

Diplomarbeit

**Epidemiologie pathologischer Frakturen
im Wachstumsalter
Altersverteilung und zugrundeliegende Ursachen
Eine retrospektive Studie**

eingereicht von

Vanessa Sackl

zur Erlangung des akademischen Grades

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

an der

Medizinischen Universität Graz

ausgeführt am

Universitätsklinikum für Orthopädie und Traumatologie

ausgeführt an der

Klinik für Kinderchirurgie

unter der Anleitung von

Ass.-Prof.ⁱⁿ Priv.-Doz.ⁱⁿ Dr.ⁱⁿ med.univ. Tanja Kraus

Priv.-Doz. Dr.med. Dr.scient.med. Patrick Johann Reinbacher, MA, MSc

Graz, 01.November 2025

Eidesstattliche Erklärung

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

Des Weiteren erkläre ich hiermit, dass, sofern bei der Erstellung dieser Arbeit Künstliche Intelligenz (KI) Werkzeuge zur Generierung und/oder Korrektur bestimmter Textpassagen verwendet wurden, dieser Einsatz unter Einhaltung ethischer Grundsätze, akademischer Integrität und den Vorgaben meiner Universität erfolgte, sowie in Folge dies transparent gemacht und in angemessener Weise gekennzeichnet wurde.

Graz, 01.November 2025

Vanessa Sackl, eh

Zusammenfassung

Wenn ein Kind nach einem Unfall in die Ambulanz kommt und eine nicht-pathologische Fraktur besteht, ist eine Diagnose zumeist schnell definiert. Doch könnte eventuell hinter dieser Fraktur eine pathologische Ursache stecken? Der diagnostische Weg zur Diagnose der pathologischen Fraktur kann eine Herausforderung sein, da Anzeichen dafür oft nicht eindeutig sind und es hierfür keine expliziten Vorgehensweisen oder Algorithmen gibt.

Aus diesem Grund wurde die Forschungsfrage formuliert: Wie sind pathologische Frakturen im Wachstumsalter epidemiologisch verteilt und gibt es Entitäten, welche in den jeweiligen Altersgruppen gehäuft vorkommen? Um für diese Fragestellung Fakten analysieren zu können, wurde eine retrospektive Datenanalyse von Patient*innen, die aufgrund einer pathologischen Fraktur an der Universitätsklinik für Orthopädie und Traumatologie, sowie im Kinderzentrum der Medizinischen Universität Graz vorstellig wurden, gemacht. Die Datenanalyse wurde im Zeitraum von 2007 bis 2021 durchgeführt. Es wurden 235 Patient*innen (161 männlich, 74 weiblich) im Alter von 0 bis 18 Jahren eingeschlossen.

Die Durchsicht der Daten ergab in allen Altersklassen ein überwiegendes Vorkommen der pathologischen Frakturen beim männlichen Geschlecht. Knochenzysten sind die häufigste Ursache für eine pathologische Fraktur, gefolgt vom Nicht-ossifizierendem-Fibrom (NOF). Maligne Ursachen sind, verglichen zu diesen genannten benignen Entitäten, selten. In Bezug auf die Lokalisation konnte festgehalten werden, dass die pathologische Fraktur vermehrt diaphysär auftritt. Betroffen waren vor allem die Regionen: Oberarm, Oberschenkel und Unterschenkel. Einen wesentlichen anamnestischen Hinweis für den Verdacht der pathologischen Fraktur stellt das Bagatelltrauma, als eigentlich inadäquates Trauma im Verhältnis zum Verletzungsausmaß, dar.

Abstract

Background

Fractures in children and adolescents are commonly regarded as straightforward traumatic injuries. In most cases, a diagnosis can be established rapidly. However, pathological fractures — defined as fractures occurring in bone weakened by an underlying lesion — must be considered, as they may be the first clinical manifestation of a benign or malignant condition. The diagnostic process is often challenging, since clinical signs are subtle, and there are no universally accepted diagnostic algorithms for the identification of pathological fractures in the growing skeleton.

Methods

To explore the epidemiological distribution and underlying etiologies of pathological fractures in children and adolescents, a retrospective analysis was conducted. Patient data were reviewed from the Department of Orthopaedics and Traumatology as well as the Pediatric Center of the Medical University of Graz over a 14-year period (2007-2021). A total of 235 patients presenting with pathological fractures were included (161 male, 74 female; age range 0-18 years). Demographic variables, underlying pathology, fracture location, and mechanism of injury were analyzed.

Results

The review demonstrated a consistent predominance of pathological fractures in male patients across all age groups. Benign lesions accounted for the majority of cases. Bone cysts were identified as the leading cause, followed by non-ossifying fibroma (NOF). Malignant entities, although clinically relevant, were rare in comparison. With regard to anatomical distribution, the majority of pathological fractures were localized to diaphyseal regions of long bones, most frequently affecting the humerus, femur, and tibia. Importantly, the presence of a low-energy trauma — where the mechanism of injury was disproportionate to the severity of the fracture — emerged as a significant clinical indicator suggestive of underlying pathology.

Conclusion

Pathological fractures in the pediatric population are predominantly associated with benign

bone lesions, most commonly bone cysts and NOF. Male patients are more frequently affected, and long bone diaphyses represent the typical sites of fracture occurrence. While malignant causes are uncommon, their potential presence necessitates careful consideration. Recognition of inadequate trauma as a red flag is essential for early suspicion and timely diagnostic workup. These findings highlight the importance of maintaining a high index of suspicion in atypical fracture presentations and underscore the need for structured diagnostic approaches in pediatric trauma care.

Angaben von bereits erfolgten Veröffentlichungen und Anteil der eigenen Beteiligung daran

Derzeit sind zwei Publikationen in Arbeit, die auf der Datenrecherche dieser Diplomarbeit beruhen. (Titel nur etwaige Angaben – definitive Titel noch ausständig)

1. The epidemiology of pathological fractures during growth
2. Femoral Fractures in the Pediatric Age Group: Distinguishing Traumatic from Pathological Patterns

Inhaltsverzeichnis

ZUSAMMENFASSUNG	III
ABSTRACT	IV
ANGABEN VON BEREITS ERFOLGTEN VERÖFFENTLICHUNGEN UND ANTEIL DER EIGENEN BETEILIGUNG DARAN	VI
ABKÜRZUNGEN UND DEREN ERKLÄRUNG	1
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	2
TABELLENVERZEICHNIS	4
1 EINLEITUNG	5
1.1 DIE PATHOLOGISCHE FRAKTUR	6
1.1.1 DEFINITION	6
1.1.2 MÖGLICHE URSACHEN PATHOLOGISCHER FRAKTUREN	7
1.1.2.1 Neoplastische, benigne Ursachen	8
1.1.2.2 Neoplastische, maligne Ursachen	10
1.1.2.3 Knocheninfektionen	12
1.1.2.4 Metabolische Störungen	12
1.1.2.5 Genetische Ursachen	13
1.1.3 DIAGNOSTIK	14
1.1.3.1 Anamnese	14
1.1.3.2 Klinische Untersuchung	16
1.1.3.3 Bildgebende Verfahren	17
1.1.3.4 Labor	21
1.1.3.5 Biopsie	22
1.2 BESONDERHEITEN IM WACHSTUMSALTER	23
1.2.1 KNOCHENWACHSTUM	23
1.2.2 DIE FUGE	25

1.3	FRAKTUREN IM WACHSTUMSALTER- TYPEN UND BESONDERHEITEN	26
1.3.1	MORPHOLOGIE	27
1.3.2	GRÜNHOLZFRAKTUR	27
1.3.3	BOWING-FRAKTUR	27
1.3.4	WULSTFRAKTUR	27
1.3.5	ÜBERGANGSFRAKTUR	27
1.4	KNOCHENBRUCHHEILUNG	28
1.4.1	BEGUTACHTUNG DES HEILUNGSFortschrittes	29
2	<u>MATERIAL UND METHODEN</u>	31
2.1	STUDIENDESIGN	31
2.2	PATIENT*INNENKOHORTE	31
2.2.1	ALTERSKATEGORIEN	32
2.3	EINSCHLUSSKRITERIEN	33
2.4	BEFUNDE UND DATENERHEBUNG	34
2.5	ERHEBUNGEN – KEY DATASET	34
2.6	UNFALLMECHANISMUS	34
2.7	UNFALLORT	35
2.8	LOKALISATION	35
2.9	DIAGNOSEN	35
2.10	STATISTIK	36
3	<u>ERGEBNISSE – RESULTATE MIT GRAPHISCHEN DARSTELLUNGEN</u>	38
3.1	GESAMTE PATIENT*INNENKOHORTE	38
3.1.1	GESCHLECHTERVERTEILUNG	38
3.1.2	ALTERSVERTEILUNG	38
3.1.3	ENTITÄTEN	39
3.1.4	LOKALISATIONEN	39
3.1.5	UNFALLMECHANISMUS	41
3.1.6	UNFALLORT	42
3.1.7	DIE OBERE EXTREMITÄT	42
3.1.8	DIE UNTERE EXTREMITÄT	44

