierig auszumachen [12]. Daher ist es entscheidend, eine Skaphoidfraktur von den deutlich häufiger

vorkommenden Handgelenksprellungen und Frakturen des distalen Unterarmes zu unterscheiden [7]. Wird eine Skaphoidfraktur rechtzeitig erkannt, kann sie in den meisten Fällen durch Ruhigstellung zur Ausheilung gebracht werden [8, 11]. Aus diesem Grund ist ein standardisiertes diagnostisches und therapeutisches Vorgehen entscheidend [4]. Darüber, sowie über die Langzeitfolgen von Frakturen des Skaphoids, herrscht in Literatur und Praxis bis zum heutigen Tage jedoch noch viel Uneinigkeit.

1.1 Nomenklatur

Das Skaphoid ist einer der acht Handwurzelknochen (Karpalknochen, lat. Ossa carpi). Diese sind für die Flexibilität der Hand unentbehrlich [26]. Im Vergleich zu anderen Knochen des menschlichen Skeletts erhielten die Handwurzelknochen jedoch erst sehr spät eine endgültige Nomenklatur, was noch heutzutage häufig für Verwirrung sorgt [27].

Geschichtlich gesehen waren die Knochen der Handwurzel anfangs entweder gar nicht bekannt oder wurden nicht voneinander unterschieden [28, 29]. Es existieren anatomische Zeichnungen, welche eine direkte Verbindung zwischen den Mittelhandknochen und dem distalen Radius zeigen [29]. Andreas Vesalius war der Erste, der 1543 in seinem Werk „De humani corporis fabrica“ eine Unterscheidung zwischen den einzelnen Handwurzelknochen vornahm, indem er ihnen Zahlen von 1 (heutiges Skaphoid) bis 8 zuordnete [27-29]. Eindeutige Namen für die Knochen der Handwurzel wurden erst im Jahr 1653 durch den deutschen Anatomen Michael Lyser in die medizinische Literatur eingebracht. Er bezeichnete das Skaphoid jedoch noch als „Os cotyloid“, aus dem griechischen „κοτυλη“ (kotyle), was als Becher oder Löffel übersetzt werden kann [28, 29].

Mehr als 70 Jahre später, im Jahr 1726, traten zwei Veröffentlichungen in Erscheinung, die einen bedeutenden Einfluss auf die heutige Benennung der Handwurzelknochen hatten [27]. Der in Deutschland geborene und an der Universität Leiden tätige Anatom Bernhard Siegfried Albinus gab dem Skaphoid auf Grund seiner leicht gebogenen Form den Namen „Os naviculare“, von lateinisch „navicula“ = Schiffelein/Kahn [27, 28]. Zur selben Zeit wählte in

Edinburgh Alexander Monro (primus) die bekannte Bezeichnung „Os scaphoideum“. Den Begriff leitete er von dem griechischen Wort „σκάφος“ (skaphe = Kahn, Graben oder Grube) ab, womöglich da das Skaphoid als einziger Handwurzelknochen einen längs verlaufenden Sulcus (=Graben oder Furche) besitzt [28]. Der Name „Os scaphoideum“ wurde unter anderem auch von Jacob Henle (1809–1885), einem der renommiertesten Anatomen Deutschlands, übernommen [27, 29]. Die deutsche Bezeichnung Kahnbein bzw. „kahnförmiges Bein“ wurde erstmals 1763 von Johann Gottlieb Walter, einem deutschen Anatomen, benutzt [28].

Die Begriffe Os naviculare und Os scaphoideum wurden lange Zeit synonym gebraucht, bis 1955 in der Pariser Nomina Anatomica der Name Os scaphoideum eindeutig festgelegt wurde [28, 29]. Dies sollte Verwechslungen mit einem ebenso als Os naviculare bezeichneten Fußwurzelknochen vorbeugen [28]. Im klinischen Sprachgebrauch konnte sich diese Definition jedoch immer noch nicht endgültig durchsetzen und so werden, auch heute noch, beide Begriffe parallel benutzt.

1.2 Entwicklung

Sowohl beim Menschen als auch beim Schimpansen ist das Skaphoid mit dem bei den meisten anderen Säugetieren getrennt vorhandenen Os centrale verschmolzen [30]. Lange Zeit wurde vermutet, dass diese Fusion auf die Fähigkeit der stammesgeschichtlichen Vorfahren des Menschen zum Knöchelgang zurückzuführen ist, da das größere Skaphoid das Handgelenk stabilisiert [30, 31]. Diese Theorie bietet jedoch noch bis heute Anlass für heftige Diskussionen [32, 33].

Im Laufe der Evolution hat sich die Anatomie des Handgelenks zu Gunsten der Entwicklung differenzierter motorischer Fertigkeiten verändert. Die Anpassung einiger morphologischer Merkmale des radialseitigen Handgelenks wurde in mehreren Studien untersucht [30, 34-36]. Die breiteren Gelenkflächen des Skaphoids verleihen dem Daumen Stabilität. Dies ermöglichte die Entwicklung eines kraftvollen und präzisen Griffes, welcher für den Gebrauch von Werkzeugen und Waffen essentiell war [30, 35, 36]. Auch bei der in der englischen Literatur als „dart-throwing-motion“ bezeichneten Bewegung spielt

das Skaphoid eine wichtige Rolle (siehe auch Kapitel 1.3.1). Diese Handgelenksbewegung von Radialabduktion und Extension in Ulnaradduktion und Flexion wird unter anderem für das Schwingen und Beschleunigen eines Hammers oder das Werfen eines Speers benötigt [36, 37]. Es wird angenommen, dass diese Fähigkeiten in der Evolution des Menschen einen entscheidenden Überlebensvorteil darstellten [36, 38, 39].

1.3 Anatomie

Die acht Handwurzelknochen bilden die Verbindung zwischen den zwei Knochen des Unterarms und den Metakarpalknochen [40]. Sie sind in zwei Reihen zu jeweils vier Knochen angeordnet, eine proximale und eine distale Handwurzelreihe [41].

Das Skaphoid liegt in der proximalen Reihe am weitesten radial (siehe Abb. 1). Es hat eine charakteristische und sehr komplexe dreidimensionale Struktur [42-44]. Vereinfacht kann es als unregelmäßiges Ellipsoid beschrieben werden, welches leicht s-förmig verdreht und gebogen ist [28, 45]. Die Längsachse des Kahnbeins verläuft in der Hand von dorsozentral proximal nach distal palmar radial [28].

Das Skaphoid ist der größte Knochen der proximalen Karpalreihe [46, 47]. Seine durchschnittliche Länge beträgt Messungen zufolge $31,3 \pm 2,1$ mm bei Männern und ist somit um etwa 4 mm länger als bei Frauen mit $27,3 \pm 1,7$ mm [48].

Klinisch-anatomisch kann das Skaphoid in drei Teile aufgeteilt werden: den proximalen Pol, die Taille und den distalen Pol mit Tuberkulum [28, 43]. Aufgrund seiner besonderen Form, bildet das Skaphoid Artikulationen mit allen benachbarten Knochen aus. Proximal artikuliert das Skaphoid mit der Fossa scaphoidea des distalen Radius und distal mit dem Os trapezium sowie dem Os trapezoideum. An seiner ulnaren Seite bildet es proximal ein Gelenk mit dem Os lunatum und distal mit dem Os capitatum aus [42, 44, 49, 50]. Das Skaphoid artikuliert also mit insgesamt fünf Knochen und ist daher auch zu einem großen Teil mit Gelenkknorpel überzogen. Der genaue Anteil der mit Knorpel bedeckten Oberfläche variiert in der Literatur zwischen 42 – 80% [28, 42-44, 51].

Das Skaphoid bildet das radiale Bindeglied zwischen dem proximalen (Articulatio radiocarpalis) und dem distalen Handgelenk (Articulatio mediocarpalis). Es ist somit für die Gesamtbeweglichkeit der Hand gegen den Unterarm von großer Bedeutung [43].

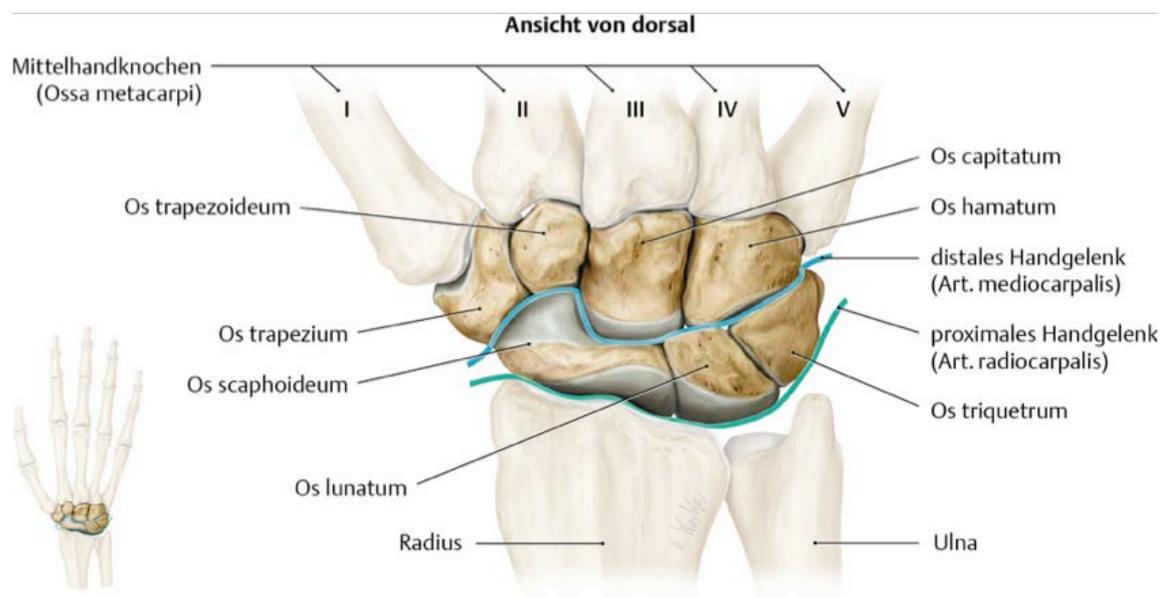


Abb. 1: Handwurzelknochen der rechten Hand in der Ansicht von dorsal
 (nach Schünke et. al aus <https://viamedici.thieme.de/lernmodule/anatomie/handknochen+ossa+manus> 15.9.2018)

1.3.1 Biomechanik

Das Handgelenk zeichnet sich durch einen großen Bewegungsumfang bei gleichzeitiger Stabilität aus [52]. Das komplexe Zusammenspiel der Karpalknochen und der intrinsischen und extrinsischen Bänder im Handgelenk ist immer noch Gegenstand zahlreicher Studien [49, 53-55].

Das Skaphoid nimmt eine Sonderstellung unter den Handwurzelknochen ein, da es sich um einen sehr beweglichen Knochen handelt, der biomechanisch eine große Rolle spielt [28]. Wolfe et al. [53] untersuchten in einer Studie die 3-dimensionale Kinematik der Handwurzelknochen mit Hilfe einer speziellen CT-Technologie. Dabei fanden sie eine große Beweglichkeit des Skaphoids gegenüber dem Os lunatum. Daraus schlossen sie, dass das Handgelenk nicht nur als System von zwei Gelenken (proximales und distales Handgelenk) angesehen werden kann, sondern weitaus komplexer ist. Demzufolge sollte das Skaphoid nicht als Teil der proximalen Handwurzelreihe betrachtet werden, sondern als unabhängiger Knochen mit eigener Kinematik. Diese ist sowohl von

den benachbarten Knochen als auch von Richtung und Ausmaß der Handgelenksbewegung abhängig.

Bei der Extension und Flexion im Handgelenk folgt das Kahnbein diesen Bewegungen [56]. Bei der Radialabduktion im Handgelenk bewegt sich das Kahnbein in Flexion. Bei der Ulnaradduktion nimmt es eine extendierte und aufgerichtete Stellung ein, in der es auch auf Röntgenbildern gut zur Darstellung kommt [57]. (siehe Abb. 2)

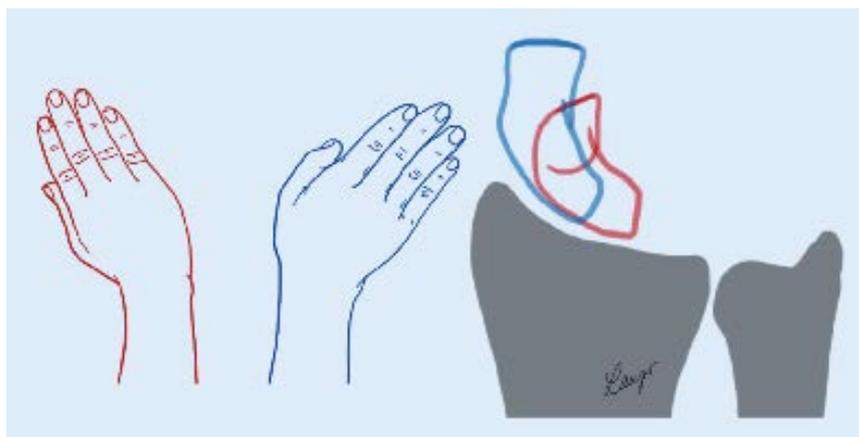


Abb. 2: Bewegungen des Kahnbeins von der Radialabduktion (rot) in die Ulnaradduktion (blau)

(aus M. F. Langer, 2016, S. 931 [28])

Bei der „dart-throwing-motion“, eine Hauptbewegung im Handgelenk für viele Alltags- und Sportaktivitäten, führt das Skaphoid nur eine minimale Bewegung aus. Es bleibt, wie die restlichen Knochen der proximalen Karpalreihe, nahezu unbeweglich. Dies erhöht die Stabilität im Handgelenk und ermöglicht Bewegungen der Hand, die sowohl Kraft als auch Feinmotorik erfordern. [28, 37, 56]

1.3.2 Bänder

In seiner Position wird das Kahnbein durch zahlreiche straffe Bänder fixiert [40]. Sie stützen und führen die Bewegungen im Handgelenk und bestimmen das Bewegungsausmaß [58]. Es kann zwischen interkarpalen und extrinsischen Bandverbindungen unterschieden werden [59].

Über die interkarpalen Bänder ist das Skaphoid mit den Nachbarknochen der Handwurzel verbunden (siehe Abb. 3). Die Bänder zum Os trapezium und Os capitatum sind für die bewegliche Befestigung des distalen Skaphoidpols verantwortlich [28, 43]. Das wichtige SL-Band (Ligamentum scapholunatum) verläuft in der Sagittalebene in Hufeisenform und fixiert das Skaphoid an das Os lunatum. Dieses 3-teilige Band ist entscheidend für die Rotationsstabilität zwischen den beiden Knochen und verhindert ihr Verkippen und Auseinanderweichen [60]. Die extrinsischen Bänder verbinden Radius und Ulna mit den Karpalknochen und sind palmar besonders stark ausgeprägt. Sie entspringen an der palmaren Radiuskante und dem Radiusstyloid und ziehen über das Skaphoid zu Os lunatum und Os capitatum [43, 60].

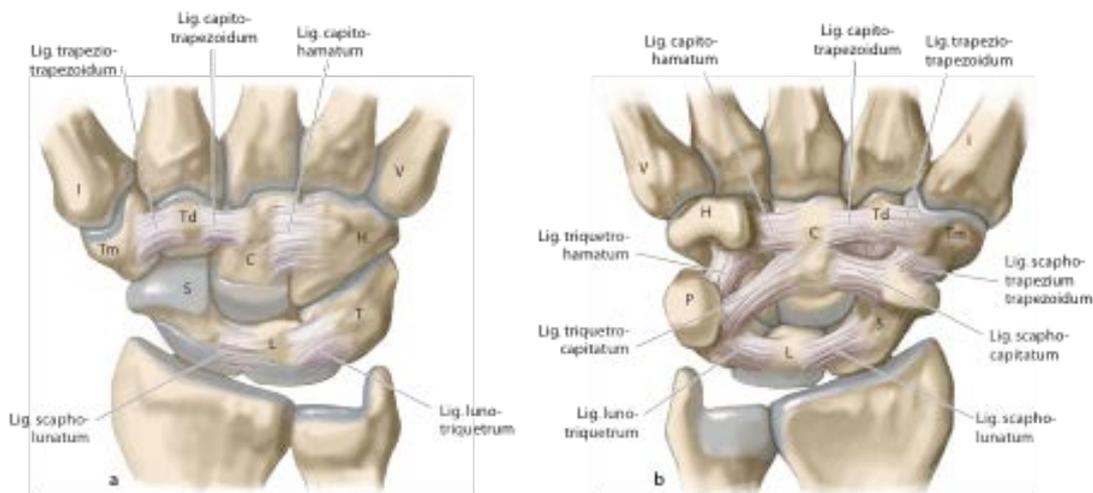


Abb. 3: Interkarpaler Bandapparat, a Ansicht von palmar b Ansicht von dorsal
 S= Os skaphoideum, L= Os lunatum, T= Os triquetrum, C= Os capitatum, Tm= Os trapezium, Td= Os trapeziodeum, H= Os hamatum, P= Os pisiforme (aus H. Towfigh, 2014, S. 234 [61])

1.3.3 Blutversorgung

Entsprechend seiner radialen Lage im Handgelenk wird das Skaphoid von radial aus der Arteria radialis mit Blut versorgt [28]. Dies erfolgt über dorsale und palmare Äste. Der wichtigste Ast ist dabei der dorsale Ast, der R. dorsalis scaphoidei arteriae radialis. (siehe Abb. 4) Die zweitwichtigste Blutversorgung stellen kleinere Äste dar, die entweder aus einem oberflächlichen Ast oder direkt aus der A. radialis entspringen und zur Palmarseite des Skaphoids sowie distal zum Tuberculum scaphoidei ziehen. [28, 43, 44, 62-64]

Da das Kahnbein zu einem großen Teil mit Knorpel überzogen ist, sind die Regionen in denen Blutgefäße in den Knochen eintreten können, begrenzt. Die Eintrittsstellen befinden sich daher in Bereichen, die als Ansatzstellen für Bänder und Gelenkkapselanteile dienen. [43, 62]

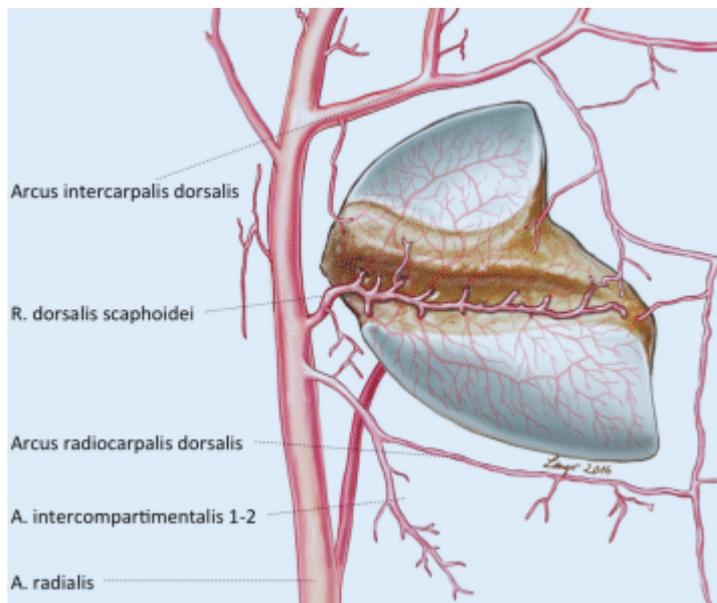


Abb. 4: Blutversorgung des Skaphoids von dorsal aus gesehen
(aus M. F. Langer et al., 2016, S. 930 [28])

Die größten Gefäße treten an der Dorsalseite des Tailenbereichs des Skaphoids, innerhalb einer längs verlaufenden Grube (Sulcus scaphoidei), in den Knochen ein [28, 62, 63]. Sie versorgen die proximalen 70 - 80% des Kahnbeins. Die distalen 20 - 30% werden hingegen über die palmaren Äste versorgt [50, 62]. In einer aktuellen Studie von Xiao et al. [63] konnte allerdings mittels Bleirot Injektion und 3-dimensionaler Rekonstruktion über Mikro-CT gezeigt werden, dass der Großteil der Blutversorgung des distalen Pols des Skaphoids ebenfalls durch die dorsalen Arterien aus dem Tailenbereich erfolgt. In nur einem Drittel der Fälle wurde der distale Pol ausschließlich von distalen Ästen versorgt. Die Blutgefäße treten über die sogenannten Foramina nutrica in den Knochen ein. Diese sind auf der Dorsalseite des Kahnbeins auch besonders zahlreich vorhanden. Dubey et al. [65] fanden auf der Dorsalseite etwa viermal so viele Foramina nutrica wie auf der Palmarseite.

Der proximale Pol des Skaphoids stellt eine Besonderheit dar. Er wird ausschließlich über Gefäße versorgt, die distal oder auf Höhe der Taille in den

Knochen eintreten. Es besteht also ein intraossärer, retrograder Blutfluss von distal nach proximal. [43, 57, 62, 63, 66, 67] Dies wird jedoch auch von einigen Autoren bestritten, die eine direkte Blutversorgung des proximalen Pols beschreiben [51]. Eine traumatische Beeinträchtigung der prekären Blutversorgung des proximalen Pols wird häufig für das vermehrte Auftreten von Pseudarthrosen und avaskulären Nekrosen sowie für eine verlängerte Heilungsdauer von Frakturen verantwortlich gemacht [43, 62, 67, 68]. Jedoch konnte in einigen Studien gezeigt werden, dass sich das häufigere Auftreten von Komplikationen bei Frakturen in diesem Bereich nicht allein durch die spezifische Durchblutungssituation begründen lässt. Dawson et al. [66] konnten keinen Zusammenhang zwischen einer verminderten Perfusion des proximalen Pols und einer schlechteren Heilungsrate nachweisen. Es ist daher wahrscheinlich, dass der proximale Pol eine ausreichend gute Kollateralisierung besitzt. Es wird folglich angenommen, dass auch andere Faktoren wie ein vertikaler Frakturverlauf und eine Dislokation von Fragmenten die Prognose wesentlich bestimmen [63, 66].

1.3.4 Anatomische Landmarken: die Tabatière

Zu Tasten ist das Skaphoid im Bereich der anatomischen Tabatière (auch: Fovea radialis, anatomical snuff box). Diese befindet sich auf der radialen Seite des Handgelenks. Sie hat eine dreieckige Form und wird durch die Sehnen der Daumenmuskulatur begrenzt [41, 69]:

- Radiale (anterolaterale) Längsseite: Musculus abductor pollicis und Musculus extensor pollicis brevis
- Ulnare (posteriomediale) Längsseite: Musculus extensor pollicis longus
- Proximale Begrenzung: Retinaculum extensorum

Den Boden der Tabatière bilden (von proximal nach distal):

- Processus styloideus radii
- Skaphoid (Taillelregion)
- Os trapezium
- Basis des 1. Metakarpalknochens

Am deutlichsten tritt die Tabatière bei Abduktion und Extension des Daumens hervor [70]. Der Name Tabatière (frz.= Schnupftabakdose), rührt daher, dass

Schnupftabak vor dem Schnupfen für gewöhnlich in dieser Vertiefung platziert wird. Das Skaphoid kann am besten getastet werden, indem der Untersucher mit seiner Fingerspitze Druck in der Tabatière ausübt und dabei die Hand des Patienten in Ulnarabduktion führt [69] (siehe Abb. 5).



Abb. 5: Anatomische Landmarken: die Tabatière

(A) Röntgenbild des Handgelenks in Ulnarabduktion. (B) klinische Untersuchung des Handgelenks. Anatomische Landmarken: (3) Processus styloideus radii, (4) Skaphoidtaille, (5) Os trapezium, (6) Basis des 1. Metakarpalknochens (aus R. S. Reddy et al., 2005, S. 176 [69])

1.4 Ossifikation

Das Handgelenk des Menschen beginnt in utero als eine einzige knorpelige Struktur. In der 10. SSW gliedert sie sich schließlich in acht eigene Entitäten [2]. Nach der Geburt ist die gesamte Handwurzel zunächst noch komplett knorpelig angelegt [12]. Die Entwicklung der Knochen der Handwurzel erfolgt durch enchondrale Ossifikation [19]. Die meisten Knochen des menschlichen Körpers ossifizieren chondral. Im Gegensatz zu Röhrenknochen weisen Handwurzelknochen, keine Wachstumsfugen auf. Es entstehen sog. Ossifikationskerne für die einzelnen Knochen der Handwurzel, von denen aus die Ossifikation zentrifugal fortschreitet [71, 72]. Die Verknöcherung erfolgt dabei nach einem vorhersagbaren Muster mit leichten individuellen sowie geschlechtsspezifischen Abweichungen [12].

Die Ossifikation des Skaphoids beginnt, im Vergleich zu den anderen Handwurzelknochen, erst sehr spät [28]. Der Ossifikationskern tritt bei Mädchen durchschnittlich in einem Alter von 4 Jahren 5 Monaten und bei Jungen in einem Alter von 5 Jahren 8 Monaten in Erscheinung. Die Verknöcherung verläuft von distal nach proximal. Abgeschlossen ist sie im Durchschnitt in einem Alter von 13 Jahren 3 Monaten bei Mädchen und 15 Jahren 3 Monaten bei Jungen [5, 73]. Zu diesem Zeitpunkt der Skelettreife ist das Kahnbein dann vollständig verknöchert und nur noch der Gelenkknorpel bleibt erhalten [22].

Aufgrund der Ossifikation von distal nach proximal erscheint der Gelenkspalt zwischen dem noch nicht ausgereiften Skaphoid und dem Os lunatum oft weit. (Pseudo-Terry-Thomas Zeichen). So beträgt der Abstand zwischen den beiden Knochen 9 mm in einem Alter von 7 Jahren, um dann nach Abschluss der Ossifikation ca. 3 mm zu erreichen [12, 74]. Dies kann auf Röntgenaufnahmen als skapholunäre Bandruptur fehlinterpretiert werden [2, 22, 28]. Auch das vorübergehende Auftreten von multiplen Ossifikationszentren kann bei der Betrachtung von Röntgenbildern zu Fehldiagnosen beitragen [2].

Die langsame Verknöcherung ist auch für die geringe Inzidenz von Skaphoidfrakturen im Wachstumsalter mitverantwortlich [20]. Die dicke Schicht an peripherem Knorpel schützt den Ossifikationskern, was erhebliche Kräfte erforderlich macht, um eine Verletzung zu verursachen [22, 75]. Daher sind Skaphoidfrakturen vor dem 8. Lebensjahr ausgesprochen selten [5, 16]. Die spezifische Ossifikationssequenz wird häufig mit der besonderen Lokalisation von Frakturen des Kahnbeins bei Kindern in Zusammenhang gebracht [12]. Bei Kindern jünger als 15 Jahre, sind Frakturen des distalen Pols am häufigsten wohingegen bei Erwachsenen Frakturen im Tailenbereich prädominieren [1, 5, 9, 13, 50]. Mit dem Fortschreiten der Ossifikation passt sich das Frakturmuster immer mehr dem der Erwachsenen an [12].

1.5 Pathomechanismus

Der häufigste Verletzungsmechanismus ist ein Sturz auf die ausgestreckte, dorsalextendierte und pronierte Hand [22, 76-79]. Durch die maximale Dorsalextension kommt es zu einer Kompression der Handwurzel [8]. Frakturen

werden oftmals schon durch Niedrig-Energie-Traumata verursacht, wie ein Sturz aus Körperhöhe auf die extendierte Hand [5, 44, 67]. Eine häufige Unfallursache, gerade bei Jugendlichen, ist ein Sturz bei Sport- und Freizeitaktivitäten [80]. Als Sportarten mit besonders hohem Frakturrisiko konnten im Rahmen verschiedener Studien, Fahrradfahren, Rollerskaten, Fußball, Football, Basketball, Snow- und Skateboarden ausgemacht werden [1, 10, 17, 81, 82].

Auch ein direktes Trauma, wie ein Schlag eines harten Gegenstandes gegen die Hand, kann gelegentlich eine Fraktur bedingen [2, 8, 50]. So wurde zum Beispiel der Anprall eines Balles mit hoher Geschwindigkeit gegen das Handgelenk in maximaler Extension als typische Unfallursache bei Fußballtorwarten beschrieben [83, 84].

Des Weiteren kann eine Skaphoidfraktur durch das Schlagen mit geballter Faust verursacht werden. Mit einer Handgelenksstellung in Neutralposition oder leichter Flexion, wird die Kraft des Anpralls über den zweiten Metakarpalknochen und das Os trapezium sowie das Os trapezoideum auf das Kahnbein übertragen [17, 80, 85].

Skaphoidfrakturen, die durch ein Hochrasanztrauma verursacht wurden (z.B. Sturz aus großer Höhe, Unfälle beim Fahrrad- oder Motorradfahren), sind häufiger mit zusätzlichen Frakturen weiterer Karpalknochen assoziiert [57].

1.6 Klassifikation

Es existieren zwei Klassifikationssysteme für Skaphoidfrakturen bei Kindern und Jugendlichen. Die gängigste Einteilungen unterscheidet, nach Lokalisation der Fraktur, drei verschiedene Subtypen (siehe Abb. 6) [2, 80]:

- Frakturen des distalen Drittels des Skaphoids (Typ A)
- Frakturen des mittleren Drittels des Skaphoids (Typ B)
- Frakturen des proximalen Drittels des Skaphoids (Typ C)

Alternativ dazu, können die Frakturen auch nach dem Klassifizierungssystem von D'Arienzo [20] eingeteilt werden (siehe Abb. 7), welches auf dem Alter des Kindes, röntgenologischen Merkmalen und dem Grad der Verknöcherung basiert [22, 50].

- Typ 1 tritt bei Kindern im Alter von bis zu 8 Jahren auf und ist eine rein chondrale Fraktur. Diese ist sehr selten und die Diagnose ist erschwert, da sich eine Läsion des Knorpels nur durch den Einsatz von erweiterten bildgebenden Verfahren wie der MRT nachweisen lässt.
- Typ 2 Verletzungen sind osteochondrale Frakturen und es sind Kinder zwischen 8 und 11 Jahren betroffen.
- Typ 3 Frakturen treten bei Kindern über 12 Jahren auf, wenn die Ossifikation des Kahnbeins fast vollständig abgeschlossen ist. Sie stellen die häufigste Form der Skaphoidfrakturen bei Kindern und Jugendlichen dar und gleichen jenen bei Erwachsenen.

Eine Aussage über die genaue Lokalisation der Fraktur innerhalb des Knochens, erfolgt durch diese Klassifikation nicht.

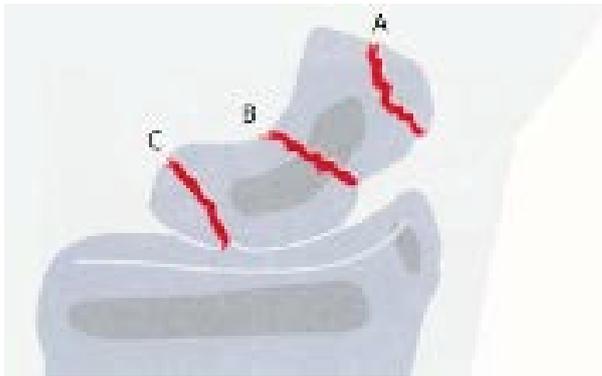


Abb. 6: Klassifikation der Skaphoidfrakturen beim Kind
 (A) distales Drittel, (B) mittleres Drittel, (C) proximales Drittel
 (aus H. Towfigh et al., 2014, S. 199 [2])

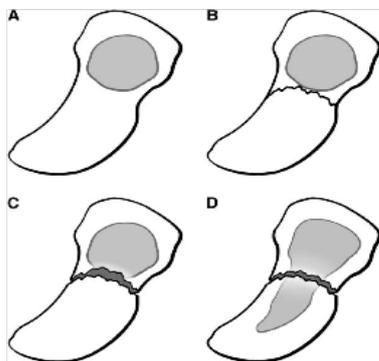


Abb. 7: Alternative Klassifikation der Skaphoidfrakturen beim Kind
 (A) normales Skaphoid, (B) Typ 1: rein chondrale Fraktur,
 (C) Typ 2: osteochondrale Fraktur, (D) Typ 3: Fraktur wie bei Erwachsenen nach Abschluss
 der Ossifikation (aus H. Towfigh et al., 2014, S. 199 [2])

1.7 Epidemiologie und Frakturlokalisation

Die Skaphoidfraktur ist am häufigsten in einem Alter zwischen 15 – 30 Lebensjahren [12, 75, 79, 86]. Typischerweise sind überwiegend junge, beruflich und sportlich aktive Männer betroffen [43, 67, 87]. Skaphoidfrakturen machen im Kindes- und Jugendalter etwa 0,45% aller Frakturen der oberen Extremität und 3% aller Frakturen der Hand und des Handgelenks aus [11, 13]. Vor Beginn des 16. Lebensjahres liegt die höchste Inzidenz zwischen 10 – 15 Jahren [2, 13, 22, 88]. Skaphoidfrakturen bei Kindern unter 8 Jahren kommen vor, sind jedoch sehr selten [5, 50, 80, 88]. Der jüngste Patient mit einer Fraktur des Kahnbeins von dem in der Literatur berichtet wurde, ist ein 4-jähriges Kind [89]. Da das Skaphoid vor einem Alter von 5 Jahren auf Röntgenaufnahmen nicht sichtbar ist, wurde auf diese Fraktur allerdings erst durch den röntgenologischen Nachweis einer Pseudarthrose im Alter von 11 Jahren zurückgeschlossen. Eine der frühesten röntgenologisch bestätigten Skaphoidfrakturen, trat bei einem 5 Jahre und 9 Monate alten Jungen nach einem direkten Trauma auf [16]. Mit zunehmender Ossifikation nimmt die Frakturwahrscheinlichkeit mit jedem Lebensjahr zu, um zwischen 15 und 25 Jahren ihre höchste Inzidenz zu erreichen [50, 80].

Das distale Drittel des Skaphoids ist bei Kindern vor dem Abschluss der Skelettreife am häufigsten von Frakturen betroffen. Die Häufigkeit wird in der älteren Literatur mit zwischen 59 - 87% angegeben [1, 5, 11]. Gefolgt werden sie von Frakturen des mittleren Drittels, während das proximale Drittel nur sehr selten betroffen ist. Dies steht im Gegensatz zu Skaphoidfrakturen bei Erwachsenen, welche mit etwa 60 - 70% zumeist im mittleren Drittel lokalisiert sind [44, 79, 80, 90].

Frakturen des distalen Pols sind häufiger inkomplett und nicht disloziert und führen in der Regel nicht zu Komplikationen [10]. In einigen neueren Publikationen wurde jedoch berichtet, dass sich das Frakturmuster bei Kindern und Jugendlichen verändert hat, indem es immer mehr dem bei Erwachsenen beobachteten Muster ähnelt [78, 81]. Dies wurde auf Veränderungen der Sportaktivitäten, einen steigenden Body-Mass-Index und eine erhöhte diagnostische Sensitivität zurückgeführt [15, 81, 91]. Da Frakturen der Mitte des Skaphoids sowie dislozierte Frakturen häufiger mit Komplikationen wie einer

verzögerten Heilung oder Pseudarthrosenbildung assoziiert sind, hätte dies therapeutische Konsequenzen [10, 81].

1.8 Diagnose

1.8.1 Körperliche Untersuchung

Patienten mit Skaphoidfrakturen weisen oft keine äußeren Verletzungszeichen auf und auch die Symptome bei der klinischen Untersuchung können zum Teil nur sehr diskret sein [2, 50]. Bei entsprechender Unfallanamnese sowie Schmerzen, Schonhaltung und/oder Schwellung im Bereich des Handgelenks muss jedoch auch an eine Fraktur des Skaphoids gedacht werden [12].

In einer Studie zu Frakturen im Kindesalter konnte gezeigt werden, dass eine genaue Lokalisation der Druckdolenz in der körperlichen Untersuchung, der beste klinische Indikator für das Vorhandensein einer Fraktur ist [92]. Bei Kindern gestaltet sich die klinische Erstuntersuchung jedoch oft schwieriger als bei Erwachsenen. Aufgrund der kleineren anatomischen Größenverhältnisse ist ein isolierter Druckschmerz über dem betroffenen Handwurzelknochen oft nur schwer auszumachen [4, 12]. Hinzu kommt die schlechtere Compliance im Kindes- und Jugendalter [8] und die Tatsache, dass es gerade jüngeren Kindern häufig schwer fällt, zwischen Schmerzen im Bereich der Handwurzel und des distalen Unterarms zu unterscheiden [12, 15, 93]. Des Weiteren kann der Abstand zwischen den einzelnen ossifizierenden Knochen in Abhängigkeit vom Alter variieren, was eine korrekte Frakturlokalisierung weiter erschwert [12].

Folgende klinische Zeichen begründen den Verdacht auf eine Skaphoidfraktur [2, 12, 14, 80, 94-96] (siehe Abb. 8):

- Druckschmerz in der Tabatière
- Druckschmerz über dem volaren distalen Skaphoidpol
- Stauchungsschmerz bei axialer Belastung des Daumens
- Schwellung über dem radialseitigen Handgelenk
- Schmerz bei Radialabduktion im Handgelenk
- Schmerz bei Extension und Flexion im Handgelenk

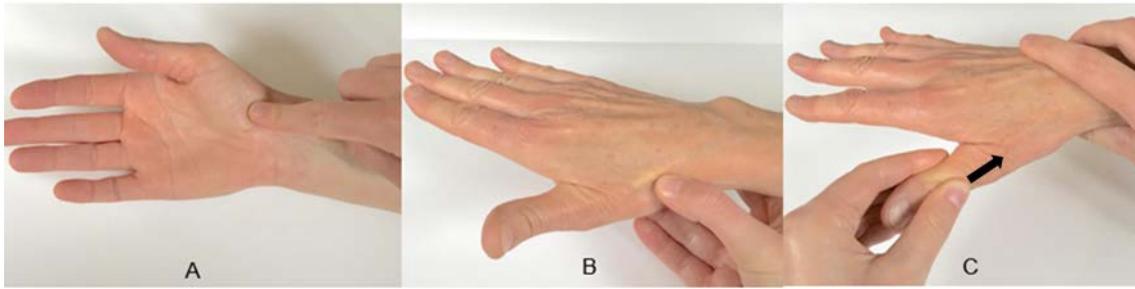


Abb. 8: Klinische Untersuchung

(A) Druckschmerz volar über dem Skaphoid, (B) Druckschmerz in der Tabatière
 (C) Daumenstauchungsschmerz

Diese Zeichen weisen zwar eine hohe Sensitivität auf, sind jedoch wenig spezifisch [96]. So geht eine Skaphoidfraktur fast immer mit Druckschmerzen in der Tabatière einher, ist dadurch jedoch nicht diagnostisch bewiesen. Denn auch eine Fraktur des Processus styloideus des Radius, des ersten oder zweiten Mittelhandknochens oder eine Prellung des Handgelenks können Schmerzen in der Tabatière hervorrufen [97, 98].