3.1.9	DER KÖRPERSTAMM	46
3.2	DATENANALYSE DER EINZELNEN DIAGNOSEN	47
3.2.1	KNOCHENZYSTEN	47
3.2.2	NOF	49
3.2.3	PRIMÄRE OSSIFIKATIONSSTÖRUNG	50
3.2.4	ENCHONDROM	52
3.2.5	PRIMÄR MALIGN KNOCHENTUMORE	53
3.2.6	OSTEOMYELITIS	55
3.2.7	STRESSFRAKTUREN	56
3.2.8	LANGERHANSZELLHISTIOZYTOSE	57
3.2.9	METASTASEN	57
3.2.10	MYOFIBROM	57
3.3	ALTERSKATEGORIEN	57
3.3.1	SÄUGLINGE IM ERSTEN LEBENSJAHR	57
3.3.2	VORSCHULKINDER IM ALTER VOM ERSTEN BIS SECHSTEN LEBENSJAHR	58
3.3.3	PRÄPUBERTIERENDE SCHULKINDER IM ALTER VOM SIEBTEN BIS ZEHNTEN LEBENSJAHR	59
3.3.4	FRÜHJUGENDLICHE PATIENT*INNEN IM ALTER VOM ZEHNTEN BIS VIERZEHNTE LEBENSJAHR	60
3.3.5	SPÄTPUBERTIERENDE PATIENT*INNEN IM ALTER VOM FÜNFZEHNTE BIS ACHTZEHNTE LEBENSJAHR	62
4	DISKUSSION	65
4.1	GESCHLECHTERVERTEILUNG	65
4.2	ALTERSVERTEILUNG	66
4.3	UNFALLMECHANISMUS	66
4.4	UNFALLORTE	67
4.5	LOKALISATIONEN DER PATHOLOGISCHEN FRAKTUR	67
4.6	ENTITÄTEN	68
4.7	SCHLUSSFOLGERUNGEN	68
4.8	AUSBLICK UND ANREGUNGEN FÜR WEITERFÜHRENDE ARBEITEN	70
5	LITERATURVERZEICHNIS	71

Abkürzungen und deren Erklärung

bzw.	beziehungsweise
CT	Computertomographie
u.a.	unter anderem
NOF	Nicht-ossifizierendes Fibrom
MRT	Magnetresonanztomographie
prox.	proximal

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Patient*innenkohorte	33
Abbildung 2: Geschlechterverteilung in Prozent	38
Abbildung 3: Altersverteilung in Alterskategorien	39
Abbildung 4: Häufigkeitsverteilung der Entitäten	39
Abbildung 5: Körperregionen in absoluter Häufigkeit	40
Abbildung 6: Frakturlokalisation in absoluter Häufigkeit	40
Abbildung 7: Knochenabschnitte	41
Abbildung 8: Unfallmechanismus.....	41
Abbildung 9: Unfallort	42
Abbildung 10: Altersverteilung in Gruppen: Obere Extremität.....	42
Abbildung 11: Lokalisationen der pathologischen Frakturen: Obere Extremität	43
Abbildung 12: Unfallmechanismen der pathologischen Frakturen: Obere Extremität.....	43
Abbildung 13: Unfallorte der pathologischen Frakturen: Obere Extremität.....	44
Abbildung 14: Altersverteilung in Gruppen: Untere Extremität.....	44
Abbildung 15: Lokalisationen der pathologischen Frakturen: Untere Extremität	45
Abbildung 16: Unfallmechanismen der pathologischen Frakturen: Untere Extremität.....	45
Abbildung 17: Unfallorte der pathologischen Frakturen: Untere Extremität	46
Abbildung 18: Altersverteilung in Gruppen: Körperstamm	46
Abbildung 19: Alterskategorien: Knochenzysten	48
Abbildung 20: Unfallmechanismus: Knochenzysten.....	48
Abbildung 21: Unfallort: Knochenzysten	49
Abbildung 22: Alterskategorien: NOF	49
Abbildung 23: Unfallmechanismen: NOF	50
Abbildung 24: Unfallorte: NOF	50
Abbildung 25: Alterskategorien: primäre Ossifikationsstörung	51
Abbildung 26: Unfallmechanismen: primäre Ossifikationsstörung.....	51
Abbildung 27: Unfallorte: primäre Ossifikationsstörung	52
Abbildung 28: Geschlechterverteilung: Enchondrom.....	52
Abbildung 29: Alterskategorien: Enchondrom	53
Abbildung 30: Alterskategorien: primär maligne Knochentumore.....	54

Abbildung 31: Unfallmechanismen: primär maligne Knochentumore	54
Abbildung 32: Unfallorte: primär maligne Knochentumore	55
Abbildung 33: Alterskategorien: Osteomyelitis	55
Abbildung 34: Unfallmechanismen: Osteomyelitis	56
Abbildung 35: Unfallorte: Osteomyelitis	56
Abbildung 36: Lokalisationen: Vorschulkinder	58
Abbildung 37: Unfallmechanismen: Vorschulkinder	58
Abbildung 38: Unfallorte: Vorschulkinder	59
Abbildung 39: Lokalisationen: Präpubertierende Schulkinder	59
Abbildung 40: Unfallmechanismen: Präpubertierende Schulkinder	60
Abbildung 41: Unfallorte: Präpubertierende Schulkinder	60
Abbildung 42: Lokalisationen: Frühjugendliche Patient*innen	61
Abbildung 43: Unfallmechanismen: Frühjugendliche Patient*innen	61
Abbildung 44: Unfallorte: Frühjugendliche Patient*innen	62
Abbildung 45: Lokalisationen: Spätpubertierende Patient*innen	63
Abbildung 46: Unfallmechanismen: Spätpubertierende Patient*innen	63
Abbildung 47: Unfallorte: Spätpubertierende Patient*innen	64

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Lokalisationen	35
Tabelle 2: Diagnosen.....	36

1 Einleitung

Hinführung zum Thema

Frakturen sind Alltag in einer chirurgischen Ambulanz. Ursache von Knochenbrüchen sind traumatische Ereignisse beziehungsweise (bzw.) Unfälle, welche den bislang gesunden Knochen in einem Maße strapazieren, das die physiologische Stabilität des Knochens übersteigt. Die Folge dieser enormen Belastung ist eine Fraktur, genauer genommen eine Unterbrechung der Kontinuität des Knochens. Nicht immer aber ist der Knochen tatsächlich gesund und im Rahmen einer Fraktur fällt der „kranke“ Knochen erst auf. Man spricht dann von einer pathologischen Fraktur. Im Rahmen dieser Diplomarbeit werden die Charakteristika pathologischer Frakturen im Wachstumsalter ausgewertet und epidemiologisch aufgearbeitet.

Aufzeigen der Kenntnis / Forschungslücke (Begründung der Fragestellung)

Die Diagnose einer vorliegenden Fraktur kann mit Hilfe von nativradiologischen Aufnahmen bzw. auch durch Schichtbildaufnahmen oftmals rasch und meist unproblematisch festgestellt werden (1). Die Herausforderung, eine pathologische Fraktur zu diagnostizieren, besteht darin, dass sie grundsätzlich übersehen werden kann oder erst mit einer Zeitverzögerung identifiziert wird. Daraus resultieren möglicherweise ungeeignete Behandlungsansätze mit potenziell schwerwiegenden Komplikationen (2). Die Wahrscheinlichkeit, als Ursache der pathologischen Fraktur einen malignen Prozess zu entdecken, ist im Vergleich zu benignen gering. Die Prävalenz für die Manifestation von malignen Tumoren erhöht sich mit zunehmendem Alter (2,3). Die Komplikationen, die aus einer primär malignen Entität resultieren, dürfen dennoch nicht außer Acht gelassen werden und sollten einen Anlass für eine histologische Abklärung der zugrundeliegenden Pathologie geben (2).

Zielsetzung und Einschränkungen / Abgrenzungen

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist es, die altersspezifischen Verteilungen und Häufungen von pathologischen Frakturen im Wachstumsalter zu identifizieren und Charakteristika zu

eruieren, welche die Diagnosestellung unterstützen. Ziel war es weiter, Hinweise auf pathologische Frakturen herauszuarbeiten, damit der*die Kliniker*in in weiterer Folge einen Anhaltspunkt hat, um bei gegebener Konstellation die pathologische Fraktur in Betracht zu ziehen.

1.1 Die pathologische Fraktur

1.1.1 Definition

Die pathologische Fraktur wird beschrieben als eine Fraktur, welche durch eine geringe äußerliche Krafteinwirkung auf den Knochen hervorgerufen wurde. Der Knochen kann strukturelle Veränderungen unterschiedlicher Genese aufweisen, welche zu einer pathologischen Knochensubstanz führen (4,5). Grundsätzlich können diese strukturellen Veränderungen zur Folge haben, dass der Knochen in Bezug auf seine Festigkeit, Elastizität und Stabilität, eine Reduktion der physiologischen Eigenschaften aufweist (4). Eine pathologische Fraktur kann daher im Gegensatz zu einer Fraktur des gesunden Knochens – bereits unter gewöhnlicher Belastung bzw. bei minimaler Mehrbelastung auftreten. Man spricht von einem sogenannten Bagatelltrauma. Zugrunde liegen können intrinsische oder extrinsische Einflüsse, die dazu führen, dass der Knochen, in Folge des Substanzumbaus, an Festigkeit verliert. Bei den intrinsischen Faktoren werden weiter lokale und systemische Faktoren unterschieden (5).

Unter intrinsischen, demnach jene Prozesse, welche endogen wirken, versteht man beispielsweise eine verminderte Knochendichte, welche unter anderem mit Osteogenesis imperfecta oder mit Umbauprozessen nach malignen Erkrankungen in Verbindung stehen (4,6). Des Weiteren haben Einfluss auf die Knochendichte Erkrankungen wie das Marfan-Syndrom, Ehlers-Danlos-Syndrom, Chondrodysplasien, Osteopetrosen sowie neuromuskuläre Erkrankungen. Letztere führen sekundär zu einer Osteoporose aufgrund von Inaktivität. Metabolische Störungen, Infektionen, oder Tumore (sowohl gutartig als auch bösartig) zählen ebenso zu den endogenen Faktoren (7).