In einer prospektiven Studie bestimmten Duckworth et al. [94] unter anderem die Sensitivität und Spezifität folgender klinischer Zeichen zur Vorhersage einer Skaphoidfraktur:

	<u>Sensitivität</u>	<u>Spezifität</u>
Druckschmerz in der Tabatière	100%	4%
Daumenstauchungsschmerz	73%	33%
Druckschmerz volar über dem Skaphoid	86%	39%

Weiters wurde in Ihrer Studie die höchste Sensitivität und Spezifität bei Druckschmerz in der Tabatière bei gleichzeitiger Ulnaradduktion der Hand 72 Stunden nach Verletzung nachgewiesen. Doch auch hier betrug die Spezifität lediglich 45% [94]. In einer Metaanalyse mit Einschluss von 13 Studien lag die Sensitivität von Druckschmerz in der Tabatière zwischen 87-100% und die Spezifität zwischen 3-98% [96]. Die Sensitivität und Spezifität von Daumenstauchungsschmerz wurden mit 48-100% bzw. 22-97% und von Druckschmerz volar über dem Skaphoid mit 82-100% bzw. 17-57% berechnet. Einigen Studien zufolge kann die Spezifität durch eine Kombination der einzelnen klinischen Zeichen erhöht werden [14, 94, 99].

Um eine Fraktur des Skaphoids sicher nachzuweisen, werden jedoch als nächster diagnostischer Schritt bildgebende Verfahren benötigt [4].

1.8.2 Röntgen

Bei Verdacht auf eine Fraktur im Bereich des Handgelenks ist die initiale Durchführung von konventionellen Röntgenaufnahmen Standard [76]. Dabei sollten Röntgenbilder des Handgelenks in 2 Ebenen (posterior-anterior und lateral) angefertigt werden. Bei klinischen und anamnestischen Hinweisen auf eine Skaphoidfraktur werden diese immer durch eine Kahnbeinzielaufnahme ergänzt [43]. Bei dieser sogenannten „Stecher-Projektion“ wird das Handgelenk in maximaler Ulnaradduktion und mit geschlossener Faust im posterior-anterioren (p.a.) Strahlengang aufgenommen [57]. Diese Aufnahme ist auch Teil des klassischen „Kahnbeinquartetts“. Dabei wurden noch zusätzlich auf die Handwurzel zentrierte Aufnahmen im p.a. und seitlichen Strahlengang sowie eine Aufnahme der semipronierten Hand angefertigt [80, 100]. Diese weiteren Kahnbeinzielaufnahmen haben jedoch aufgrund der höheren Sensitivität der Schnittbilddiagnostik an Bedeutung verloren [43]. Eine Aufnahme des Handgelenks in Ulnaradduktion ist diagnostisch jedoch sehr hilfreich, da es in dieser Position zu einer Aufrichtung und nahezu filmparallelen Lage des Skaphoids kommt, sodass es in seiner vollen Länge und überlagerungsfrei dargestellt werden kann [43, 57, 101] (siehe Abb. 9).



Abb. 9: Kahnbeinzielaufnahme eines 16-jährigen Patienten mit Fraktur des Skaphoids im mittleren Drittel

Bei Kindern sowie bei Erwachsenen ist die Diagnose einer Skaphoidfraktur im Röntgenbild häufig schwierig zu stellen. Frakturen können oft nicht mit genügender Sicherheit nachgewiesen werden, und werden dadurch leicht übersehen [4, 102].

Bei Kindern kann eine fehlende Verknöcherung des Kahnbeins die Diagnostik noch weiter erschweren [12]. Hinzu kommt, dass die Frakturen im Kindesalter

häufiger unvollständig und nicht disloziert sind, wodurch sie auf Röntgenbildern oft nicht zur Darstellung kommen [76]. All dies trägt dazu bei, dass die Sensitivität der initialen Röntgenuntersuchung eher gering ist (54% in einer Studie von Jørgsholm et al. [15]).

Eine Röntgenuntersuchung bei Aufnahme eines Patienten mit posttraumatischen Schmerzen im Handgelenk, dient daher oftmals auch dem Ausschluss bzw. Nachweis der viel häufiger auftretenden Frakturen des distalen Radius oder der Mittelhandknochen [4].

1.8.3 Magnetresonanztomographie

Bei negativem Röntgenbefund und persistierenden Symptomen sollte zur Sicherung der Diagnose eine zusätzliche Bildgebung erfolgen. Die Magnetresonanztomographie (MRT) wird heutzutage vielfach als die Methode der Wahl betrachtet [50, 80, 102]. Die empfohlenen MRT-Sequenzen umfassen koronare flüssigkeitssensitive STIR-Sequenzen (**S**hort **T**au **I**nversion **R**ecovery) oder andere spezielle fettsupprimierte Sequenzen (SPIR/SPAIR) sowie T1-gewichtete Aufnahmen in koronarer Schichtung. In den STIR-Sequenzen erscheint Flüssigkeit im traumatisierten Bereich als Ausdruck eines Knochenmarködems signalintensiv (hell). Die Frakturlinie zeichnet sich in den T1-Sequenzen als dunkle Linie mit niedrigem Signal ab. [43, 57, 103]

Wie bei Erwachsenen, so wird auch bei Kindern die MRT zumeist als die Methode mit der höchsten Sensitivität zum Nachweis von Frakturen des Skaphoids angesehen [15, 102, 104]. Die MRT ermöglicht somit das zügigere Stellen einer definitiven Diagnose bei röntgenokkulten Skaphoidfrakturen (siehe Abb. 10). Außerdem wird die Detektion weiterer, auch ligamentärer, Verletzungen im Bereich des Handgelenks ermöglicht [105]. Von einem negativ prädiktiven Wert von 100% wird berichtet [106]. Ein negativer MRT Befund schließt somit eine Skaphoidfraktur mit hoher Sicherheit aus, wodurch diese Patienten früher aus der Behandlung entlassen werden können.

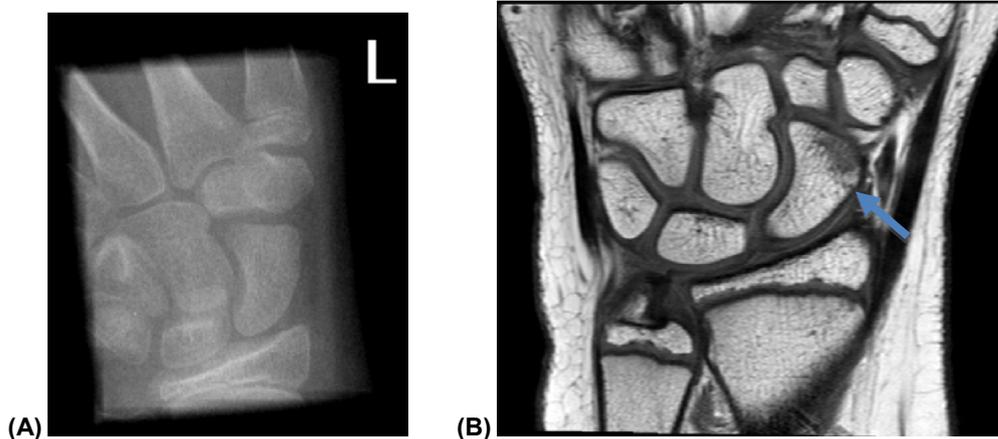


Abb. 10: (A) Röntgen- und (B) MRT-Aufnahme eines 11-jährigen Patienten mit Skaphoidfraktur

(A) Kahnbeinzielaufnahme (links): kein Hinweis auf Skaphoidfraktur

(B) MRT der Hand in T1-gewichteter Sequenz (links): quer verlaufende Frakturlinie im mittleren Drittel des Skaphoids (Pfeil), distal hypointenses flächiges Signal vereinbar mit einem Knochenödem

Auch die Spezifität der MRT wird als sehr hoch angesehen und in einer Metaanalyse mit bis zu 100% angegeben [102]. Jedoch berichten andere Studien auch von einer niedrigeren Spezifität [4, 57]. Der Grund hierfür ist, dass keine Einigkeit darüber besteht, ob ein posttraumatisches Knochenmarksödem (sog. „bone bruise“) ohne erkennbare Frakturlinie im Skaphoid ebenfalls als Fraktur zu werten ist [102, 107]. Dieses entspricht einer intraossären Ödem- oder Hämatombildung und tritt auch bei Knochenkontusion und trabekulärer Mikrofrakturierung auf [43]. Wenn zwischen Fraktur und „bone bruise“ unterschieden wird, muss nicht jeder positive MRT Befund einer Fraktur entsprechen [108]. Häufig werden diese jedoch auch gleichgesetzt [109].

Die MRT verwendet, im Vergleich zu Röntgen und Computertomographie keine Röntgenstrahlen. Daher werden die Patienten im Kindes- und Jugendalter keiner potenziell schädlichen ionisierenden Strahlung ausgesetzt [110].

Doch die MRT weist auch Limitationen auf. Bei Kindern wurde während des Wachstums im Bereich des Handgelenks ein hohes Signal auf den flüssigkeitssensitiven Sequenzen der MRT festgestellt. Dieses wurde am häufigsten im Knochenmark von distalem Radius und Ulna nachgewiesen, gefolgt von der proximalen und distalen Handwurzelreihe und der Basis der Metakarpalknochen. Das Signal tritt am häufigsten zwischen 7 – 11 Jahren auf und könnte als pathologisches Knochenmarksödem fehlinterpretiert werden [111]. Weitere Einschränkungen der MRT sind die vielerorts begrenzte

Verfügbarkeit, die höheren Kosten und das relativ zeitaufwendige Verfahren, bei dem die Bildqualität aufgrund von Bewegungsartefakten beeinträchtigt werden kann [109, 112].

1.8.4 Weitere Bildgebende Verfahren

Computertomographie (CT), Ultraschall und Knochenszintigraphie haben sich bei der Detektion von Skaphoidfrakturen ebenfalls als wirksam erwiesen [22].

Auch die CT besitzt eine hohe Sensitivität und Spezifität, vergleichbar mit der MRT [15, 109]. Aufgrund der hohen Ortsauflösung vermag die CT eine exaktere Darstellung der Frakturmorphologie und erlaubt eine dreidimensionale Rekonstruktion. Daher wird sie bei komplexeren Frakturen zur weiteren Therapieplanung eingesetzt [57, 80]. Außerdem ist die CT in den meisten Einrichtungen rund um die Uhr verfügbar, relativ kostengünstig und rasch durchführbar [103, 110]. Nachteile sind jedoch, dass Weichteilläsionen, wie ligamentäre Begleitverletzungen, im Gegensatz zur MRT nicht gut zur Darstellung kommen [43, 80] und Röntgenstrahlung verwendet wird (Strahlendosis 0,03mSv) [113].

Die Knochenszintigraphie war bei Erwachsenen mit Verdacht auf Kahnbeinfraktur aber negativem Röntgenbefund lange Zeit eine Untersuchung der ersten Wahl [114]. Sie ist ebenfalls sehr sensitiv im Nachweis von okkulten Skaphoidfrakturen. In einer 1993 erschienenen Publikation von Tiel-van Buul et al. [115] wird die Sensitivität der Knochenszintigraphie mit 100% und die Spezifität mit 98% angegeben. Zudem wird eine höhere Interobserver-Reliabilität im Vergleich zu weiteren Röntgenaufnahmen im Verlauf beschrieben. Die Autoren empfehlen daher die Durchführung der Szintigraphie, wenn bei Patienten mit negativem, initialen Röntgenbefund der klinische Verdacht auf eine Skaphoidfraktur besteht. Es handelt sich jedoch um ein invasives Verfahren mit Injektion von radioaktiv markierten Stoffen, welche sich in Gebieten mit vermehrtem Knochenstoffwechsel anreichern [112]. Heutzutage wurde sie fast vollständig durch die MRT-Untersuchung ersetzt [22]. Die notwendige Strahlendosis ist um einiges höher als bei der CT (~4 mSv) [103]. Ebenso ist

die Ortsauflösung bei Kindern nicht ausreichend. Deshalb findet die Knochenszintigraphie bei Patienten im Wachstumsalter keine Anwendung [50]. Ultraschall wird gelegentlich in der Diagnostik von Skaphoidfrakturen angewandt, ist aber stark untersucherabhängig und zeitaufwändig [50, 103]. Bei einer Analyse der verfügbaren Literatur zu erwachsenen Patienten fanden Jenkins et al. [116] eine Sensitivität zwischen 50 und 100% und eine Spezifität zwischen 91 und 98%.

1.9 Therapie

1.9.1 Hintergrund

Noch im 19. Jahrhundert wurde an der Möglichkeit einer Kahnbeinfraktur gezweifelt. Erst im Zuge der Entwicklung des Röntgens 1895 konnte mit Sicherheit gezeigt werden, dass ein Bruch des Handwurzelknochens tatsächlich möglich ist [117]. Destot, ein französischer Radiologe und Anatom, war der erste, der 1896 eine Skaphoidfraktur im Röntgenbild beschrieb [118]. Doch selbst bei Nachweis der Fraktur bestand die Therapie anfänglich höchstens in einer kurzen Ruhigstellung mit anschließender Massage. Bei den häufig auftretenden Pseudarthrosen galt noch Anfang des 20. Jahrhunderts die vollständige Exstirpation des Kahnbeins als Methode der Wahl, was zu schlechten funktionellen Ergebnissen führte [117, 118].

Wesentliches Therapieziel bei der Behandlung von Skaphoidfrakturen ist die vollständige Wiederherstellung der Stabilität sowie der Funktion des Handgelenks bei gleichzeitiger Vermeidung von Komplikationen wie der Entwicklung einer Pseudarthrose. Dafür stehen bei Kindern und Jugendlichen heute sowohl konservative als auch operative Therapiemaßnahmen zur Verfügung. [12]

1.9.2 Konservative Therapie

Die meisten Frakturen des Kahnbeins im Kindes- und Jugendalter können konservativ behandelt werden [1, 76, 80, 81]. Dabei wird das Handgelenk mithilfe eines Gips- oder Kunststoffverbandes ruhiggestellt. Dies erfolgt in einem Unterarmgips mit Einschluss des Daumengrundgelenks, oft als Kahnbeingips (auch Skaphoid- oder Navicularegips) bezeichnet. Der Gips

schließt das Daumengrundgelenk in Abduktion ein und lässt das Interphalangealgelenk des Daumens sowie die Grundgelenke der Langfinger frei [43, 57, 80]. Bei frischen Verletzungen ist mit einer zunehmenden Weichteilschwellung zu rechnen, weshalb bei einem geschlossenen Gips die Gefahr einer Druckerhöhung mit Durchblutungsstörung des Gewebes besteht. Daher wird der Gips anfangs als dorsoradiale Schiene angebracht, welche sekundär zirkuliert wird. Anstatt des klassischen Weißgipses werden gegenwärtig vermehrt leichtere Kunststoffmaterialien eingesetzt [2].

Noch bis vor einigen Jahren erfolgte die initiale Ruhigstellung oftmals für einige Wochen in einem Oberarmgips, mit anschließender Umstellung auf einen Unterarmgips [5, 50, 95, 119]. Heutzutage wird dagegen in den meisten Fällen die Verwendung eines Unterarmgipses als ausreichend betrachtet und empfohlen [8, 12, 43, 57].

Das therapeutische Vorgehen ist in der Literatur nicht immer einheitlich. Zumeist ist die Primärbehandlung vom klinischen Bild abhängig, da sich eine Skaphoidfraktur mithilfe der konventionellen radiologischen Diagnostik nicht immer sicher feststellen lässt [2, 4, 15]. Eine Ruhigstellung im Gips sollte daher bei allen Patienten mit entsprechender Anamnese und klinischem Untersuchungsbefund begonnen werden, selbst bei initial negativem Röntgenbefund [2, 50]. Nach ungefähr 7-14 Tagen erfolgt eine klinische Reevaluation. Bei persistierenden Beschwerden sollte die Diagnose durch eine erneute röntgenologische Bildgebung oder eine MRT Untersuchung gesichert werden [12, 14, 22]. Bei einem positiven Befund wird die Immobilisation fortgesetzt. In der Regel beträgt die notwendige Ruhigstellung im Gips sechs Wochen [2]. Einige Autoren empfehlen vor dem Abschluss der Behandlung eine erneute Röntgenkontrolle, um die knöcherne Konsolidierung der Fraktur zu bestätigen. In fragwürdigen Fällen kann auch eine MRT oder CT durchgeführt werden [50, 57, 80]. Bei Schmerzpersistenz und fehlender Knochendurchbauung in der Bildgebung, muss die Ruhigstellung ggf. verlängert werden [2].

Es konnten einige Faktoren identifiziert werden, welche die benötigte Zeit bis zur Ausheilung der Fraktur beeinflussen:

- **Frakturlokalisierung**

Frakturen des distalen Pols des Skaphoids bedürfen einer kürzeren Ruhigstellung als Frakturen des mittleren oder proximalen Pols [20, 22, 50].

Unterschiedlich lange Zeiten der Ruhigstellung im Gips basierend auf der Frakturlokalisierung wurden in mehreren Studien berichtet:

Studie	Anzahl und Lokalisation	mittlere Ruhigstellung (Wochen)
Gholson et al. [81]	81 distal	6
	248 Mitte	9
	22 proximal	15
Ahmed et al. [9]	45 distal	4
	10 Mitte	4,9
Christodoulou und Colton [11]	21 distal, Tuberkel	3,2
	24 Mitte	5,6

Tab. 1: Dauer der Ruhigstellung in Abhängigkeit von der Frakturlokalisierung

- **Dislokation**

Dislozierte Frakturen haben bei rein konservativer Therapie eine geringere Heilungsrate [112]. Die notwendige Ruhigstellung im Gips verlängert sich deutlich. So berichteten Gholson et al. [81] in ihrer Studie zu Skaphoidfrakturen bei Patienten zwischen 7 – 18 Jahren, dass die Zeit bis zur Ausheilung bei dislozierten Frakturen um 12 Wochen länger war als bei undislozierten Frakturen.

- **Zeitdauer bis zur Erstbehandlung**

Wird die Fraktur erst verspätet erkannt, erhöht sich das Risiko einer verzögerten oder ausbleibenden Heilung [77, 78]. Bei konservativer Therapie ist dann eine prolongierte Immobilisation erforderlich [1, 12, 120]. Gholson et al. [81] konnten einen signifikanten Unterschied zwischen akuten und chronischen Frakturen nachweisen. Als chronisch galten Frakturen, wenn die Zeit zwischen Verletzung und Erstbehandlung > 6 Wochen betrug. Die Wahrscheinlichkeit, eine Skaphoidfraktur durch Ruhigstellung im Gips zur Ausheilung zu bringen, war bei chronischen

Frakturen 29,7 mal geringer als bei akuten Frakturen. Bei 77 Patienten mit chronischen Frakturen war die konservative Therapie nur bei 18 erfolgreich. Die notwendige Ruhigstellung im Gips war dabei um 9 Wochen länger als bei akuten Frakturen.

Zusammenfassend bedeutet dies, dass > 90% aller akuten und undislozierten Skaphoidfrakturen erfolgreich konservativ behandelt werden können [2, 78-81]. Die Heilungsrate ist verringert bei dislozierten und/oder chronischen Frakturen der Taille oder des proximalen Pols des Skaphoids. [81] Deshalb wird bei Vorliegen von bestimmten Indikationen in weiterer Folge eine operative Therapie durchgeführt.

1.9.3 Operative Therapie

Bei Erwachsenen kann in den letzten Jahren ein wachsender Trend hin zur frühzeitigen operativen Behandlung von Skaphoidfrakturen verzeichnet werden [121, 122]. Dadurch soll zum einen die Inzidenz von Pseudarthrosen gesenkt und zum anderen die Heilungszeit verkürzt und eine frühere Rückkehr der Patienten zur Arbeit sowie zu Sport- und Freizeitaktivitäten ermöglicht werden [67, 123]. Demgegenüber stehen potentielle intra- und postoperative Komplikationen [124] und die bei Kindern beschriebenen exzellenten Heilungsraten nach konservativer Therapie [50, 80].

Eine chirurgische Therapie wird daher bei Kindern und Jugendlichen meist nur bei folgenden Indikationen durchgeführt [2, 12, 50, 80, 81]:

- Akute dislozierte und instabile Frakturen: Als disloziert gelten alle Frakturen mit Spaltbildungen von > 1 - 2 mm und Abkippungen von > 10°. Die Bestimmung des Dislokationsgrades ist auf Röntgenaufnahmen häufig schwierig, weshalb Bildgebung durch MRT oder CT notwendig werden kann, um festzustellen, ob eine Indikation zur Operation vorliegt [125-127].
- Pseudarthrosen des Skaphoids

In neueren Publikationen wird außerdem vermehrt von der operativen Therapie von Skaphoidfrakturen bei Kindern und Jugendlichen berichtet, sowohl bei akuten dislozierten Frakturen als auch bei Pseudarthrosen [17, 81, 128-130].

Die operative Therapie bei Kindern und Jugendlichen gleicht sich immer mehr jener bei Erwachsenen an und wird selbst bei akuten Skaphoidfrakturen zunehmend angewandt. Die genauen Indikationen sind jedoch nicht einheitlich festgelegt [131]. Die Vor- und Nachteile einer chirurgischen Therapie sind gründlich abzuwiegen und mit den Patienten und deren Eltern zu besprechen.

Die operative Therapie lehnt sich an diejenige der Erwachsenen an, da instabile Frakturen fast ausschließlich ab der Pubertät vorkommen [2, 80].

1.9.4 Operationstechnik akuter Skaphoidfrakturen

Die geringe Größe, gekrümmte Form und die zu einem großen Teil mit Knorpel überzogene Oberfläche des Skaphoids, bereiteten Chirurgen lange Zeit große Schwierigkeiten hinsichtlich der korrekten Platzierung der Schraubenosteosynthese [57, 112]. Ein wesentlicher Fortschritt konnte durch die von Herbert und Fischer 1984 vorgestellte kopflose Doppelgewindeschraube (Herbert-Schraube) erzielt werden [132]. Diese wird vollständig in Längsrichtung im Knochen platziert. Durch zwei unterschiedlich steil verlaufende Gewinde an den Enden der Schraube erfolgt eine interfragmentäre Kompression. Zahlreiche Modifikationen der klassischen Herbert-Schraube in verschiedenen Größen befinden sich heute auf dem Markt [43] (siehe Abb. 11 sowie Abb. 12). Eine Metallentfernung ist meist nicht erforderlich [8]. Relativ neu sind resorbierbare Osteosynthesematerialien zur Behandlung der Skaphoidfraktur (Markteinführung der resorbierbaren Herbert-Schraube 2013) [133]. Ein Vorteil ist, dass eine Metallentfernung und ein damit verbundener zweiter Eingriff nicht notwendig sind [133-136]. Außerdem ist das Risiko von Knorpelschäden durch einen potentiellen Schraubenüberstand reduziert. Weiters verursachen resorbierbare Implantate, im Gegensatz zu Stahlimplantaten weniger Artefaktbildungen in postoperativen MRT-Untersuchungen [134]. Ein Nachteil sind die höheren Kosten [135]. Berichtet wurde außerdem vom Auftreten von zystischen Osteolysezonen im Skaphoid drei Monate nach der Implantation von resorbierbaren Metallschrauben auf Magnesiumbasis, weshalb noch weitere Langzeitstudien zum Einsatz dieser Osteosynthesematerialien erforderlich sind [134].



Abb. 11: Verschiedene Formen der Herbert-Schraube

Von links nach rechts: Original, kanüliert mit Führungsdraht, Mini-Herbert-Schraube
(aus Krimmer et al., 2000, S. 816 [137])



Abb. 12: Röntgenaufnahme eines 17-jährigen Patienten mit Skaphoidfraktur und Versorgung mittels Herbert-Schraube

Handgelenk in 2 Ebenen (links): Zustand nach Osteosynthese bei Luxationsfraktur der Handwurzel. Versorgung des Os scaphoideum und Os capitatum mit Herbert-Schrauben, Versorgung der Gelenksprengung zwischen Os lunatum und Os triquetrum mit zwei Pins, keine Versorgung der distalen Radiusfraktur

Die Operation kann in Plexusanästhesie oder in Vollnarkose durchgeführt werden [43, 67]. Die Auswahl des Zugangsweges und die OP-Technik richten sich nach der Frakturlokalisation, dem Ausmaß der Dislokation, evtl. vorhandenen Begleitverletzungen und den Vorlieben des Operateurs. Zumeist wird der palmare Zugang für Frakturen im mittleren Drittel gewählt, während die selteneren Frakturen im proximalen Drittel von dorsal operiert werden [67, 138]. Es kann zwischen offener Reposition mit interner Stabilisierung und minimalinvasiver perkutaner Verschraubung unterschieden werden. Instabile und stark dislozierte Frakturen erfordern grundsätzlich eine offene Operationstechnik [137]. Bei un- oder nur gering dislozierten Frakturen, die sich

geschlossen reponieren lassen, ist bei Erwachsenen auch ein minimalinvasives Vorgehen möglich [43, 138]. Auch bei Jugendlichen wird diese Operationstechnik mittlerweile vermehrt angewandt [8, 125, 139]. Eine Osteosynthese mittels Kirschner-Drähten (K-Drähten) ist ebenso möglich [12, 140]. Ob es bei Kindern und Jugendlichen zum Einsatz von kanülierten Schrauben oder K-Drähten kommt, ist vom Alter des Patienten und der Fragmentgröße abhängig [2].

- **Minimalinvasive Technik:** (siehe Abb. 13)

Nach einem ca. 1 cm langen Hautschnitt palmar über dem Skaphotrapezial (ST) -Gelenk wird ein Führungsdraht (Kirschner-Draht) unter permanenter Röntgenkontrolle in der Längsachse des Kahnbeins eingebracht. Über den gebohrten Draht wird die Schraube in das Skaphoid eingebracht und so eine exakte Positionierung ermöglicht [67, 137]. Es werden meist kanülierte Schrauben verwendet, die selbstschneidend sind. Vorteile gegenüber der offenen Technik, sind das Intaktbleiben der palmaren bzw. dorsalen Bandstrukturen, das minimale Zugangstrauma und eine verkürzte postoperative Ruhigstellung [43, 138, 139].

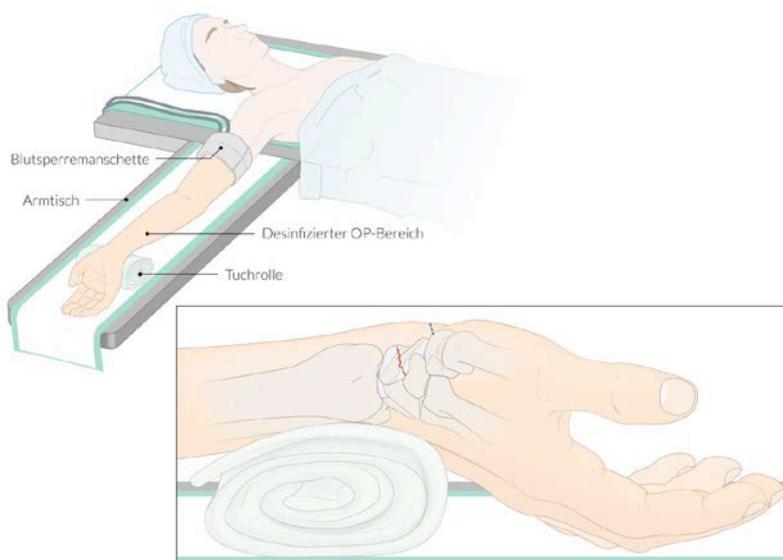


Abb. 13. Lagerung und Schnittführung bei der minimalinvasiven Schraubenosteosynthese von palmar

Der Patient wird auf dem Rücken und der betroffene Arm auf einem röntgendurchlässigen Armtisch gelagert. Das Handgelenk wird mithilfe einer Tuchrolle gestreckt. Ist eine Operation in Blutleere geplant, wird am Oberarm eine Blutdruckmanschette angelegt. Bei der minimalinvasiven Schraubenimplantation ist lediglich eine kurze Hautinzision notwendig (blau gestrichelte Linie). (Aus Amboss: Kahnbeinfraktur <https://www.amboss.com/de/wissen/Kahnbeinfraktur> 30.8.2019)

Frakturen, bei denen eine Osteosynthese durch ein minimalinvasives Vorgehen nicht möglich ist, werden offen unter Sicht reponiert und mit einer Schraube versorgt [141]. Beim offenen Vorgehen ist eine Oberarmblutleere notwendig.

- **Offener dorsaler Zugang:**

Der Hautschnitt erfolgt radiokarpal im schrägen Verlauf der Sehne des Musculus extensor pollicis longus [67]. Nach Eröffnung des 2. und 3. Strecksehnenfaches sowie der Gelenkkapsel kann der proximale Skaphoidpol dargestellt werden. Für eine gute Sicht auf die Fraktur ist eine maximale Flexion im Handgelenk erforderlich [137, 138]. Ein geeignetes Implantat für die Versorgung von proximalen Skaphoidfrakturen ist die Mini-Herbert-Schraube, da sie der Größe des proximalen Pols angepasst ist und subchondral versenkt werden kann [67, 137]. Unter Bildwandlerkontrolle wird ein Kirschner-Draht von proximal parallel zur Längsachse des Kahnbeins eingeführt [138]. Nach Längenmessung und Aufbohren in Freihandtechnik wird die Schraube eingedreht, bis das proximale Ende in der Kortikalis unter dem Knorpel liegt [67, 137].

- **Offener palmarer Zugang:** [43, 141] (siehe Abb. 14)

Die Lagerung erfolgt in leichter Extension des Handgelenks. Der Hautschnitt verläuft entlang des radialen Randes der Sehne des Musculus flexor carpi radialis (FCR) mit Abwinkelung ab der distalen Handgelenksbeugefurche und Weiterführung nach radial in Richtung des Tuberculum scaphoidei. Dann erfolgt die Inzision der FCR-Sehnenscheide, der palmaren radiokarpalen Bänder sowie der Gelenkkapsel. Eine Reposition der Fraktur erfolgt durch Zug am Daumen und Extension des Handgelenks. Der Führungsdraht wird am distalen Kahnbeinpol bis zur proximalen Kortikalis eingebracht und die Schraubenlänge bestimmt. Nach dem Aufbohren wird die kanülierte Doppelgewindeschraube eingedreht und die korrekte Lage röntgenologisch verifiziert.

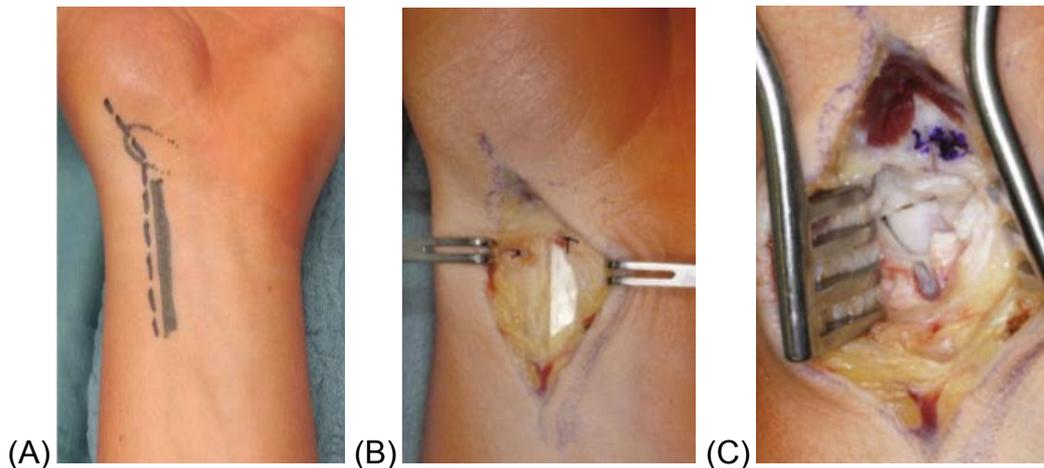


Abb. 14: Technik der offenen Reposition und Schraubenosteosynthese der frischen Skaphoidfraktur von palmar
 (A) Anzeichnung des Hautschnitts, Leitstruktur ist die Sehne des M. flexor carpi radialis (B) Durchtrennung der Sehnengleitbahn (C) Darstellung des Kahnbeins (aus H. Towfigh et al., 2014, S. 206)

1.9.5 Risiken

Als allgemeine Komplikationen der Operation gelten Nachblutung bzw. Hämatomausbildung, Wundheilungsstörungen und –infektion [67].

Weitere Risiken sind [12, 43, 57, 67, 141]:

- Nervenverletzungen (sensible Hautäste des Nervus medianus und radialis)
- Gefäßverletzungen (Arteria radialis)
- Sehnenverletzungen (palmarer Zugang: Musculus flexor carpi radialis oder Musculus flexor pollicis longus, dorsaler Zugang: Musculus extensor pollicis longus)
- Intraoperative technische Komplikationen (z.B. Brechen des Kirschner-Drahtes, Schraubenbruch)
- Schraubenfehlage mit Notwendigkeit der Metallentfernung
- Schraubenüberstand: Schmerzen und Arthroseentwicklung der radialen bzw. trapezialen Gelenkflächen
- Narbenbildung
- Bewegungseinschränkung des Handgelenks
- Komplexes regionales Schmerzsyndrom (CRPS)

Bedenken bestehen auch hinsichtlich einer möglichen Störung des Wachstums des Skaphoids durch die permanente Platzierung der Schraube im Knochen [17, 50]. In einer Studie wurde über die Langzeitergebnisse von Kindern und

Jugendlichen mit Skaphoidfrakturen nach durchschnittlich 6,3 Jahren Follow-up berichtet [130]. Von 39 Patienten mit akuten Frakturen (Therapiebeginn innerhalb von 6 Wochen nach dem Unfall), wurden 6 operativ mittels Schraubenosteosynthese behandelt. Als Indikationen zur Operation wurden eine Frakturdislokation und, bei zwei Jugendlichen, der Wunsch nach einer früheren Rückkehr zu sportlichen Aktivitäten genannt. Alle diese Patienten hatten bei der Follow-up Untersuchung exzellente funktionelle Ergebnisse, was anhand des DASH (Disabilities of the Arm, Shoulder and Hand) und des MMWS (Modified Mayo Wrist) Scores ausgewertet wurde. Erneute Röntgenuntersuchungen des Handgelenks wurden zu diesem Zeitpunkt allerdings nicht durchgeführt.

In den meisten Studien zur operativen Therapie von Skaphoidfrakturen waren die Patienten älter als 11 Jahre. Das genaue Alter ab dem die Schraubenosteosynthese sicher möglich ist, ist nicht bekannt. [17, 22, 50]

1.9.6 Nachbehandlung

Die Dauer einer postoperativen Ruhigstellung im Gips ist abhängig vom operativen Vorgehen sowie der erzielten Frakturstabilität [57, 142]. Durch die Verschraubung wird eine übungsstabile Osteosynthese erzielt, weshalb eine strenge Immobilisation der Hand meist nicht notwendig ist [43]. In Abhängigkeit von der postoperativen Schmerzsituation, wird die Hand der Patienten entweder gleich belastungsfrei mobilisiert oder für 1–2 Wochen zur Analgesie ruhiggestellt [43, 57, 142].

Ist durch die Osteosynthese keine sicher übungsstabile Situation herzustellen oder liegen entsprechende knöcherne oder ligamentäre Begleitverletzungen vor, kann eine mehrwöchige Ruhigstellung notwendig werden [67, 142]. Für ungefähr 6 Wochen postoperativ sollte die Hand keinen übermäßigen Belastungen ausgesetzt werden [43]. Bei persistierenden Schmerzen oder Bewegungseinschränkungen kann sich eine Physiotherapie anschließen [12]. Röntgenkontrollen werden unmittelbar postoperativ sowie nach 6 Wochen zur Überprüfung des Fremdmaterials und der Frakturheilung durchgeführt. Bei Auffälligkeiten oder unsicherer Bildinterpretation wird zumeist eine CT-Untersuchung angeschlossen [43, 142, 143]. Mithilfe der CT kann der

postoperative Zustand gut dokumentiert werden, da liegende Schrauben nur wenige Störartefakte hervorrufen. Ebenso kann eine normale oder ausbleibende Konsolidierung sicher und eindeutiger als in konventionellen Röntgenaufnahmen nachgewiesen werden. Die MRT ist zur Beurteilung der knöchernen Frakturheilung nur eingeschränkt geeignet. [143]

1.9.7 Verlaufskontrolle und Sportfähigkeit

Nach Abschluss einer konservativen oder operativen Therapie wird empfohlen, nach 6 sowie nach 12 Monaten, eine erneute klinische und ggf. radiologische Verlaufskontrolle durchzuführen. So soll das eventuelle Auftreten von Komplikationen frühzeitig erkannt werden. Generell wird eine Sportkarenz für rund drei Wochen nach Aufhebung der Ruhigstellung angeraten. Im Anschluss ist normale sportliche Betätigung möglich, jedoch sollte das Handgelenk nicht exzessiv belastet werden. So wird für ungefähr 6 Monate von der Durchführung von Kontaktsportarten oder risikoreichen sportlichen Aktivitäten mit starker Belastung des Handgelenks wie z.B. Tennis oder Snowboarden abgeraten [2, 12]. Das richtungweisende Symptom für den Belastungsaufbau und die Nachsorge ist der Schmerz [8].

1.10 Komplikationen

1.10.1 Definition und Ursachen

Als klassische Komplikation einer nicht ausgeheilten Skaphoidfraktur gilt die Bildung einer Pseudarthrose. Das Wort stammt aus dem Griechischen und setzt sich aus den Wörtern „pseudes“ = falsch und „arthron“ = Gelenk zusammen [144]. Von einer Pseudarthrose spricht man, wenn nach einer Fraktur die knöcherne Konsolidierung ausbleibt und ein Stillstehen im Heilungsprozess vorliegt [145]. In der englischsprachigen Literatur hat sich dafür der Begriff „Nonunion“ durchgesetzt.

Eine einheitliche Definition der Skaphoidpseudarthrose existiert nicht [80, 120]. Im klinischen Alltag ist zumeist die Klassifikation nach Herbert und Filan [146] etabliert. Die modifizierte Version unterscheidet sowohl eine verzögerte Frakturheilung (Typ C) als auch vier Untertypen der Pseudarthrosen (Typ D1-4). Letztere differenzieren Pseudarthrosenstabilität, Deformität des Skaphoids

sowie die Vitalität des proximalen Fragments (siehe Abb. 15). Dadurch können Rückschlüsse auf die Prognose und die notwendige Therapie gezogen werden [43, 147].

Auch die seit der Verletzung vergangene Zeit spielt bei der Diagnosestellung eine Rolle. Eine manifeste Skaphoidpseudarthrose wird zumeist definiert als fehlende knöcherne Konsolidierung nach 6 Monaten. Von einer verzögerten Heilung („delayed union“, Typ C) spricht man vor dem Ablauf von 6 Monaten, wenn sich 13 - 24 Wochen nach dem Frakturereignis keine knöcherne Heilung nachweisen lässt [43, 138, 145]. Es existieren jedoch auch Definitionen, die bereits nach dem Ablauf von 3 Monaten von einer Pseudarthrose bzw. Nonunion sprechen, wenn spezifische radiologische Zeichen vorliegen [129, 148].

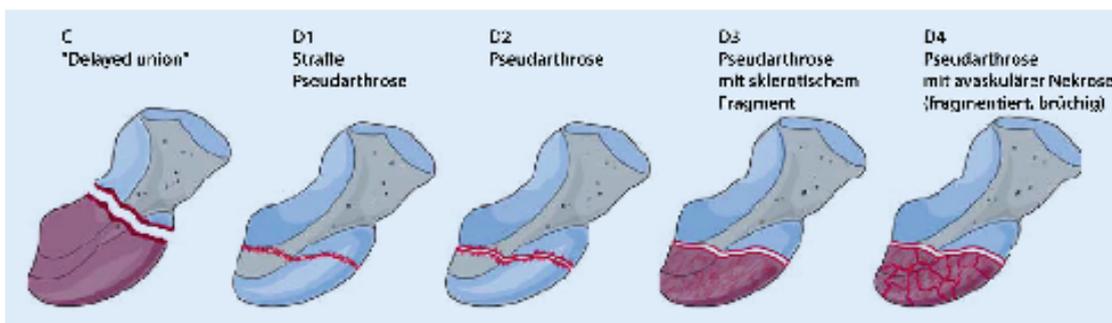


Abb. 15: Modifizierte Klassifikation der Skaphoidpseudarthrose nach Herbert und Filan (aus A. Arsalan-Werner, 2016, S. 381 [138])

Folgende Ursachen kommen in Betracht:

1. unerkannte und daher nicht behandelte Skaphoidfrakturen
2. Versagen der konservativen oder operativen Therapie

Während bei der akuten Kahnbeinfraktur von Erwachsenen selbst bei adäquater konservativer oder operativer Behandlung eine Pseudarthrosenrate von um die 12% beschrieben wird [43, 146, 149], ist bei Kindern ein Therapieversagen selten, wie die hohen Heilungsraten zeigen [50, 80].

Faktoren, welche die Bildung einer Skaphoidpseudarthrose begünstigen, sind unter anderem: [43, 44, 80, 138, 149]

Biologische Faktoren:

- Fragmentdislokationen von über 1 mm

- Frakturen im proximalen Kahnbeindrittel
- Ligamentäre Instabilität durch radiokarpale oder interkarpale Begleitverletzungen

Klinische Faktoren:

- Verzögerte Vorstellung der Patienten in der Klinik
- Diskrete klinische Symptomatik
- Schwierige radiologische Darstellung der Fraktur
- Unzureichende Ruhigstellung

1.10.2 Epidemiologie

Das Kahnbein ist einer der Knochen, der am häufigsten von einer Pseudarthrosenbildung betroffen ist [145, 150]. Eine Kahnbeinpseudarthrose bei Kindern ist sehr selten aber möglich [12, 147, 151]. Im Gegensatz zu Erwachsenen wird sie zumeist nicht auf ein Versagen der konservativen oder operativen Therapie, sondern auf eine verzögerte Diagnosestellung zurückgeführt. Dies kann in einer verspäteten Vorstellung der Patienten in der Klinik aufgrund von geringen Symptomen oder Bagatellisierung der Verletzung begründet sein [50, 80]. In einer retrospektiven Analyse von 312 Skaphoidfrakturen erfolgte die Erstvorstellung bei etwa einem Drittel der Patienten im Kindes- und Jugendalter erst verspätet (nach einer mittleren Zeit von 26,8 Wochen) [81]. Andererseits wird die Skaphoidfraktur aufgrund der schwierigen Diagnosestellung auch leicht verpasst [18].

Doch auch bei zeitnah adäquat behandelten Skaphoidfrakturen kann es - wenn auch sehr selten - zu einer Pseudarthrosenbildung kommen. In einer Durchsicht der Literatur fanden Fabre et al [76] bei 371 Kindern mit Skaphoidfrakturen eine Pseudarthrosenrate von 0,8% nach sofortiger, angemessener Ruhigstellung der Hand. Fast alle in der Literatur berichteten Fälle von Pseudarthrosen betreffen die Taille des Skaphoids [16, 17, 120, 151-159]. Die meisten dieser Kinder waren älter als 10 Jahre alt. Toh et al. [17] stellten einen Zusammenhang zwischen dem vermehrten Auftreten von Pseudarthrosen und steigendem Alter der Patienten fest. Doch auch bei 8 Jahre alten oder noch jüngeren Kindern wurden bereits Pseudarthrosen beschrieben [16, 158, 160, 161].

1.10.3 Diagnostik

Die Symptomatik bei Skaphoidpseudarthrosen ist häufig unspezifisch. Es können Bewegungsschmerzen im Handgelenk auftreten, häufig bei starker Dorsalflexion. Auch ein Verlust an Kraft und Beweglichkeit der Hand sind möglich [18, 43]. Bei der klinischen Untersuchung können Druckschmerzen im Bereich der Tabatière und Stauchungsschmerzen des Daumens vorliegen [76, 162]. Auch gelegentliche Schmerzen nur bei starker Belastung der Hand sind möglich. Die Patienten können allerdings auch über einen langen Zeitraum völlig beschwerdefrei sein [43, 152].

Eine Skaphoidpseudarthrose kann daher unter verschiedenen Umständen diagnostiziert werden: [50]

1. Kinder mit persistierenden Handgelenksbeschwerden nach Unfall:
 - eine akute Skaphoidfraktur wurde nicht erkannt oder unzureichend behandelt.
 - zeitliche Verzögerung zwischen Unfall und Vorstellung in der Klinik.Ein spezifisches Unfallereignis ist meist rememberlich.
2. Kinder ohne Handgelenksbeschwerden:

Die Skaphoidpseudarthrose wird zufällig diagnostiziert, z.B. bei einer Röntgen- oder MRT-Untersuchung die aufgrund einer anderen Indikation durchgeführt wird. Eine spezifische Verletzung des Handgelenks ist meist nicht rememberlich.
3. Kinder mit chronischen Handgelenksbeschwerden ohne bekannte Ursache:

Die Erinnerung an ein spezifisches Unfallereignis fehlt. Oft wird von vermehrten Stürzen oder Bagatelltraumen der Hand beim Spielen oder Sport berichtet.

Als Basisdiagnostik gilt die röntgenologische Darstellung der Handwurzel in 2 Ebenen und die Kahnbeinzielaufnahme [138].

Radiologische Zeichen einer Pseudarthrose sind: [43, 120, 129]

- Resorptionszonen mit erhöhter Strahlentransparenz entlang des Frakturspaltes
- Sklerosierung und Abdeckelung der Spaltränder
- Zystoide Veränderungen entlang der Spaltränder

Es wurde darauf hingewiesen, dass die radiologische Diagnostik gerade bei jüngeren Kindern unter 11 - 12 Jahren, häufig erschwert ist. Die Pseudarthrose lässt sich auf den Aufnahmen in 2 Ebenen zuweilen nicht darstellen oder stellt sich mit uneindeutigen zystoiden Veränderungen dar [160]. Ergänzend kann die MRT eingesetzt werden. Ein Kontrastmittelgabe kann helfen, die Vitalität des proximalen Kahnbeinfragments zu beurteilen [43, 138]. Eine durch Minderperfusion induzierte Ischämie zeigt sich in Signalveränderungen des Knochenmarks [162].

Mit Hilfe der CT kann die knöchernerne Morphologie sehr genau beurteilt werden (siehe Abb. 16). Sie erlaubt Aussagen zur Größe und Stellung der Fragmente, dem Ausmaß der Resorptionszonen und Zystenbildung sowie zu karpalen Fehlstellungen [162]. Sie findet ihren Einsatz daher vor allem bei der präoperativen Planung vor rekonstruktiven Eingriffen [43].



Abb. 16: Röntgen- und CT-Bilder des linken Handgelenks eines 16-jährigen Jungens mit Schmerzen und Kraftverlust der Hand

(A) das Röntgenbild zeigt eine Pseudarthrose (Typ D2) der Taille des Skaphoids, (B) und (C) die CT-Aufnahmen zeigen zystoide Veränderungen entlang des Frakturspalts (aus Masquijo et al., 2010, S. 121 [129])

1.10.4 Differentialdiagnose

Als mögliche Differentialdiagnose gilt das Os scaphoideum bipartitum [2]. Dieser geteilte Handwurzelknochen kann einen pseudarthroseähnlichen Röntgenbefund hervorrufen [43]. Dabei ist unklar, ob es sich um eine anlagebedingte anatomische Variante mit zwei Knochenkernen oder um einen Zustand nach frühkindlichem Trauma mit Entwicklung einer asymptomatischen Zweiteilung des Knochens handelt [80, 163].

Ein bilaterales Auftreten wurde beschrieben [164]. In einem Fallbericht aus 1990 [165] wurden die Röntgenbefunde einer Patientin mit beidseitigem Os scaphoideum bipartitum von Beginn der Ossifikation bis zum Abschluss der Skelettreife dokumentiert. Mit einem Alter von 13 Jahren zeigten sich bei der Patientin zwei getrennte Ossifikationszentren. Diese vergrößerten sich progredient, blieben aber auch noch nach Abschluss der Ossifikation mit einem Alter von 16 Jahren getrennt. In einer MRT wurde zwischen den beiden Anteilen des Skaphoids Knorpelgewebe nachgewiesen. Eine kongenitale Genese als sehr seltene anatomische Variante ist daher wahrscheinlich.

Seitdem können sehr vereinzelt weitere Fallberichte zu Patienten mit bilateralem Os scaphoideum bipartitum gefunden werden [166-170]. Über die genaue Inzidenz liegen derzeit keine verlässlichen Daten vor. Ein Zusammenhang zwischen dem Auftreten eines Os scaphoideum bipartitum und dem Holt-Oram-Syndrom mit kardialen Defekten und skelettalen Anomalien wurde genannt [167].

Zur Differenzierung eines Os scaphoideum bipartitum von einer Pseudarthrose des Skaphoids könnten bestimmte Kriterien herangezogen werden, welche jedoch nicht beweisend sind: [164, 167, 170]

1. Klar umrissene Knochenkanten mit schmalem, gelenkähnlichen Zwischenraum in konventionellen Röntgenaufnahmen
2. Gleichmäßig weite Distanz des Teilungsspalts und abgerundete Knochenkanten
3. Keine Sklerosierung und zystische Veränderungen an den zugewandten Knochenkanten
4. Beide Knochenanteile sind von gleicher Dichte
5. Keine degenerativen Veränderungen der radiokarpalen Artikulation

6. Leere Traumaanamnese bezüglich des Handgelenks
7. Beidseitiges Auftreten
8. Jahrelang unveränderte Form

Da es möglich ist, dass multiple Ossifikationszentren im Skaphoid auftreten, welche im Verlauf miteinander verschmelzen [2, 170], kann eine endgültige Diagnose jedoch erst nach dem Abschluss der Skelettreife gestellt werden.

1.10.5 Therapie

Die optimale Therapie der undislozierten Kahnbeinpseudarthrose im Kindes- und Jugendalter wird kontrovers beurteilt. Eine Vielzahl an operativen Maßnahmen wurde beschrieben:

- Rekonstruktion mittels eines kortikospongiösen Knochenspanns und Stabilisierung mit Kirschner-Drähten [152, 171] oder Kompressionsschrauben [17, 129, 153, 154, 172]
- Spongiosaplastik ohne Osteosynthese [18, 151, 153]
- perkutane oder offene Schraubenosteosynthese [139, 155].

Doch auch von erfolgreicher, konservativer Therapie mittels prolongierter Ruhigstellung wurde berichtet [76, 120, 161]. Bei instabilen Pseudarthrosen des Kahnbeins wird ein operatives Vorgehen empfohlen. Durch kortikospongiöse Späne kann, bei einer bestehenden Deformität (z.B. Humpback-Deformität), eine Aufrichtung des Kahnbeins erfolgen [80, 138].

1.10.6 Operationstechniken und Immobilisation

Bei rekonstruktiven Verfahren wird zur Auffüllung des knöchernen Substanzdefekts ein autogenes Knochentransplantat (engl. „bone graft“) verwendet [43]. Bei der Matti-Russe-Plastik wird, nach Resektion der Pseudarthroseränder, ein kortikospongiöser Knochenspan in den ausgehöhlten Spalt eingebracht. Der Span wird meist aus dem distalen Radius, der Ulna oder dem Beckenkamm entnommen. Eine weitere Osteosynthese erfolgt nicht [18, 138].

Ein anderes Verfahren besteht in der zusätzlichen Fixierung des kortikospongiösen Spans mittels kanülierter, selbstschneidender

Doppelgewindeschrauben (z.B. Herbert-, Mini-Herbert-, Synthes- oder Acutrak-Schraube) (siehe Abb. 17) oder Kirschner-Drähten [43, 81, 138, 162, 173].

Eine minimalinvasive perkutane Schraubenosteosynthese kann bei Jugendlichen mit verzögerter Frakturheilung oder Pseudarthrose mit stabiler, fibröser Überbrückung des Frakturspaltes (Typ D1) durchgeführt werden [17, 129, 139]. Ein neueres Verfahren besteht in der zusätzlichen perkutanen Versorgung mit autogenem Knochentransplantat [174].

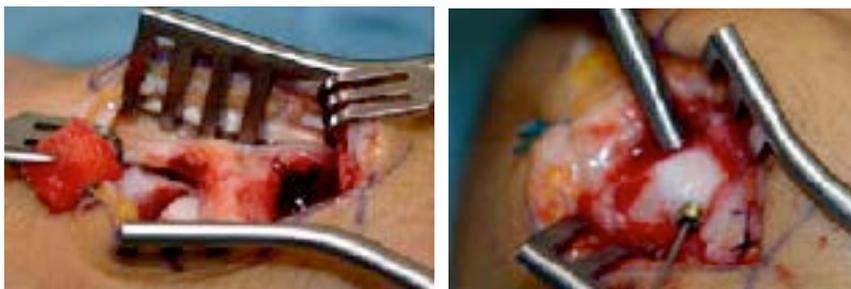


Abb. 17: offene Reposition von dorsal mit kortikospongiösem Span aus dem distalen Radius und Schraubenosteosynthese
(modifiziert aus A. Arsalan-Werner, 2016, S. 382 [138])

Über die Dauer der postoperativen Ruhigstellung gibt es keine einheitlichen Richtlinien [43]. Ein Vorteil der Schraubenosteosynthese ist bei Erwachsenen die verkürzte Ruhigstellung nach der Operation [50, 138]. Ob dies auch für Patienten im Wachstumsalter zutrifft, bleibt jedoch unklar [50]. Mehrfach wurde bereits von einer signifikant kürzeren postoperativen Ruhigstellung nach der Behandlung mit Knochentransplantat und Herbert-Schrauben im Vergleich zur Matti-Russe-Plastik berichtet [153, 157]. Generell variiert die Dauer der Ruhigstellung zwischen 4 Wochen und 3 Monaten und ist von der Art der operativen Versorgung und den Präferenzen des Operateurs abhängig [18, 50, 138, 152-156].

Unabhängig von der verwendeten Methode, wurde insgesamt von sehr guten Resultaten bei der chirurgischen Behandlung berichtet [175]. Zumeist wird eine Heilungsrate von nahezu 100% angegeben, bei guten bis ausgezeichneten funktionellen Ergebnissen und Abwesenheit von Schmerzen [50, 151-157, 172]. Die Operation bei Kahnbeinpseudarthrosen ist technisch jedoch sehr anspruchsvoll und sollte daher erfahrenen Operateuren vorbehalten bleiben [43, 80].

Allerdings existieren auch Empfehlungen zur Behandlung der Kahnbeinpseudarthrose durch prolongierte Ruhigstellung im Unterarmgips mit Daumeneinschluss [12, 76, 88, 120, 161]; manchmal auch mit zusätzlicher Schockwellen- [20] oder Magnetfeld-Therapie [176]. Weber et al. [120] berichten von 12 Kindern (9 - 16 Jahre) mit Skaphoidpseudarthrose, die konservativ behandelt wurden. Die mittlere zeitliche Verzögerung zwischen Verletzung und Beginn der Therapie war dabei 5,3 Monate (3 - 7 Monate). Nach einer durchschnittlichen Ruhigstellung von 5,3 Monaten konnte bei allen Patienten eine Ausheilung, exzellente funktionelle Ergebnisse und Schmerzfreiheit festgestellt werden.

In jedem Fall sollten die Vor- und Nachteile mit dem Patienten und dessen Eltern eingehend besprochen werden, bevor eine Entscheidung zur konservativen oder operativen Therapie getroffen werden kann.

1.10.7 Spätfolgen

Bei Erwachsenen sind die Spätfolgen einer nicht ausgeheilten Skaphoidpseudarthrose gut dokumentiert. Eine Fragmentverkipfung und eine, durch die karpale Ringsprengung resultierende, Instabilität wirken sich auf die Biomechanik der Handwurzel aus. Das proximale Skaphoidfragment und das Mondbein sind ligamentär gekoppelt und kippen zusammen in Dorsalextension. Das distale Fragment nimmt dabei eine Palmarflexionsstellung ein. Daraus resultiert die sog. DISI-Fehlstellung („*dorsiflexed intercalated segment instability*“). Durch den einhergehenden Höhenverlust der Handwurzel kommt es zur Störung der harmonischen Kraftübertragung und zum Knorpelabrieb. Abhängig vom Grad der Instabilität und der Fehlbelastung kommt es für gewöhnlich nach 2 - 10 Jahren zur Arthrose im Handgelenk mit karpalem Kollaps, dem sog. SNAC-wrist (*scaphoid nonunion advanced collapse*). [43, 57, 138, 162]

Obwohl Bedenken bestehen, dass diese Spätfolgen auch bei Kindern auftreten könnten, sind in der Literatur keine größeren Fallserien bekannt, in denen die Ausbildung einer Handgelenksarthrose nach Skaphoidpseudarthrose beschrieben wird [50, 80]. Bekannt ist auch, dass das Skaphoid im Wachstumsalter das Potential zur Spontankorrektur besitzt [80]. Suzuki und

Herbert [177] berichten von zwei Kindern (9 und 10 Jahre alt), bei denen es nach vier Jahren zu einer spontanen Korrektur einer bestehenden DISI-Fehlstellung kam. Allerdings wird vermutet, dass dieses Korrekturpotential bei Kindern zumeist nur bis zu einem Alter von 10 Jahren besteht [12]. Da keine langfristigen Follow-up Untersuchungen von Kindern mit Kahnbeinpseudarthrose existieren, ist jedoch nicht bekannt, wie groß das Korrekturpotential ist und ob im Verlauf mit der Entwicklung eines SNAC-wrist zu rechnen ist oder nicht [50, 80, 120].

1.10.8 Andere Komplikationen

Als Folge einer Kahnbeinfraktur kann durch eine Störung in der Durchblutung eine aseptische Knochennekrose (Osteonekrose, avaskuläre Nekrose, AVN) eines Kahnbeinfragments entstehen [12, 44]. Eine Frakturlokalisierung im proximalen Drittel des Knochens stellt dabei aufgrund der retrograden Blutversorgung einen Risikofaktor dar [162]. Als Methode der Wahl zur Frühdiagnostik gilt die MRT [162]. Eine Therapiemöglichkeit besteht in der Verwendung von gefäßgestielten Knochentransplantaten zur Auffüllung des Pseudarthrosenspalts [43, 129].

Im Wachstumsalter ist diese Komplikation möglich, wurde aber nur vereinzelt beschrieben [18, 50, 153, 178, 179]. In einem Bericht wurde das Auftreten von Osteonekrose bei drei Jugendlichen (mittleres Alter 14,8 Jahre) mit Pseudarthrose im proximalen Kahnbein beschrieben [178]. Alle drei Patienten wurden mit vaskularisierten Knochentransplantaten aus dem distalen Radius versorgt. Bei der Follow-up Untersuchung nach 5 Jahren waren alle Patienten beschwerdefrei, zeigten aber moderate Einschränkungen der Dorsalflexion und Radialabduktion im Handgelenk. In den Röntgenbildern zeigten sich eine Ausheilung der Fraktur und keine Anzeichen von Osteonekrose.

Doch auch von einer Ausheilung nach konservativer Therapie von, in der MRT bestätigten, avaskulären Nekrosen wurde berichtet [180]. Das Vorhandensein einer Knochennekrose beeinträchtigt die Frakturheilung. So zeigten Gholson et al. [81] in einer großen Fallserie, dass die benötigte Zeit im Gips bis zur Ausheilung der Fraktur bei Patienten mit Osteonekrose deutlich länger war als bei jenen ohne Osteonekrose.

1.11 Begleitverletzungen

1.11.1 Knöchern

1.11.1.1 Radius

Distale Radiusfrakturen gehören zu den häufigsten Frakturen im Wachstumsalter [25]. Sie können auch in Kombination mit einer Skaphoidfraktur auftreten [1, 12, 181] (siehe Abb. 18). In einer großen Studie zu 351 Patienten im Kindes- und Jugendalter mit Skaphoidfrakturen, hatten 4,8% eine zusätzliche Fraktur des distalen Radius [81]. Auch das gleichzeitige Auftreten einer proximalen Radius- und einer Skaphoidfraktur wurde beschrieben [182]. Daher ist es besonders wichtig, bei Kindern mit Radiusfrakturen auf klinische Anzeichen einer Verletzung des Skaphoids zu achten, und ebenfalls Röntgenaufnahmen anzufertigen, die auf das Handgelenk zentriert sind [80]. Eine mögliche Gefahr besteht in der sekundären Dislokation einer nicht erkannten und zuvor undislozierten Skaphoidfraktur, beim Versuch der Reposition der distalen Radiusfraktur [181].



Abb. 18: Röntgenaufnahme eines 17-jährigen Patienten mit Skaphoid- und distaler Radiusfraktur

Unterarm in 2 Ebenen (links): dislozierte Skaphoidfraktur (Pfeil A) und distale Extensionsfraktur des Radius (Pfeil B)

1.11.1.2 Handwurzelknochen

Frakturen der übrigen Handwurzelknochen sind sehr selten und treten kaum isoliert auf [80]. In Kombination mit einer Skaphoidfraktur ist eine Fraktur des Os capitatum am häufigsten [77]. Als klassische Unfallmechanismen gelten die Hyperdorsalextension sowie eine direkte Kompression [19]. Tritt eine Skaphoidfraktur zusammen mit einer Fraktur des Kapitatum auf, bei der es zu einer Verdrehung des proximalen Fragments um 90 - 180° kommt, wird dies auch als Skaphokapitäres Syndrom (Fenton-Syndrom) bezeichnet [12, 183, 184]. Ein Vorkommen bei Jugendlichen wurde beschrieben, ist aber äußerst selten [183]. Laut einer Übersichtsstudie wurde diese Frakturform bis 1993 bei nur vier Patienten in einem Alter von 18 Jahren oder jünger in der Literatur beschrieben [185]. Zwei weitere Fallberichte aus dem Jahr 2000 [183] und 2007 [186] berichten vom Vorliegen eines Skaphokapitären Syndroms bei einem 12 und einem 15 jährigen Jungen. Trotz seiner Seltenheit sollte es differenzialdiagnostisch aber in Erwägung gezogen werden, um Fehldiagnosen zu vermeiden [183]. Bei dislozierten Frakturen ist eine offene Reposition und interne Fixation anzustreben [19].

Auch gleichzeitige Frakturen des Skaphoids und des Os triquetrum treten sehr selten auf. In einer Studie zu 89 Kindern und Jugendlichen (< 18 Jahre) mit Skaphoidfrakturen, hatten 2 Patienten eine begleitende Fraktur des Os triquetrum [15]. Komplexe Verletzungen der Handwurzel sind eine Rarität. Sie kommen vor allem bei Adoleszenten vor; sind jedoch auch bei jüngeren Kindern möglich. So beschreibt ein Fallbericht das gleichzeitige Auftreten von Frakturen des Skaphoids, des Kapitatum (disloziert) und des Triquetrum bei einem 10 jährigen Jungen [187].

Eine Luxationsfraktur mit Beteiligung des Skaphoids (transskaphoidale perilunäre Luxationsfraktur) ist im Wachstumsalter eine absolute Seltenheit. Sie tritt vor allem nach Hochrasanztraumen bei jungen, aktiven Patienten auf [188]. Daher sollte bei entsprechender Anamnese auch bei Jugendlichen an eine solche Verletzung gedacht werden, da eine sofortige Reposition folgen muss [77, 80].

1.11.1.3 Andere knöcherner Verletzungen

Weitere Frakturen der Hand und des Unterarms, die in Kombination mit einer Skaphoidfraktur auftreten können, betreffen Metakarpalknochen, Phalangen und Ulna [1, 11, 81, 105].

1.11.2 Ligamentär

Rein ligamentäre Verletzungen sind bei Patienten im Wachstumsalter selten. Dies liegt an der größeren Elastizität der Bänder und dem im Vergleich weniger zugfesten Knorpel- und Knochengewebe des wachsenden Skeletts [189]. So kommt es leichter zum Ausriss eines osteochondralen Fragments (sog. Avulsionsfraktur) als bei Erwachsenen [80]. Zum Ende der Pubertät hin kann es jedoch häufiger zu einer Mitverletzung des Bandapparats kommen. Die klinische Bedeutung hängt von der Schwere der Verletzung ab. Bei inkompletten ligamentären Einrissen ist in der Regel keine spezifische Therapie erforderlich [190]. Bei schwereren Verletzungen und bestehender Instabilität ist häufig eine operative Therapie im Sinne einer Bandnaht oder –rekonstruktion erforderlich [12]. In einer Studie zu Erwachsenen mit akuten Skaphoidfrakturen, hatten Patienten mit zusätzlicher Verletzung von ligamentären Strukturen ein schlechteres funktionelles Outcome als Patienten ohne assoziierte Verletzungen [190].

1.11.2.1 Triangulärer fibroartilaginärer Komplex (TFCC)

Der TFCC setzt sich aus dem Diskus triangularis, einem distal der Ulna aufliegendem dreieckigen Faserknorpel, und diversen Bandstrukturen zusammen. Er stabilisiert das ulnarseitige Handgelenk sowie das distale Radioulnargelenk [191].

Eine zusätzliche Verletzung des TFCC bei einer Fraktur des Skaphoids ist möglich und kann in der MRT diagnostiziert werden [190, 191]. Klinisch zeigen sich oft ein Druckschmerz über dem ulnaren Handgelenk und Schmerzen bei Supination [80, 140]. Bei bestehender Instabilität kann auch bei Patienten im Wachstumsalter eine chirurgische Refixation angezeigt sein [24, 80].

1.11.2.2 Skapholunäres Ligament (SL-Band)

Eine Läsion des SL-Bandes ist bei Erwachsenen relativ häufig. Ein Vorkommen bei Kindern und Jugendlichen ist sehr selten, wurde aber berichtet [80, 192-194]. Ein gleichzeitiges Auftreten von Skaphoidfraktur und Ruptur des SL-Bandes ist möglich [195]. Bei Verdacht auf eine skapholunäre Bandverletzung kann zur Überprüfung der Instabilität ein klinischer Provokationstest durchgeführt werden. Bei dem sog. „Skaphoid-Shift-Test“ nach Watson drückt der Untersucher mit dem Daumen auf das distal-palmar gelegene Tuberkel des Kahnbeins und führt gleichzeitig das Handgelenk passiv von ulnar nach radial (siehe Abb. 19). Der Test ist positiv, wenn sich das Skaphoid nach dorsal subluzieren lässt. Dies ist mit Schmerzen und einem spürbaren „Schnappen“ verbunden. Da gerade junge weibliche Patienten häufig einen laxen Bandapparat besitzen, ist der Test vor allem im Seitenvergleich aussagekräftig. [24, 61, 80, 196]

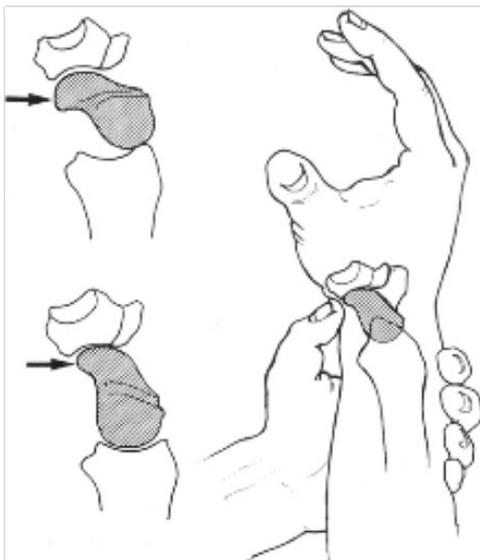


Abb. 19: Skaphoid-Shift-Test nach Watson

(aus H. Towfigh et al., 2014, S. 239 [61])

Radiologisch besteht bei Erwachsenen der Verdacht auf eine skapholunäre Dissoziation, wenn in der p.a. Aufnahme die Distanz zwischen Kahn- und Mondbein auf über 2 - 3 mm vergrößert ist [61]. Dieser Abstand kann im Wachstumsalter aufgrund der unvollständigen Ossifikation der Handwurzelknochen erweitert erscheinen [12, 80]. Daher wird eher die MRT oder auch die Arthroskopie zur Diagnosestellung herangezogen [140]. Eine unbehandelte skapholunäre Dissoziation kann zu persistierenden Bewegungsschmerzen und Kraftverlust des Handgelenks führen [192-194]. Bei

partiellen SL-Band Läsionen kann eine vollständige Ausheilung unter konservativer Therapie erwartet werden. Eine komplette Bandruptur mit bestehender Instabilität wird dagegen operativ im Sinne einer Bandnaht und temporären K-Draht-Fixation von Kahn- und Mondbein behandelt. [12, 80, 140, 193-195]

2 Fragestellungen und Hypothesen

Ziel der vorliegenden Studie war es, die Diagnostik und Therapie von Frakturen des Skaphoids bei Kindern und Jugendlichen in einem Zentrum retrospektiv zu evaluieren. Um die Langzeitergebnisse der Behandlung zu beurteilen, wurden die Patienten befragt und nachuntersucht.

Skaphoidfrakturen sind zwar keine häufigen Verletzungen, doch werden sie gerade wegen ihrer relativen Seltenheit und der schwierigen Interpretation von Röntgenaufnahmen der unreifen Handwurzel oft übersehen. Eine rasche Diagnosestellung und eine korrekte altersentsprechende Therapie sind jedoch sehr wichtig, um Komplikationen zu vermeiden. Trotz der zunehmenden Häufigkeit von sportbedingten Hand- und Handgelenksverletzungen bei Kindern gibt es nach wie vor nur wenige veröffentlichte Daten über Inzidenz, Verletzungsmuster und die beste Art der Früherkennung von Skaphoidfrakturen bei Kindern und Jugendlichen. Auch über die optimale Art und Dauer der konservativen Therapie sowie über die längerfristigen Behandlungsergebnisse herrscht noch wenig Konsens in der Literatur.

Diese Studie soll zu einer Verbesserung der Behandlung von Kindern und Jugendlichen mit Skaphoidfrakturen beitragen. Durch die Erstellung eines geeigneten Diagnose- und Therapiealgorithmus soll eine zügigere und sichere Diagnosestellung sowie das Einleiten einer adäquaten Therapie erleichtert werden. Um dies zu erreichen, wurde zum einen eine retrospektive Analyse von allen Kindern und Jugendlichen durchgeführt, die über 12 Jahre hinweg in der Kinderchirurgischen Klinik und Poliklinik am Dr. von Haunerschen Kinderspital der LMU München mit Verdacht auf eine Verletzung des Skaphoids behandelt wurden.

Ziel dieser Auswertung war

- die Erfassung von Unfallursache und –mechanismus, Alters- und Geschlechterverteilung,
- die Bestimmung der Anzahl an Skaphoidfrakturen bei allen Patienten, welche mit klinischem Verdacht auf eine solche Fraktur behandelt wurden,
- die Ermittlung der Verteilung von Frakturlokalisationen im Skaphoid,
- die Bestimmung der Häufigkeit und Art von Begleitverletzungen,
- der Vergleich von Röntgen- und MRT-Aufnahmen hinsichtlich der Detektion von Skaphoidfrakturen,
- die Erstellung eines geeigneten Diagnosealgorithmus zur Früherkennung der Fraktur, sowie
- die Erstellung eines standardisierten therapeutischen Vorgehens zur Behandlung von Skaphoidfrakturen bei Kindern und Jugendlichen.

Zum anderen wurde eine klinische Nachuntersuchung und Befragung durchgeführt. Folgende Ziele wurden dabei angestrebt:

- Die Bestimmung des funktionellen Langzeitergebnisses in Abhängigkeit von der durchgeführten Therapie.
- Die Bewertung der durchgeführten Ruhigstellung in Hinblick auf Beeinträchtigung im Alltag und Komfort durch die Patienten.

3 Patienten und Methoden

3.1 Datenerfassung

Die retrospektive Analyse bezieht sich auf alle Kinder und Jugendlichen bis zum 18. Lebensjahr, welche im Zeitraum von September 2003 bis Mai 2015 in der Kinderchirurgischen Klinik und Poliklinik am Dr. von Haunerschen Kinderspital der Ludwig-Maximilians-Universität München mit dem klinischen Verdacht auf eine Skaphoidfraktur behandelt wurden. Ein klinischer Verdacht ergab sich bei entsprechendem Trauma und bestehenden Druck- und Bewegungsschmerzen im Bereich der Handwurzel bei der Erstuntersuchung. Der Beobachtungszeitraum erstreckte sich vom Tag der Erstvorstellung bis zur Freigabe der Patienten nach abgeschlossener Behandlung bzw. den Nachuntersuchungen im weiteren Verlauf.

Zur Datensammlung und -erfassung standen die archivierten und elektronischen Patientenakten sowie Röntgen-, MRT- und CT-Bilder der Patienten zur Verfügung. Die Auswahl der Patienten erfolgte mittels Suchanfrage in der SAP-System Datenbank. Als Einschlusskriterien galten der anamnestische und klinische Verdacht auf eine Skaphoidfraktur und eine durchgeführte Röntgenuntersuchung des Handgelenks. Nach Genehmigung der Studie durch die Ethikkommission der Medizinischen Fakultät der LMU München (siehe Kapitel 3.5) wurden die entsprechenden Akten eingesehen.

Daraus wurden folgende Parameter tabellarisch erfasst:

- Geburtsdatum, Alter und Geschlecht
- Unfalldatum
- Zeitliche Verzögerung bis zur Erstvorstellung
- Unfallursache und Verletzungsmechanismus
- Befunde bei der klinischen Erstuntersuchung
- Durchführung einer Bildgebung mittels Röntgen und/oder MRT oder CT
- Durchführung einer Skaphoid-Zielaufnahme
- Röntgen- und MRT- oder CT-Diagnose
- Frakturdiagnose, -art und -lokalisation
- Begleitverletzungen
- Zeit von Erstuntersuchung bis MRT
- Durchführung von zusätzlichen Röntgenuntersuchungen im Verlauf
- Art der Therapie (konservativ oder operativ)
- Zeitdauer der Ruhigstellung im Gips
- Zeitdauer bis Behandlungsabschluss und Schmerzfreiheit
- Anzahl ambulanter Wiedervorstellungen und Nachuntersuchungen
- Dauer bis zur ersten klinischen Nachuntersuchung und Ergebnis
- Komplikationen
- Ggf. Besonderheiten

Ein weiterer Aspekt der Studie war das Ermitteln der funktionellen Ergebnisse und Langzeitresultate der durchgeführten Behandlung. Dazu wurden alle Patienten mit bestätigter Skaphoidfraktur zu einer klinischen Nachuntersuchung eingeladen. Dabei sollte die Hand auf Schmerzen und Beweglichkeit untersucht

werden und die Patienten zu Beschwerden und Einschränkungen im Alltag sowie zur Zufriedenheit mit der erhaltenen Therapie befragt werden.

3.2 Patientenkollektiv und Methode

Insgesamt wurden die Daten von 158 Kindern und Jugendlichen ausgewertet, welche von September 2003 bis Mai 2015 mit Verdacht auf eine Skaphoidfraktur betreut wurden. Dies entspricht einem Zeitraum von 12 Jahren. Patienten, die sich mehrfach aus unzusammenhängenden Gründen mit posttraumatischen Schmerzen im Handgelenk vorstellten, wurden als separate Fälle inkludiert.

Alle Patienten waren zum Zeitpunkt der Erstvorstellung unter 18 Jahre alt, mit einem mittleren Alter von 12,03 Jahren (Spanne 7-17 Jahre). Von diesen 158 Patienten erschienen 43 nach der Erstuntersuchung oder im Verlauf nicht mehr in unserer Klinik oder beendeten ihre Behandlung auswärts. Sie wurden als „lost to follow-up“ gewertet und (sofern nicht explizit anders angegeben) von der weiteren Auswertung in dieser Studie ausgeschlossen. Es verblieben somit 115 Patienten in unserem Studienkollektiv.

Bei der klinischen Untersuchung wurde unter anderem auf Druck- und Bewegungsschmerzen sowie Schwellung des Handgelenks geachtet. Die Hand wurde auf einen ggf. vorhandenen lokalisierten Druckschmerz über der Tabatière oder über dem distalen Radius untersucht. Zusätzlich wurden teilweise ein lokalisierter Druckschmerz über dem palmaren Skaphoid und über der Basis des ersten Metakarpalknochens, Daumenstauchungsschmerz sowie Schmerzen bei Flexion, Extension und beim Faustschluss dokumentiert.

Bei allen Patienten wurden zur initialen Frakturabklärung Standardröntgenaufnahmen des Handgelenks in zwei Ebenen durchgeführt. Bei 86 (74,8%) Patienten wurden zudem Skaphoid-Zielaufnahmen veranlasst. Bei bestehendem Verdacht auf eine Kahnbeinfraktur wurde auch bei negativem Röntgenbefund bei allen Patienten eine konservative Therapie begonnen. Diese bestand in der Immobilisation des Handgelenks in einem Ober- oder Unterarmgips mit Einschluss des Daumengrundgelenks. Kinder mit unsicherer Diagnose wurden nach einer durchschnittlichen Dauer von 7,1 Tagen klinisch

nachuntersucht. Bei unauffälliger klinischer Untersuchung und Beschwerdefreiheit wurde die Diagnose Handgelenksprellung/-distorsion gestellt. Die Behandlung wurde dann an diesem Punkt beendet. Bei Beschwerdepersistenz wurde eine MRT-Untersuchung veranlasst. Bei negativem Befund wurden die Patienten aus der Behandlung entlassen. Bei Nachweis eines pathologischen Befundes erfolgte eine entsprechende Therapie.

Bei 56 (48,7%) der Patienten in unserem Studienkollektiv konnte eine Skaphoidfraktur entweder durch Röntgen oder MRT nachgewiesen werden. Diese Patienten wurden in der Auswertung in die „endgültige“ Frakturgruppe eingeschlossen. Der Endpunkt der retrospektiven Auswertung der Patienten in dieser Gruppe war der Nachweis einer erfolgreichen Behandlung im Sinne einer vollständigen Heilung der Fraktur. Nachgewiesen wurde dies durch das Bestehen klinischer Beschwerdefreiheit sowie eines vollen Funktionsausmaßes der betroffenen Hand und ggf. eine beginnende Konsolidierung im Röntgenbild.