Im Gegensatz dazu haben extrinsische Prozesse einen Einfluss auf das biologische System von außen. Hierbei kann es sich um Operationen oder Bestrahlungen, welche die Knochensubstanz schwächen oder um dauerhafte medikamentöse Therapien, handeln (4).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass durch eine verminderte Knochenintegrität und die Kraft, welche auf den Knochen einwirkt, eine pathologische Fraktur resultieren kann (8). Der Häufigkeitsgipfel der pathologischen Fraktur liegt zwischen dem 10. und dem 16. Lebensjahr (4). Eine strukturierte und zielführende Diagnostik durchzuführen, um eine prompte Diagnose stellen zu können, hat eine hohe Relevanz in Bezug auf den Behandlungsplan und in weiterer Folge auf den Heilungsverlauf. In diesem Kontext gilt es nicht nur den Fokus auf die Frakturbehandlung zu setzen, sondern auch eine Ursachenbehandlung durchzuführen (5).

1.1.2 Mögliche Ursachen pathologischer Frakturen

Im Allgemeinen sind es Erkrankungen, die zu einer Veränderung der Knochenstruktur bzw. der Qualität des Knochens führen. Die Genetik, langfristige Systemerkrankungen mit Dauermedikationen und Infektionen, Stoffwechselerkrankungen oder Skeletterkrankungen können hierbei eine Rolle spielen (9). Eine mögliche Klassifizierung der verschiedenen Ursachen wird im nächsten Abschnitt angeführt.

Systemische Einteilung pathologischer Frakturen:

- 1) Neoplastische, benigne Ursachen
 - a. Lokale Läsionen
 - i. Nicht-ossifizierendes Fibrom
 - ii. Knochenzysten (einfach/aneurysmatisch)
 - b. Systemisch-lokale Mischformen
 - i. Fibröse Dysplasie (monoostotisch/polyostotisch)
 - ii. Enchondrome
 - iii. Langerhanszell-Histiozytose
- 2) Neoplastische, maligne Ursachen
 - a. Primäre Knochentumore
 - i. Osteosarkome
 - ii. Ewing-Sarkom
 - b. Metastasen

- 3) Infektiöse Ursachen
 - a. Osteomyelitis
- 4) Metabolische Störungen
 - a. Systemisch
 - i. Osteoporose
 - ii. Hypophosphatämie
 - iii. McCune Albright
- 5) Genetische Ursachen
 - a. Systemische Skeletterkrankungen
 - i. Osteogenesis imperfecta
 - ii. Osteopetrosen
 - b. Kongenitale Pseudoarthrosen
 - i. Tibiapseudoarthrose
 - ii. Claviculapseudoarthrose

Im nachfolgenden Absatz werden ausgewählte Erkrankungen, die in einer pathologischen Fraktur gipfeln können, näher beschrieben.

1.1.2.1 Neoplastische, benigne Ursachen

1.1.2.1.1 Nicht-ossifizierendes Fibrom

Ein NOF stellt ein Risiko für die Entstehung einer pathologischen Fraktur dar (10). Ein NOF entsteht durch unphysiologischen Einbau von Bindegewebe in die Knochensubstanz. Die Häufigkeitsverteilung im Wachstumsalter liegt bei ca. 30%. Diese Entität wird meist zufällig bei bildgebenden Verfahren, welche zunächst aufgrund anderer Fragestellungen angefertigt wurden, entdeckt (11). Das basiert auf dem Fakt, dass es häufig asymptomatisch ist (12). Das NOF ist transparent für radioaktive Strahlung. Charakterisiert wird es durch den randständigen Sitz auf der Kortikalis, eine gute Begrenzung und durch sklerosierende Randbereiche. Die Kortikalis wird schmaler, bleibt aber intakt. Im frühen Erwachsenenalter hat ein NOF ein großes Potential zur Regression (12,13). Regelmäßige Kontrollen sind empfehlenswert, zum einen, um das NOF im Verlauf zu beobachten und zum anderen, um das Risiko einer möglichen pathologischen Fraktur abzuschätzen (14).

1.1.2.1.2 Knochenzysten

In diesem Kapitel werden Knochenzysten behandelt, hierunter fallen die simplen Knochenzysten und die aneurysmatischen Knochenzysten.

1.1.2.1.2.1 Simple Knochenzyste

Synonym werden in der Literatur die Begriffe „solitär“, „einfach“ oder „juvenil“ für diese Zyste verwendet (15). Sie ist mit Flüssigkeit gefüllt, frei von tumorhaltigem Gewebe. Die einfache Zyste präsentiert sich einkammerig oder mit einer segmentierten Struktur (15,16). Die Kortikalis wird im betroffenen Gebiet dünner. Der Häufigkeitsgipfel liegt im Alter zwischen fünf und 15 Jahren, wobei die Inzidenz beim männlichen Geschlecht höher ist. In den meisten Fällen wird die einfache Zyste primär durch das Auftreten einer pathologischen Fraktur entdeckt (15). Simple Knochenzysten sind radioluzent, klar abgrenzbar mit erkennbarem Zentrum. Im Rahmen der pathologischen Fraktur ist auf dem Röntgenbild das „gefallene Fragment“ („fallen leave sign“), oberhalb der zystischen Flüssigkeit, pathognomisch für die simple Zyste; ebenso eine aufsteigende Gasblase (16). Das gefallene Fragment impliziert immer eine pathologische Fraktur. Dieses Frakturzeichen ist ausschließlich im Wachstumsalter bei noch nicht verknöchelter Fuge zu finden (17). Kleinste Gasblasen können auch im Randbereich der Fraktur im Röntgenbild gesichtet werden. Dies würde Hinweise auf eine luftgefüllte Struktur, insbesondere auf eine einfache Zyste, liefern (18).

Grundsätzlich kann mittels Röntgen eine Diagnose gestellt werden, ein MRT kann zum Ausschluss einer aneurysmatischen Zyste oder eines Osteosarkoms dienlich sein (15). Die simple Zyste entwickelt sich prädispositionell im Bereich des proximalen (prox.) Humerus bzw. Femurs. Sie hat eine große Tendenz zur Regression (16). Solitäre Zysten im Bereich der Diaphyse gelten primär meist als inaktiv, wohingegen metaphysär gelegene eher als aktiv angesehen werden. Eine Intervention ist hier wahrscheinlicher notwendig (15). Wird bei der Biopsie eine klare Flüssigkeit aspiriert und ist die Zyste nach Kontrastmittelaufnahme komplett undurchsichtig, so weist dies eher auf eine simple Zyste hin. Intraoperativ kann man gegebenenfalls einen flüssigkeitsgefüllten Raum erkennen, der bei Vorliegen einer Fraktur möglicherweise hämorrhagische Anteile aufweisen kann. Als Differentialdiagnose kommt in erster Linie die aneurysmatische Zyste in Frage (16).

1.1.2.1.2.2 Aneurysmatische Zyste

Die seltenere aneurysmatische Knochenzyste greift die Knochensubstanz lokal an, wächst ausgedehnter und ist häufiger hämorrhagisch. Im Gegensatz zur simplen Knochenzyste kommt die aneurysmatische häufiger beim weiblichen Geschlecht vor. Aneurysmatische Zysten haben ein höheres Risiko zur Entwicklung von pathologischen Frakturen. Hierbei wird häufiger die Indikation für eine Kürettage mit Knochenersatz gestellt (16). Sie kann intraoperativ stark bluten. Eine aneurysmatische Knochenzyste kann in jedem Abschnitt des Skeletts entstehen, tritt jedoch mit einem überwiegenden Anteil in den metaphysären Bereichen der langen Röhrenknochen auf (19). Radiologisch betrachtet findet man exzentrisch, ausgedehnt-wachsende und die Knochensubstanz abbauende Zysten. Als zusätzliche Untersuchung wird das MRT vor der CT präferiert (16). Bei der aneurysmatischen Knochenzyste handelt es sich um eine echte Neoplasie (19). Zur sicheren Diagnosestellung benötigt man eine Biopsie. Die dabei wichtigste Schlussfolgerung ist der Ausschluss eines Osteosarkoms. Zudem kann eine definitive Unterscheidung zwischen einer einfachen und einer aneurysmatischen Zyste getroffen werden (16).

1.1.2.2 Neoplastische, maligne Ursachen

1.1.2.2.1 Osteosarkom

Das Osteosarkom ist klassifiziert als ein primär maligner Tumor des Knochens, welcher überwiegend im Kindes- und Jugendalter auftritt. Er ist charakterisiert als osteoidbildender Tumor, welcher sich meist im zweiten Lebensjahrzehnt entwickelt. Die Entstehung in dieser Altersgruppe geht mit der verstärkten Vermehrung der Knochenmasse einher, die während dieser Wachstumsphase auftritt. Der zweite Häufigkeitsgipfel liegt über dem 65. Lebensjahr. Die typische Lokalisation ist die Region um das Kniegelenk. Somit sind vor allem das distale Femur und die proximale Tibia bzw. Fibula betroffen (20-22). Das Osteosarkom zeichnet sich durch eine schnelle Wachstumsrate und eine rasche Ausbreitung entlang der Trabekel aus. Im Röntgenbild ist ein destruierend-invasives Wachstumsmuster erkennbar. Durch die Invasion der Tumorzellen in die Kortikalis, entlang des Haverskanals, löst sich das Periost und wird als Codmann-Dreieck sichtbar (20). Symptomatisch werden Patient*innen mit Schwellung und Schmerzen im Bereich des Tumors. Jene Schmerzen sind nachts sehr intensiv und führen zu unterbrochenem Schlaf (20,23). Zu Erkrankungsbeginn kann sich diese Entität unspezifisch präsentieren und fälschlicherweise als Resultat eines Traumas

oder Überlastungsreaktion interpretiert werden. Erst durch die Persistenz der Symptomatik werden weiterführende diagnostische Maßnahmen angeordnet, welche dann auf ein Osteosarkom schließen lassen (22).

1.1.2.2 Ewing-Sarkom

Im Wachstumsalter ist das Ewing-Sarkom der häufigste Tumor des Knochens mit Malignitätskriterien. Typischerweise ist es zu finden in den Diaphysen der Extremitäten, im Bereich des Beckens und in den Wirbeln. Symptomatisch präsentieren sich Patient*innen mit intensiven Knochenschmerzen, mit leichtgradig erhöhter Körpertemperatur und gesteigerter Blutsenkungsgeschwindigkeit (24). Die Schmerzen treten vor allem bei Belastung auf. Im Tumorbereich kann es zu umschriebenen Weichteilschwellungen kommen. Der Tumor wächst lokal destruierend und kann in Gefäße und Nerven infiltrieren, wodurch eine variable Symptomatik resultiert. Im Wachstumsalter sollte länger andauernder Knochenschmerz jedenfalls diagnostisch abgeklärt werden (25). Herausfordernd ist die Ähnlichkeit des Beschwerdebilds zu anderen benignen Entitäten, welche statistisch wahrscheinlicher sind. Durch die MRT kann die Tumorausdehnung sichtbar gemacht werden. Überdies ist dadurch auch die genaue Biopsieplanung möglich. Bei Verdacht auf ein Ewing Sarkom ist eine offene Biopsie oder eine perkutan durchgeführte Stanzbiopsie empfohlen (26). Das Ewing-Sarkom hat eine große Tendenz zur Metastasierung. Demnach sind eine neoadjuvante Therapie mit Chemotherapeutika, Bestrahlung und Operation indiziert. Als dynamische Laborwerte können für die Verlaufskontrolle die alkalische Phosphatase, Laktatdehydrogenase und die neuronenspezifische Enolase herangezogen werden (25). Für die Prognose relevant sind: Metastasierung bei Diagnose, Lokalisation des Tumors, Größe, Alter bei Erstdiagnose histologisches Ansprechen auf Chemotherapie. Um diese Werte zu veranschaulichen wären ein rumpfnah-gelegenes Ewing-Sarkom mit großer Tumorausdehnung und Metastasenbildung zum Diagnosezeitpunkt, welches schlecht auf die neoadjuvanten Chemotherapeutika anspricht, bei einer Patientin / einem Patienten über dem 15. Lebensjahr, mit einem schlechteren Outcome assoziiert (25).

1.1.2.3 Knocheninfektionen

1.1.2.3.1 Osteomyelitis

Osteomyelitis ist die Entzündung des Knochens und Knochenmarks. Anfällig für diese Entzündung ist der wachsende Knochen bzw. Bereiche des Knochens mit gesteigerter Vaskularisierung. Die Entzündung schwächt die Knochenintegrität durch Minderung der Knochensubstanz, wodurch das Frakturrisiko steigt. Primär am häufigsten davon betroffen ist der metaphysäre Anteil der Knochen. Dies ist zurückzuführen auf die reichlich vorhandenen Gefäße. Ähnliche Eigenschaften weist der Bereich an der Knorpel-Knochengrenze der unreifen flachen Knochen auf. Grundsätzlich kann gesagt werden, dass eine Osteomyelitis im Wachstumsalter eine Seltenheit ist. Zur Diagnostik herangezogen wird die Anamnese, ein Entzündungslabor, Röntgen und bei Bedarf die MRT, um die Ausdehnung der Entzündung klar darstellen zu können (27).

1.1.2.4 Metabolische Störungen

1.1.2.4.1 Osteoporose

Osteoporose ist eine sich progressiv verschlechternde metabolische Erkrankung des Skeletts. Sie ist charakterisiert durch eine Architekturstörung des Knochengewebes, die mit einer verminderten Knochendichte einhergeht (28). Es werden eine primäre und sekundäre Form unterschieden. Der primären Form liegen genetische Veränderungen zu Grunde. Langzeiterkrankungen und medikamentöse Behandlungen können in einer sekundären Osteoporose resultieren (29). Die Osteoporose im Kindesalter hat per definitionem eine Knochendichte kleiner gleich minus zwei im Verhältnis zur Referenzgruppe. Definitionsgemäß impliziert kindliche Osteoporose jedenfalls zwei oder mehr Brüche der Röhrenknochen bis zum 10. Lebensjahr, drei oder mehr bis zum 19. Lebensjahr oder zumindest eine Fraktur der Wirbelkörper ohne große Gewalteinwirkung (29). Zum einen kann die reduzierte Knochendichte durch einen ungenügenden Aufbau der Knochenmasse und zum anderen durch stetigen Substanzverlust entstehen. Bis zur Adoleszenz werden 95-100% der maximal möglichen Knochenmasse produziert (28). Das Risiko für die Entwicklung von Osteoporose ist anhand dieser, bis zum frühen Adoleszenzenalter erworbenen Masse an Knochen, zu einem Großteil (60%) abschätzbar. Wenn der Faktor des Knochenabbaus miteinbezogen wird annähernd zur Gänze (30). Laut der Studie „Bone

mineral accrual from 8 to 30 years of age: An estimation of peak bone mass“, von Adam DG Baxter-Jones et al. (31) erreicht man den höchsten Wert der Knochenmasse im zweiten oder Anfang des dritten Lebensjahrzehnts (31). Die Zusammenführung der vorliegenden Erkenntnisse ergibt, dass die Kindheit den Grundstein für eine stabile Knochenmasse legt und eine wesentliche Rolle für die Knochengesundheit spielt (9). Zur Eruierung der Knochengesundheit wird die Duale-Röntgen-Absorptiometrie (DXA) als Standard angesehen. Die CT kann verwendet werden und der Ultraschall gewinnt immer mehr Einfluss. Die medikamentöse Therapie bei Osteoporose im Kindesalter wird mit Bisphosphonaten durchgeführt. Eine Lifestylemodifikation, vor allem im Hinblick auf eine ausgewogene Ernährung, mit einer angemessenen Aufnahme von Calcium und Vitamin D und zusätzlicher sportlicher Aktivität, bringen mehr Nutzen als der Einsatz von monoklonalen Antikörpern. Jene werden im Einsatz bei Osteoporose kontrovers diskutiert (29). Zusammenfassend kann gesagt werden, dass eine früh einsetzende Form der Osteoporose zu einer geringeren Dichte an Knochenmineralien führt und ein erhöhtes Frakturrisiko impliziert (32).

1.1.2.5 Genetische Ursachen

1.1.2.5.1 Osteogenesis imperfecta

Das Krankheitsbild der Osteogenesis imperfecta ist charakterisiert durch eine niedrige Knochendichte, erhöhtes Aufkommen an Frakturen, Knochendeformationen und ein geringeres Größenwachstum (32). Osteogenesis imperfecta ist eine genetisch vererbte Erkrankung, die zur Knochenbrüchigkeit führt. Sie wird als eine Variante der primären Osteoporose mit genetischer Komponente gezählt (29). Mildere Ausprägungen der Osteogenesis imperfecta sind oftmals schwer von einer früh einsetzenden Osteoporose zu differenzieren. Sie zeichnen sich teilweise durch dieselben Merkmale aus, unterscheiden sich aber in einigen Charakteristika der Osteogenesis imperfecta, wie beispielsweise das Auftreten von blauen Skleren, Hörminderung, Zahnfehlbildung und Hyperflexibilität. Die Symptome können einzeln oder in Kombination auftreten (32,33).

1.1.2.5.2 Osteopetrosen

Osteopetrosen zählen zu den vererbaren Erkrankungen des Skelettsystems. Sie sind definiert als seltene Erkrankungen des Knochens, welche mit einer Erhöhung der

Knochenmineraldichte einhergehen. Dieser seltenen Entität liegt eine Pathologie des Knochenumbaus zu Grunde. Die Osteoklasten arbeiten ineffizient, der Knochen wird daher immer dichter, fragiler und in weiterer Folge zerbrechlicher. In der Literatur beschrieben sind unterschiedliche Schweregrade von symptomlosen Formen bis hin zu schwereren Verläufen (34).

1.1.3 Diagnostik

Das Stellen der klinischen Diagnostik einer Fraktur ist in den meisten Fällen unkompliziert. Dennoch birgt es das Risiko, dass das Vorliegen einer pathologischen Fraktur übersehen wird (7).

Weil Patient*innen mit einem Frakturverdacht eine Notfallsambulanz aufsuchen, stellt der*die Erstuntersucher*in die Weichen für die diagnostischen und therapeutischen Interventionen und trägt somit eine große Verantwortung (35). Mittels Schienung und entsprechender Analgetikatherapie wird initial eine Schmerzlinderung erreicht, wodurch man sich häufig ausreichend Zeit und dem Kind erträglichere Bedingungen, für eine angemessene Diagnostik verschaffen kann (35,36).