Das Studienkollektiv unterteilt sich demnach in zwei Teilgruppen:

- Patienten mit nachgewiesener Skaphoidfraktur (Anzahl: 56)
- Patienten ohne nachgewiesene Skaphoidfraktur (Anzahl: 59)

Letztere kann erneut in drei Untergruppen von Patienten unterteilt werden:

- Beschwerdefreiheit bei der 1. klinischen Kontrolle oder nach kurzer weiterer Ruhigstellung und Freigabe ohne sekundäre Bildgebung (Anzahl: 32)
- Beschwerdepersistenz bei der 1. klinischen Kontrolle und Durchführung einer sekundären Bildgebung (MRT) ohne Nachweis einer Fraktur (Anzahl: 11)
- Nachweis einer anderen Verletzung in der Bildgebung (Röntgen und/oder MRT) (Anzahl: 16)

3.3 Nachuntersuchungen und Befragungen

Die Nachuntersuchungen und Befragungen fanden in einem Zeitraum zwischen Mai 2017 und Dezember 2017 statt. Die mittlere Zeit zwischen Erstvorstellung

in der Klinik und Follow-up betrug 71,1 Monate bzw. 5,9 Jahre (min. 33 Monate, max. 156 Monate).

Alle Patienten mit bestätigter Skaphoidfraktur wurden über ein Anschreiben per Post zu einer klinischen Nachuntersuchung in unserer Klinik eingeladen. Die Erstanschrift erfolgte im April 2017. Um die Teilnahmebereitschaft zu erhöhen, erfolgten ca. 6 Monate danach bis zu fünf telefonische Kontaktversuche.

Von den 56 Patienten mit nachgewiesener Skaphoidfraktur konnten 7 (12,5%) klinisch nachuntersucht werden. Alle Nichtteilnehmer wurden anschließend telefonisch kontaktiert. 23 Patienten (41,1%) nahmen an einer telefonischen Befragung teil. 26 (46,4%) konnten nicht erreicht werden.

Über die Nachuntersuchung und Befragung wurden die Langzeitergebnisse der aufgrund einer Skaphoidfraktur behandelten Patienten ermittelt. So sollte die in unserer Klinik durchgeführte Therapie überprüft und validiert werden. Es wurde auf Hinweise auf mögliche Komplikationen einer nicht erfolgten Heilung der Skaphoidfraktur, wie Pseudarthrose und avaskuläre Nekrose, geachtet.

Im Rahmen der Nachuntersuchung wurde die Hand auf folgende klinische Zeichen hin überprüft:

- Druckschmerz in der anatomischen Tabatière
- Daumenstauchungsschmerz
- Schmerzen bei Extension/Flexion und Pro-/Supination im Handgelenk
- Schmerzen bei Faustschluss
- Bewegungseinschränkungen im Handgelenk im Vergleich zur Gegenseite: Überprüfung von Extension/Flexion und Pro-/Supination, Radial- und Ulnardeviation
- Griffstärke im Vergleich zur Gegenseite

Befragt wurden die Patienten zu:

- Unfallursache und –mechanismus
- Ruhigstellung im Gips: Beschwerden und Einschränkungen im Alltag
- Allgemeine Zufriedenheit mit der Therapie
- Schmerzen nach Abschluss der Behandlung
- Häufigkeit, Dauer und Auslöser der Beschwerden (falls vorhanden)

- Ruheschmerzen im Handgelenk
- Einschränkungen bei Alltagsaktivitäten
- Subjektive Einschränkungen der Beweglichkeit und Belastbarkeit der betroffenen Hand
- Weitere Klinikbesuche oder Behandlungen aufgrund von Handgelenksbeschwerden
- Schmerzen im Handgelenk zum Zeitpunkt der Befragung

Die Befragung erfolgte dabei anhand eines von uns erstellten Fragebogens.

Bei vorhandenen Beschwerden konnten die Patienten anschließend auf freiwilliger Basis eine weiterführende Diagnostik in Anspruch nehmen.

3.4 Statistische Auswertung

Die Auswertung der Daten erfolgte in Microsoft Excel 2008. Weitere statistische Analysen wurden in der freien Statistik-Software „R“ [197] durchgeführt (siehe die Ergebnisse in den Kapiteln 4.1.1 und 4.1.2). Technische Unterstützung und Validierung der Ergebnisse erfolgte durch Univ. Doz. Dr. Hannes Kazianka.

3.5 Ethik

Die vorliegende Studie wurde von der Ethikkommission der Medizinischen Fakultät der LMU München genehmigt (siehe Anhang 4). Die Auswertung der Studiendaten erfolgte anonymisiert. Eine Einverständniserklärung von den Patienten bzw. deren Eltern liegt vor, zusätzlich wurde ein Informationsblatt zur Studie postalisch an alle Studienteilnehmer geschickt.

4 Ergebnisse

Insgesamt wurde in dem Zeitraum von 12 Jahren bei 158 Patienten eine radiologische Diagnostik durchgeführt, da bei der klinischen Untersuchung der Verdacht auf eine Skaphoidfraktur bestand. 43 davon mussten (sofern nicht explizit anders angegeben, siehe Kapitel 4.1.1 und 4.1.2) auf Grund unvollständiger Follow-up-Daten ausgeschlossen werden, womit 115 Patienten in der Studie verblieben. Davon waren 46 (40%) Mädchen und 69 (60%)

Jungen. Das mittlere Alter bei Verletzung lag bei 12,03 Jahren (Spanne 7-17 Jahre).

Bei der initialen Röntgenuntersuchung wurde bei 21 der 115 Patienten (18,3%) eine Fraktur des Kahnbeins festgestellt. Davon hatten drei dieser 21 Patienten eine oder mehrere begleitende Frakturen im Bereich des Handgelenks (siehe Kapitel (4.1.4). Bei 29 Patienten (25,2%) war der initiale radiologische Befund verdächtig auf eine Kahnbeinfraktur, ohne eindeutig erkennbare Frakturlinie. Bei 5 Patienten (4,3%) wurden andere knöcherne Verletzungen nachgewiesen, darunter drei Frakturen des distalen Radius und zwei Frakturen jeweils der Basis des ersten oder zweiten Mittelhandknochens. Bei den restlichen 60 Patienten (52,2%) konnte im initialen Röntgenbild keine Fraktur nachgewiesen werden.

Die erste klinische Kontrolluntersuchung fand im Mittel nach 7,1 Tagen statt. 23 Patienten (20%) waren zu diesem Zeitpunkt vollkommen beschwerdefrei. Es wurde die Diagnose einer Handgelenksprellung gestellt und die Behandlung beendet. Nur bei einem dieser Patienten wurde vor Freigabe eine erneute Röntgenuntersuchung durchgeführt. 9 Patienten (7,8%) wiesen bei der Kontrolluntersuchung nur sehr leichte Beschwerden auf, weshalb das Handgelenk von 6 dieser Kinder noch für durchschnittlich 7,6 weitere Tage ruhiggestellt wurde bevor Beschwerdefreiheit festgestellt wurde. 3 Kinder wurden mit einem Voltaren-Salben-Verband entlassen und angewiesen, sich bei Verschlechterung erneut vorzustellen.

Wegen persistierender Beschwerden im Bereich des Handgelenks bei der ersten klinischen Kontrolluntersuchung wurden bei 49 Patienten (42,6%) MRT Untersuchungen durchgeführt. 7 Kinder (6,1%) erhielten bereits vor der ersten Kontrolluntersuchung eine Bildgebung mittels MRT. Bei 4 der 21 Patienten mit bereits im Röntgen nachgewiesener Skaphoidfraktur wurde anschließend noch eine MRT zur Bestätigung der Fraktur angeschlossen. Insgesamt wurden demnach bei 60 der 115 Patienten (52,2%) MRT Untersuchungen durchgeführt. Die mittlere zeitliche Differenz zwischen Erstvorstellung und MRT betrug 11,3 Tage.

Bei 38 der 60 mittels MRT untersuchten Patienten (63,3%) konnte eine Skaphoidfraktur bei der Untersuchung diagnostiziert werden. Bei 6 dieser 38 Patienten wurde eine zusätzliche Fraktur im Bereich des Handgelenks festgestellt (siehe Kapitel 4.1.4). 22 (36,7%) hatten keine Skaphoidfraktur. Bei 11 dieser 22 Kinder, wurden andere Verletzungen der Hand festgestellt (siehe Tab. 2). Davon hatten 5 Kinder eine oder mehrere Frakturen im Bereich des Handgelenks. Bei einem Patienten (0,9%) wurde eine Fraktur des Skaphoids mittels CT nachgewiesen.

MRT Diagnose	Anzahl Patienten
Distale Radius Fraktur	3
Distale Radius Fraktur + Os trapezium Fraktur	1
MC 2 Basis Fraktur	1
bone bruise distaler Radius	2
bone bruise distaler Radius + Ulna	1
bone bruise MC 2-5 + Os hamatum + Os trapezoideum	1
Lunatummalazie	1
Kapselverletzung Daumensattelgelenk	1

Tab. 2: MRT Diagnose bei anderen Verletzungen der Hand außer Skaphoidfraktur

Die Verteilung aller mittels Röntgen oder MRT diagnostizierter Frakturen im Bereich des Handgelenks zeigt Abb. 20.



Abb. 20: Verteilung von 78 diagnostizierten Frakturen in 115 Handgelenken

(modifiziert aus PediRad, Universität Bern 2016 <http://e-learning.studmed.unibe.ch/pedirad/htmls/slide.html?pedirad|pediradsk|devreg|skeldevhand|2,28.09.2019>)

Insgesamt konnte der klinische Verdacht auf eine Skaphoidfraktur bei 56 (48,7%) der 115 Patienten bestätigt werden. Bei 43 (37,4%) Kindern wurde weder eine Skaphoidfraktur noch eine andere spezifische Verletzung im Bereich des Handgelenks festgestellt. Bei 16 (13,9%) Patienten wurden andere Verletzungen diagnostiziert. (siehe Abb. 21)

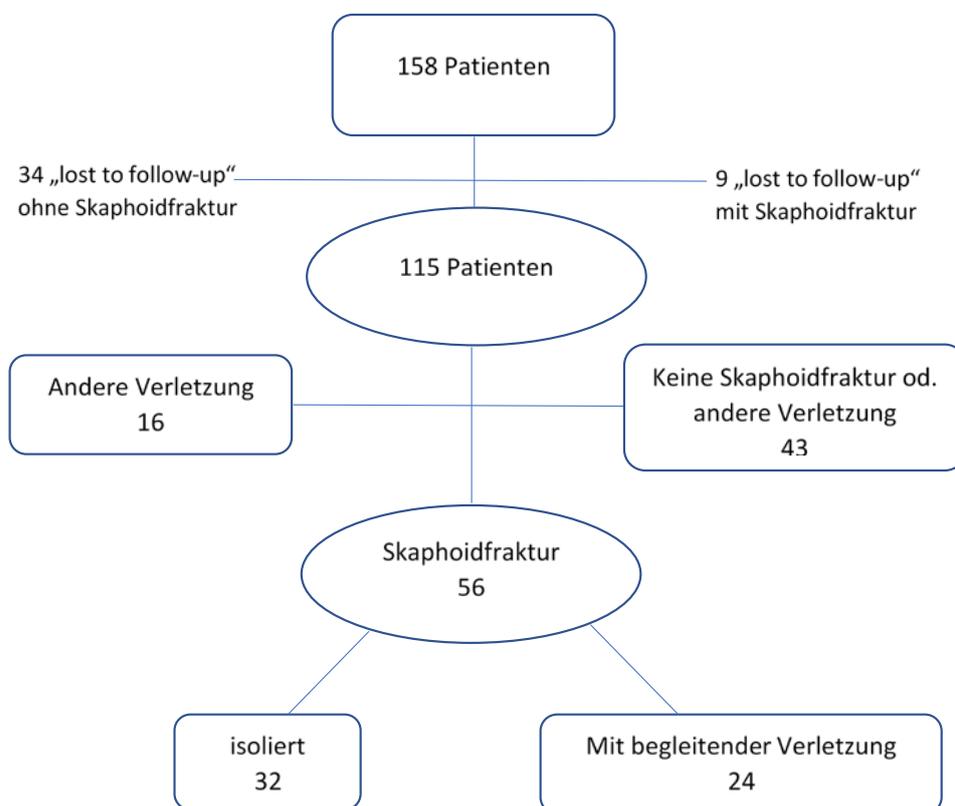


Abb. 21: Verteilung des Studienkollektivs

4.1 Patienten mit Skaphoidfraktur

Bei 56 Patienten wurde eine Fraktur des Skaphoids nachgewiesen, davon 16 bei Mädchen und 40 bei Jungen. Mit einem Geschlechterverhältnis M:W von 2,5:1 (71,4%:28,6%) waren Jungen demnach deutlich häufiger betroffen. Ausschließlich in einem Alter von 9-10 Jahren überwog der Mädchenanteil. Die Verteilung der Patienten nach Alter und Geschlecht zeigt Abb. 22.

Das mittlere Alter bei Verletzung lag bei 12,4 Jahren (12,1 Jahre bei Mädchen, 12,4 Jahre bei Jungen). Der jüngste Patient war 9 Jahre und 2 Monate alt, der älteste 17 Jahre und 6 Monate. 29 (51,8%) hatten eine Fraktur des Skaphoids der linken Hand, 27 (48,2%) der rechten Hand.

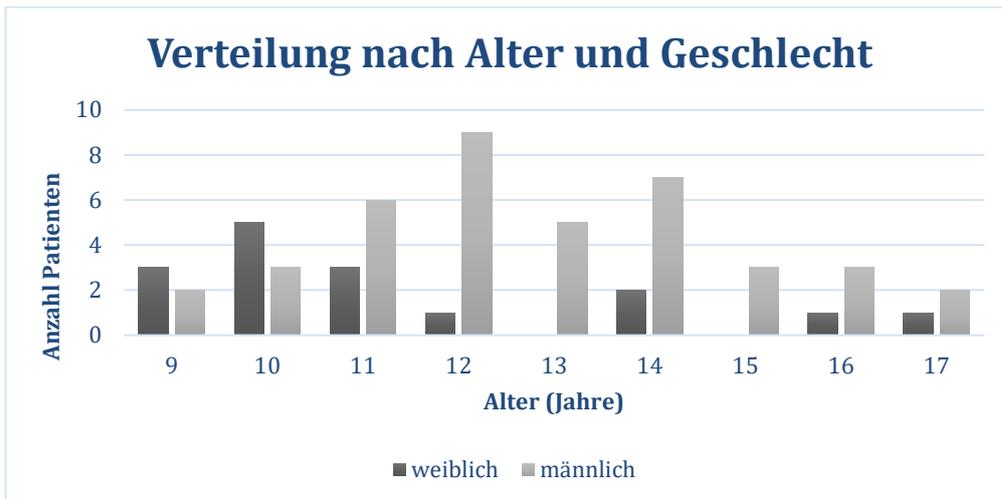


Abb. 22: Alter- und Geschlechterverteilung der Patienten mit Skaphoidfrakturen (n=56)

36 Kinder stellten sich gleich am Unfalltag (Tag 0) in der Klinik vor, 16 am Folgetag (Tag 1). Drei Kinder wurden am Tag 2 und ein Kind erst 21 Tage nach dem Unfall vorstellig. Die mittlere zeitliche Verzögerung zwischen Unfallzeitpunkt und Erstvorstellung betrug demnach 0,8 Tage.

27 (48,2%) Patienten verletzten sich bei sportlichen Aktivitäten. Davon stellten Fahrrad- und Rollerfahren die häufigsten Ursachen dar (siehe Abb. 23). In den meisten Fällen (50 Patienten, 89,3%) war ein Sturz auf die Hand ursächlich. 4 Kinder erlitten ein Anpralltrauma der Hand gegen einen festen Gegenstand, bei 2 Kindern erfolgte der Anprall durch ein bewegliches Objekt. Bei 27 (48,2%) Patienten wurde der klassische Unfallmechanismus als ein Sturz auf die dorsalextendierte Hand angegeben.

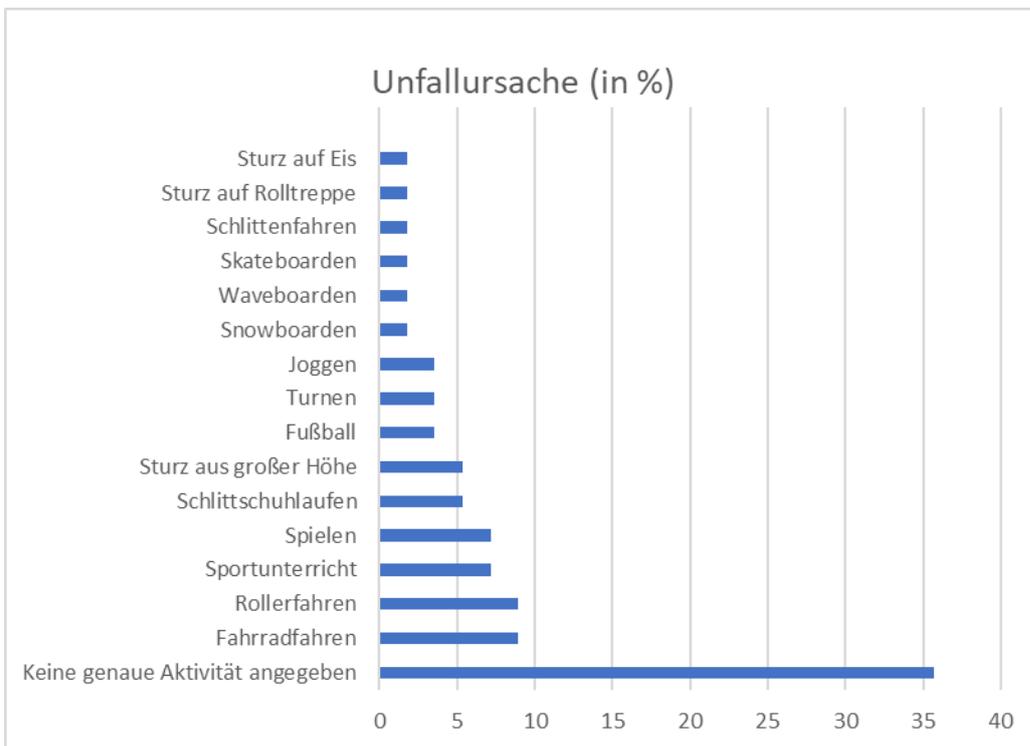


Abb. 23: Unfallursachen (in %) aller Patienten mit Skaphoidfrakturen (n=56)

4.1.1 Diagnostik

Bei der körperlichen Untersuchung wurde bei 46 (82,1%) Patienten ein Druckschmerz im Bereich der Tabatière dokumentiert, bei 21 (37,5%) Patienten zusätzlich ein Druckschmerz über dem distalen Radius. In 24 (42,9%) Fällen wurde eine Schwellung über dem Handgelenk beobachtet. Ein Daumenstauchungsschmerz wurde in 3 (5,4%) Fällen dokumentiert, ein Druckschmerz palmar über dem Skaphoid in 4 (7,1%) Fällen und Schmerzen bei Extension und Flexion im Handgelenk in 11 (19,6%) Fällen.

Bei allen Patienten wurden zur primären Frakturabklärung Röntgenbilder des Handgelenks in 2 Ebenen durchgeführt. Bei 43 (76,8%) Kindern wurden zusätzlich Kahnbeinzielaufnahmen durchgeführt. Nur bei 21 (37,5%) der 56 Patienten konnte die Skaphoidfraktur bereits im initialen Röntgenbild eindeutig nachgewiesen werden. Bei 34 (60,7%) Kindern war eine Fraktur des Skaphoids erst in den MRT-Aufnahmen zu sehen. Bei einem (1,8%) Patienten erfolgte die Diagnostik mittels CT.

Von den 29 Kindern mit röntgenologischem Verdacht auf eine Kahnbeinfraktur konnte dieser nach anschließender MRT bei 22 (75,9%) Kindern bestätigt werden.

Insgesamt wurden bei 20 (35,7%) Patienten zusätzliche Röntgenaufnahmen im Verlauf durchgeführt.

Bei 39 (69,6%) Patienten wurde nach Gipsabnahme und vor Freigabe erneut ein Röntgenbild angefertigt. Auf 34 Aufnahmen war eine Sklerosierungslinie im Skaphoid als Zeichen der Konsolidierung der Fraktur zu erkennen. Auf den restlichen 5 Aufnahmen stellte sich das Skaphoid unauffällig dar, ohne dass eine Sklerosierungs- oder Frakturlinie abzugrenzen war. Die übrigen 17 (30,4%) Patienten wurden bei Beschwerdefreiheit ohne erneute Röntgendiagnostik aus der Behandlung entlassen.

Bei den beiden operativ versorgten Patienten wurden weitere Röntgenaufnahmen zur Kontrolle des Fremdmaterials und der Knochenstellung durchgeführt.

4.1.2 Frakturlokalisierung

24 (42,9%) Frakturen waren im distalen Pol lokalisiert, 17 (30,4%) am Übergang von der Taille zum distalem Pol, 11 (19,6%) im Bereich der Taille und 4 (7,1%) am Übergang von der Taille zum proximalen Pol (siehe Abb. 24). 54 (96,4%) Frakturen waren undisloziert, während bei den 2 übrigen Patienten dislozierte Frakturen vorlagen.

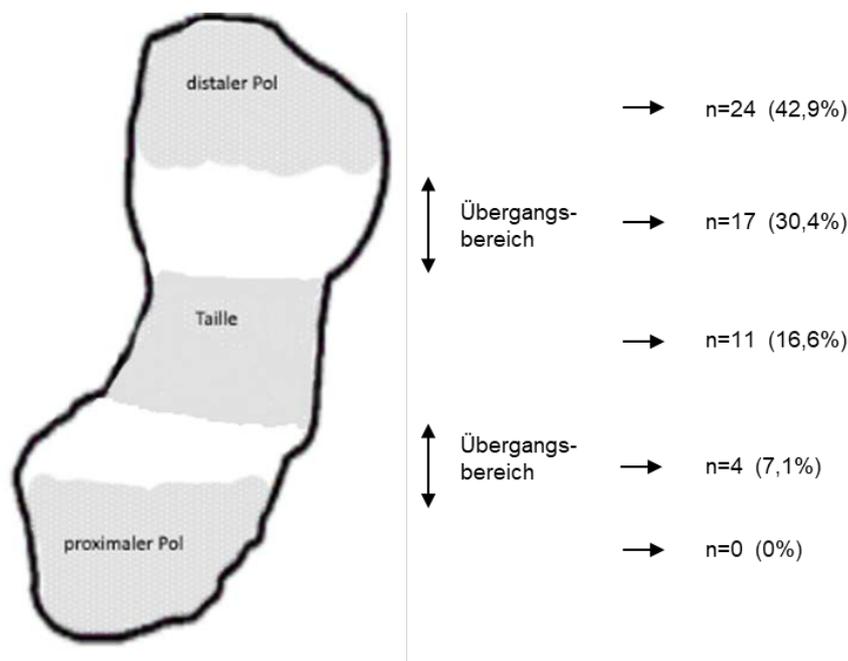


Abb. 24: Frakturlokalisation im Skaphoid

4.1.3 Therapie

Bis auf 2 Kinder, erhielten alle Patienten (96,4%) eine konservative Therapie mittels Ruhigstellung des Handgelenks im Ober- oder Unterarmgips mit Daumeneinschluss. 9 Kinder erhielten zuerst einen Oberarmgips, welcher nach durchschnittlich 3,5 Wochen gegen einen Unterarmgips getauscht wurde. Bei allen anderen Patienten erfolgte die Immobilisation gleich von Beginn an im Unterarmgips.

Die Dauer der Ruhigstellung betrug im Mittel 51,8 Tage (7,4 Wochen). Die minimale Dauer betrug 31 Tage (4,4 Wochen), die maximale Dauer 81 Tage (11,6 Wochen). Nach der bei Diagnosestellung angesetzten Dauer der Ruhigstellung waren 47 (87%) der 54 Kinder beschwerdefrei (minimale Dauer 31 Tage, maximale Dauer 70 Tage). 7 (13%) Patienten hatten persistierende Druck- und/oder Bewegungsschmerzen im Bereich des Handgelenks. Bei diesen Patienten wurde die Ruhigstellung um durchschnittlich 14,1 Tage (2 Wochen) verlängert, bevor Beschwerdefreiheit eintrat.

Eine operative Therapie war bei 2 Patienten (3,6%) notwendig.

Ein 12-jähriger Patient erlitt durch einen Sturz auf die dorsalextendierte Hand beim Schlittensfahren Frakturen der gesamten proximalen Handwurzelreihe.

Präoperativ erfolgte eine CT Untersuchung. Die Skaphoidfraktur verlief mittig im Bereich der Taille und war gering dehiszent (1 mm). Die Frakturen des Os lunatum und triquetrum waren ebenfalls disloziert. Die Osteosynthese der Skaphoidfraktur erfolgte mittels Herbert-Schraube. Nach Ruhigstellung im Gips über einige Wochen war der Patient vollkommen beschwerdefrei.

Der zweite Patient war zum Unfallzeitpunkt 17 Jahre alt und stürzte von einem Baum aus 2 Meter Höhe auf die Hand. Dabei erlitt er eine Luxationsfraktur der linken Handwurzel mit dislozierten Skaphoid- und Os capitatum Frakturen, Ruptur des LT-Bandes sowie distaler Radiusfraktur. Die Skaphoidfraktur sowie die Fraktur des Os capitatum wurden offen reponiert und mittels Kompressionsschraubenosteosynthese mit Herbert-Schraube versorgt. Zudem erfolgten eine temporäre Arthrodese von Os lunatum und Os triquetrum mittels zweier Bohrdrähte sowie eine Naht des LT-Bandes. Die distale Radiusfraktur wurde offen reponiert, eine Osteosynthese war nicht erforderlich. Postoperativ erfolgte eine Immobilisation im Gips über 6 Wochen sowie eine anschließende Physiotherapie.

Nach Beendigung der Therapie und Freigabe stellten sich 6 (10,7%) Patienten aufgrund von Beschwerden im Handgelenk erneut in unserer Klinik vor. Die Wiedervorstellung erfolgte im Mittel nach 9 Monaten (269,5 Tagen). Bei keinem der Patienten konnten in erneut angefertigten Röntgenaufnahmen des Handgelenks Hinweise auf Pseudarthrose oder avaskuläre Nekrose gesehen werden.

- Eine zum Unfallzeitpunkt 17 Jahre alte Patientin mit einer Fraktur am Übergang vom distalen zum mittleren Drittel des Skaphoids litt nach insgesamt 81-tägiger Ruhigstellung immer noch unter progredienten Bewegungsschmerzen im rechten Handgelenk sowie unter Schmerzen bei Belastung. Sie wurde physiotherapeutisch nachbehandelt. Da eine Besserung der Beschwerden ausblieb wurde die Patientin sowohl in der Schmerzambulanz als auch beim Orthopäden vorstellig. Durch das intermittierende Tragen einer abnehmbaren Unterarmschiene bei Schmerzen im Handgelenk konnte eine Besserung erzielt werden.
- Eine zum Unfallzeitpunkt 10 Jahre alte Patientin mit einer Fraktur am Übergang vom distalen zum mittleren Drittel des Skaphoids und zusätzlicher Fraktur des Os capitatum gab 5,5 Monate nach

Behandlungsabschluss intermittierende Schmerzen im Bereich der linken Handwurzel an. Es wurde keine weitere Therapie veranlasst und die Patientin war nach weiteren 7 Monaten vollkommen beschwerdefrei.

- Ein zum Unfallzeitpunkt 9 Jahre alter Patient mit distaler Skaphoidfraktur stellte sich 2 Wochen nach Freigabe erneut wegen Schmerzen sowie schlechter Belastbarkeit und Verkrampfungen der rechten Hand vor. Durch die Durchführung einer Ergotherapie konnte Beschwerdefreiheit erreicht werden.
- Der Patient mit operativ versorgter Luxationsfraktur der linken Handwurzel wurde nach rund 3 Jahren und 9 Monaten erneut in unserer Klinik vorstellig. Die von ihm beschriebenen Schmerzen sowie die schlechte Belastbarkeit des Handgelenks, vor allem beim Heben schwerer Lasten, bestanden auch noch zum Zeitpunkt der telefonischen Follow-up Befragung (8,3 Jahre nach Verletzung).
- Eine zum Unfallzeitpunkt 16-jährige Patientin und ein 17-jähriger Patient stellten sich nach jeweils 56 und 14 Tagen erneut wegen intermittierenden Bewegungsschmerzen des betroffenen Handgelenks vor. Diese Patienten erschienen im Anschluss nicht mehr in unserer Klinik, weshalb der weitere Verlauf unbekannt ist.

4.1.4 Begleitverletzungen

Bei 24 (42,9%) Patienten konnten eine oder mehrere zusätzliche Verletzungen im Bereich desselben Handgelenks nachgewiesen werden. Davon hatten 9 Kinder eine oder mehrere zusätzliche Frakturen im Bereich des Handgelenks (siehe Tab. 3). 2 Patienten hatten dabei mehr als eine begleitende Fraktur. Die häufigste knöcherner Begleitverletzung war eine Fraktur des Os capitatum (bei 10,7% aller Patienten mit Skaphoidfrakturen). Bei 7 Patienten wurden mittels MRT zusätzliche „bone bruise“ Läsionen bei ein oder mehr Knochen im Handgelenksbereich (distaler Radius, Os trapezium, Os capitatum und Os lunatum) diagnostiziert. Die mittlere Ruhigstellung betrug bei Patienten mit knöchernen Begleitverletzungen (Fraktur oder „bone bruise“) 50,5 Tage, während sie bei Patienten ohne zusätzliche knöcherner Läsionen 48,5 Tage betrug.

Bei 10 Patienten wurden im MRT begleitende Band- oder Diskusläsionen erkannt. Am häufigsten waren dabei Läsionen des SL-Bandes (4 Patienten), gefolgt von TFCC-Läsionen (3 Patienten). Weiters wurden eine Ruptur des radioscaphoidalen Ligaments, eine Läsion des radialen Kollateralbandes und der dorsalen interkarpalen Ligamente festgestellt.

begleitende Fraktur	Anzahl Patienten
Os capitatum	6
Os lunatum	1
Os triquetrum	1
Os trapezium	1
distaler Radius	2

Tab. 3: Patienten mit Skaphoidfraktur und begleitender Fraktur

Die Verteilung und Anzahl von Frakturen des Skaphoids, Os capitatum und distalen Radius bei den 115 Patienten des Studienkollektivs zeigt Abb. 25.

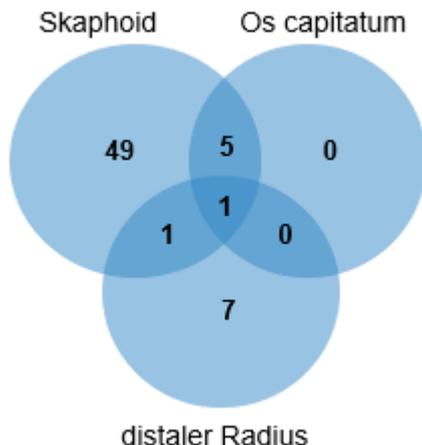


Abb. 25: Die Verteilung von Frakturen des Skaphoids, Os capitatum und distalen Radius bei 115 Patienten mit posttraumatischen Schmerzen im Handgelenk

4.2 Vergleich von Patientengruppen

Von den insgesamt 115 Patienten, bei denen nach der klinischen Erstuntersuchung der Verdacht auf eine Skaphoidfraktur bestand, wurde bei 48,7% eine Skaphoidfraktur im Verlauf bestätigt. Bei 37,4% wurde die Diagnose einer Handgelenksprellung gestellt, da weder eine Skaphoidfraktur noch eine

andere spezifische Verletzung der Hand nachgewiesen werden konnten. Diese beiden Gruppen waren ähnlich in Bezug auf mittleres Alter, mittlere Zeitdauer zwischen Unfall und Erstuntersuchung, mittlere Zeitdauer bis zur ersten Kontrolluntersuchung und mittlere zeitliche Differenz zwischen Erstvorstellung und MRT. Unterschiede zwischen den beiden Gruppen bestanden vor allem in der deutlich längeren Dauer der Ruhigstellung bei den Patienten mit Skaphoidfrakturen. Des Weiteren war der Anteil an Jungen in der Frakturgruppe höher.

	keine Skaphoidfraktur und keine andere Verletzung	Skaphoidfraktur
Anzahl	43	56
mittleres Alter (Jahre)	11,9	12,4
Anteil an Jungen (%)	48,8	71,4
mittlere Zeitdauer zw. Unfall und Erstvorstellung (Tage)	1,6	0,8
mittlere Zeitdauer bis zur 1. Kontrolluntersuchung (Tage)	6,8	7,1
Anzahl Kahnbeinzielaufnahmen Röntgen	33	43
Anzahl MRT	11	38
mittlere zeitl. Differenz zw. Erstvorstellung und MRT (Tage)	9,5	11,1
mittlere Dauer der Ruhigstellung (Tage)	9,7	51,8
Wiedervorstellung nach Freigabe wegen Beschwerden	0	6

Tab. 4: Vergleich von Patienten mit Skaphoidfraktur (n=56) und Patienten mit Handgelenksprellung (n=43)

4.3 Vergleich von Röntgen- und MRT-Aufnahmen

Bei insgesamt 60 Patienten wurden sowohl Röntgen- als auch MRT-Untersuchungen durchgeführt. Bei 89,5% der Patienten, bei denen eine Skaphoidfraktur im MRT nachgewiesen wurde, war der Befund der initialen Röntgenbilder negativ oder inkonklusiv. Bei 81,5% der Patienten mit Verdacht auf Skaphoidfraktur in den Röntgenaufnahmen konnte dieser durch die MRT bestätigt werden.

Bei 56 Patienten wurde die MRT aufgrund von negativen oder uneindeutigen Röntgenbefunden durchgeführt. Die Häufigkeit von okkulten Skaphoidfrakturen betrug 60,7%. Bei allen 4 Patienten mit bereits im Röntgenbild diagnostizierter Skaphoidfraktur konnte dieser Befund durch eine MRT-Aufnahme bestätigt werden.

Röntgen-Befund (n)	MRT-Befund (n)
keine Skaphoidfraktur (29)	Skaphoidfraktur (12) normal (6) Ganglionzysten (2) Distale Radius Fraktur (2) Distale Radius Fraktur + Os trapezium Fraktur (1) MC 2 Basis Fraktur (1) bone bruise dist. Radius (2) bone bruise MC 2-5 + Os hamat. + os trapezoid. (1) Lunatummalazie (1) Kapselverletzung Daumensattelgelenk (1)
Verdacht auf Skaphoidfraktur (27)	Skaphoidfraktur (22) normal (3) bone bruise distaler Radius + Ulna (1) Distale Radius Fraktur (1)
Skaphoidfraktur (4)	Skaphoidfraktur (4)

Tab. 5: Vergleich von Röntgen- und MRT-Befunden

4.3.1 Kahnbeinzielaufnahme

Insgesamt wurden bei 86 der 115 Patienten (74,8%) Kahnbeinzielaufnahmen durchgeführt. Von den 43 Patienten mit Skaphoidfrakturen, bei denen eine Zielaufnahme durchgeführt wurde, war diese in 15 (34,9%) Fällen positiv. Bei 2 dieser Patienten war die Frakturlinie nur auf der Kahnbeinzielaufnahme und nicht auf den Röntgenbildern in 2 Ebenen zu sehen.

Bei insgesamt 22 der 115 Patienten (19,1%) bestand auf der Kahnbeinzielaufnahme der Verdacht auf eine Kahnbeinfraktur. Dieser bestätigte sich in 19 (86,4%) der Fälle durch eine MRT Aufnahme.

4.4 Nachuntersuchungen

Insgesamt konnten 30 (53,6%) der 56 per Post angeschriebenen Patienten nachverfolgt werden. 7 Patienten (12,5%) sind zu einer klinischen Nachuntersuchung in unsere Klinik gekommen und 23 Patienten (41,1%) wurden telefonisch befragt. Die mittlere Zeitdauer von der Erstvorstellung bis zur Nachuntersuchung bzw. Befragung betrug 71,1 Monate / 5,9 Jahre (min. 33 Monate, max. 156 Monate).

18 der Patienten waren Jungen und 12 Mädchen. Das mittlere Alter der Patienten bei Follow-up betrug 18,5 Jahre. Die jüngste Patientin war zu diesem Zeitpunkt 13 Jahre alt, der älteste Patient 26 Jahre und 10 Monate.

4.4.1 Befragungen

30 Patienten wurden standardisiert anhand eines entsprechenden Fragebogens (siehe Kapitel 13 Anhang 3) befragt, davon 7 bei der funktionellen Nachuntersuchung in unserer Klinik und 23 telefonisch.

- **Therapie:**

11 (36,7%) Patienten berichteten von leichten Beschwerden im Gips, 17 (56,7%) hatten keinerlei Beschwerden. Zu den leichten Beschwerden zählten Juckreiz (9 Patienten), Hitzegefühl (3 Patienten) und Druckstellen am Oberarm bei Beugung (2 Patienten).

Der Großteil der Patienten (26 bzw. 86,7%) fühlte sich durch den Gipsverband im Alltag nicht beeinträchtigt. 2 Patienten (6,7%) fühlten sich leicht beeinträchtigt. 2 (6,7%) Patienten konnten zur Behandlung im Gips keine genauen Angaben machen.

Ein Gipswechsel aufgrund von beschädigtem oder schmerzhaftem Gipsverband war in 7 Fällen notwendig.

Alle Patienten (100%) gaben Zufriedenheit mit der Therapie an.

- Schmerzen oder Beeinträchtigungen des betroffenen Handgelenks:
22 (73,3%) Patienten berichteten von vollständiger Beschwerdefreiheit. 8 (26,7%) Patienten gaben Beschwerden an. (siehe Tab. 6) Davon fühlten sich 3 durch die Beschwerden in ihren Alltagsaktivitäten eingeschränkt. Die Patienten mit Beschwerden ohne Beeinträchtigung im Alltag berichteten vom intermittierenden Auftreten leichter stechender Schmerzen im Handgelenk, vor allem bei besonderer Belastung der Hand (häufig bei sportlichen Aktivitäten wie bspw. Fahrradfahren, Turnen am Reck oder Gewichtheben).

Beurteilung	Anzahl Patienten
keine Beschwerden	22 (73,3%)
Schmerzen ohne Beeinträchtigung im Alltag	5 (16,7%)
Schmerzen mit leichter Beeinträchtigung im Alltag	2 (6,7%)
Schmerzen mit starker Beeinträchtigung im Alltag	1 (3,3%)

Tab. 6: Einteilung der Patienten in Bezug auf Beschwerden und Beeinträchtigung im Alltag

Vier (13,3%) der 30 Patienten beschrieben ein häufigeres „Knacken“ bei Handgelenksbewegungen im Vergleich zu der gesunden Hand. Zwei (6,7%) Patienten entwickelten Ganglionzysten im Bereich des betroffenen Handgelenks, welche bei einer Patientin operativ entfernt wurde und bei dem zweiten Patienten keiner weiteren Therapie bedurfte.

Patienten	1	2	3	4	5	6	7
Druckschmerz Tabatière	+	+	-	-	-	-	-
Daumenstauchungsschmerz	+	-	-	-	-	-	-
Schmerz bei Extension/Flexion im Handgelenk	-	-	-	-	-	-	-
Schmerz bei Pro-/Supination im Handgelenk	-	-	-	-	-	-	-
Schmerz bei Faustschluss	-	-	-	-	-	-	-
Bewegungseinschränkungen im Handgelenk im Vergleich zur Gegenseite <ul style="list-style-type: none"> • Extension/Flexion • Pro-/Supination • Radial- und Ulnarduktion 	-	-	-	-	-	-	-
Verlust der Griffstärke im Vergleich zur Gegenseite	-	-	-	-	-	-	-

Tab. 7: Befunde bei der klinischen Nachuntersuchung

Bei der klinischen Nachuntersuchung wiesen 2 Patienten Druckschmerzen im Bereich der anatomischen Tabatière auf - einmal in Kombination mit Daumenstauchungsschmerz. Bewegungseinschränkungen im Handgelenk oder ein Verlust der Griffstärke im Vergleich zur Gegenseite waren in keinem der Fälle festzustellen. Keiner der Patienten wies eine Schwellung des Handgelenks oder Störungen der Durchblutung, Sensibilität und Motorik auf.

4.4.2 Fallberichte

Zwei Patienten wiesen bei der körperlichen Untersuchung Druckschmerzen im Bereich der Tabatière auf.

Es handelte sich dabei zum einen um ein 14-jähriges Mädchen, welches annähernd vier Jahre zuvor eine Skaphoidfraktur beim Weitsprung im Schulsport erlitten hatte. Die Fraktur befand sich im Übergang vom distalen zum mittleren Drittel des Knochens. Die Therapie erfolgte konservativ mit einer Ruhigstellung der Hand über 7 Wochen im Gips. Das Mädchen war nach Gipsabnahme beschwerdefrei, berichtete jedoch von mehreren Prellungen derselben Hand, in kurzem zeitlichen Abstand zur Fraktur, die auswärts behandelt wurden. Die Patientin gab persistierende leichte Schmerzen im Handgelenk an, welche sie im Alltag beim Heben und Greifen leicht

einschränkten. Ruheschmerzen, ein Verlust der Beweglichkeit oder ein Kraftverlust der Hand lagen nicht vor.

Zum Zeitpunkt der Nachuntersuchung zeigten sich ein Druckschmerz in der Tabatière sowie ein Stauchungsschmerz des Daumens. Sonstige Untersuchungsbefunde waren unauffällig. Es wurden Röntgenaufnahmen des Handgelenks angefertigt, welche keinen pathologischen Befund ergaben. Vier Wochen später wurde eine MRT Untersuchung durchgeführt. Diese ergab ebenfalls keine Auffälligkeiten. Es wurde eine Schonung der Hand sowie eine Physiotherapie bei ausbleibender Besserung der Beschwerden empfohlen.

Der andere Patient war ein 18-jähriger Junge, welcher sich vor 4,5 Jahren eine Skaphoidfraktur durch einen Sturz beim Laufen zuzog. Die Fraktur verlief im Übergang vom distalen zum mittleren Drittel des Skaphoids und wurde für 8,1 Wochen im Gips ruhiggestellt. Der Patient berichtete von intermittierend auftretenden stechenden und ziehenden Schmerzen im Handgelenk, welche Minuten bis Stunden anhalten und anschließend wieder sistieren. Die Häufigkeit der Beschwerden wurde mit rund zweimal pro Monat angegeben. Als Auslöser nannte er starke Dorsalextension im Handgelenk, wie zum Beispiel beim Aufstützen der Hand. Durch die Schmerzen fühlte sich der Patient im Alltag leicht eingeschränkt. Ruheschmerzen, Bewegungseinschränkungen oder ein Kraftverlust des Handgelenks lagen nicht vor.

Bei der klinischen Nachuntersuchung konnte ein leichter Druckschmerz in der Tabatière festgestellt werden. Sonstige Untersuchungsbefunde waren unauffällig. Es wurden Röntgenaufnahmen der Hand durchgeführt, auf denen kein Hinweis auf eine Pseudarthrose oder anderwärtige Auffälligkeiten gesehen wurden. Es wurde die Durchführung einer MRT empfohlen. Der Patient erschien jedoch im Anschluss nicht mehr in unserer Klinik.

Ein Studienteilnehmer fühlte sich zum Zeitpunkt der telefonischen Befragung durch seine Beschwerden im Alltag stark eingeschränkt. Dabei handelte es sich um einen 25-jährigen Patienten, welcher 8 Jahre zuvor aufgrund einer Luxationsfraktur der Handwurzel operativ behandelt wurde. Nach Angaben des Patienten sei die Hand sehr schlecht belastbar, vor allem beim Tragen von 3–4 kg schweren Lasten, wodurch er in der Ausübung seines Berufs eingeschränkt sei. Des Weiteren berichtete er von Versteifungen der Hand bei Kälte sowie von

Schmerzen im Handgelenk, vor allem bei starker Belastung. Eine Nachuntersuchung lehnte der Patient ab.

4.5 Statistische Auswertung

Im Folgenden werden statistische Auswertungen zusammengefasst, die es zum Ziel haben, patientenspezifische Faktoren bzw. Erstuntersuchungsbefunde zu identifizieren, die eine Skaphoidfraktur wahrscheinlich machen bzw. die zu einer Vorhersage herangezogen werden können. Dazu wurden auch 6 „Lost to follow-up“-Patienten mit durch MRT bestätigter Diagnose (4 mit Fraktur und 2 ohne Fraktur) in die Analyse einbezogen. Alle Auswertungen wurden in der freien Statistik-Software „R“ [197] durchgeführt und verfolgten den Modellansatz einer logistischen Regression mit dem Auftreten einer Skaphoidfraktur als binäre abhängige Variable [198].

In einer univariaten Analyse zeigen sich ein Sturz auf die Hand in Dorsalextension als Unfallmechanismus (p-Wert von 0,006), männliches Geschlecht (p-Wert von 0,018) und Schmerzen bei Flexion und Extension im Handgelenk (p-Wert von 0,037) als signifikante Regressoren, etwas weniger signifikant sind starke Druckschmerzen im Bereich der Tabatière (p-Wert von 0,049). Unfallmechanismus (p-Wert von 0,004), Geschlecht (p-Wert von 0,011) und Schmerzen bei Flexion und Extension (p-Wert von 0,038) bleiben auch in einer multivariaten Analyse signifikant. Zur Beurteilung der Erklärungskraft bzw. Trennschärfe dieser Regression mit drei erklärenden Faktoren wird die Fläche, AUC, unter der sogenannten Receiver-Operating-Characteristic-Kurve [199] (bzw. ROC-Kurve) herangezogen. Dabei besitzt ein Modell mit AUC=1 eine perfekte Erklärungskraft, ein Modell mit AUC=0,5 keine Erklärungskraft und ein Modell mit AUC=0 eine perfekt negative Erklärungskraft. Die Erklärungskraft der vorliegenden Regression beträgt AUC=72,54% und ist mit einem 95%-Konfidenzintervall von [0,6336; 0,8171] signifikant positiv. Das bedeutet, Kenntnis über Unfallmechanismus, Geschlecht und Ergebnisse einer klinischen Erstuntersuchung (hier insbesondere Flexion und Extension im Handgelenk) lassen maßgebliche Rückschlüsse auf eine erhöhte Wahrscheinlichkeit für eine Skaphoidfraktur bereits vor einer Röntgenuntersuchung zu. Dabei sind alle identifizierten Risikofaktoren auch intuitiv nachvollziehbar, beispielsweise

männliches Geschlecht aufgrund der vermutlichen höheren Kraftereinwirkung bei Stürzen durch höheres Gewicht und Präferenz für höherenergetische Sportarten. Es ist denkbar, dass die Auswertung bei Patienten in den jüngeren Altersklassen anders ausfallen würde, da die Skelettreife bei Mädchen früher beginnt als bei Jungen. Auch in unserem Kollektiv gibt es Hinweise, dass Mädchen in einem Alter von 9-10 Jahren häufiger von Skaphoidfrakturen betroffen sind als Jungen. Aufgrund der geringen Anzahl an Patienten in dieser Altersgruppe, war jedoch keine statistisch signifikante Auswertung möglich.

Der Grund, weshalb Druckschmerzen im Bereich der Tabatière, der vermeintlich offensichtlichste erklärende Faktor, im Regressionsmodell keine wesentliche zusätzliche Erklärungskraft bietet, ist dem Studiendesign geschuldet: die überwiegende Mehrheit (80,4%) der für die Analyse relevanten Patienten mit Verdacht auf Skaphoidfraktur weisen diesen Untersuchungsbefund auf und auch das Fehlen der Druckschmerzen im Bereich der Tabatière ist über die Patientengruppen mit und ohne Fraktur ähnlich verteilt.

Röntgenbilder bieten eine wesentliche zusätzliche Information, selbst wenn eine Fraktur nicht unmittelbar diagnostiziert werden kann. Um in diesem Fall die Erklärungskraft von röntgenologischen Befunden zu analysieren (d.h. bei Verdacht auf Fraktur bzw. bei keinem Hinweis auf eine Fraktur), wurde eine Regression auf einer dementsprechend eingeschränkten Datengrundlage durchgeführt. Der Verdacht auf eine Fraktur ist dabei hochsignifikant (p -Wert $< 0,0001$) für die Vorhersage einer Fraktur und weist bereits alleine einen AUC von 71,5% auf. Werden zusätzlich zum Röntgenbefund auch Unfallmechanismus (p -Wert von 0,006) und männliches Geschlecht (p -Wert von 0,040) als weitere erklärende Faktoren in die Regression aufgenommen, erhöht sich die Erklärungskraft nochmals signifikant (p -Wert von 0,006) auf AUC=82,17% mit einem 95%-Konfidenzintervall von [73%; 91,33%]. Abb. 26 zeigt die zugehörige ROC-Kurve, auf der die Sensitivität (gibt an, wie häufig eine Klassifikation bei einem Patienten mit Fraktur korrekt ist) einer auf diesem Regressionsmodell basierenden Entscheidungsregel als Funktion ihrer Spezifität (gibt an, wie häufig eine Klassifikation bei einem Patienten ohne Fraktur korrekt ist) aufgetragen ist.

Die Graphik zeigt einerseits mit dem starken initialen Anstieg der ROC-Kurve die nahezu fehlerfreie Frakturerkennung im Falle von Patienten mit röntgenologischem Verdacht auf Fraktur bei Sturz auf die dorsalextendierte Hand bzw. männlichen Patienten mit Frakturverdacht, andererseits jedoch auch durch die Abschwächung des Anstiegs der Sensitivität die Schwierigkeit der korrekten Erkennung von Frakturen im Falle des Zutreffens von nur einem oder keinem der betrachteten Risikofaktoren (Verdacht auf Fraktur im Röntgenbild, Hand beim Sturz in Dorsalextension bzw. männliches Geschlecht). Dass keine noch höhere Trennschärfe und insbesondere Sensitivität erzielt werden kann, ist insbesondere dem Umstand geschuldet, dass bei 16 von 26 Patienten, bei denen, trotz negativem röntgenologischen Befund, (d.h. ohne Hinweis auf Fraktur) eine MRT durchgeführt wurde, schlussendlich eine Skaphoidfraktur festzustellen war. Selbst bei 3 von 19 weiblichen Patienten mit negativem Röntgenbefund ohne Sturz auf die dorsalextendierte Hand wurde im MRT eine Skaphoidfraktur diagnostiziert.

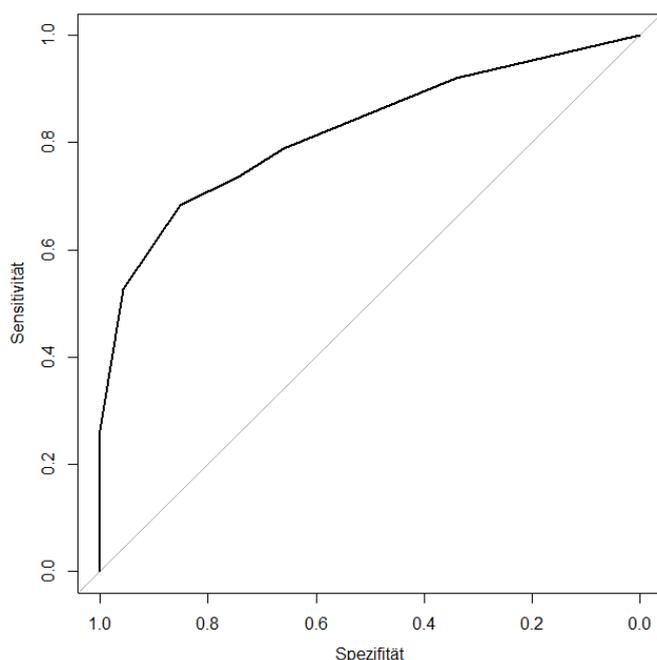


Abb. 26: ROC-Kurve eines Regressionsmodells mit Röntgenbefund, Unfallmechanismus und Geschlecht als Regressoren zur Vorhersage einer Fraktur

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Wahrscheinlichkeit für das tatsächliche Vorliegen einer Skaphoidfraktur hoch ist (rund 76%), wenn röntgenologisch bereits der Verdacht auf eine solche Fraktur besteht, ohne dass eine sichere Frakturlinie nachzuweisen ist. Männliches Geschlecht und ein

Sturz auf die dorsalexthendierte Hand in der Anamnese erhöhen die geschätzte Frakturwahrscheinlichkeit zusätzlich auf rund 94%. Ein Regressionsmodell zur Vorhersage der Frakturwahrscheinlichkeit basierenden auf den genannten drei Risikofaktoren besitzt eine signifikant positive Erklärungskraft. Ein negativer Röntgenbefund ist dagegen wenig spezifisch und kann eine Skaphoidfraktur nicht sicher ausschließen (Frakturwahrscheinlichkeit von trotzdem rund 29%).

Ein weiteres Ziel der statistischen Auswertungen war die Identifizierung eines Zusammenhangs zwischen der Frakturlokalisierung und bestimmten weiteren Faktoren. Ein statistisch signifikanter Zusammenhang konnte zwischen der Frakturlokalisierung und sowohl der Dauer der Ruhigstellung als auch dem Alter der Patienten festgestellt werden (p -Wert = 0.02). Dafür wurden die Patienten zunächst, aufgrund von paarweisen Vergleichen der ursprünglich vier Gruppen von Frakturlokalisationen, in zwei Gruppen zusammengefasst:

1. Lokalisation der Fraktur im distalen Pol oder am Übergang vom distalen Pol zur Skaphoidtaille
2. Lokalisation der Fraktur in der Skaphoidtaille oder am Übergang von der Taille zum proximalen Pol

Alle nachfolgenden statistischen Auswertungen wurden in der freien Statistik-Software „R“ durchgeführt [197].

Die Verteilungen der Dauer der Ruhigstellung der ursprünglichen vier Patientengruppen ist in Abb. 27 veranschaulicht. Die Unterschiede in der mittleren Dauer der Ruhigstellung sind für die beiden zusammengefassten Patientengruppen darin bereits graphisch erkennbar.

Während die Dauer der Ruhigstellung in Gruppe 1 durchschnittlich 7 Wochen betrug, war es notwendig, das Handgelenk der Patienten in Gruppe 2 im Mittel 8 Wochen zu immobilisieren. Zur geeigneten Berücksichtigung der beiden auch im Boxplot separat dargestellten Ausreißer-Beobachtungen und der potenziellen Varianzheterogenität wurde für den statistischen Mittelwertvergleich ein zweiseitiger Wilcoxon-Rangsummentest durchgeführt [200]. Dieser ergibt mit einem p -Wert von 0,026 einen signifikanten Einfluss der Frakturlokalisierung auf die Dauer der Ruhigstellung. Bei Ausschließen der Ausreißer-Beobachtungen aus der Analyse ergeben sowohl der Wilcoxon-Rangsummentest als auch der Welch T-Test einen p -Wert kleiner 0,01.

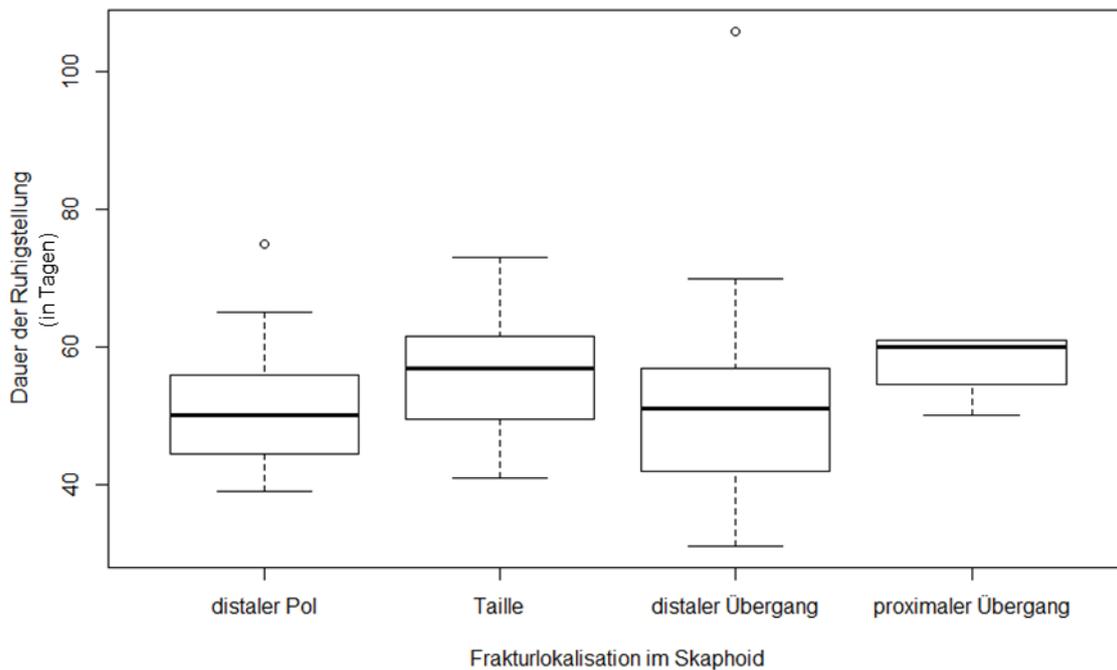


Abb. 27: Boxplot der Dauer der Ruhigstellung in Bezug auf die Frakturlokalisierung im Skaphoid

Zur Beantwortung der Fragestellungen nach dem Zusammenhang zwischen Frakturlokalisierung und Alter bzw. Geschlecht konnten 6 weitere Patienten, die „lost to follow-up“ waren, für die jedoch die Frakturlokalisierung aus Untersuchungen bekannt war, in die Auswertung einbezogen werden. Das mittlere Alter der Patienten in Gruppe 1 betrug 11,9 Jahre, während die Patienten in Gruppe 2 im Durchschnitt 13,3 Jahre alt waren. Aufgrund rechtsschiefer Altersverteilungen und potenzieller Varianzheterogenität wurde auch in dieser Analyse für den statistischen Mittelwertvergleich ein zweiseitiger Wilcoxon-Rangsummentest durchgeführt. Ein p-Wert von 0,023 bezeugt statistisch signifikante Unterschiede im Alter der Patienten bezogen auf die Frakturlokalisierung.

Des Weiteren gibt es auch Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen Geschlecht und Frakturlokalisierung in diesen beiden Gruppen. Skaphoidfrakturen bei Jungen waren demnach relativ gesehen häufiger im Bereich der Taille und am Übergang zum proximalen Pol (Gruppe 2) lokalisiert als bei Mädchen. Allerdings war aufgrund der geringen Datenverfügbarkeit (nicht nur hinsichtlich der Gesamtanzahl an Patienten, sondern auch

hinsichtlich der Anzahl an Mädchen in der Frakturgruppe) keine statistisch hochsignifikante Aussage möglich. In einem logistischen Regressionsmodell mit der Frakturlokalisation als endogene Variable besitzt der das Geschlecht beschreibende Regressor einen p-Wert von 0,08. Ein zweiseitiger Test auf Gleichheit der Anteile für die Gruppenzugehörigkeit bei Mädchen und Jungen weist einen p-Wert von 0,127 auf.

5 Diskussion

Mit der vorliegenden Studie wurde ein retrospektiver Ansatz verfolgt, um Diagnostik und Therapie von Frakturen des Os scaphoideums im Wachstumsalter zu evaluieren. Insgesamt wurden die Daten von 115 Kinder und Jugendlichen in einem Alter von 7 bis 17 Jahren, welche sich in einem kindertraumatologischen Zentrum in München vorgestellt hatten, ausgewertet. Alle hatten posttraumatische Schmerzen im Bereich des Handgelenks. Der klinische Verdacht auf eine Skaphoidfraktur bestätigte sich bei 48,7% der Patienten. Jungen waren 2,5-mal häufiger betroffen als Mädchen. Bei ca. 60% der Patienten zeigte sich die Fraktur erst auf den MRT-Aufnahmen und nicht auf den initialen Röntgenaufnahmen. Weiter distal lokalisierte Frakturen gingen mit einer kürzeren Immobilisationsdauer im Gips einher als Frakturen der Skaphoidtaille und am Übergang zum proximalen Pol.

Follow-up Informationen, durchschnittlich 5,9 Jahre nach Erstvorstellung, liegen zu 53,6% der Patienten mit Skaphoidfrakturen vor. 90% der Teilnehmer waren völlig beschwerdefrei oder gaben nur intermittierend auftretende, leichte Schmerzen ohne Beeinträchtigung im Alltag an. Keiner der Probanden hatte funktionelle Einschränkungen des Handgelenks. Darüber hinaus erfolgte eine Bewertung der durchgeführten Therapie durch die Teilnehmer. Über 90% gaben keine oder nur leichte Beschwerden im Gips an und fühlten sich dadurch nicht im Alltag beeinträchtigt. Alle Patienten gaben Zufriedenheit mit der Therapie an. Die Ergebnisse zeigen, dass Kinder und Jugendliche mit akuter, undislozierter Skaphoidfraktur erfolgreich konservativ mittels Ruhigstellung des Handgelenks im Unterarmgips therapiert werden können.

Eine Besonderheit dieser Studie ist die im Vergleich zu anderen Studien [5, 11, 17, 78, 81, 176, 201] relativ große zeitliche Differenz zwischen dem Zeitpunkt

der Erstvorstellung und dem klinischem Follow-up (5,9 Jahre). So konnten die Langzeitfolgen einer Fraktur des Skaphoids sowie die Auswirkungen auf das tägliche Leben der Patienten beschrieben und damit die Effektivität der durchgeführten Therapie bewertet werden. Zusätzlich wurde in dieser Studie außerdem die Ruhigstellung des Handgelenks im Gips durch die Studienteilnehmer hinsichtlich Einschränkungen im Alltag und Komfort bewertet. Dadurch konnte gezeigt werden, dass die konservative Therapie nicht nur zu einer hohen Heilungsrate der Skaphoidfrakturen führt, sondern auch mit einer hohen Patientenzufriedenheit einhergeht.

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist allerdings die relativ geringe Gesamtgröße des Studienkollektivs zu beachten. Aufgrund der Seltenheit dieser Verletzung im Kindes- und Jugendalter bleibt daher die allgemeine Aussagekraft der Ergebnisse trotz der guten Rücklaufquote von 53,6% beschränkt. Des Weiteren konnte nur ein geringer Teil der Probanden tatsächlich klinisch nachuntersucht werden. Trotzdem wurden einige Patienten zusätzlich telefonisch anhand eines standardisierten Fragebogens befragt. Hierdurch war es uns möglich die Teilnehmeranzahl zu erhöhen. Dies ist aber eine subjektive Form der Beurteilung und könnte durch eine zusätzliche objektive klinische Nachuntersuchung weiter verbessert werden. Die Wahrscheinlichkeit bei subjektiv beschwerdefreien Patienten Auffälligkeiten bei einer klinischen Nachuntersuchung zu finden, ist dennoch als gering anzusehen. Die Teilnehmerate wird reduziert durch die Schwierigkeit der klinischen Nachsorge von beschwerdefreien Patienten nach einer ausgeheilten traumatischen Verletzung, den migratorischen Charakter der adoleszenten Bevölkerung und den Ersatz von Festnetztelefonen durch Mobiltelefone. Da Skaphoidfrakturen häufig im Jugendalter auftreten, befanden sich aufgrund der langen Nachschauzeit ein Großteil der Patienten bereits im Übergang zum Erwachsenenalter. In diesem Lebensabschnitt ist nicht nur ein Wechsel des Wohnorts sondern auch vom Kinderarzt in die hausärztliche Versorgung häufig, was eine Kontaktaufnahme zusätzlich erschwert.

Als weitere Einschränkung ist zu bemerken, dass aufgrund der retrospektiven Natur der Studie 43 Kinder wegen unvollständiger Aufzeichnungen in der Patientenakte von einem Großteil der Auswertung ausgeschlossen werden

mussten. Soweit möglich wurde trotzdem versucht, diese Patienten in einzelne statistische Analysen einzubeziehen. Bei 9 dieser „Lost to Follow-up“-Patienten wurde anfänglich eine Skaphoidfraktur beschrieben. Der weitere Verlauf ist nicht bekannt.

Des Weiteren konnte nicht mit absoluter Sicherheit geklärt werden, ob auch wirklich keine Skaphoidfraktur übersehen wurde. Dazu wäre ein zusätzliches Follow-up bei jenen Patienten notwendig gewesen, bei denen im Rahmen ihres klinischen Aufenthalts keine Skaphoidfraktur festgestellt wurde. Denn für eine abschließende Evaluierung des hier vorgestellten diagnostischen und therapeutischen Algorithmus (siehe Anhang 1 und 2), wäre zu zeigen, dass die Anzahl an falsch negativen Diagnosen möglichst gering ist. Alternativ hätte auch bei den 32 Patienten, die bei der 1. klinischen Kontrolle Beschwerdefreiheit aufwiesen, eine MRT durchgeführt werden müssen, um eine Fraktur mit Sicherheit auszuschließen. Dieser Fragestellung könnte besser im Rahmen einer prospektiven Analyse nachgegangen werden.

Eine Schwierigkeit bei Patienten im Kindes- und Jugendalter ist der Vergleich von Studien aufgrund der häufig sehr unterschiedlich gewählten Altersspanne. Die Dauer der Wachstumsphase ist nicht klar definiert. Der Schluss der Wachstumsfugen ist individuell verschieden und auch vom Geschlecht und dem Wachstumspotenzial der einzelnen Knochen abhängig [202]. Zu den Patienten im Wachstumsalter zählten für uns im Rahmen dieser Studie alle Kinder jünger als 18 Jahre. Dies ist zum einen in der Versorgungsstruktur unseres Krankenhauses begründet. Zum anderen ist bei diesen Patienten die endgültige Skelettreife weniger wahrscheinlich erreicht [150].

5.1 Inzidenz und Verletzungsursache

Frakturen sind häufige Verletzungen im Kindes- und Jugendalter. Die Prävalenz wird mit 21–25 Frakturen auf 1000 Kinder pro Jahr in einem mitteleuropäisch-städtisch geprägten Umfeld angegeben. Das Risiko vor Beendigung des Wachstumsalters eine Fraktur zu erleiden wird auf 15-45% geschätzt (Stand 2016) [203]. In den letzten 10-20 Jahren wurde mehrfach die vermehrte Teilnahme von Kindern und Jugendlichen an sportlichen Aktivitäten und die

damit verbundene Zunahme an Verletzungen beschrieben [204-208]. Diese Verletzungen betreffen häufig die obere Extremität [24, 25, 82, 205, 209]. Es gibt Hinweise darauf, dass auch die Anzahl an Skaphoidfrakturen bei Kindern in den letzten 10–20 Jahren zugenommen hat [9, 10, 77, 125]. Im Jahr 1986 wurde die jährliche Inzidenz der Skaphoidfraktur bei Kindern unter 15 Jahren in einer Studie von Christodoulou und Colton [11] mit 6/100.000 angegeben. In aktuelleren Publikationen von Tan und Maffulli [10] 2009, und Ahmed et al. [9] 2014, wurde die Inzidenz jeweils mit 15/100.000 und 11/100.000 berechnet. Ob dieser Trend auch auf Kinder und Jugendliche in Deutschland zutrifft, ist jedoch nicht bestätigt. Es wird allgemein angenommen, dass einer steigenden Inzidenz folgende zwei Faktoren zu Grunde liegen: Zum einen hat die zunehmende Beliebtheit und Teilnahme an Sport- und Freizeitaktivitäten zu einer relativ starken Zunahme an Frakturen im Bereich des Handgelenks bei Kindern geführt [10, 23, 24, 82, 210]. Zum anderen haben eine verbesserte Bildgebung und der Einsatz von MRT und CT dazu geführt, dass Skaphoidfrakturen früher und häufiger diagnostiziert werden [12, 23, 105].

Auch in unserer Studie zogen sich fast die Hälfte der Patienten (48,2%) die Fraktur im Rahmen sportlicher Aktivitäten zu. Der Unfallmechanismus war in den meisten Fällen (48,2%) ein Sturz auf die dorsalextendierte Hand. Fahrrad- und Rollerfahren stellten dabei die häufigsten Ursachen dar. Dies stimmt mit den Ergebnissen anderer Studien überein [1]. Zusätzlich wurden Rollerskaten, Fußball, Snow- und Skateboarden als Aktivitäten mit hohem Verletzungsrisiko beschrieben [10, 17, 81, 82]. Football- und Basketballspielen als häufige Ursachen für Skaphoidfrakturen in den Vereinigten Staaten [81] sind hierzulande aufgrund der geringeren Popularität der Sportarten seltener.

Präventive Maßnahmen bei sportlichen Aktivitäten mit hohem Risiko für eine Fraktur des Skaphoids sind zu erwägen. Verschiedene Studien weisen auf eine Reduktion von Handgelenkverletzungen beim Rollerskaten [211] bzw. Snowboarden [212] durch das Tragen von Handgelenkschützern hin. Die Art der Verletzung wurde dabei aber nicht weiter spezifiziert. Ob damit auch auf das Auftreten von Skaphoidfrakturen reduziert werden kann, wäre in vergleichenden Studien zu klären.

5.2 Geschlechterverteilung und Frakturlokalisierung

Die 56 Patienten mit Skaphoidfrakturen wiesen mit einem Geschlechterverhältnis M:W von 2,5:1 eine deutliche männliche Prädominanz auf. Dies stimmt mit den Ergebnissen anderer vergleichbarer Studien überein [5, 9, 76, 176]. Mädchen waren nur in den unteren Altersgruppen von 9 und 10 Jahren vermehrt vertreten, was sich auf die früher einsetzende Skelettreife zurückführen lässt.

Bei Patienten im Wachstumsalter ist in der Literatur der distale Pol des Skaphoids am häufigsten von Frakturen betroffen. So betrafen 64% der Frakturen den distalen Pol in einer Studie von Wulff und Schmidt [5], 87% in einer Studie von Vahvanen und Westerlund [1], 59% in einer Studie von Christodoulou und Colton [11] und 80% in einer Studie von Ahmed et al. [9]. In den letzten 10-25 Jahren wird vermehrt von einer Veränderung dieses Frakturmusters berichtet. Demzufolge ähnelt es immer mehr dem bei Erwachsenen beobachteten Muster, mit vermehrten Frakturen im mittleren und proximalen Drittel sowie häufigerer Dislokation und Pseudarthrosenbildung [17, 78, 81, 201]. So berichten Gholson et al. [81], dass die Fraktur bei 351 Kindern zu 71% in der Skaphoidtaille, 23% im distalen Pol und 6% im proximalen Pol lokalisiert war. Dabei waren männliches Geschlecht, geschlossene Wachstumsfugen, ein hoher BMI und hochenergetische Verletzungen mit Frakturen im Taillebereich und im proximalen Pol verbunden.

Es ist jedoch zu beachten, dass ein direkter Vergleich der Ergebnisse in verschiedenen Studien nur schwer möglich ist. Dies liegt an der gewählten Altersspanne der Patienten. So schließen manche Studien nur Patienten bis zu einem Alter von 13 oder 15 Jahren in die Studie ein [1, 9, 11, 13, 17, 105], während andere eine obere Altersgrenze von 16 oder 18 Jahren wählen [3, 15, 78, 81, 201]. Ahmed et al. [9] weisen bereits darauf hin, dass eine vermeintliche Veränderung im Frakturmuster durch den Einschluss von älteren Kindern in die Studien erklärt werden kann.

Des Weiteren wurden in den meisten Studien konventionelle Röntgenaufnahmen zur Klassifizierung der Frakturen herangezogen. Jørgsholm et al. [15] verwendeten dagegen MRT zur Diagnostik und Klassifizierung von 48 Skaphoidfrakturen. Dabei war eine Frakturlokalisierung in der Taille und im distalen Pol gleichermaßen häufig. Außerdem fanden sie keinen signifikanten

Unterschied im Frakturmuster zwischen Handgelenken mit offenen oder geschlossenen Wachstumsfugen.

In unserem Kollektiv erfolgte die Frakturklassifizierung bei 38 Patienten über MRT-, bei 17 über Röntgen- und bei einem Patienten über CT-Aufnahmen. Eine eindeutige Zuordnung der Frakturlinie zum distalen Pol, der Taille oder dem proximalen Pol ist in einigen Fällen schwierig. Aus diesem Grund wurden die Übergangsbereiche von der Taille zum distalen bzw. zum proximalen Pol als zwei eigene Kategorien gewertet. Unseren Ergebnissen zufolge befindet sich die Mehrzahl der Frakturen im Bereich des distalen Pols (42,9%) und im Übergang zur Taille (30,4%), während weiter proximal lokalisierte Frakturen seltener sind (26,7%). Festgestellt wurde außerdem ein signifikanter Zusammenhang mit dem Alter der Patienten. Eine Lokalisation im Bereich der Taille und am Übergang zum proximalen Pol war vermehrt bei älteren Kindern (im Mittel 13,3 Jahre im Vergleich zu 11,9 Jahren bei einer Lokalisation weiter distal) zu finden. Dies stimmt mit Ergebnissen anderer Studien überein [3]. Es bestanden auch deutliche Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen Geschlecht und Frakturlokalisierung. Skaphoidfrakturen bei Jungen waren demnach relativ gesehen häufiger im Bereich der Taille und am Übergang zum proximalen Pol lokalisiert als bei Mädchen. Eine statistisch hochsignifikante Aussage war aufgrund der geringen Kollektivgröße allerdings nicht möglich.

5.3 Diagnose

Aufgrund ihrer Seltenheit und der unspezifischen klinischen Symptomatik können Skaphoidfrakturen im Wachstumsalter leicht übersehen werden. Ob das Vorhandensein von bestimmten klinischen Zeichen die Wahrscheinlichkeit für das tatsächliche Vorliegen einer Skaphoidfraktur erhöht, wird diskutiert. Cook et al. [106] stellten in ihrer Studie an Kindern zwischen 8–15 Jahren fest, dass Druckschmerzen in der Tabatière und über dem distalen, palmaren Skaphoid als Indikatoren für eine Fraktur eine hohe Sensitivität besitzen; sogar noch drei Wochen nach der Verletzung. Die Spezifität dieser Zeichen war jedoch gering. Das Ausbleiben dieser Zeichen zeigte einen negativen prädiktiven Wert von 100%, dies allerdings erst drei Wochen nach der Verletzung. Demzufolge

könnte eine Skaphoidfraktur mit Hilfe der klinischen Untersuchung erst sehr spät mit Sicherheit ausgeschlossen werden.

In unserer Studie bestand bei 82,1% aller Patienten mit Skaphoidfrakturen ein Druckschmerz im Bereich der anatomischen Tabatière bei der ersten klinischen Untersuchung. Allerdings wiesen auch eine hohe Anzahl an Patienten (81,4%), bei denen im Verlauf keine Skaphoidfraktur oder eine andere Verletzung nachgewiesen wurde, dieses Zeichen auf. Daher empfiehlt es sich, bei Kindern mit Schmerzen im Handgelenk und lokalisiertem Druckschmerz in der Tabatière, zusätzlich auch noch auf das Vorhandensein anderer klinischer Zeichen zu testen. Aufgrund der unvollständigen Dokumentation dieser Untersuchungsbefunde in den Patientenakten, war aber keine eingehende Analyse dieser Befunde möglich. Ein Auftreten von Schmerzen bei Flexion und Extension im Handgelenk zusätzlich zu Druckschmerz im Bereich des Handgelenks war signifikant häufiger mit dem Vorhandensein einer Skaphoidfraktur verbunden. Da die klinische Untersuchung der Patienten, als inhärente Limitation einer retrospektiven Studie, nicht standardisiert erfolgte, ist die Aussagekraft dieses Ergebnisses beeinträchtigt.

Es existieren Studien, die zeigen, dass durch eine Kombination der einzelnen klinischen Zeichen, die Spezifität, sowohl bei Erwachsenen als auch bei Kindern, erhöht werden kann [14, 94, 99]. Evenski et al. [14] konnten zeigen, dass bei Kindern mit Druckschmerzen über dem volaren Skaphoid, Schmerzen bei Radialduktion sowie bei Extension und Flexion im Handgelenk, jeweils in Kombination mit Druckschmerzen in der Tabatière, mit einer höheren Wahrscheinlichkeit eine Kahnbeinfraktur vorlag. Mit 31 Kindern mit Skaphoidfrakturen war die Anzahl der Studienteilnehmer jedoch eher gering. Die allgemeine Übertragbarkeit der Ergebnisse ist daher beschränkt und wäre in einer größeren, prospektiven Studie zu klären.

Gerade bei Kindern ist die klinische Untersuchung jedoch nicht sehr zuverlässig, weshalb bildgebende Verfahren notwendig werden.

Wie bei Erwachsenen, so ist auch bei Kindern eine Skaphoidfraktur auf konventionellen Röntgenaufnahmen häufig sehr schwierig zu diagnostizieren bzw. auszuschließen [3, 4, 9, 12, 102]. Die Rate an Fehldiagnosen ist bei Patienten im Wachstumsalter im Vergleich zu Erwachsenen aber noch erhöht.

Dies liegt an der Seltenheit der Fraktur bei Kindern und der schwierigen Interpretation der skelettunreifen Handwurzel [14, 20, 22, 110].

Von einer geringen Sensitivität der initialen Röntgenuntersuchung wurde mehrfach berichtet. In einer Studie von Jørgsholm et al. [15] konnten nur 54% aller Skaphoidfrakturen in einer Kohorte von 48 Patienten im Röntgen nachgewiesen werden. Tan und Maffulli [10] berichten, dass 5 (35,7%) der Skaphoidfrakturen von 14 Kindern, radiographisch anfänglich nicht erkennbar waren. Dies entspricht den Ergebnissen aus unserer Studie, wo nur 37,5% der Skaphoidfrakturen auf Röntgenbildern eindeutig erkennbar waren. Bei 39,3% der Patienten bestand lediglich der Verdacht auf eine Skaphoidfraktur. Bei den restlichen 23,2% war die Fraktur auf den Röntgenaufnahmen nicht nachweisbar. Daraus wird offensichtlich, dass konventionelle Röntgenaufnahmen eine Fraktur des Skaphoids nur in etwa einem Drittel der Fälle nachweisen und nicht mit genügender Sicherheit ausschließen können. Als Erstdiagnostik steht das Röntgenbild in Hinblick auf die Detektion von Begleitverletzungen, der besseren Verfügbarkeit sowie des geringeren ökonomischen Aufwands dennoch an erster Stelle.