1.1.3.1 Anamnese

Grundlegend für jede Diagnose ist eine strukturierte Anamnese und in weiterer Folge die klinische Untersuchung. Die „W-Fragen“ könnten für die Erhebung eine geeignete Stütze sein.

- Was genau ist passiert?
- Wann ist der Unfall geschehen?
- Wann sind die Beschwerden aufgetreten?
- Wo ist es passiert?
- Wie hat es sich ereignet?
- Was wurde bereits unternommen?

Für weitere anamnestische Fragestellungen wären das SAMPLE- und PQRST-Schema sinnvoll, welche im Folgenden näher erläutert werden.

SAMPLE-Schema:

- Symptome: Welche Beschwerden führten zu einem Krankenhausbesuch?
- Bestehende Allergien
- Medikamente/Dauermedikation
- Patient*innengeschichte
- Letzte Nahrungsaufnahme
- Ereignis: Was ist unmittelbar vor und während dem Vorfall geschehen?

Zur strukturierenden Erhebung des Schmerzes mittels PQRST-Schema:

- Provokation: Was führt zur Schmerzintensivierung oder Schmerzlinderung?
- Qualität: Wie fühlt sich der Schmerz an?
- Region und Radiation: Wo befindet sich das Schmerzmaximum und strahlt es in andere Lokalisationen aus?
- Schweregrad wird mittels Numeric Rating Scale (NRS) eingeschätzt
- Timing: Zeitlicher Verlauf

Eine besondere Beachtung im Rahmen der Anamneseerhebung wird darauf gelegt, unter welchen Bedingungen sich das Kind die Fraktur zugezogen hat. Die Unfalldynamik, der Ort des Geschehens und die Unfallkinetik spielen eine Rolle. Es soll erfragt werden, wie sich die Fraktur kurz nach dem Ereignis präsentiert und ob jemand eine primäre Behandlung (Reposition, Medikation) durchgeführt hat (1). Es sollte zunächst geklärt werden, ob bei dem*der Patient*in eine verifizierte onkologische Erkrankung vorliegt. Trifft dieser Umstand zu, so ist dies eine mögliche und sehr wahrscheinliche Ursache der pathologischen Fraktur (35).

Ein anamnestischer Hinweis auf eine pathologische Fraktur ist das Bagateltrauma. Der Untersucher muss eruieren, ob in letzter Zeit beim Kind Entzündungszeichen im Bereich der Fraktur vorhanden waren. Dazu zählen Schwellungen, Rötungen, Schmerzen, Funktionseinschränkungen und Fieber (7). Die Erhebung der Schmerzlokalisierung und -qualität kann mit Hilfe der Eltern erfolgen. Das Verhalten des Kindes im Alltag könnte hierfür Hinweise bieten (37). Die präzise Angabe der Schmerzlokalisierung und des zeitlichen Verlaufs wären von diagnostischem Nutzen (38). Bei malignen Prozessen ist eine positive

Schmerzanamnese charakteristisch (39). Ein rezenter Gewichtsverlust kann ein Indiz für eine pathologische Ätiologie sein. Weiters ist das Erheben der familiären Anamnese im Hinblick auf Knochendysplasien, Stoffwechselstörungen und Osteoporose relevant (7). Das Auftreten von Knochenschmerzen als Resultat von hormonellen Entgleisungen ist im Kindesalter selten (40). Nach der Anamnese ist eine fokussierte Inspektion für die Diagnosefindung wesentlich.

1.1.3.2 Klinische Untersuchung

Der erste Eindruck des Kindes wird durch die spontanen Bewegungen generiert. Bewegungsabfolgen und Schonhaltungen können bereits Indiz für potenzielle Beeinträchtigungen bzw. Traumata sein (41). Theoretisch klingt das simpel, in Wahrheit ist die genaue klinische Untersuchung bei Kindern eine echte Herausforderung. Selbst sind Kinder meist noch nicht in der Lage, genaue Angaben zum Schmerz und zur betroffenen Stelle zu geben. Das Setting im Krankenhaus und spätestens die Durchführung der Untersuchung führt dazu, dass das Kind sehr unruhig wird und zu Weinen beginnt. Hierbei ist die Lokalisation der Verletzung schwer eruierbar. Die Untersuchung eines ungeduldigen, von Schmerzen geplagten Kindes, erfordert viel Geschick (42). Grundsätzlich kann mit Hilfe der zuvor erhobenen Historie die zu untersuchende Stelle näher lokalisiert werden. Somit wird eine fokussierte Untersuchung an den relevanten Lokalisationen durchgeführt. Die Weichteile werden mitbeurteilt, um Hämatome oder offene Wunden zu detektieren. Ein Hautschaden könnte auf eine offene Fraktur hinweisen (43). Bei der klinischen Untersuchung sollte auf Schwellungen, Symmetrieabweichungen und Deformierungen geachtet werden. Die manuelle Überprüfung auf Motorik, Durchblutung und Sensibilität wird durchgeführt (5).

Nach der Durchführung der Anamnese und der klinischen Untersuchung ergeben sich folgende Fragestellungen. Der*die Untersucher*in muss sich überlegen, ob die Erläuterungen aus der Anamnese, in Kombination mit dem klinischen Erscheinungsbild, mit der Fraktur kongruent sind (7).

Steht anschließend ein Frakturverdacht im Raum, werden bildgebende Verfahren angeordnet. Im Rahmen dieser Beurteilung werden folgende Kriterien analysiert:

Lokalisation, Trümmerzonen und Frakturteile, Verlauf der Fraktur, Fehlstellung (44). Im nachfolgenden Abschnitt werden diverse diagnostische Verfahren zur Bildgebung aufgelistet und erläutert.

1.1.3.3 Bildgebende Verfahren

1. Röntgen
2. Sonographie
3. Magnetresonanztomographie
4. Computertomographie
5. Szintigraphie

1.1.3.3.1 Röntgen

Im Rahmen der bildgebenden Diagnostik werden Röntgenbilder in zwei Ebenen aus unterschiedlichen Winkeln angefertigt. Eine angemessene radiologische Beurteilung kann nur mit entsprechender Bildqualität erfolgen. Mit Hilfe von speziellen Filtern kann die Dosis individuell angepasst und dementsprechend reduziert werden (1). Eine Dosisreduktion ist unabdingbar, da Kinder laut Strauss et al. (45) im Vergleich zu Erwachsenen zehnmal sensitiver auf Strahlenexposition sind (45). Im Kindes- und Jugendalter sollte die Anordnung für bildgebende Verfahren mit ionisierender Strahlung sorgfältig abgewogen werden. Diese Diagnostik muss dann mit einer geringstmöglichen Dosis, im Sinne des Strahlenschutzes, erfolgen (46). Zu Mehrfachaufnahmen kann es kommen, wenn bei der ersten Untersuchung der Punkt mit der größten Schmerzintensität, aufgrund erschwerter Untersuchungsbedingungen, nicht herausgefiltert werden konnte. Vor allem für die Suche der Frakturstelle ist der Ultraschall, welcher im Kapitel 1.1.3.3.2 beschrieben wird, dem Röntgen überlegen (42).

Eine definitive Diagnose mit Hilfe des Röntgens kann gestellt werden für juvenile Knochenzysten, nichtossifizierende Knochenfibrome, iatrogene pathologische Frakturen und eingeschränkt auch bei Osteogenesis imperfecta (5). Bei sogenannten „leave me alone-lesions“, wie sie von Freyschmidt (39) beschrieben werden, handelt es sich um Entitäten, welche mittels Bildgebung eindeutig zugeordnet werden können und keiner weiteren Behandlung bedürfen (39). Bei anderen Fragestellungen sind jedoch eine Biopsie und

vielmehr die histologische Befundung des Präparates essenziell. Unter vermeidbaren iatrogenen pathologischen Frakturen versteht man jene, welche durch ärztliche Handlungen induziert sind. Darunter fallen Frakturen nach ungenügender Frakturbehandlung, Biopsien, Bohrloch- oder Schraubenlochfrakturen (5). Grundsätzlich kann gesagt werden, dass ein intaktes Periost, eine unversehrte Kortikalis und eine vorhandene Sklerosierung des Tumors für gutartige Pathologien sprechen. Hinweise auf Malignität geben u.a. Mottenfraßosteolysen und zwiebelschaliger Aufbau der Kortikalis (4). Das Periost entspricht einer äußeren Hülle aus fasrigem Bindegewebe, welche über Sharpey-Fasern mit der darüberliegenden Schicht, der Kortikalis, in Verbindung steht (47). Das Periost an sich besteht aus dem Stratum fibrosum und dem innen liegenden Stratum osteogenicum. Im Bereich des Periosts liegen viele Gefäße, Nerven und Schmerzrezeptoren (48).

1.1.3.3.2 Sonographie

Einen großen Stellenwert in der Frakturdiagnostik im Kindesalter hat die Sonographie, ein Diagnostikmodul ohne ionisierende Strahlung, welches im Unterschied zu anderen bildgebenden Verfahren leicht und schnell verfügbar ist. Mit Studien konnte belegt werden, dass die Ultraschalltechnik erfolgreich für die Diagnostik von Frakturen eingesetzt werden kann. Die Ergebnisse belegen, dass Frakturen mit hoher Genauigkeit identifiziert werden können. Hierbei wurden Sensitivitätsraten zwischen 92,9 und 94 Prozent, sowie Spezifitätsraten von 92 bis 99,5 Prozent, erreicht. Jene Werte sind ähnlich zur diagnostischen Aussagekraft der konventionellen Röntgendiagnostik. Verletzungen, welche ebenso im Rahmen der Frakturverletzung auftreten, können mit dem Ultraschall auch dargestellt werden. Weichteile können beurteilt werden, wodurch Hämatome sichtbar gemacht werden können. Für einzelne Lokalisationen gibt es Evidenz dafür, dass die Sonographie als einzige Methode ausreichend zur Diagnosestellung ist. Darunter fallen Schädelfrakturen, Frakturen der Clavicula und nicht dislozierte Brüche des distalen Unterarms (42).