Eckert et al. [4] raten an, im Sinne des Strahlenschutzes auf eine zusätzliche Kahnbeinzielaufnahme zu verzichten. In der zugrundeliegenden Analyse ließ eine Zielaufnahme bei keinem von 6 Patienten eine sichere Frakturdiagnostik zu. In unserer Studie wurde eine Kahnbeinzielaufnahme bei 43 Patienten durchgeführt. Diese war in 34,9% der Fälle positiv, dabei war die Frakturlinie bei zwei der Patienten nur in diesen Aufnahmen sichtbar. In den aktuellen S3-Leitlinien wird als Basisdiagnostik bei Verdacht auf eine Skaphoidfraktur zunächst die Durchführung der Projektionsradiographie des Handgelenks mit den drei Standardaufnahmen (dorsopalmar, lateral und Stecher) empfohlen [141]. Es ist zu bedenken, dass diese Leitlinien für erwachsene Patienten entwickelt wurden. Dennoch gelingt in einer zusätzlichen Kahnbeinzielaufnahme nach Stecher oft eine bessere Darstellung des Handwurzelknochens, was zu einer früheren Diagnosestellung beitragen kann. Bei diagnostischer Unsicherheit sollte die Basisdiagnostik durch eine Schnittbilduntersuchung ergänzt werden [141].

Johnson et al. [105] untersuchten 56 Kinder (57 Verletzungen) zwischen 6 und 15 Jahren, bei denen in der klinischen Untersuchung der Verdacht auf eine Skaphoidfraktur bestand. Bei allen Patienten wurden innerhalb der ersten 10 Tage nach der Verletzung sowohl eine Röntgen- als auch eine MRT-Aufnahme angefertigt. Dabei waren nur 3 (18,8%) der 16 Skaphoidfrakturen auf den initialen Röntgenaufnahmen sicher nachzuweisen, der Rest wurde erst mittels MRT diagnostiziert. Die Autoren plädieren daher für eine frühzeitige MRT-Untersuchung. Diese Ergebnisse werden von Cook et al. [106] bestätigt, die angeben, dass eine normale MRT-Untersuchung bereits 2 Tage nach dem Unfall einen negativen prädiktiven Wert von 100% besitzt (18 Patienten, 8–15 Jahre).

Kanavaki et. al [213] konnten in einer ähnlichen Studie an 45 Kindern zwischen 8 und 15 Jahren außerdem eine sehr hohe Interobserver-Reliabilität bei der Analyse der MRT-Bilder feststellen. Im Gegensatz dazu unterschied sich die Interpretation der Röntgenbilder deutlich zwischen den beiden auswertenden Radiologen.

Eine Kritik an diesen Publikationen wurde in einem 2018 veröffentlichten Review Artikel [110] hervorgebracht. Die Autoren zeigen auf, dass keine der drei Studien zur Evaluation der MRT einen externen Referenzstandard für die Bestätigung der Fraktur enthält. Dieselbe bildgebende Methode (MRT), die im Rahmen der Studien beurteilt werden soll, ist gleichzeitig auch der Referenzstandard. Um die MRT in der Diagnostik von Skaphoidfrakturen zu evaluieren, wäre ein prospektives Studiendesign nötig. Als möglicher Referenzstandard könnten, den Autoren zufolge, wiederholte MRT Untersuchungen nach ca. 14 Tagen herangezogen werden, um die Resorption eines potenziell als Fraktur fehlinterpretierten Knochenödems sicherzustellen. Doch auch diese Methode erscheint fragwürdig, da die Zeit bis zur Resorption nicht genau definierbar ist und ein Ödem bei manchen Patienten bis zu einigen Monaten persistieren kann.

Eine Studie zum Vergleich der MRT und der CT in der Diagnostik von Skaphoidfrakturen zog als Referenzstandard eine Röntgenuntersuchung nach 6 Wochen heran [109]. Die Autoren bezeichnen dies in ihrer Diskussion jedoch als inadäquat, da nicht jede Fraktur auf diesen Röntgenaufnahmen zu diagnostizieren ist. Derzeit existiert somit kein geeigneter Referenzstandard zur abschließenden Beurteilung der diagnostischen Sensitivität der MRT.

In der Literatur wird dennoch gängiger Weise die MRT als Goldstandard in der Diagnostik von okkulten Skaphoidfrakturen angesehen [15, 50, 80, 93, 214]. Wir zogen die MRT als Referenzstandard zur Beurteilung der Röntgenaufnahmen heran. Ein Vergleich der beiden bildgebenden Modalitäten zeigte, dass 89,5% der Patienten mit nachgewiesener Skaphoidfraktur in der MRT, einen negativen Röntgenbefund hatten. Unsere Ergebnisse bestätigen also die schlechte diagnostische Sensitivität der Röntgenuntersuchung in der Detektion von Skaphoidfrakturen. Die Röntgenaufnahmen zeigten keine falsch positiven Befunde, was für eine ausreichend gute Spezifität spricht.

Das posttraumatische Knochenödem („bone bruise“), welches auch bei Knochenkontusion und trabekulärer Mikrofrakturierung auftritt [43], ist der Grund dafür, warum die Spezifität der MRT in der Literatur kontrovers beurteilt wird [102, 107, 109]. Dies liegt daran, dass der Befund zum Teil mit einer Fraktur gleichgesetzt wird, während andere Autoren nur bei Vorhandensein einer erkennbaren Frakturlinie die Diagnose einer Skaphoidfraktur stellen [105, 107-109].

Eine der größten Schwierigkeiten bei der Interpretation von MRT-Aufnahmen ist die Unterscheidung zwischen einem solchen Knochenödem und einer echten Fraktur mit Konturunterbrechung der Kortikalis. Mit dem vermehrten Einsatz der MRT werden die beiden Befunde zunehmend nicht mehr klar voneinander abgegrenzt. Bei Erwachsenen kann eine hochauflösende CT zur genaueren Charakterisierung des Befundes beitragen [4]. Bei Kindern wird zur Vermeidung von Strahlenbelastung jedoch die MRT bevorzugt angewandt. Zusätzlich sind auch bei der CT falsch positive Befunde aufgrund der subtilen Darstellung undislozierter Frakturen und der schwierigen Interpretation kleiner, unikortikaler Linien möglich [102, 109].

In unserer Studie wurde ein ausgeprägtes fokales „bone bruise“ mit einer Fraktur gleichgesetzt, wenn eine Unterscheidung zu einer echten Fraktur nicht mit Sicherheit möglich war. Dies war bei 8 Patienten der Fall.

Die klinische Relevanz eines posttraumatischen Knochenödems ist unklar. Eine reine Knochenkontusion bedarf zumeist keiner weiteren Therapie. Da aber übersehene Frakturen mit Komplikationen einhergehen können, scheint eine

Ruhigstellung des Handgelenks bei unklaren MRT-Befunden von Patienten mit persistierenden Schmerzen sinnvoll. Eine Möglichkeit bestände in zeitnahen klinischen Kontrolluntersuchungen von Patienten mit fraglichem „bone bruise“ im MRT-Bild und ggf. früherem Behandlungsabschluss bei Schmerzfreiheit. Die Langzeitergebnisse von Kindern mit posttraumatischem Knochenödem, bei dem eine klare Abgrenzung zu einer Fraktur mithilfe der Schnittbilddiagnostik nicht möglich ist, wären in einer entsprechenden klinischen Studie zu klären.

Der negativ prädiktive Wert der MRT wird mit 90–100% angegeben [106, 108, 109]. Ein negativer MRT-Befund kann eine Skaphoidfraktur also mit sehr hoher Sicherheit ausschließen. Nimmt man nun an, dass nicht jeder positive MRT-Befund eine echte Fraktur repräsentiert, wird offensichtlich, dass die Wahrscheinlichkeit viel höher ist, eine Skaphoidfraktur fälschlicherweise zu diagnostizieren, als eine Fraktur zu übersehen [108]. Dies führt zu einem gewissen Maß an Übertherapie. Da das Risiko eine Skaphoidfraktur zu übersehen, viel höher ist, kann eine konservative Übertherapie, unserer Meinung nach, in Kauf genommen werden. Zusätzlich konnten wir zeigen, dass eine Ruhigstellung im Unterarmgips von den Kindern und Jugendlichen gut bis sehr gut toleriert wird und nicht zu Einschränkungen im Alltag führt.

Des Weiteren konnten über die MRT eine Reihe weiterer Verletzungen festgestellt werden. Die MRT hat demnach nicht nur einen hohen Stellenwert in der Diagnostik okkulten Skaphoidfrakturen, sondern auch zum Ausschluss weiterer therapiebedürftiger ligamentärer und knöcherner Verletzungen. Dies wird durch die Ergebnisse anderer Studien verdeutlicht [15, 100, 105]. Elvey et al. [215] führten eine retrospektive Studie durch, um die Pathoanatomie akuter Handgelenksverletzungen von Patienten im Kindes- und Jugendalter mit initial negativen Röntgenbefunden zu ermitteln. 75,4% der Kinder hatten einen positiven MRT Befund, davon waren okkulte Frakturen und Knochenkontusionen die häufigsten Verletzungen. Isolierte Weichteilverletzungen stellten sie keine fest. Die Autoren schlagen daher vor, dass der Begriff „Handgelenksprellung“ nicht mehr zutreffend ist und bei Kindern nicht verwendet werden sollte. Eine genauere Definition der Verletzung durch den Einsatz der MRT soll zu einer besseren Informationsübermittlung

führen und Unsicherheiten auf Seiten der Patienten und deren Eltern reduzieren.

In unserem Kollektiv konnte bei 11 Patienten mit negativem Befund in der MRT Kontrolle die Ruhigstellung beendet werden. Der sichere Ausschluss einer Fraktur erlaubt eine frühere Wiederaufnahme von schulischen und sportlichen Aktivitäten [105]. Weiters wird die Anzahl an zusätzlichen Röntgenaufnahmen im Verlauf gesenkt und so die Strahlenbelastung reduziert. Durch die eingeschränkte Verfügbarkeit und die deutlich höheren Kosten spielt die MRT in der initialen Diagnostik meist keine Rolle, auch wenn einige Analysen gleichbleibende oder sogar reduzierte Gesamtkosten durch den Einsatz der MRT und der damit verbundenen geringeren Anzahl von Wiedervorstellungen der Patienten in der Klinik propagieren [107, 108, 216].

Interessanterweise scheint die Gesamthäufigkeit von Skaphoidfrakturen, die mittels MRT erkannt werden, bei Kindern und Jugendlichen mit posttraumatischen Handgelenksschmerzen größer zu sein als bei Erwachsenen. So bestätigte sich der klinische Verdacht auf eine Skaphoidfraktur bei 53,3% der Patienten in einer Studie von Jörgsholm et al. [15], 51% in einer Studie von Kavanaki et al. [213] und 63,3% in der vorliegenden Studie. Im Vergleich dazu wurden okkulte Skaphoidfrakturen in Studien an Erwachsenen nur bei rund 11%-21% nachgewiesen [104, 109].

Obwohl eine Skaphoidfraktur mit Hilfe der MRT früher diagnostiziert werden kann, ist es dennoch nicht sinnvoll, sie als Erstlinienuntersuchung am Verletzungstag durchzuführen [14]. Dagegen sprechen sowohl die höheren Kosten als auch die eingeschränkte Verfügbarkeit [109, 176]. Außerdem würde dieses Vorgehen zu einer unnötig hohen Anzahl an MRT Untersuchungen führen, da viele der Patienten mit posttraumatischen Schmerzen im Handgelenk bereits nach einigen Tagen wieder beschwerdefrei sind. In der Literatur wird zumeist eine erste klinische Kontrolluntersuchung nach 14 Tagen angeraten [14]. Wir führten die erste Kontrolluntersuchung nach durchschnittlich 7,1 Tagen durch. Es wurde vermutet, dass eine verkürzte Zeit bis zur ersten Nachbegutachtung mit einer erhöhten Anzahl an MRT Untersuchungen mit niedriger Trefferquote einhergehen würde [4]. In unserem Kollektiv hatten

allerdings 81,6% der Patienten einen pathologischen Befund im MRT (davon 63,3% Skaphoidfrakturen und 18,3% andere Verletzungen). Außerdem war zu diesem Zeitpunkt bereits eine relativ hohe Anzahl an Patienten (20%), bei denen ursprünglich der Verdacht auf eine Skaphoidfraktur vorlag, beschwerdefrei und konnte aus der Behandlung entlassen werden. Daher empfehlen wir in unserem diagnostischen Algorithmus eine erste klinische Kontrolluntersuchung nach 7 Tagen und die Durchführung einer MRT bei persistierenden Schmerzen (siehe Anhang 1).

In einer univariaten Analyse konnten in unserem Kollektiv patientenspezifische Faktoren identifiziert werden, die das Vorhandensein einer Skaphoidfraktur wahrscheinlicher machen. Ein Sturz auf die Hand in Dorsalextension (p-Wert = 0,006), männliches Geschlecht (p-Wert = 0,018) und Schmerzen bei Flexion und Extension im Handgelenk (p-Wert = 0,037) waren dabei signifikant häufiger mit einer Skaphoidfraktur verbunden. Außerdem war ein bestehender Verdacht auf eine Skaphoidfraktur in der Röntgenaufnahme hochsignifikant (p-Wert < 0,0001) für die Vorhersage einer Fraktur. Eine Einschränkung der allgemeinen Aussagekraft dieser Ergebnisse aufgrund der geringen Datengrundlage ist zu bedenken. Dennoch könnte erwogen werden, bei Zutreffen aller dieser patientenspezifischen Faktoren schon früher eine MRT zur Diagnosesicherung durchzuführen.

5.4 Therapie

Akute, undislozierte Skaphoidfrakturen können im Kindes- und Jugendalter in den meisten Fällen erfolgreich konservativ therapiert werden. Die beste Art der Immobilisation wird in der Literatur schon seit vielen Jahren kontrovers diskutiert. Einige Autoren empfehlen eine initiale Ruhigstellung im Oberarmgips für einige Wochen, mit anschließender Umstellung auf einen Unterarmgips [5, 50, 95, 119]. Ein Oberarmgips soll durch Verhinderung der Pro- und Supinationsbewegung im Handgelenk zu mehr Stabilität und dadurch zu besseren Heilungsraten führen [217, 218]. Im Gegensatz hierzu konnte in mehreren Studien gezeigt werden, dass auch bei Kindern durch Ruhigstellung im Unterarmgips exzellente Ergebnisse erzielt werden konnten [1, 11, 78]. Anders als bei Erwachsenen, existieren bei Kindern jedoch keine

vergleichenden Studien [80]. Weiteren Anlass für Diskussionen bieten der Einschluss des Daumens sowie die richtige Handgelenksstellung im Gips. Lorenz Böhler war einer der ersten, der 1942 begann, den Daumen im Gips mit einzuschließen [219]. Heute ist die zusätzliche Ruhigstellung des Daumengrundgelenks bei der Behandlung von Skaphoidfrakturen in vielen Kliniken Standard. Bevorzugt wird ein Einschluss des Daumens meist, um bei den großteils jungen, aktiven Patienten die Gefahr der frühzeitigen Belastung zu vermeiden [57]. Jedoch konnte für das Erzielen von besseren therapeutischen Ergebnissen durch Anwendung eines Gipses mit Daumeneinschluss noch keine wissenschaftliche Evidenz erbracht werden [220, 221]. Aus diesem Grund empfehlen einige Autoren die Ruhigstellung in einem einfachen Unterarmgips bei Skaphoidfrakturen von Erwachsenen [222, 223]. Vergleichbare Studien zur Behandlung von Kindern fehlen gänzlich.

Auch die Meinungen zur Handgelenksstellung im Gips sind widersprüchlich. Während sich manche Autoren für die Immobilisation des Handgelenks in leichter Extension aussprechen [224], bevorzugen andere eine Flexionsstellung [225] oder die Neutralposition [44]. Hambidge et al. [226] fanden hinsichtlich der Heilungsraten keinen Unterschied zwischen einem Unterarmgips mit dem Handgelenk in 20° Extension, im Vergleich zu einer Handgelenksstellung in 20° Flexion. Auch ob eine Stellung in Radial- oder Ulnarabduktion Vorteile erbringt, wird unterschiedlich beurteilt [222]. Auf Grund dieser vielen Uneinigkeiten wird vermutet, dass die Ruhigstellung selbst das Entscheidende ist, und nicht die genaue Stellung des Handgelenks [222].

96,4% aller Patienten aus unserem Studienkollektiv wurden konservativ behandelt. Bei 83,3% erfolgte die Ruhigstellung in einem Unterarmgips mit Daumeneinschluss, die restlichen Patienten erhielten davor zuerst für einige Wochen einen Oberarmgips. Bei keinem der Patienten waren zum Zeitpunkt des Behandlungsabschlusses Zeichen von Komplikationen im Sinne einer Pseudarthrose oder avaskulären Nekrose nachweisbar. Außerdem traten auch keine Komplikationen auf, die durch die Ruhigstellung selbst verursacht wurden (wie z.B. Nervenschädigungen, Druckulzera oder anhaltende Bewegungseinschränkungen).

Es wurde bereits berichtet, dass die Dauer, die für die Immobilisation im Gips benötigt wird, von der Lokalisation und dem Grad der Dislokation der Fraktur

sowie der Zeitdauer bis zur Erstbehandlung abhängt [1, 9, 11, 50, 77, 112]. Chronische (> 6 Wochen nach Verletzung) und/oder dislozierte Frakturen der Taille oder des proximalen Pols benötigen dabei die längste Zeit bis zur Ausheilung [1, 81]. In unserer Studienkohorte handelte es sich, mit einer mittleren Zeit zwischen Unfallzeitpunkt und Erstvorstellung von 0,8 Tagen, ausschließlich um akute Frakturen. Nur zwei Patienten wiesen dislozierte Frakturen auf, diese wurden allerdings operativ versorgt. Auch in unserem Kollektiv war die Dauer der Ruhigstellung bei weiter distal lokalisierten Frakturen durchschnittlich um eine Woche kürzer als bei im Bereich der Taille oder weiter proximal lokalisierten Frakturen (p-Wert < 0,01). Dies bestätigt die Ergebnisse anderer Studien und wird teilweise mit der besseren Blutversorgung im distalem Bereich des Knochens in Verbindung gebracht [9].

Eine direkte Vergleichbarkeit mit anderen Publikationen ist zum Teil dadurch erschwert, dass keine einheitliche Definition für erfolgte Ausheilung der Fraktur verwendet wird. Während in einigen Studien eine sichtbare Konsolidierung der Fraktur im Röntgenbild vorausgesetzt wird [9, 78], ist für andere Autoren die Beschwerdefreiheit der Patienten [4] ausschlaggebend. In unserem Kollektiv wurden bei insgesamt 69,6% der Patienten erneute Röntgenaufnahmen vor der Freigabe durchgeführt. Da eine Sklerosierungslinie im Skaphoid als Zeichen der Konsolidierung jedoch nicht immer erkennbar war, war für uns die Beschwerdefreiheit der Patienten nach Beendigung der Ruhigstellung das entscheidende Kriterium zur Annahme einer Ausheilung der Fraktur. Dies trägt auch zur Reduktion der Anzahl zusätzlicher Röntgenaufnahmen bei.

Nach Beendigung der Therapie wurden 5 der konservativ behandelten Patienten erneut aufgrund Schmerzen im betroffenen Handgelenk in unserer Klinik vorstellig. Während der weitere Verlauf bei 2 dieser Patienten unbekannt ist, trat bei den übrigen 3 nach der Durchführung einer Physiotherapie (1 Patientin), einer Ergotherapie (1 Patient) und ohne weitere Intervention (1 Patient) Beschwerdefreiheit ein. Dies deutet darauf hin, dass Kinder und Jugendliche mit undislozierten Skaphoidfrakturen in der Mehrzahl der Fälle durch eine konservative Therapie mittels Ruhigstellung des Handgelenks im Gips erfolgreich behandelt werden können. Eine Physio- oder Ergotherapie kann bei persistierenden Beschwerden sinnvoll sein.

In Verbindung mit Studien, die eine Veränderung des Frakturmusters bei Patienten im Kindes- und Jugendalter beschreiben, wurde auch von einer zunehmenden Anzahl an komplizierten Frakturen berichtet, welche eine operative Versorgung notwendig machen [9, 17, 151]. In unserer Studienkohorte wurden 2 Patienten mit dislozierten Frakturen des Skaphoids sowie Frakturen weiterer Knochen im Handgelenksbereich operativ behandelt. Die Fraktur des Skaphoids wurde bei beiden Patienten durch Osteosynthese mittels Herbert-Schraube versorgt. Während ein Patient zum Zeitpunkt der telefonischen Befragung völlig beschwerdefrei war, berichtete der andere von schlechter Belastbarkeit und Versteifungen des Handgelenks sowie Schmerzen bei starker Belastung. Dies kann auf die Schwere der Verletzung seines Handgelenks mit Begleitverletzungen im Rahmen einer Luxationsfraktur der Handwurzel mit Ruptur des LT-Bandes zurückgeführt werden.

In einigen zwischen 2011 und 2017 erschienenen Publikationen wird außerdem vermehrt von den Erfolgen der operativen Therapie von Skaphoidfrakturen bei Kindern und Jugendlichen berichtet. Gholson et al. [81] konnten eine Heilungsrate von > 95% nach operativer Therapie nachweisen. Bae et al. [130] berichteten über die Ergebnisse von 63 Patienten zwischen 8 und 18 Jahren nach durchschnittlich 6,3 Jahren Follow-up. In dieser Kohorte hatten > 95% der Patienten ausgezeichnete funktionelle Ergebnisse, unabhängig davon, ob sie konservativ oder chirurgisch therapiert wurden. Ausgewertet wurde dies anhand des DASH (Disabilities of the Arm, Shoulder and Hand) und des MMWS (Modified Mayo Wrist) Scores. Shaterian et al. [131] führten eine 17 Studien einschließende Meta-Analyse zum Vergleich verschiedener Therapiemodalitäten bei akuten Skaphoidfrakturen durch. Dabei zeigte sich kein Unterschied in der Heilungsrate sowie den funktionellen Ergebnissen von konservativ gegenüber operativ behandelten Kindern und Jugendlichen. In den meisten Studien erfolgte jedoch keine Stratifizierung hinsichtlich des Grades der Frakturdislokation, dem Alter der Patienten oder der Akuität der Fraktur. Auch die Zeit bis zum Follow-up ist in den einzelnen Studien uneinheitlich.

Als Indikationen für eine chirurgische Therapie werden ein Scheitern der konservativen Therapie [81], Frakturen des proximalen Pols, Dislokation [17,

78, 81, 130] sowie der Patientenwunsch nach früherer Rückkehr zu Sport- und Freizeitaktivitäten [130] genannt. Verschiedene Studien deuten darauf hin, dass eine operative Versorgung zu einer schnelleren Ausheilung von Skaphoidfrakturen führt, insbesondere wenn es sich um komplizierte oder chronische Verletzungen handelt [131, 227]. Dagegen sprechen die Risiken, die mit einer Operation verbunden sind, wie z.B. Infektion, Gefäß- oder Nervenverletzung [12, 67]. Außerdem werden mögliche Wachstumsstörungen durch die Platzierung von Fremdmaterial [17, 50] und die Notwendigkeit einer Narkose [176] als negative Auswirkungen eines operativen Eingriffes im Kindes- oder Jugendalter genannt. Auch die Dauer der postoperativen Ruhigstellung ist nicht einheitlich festgelegt [131].

Bei Erwachsenen ist in den letzten Jahren ein Trend zur operativen Versorgung akuter, nichtdislozierter Skaphoidfrakturen zu verzeichnen, da dies eine frühere Rückkehr zu Beruf oder anderen Aktivitäten erlaubt [227]. Während ein ökonomischer Verlust durch eine spätere Rückkehr zur Arbeit bei Kindern und Jugendlichen zumeist kein Argument darstellt, kann ein längerer Ausschluss von sozialen, sportlichen Aktivitäten für einige Kinder inakzeptabel sein [120]. Ob ältere Jugendliche nach den gleichen Richtlinien wie Erwachsene behandelt werden sollten, ist unklar und bedarf weiterer Analysen. Überlegungen wurden angestellt, Jugendlichen, die z.B. wegen der Ausübung von Leistungssport eine verkürzte Ruhigstellung wünschen, eine operative Therapie anzubieten [130]. In den aktuellen Leitlinien wird nach minimalinvasiver Schraubenosteosynthese von frischen undislozierten Frakturen mit quere Verlauf im mittleren oder distalen Drittel eine frühfunktionelle Behandlung empfohlen, allerdings ohne Belastung der Hand für 6 Wochen [141]. Ob eine operative Therapie daher tatsächlich eine frühere Rückkehr zu sportlichen Aktivitäten ermöglicht, bleibt fraglich. Außerdem sprechen die sehr guten Erfolgsraten der konservativen Therapie von undislozierten Skaphoidfrakturen sowie die darüber hinaus angegebene hohe Patientenzufriedenheit in unserer Studie gegen eine operative Therapie zur Verkürzung der Ruhigstellung.

Die Indikationen zur operativen Therapie einer Skaphoidfraktur im Wachstumsalter bedürfen daher einer genaueren Definition. In jedem Fall bedarf es einer genauen Aufklärung der Patienten und deren Eltern über die Vor- und Nachteile sowohl der konservativen als auch der operativen Therapie.

5.5 Follow-up

Wir konnten 30 (53,6%) der 56 Patienten mit bestätigten Skaphoidfrakturen kontaktieren, um die langfristigen funktionellen Ergebnisse zu beurteilen. Die mittlere Zeitdauer von der Erstvorstellung bis zur Nachuntersuchung betrug 71,1 Monate. Zu diesem Zeitpunkt waren 73,3% der Patienten vollkommen beschwerdefrei und gaben keine Einschränkungen in ihren Alltagsaktivitäten an. 16,7% berichteten von intermittierenden leichten Schmerzen im Handgelenk ohne sich dadurch im Alltag eingeschränkt zu fühlen. Bei den meisten Teilnehmern traten die Schmerzen vor allem bei besonderer Belastung der Hand, insbesondere bei sportlichen Aktivitäten wie Fahrradfahren oder Turnen auf. Ruheschmerzen, ein Verlust an Beweglichkeit oder Kraft der Hand lagen bei keinem der Probanden vor. 2 Probanden (6,7%) fühlten sich durch Schmerzen im Handgelenk beim Greifen oder bei starker Dorsalextension leicht im Alltag beeinträchtigt. Beide wiesen bei der klinischen Nachuntersuchung Druckschmerzen in der anatomischen Tabatière auf. Röntgen- und MRT-Aufnahmen zeigten keine pathologischen Befunde. Bei den restlichen 5 Patienten, die an der klinischen Nachuntersuchung teilnahmen, wurden weder funktionelle Einschränkungen noch Schmerzen im Bereich des Handgelenks festgestellt. Ein Verlust an Beweglichkeit oder Griffstärke der betroffenen Hand im Vergleich zur Gegenseite lag in keinem Fall vor. Diese Ergebnisse entsprechen großteils jenen anderer Studien [9, 78, 130].

Mehrere Publikationen verwenden zur Auswertung der funktionellen Ergebnisse Klassifikationssysteme wie den Cooney Score [17, 78] oder den Mayo Wrist Score [130]. Dabei handelt es sich um Traumascores bei denen Schmerz, Beweglichkeit, Kraft und Funktionalität der Hand anhand einer Punkteskala bewertet werden. Der DASH (Disabilities of the Arm, Shoulder, and Hand) Fragebogen dient der subjektiven Einschätzung der funktionellen Aspekte der oberen Extremität. Diese Scores wurden allerdings nur für erwachsene Patienten entwickelt und validiert. Daher sind sie möglicherweise kein geeignetes Instrument für die Beurteilung von Patienten im Kindes- und Jugendalter [130]. Der von uns verwendete Fragebogen wurde speziell für die vorliegende Studie erstellt. Eine gute Verständlichkeit für Kinder und Jugendliche war dabei vorrangig. Abgezielt wurde auf eine Erfassung von möglichen Schmerzen und funktioneller Beeinträchtigung des betroffenen

Handgelenks in Bezug auf Einschränkungen in alltäglichen Aktivitäten. Ebenfalls sollten die Patienten die Ruhigstellung im Gips in Hinblick auf Komfort und Einschränkungen im Alltag bewerten.

Die Studienteilnehmer, die Beschwerden im Handgelenk angaben, unterschieden sich nicht von den übrigen beschwerdefreien Teilnehmern hinsichtlich Alter, Geschlechterverteilung, Frakturlokalisierung, Zeitdauer bis zur Erstbehandlung, Unfallmechanismus und mittlerer Dauer der Ruhigstellung. Es ist unklar, warum genau diese Patienten weiterhin Schmerzen im Handgelenk verspürten. Ein Teil der Probanden mit Beschwerden im Handgelenk berichtete jedoch von mehreren Verletzungen derselben Hand und stärkerer Belastung der Hand im Rahmen sportlicher Aktivitäten im Anschluss an die Behandlung der Skaphoidfraktur. Dies deutet darauf hin, dass es sinnvoll sein könnte, nach der konservativen Therapie einer Skaphoidfraktur eine längere (> 3 Wochen) Sportkarenz zu empfehlen. Zusätzlich könnte den Patienten eine längerfristige Vermeidung von Sportarten mit exzessiver Belastung des Handgelenks angeraten werden. Dass ein Tragen einer Handgelenksschiene bei Aktivitäten mit starker Beanspruchung des Handgelenks zur Vermeidung von Schmerzen beitragen kann, ist denkbar und bedarf weiterer Analysen.

Zusätzlich wurden die Studienteilnehmer dazu angehalten, die durchgeführte Ruhigstellung im Gips hinsichtlich Einschränkung im Alltag und Komfort zu bewerten. Zwei der Patienten konnten hierzu aufgrund der langen Follow-up Zeit keine genauen Angaben machen. Von den restlichen Befragten hatten 56,7% keinerlei Beschwerden im Gips. 36,7% gaben leichte Beschwerden, wie Juckreiz, Hitzegefühl oder Druckstellen am Oberarm bei Beugung des Arms an. Lediglich zwei Teilnehmer fühlten sich durch den Gips im Alltag leicht beeinträchtigt, die übrigen Teilnehmer fühlten sich nicht beeinträchtigt. Alle Befragten gaben Zufriedenheit mit der Therapie an. Diese Ergebnisse sprechen dafür, dass die Ruhigstellung des Handgelenks zur Therapie von Skaphoidfrakturen von Kindern und Jugendlichen in der Regel gut toleriert wird und mit hoher Patientenzufriedenheit verbunden ist.

5.6 Begleitverletzungen

42,9% der Patienten aus unserem Kollektiv hatten Begleitverletzungen im Handgelenksbereich derselben Hand. Die häufigsten Begleitfrakturen waren dabei eine Fraktur des Os capitatum (6 Patienten) und des distalen Radius (2 Patienten). Ligamentäre Begleitverletzungen waren auf den MRT-Aufnahmen ebenfalls zu erkennen, am häufigsten waren dabei SL-Band- (4 Patienten) und TFCC-Läsionen (3 Patienten). Es ist daher wichtig zu beachten, dass auch bei Patienten mit nachgewiesener Fraktur im Röntgen weitere Verletzungen vorliegen können. Auch bei den viel häufiger vorkommenden Frakturen des distalen Radius sollte an die Möglichkeit einer begleitenden Skaphoidfraktur gedacht werden. Das Handgelenk der Patienten mit knöchernen Begleitverletzungen wurde im Mittel 2 Wochen länger ruhiggestellt als das von Patienten ohne zusätzliche knöcherne Läsionen.

5.7 Komplikationen

In unserem Studienkollektiv traten bei keinem der 54 konservativ und 2 operativ behandelten Patienten Komplikationen im Sinne einer Skaphoidpseudarthrose oder avaskulären Nekrose auf. Diese Komplikationen sind im Wachstumsalter sehr selten [12, 147, 151]. Als einer der Knochen, der am häufigsten von Pseudarthrosenbildung betroffen ist [145], kommen sie jedoch auch bei Kindern und Jugendlichen vor. In einer aktuellen Kohortenstudie untersuchten Zura et al. [150] Risikofaktoren für die Ausbildung von Pseudarthrosen nach knöchernen Frakturen bei Patienten im Kindes- und Jugendalter. Dabei wurde die Hypothese bestätigt, dass sich diese Risikofaktoren nicht wesentlich von jenen bei Erwachsenen unterscheiden. Folgende Faktoren waren dabei unter anderem mit einem höheren Pseudarthrosenrisiko assoziiert: steigendes Alter, männliches Geschlecht, hoher Body-Mass-Index und Tabak Rauchen. Ein Zusammenhang konnte außerdem zwischen dem Vorhandensein von bestimmten Risikofaktoren und der Ausbildung einer Pseudarthrose festgestellt werden (Odds Ratio >1), unter anderem: Vitamin D Mangel, Osteoporose, kardiovaskuläre Erkrankungen sowie die Einnahme von Medikamenten wie z.B. Bisphosphonaten, Antikoagulanzen, Opioiden und oralen Kontrazeptiva. Speziell auf das Skaphoid bezogen, konnte die Einnahme von Opioiden als Risikofaktor für das häufigere Auftreten von Pseudarthrosen ausgemacht

werden. Während diese Erkenntnisse für die Behandlung einer Skaphoidfraktur relevant sein könnten, ist eine regelmäßige Medikamenteneinnahme sowie das Auftreten von chronischen Krankheiten im Kindes- und Jugendalter im Allgemeinen jedoch nicht sehr häufig.

Als häufigste Ursache der Skaphoidpseudarthrose gilt eine verzögerte Diagnosestellung [50, 80]. In einer Analyse aus Japan von Toh et. al [17], waren ungewöhnlich viele (71,9%) der 64 Kinder von einer Pseudarthrose betroffen. Die Autoren führen dies darauf zurück, dass die meisten Patienten nicht sofort nach der Verletzung ein Krankenhaus aufsuchen, aus Angst ihren Eltern von der Verletzung zu erzählen oder ihre Position in Sportmannschaften zu verlieren. Die mittlere Zeit zwischen Unfall und der Erstvorstellung in der Klinik wird jedoch nicht angegeben. Im Vergleich dazu erfolgte die Erstvorstellung der 56 Patienten in unserem Studienkollektiv sehr früh nach dem Unfall. 52 Kinder wurden entweder am gleich am Unfalltag oder am Folgetag (Tag 1) in unserer Klinik vorstellig. Drei weitere Kinder stellten sich am Tag 2 und ein Kind 21 Tage nach dem Unfall vor. Zudem wurden auch jene Patienten, bei denen nach initialer klinischer und radiologischer Diagnostik lediglich der Verdacht auf eine Skaphoidfraktur bestand, einer Therapie mittels Ruhigstellung des verletzten Handgelenks zugeführt. Dies könnte ein Grund dafür sein, warum in unserem Kollektiv keine Pseudarthrosen auftraten.

Des Weiteren ist die Definition der Skaphoidpseudarthrose in der Literatur nicht einheitlich. So wird ein Fehlen der Konsolidierung nach 6 Monaten [43, 138] oder teilweise auch bereits nach 3 Monaten [129, 148] als Pseudarthrose bezeichnet. Dies könnte zu der großen Varianz in der berichteten Häufigkeit von Skaphoidpseudarthrosen bei Kindern und Jugendlichen beitragen.

Als Therapie der Wahl gilt zumeist eine operative Versorgung mittels Schraubenosteosynthese und/oder Spongiosaplastik. Dies gilt für instabile genauso wie für stabile Pseudarthrosen. Die Behandlungsprinzipien gleichen dabei denen von Erwachsenen [80, 228]. Um Wachstumsstörungen zu vermeiden, berichten Mintzer et al. [157] von der Verwendung kleinerer, an Patienten im Kindesalter angepasster Schrauben. Die beste Operationstechnik wird allerdings noch kontrovers diskutiert und auch zu der Dauer der postoperativen Ruhigstellung gibt es keine einheitlichen Richtlinien [43].

Unabhängig davon wird zumeist von sehr guten Resultaten der operativen Therapie mit guten funktionellen Ergebnissen im klinischen Follow-up berichtet [129, 152-154, 172, 175]. Ein direkter Vergleich der Studien ist jedoch erschwert, da keine einheitliche Definition für Pseudarthrosen gewählt wurde und die Auswertung der Ergebnisse nicht standardisiert erfolgte [120].

Auch von einer erfolgreichen konservativen Therapie der Skaphoidpseudarthrose durch prolongierte Ruhigstellung im Unterarmgips wird berichtet [120]. Den Autoren zufolge können so die Risiken und höheren Kosten einer Operation vermieden werden. Außerdem weisen sie darauf hin, dass bei Kindern, auch nach längerer Immobilisation, keine Einsteifung des Handgelenks oder Osteoporose zu erwarten sind. In einem aktuellen Fallbericht beschreiben Jernigan et al. [229] die erfolgreiche konservative Behandlung eines 13-jährigen Jungen mit Pseudarthrose des proximalen Skaphoidpols und Nachweis einer avaskulärer Nekrose in der MRT. Der Patient lehnte eine Operation ab und wurde 19 Monate nach der Verletzung für eine Dauer von 14 Wochen im Kahnbeingips ruhiggestellt. Zusätzlich erfolgte täglich für 20 Minuten eine Behandlung mit einem niedrig-intensiv gepulsten Ultraschall (sog. LIPUS = low-intensity pulsed ultrasound) zur Stimulation der Knochenheilung. 10 Monate nach Behandlungsabschluss war der Junge vollkommen beschwerdefrei und eine Konsolidierung der Fraktur war in den Röntgenaufnahmen nachweisbar.

Einige Autoren schlagen daher vor, bei einem Kind mit Skaphoidpseudarthrose eine Ruhigstellung des Handgelenks für mindestens 3 Monate durchzuführen, falls zuvor noch kein konservativer Therapieversuch unternommen wurde [76, 120, 161]. Ein operatives Vorgehen sollte demzufolge erst nach Versagen einer konservativen Behandlung in Frage kommen. Dabei ist jedoch oft eine sehr lange Ruhigstellung der Hand im Gips notwendig. Die Möglichkeit im Anschluss doch noch eine chirurgische Therapie zu benötigen bleibt bestehen. Eine genaue Aufklärung der Patienten zu den Vor- und Nachteilen eines operativen oder konservativen Vorgehens ist notwendig, um eine individuelle Therapieentscheidung zu treffen.

Eine nicht behandelte Pseudarthrose des Skaphoids kann bei Erwachsenen zu einer Fehlstellung und später zu einem karpalen Kollaps führen, welcher zu

vorzeitiger Arthrose im Handgelenk prädisponiert [80]. Die Spätfolgen bei Patienten im Wachstumsalter sind jedoch weitgehend unbekannt. Es existieren auch nur sehr wenige Informationen zur Behandlung der karpalen Instabilität bei Kindern und Jugendlichen. In ihrer Studie zu der operativen Therapie von 20 Kindern mit Skaphoidpseudarthrose berichteten Henderson und Letts [153] von zwei Patienten mit karpalem Kollaps. Nach Schraubenosteosynthese und Rekonstruktion mittels Knochentransplantats waren beide Kinder beschwerdefrei. Mintzer und Waters [157] berichteten von drei Patienten im Wachstumsalter mit DISI-Fehlstellung. Alle wurden chirurgisch behandelt. Es kam zur Ausheilung der Pseudarthrose mit postoperativ bestehender Fehlstellung. Alle drei Patienten waren klinisch beschwerdefrei.