Die Sonographie ist laut der S2e Leitlinie zur Fraktursonographie der Goldstandard zur Detektion von Frakturen des distalen Unterarms im Wachstumsalter (49). Kann die Fraktur konservativ ohne Korrekturmanöver der anatomischen Stellung und ohne Operation behandelt werden, muss hierbei nie geröntgt werden (42).

Bei Frakturen der Clavicula hat die Sonographie sowohl im Hinblick auf Sensitivität, als auch Spezifität, bessere Ergebnisse als die Röntgenuntersuchung. Bei Verdacht auf eine Claviculafraktur sollte jedenfalls eine sonographische Untersuchung stattfinden, selbst wenn zuvor ein Röntgenbild angefertigt wurde, das keine Fraktur zeigt (42). Vor allem medial gelegene Frakturen lassen sich ohne Projektionsüberlagerungen präzise abbilden. In diesem Kontext wird die Röntgendiagnostik in Bezug auf die Darstellungsqualität übertroffen (50).

Für Frakturen mit Lokalisation am proximalen Humerus und im Ellbogen kann die Sonographie bedingt angewendet werden. Dies wird in diesem Absatz genauer erläutert. Bei der Untersuchung des proximalen Humerus mittels Ultraschall, kann durch einen negativen Befund eine Fraktur ausgeschlossen werden. Hiernach müsste man kein weiteres bildgebendes Verfahren anschließen. Konnte man mit Hilfe des Ultraschalls einen Bruch des proximalen Humerus detektieren, so wäre dennoch ein ergänzendes Röntgen notwendig für den Ausschluss einer pathologischen Ursache der Fraktur. Ab dem zwölften Lebensjahr stellt die Sonographie nur mehr ein additives Verfahren dar, weil das Bestehen einer Fraktur innerhalb des Gelenks möglich wäre. Dieser Bereich wäre mittels sonographischer Methode schlechter darstellbar (42). Für Ellbogenfrakturen typisch ist ein Erguss des Gelenkes. Somit kann durch das Fehlen des Ergusses die Fraktur ausgeschlossen werden. Hierbei wird ein longitudinaler Schnitt auf der Rückseite des Ellenbogens, auf Höhe des Olecranon, angefertigt (42).

Wenig Fallzahlen gibt es im Hinblick auf die Anwendung der sonographischen Untersuchung von Frakturen der Mittelhand, der Rippen, des Sternums und des Mittelfußes. Für die distalen Unterschenkelknochen ist die Sonographie allein nicht ausreichend, um die Frakturen in genaue Klassen einzuordnen (42).

Zusammenfassend werden in diesem Absatz Vor- und Nachteile erörtert. Im Rahmen der Frakturdiagnostik bei Kindern bietet der Ultraschall zahlreiche Vorteile: In der Regel ist er schnell verfügbar, die Durchführung ist zügig machbar und die Untersuchung liefert unmittelbar verwertbare Ergebnisse. Ein äußerst entscheidender Vorteil ist das Fehlen der Strahlenbelastung – ein Aspekt, welcher vor allem im Wachstumsalter eine große Bedeutung hat. Die Sonographie kann sowohl Weichteile als auch oberflächlich gelegene Knochen

darstellen. Mittels dynamischer Untersuchung und vor allem flexibler Schallkopfführung kann die betroffene Lokalisation aus verschiedenen Blickrichtungen beurteilt werden. Als Nachteil ist anzuführen, dass genaue Klassifizierungen schwierig sind, der Ablauf ist meist nicht standardisiert und untersuchungsabhängig. Tief gelegene Strukturen können, wenn überhaupt, nur eingeschränkt dargestellt werden. Trotz einiger Limitationen ist die Sonographie bei geeigneter Indikation als diagnostisches Mittel durchaus primär zu verwenden. Vor allem aber auch, um die Lokalisation präziser einzugrenzen, wodurch Mehrfachaufnahmen beim Röntgen erspart bleiben (51).

1.1.3.3 Computertomographie und Magnetresonanztomographie

Für weitere diagnostische Fragestellungen, insbesondere im Hinblick auf mögliche pathologische Ursachen, muss eine Schichtbildaufnahme angefertigt werden. Dazu zählt man die Computertomographie und die Magnetresonanztomographie (MRT).

Gibt es spezifische Fragestellungen für die Operation oder werden auf den Röntgenbildern suspekte Anzeichen gefunden, welche gegebenenfalls nicht mit der Symptomatik einhergehen, kann die Computertomographie (CT) Abhilfe schaffen (1). Die Strahlenbelastung ist hoch, weswegen die Verordnung einer CT gut überlegt sein sollte (44). Besteht die Vermutung, dass es sich um eine knöcherne Veränderung handelt, ist die CT der MRT überlegen, hat jedoch den Nachteil der radioaktiven Strahlenbelastung. Sind Veränderungen in Weichteilen oder dem Knochenmark zu erwarten, ist die MRT die bevorzugte Option für die Diagnostik. Ein weiterer positiver Aspekt der MRT ist, dass bei dieser Untersuchungsmethode keine radioaktive Strahlung appliziert wird (4). Verletzungen an der Wirbelsäule können durch die präzisere Darstellung der Spongiosa mittels MRT besser diagnostiziert werden. Fragestellungen, welche den intraartikulär gelegenen Bereich betreffen, sind mit Hilfe der MRT ebenso gut beurteilbar. Komplexere Frakturen, welche sowohl den Knochen, als auch den Bandapparat betreffen, können mit dieser Methode gut dargestellt und beurteilt werden (44).

1.1.3.4 Szintigraphie

Die Szintigraphie bietet die Möglichkeit, eine Tumorstreuung und Umbauprozesse zu detektieren (4). Wird eine höhergradig maligne Läsion vermutet, kann eine Szintigraphie des Skeletts Auskunft über die Metabolismusrate und die Verbreitung der Tumorzellen im

Körper geben (52). Die Szintigraphie hat dennoch in der Frakturdiagnostik, explizit aber auch im Zusammenhang der Diagnostik der pathologischen Frakturen, an Bedeutung verloren. Die Szintigraphie stellt ein Diagnostikmodul mit einer hohen Sensitivität dar, wodurch frühzeitig erhöhte Stoffwechselaktivitäten des Knochens erkannt werden können. Die MRT hat ebenfalls eine hohe Sensitivität und ermöglicht die Weichteildarstellung und die Aufnahme des gesamten Körpers. Ein entscheidender Vorteil der MRT gegenüber der Szintigraphie ist das Fehlen von ionisierender Strahlung und die bessere Auflösung im Krankheitsgebiet (53).

1.1.3.4 Labor

Ein Verdacht auf eine pathologische Fraktur kann ein Labor nötig machen, da die Fraktur das Resultat einer anderen zugrundeliegenden Pathologie sein könnte (9). Die Indikation für eine gezielte Laboruntersuchung ist beispielsweise bei Osteomyelitis-Verdacht gegeben oder wenn Hinweise auf stoffwechselbedingte Entgleisungen vorliegen (4).

Zum Labor bei einem Verdacht auf eine pathologische Fraktur und zur Evaluierung der Knochengesundheit gehören folgende Parameter:

- Blutbild, Differentialblutbild mit allen Zellreihen
- Elektrolyte: Calcium, Phosphat, Magnesium
- Alkalische Phosphatase
- Harnsäure
- Creatinin
- Blutsenkungsgeschwindigkeit
- CRP
- Protein Elektrophorese
- Schilddrüsenparameter
- Hormonhaushalt: LH, FSH, Testosteron, Östrogen
- 24h Cortisolmessung bei Verdacht auf Mb. Cushing

Des Weiteren ist die Abklärung auf vorhandene Tumormarker relevant (7,9).

1.1.3.5 Biopsie

Liegt eine abnormale Beschaffenheit der Knochenstruktur in Kombination mit einer Fraktur vor, welche chirurgisch behandelt werden muss, so wird empfohlen, die Biopsie vor der Definitivversorgung durchzuführen. Dadurch sollten Fehlbehandlungen und eine Tumorausdehnung vermieden werden (2,35). Durch Fehlinterpretation der Symptome, in Kombination mit dem klinischen Bild und der radiologischen Bildgebung, könnte eine pathologische Fraktur übersehen werden. Die Folge wäre eine chirurgische Fixierung ohne zuvor erfolgte Biopsie. Eine solche „Whoops Fixierung“ hat die Kontamination bzw. die Verbreitung der Tumorzellen zur Folge und muss verhindert werden (54). Daraus könnte resultieren, dass der Bereich um die Läsion und um den Biopsiekanal großzügiger entfernt werden muss. Bezogen auf Extremitäten würde die Indikation für eine Amputation gestellt werden müssen. Letztendlich kann gesagt werden, dass eine Biopsie nur dann gemacht werden sollte, wenn man ausreichend Fakten geklärt hat (52).

Stellt sich bei vorangegangenen Untersuchungen heraus, dass die Läsion mit hoher Wahrscheinlichkeit benigne ist, so kann die Biopsie im Zuge der Frakturversorgung stattfinden (7). Um eine diagnostische Abklärung mittels Biopsie durchführen zu können, müssen zuvor einige Punkte geklärt sein. Das Erfassen der Krankheitsgeschichte mit dem Unfallhergang und der Unfallmechanik, sowie die klinische Untersuchung legen hierfür die Basis. Jedenfalls muss die Knochenläsion in zwei Ebenen radiologisch beurteilt werden. Man muss sich die Frage stellen, ob es wahrscheinlich ist, dass es sich um eine maligne Läsion handeln könnte. Hierfür analysiert man die Knochensubstanz im Bereich der Läsion und achtet auf die Ausbreitung bzw. auf das Wachstum. Vor der Durchführung der Biopsie ist das Anfertigen einer MRT sinnvoll, ggf. mit Zugabe eines Kontrastmittels (52).

Die Durchführung der Biopsie hat im jeweiligen Klinikum zu erfolgen, in welchem auch die Therapie geplant ist, da negative Konsequenzen durch eine Biopsie, welche nicht in einem Tumorzentrum durchgeführt wurde, wesentlich höher sind. Die Biopsie sollte auf dem kürzest-möglichen Zugang erfolgen, welcher im Zuge der Tumorresektion ebenfalls genutzt und entfernt werden könnte. Dies minimiert die Verbreitung der kontagiösen Zellen. Grundsätzlich kann man zwei Arten der Biopsie anwenden: die offene und die geschlossene Biopsiemethode. Die geschlossene bzw. Stanzbiopsie eignet sich für eine Biopsie der

Knochen, die den Rumpf bilden. Ein Nachteil dieser Methode könnte die kleine Probengröße darstellen. Biopsate des Extremitätenskeletts werden bevorzugt mittels offener Technik entnommen. Die Inzisionsbiopsie ist die präferierte Option und kann als Nadelbiopsie, Stanzbiopsie oder offene Biopsie durchgeführt werden (5,7,52). Bei der Durchführung einer Nadel- oder Stanzbiopsie können je nach verwendeten Instrumenten (Feinnadel, Trokar-Biopsie, Core-Needle-Biopsie) Biopsate in unterschiedlichen Größen entstehen (55).

Ist eine benigne Läsion wahrscheinlicher, so kann diese zweitrangig, nach Versorgung der Fraktur, stattfinden. Bei bösartigen Läsionen muss der Tumor primär behandelt werden. Von internen Stabilisierungen muss aufgrund der Kontaminationsgefahr Abstand genommen werden. Grundsätzlich müssen vor einer Biopsie einige Untersuchungen stattfinden, welche das genauere Ausmaß besser einschätzen lassen. Röntgenaufnahmen stellen das Standardprozedere dar, aber es muss auch ein MRT gleichermaßen vom betroffenen Gebiet angeordnet werden. Genauere Aufnahmen mittels CT von Knochen und der Lunge werden gemacht. Ziel ist es, hierdurch die Verbreitung und Beziehung zu Nachbarstrukturen zu eruieren. Die Biopsie kann im Anschluss stattfinden. Der Knochen muss im Nachhinein stabilisiert und geschützt werden, sodass keine Refraktur entstehen kann (7). Einen Sonderfall mit geringer Inzidenz stellen Kinder mit bekannter metastasierender onkologischer Erkrankung dar. Hierbei speziell ist, dass eine primäre Biopsie nicht obligat ist, um durch eine schnelle Frakturversorgung weitere Komplikationen wie Entzündungen und Thrombosen zu vermeiden. Die Biopsie wird zu einem späteren Zeitpunkt nachgeholt. Trotzdem gilt es zu beachten, dass die Reihenfolge der einzelnen Schritte von Diagnostik und Therapie in einem Fachkreis aus Spezialisten, dem sogenannten Tumorboard, diskutiert werden muss (35).

1.2 Besonderheiten im Wachstumsalter

1.2.1 Knochenwachstum

Das Knochengewebe ist aus anorganischen und organischen Bestandteilen aufgebaut. Kollagenfibrillen, welche das Osteoid bilden, sind Teil des organischen und Salze, wie bspw. Calciumcarbonat, Calcium- und Magnesiumphosphat, des anorganischen Anteils (38,56). Die Elastizität des Knochens wird beeinflusst von den organischen Anteilen, im Gegensatz dazu sorgen die anorganischen Anteile (Mineralien) für die Härte und Rigidität des

Knochens (9). Nach der Geburt beträgt der anorganische Anteil zirka die Hälfte, welcher sich im Laufe des Lebens auf bis zu 70 Prozent steigern kann. Aufgrund der geringeren Härte und Flexibilität des kindlichen Knochens im Vergleich zu Erwachsenen kommt es durch geringere Krafteinwirkung bereits zu Frakturen. Die negativen Auswirkungen auf das umliegende Gewebe sind hierdurch aber milder ausgeprägt (38,56). Die Belastbarkeit des Knochens hängt 50-70% von der Masse ab; die Geometrie und die Knochenbestandteile sind hierbei von geringerer Wichtigkeit. Vergleicht man zwei Knochen mit derselben Dichte miteinander, so ist der größere Knochen dennoch „stärker“ (47).

Bei der Knochenbildung sind Osteoblasten, welche die Interzellulärsubstanz bilden und sich zu Osteozyten differenzieren, beteiligt. Osteoklasten könnte man als deren Antagonisten bezeichnen, da sie Knochensubstanz abbauen. Sie sind dadurch ebenso relevant für stetige Ab- und Aufbauprozesse (56). Osteozyten haben regulatorische Eigenschaften im Hinblick auf die Bildung der Osteoklasten; sie beeinflussen die Mineralisierung und den Aufbau des Knochens. Überdies steuern sie den Umbau und sind beteiligt bei der Anpassung des Phosphathaushaltes (57).

Im Zuge der Entwicklung des einzelnen Organismus werden die direkte und indirekte Knochenbildung unterschieden. Durch Umbauprozesse entsteht durch eine indirekte Bildung aus dem chondralen Gewebe das Knochengewebe. Dies findet entweder an sogenannten Knochenkernen, im Bereich der Epiphyse und Apophyse oder an der Epiphysenfuge statt. Diese zweizeitige Entwicklung vollziehen die meisten Knochen, lediglich einzelne Teile des knöchernen Schädels und die Claviculae werden durch die direkte Ossifikation geformt (58,59).

Prinzipiell besteht der Knochen aus einer Diaphyse und den zwei Epiphysen. Am Übergang von der Epiphysenfuge zur Diaphyse befindet sich jeweils die Metaphyse. In diesem Bereich findet, im Rahmen des Längenwachstums, die Bildung des neuen Knochens statt. Am Knochenschaft (Diaphyse) der Röhrenknochen lagert sich Gewebe von außen unter dem Stratum osteogenicum an, wodurch der Knochen an Dicke zunimmt. Die Ausbildung dieser Manschette, welche den Knochen umgibt, nennt man perichondrale Ossifikation (58,59).

Mit einem Anteil von 80% besteht das menschliche Skelett aus kortikalen Knochen. Im Inneren stellt sich die Knochenarchitektur wabenartig dar. Knochentrabekel haben einen Anteil von 20%. Aufgrund dieser komplex aufgebauten Struktur ist dennoch die trabekuläre Oberfläche in Relation viel größer. Der Knochenumbau in diesen Regionen ist viel dynamischer, wodurch metabolische Störungen, die den Knochenumsatz betreffen, einen stärkeren Einfluss auf diese Knochenstrukturen haben (9). Der kortikale Knochen ist aus zwei Schichten aufgebaut, die innere endostale und die außen liegende periostale Fläche. Letztere ist relevant für die Knochenbruchheilung und das appositionelle Wachstum. Im Laufe des Lebens verdickt sich die periostale Oberfläche und die endostale Oberfläche wird abgebaut, wodurch sich die Knochenmarkhöhle vergrößert (47).

Für das Knochenwachstum essenziell ist eine physikalische Beanspruchung des Knochens und die Beteiligung von Hormonen (56,58). Es sei erwähnt, dass nicht nur der Calcium-, Magnesium- und Phosphathaushalt bei den Umbauprozessen des Knochens beteiligt sind, sondern auch die Hormone Leptin, Serotonin und Osteocalcin beim Knochenstoffwechsel interagieren (60). Osteozyten können eine sich ändernde physikalische Belastung über Sensoren, getriggert durch Reize aus Knochenkanälchen, wahrnehmen. Es resultiert eine vermehrte Produktion von Sclerostin, FGF23, RANKL und Osteoprotegerin. Diese Produkte wirken auf den Knochen- und Mineralhaushalt ein. Sclerostin vermindert die Bildung des neuen Knochens und ist wesentlich am Knochenabbau beteiligt, wenn dieser nicht belastet wird. FGF23 ist ein Wachstumsfaktor, welcher auf den Phosphatstoffwechsel einwirkt, indem die Sezernierung von Phosphat erhöht wird. RANKL ist essenziell für die Osteoklastenbildung. Das Protein OPG wirkt der Bildung der Osteoklasten entgegen (48).