Interessanterweise existieren in der Literatur keine Fallserien über eine frühzeitige Handgelenksarthrose bei karpalem Kollaps als Folge einer Skaphoidpseudarthrose im Wachstumsalter. Da sich eine fortgeschrittene Degeneration der Handwurzel über einen langen Zeitraum zu entwickeln scheint, müssten die Kinder und Jugendlichen langfristig im Erwachsenenalter weiterverfolgt werden [18, 120].

Clementson et al. [230] führten in einer aktuellen prospektiven Analyse zu distalen Skaphoidfrakturen eine Follow-up-Untersuchung nach 10 Jahren durch. Alle 41 Patienten in ihrer Studienkohorte (Alter bei Verletzung 9–65 Jahre) wurden konservativ behandelt. Die Entwicklung einer posttraumatischen Arthrose im STT- (skapho-trapezio-trapezoidal) Gelenk wurde mittels CT untersucht. Dabei zeigte sich bei 7 Patienten eine Arthrose im STT-Gelenk; alle waren jedoch klinisch symptomfrei. Zwei dieser Patienten waren dabei älter als 60 Jahre. Das Risiko einer Arthroseentwicklung im STT-Gelenk nach einer Fraktur des distalen Skaphoids wurde allgemein als sehr gering eingeschätzt. Ob dies jedoch auch auf Frakturen der Taille oder des proximalen Skaphoidpols zutrifft, ist nicht abschließend geklärt.

Bekannt ist auch, dass das Skaphoid im Wachstumsalter ein Potential zur Spontankorrektur von Fehlstellungen besitzt [80]. Das genaue Ausmaß ist jedoch nicht bekannt. Die langfristigen Folgen einer unbehandelten Skaphoidfraktur im Wachstumsalter sind daher bis heute nicht genau geklärt. Die Prognose von Kindern und Jugendlichen mit Handgelenksschmerzen

aufgrund einer nicht ausgeheilten Skaphoidfraktur scheint unter einer angemessenen Therapie jedoch sehr gut zu sein.

6 Zusammenfassung

Frakturen des Skaphoids sind im Wachstumsalter selten. Die Diagnosestellung ist schwierig. Dies liegt an der unspezifischen klinischen Symptomatik und der geringen Sensitivität der Röntgenaufnahmen. Die Interpretation dieser ist durch die Skelettunreife der Handwurzel zusätzlich erschwert. Das Vorhandensein einer Skaphoidfraktur ist umso wahrscheinlicher, wenn folgende Faktoren zutreffen: männliches Geschlecht, Sturz auf die Hand in Dorsalextension, Alter ≥ 9 Jahre und Verletzung bei sportlichen Aktivitäten.

In der vorliegenden Studie wurde die Diagnostik und Therapie von Frakturen des Skaphoids bei Kindern und Jugendlichen retrospektiv evaluiert. Eingeschlossen wurden dabei 115 Patienten in einem Alter von 7-17 Jahren, welche in einem Zeitraum von 12 Jahren in der Kinderchirurgischen Klinik und Poliklinik am Dr. von Haunerschen Kinderspital der LMU München mit Verdacht auf eine Verletzung des Skaphoids behandelt wurden. Als Einschlusskriterien galten der anamnestische und klinische Verdacht auf eine Skaphoidfraktur und eine durchgeführte Röntgenuntersuchung des Handgelenks.

Ein weiterer Aspekt der Studie war das Ermitteln der funktionellen Langzeitergebnisse und die Zufriedenheit der Patienten mit der durchgeführten Behandlung. Dazu konnten insgesamt 53,6% aller Patienten mit bestätigter Skaphoidfraktur nachverfolgt werden.

Der klinische Verdacht auf eine Skaphoidfraktur wurde bei 56 der 115 Patienten (48,7%) bestätigt. Bei 43 Kindern (37,4%) konnte weder eine Skaphoidfraktur noch eine andere spezifische Verletzung im Bereich des Handgelenks festgestellt werden. Bei 16 Patienten (13,9%) wurden andere Verletzungen diagnostiziert. Am häufigsten waren dabei Frakturen des distalen Radius (bei 7 Patienten), gefolgt von Frakturen der Basis des zweiten Metakarpalknochens (bei 2 Patienten).

Das mittlere Alter der 56 Patienten mit einer Fraktur des Skaphoids lag zum Zeitpunkt der Verletzung bei 12,4 Jahren (Spanne 9-17 Jahre). Jungen waren

2,5 mal häufiger von einer Skaphoidfraktur betroffen als Mädchen. Nur in der unteren Altersgruppe von 9 bis 10 Lebensjahren waren Mädchen vermehrt vertreten, was sich auf die früher einsetzende Skelettreife zurückführen lässt. Die mittlere zeitliche Verzögerung zwischen Unfallzeitpunkt und Erstvorstellung betrug 0,8 Tage. Ein großer Teil der Patienten (48,2%) verletzte sich bei sportlichen Aktivitäten, wie Fahrrad- und Rollerfahren. Bei 27 der 56 Patienten (48,2%) konnte als Unfallmechanismus ein Sturz auf die dorsalextendierte Hand anamnestisch nachvollzogen werden.

Die klinische Untersuchung wird durch die häufig eher unspezifische Symptomatik erschwert. Der klassische Druckschmerz in der Tabatière kann nicht als zuverlässiges klinisches Zeichen zur Diagnosestellung einer Skaphoidfraktur angesehen werden. In unserer Studie wurde bei 82,1% aller Patienten mit Skaphoidfrakturen ein deutlicher Druckschmerz bei der ersten klinischen Untersuchung dokumentiert. Jedoch wies auch eine hohe Anzahl an Patienten (81,4%), bei denen im Verlauf keine Skaphoidfraktur oder eine andere Verletzung nachgewiesen wurde, dieses Zeichen auf. Daher empfiehlt es sich, bei Kindern mit Schmerzen im Handgelenk und lokalisiertem Druckschmerz in der Tabatière, zusätzlich auch noch auf das Vorhandensein anderer klinischer Zeichen (Schmerzen bei Extension/Flexion und Radialabduktion im Handgelenk, Daumenstauchungsschmerz und Druckschmerz über dem palmaren Skaphoid) zu testen.

Bei Patienten im Wachstumsalter mit posttraumatischen Handgelenksschmerzen sollte auch bei negativem Röntgenbefund eine Ruhigstellung im Unterarmgips erfolgen. Eine Skaphoidfraktur ist auf konventionellen Röntgenaufnahmen häufig sehr schwierig zu diagnostizieren bzw. auszuschließen. So waren auch in dieser Studie nur 37,5% der Skaphoidfrakturen auf Röntgenbildern eindeutig erkennbar. Es konnte gezeigt werden, dass die Wahrscheinlichkeit für das tatsächliche Vorliegen einer Skaphoidfraktur hoch ist (rund 76%), wenn röntgenologisch der Verdacht auf eine solche Fraktur besteht, ohne dass eine sichere Frakturlinie nachweisbar ist. Männliches Geschlecht und ein Sturz auf die dorsalextendierte Hand in der Anamnese erhöhen die Frakturwahrscheinlichkeit auf rund 94%. Ein negativer Röntgenbefund ist dagegen wenig spezifisch und kann eine Skaphoidfraktur

nicht sicher ausschließen. Aufgrund der guten Verfügbarkeit, des geringen ökonomischen Aufwands sowie zur Detektion von Begleit- oder anderen Verletzungen steht die Röntgenuntersuchung als Erstdiagnostik nach wie vor an erster Stelle. In einer zusätzlichen Kahnbeinzielaufnahme nach Stecher ist oft eine bessere Darstellung des Handwurzelknochens möglich. In den aktuellen S3-Leitlinien wird als Basisdiagnostik die Durchführung der Projektionsradiographie des Handgelenks mit den drei Standardaufnahmen (dorsopalmar, lateral und Stecher) empfohlen. In unserem Studienkollektiv wurde eine Kahnbeinzielaufnahme bei 43 Patienten durchgeführt. Sie war in 34,9% der Fälle positiv, dabei war die Frakturlinie bei zwei der Patienten nur in diesen Aufnahmen sichtbar.

Eine klinische Kontrolluntersuchung ist nach einer Woche indiziert. In unserer Studie fand diese im Mittel nach 7,1 Tagen statt. Zu diesem Zeitpunkt waren bereits einige Patienten (20%), bei denen ursprünglich der Verdacht auf eine Skaphoidfraktur vorlag, beschwerdefrei, und konnten aus der Behandlung entlassen werden.

Bei persistierenden Schmerzen sollte eine MRT angeschlossen werden. In unserem Kollektiv wurden bei 60 der 115 Patienten (52,2%) MRT Untersuchungen durchgeführt. Insgesamt wurde in dieser Studie eine Skaphoidfraktur bei 56 Kindern und Jugendlichen mit posttraumatischen Handgelenksschmerzen diagnostiziert. Bei 60,7% wurde die Fraktur erst in den MRT-Aufnahmen erkannt. Die MRT ermöglicht die frühzeitige definitive Diagnose und damit eine korrekte Behandlung. Ein negativer MRT-Befund schließt eine Fraktur mit hoher Sicherheit aus und erlaubt eine frühere Rückkehr zur Schule und zu sportlichen Aktivitäten. Durch das Vermeiden weiterer Röntgenaufnahmen wird auch die Strahlenbelastung reduziert.

In unserem Kollektiv waren folgende patientenspezifische Faktoren signifikant häufiger mit einer Skaphoidfraktur verbunden: ein Sturz auf die Hand in Dorsalextension (p-Wert = 0,006), männliches Geschlecht (p-Wert = 0,018) und Schmerzen bei Flexion und Extension im Handgelenk (p-Wert = 0,037). Aufgrund der geringen Datengrundlage ist eine Einschränkung der Aussagekraft dieser Ergebnisse zu berücksichtigen. Dennoch könnte bei Zutreffen all dieser Faktoren erwogen werden, bereits rascher eine MRT zur Diagnosesicherung durchzuführen.

Neben der Diagnostik okkultter Skaphoidfrakturen, besitzt die MRT außerdem auch einen hohen Stellenwert zum Ausschluss weiterer therapiebedürftiger ligamentärer und knöcherner Verletzungen. Bei 24 der 56 Patienten (42,9%) mit Skaphoidfrakturen in unserem Studienkollektiv konnten eine oder mehrere zusätzliche Verletzungen im Bereich desselben Handgelenks nachgewiesen werden. Die häufigsten mittels MRT diagnostizierten Band- oder Diskusläsionen waren dabei Läsionen des SL-Bandes (4 Patienten), gefolgt von TFCC-Läsionen (3 Patienten). Die häufigste knöcherne Begleitverletzung ist eine Fraktur des Os capitatum (bei 6 bzw. 10,7% der Patienten mit Skaphoidfrakturen in unserem Kollektiv).

Akute, undislozierte Skaphoidfrakturen können konservativ therapiert werden. In unserem Studienkollektiv erhielten bis auf 2 Kinder, alle 54 Patienten (96,4%) eine konservative Therapie mittels Ruhigstellung des Handgelenks im Ober- oder Unterarmgips mit Daumeneinschluss. 9 Kinder erhielten zuerst einen Oberarmgips, welcher nach durchschnittlich 3,5 Wochen gegen einen Unterarmgips getauscht wurde. Bei allen anderen Patienten erfolgte die Immobilisation gleich von Beginn an im Unterarmgips.

Die mittlere Ruhigstellungszeit betrug in unserem Kollektiv 51,8 Tage (7,4 Wochen). Bei keinem der Patienten waren zum Zeitpunkt des Behandlungsabschlusses Zeichen von Komplikationen im Sinne einer Pseudarthrose oder avaskulären Nekrose nachweisbar. Außerdem traten auch keine Komplikationen auf, die durch die Ruhigstellung selbst verursacht wurden (wie z.B. Nervenschädigungen, Druckulzera oder anhaltende Bewegungseinschränkungen).

Ein statistisch signifikanter Zusammenhang konnte zwischen der Frakturlokalisierung und der Dauer der Ruhigstellung sowie dem Alter der Patienten festgestellt werden (p -Wert = 0.02). Frakturen mit Lokalisation in der Taille oder am Übergang zum proximalen Skaphoidpol bedurften einer längeren Immobilisation (durchschnittlich 8 Wochen) im Vergleich zu weiter distal lokalisierten Frakturen (durchschnittlich 7 Wochen). Außerdem war eine Frakturlokalisierung im Bereich der Taille und am Übergang zum proximalen Pol vermehrt bei älteren Kindern (im Mittel 13,3 Jahre im Vergleich zu 11,9 Jahren bei einer Lokalisation weiter distal) zu finden.

Des Weiteren zeigten sich auch Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen Geschlecht und Frakturlokalisierung, ohne dass eine statistisch hochsignifikante Aussage möglich war. Bei Jungen traten dabei deutlich häufiger Skaphoidfrakturen im Bereich der Taille und am Übergang zum proximalen Pol auf.

Instabile Frakturen müssen operativ versorgt werden. Dies war in unserem Kollektiv bei 2 Patienten (3,6%) notwendig. Ein 12-jähriger Patient erlitt dislozierte Frakturen der gesamten proximalen Handwurzelreihe. Ein 17-jähriger Patient zog sich durch einen Sturz eine Luxationsfraktur der linken Handwurzel mit dislozierten Skaphoid- und Os capitatum Frakturen, Ruptur des LT-Bandes sowie distaler Radiusfraktur zu. Die Versorgung der Skaphoidfraktur erfolgte in beiden Fällen mittels Kompressionsschraubenosteosynthese mit der Herbert-Schraube. Ob bei Jugendlichen mit akuten, undislozierten Skaphoidfrakturen eine Indikation zur operativen Therapie besteht, ist nach der aktuellen Studienlage nicht abschließend geklärt und muss genauer definiert werden. Dagegen sprechen die sehr guten Erfolgsraten der konservativen Therapie in unserem Studienkollektiv.

Im Rahmen der Studie konnten Follow-up-Informationen zu 53,6% der Patienten erhoben werden. Die Befragung erfolgte standardisiert anhand eines entsprechenden Fragebogens. 7 Patienten (12,5%) nahmen zusätzlich an einer klinischen Nachuntersuchung in unserer Klinik teil. 23 Patienten (41,1%) wurden telefonisch befragt.

Nach einer mittleren Zeitdauer von 5,9 Jahren nach Erstvorstellung waren 73,3% der Patienten vollkommen beschwerdefrei. 16,7% der Teilnehmer gaben leichte, intermittierende Schmerzen ohne Beeinträchtigung im Alltag an, welche vor allem bei besonderer Belastung der Hand wie Fahrradfahren oder Turnen auftraten. Ruheschmerzen, ein Verlust an Beweglichkeit oder Kraft der Hand im Vergleich zur Gegenseite lagen bei keinem dieser Probanden vor. 2 Probanden (6,7%) fühlten sich durch Schmerzen im Handgelenk beim Greifen oder bei starker Dorsalextension leicht im Alltag beeinträchtigt. Im Folgenden angefertigte Röntgen- und MRT-Aufnahmen zeigten keine pathologischen Befunde. Ein Studienteilnehmer (3,3%), der aufgrund einer schweren Luxationsfraktur der Handwurzel mit Begleitverletzungen operativ behandelt

wurde, fühlte sich zum Zeitpunkt der telefonischen Befragung durch eine schlechte Belastbarkeit und Schmerzen der Hand im Alltag stark eingeschränkt. Alle Patienten, die klinisch nachuntersucht wurden, zeigten keine funktionellen Einschränkungen des betroffenen Handgelenks. Pseudarthrosen wurden nicht festgestellt. Der Großteil aller Studienteilnehmer (93,3%) hatte keine oder nur leichte Beschwerden im Gips. Zu den leichten Beschwerden zählten Juckreiz (9 Patienten), Hitzegefühl (3 Patienten) und Druckstellen am Oberarm bei Beugung (2 Patienten). Ebenso fühlte sich die Mehrheit der Befragten (86,7%) dadurch nicht im Alltag beeinträchtigt. Alle Patienten (100%) gaben Zufriedenheit mit der Therapie an.

Die konservative Therapie akuter Skaphoidfrakturen führt zu sehr guten Langzeitergebnissen und ist mit einer hohen Patientenzufriedenheit verbunden. In unserem Therapiealgorithmus empfehlen wir eine Ruhigstellung im Unterarmgips mit Daumeneinschluss für mindestens 4 Wochen bei undislozierten Frakturen des distalen Skaphoidpols und im Übergangsbereich zur Taille. Bei weiter proximal lokalisierten Frakturen ist dagegen eine Ruhigstellung für mindestens 6 Wochen zu bevorzugen. Eine Sportkarenz von mindestens 2-3 Wochen nach Behandlungsabschluss und ein Vermeiden von exzessiver Belastung des Handgelenks sind zu empfehlen. Eine Physio- oder Ergotherapie kann bei persistierenden Beschwerden sinnvoll sein.

Im Gegensatz zu den Verletzungen bei Erwachsenen sind Skaphoidfrakturen im Wachstumsalter zumeist im distalen Pol und am Übergang zur Taille lokalisiert (73,3% in unserem Kollektiv) und weniger häufig disloziert. Dies trägt zu einer günstigeren Prognose bei. Bei verspäteter Diagnosestellung oder unzureichender Therapie, besteht jedoch auch bei Kindern und Jugendlichen das Risiko einer Pseudarthrosenbildung und den damit verbundenen Schmerzen und protrahierten Verläufen.

Die von uns gewonnenen Daten sollen in Zukunft eine sichere Diagnosestellung und das Einleiten einer adäquaten, altersentsprechenden Therapie erleichtern, Komplikationen vermeiden und damit zu einer Verbesserung der Behandlung von Kindern und Jugendlichen mit Skaphoidfrakturen beitragen.

7 Literaturverzeichnis

1. Vahvanen, V. and M. Westerlund, *Fracture of the carpal scaphoid in children. A clinical and roentgenological study of 108 cases.* Acta Orthop Scand, 1980. **51**(6): p. 909-13.
2. Weinberg, A. and B. Schmidt, *Skaphoidfraktur und Skaphoidpseudarthrose,* in *Frakturen und Luxationen der Hand,* H. Towfigh, et al., Editors. 2014, Springer: Berlin [u.a.]. p. 198-201.
3. Nafie, S.A., *Fractures of the carpal bones in children.* Injury, 1987. **18**(2): p. 117-9.
4. Eckert, K., et al., *Diagnostisches Vorgehen bei Handwurzelknochenfrakturen im Kindesalter: eine retrospektive Analyse.* Zeitschrift für Orthopädie und Unfallchirurgie, 2016. **154**(01): p. 43-49.
5. Wulff, R.N. and T.L. Schmidt, *Carpal fractures in children.* J Pediatr Orthop, 1998. **18**(4): p. 462-5.
6. Pieper, W.-M., S. Gardt, and S.H.v. Kap-herr, *Handwurzelfrakturen im Kindesalter.* Unfallchirurgie, 1980. **6**(3): p. 162.
7. Fotiadou, A., et al., *Wrist injuries in young adults: the diagnostic impact of CT and MRI.* Eur J Radiol, 2011. **77**(2): p. 235-9.
8. Sommerfeldt, D.W., *Hand,* in *Praxis der Kinder- und Jugendtraumatologie,* H.G. Dietz, et al., Editors. 2011, Springer: Heidelberg. p. 331-349.
9. Ahmed, I., et al., *The pediatric fracture of the scaphoid in patients aged 13 years and under: an epidemiological study.* J Pediatr Orthop, 2014. **34**(2): p. 150-4.
10. Tan, Y.W. and N. Maffulli, *Carpal scaphoid fracture in the skeletally immature: a single centre one-year prospective study.* Acta Orthop Belg, 2009. **75**(5): p. 616-22.
11. Christodoulou, A.G. and C.L. Colton, *Scaphoid fractures in children.* J Pediatr Orthop, 1986. **6**(1): p. 37-9.
12. Frank, J. and I. Marzi, *Hand,* in *Kindertraumatologie,* I. Marzi, Editor. 2016, Springer: Berlin, Heidelberg. p. 250-259.
13. Mussbichler, H., *Injuries of the carpal scaphoid in children.* Acta radiol, 1961. **56**: p. 361-8.
14. Evenski, A.J., et al., *Clinically suspected scaphoid fractures in children.* J Pediatr Orthop, 2009. **29**(4): p. 352-5.
15. Jørgsholm, P., et al., *MRI shows a high incidence of carpal fractures in children with posttraumatic radial-sided wrist tenderness.* Acta Orthop, 2016. **87**(5): p. 533-7.
16. Larson, B., T.R. Light, and J.A. Ogden, *Fracture and ischemic necrosis of the immature scaphoid.* J Hand Surg Am, 1987. **12**(1): p. 122-7.
17. Toh, S., et al., *Scaphoid fractures in children: problems and treatment.* J Pediatr Orthop, 2003. **23**(2): p. 216-21.
18. Garcia-Mata, S., *Carpal scaphoid fracture nonunion in children.* J Pediatr Orthop, 2002. **22**(4): p. 448-51.
19. Weinberg, A., *Frakturen und Luxationen im Handwurzelbereich,* in *Frakturen und Luxationen der Hand,* H. Towfigh, et al., Editors. 2014, Springer: Berlin [u.a.]. p. 170-171.
20. D'Arienzo, M., *Scaphoid fractures in children.* J Hand Surg Br, 2002. **27**(5): p. 424-6.
21. Cockshott, W., *Distal avulsion fractures of the scaphoid.* The British journal of radiology, 1980. **53**(635): p. 1037-1040.

22. Elhassan, B.T. and A.Y. Shin, *Scaphoid fracture in children*. Hand Clin, 2006. **22**(1): p. 31-41.
23. de Putter, C.E., et al., *Trends in wrist fractures in children and adolescents, 1997-2009*. J Hand Surg Am, 2011. **36**(11): p. 1810-1815.e2.
24. Gerbino II, P.G., *Wrist disorders in the young athlete*. Operative Techniques in Sports Medicine, 1998. **6**(4): p. 197-205.
25. Kocher, M.S., P.M. Waters, and L.J. Micheli, *Upper extremity injuries in the paediatric athlete*. Sports Med, 2000. **30**(2): p. 117-35.
26. Reichert, B., *Anatomie in vivo*. 2 ed. 2005: Thieme. 204. p. 76
27. McMurrich, J.P., *The nomenclature of the carpal bones*. The Anatomical Record, 1914. **8**(3): p. 173-182.
28. Langer, M.F., et al., *Anatomie und Biomechanik des Kahnbeins*. Der Orthopäde, 2016. **11**(45): p. 926-937.
29. Johnson, R.P., *The evolution of carpal nomenclature: a short review*. J Hand Surg Am, 1990. **15**(5): p. 834-8.
30. Marzke, M.W., *Upper-limb evolution and development*. J Bone Joint Surg Am, 2009. **91 Suppl 4**: p. 26-30.
31. Richmond, B.G. and D.S. Strait, *Evidence that humans evolved from a knuckle-walking ancestor*. Nature, 2000. **404**(6776): p. 382-5.
32. Orr, C.M., *Kinematics of the anthropoid os centrale and the functional consequences of scaphoid-centrale fusion in African apes and hominins*. J Hum Evol, 2018. **114**: p. 102-117.
33. Kivell, T.L. and D. Schmitt, *Independent evolution of knuckle-walking in African apes shows that humans did not evolve from a knuckle-walking ancestor*. Proc Natl Acad Sci U S A, 2009. **106**(34): p. 14241-6.
34. Tocheri, M.W., et al., *The evolutionary history of the hominin hand since the last common ancestor of Pan and Homo*. J Anat, 2008. **212**(4): p. 544-62.
35. Marzke, M.W., K.L. Wullstein, and S.F. Viegas, *Evolution of the power ("squeeze") grip and its morphological correlates in hominids*. Am J Phys Anthropol, 1992. **89**(3): p. 283-98.
36. Wolfe, S.W., et al., *The dart-throwing motion of the wrist: is it unique to humans?* J Hand Surg Am, 2006. **31**(9): p. 1429-37.
37. Crisco, J.J., et al., *In vivo radiocarpal kinematics and the dart thrower's motion*. J Bone Joint Surg Am, 2005. **87**(12): p. 2729-40.
38. Young, R.W., *Evolution of the human hand: the role of throwing and clubbing*. J Anat, 2003. **202**(1): p. 165-74.
39. Marzke, M.W., J.M. Longhill, and S.A. Rasmussen, *Gluteus maximus muscle function and the origin of hominid bipedality*. Am J Phys Anthropol, 1988. **77**(4): p. 519-28.
40. Towfigh, H., *Frakturen und Luxationen im Handwurzelbereich*, in *Frakturen und Luxationen der Hand*, H. Towfigh, et al., Editors. 2014, Springer: Berlin [u.a.]. p. 159-180.
41. Schünke, M., E. Schulte, and U. Schumacher, *Prometheus: Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem: LernAtlas der Anatomie*. 3 ed. Prometheus. 2011, Stuttgart: Thieme. 624. p. 397
42. Buijze, G.A., et al., *Osseous and ligamentous scaphoid anatomy: Part I. A systematic literature review highlighting controversies*. J Hand Surg Am, 2011. **36**(12): p. 1926-35.
43. Dönicke, T. and R. Friedel, *Skaphoidfraktur und Skaphoidpseudarthrose*, in *Frakturen und Luxationen der Hand*, H. Towfigh, et al., Editors. 2014, Springer: Berlin [u.a.]. p. 181-212.

44. Sendher, R. and A.L. Ladd, *The scaphoid*. Orthop Clin North Am, 2013. **44**(1): p. 107-20.
45. Ceri, N., et al., *The morphological and morphometric features of the scaphoid*. J Hand Surg Br, 2004. **29**(4): p. 393-8.
46. Crisco, J.J., et al., *Carpal bone size and scaling in men versus in women*. J Hand Surg Am, 2005. **30**(1): p. 35-42.
47. Le Minor, J.M. and E. Rapp, *Relative weights of the human carpal bones: biological and functional interests*. Ann Anat, 2001. **183**(6): p. 537-43.
48. Heinzelmann, A.D., G. Archer, and R.R. Bindra, *Anthropometry of the human scaphoid*. J Hand Surg Am, 2007. **32**(7): p. 1005-8.
49. Patterson, R.M., et al., *Scaphoid anatomy and mechanics: update and review*. Operative Techniques in Orthopaedics, 2003. **13**(1): p. 2-10.
50. Anz, A.W., et al., *Pediatric scaphoid fractures*. J Am Acad Orthop Surg, 2009. **17**(2): p. 77-87.
51. Oehmke, M.J., et al., *The blood supply of the scaphoid bone*. J Hand Surg Eur Vol, 2009. **34**(3): p. 351-7.
52. Kamal, R.N., A. Starr, and E. Akelman, *Carpal Kinematics and Kinetics*. J Hand Surg Am, 2016. **41**(10): p. 1011-1018.
53. Wolfe, S.W., C. Neu, and J.J. Crisco, *In vivo scaphoid, lunate, and capitate kinematics in flexion and in extension*. J Hand Surg Am, 2000. **25**(5): p. 860-9.
54. Rainbow, M.J., et al., *In vivo kinematics of the scaphoid, lunate, capitate, and third metacarpal in extreme wrist flexion and extension*. J Hand Surg Am, 2013. **38**(2): p. 278-88.
55. Kijima, Y. and S.F. Viegas, *Wrist anatomy and biomechanics*. J Hand Surg Am, 2009. **34**(8): p. 1555-63.
56. Werner, F.W., et al., *Scaphoid and lunate motion during a wrist dart throw motion*. J Hand Surg Am, 2004. **29**(3): p. 418-22.
57. Krimmer, H., *Frakturen der Handwurzelknochen*, in *Die Handchirurgie*, M. Sauerbier, et al., Editors. 2014, Urban & Fischer Verlag/Elsevier GmbH: München. p. 244-251.
58. Berger, R.A., *The anatomy of the ligaments of the wrist and distal radioulnar joints*. Clin Orthop Relat Res, 2001(383): p. 32-40.
59. Taleisnik, J., *The ligaments of the wrist*. J Hand Surg Am, 1976. **1**(2): p. 110-8.
60. Schmitt, R., *Bandverletzungen an der Handwurzel*. Der Radiologe, 2016. **56**(12): p. 1087-1106.
61. Towfigh, H., *Kapsel-Band-Läsionen im Handgelenkbereich*, in *Frakturen und Luxationen der Hand*, H. Towfigh, et al., Editors. 2014, Springer: Berlin [u.a.]. p. 227-272.
62. Gelberman, R.H. and J. Menon, *The vascularity of the scaphoid bone*. J Hand Surg Am, 1980. **5**(5): p. 508-13.
63. Xiao, Z., G. Xiong, and W. Zhang, *New findings about the intrascaphoid arterial system*. J Hand Surg Eur Vol, 2018: p. 1753193418758890.
64. Taleisnik, J. and P.J. Kelly, *The extraosseous and intraosseous blood supply of the scaphoid bone*. J Bone Joint Surg Am, 1966. **48**(6): p. 1125-37.
65. Dubey, P.P., N.K. Chauhan, and M.S. Siddiqui, *Vascular Foramina of Scaphoid and its Clinical Implications*. Biomedical Research, 2011. **22**(2): p. 201-204.
66. Dawson, J.S., A.L. Martel, and T.R. Davis, *Scaphoid blood flow and acute fracture healing. A dynamic MRI study with enhancement with gadolinium*. J Bone Joint Surg Br, 2001. **83**(6): p. 809-14.
67. Sauerbier, M. and M. Müller, *Skaphoidfrakturen: Diagnostik, Zugangswege, Komplikationen*. Zentralblatt für Chirurgie, 2007. **132**(03): p. W42-W53.

68. Steinmann, S.P. and J.E. Adams, *Scaphoid fractures and nonunions: diagnosis and treatment*. J Orthop Sci, 2006. **11**(4): p. 424-31.
69. Reddy, R.S. and J. Compson, *(i) Examination of the wrist—surface anatomy of the carpal bones*. Current Orthopaedics, 2005. **19**(3): p. 171-179.
70. Spies, C.K., et al., *Carpus und distales Radioulnargelenk*. Der Unfallchirurg, 2016. **8**(119): p. 673-689.
71. Spanel-Borowski, K., *Zytologie und Histologie - Grundlagen*, in *Anatomie*, G. Aumüller, et al., Editors. 2010, Thieme: Stuttgart. p. 20-70.
72. Welsch, U. and T. Deller, *Lehrbuch Histologie*. 3 ed. 2010, München: Elsevier, Urban & Fischer. 596. p. 116-119
73. Stuart, H.C., et al., *Onsets, completions and spans of ossification in the 29 bonegrowth centers of the hand and wrist*. Pediatrics, 1962. **29**: p. 237-49.
74. Leicht, P., J.B. Mikkelsen, and C.F. Larsen, *Scapholunate distance in children*. Acta Radiol, 1996. **37**(5): p. 625-6.
75. Grundy, M., *Fractures of the carpal scaphoid in children. A series of eight cases*. Br J Surg, 1969. **56**(7): p. 523-4.
76. Fabre, O., H. De Boeck, and P. Haentjens, *Fractures and nonunions of the carpal scaphoid in children*. Acta Orthop Belg, 2001. **67**(2): p. 121-5.
77. Goddard, N., *Carpal fractures in children*. Clin Orthop Relat Res, 2005(432): p. 73-6.
78. Huckstadt, T., et al., *Pediatric fractures of the carpal scaphoid: a retrospective clinical and radiological study*. J Pediatr Orthop, 2007. **27**(4): p. 447-50.
79. Leslie, I.J. and R.A. Dickson, *The fractured carpal scaphoid. Natural history and factors influencing outcome*. J Bone Joint Surg Br, 1981. **63-b**(2): p. 225-30.
80. Weber, D.M., *Skaphoidfrakturen im Kindesalter*. Der Unfallchirurg, 2011. **114**(4): p. 285.
81. Gholson, J.J., et al., *Scaphoid fractures in children and adolescents: contemporary injury patterns and factors influencing time to union*. J Bone Joint Surg Am, 2011. **93**(13): p. 1210-9.
82. Brudvik, C. and L.M. Hove, *Childhood fractures in Bergen, Norway: identifying high-risk groups and activities*. J Pediatr Orthop, 2003. **23**(5): p. 629-34.
83. Curtin, J. and N.R. Kay, *Hand injuries due to soccer*. Hand, 1976. **8**(1): p. 93-5.
84. Green, J.R., Jr. and G.M. Rayan, *Scaphoid fractures in soccer goalkeepers*. J Okla State Med Assoc, 1997. **90**(2): p. 45-7.
85. Horii, E., et al., *Scaphoid fracture as a "puncher's fracture"*. J Orthop Trauma, 1994. **8**(2): p. 107-10.
86. Van Tassel, D.C., B.D. Owens, and J.M. Wolf, *Incidence estimates and demographics of scaphoid fracture in the U.S. population*. J Hand Surg Am, 2010. **35**(8): p. 1242-5.
87. Hove, L.M., *Epidemiology of scaphoid fractures in Bergen, Norway*. Scand J Plast Reconstr Surg Hand Surg, 1999. **33**(4): p. 423-6.
88. Greene, M.H., A.M. Hadied, and R.L. LaMont, *Scaphoid fractures in children*. J Hand Surg Am, 1984. **9**(4): p. 536-41.
89. Bloem, J.J., *Fracture of the carpal scaphoid in a child aged 4*. Arch Chir Neerl, 1971. **23**(1): p. 91-4.
90. Langhoff, O. and J.L. Andersen, *Consequences of late immobilization of scaphoid fractures*. J Hand Surg Br, 1988. **13**(1): p. 77-9.
91. Journeau, P., *Traumatismes du carpe chez l'enfant*. Chirurgie de la Main, 2013. **32**: p. S16-S28.

92. Al-Adhami, A.S., et al., *Clinical diagnosis of fractures in a paediatric population*. Eur J Emerg Med, 2005. **12**(2): p. 99-101.
93. Wilson, E.B., T.F. Beattie, and A.G. Wilkinson, *Epidemiological review and proposed management of 'scaphoid' injury in children*. Eur J Emerg Med, 2011. **18**(1): p. 57-61.
94. Duckworth, A.D., et al., *Predictors of fracture following suspected injury to the scaphoid*. J Bone Joint Surg Br, 2012. **94**(7): p. 961-8.
95. Schmid, T., *Traumatologie*, in *Praxisleitfaden Allgemeinmedizin S*. Gesenhues, R.H. Ziesché, and A. Bretholt, Editors. 2014, Elsevier, Urban & Fischer: München. p. 195.
96. Mallee, W.H., et al., *Clinical diagnostic evaluation for scaphoid fractures: a systematic review and meta-analysis*. J Hand Surg Am, 2014. **39**(9): p. 1683-1691.e2.
97. McRae, R. and M. Esser, *Praxis der Frakturbehandlung*. 4 ed. 2009, München: Elsevier, Urban & Fischer. 454. p. 210
98. Pillai, A. and M. Jain, *Management of clinical fractures of the scaphoid: results of an audit and literature review*. Eur J Emerg Med, 2005. **12**(2): p. 47-51.
99. Parvizi, J., et al., *Combining the clinical signs improves diagnosis of scaphoid fractures. A prospective study with follow-up*. J Hand Surg Br, 1998. **23**(3): p. 324-7.
100. Smith, M., et al., *Review of imaging of scaphoid fractures*. ANZ J Surg, 2010. **80**(1-2): p. 82-90.
101. Tubiana, R., J.-M. Thomine, and E.J. Mackin, *Examination of the hand and wrist*. 2 ed. 1996, London: Dunitz. X, 397 S. :. p. 228
102. Yin, Z.G., et al., *Diagnostic accuracy of imaging modalities for suspected scaphoid fractures: meta-analysis combined with latent class analysis*. J Bone Joint Surg Br, 2012. **94**(8): p. 1077-85.
103. Geijer, M., *Diagnosis of scaphoid fracture: optimal imaging techniques*. Reports in Medical Imaging, 2013. **6**: p. 57-69.
104. Tibrewal, S., et al., *Role of MRI in the diagnosis and management of patients with clinical scaphoid fracture*. Int Orthop, 2012. **36**(1): p. 107-10.
105. Johnson, K.J., S.F. Haigh, and K.E. Symonds, *MRI in the management of scaphoid fractures in skeletally immature patients*. Pediatr Radiol, 2000. **30**(10): p. 685-8.
106. Cook, P.A., et al., *Suspected scaphoid fractures in skeletally immature patients: application of MRI*. J Comput Assist Tomogr, 1997. **21**(4): p. 511-5.
107. Amrami, K.K., *Radiology corner: diagnosing radiographically occult scaphoid fractures—what's the best second test?* Journal of the American Society for Surgery of the Hand, 2005. **5**(3): p. 134-138.
108. Ring, D. and S. Lozano-Calderon, *Imaging for suspected scaphoid fracture*. J Hand Surg Am, 2008. **33**(6): p. 954-7.
109. Mallee, W., et al., *Comparison of CT and MRI for diagnosis of suspected scaphoid fractures*. J Bone Joint Surg Am, 2011. **93**(1): p. 20-8.
110. Offiah, A.C. and D. Burke, *The diagnostic accuracy of cross-sectional imaging for detecting acute scaphoid fractures in children: a systematic review*. Br J Radiol, 2018: p. 20170883.
111. Shabshin, N. and M.E. Schweitzer, *Age dependent T2 changes of bone marrow in pediatric wrist MRI*. Skeletal Radiol, 2009. **38**(12): p. 1163-8.
112. Jørgsholm, P., *Scaphoid Fractures - epidemiology, diagnosis and treatment*. Hand Surgery Research Group, 2015: p. 105.

113. Biswas, D., et al., *Radiation exposure from musculoskeletal computerized tomographic scans*. J Bone Joint Surg Am, 2009. **91**(8): p. 1882-9.
114. Fowler, C., et al., *A comparison of bone scintigraphy and MRI in the early diagnosis of the occult scaphoid waist fracture*. Skeletal Radiol, 1998. **27**(12): p. 683-7.
115. Tiel-van Buul, M.M., et al., *The value of radiographs and bone scintigraphy in suspected scaphoid fracture: a statistical analysis*. Journal of Hand Surgery, 1993. **18**(3): p. 403-406.
116. Jenkins, P.J., et al., *A comparative analysis of the accuracy, diagnostic uncertainty and cost of imaging modalities in suspected scaphoid fractures*. Injury, 2008. **39**(7): p. 768-74.
117. Haferkamp, H., *Anmerkung zur Geschichte der Kahnbeinfraktur*. Aktuelle Traumatologie, 2002. **32**(05): p. 190-197.
118. Gupta, A. and F. Burke, *The fractured scaphoid: 100 years of evolution of concepts of management*. Current Orthopaedics, 1993. **7**(4): p. 248-254.
119. Williams, A.A. and H.V. Lochner, *Pediatric hand and wrist injuries*. Curr Rev Musculoskelet Med, 2013. **6**(1): p. 18-25.
120. Weber, D.M., R. Fricker, and L.E. Ramseier, *Conservative treatment of scaphoid nonunion in children and adolescents*. J Bone Joint Surg Br, 2009. **91**(9): p. 1213-6.
121. Dias, J.J., et al., *Should acute scaphoid fractures be fixed? A randomized controlled trial*. J Bone Joint Surg Am, 2005. **87**(10): p. 2160-8.
122. Bond, C.D., et al., *Percutaneous screw fixation or cast immobilization for nondisplaced scaphoid fractures*. J Bone Joint Surg Am, 2001. **83-a**(4): p. 483-8.
123. Arsalan-Werner, A., M. Sauerbier, and I.M. Mehling, *Current concepts for the treatment of acute scaphoid fractures*. Eur J Trauma Emerg Surg, 2016. **42**(1): p. 3-10.
124. Yin, Z.G., et al., *Treatment of acute scaphoid fractures: systematic review and meta-analysis*. Clin Orthop Relat Res, 2007. **460**: p. 142-51.
125. Waters, P.M., *Operative carpal and hand injuries in children*. J Bone Joint Surg Am, 2007. **89**(9): p. 2064-74.
126. Bhat, M., et al., *MRI and plain radiography in the assessment of displaced fractures of the waist of the carpal scaphoid*. J Bone Joint Surg Br, 2004. **86**(5): p. 705-13.
127. Nakamura, R., et al., *Analysis of scaphoid fracture displacement by three-dimensional computed tomography*. J Hand Surg Am, 1991. **16**(3): p. 485-92.
128. Mintzer, C. and P.M. Waters, *Acute open reduction of a displaced scaphoid fracture in a child*. J Hand Surg Am, 1994. **19**(5): p. 760-1.
129. Masquijo, J.J. and B.R. Willis, *Scaphoid nonunions in children and adolescents: surgical treatment with bone grafting and internal fixation*. J Pediatr Orthop, 2010. **30**(2): p. 119-24.
130. Bae, D.S., et al., *Functional Outcomes After Treatment of Scaphoid Fractures in Children and Adolescents*. J Pediatr Orthop, 2016. **36**(1): p. 13-8.
131. Shaterian, A., et al., *Management Modalities and Outcomes Following Acute Scaphoid Fractures in Children: A Quantitative Review and Meta-Analysis*. Hand (N Y), 2017: p. 1558944717735948.
132. Herbert, T.J. and W.E. Fisher, *Management of the fractured scaphoid using a new bone screw*. J Bone Joint Surg Br, 1984. **66**(1): p. 114-23.

133. Amboss. *Kahnbeinfraktur*. 2019 [cited 2019 30.8.]; Available from: <https://www.amboss.com/de/library#xid=l30vif&anker=Zdee1e1868ce44eb406407e9369ea3bdc>.
134. Meier, R. and M. Panzica, *Erste Ergebnisse mit einer resorbierbaren MgYREZr-Kompressionsschraube bei der instabilen Kahnbeinfraktur zeigen eine massive Zystenbildung*. *Handchirurgie· Mikrochirurgie· Plastische Chirurgie*, 2017. **49**(01): p. 37-41.
135. Akmaz, I., et al., *Biodegradable implants in the treatment of scaphoid nonunions*. *Int Orthop*, 2004. **28**(5): p. 261-6.
136. Kujala, S., et al., *Successful treatment of scaphoid fractures and nonunions using bioabsorbable screws: report of six cases*. *J Hand Surg Am*, 2004. **29**(1): p. 68-73.
137. Krimmer, H., R. Schmitt, and T. Herbert, *Kahnbeinfrakturen–Diagnostik, Klassifikation und Therapie*. *Der Unfallchirurg*, 2000. **103**(10): p. 812-819.
138. Arsalan-Werner, A., M. Sauerbier, and I. Mehling, *Skaphoidfraktur und Skaphoidpseudarthrose*. *Trauma und Berufskrankheit*, 2016. **18**(4): p. 376-385.
139. Jeon, I.H., et al., *Clinical result of operative treatment for scaphoid non-union in the skeletally immature: percutaneous versus open procedure*. *Hand Surg*, 2008. **13**(1): p. 11-6.
140. Cornwall, R., *The painful wrist in the pediatric athlete*. *Journal of Pediatric Orthopaedics*, 2010. **30**: p. S13-S16.
141. (AWMF), A.d.W.M.F. *DGU, DGOOC, DGH: S3-Leitlinie Skaphoidfraktur*. 2015 [cited 2019 30.08.]; Available from: <https://www.awmf.org/leitlinien/detail/ll/012-016.html>.
142. Schädel-Höpfner, M., et al., *Behandlung von Handwurzelfrakturen*. *Der Unfallchirurg*, 2010. **113**(9): p. 741-756.
143. Schmitt, R. and H. Rosenthal, *Bildgebende Diagnostik der Skaphoidfrakturen nach den aktuellen S3-Leitlinien*. *Röfo*, 2016. **188**(5): p. 459-69.
144. Jóskowska, K. and Z. Grabarczyk, *Greek and Latin in medical terminology*. *Medical Research Journal*, 2013. **1**(2): p. 41-52.
145. Runkel, M. and P. Rommens, *Pseudarthrosen*. *Der Unfallchirurg*, 2000. **103**(1): p. 51-63.
146. Filan, S.L. and T.J. Herbert, *Herbert screw fixation of scaphoid fractures*. *J Bone Joint Surg Br*, 1996. **78**(4): p. 519-29.
147. de Lemos, M.B., et al., *PSEUDARTHROSIS OF THE SCAPHOID IN IMMATURE SKELETONS*. *Rev Bras Ortop*, 2012. **47**(3): p. 292-6.
148. Osterman, A.L. and M. Mikulics, *Scaphoid nonunion*. *Hand Clin*, 1988. **4**(3): p. 437-55.
149. Wong, K. and H.P. von Schroeder, *Delays and poor management of scaphoid fractures: factors contributing to nonunion*. *J Hand Surg Am*, 2011. **36**(9): p. 1471-4.
150. Zura, R., et al., *Risk factors for nonunion of bone fracture in pediatric patients: An inception cohort study of 237,033 fractures*. *Medicine (Baltimore)*, 2018. **97**(31): p. e11691.
151. Southcott, R. and M.A. Rosman, *Non-union of carpal scaphoid fractures in children*. *J Bone Joint Surg Br*, 1977. **59**(1): p. 20-3.
152. Duteille, F. and G. Dautel, *Non-union fractures of the scaphoid and carpal bones in children: surgical treatment*. *J Pediatr Orthop B*, 2004. **13**(1): p. 34-8.

153. Henderson, B. and M. Letts, *Operative management of pediatric scaphoid fracture nonunion*. J Pediatr Orthop, 2003. **23**(3): p. 402-6.
154. Chloros, G.D., et al., *Pediatric scaphoid nonunion*. J Hand Surg Am, 2007. **32**(2): p. 172-6.
155. Onuba, O. and J. Ireland, *Two cases of non-union of fractures of the scaphoid in children*. Injury, 1983. **15**(2): p. 109-12.
156. Littlefield, W.G., R.L. Friedman, and J.R. Urbaniak, *Bilateral non-union of the carpal scaphoid in a child. A case report*. J Bone Joint Surg Am, 1995. **77**(1): p. 124-6.
157. Mintzer, C.M. and P.M. Waters, *Surgical treatment of pediatric scaphoid fracture nonunions*. J Pediatr Orthop, 1999. **19**(2): p. 236-9.
158. Pick, R.Y. and D. Segal, *Carpal scaphoid fracture and non-union in an eight-year-old child. Report of a case*. J Bone Joint Surg Am, 1983. **65**(8): p. 1188-9.
159. Mintzer, C.M., P.M. Waters, and B.P. Simmons, *Nonunion of the scaphoid in children treated by Herbert screw fixation and bone grafting. A report of five cases*. J Bone Joint Surg Br, 1995. **77**(1): p. 98-100.
160. Haferkamp, H. and Z. Mascharka, *Die Kahnbeinpseudarthrose im Kindesalter*. Aktuelle Traumatologie, 2002. **32**(05): p. 227-231.
161. De Boeck, H., P. Van Wellen, and P. Haentjens, *Nonunion of a carpal scaphoid fracture in a child*. J Orthop Trauma, 1991. **5**(3): p. 370-2.
162. Coblenz, G., et al., *Skaphoidfraktur und -pseudarthrose*. Der Radiologe, 2006. **46**(8): p. 664-676.
163. Louis, D.S., et al., *Congenital bipartite scaphoid--fact or fiction?* J Bone Joint Surg Am, 1976. **58**(8): p. 1108-12.
164. Roushan, A.H., et al., *Die Skaphoidfraktur*. Der Unfallchirurg, 2017. **120**(10): p. 885-889.
165. Doman, A.N. and N.W. Marcus, *Congenital bipartite scaphoid*. J Hand Surg Am, 1990. **15**(6): p. 869-73.
166. Laski, G. and R. Müller, *Doppelseitiges Os scaphoideum bipartitum*. Manuelle Medizin, 2002. **40**(1): p. 74-75.
167. Klimsa, C., M. Canova, and S. Schibli, *Os scaphoideum bipartitum mit Osteonekrose des proximalen Anteils–Differenzialdiagnose zur Pseudarthrose*. Handchirurgie· Mikrochirurgie· Plastische Chirurgie, 2014. **46**(01): p. 62-63.
168. Kim, S.B., et al., *Bilateral bipartite carpal scaphoid: a case report*. Journal of the Korean Orthopaedic Association, 2005. **40**(5): p. 614-616.
169. Takemitsu, Y., et al., *Bilateral bipartite carpal scaphoid: a case report and literature review*. Hand Surg, 2014. **19**(3): p. 427-31.
170. Chang, A.C., D.T. Leonello, and J.M. Webb, *Congenital bipartite scaphoid*. J Hand Surg Eur Vol, 2015. **40**(5): p. 537-8.
171. Maxted, M.J. and R. Owen, *Two cases of non-union of carpal scaphoid fractures in children*. Injury, 1982. **13**(5): p. 441-3.
172. Behr, B., et al., *Scaphoid nonunions in skeletally immature adolescents*. J Hand Surg Eur Vol, 2014. **39**(6): p. 662-5.
173. Reigstad, O., et al., *Excellent results after bone grafting and K-wire fixation for scaphoid nonunion surgery in skeletally immature patients: a midterm follow-up study of 11 adolescents after 6.9 years*. J Orthop Trauma, 2013. **27**(5): p. 285-9.
174. Saeed, M., I. Aktselis, and N. Goddard, *Percutaneous Fixation And Bone Grafting Of Paediatrics Scaphoid Non-Unions*. The Internet Journal of Orthopedic Surgery, 2015. **23**(1).

175. Jauregui, J.J., et al., *Operative Management for Pediatric and Adolescent Scaphoid Nonunions: A Meta-analysis*. J Pediatr Orthop, 2017.
176. Gajdobranski, D., et al., *Scaphoid fractures in children*. Srp Arh Celok Lek, 2014. **142**(7-8): p. 444-9.
177. Suzuki, K. and T.J. Herbert, *Spontaneous correction of dorsal intercalated segment instability deformity with scaphoid malunion in the skeletally immature*. J Hand Surg Am, 1993. **18**(6): p. 1012-5.
178. Waters, P.M. and S.L. Stewart, *Surgical treatment of nonunion and avascular necrosis of the proximal part of the scaphoid in adolescents*. J Bone Joint Surg Am, 2002. **84-a**(6): p. 915-20.
179. Ben-Amotz, O., C. Ho, and D.M. Sammer, *Reconstruction of scaphoid non-union and total scaphoid avascular necrosis in a pediatric patient: a case report*. Hand (N Y), 2015. **10**(3): p. 477-81.
180. Gunal, I. and T. Altay, *Avascular necrosis of the scaphoid in children treated by splint immobilisation: a report of two cases*. J Bone Joint Surg Br, 2011. **93**(6): p. 847-8.
181. Faouzi, H.M., *Scaphoid fracture associated with distal radius fracture in children: a case report*. Chin J Traumatol, 2009. **12**(3): p. 187-8.
182. Kay, R.M. and S.H. Kuschner, *Bilateral proximal radial and scaphoid fractures in a child*. J Hand Surg Br, 1999. **24**(2): p. 255-7.
183. Sawant, M. and J. Miller, *Scaphocapitate syndrome in an adolescent*. J Hand Surg Am, 2000. **25**(6): p. 1096-9.
184. Fenton, R.L., *The naviculo-capitate fracture syndrome*. J Bone Joint Surg Am, 1956. **38-a**(3): p. 681-4.
185. Milliez, P.Y., M. Dallaserra, and J.M. Thomine, *An unusual variety of scapho-capitate syndrome*. J Hand Surg Br, 1993. **18**(1): p. 53-7.
186. Shaikh, A.A. and G. Saeed, *Fenton syndrome in an adolescent*. J Coll Physicians Surg Pak, 2007. **17**(1): p. 55-6.
187. Foley, K. and S. Patel, *Fractures of the scaphoid, capitate and triquetrum in a child: a case report*. J Orthop Surg (Hong Kong), 2012. **20**(1): p. 103-4.
188. Lutz, M., R. Arora, and M. Gabl, *Perilunäre Luxationen und Luxationsfrakturen*, in *Frakturen und Luxationen der Hand*, H. Towfigh, et al., Editors. 2014, Springer: Berlin [u.a.]. p. 213-226.
189. Carson, S., et al., *Pediatric upper extremity injuries*. Pediatr Clin North Am, 2006. **53**(1): p. 41-67, v.
190. Wong, T., T. Yip, and W. Wu, *Carpal ligament injuries with acute scaphoid fractures—a combined wrist injury*. Journal of Hand Surgery, 2005. **30**(4): p. 415-418.
191. Frank, J., H. Pralle, and I. Marzi, *Funktionelle Anatomie und Biomechanik des Handgelenkes und distalen Radioulnargelenkes*. OP-JOURNAL, 2003. **19**(01): p. 4-9.
192. Cook, P.A., et al., *Scapholunate ligament disruption in a skeletally immature patient: a case report*. J Hand Surg Am, 1997. **22**(1): p. 83-5.
193. Dautel, G. and M. Merle, *Scapholunate dissociation in the skeletally immature carpus*. J Hand Surg Br, 1997. **22**(2): p. 173-4.
194. Zimmerman, N.B. and A.J. Weiland, *Scapholunate dissociation in the skeletally immature carpus*. J Hand Surg Am, 1990. **15**(5): p. 701-5.
195. Mawdsley, M.J., M. Jalul, and A.R. Humphreys, *Distal scaphoid fracture and scapholunate ligament injury in a child*. J Hand Surg Eur Vol, 2013. **38**(5): p. 574-5.

196. Englert, A., *Die klinische Untersuchung der Hand und des Handgelenks*. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 2013. **64**(12): p. 385-387.
197. R Development Core Team, *A language and environment for statistical computing*, in *R Foundation for Statistical Computing*. 2008, R Foundation For Statistical Computing: Vienna.
198. Hosmer, D.W. and S. Lemeshow, *Applied Logistic Regression*. 2 ed. 2005, New York: Wiley. p. 392
199. Hanley, J.A. and B.J. McNeil, *The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve*. Radiology, 1982. **143**(1): p. 29-36.
200. Hedderich, J. and L. Sachs, *Angewandte Statistik – Methodensammlung mit R*. 2018, Berlin: Springer. p. 1025
201. Stanciu, C. and A. Dumont, *Changing patterns of scaphoid fractures in adolescents*. Can J Surg, 1994. **37**(3): p. 214-6.
202. von Laer, L., *Knochenwachstum und Knochenheilung*, in *Kindertraumatologie*, I. Marzi, Editor. 2016, Springer: Berlin, Heidelberg. p. 3-13.
203. Kraus, R., *Epidemiologie*, in *Kindertraumatologie*, I. Marzi, Editor. 2016, Springer: Berlin, Heidelberg. p. 35-39.
204. Caine, D., C. Caine, and N. Maffulli, *Incidence and distribution of pediatric sport-related injuries*. Clin J Sport Med, 2006. **16**(6): p. 500-13.
205. Delgado, J., D. Jaramillo, and N.A. Chauvin, *Imaging the Injured Pediatric Athlete: Upper Extremity*. Radiographics, 2016. **36**(6): p. 1672-1687.
206. Adirim, T.A. and T.L. Cheng, *Overview of injuries in the young athlete*. Sports Med, 2003. **33**(1): p. 75-81.
207. Shanmugam, C. and N. Maffulli, *Sports injuries in children*. Br Med Bull, 2008. **86**: p. 33-57.
208. Trentacosta, N., *Pediatric Sports Injuries*. Pediatr Clin North Am, 2020. **67**(1): p. 205-225.
209. Brooks, A. and E. Hammer, *Acute upper extremity injuries in young athletes*. Clinical Pediatric Emergency Medicine, 2013. **14**(4): p. 289-303.
210. Backx, F.J., et al., *Sports injuries in school-aged children. An epidemiologic study*. Am J Sports Med, 1989. **17**(2): p. 234-40.
211. Schieber, R.A., et al., *Risk factors for injuries from in-line skating and the effectiveness of safety gear*. N Engl J Med, 1996. **335**(22): p. 1630-5.
212. Ronning, R., et al., *The efficacy of wrist protectors in preventing snowboarding injuries*. Am J Sports Med, 2001. **29**(5): p. 581-5.
213. Kanavaki, A., et al., *Short MRI Protocol for Excluding Traumatic Lesions of the Scaphoid Bone in Children*. In Vivo, 2016. **30**(4): p. 495-9.
214. Lögters, T.T., et al., *Diagnostic Approach for Suspected Scaphoid Fractures in Children*. Eur J Trauma Emerg Surg, 2008. **34**(2): p. 131.
215. Elvey, M., et al., *Defining occult injuries of the distal forearm and wrist in children*. J Child Orthop, 2016. **10**(3): p. 227-33.
216. Gooding, A., M. Coates, and A. Rothwell, *Cost analysis of traditional follow-up protocol versus MRI for radiographically occult scaphoid fractures: a pilot study for the Accident Compensation Corporation*. N Z Med J, 2004. **117**(1201): p. U1049.
217. Gellman, H., et al., *Comparison of short and long thumb-spica casts for non-displaced fractures of the carpal scaphoid*. J Bone Joint Surg Am, 1989. **71**(3): p. 354-7.
218. Verdan, C., *Fractures of the scaphoid*. Surg Clin North Am, 1960. **40**: p. 461-4.

219. Böhler, L., E. Trojan, and H. Jahna, *The results of treatment of 734 fresh, simple fractures of the scaphoid*. J Hand Surg Br, 2003. **28**(4): p. 319-31.
220. Clay, N.R., et al., *Need the thumb be immobilised in scaphoid fractures? A randomised prospective trial*. J Bone Joint Surg Br, 1991. **73**(5): p. 828-32.
221. Buijze, G.A., et al., *Cast immobilization with and without immobilization of the thumb for nondisplaced and minimally displaced scaphoid waist fractures: a multicenter, randomized, controlled trial*. J Hand Surg Am, 2014. **39**(4): p. 621-7.
222. Barton, N.J., *Twenty questions about scaphoid fractures*. J Hand Surg Br, 1992. **17**(3): p. 289-310.
223. Petheram, T.G., S. Garg, and J.P. Compson, *Is the scaphoid cast still alive? A survey of current UK practice in conservative management of scaphoid fractures*. J Hand Surg Eur Vol, 2009. **34**(2): p. 281-2.
224. King, R.J., R.P. Mackenney, and S. Elnur, *Suggested method for closed treatment of fractures of the carpal scaphoid: hypothesis supported by dissection and clinical practice*. J R Soc Med, 1982. **75**(11): p. 860-7.
225. Cooney, W.P., J.H. Dobyns, and R.L. Linscheid, *Fractures of the scaphoid: a rational approach to management*. Clin Orthop Relat Res, 1980(149): p. 90-7.
226. Hambidge, J.E., et al., *Acute fractures of the scaphoid. Treatment by cast immobilisation with the wrist in flexion or extension?* J Bone Joint Surg Br, 1999. **81**(1): p. 91-2.
227. Schädel-Höpfner, M., et al., *Operative vs. konservative Therapie nichtdislozierter Skaphoidfrakturen*. Der Unfallchirurg, 2010. **113**(10): p. 804-813.
228. Hamdi, M.F. and A. Khelifi, *Operative management of nonunion scaphoid fracture in children: a case report and literature review*. Musculoskelet Surg, 2011. **95**(1): p. 49-52.
229. Jernigan, E.W., B.S. Smetana, and J.M. Patterson, *Pediatric Scaphoid Proximal Pole Nonunion With Avascular Necrosis*. J Hand Surg Am, 2017. **42**(4): p. 299.e1-299.e4.
230. Clementson, M., et al., *Long-Term Outcomes After Distal Scaphoid Fractures: A 10-Year Follow-Up*. J Hand Surg Am, 2017. **42**(11): p. 927.e1-927.e7.

8 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Handwurzelknochen der rechten Hand in der Ansicht von dorsal.....	11
Abb. 2: Bewegungen des Kahnbeins von der Radialabduktion (rot) in die Ulnaradduktion (blau).....	12
Abb. 3: Interkarpaler Bandapparat, a Ansicht von palmar b Ansicht von dorsal.....	13
Abb. 4: Blutversorgung des Skaphoids von dorsal aus gesehen.....	14
Abb. 5: Anatomische Landmarken: die Tabatière.....	16
Abb. 6: Klassifikation der Skaphoidfrakturen beim Kind.....	19
Abb. 7: Alternative Klassifikation der Skaphoidfrakturen beim Kind.....	19
Abb. 8: Klinische Untersuchung.....	22
Abb. 9: Kahnbeinzielaufnahme eines 16-jährigen Patienten mit Fraktur des Skaphoids im mittleren Drittel.....	23
Abb. 10: (A) Röntgen- und (B) MRT-Aufnahme eines 11-jährigen Patienten mit Skaphoidfraktur.....	25
Abb. 11: Verschiedene Formen der Herbert-Schraube.....	32
Abb. 12: Röntgenaufnahme eines 17-jährigen Patienten mit Skaphoidfraktur und Versorgung mittels Herbert-Schraube.....	32
Abb. 13: Lagerung und Schnittführung bei der minimalinvasiven Schraubenosteosynthese von palmar.....	33
Abb. 14: Technik der offenen Reposition und Schraubenosteosynthese der frischen Skaphoidfraktur von palmar.....	35
Abb. 15: Modifizierte Klassifikation der Skaphoidpseudarthrose nach Herbert und Filan.....	38
Abb. 16: Röntgen- und CT-Bilder des linken Handgelenks eines 16-jährigen Jungens mit Schmerzen und Kraftverlust der Hand.....	41
Abb. 17: offene Reposition von dorsal mit kortikospongiösem Span aus dem distalen Radius und Schraubenosteosynthese.....	44
Abb. 18: Röntgenaufnahme eines 17-jährigen Patienten mit Skaphoid- und distaler Radiusfraktur.....	47
Abb. 19: Skaphoid-Shift-Test nach Watson.....	50
Abb. 20: Verteilung von 78 diagnostizierten Frakturen in 115 Handgelenken.....	59
Abb. 21: Verteilung des Studienkollektivs.....	60
Abb. 22: Alter- und Geschlechterverteilung der Patienten mit Skaphoidfrakturen (n=56).....	61
Abb. 23: Unfallursachen (in %) aller Patienten mit Skaphoidfrakturen (n=56).....	62
Abb. 24: Frakturlokalisation im Skaphoid.....	64
Abb. 25: Die Verteilung von Frakturen des Skaphoids, Os capitatum und distalen Radius bei 115 Patienten mit posttraumatischen Schmerzen im Handgelenk.....	67
Abb. 26: ROC-Kurve eines Regressionsmodells mit Röntgenbefund, Unfallmechanismus und Geschlecht als Regressoren zur Vorhersage einer Fraktur.....	76
Abb. 27: Boxplot der Dauer der Ruhigstellung in Bezug auf die Frakturlokalisation im Skaphoid.....	78

9 Tabellenverzeichnis

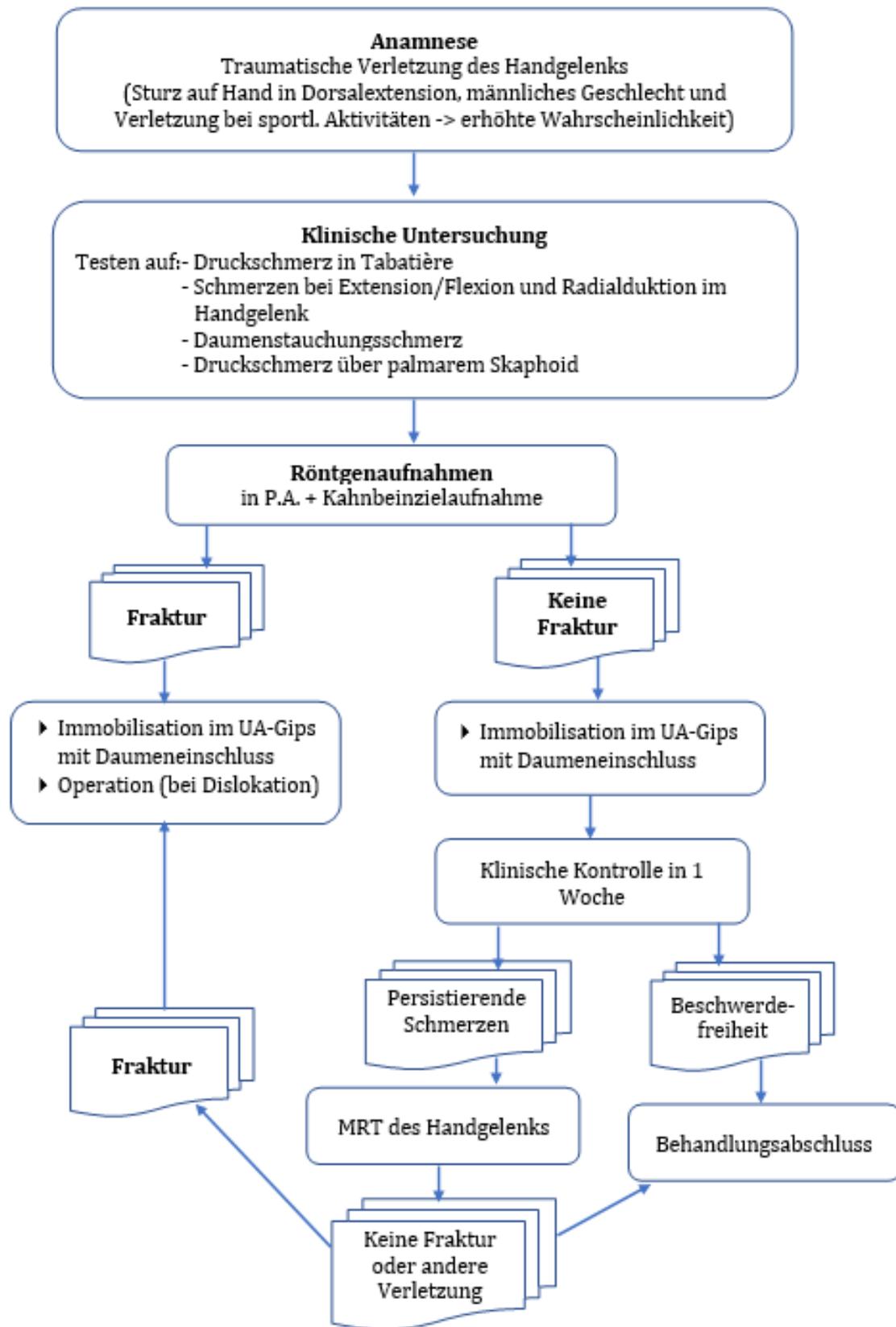
Tab. 1: Dauer der Ruhigstellung in Abhängigkeit von der Frakturlokalisation	29
Tab. 2: MRT Diagnose bei anderen Verletzungen der Hand außer Skaphoidfraktur	59
Tab. 3: Patienten mit Skaphoidfraktur und begleitender Fraktur	67
Tab. 4: Vergleich von Patienten mit Skaphoidfraktur (n=56) und Patienten mit Handgelenksprellung (n=43)	68
Tab. 5: Vergleich von Röntgen- und MRT-Befunden	69
Tab. 6: Einteilung der Patienten in Bezug auf Beschwerden und Beeinträchtigung im Alltag....	71
Tab. 7: Befunde bei der klinischen Nachuntersuchung	72

10 Abkürzungsverzeichnis

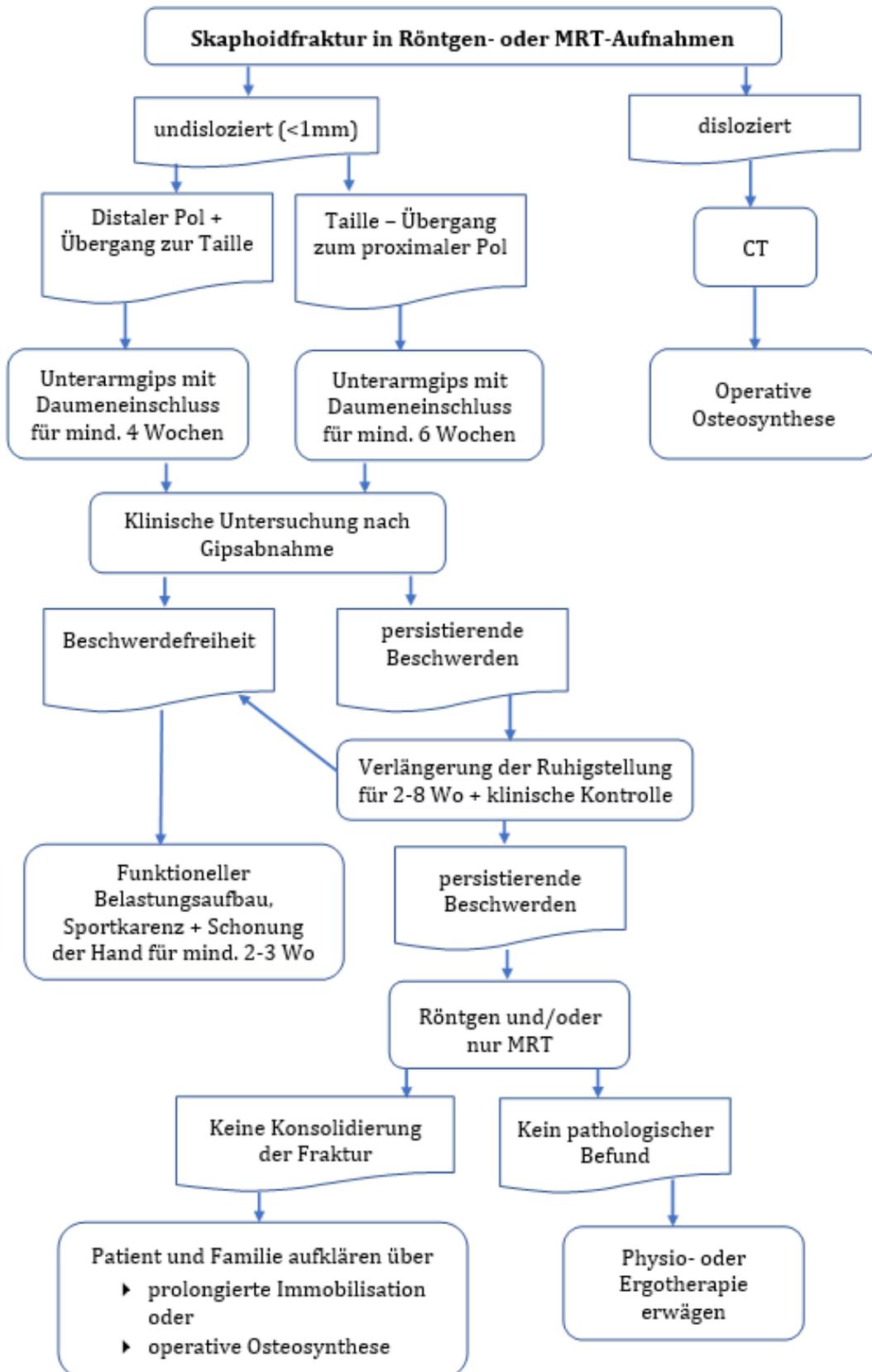
%	Prozent
>	größer
<	kleiner
°	Grad
Abb.	Abbildung
A.	Arteria
AVN	avaskuläre Nekrose
AUC	Area under the curve
BMI	Body-Maß-Index
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CT	Computertomographie
d.h.	das heißt
DISI	dorsiflexed intercalated segment instability
et al.	et alii
ggf.	gegebenenfalls
Jh.	Jahrhundert
K-Draht	Kirschnerdraht
lat.	lateinisch
Lig.	Ligamentum
LT	lunotriquetral
M	männlich
M.	Musculus
MC	Metakarpalknochen
mind.	mindestens
MRT	Magentresonanztomographie
mSv	Millisievert
p.a.	posterior-anterior
ROC	Receiver-Operating-Characteristic
SAP	Systeme, Anwendungen und Produkte in der Datenverarbeitung
SL	skapholunär
SNAC	scaphoid nonunion advanced collapse

sog.	sogenannt
SPAIR	Spectral Adiabatic Inversion Recovery
STIR	Short Tau Inversion Recovery
STT	skaptho-trapezio-trapezoidal
TFCC	Triangulärer fibroartilaginärer Komplex
W	weiblich
Wo	Wochen
z.B.	zum Beispiel

11 Anhang 1 Diagnosealgorithmus



12 Anhang 2 Therapiealgorithmus



13 Anhang 3 Fragebogen

22.6.2017

Patientenbefragung - Skaphoidfrakturen

- Wie ist es zu der Verletzung gekommen?

Therapie:

- Hatten Sie/Du Beschwerden bei der Ruhigstellung im Gipsverband? (Schmerzen, Druckstellen, starkes Hitzegefühl, Juckreiz etc.)
- Fühlten Sie sich/Du dich durch das Tragen des Gipsverbandes in Ihren/deinen Alltagsaktivitäten eingeschränkt?
- Waren Sie/Du im Allgemeinen mit der Therapie zufrieden?

Handgelenksbeschwerden:

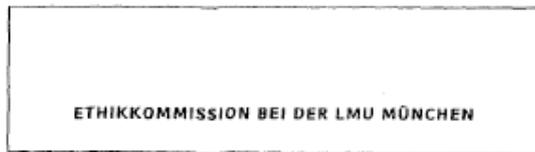
- Hatten Sie/Du in der Zeit seit dem Abschluss der Behandlung erneut Schmerzen oder andere Beschwerden im Handgelenk?

Wenn ja:

- Wie oft?
- Wie lange halten die Schmerzen an?
- Bei welchen Aktivitäten treten die Schmerzen auf?
- Haben Sie/Du Schmerzen beim Greifen oder Abstützen der Hand (z.B. beim Fahrradfahren)?
- Liegen Ruheschmerzen im Handgelenk vor?
- Fühlen Sie sich/Du dich durch die Schmerzen in Ihren/deinen Alltagsaktivitäten eingeschränkt?
- Ist das betroffene Handgelenk in der Beweglichkeit im Vergleich zur gesunden Hand eingeschränkt?
- Ist die betroffene Hand schlechter belastbar im Vergleich zur gesunden Hand?
- Waren Sie/Du aufgrund der Handgelenksbeschwerden erneut in Behandlung?

- Liegen zum jetzigen Zeitpunkt Beschwerden vor?

14 Anhang 4 Beschluss Ethikkommission



Ethikkommission · Pettenkofenstr. 8 · 80336 München

Herrn
Prof. Dr. Hans- Georg Dietz
Dr. von Haunersches Kinderspital
Lindwurmstraße 4
80337 München

Vorsitzender:
Prof. Dr. W. Eisenmenger
Telefon+49 (0)89 440055191
Telefax+49 (0)89 440055192
Ethikkommission@
med.uni-muenchen.de
www.ethikkommission.med.uni-muenchen.de

Anschrift:
Pettenkofenstr. 8a
D-80336 München

02.03.2016 Hb /sc

Unser Zeichen: **658-15** (bitte bei Schriftwechsel angeben)

Beratung nach Fakultätsrecht Ergänzung zum Votum vom 01.12.2015

Studientitel: Verletzungen des Os naviculare im Wachstumsalter
Antragsteller: Prof. Dr. Hans- Georg Dietz, Klinikum der Universität München , Dr. von Haunersches Kinderspital, Lindwurmstraße 4, 80337 München

Sehr geehrter Herr Prof. Dietz,

besten Dank für Ihr Schreiben vom 25.02.2016 mit der Erfüllung der Auflagen und den noch ausstehenden bzw. überarbeiteten Unterlagen:

- Patienteninformation und Einwilligungserklärung.

Die Ethikkommission (EK) kann Ihrer Studie nun die ethisch-rechtliche Unbedenklichkeit zuerkennen.

- Vorsorglich möchte ich darauf hinweisen, dass auch bei einer positiven Beurteilung des Vorhabens durch die EK die ärztliche und juristische Verantwortung für die Durchführung des Projektes uneingeschränkt bei Ihnen und Ihren Mitarbeitern verbleibt.
- Änderungen des Studienprotokolls sind der EK mitzuteilen.
- Das Ende der Studie ist anzuzeigen und das Ergebnis der Studie mitzuteilen.

Für Ihre Studie wünsche ich Ihnen viel Erfolg.

Mit freundlichen Grüßen

Prof. Dr. W. Eisenmenger
Vorsitzender der Ethikkommission

Mitglieder der Kommission:
Prof. Dr. W. Eisenmenger (Vorsitzender), Prof. Dr. E. Held (stellv. Vorsitzender), Prof. Dr. C. Bausewein, PD Dr. Th. Beinert, Prof. Dr. B. Emmerich, Prof. Dr. H. U. Gallwas, Prof. Dr. K. Hahn, Dr. B. Henrikus, Dr. V. Mönch, Prof. Dr. D. Nowak, Prof. Dr. R. Penning, Prof. Dr. K. Pfeifer, Dr. A. Yassouridis, Dr. Ch. Zach

15 Danksagung

Herrn Prof. Dr. med. Dr. h.c. Hans-Georg Dietz danke ich herzlich für die Überlassung des interessanten Promotionsthemas und die sorgfältige Durchsicht der Arbeit.

Bei Herrn Dr. med. Florian Bergmann möchte ich mich für die Betreuung und Unterstützung bei der Durchführung der Arbeit bedanken.

Mein besonderer Dank gilt allen Probanden, die durch ihre Teilnahme diese Studie erst ermöglicht haben.

Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Univ. Doz. Dr. Hannes Kazianka für die Unterstützung und Beratung bei dem statistischen Teil der Arbeit.

Herzlichst möchte ich auch Herrn Ing. Hanns Lang für das Korrekturlesen danken.

Schließlich gilt mein ganz besonderer Dank meinen Eltern und meiner Schwester, die mir stets mit Rat und Tat unterstützend zur Seite standen und mich ermutigten - sowohl während des Studiums als auch darüber hinaus.