1.2.2 Die Fuge

Die Fuge wird als Wachstumsfuge oder Wachstumsplatte bezeichnet. Sie ist zwischen der Epiphyse und Metaphyse lokalisiert. In dieser Zone befinden sich bis zur Vollendung des Längenwachstums teilungsfähige Chondrozyten. Das Wachstum in diesem Bereich findet orthogonal zur physikalischen Belastung statt. Im Bereich der Epiphysenfuge erfolgt das Längenwachstum des Knochens. Der Prozess des Längenwachstums wird mit dem Schluss der distalen Epiphysen der Ulna und des Femurs im 18.-20. Lebensjahr bzw. an der

Apophyse des Tuberculum majus humeri im 20.-25. Lebensjahr beendet. Eine vermehrte Durchblutung im Bereich der Epiphyse ist ein Stimulus für das Längenwachstum (58,59).

Die Epiphysenfuge weist einen knorpelähnlichen Aufbau auf und kann in folgende Zonen gegliedert werden.

- Zone mit hyalinem Knorpel
- Wachstumszone
- Zone mit großblasigem Knorpel
- Knorpelabbauzone (56)

Der Bereich des ruhenden, hyalinen Knorpels wird von der Osteogenese nicht beeinflusst. Wachstums- und Teilungsprozesse werden in den Zellsäulen durchlaufen. Anschließend befindet sich ein Abschnitt, in welchem bereits Kalkeinlagerungen stattfinden, bis es schlussendlich in der Zone des Abbaus durch die Chondroklasten zum Knorpelabbau und durch die Osteoblasten in weiterer Folge zum Aufbau des Knochens kommt (56).

Bei Frakturen sollte explizit die Epiphysenfuge mitbeurteilt werden, da es durch ein Trauma in diesem Bereich zu einer Beeinträchtigung des Längenwachstums und infolgedessen zu einer Verminderung der Knochenheilung kommen kann. Ein weiterer negativer Aspekt ist die Möglichkeit einer inkorrekten Frakturheilung, wobei Fehlstellungen resultieren können (61). Durch eine Verletzung im Bereich der Wachstumsplatte ist es ebenso möglich, dass der Wachstumsprozess frühzeitig gestoppt wird (48). Im Röntgen ist die Epiphysenfuge während des Längenwachstums deutlich zu differenzieren, da hier kein Kalzium eingelagert ist, wodurch dieser Bereich für Strahlen durchlässig ist (48,59). Bei einer verschlossenen Fuge ist nur mehr eine Art Narbe im Röntgenbild erkennbar (56).

1.3 Frakturen im Wachstumsalter- Typen und Besonderheiten

Der wachsende Knochen weist aufgrund seiner besonderen Struktur und Elastizität, sowie der offenen Wachstumsfugen spezifische morphologische Formen auf, welche im Folgenden kurz erläutert werden.

1.3.1 Morphologie

Das Knochenwachstum wird, wie im Kapitel 1.2.1 beschrieben, durch die offene Wachstumsfuge ermöglicht, bevor das Skelett in der Pubertät reifen kann. Der Knochen im Wachstumsalter ist vorwiegend ein verkalkter Knorpel, welcher die Elastizität erhöht. Aufgrund dessen entstehen beim kindlichen Knochen bei erhöhter Belastung mehr Verletzungen durch Biegung und Verformung, welche beim Erwachsenen typischerweise zu einer Fraktur führen. Die Knochenhaut weist im Wachstumsalter mehr Aktivität und eine erhöhte Dicke und Festigkeit auf. Dadurch ergeben sich speziellere Frakturformen (62). Die häufigste Frakturlokalisation ist die Metaphyse mit nahezu zwei Dritteln aller Fälle. Die Diaphyse ist in etwa einem Viertel der Fälle betroffen und bei Frakturen der Epiphyse mit Gelenkbeteiligung nur in etwa zehn Prozent (63). Durch diese Gegebenheiten resultieren für das Wachstumsalter spezifische Frakturtypen.

1.3.2 Grünholzfraktur

Grünholzfrakturen sind definiert durch eine einseitige Unterbrechung der Kortikalis und des Periosts. Die häufigste Ursache hierfür ist der Sturz auf den ausgestreckten Arm. Durch einen Vitamin D-Mangel steigt das Risiko für eine derartige Fraktur. Betroffen sind vor allem Kinder im Wachstumsalter unter dem 10. Lebensjahr. Die dickere Knochenhaut und die größere Flexibilität des Knochens sind hierfür der Grund (62).

1.3.3 Bowing-Fraktur

Es kommt zu einer bleibenden Deformierung des Knochens bei intakter Knochenhaut. Betroffen ist typischerweise der diaphysäre Anteil von Röhrenknochen (64).

1.3.4 Wulstfraktur

Diese Art der Fraktur entsteht durch eine Stauchungsverletzung. Der Knochen wird dabei verformt und Kortikalis und Periost bleiben erhalten. Eine derartige Fraktur liegt häufig im metaphysären Bereich des Knochens (65).

1.3.5 Übergangsfaktur

Hierbei handelt es sich um eine Fraktur, welche nahe des Gelenkes liegt. Die Fuge ist am Ausreifen und Verschließen. Diese Frakturen liegen auf Höhe der Epiphyse. Trotz der Lokalisation sind für das Wachstum keine weiteren Komplikationen zu erwarten (63).

1.4 Knochenbruchheilung

In Bezug auf die Thematik der Knochenheilung lässt sich allgemein festhalten, dass ein Zehntel der Frakturen aller Altersgruppen Probleme bereiten, Probleme im Sinne von Komplikationen bei der Frakturheilung bzw. schlechte Tendenzen zur Heilung, Verzögerungen und Fehlheilungen. In diesen seltenen Fällen sind die Patient*innen von andauernden Schmerzen geplagt und ein Revisionseingriff kann notwendig sein (66). Im Bereich der Epiphysenfugen variiert die Intensität des longitudinalen Knochenwachstums. Die wachstumsstärksten Epiphysenfugen sind am proximalen Humerus, distalen Radius, distalen Femur und an der proximalen Tibia lokalisiert. Bei Knochenbrüchen in den genannten Regionen dominiert dadurch ein großes Heilungspotenzial (67). Knochenbrüche, welche in unmittelbarer Nähe zur Wachstumsplatte liegen, weisen einen stärkeren Reparaturmechanismus auf als jene, die sich distanzierter befinden. Vergleicht man die anderen Abschnitte des Knochens miteinander, so rekonstruieren sich Frakturen im diaphysären Abschnitt am schlechtesten. Mit steigendem Alter der Kinder nimmt die Kraft des Remodelings ab, wodurch Frakturen bei jüngeren Kindern besser heilen können. Liegt die Fraktur auf sagittaler Ebene, so zeigt sich bei dieser im Vergleich zu den anderen zwei Ebenen (Frontalebene, Transversalebene) das beste Korrekturpotenzial (67).

Eine größere Einschränkung der Mobilität zwischen den Knochenfragmenten hat einen positiven Einfluss auf die Gefäßneubildung, ebenso für die Einlagerung von Mineralien in den neu gebildeten Knochen (68). Ein Knochenbruch regeneriert sich durch spezifische An- und Abbauprozesse. Dieses Remodeling rekonstruiert im besten Fall die physiologische Form und Eigenschaften des Knochens (67). Der Knochen wird umgebaut als Anpassungsreaktion an die auf ihn einwirkende Belastung bzw. auf ihn einwirkenden Kräfte. Jene Modellierungen sind im Röntgenbild ersichtlich, somit makroskopisch darstellbar (69).

Der kindliche Knochen verfügt über erhebliche Fähigkeiten in Bezug auf das Modeling nach Frakturen. Das Periost weist im Wachstumsalter eine größere Dicke auf. Bei Frakturentstehung ist es wahrscheinlich, dass die Enden des frakturierten Knochens durch das Periost in Verbindung bleiben. Dies ist ein weiterer positiver Aspekt für die schnellere Knochenbruchheilung, da das Periost den Bereich des initialen Knochenwachstums darstellt. Die häufig angewandte konservative Frakturbehandlung resultiert aus dem erhöhten

Heilungspotential von Frakturen im Kindesalter. Nach einer Fraktur wird initial ein Geflechtknochen gebildet, welcher in den Lamellenknochen umgewandelt wird. (38,59).

Eine homogene Belastung der Frakturanteile ist notwendig, um eine frakturumspannende Kallusbildung zu ermöglichen. Der Kallus ist die Grundlage für eine sekundäre Verknöcherung (5). Dieser Kallus entsteht in mehreren Schritten bzw. Stadien. Zunächst bildet sich Bindegewebe, welches sich dann in knorpeliges Material umwandelt. Über längere Zeit entwickelt sich aus dem Knorpel schlussendlich der Knochen (70).

Zusammenfassend sind neben der richtigen Wahl der Therapie auch Aspekte wie die mechanische Belastung, die Ausbildung von Wachstumsfaktoren und knochenbildenden Zellen sowie eine grundlegende Struktur, die eine Knochenbildung fördert für einen physiologischen Frakturheilungsprozess relevant (71). Im Rahmen der Frakturheilung werden zwei Formen unterschieden. Es handelt sich hierbei einerseits um die primäre und andererseits um die sekundäre Frakturheilung. Die häufigere Art im Kindesalter ist die sekundäre Knochenbruchregeneration (67). Die Voraussetzung für eine primäre Heilung ist eine durchwegs stabile Verbindung bzw. ein robustes Zusammenhalten der Fraktarenden. Im Rahmen der sekundären Frakturheilung sind kleinste Bewegungen gestattet und darüber hinaus sogar förderlich (72). Es handelt sich um neu gebildetes Gewebe; es stabilisiert die beiden Knochenenden und sorgt für die Bildung einer Einheit, wenn aus dem Kallus wieder neues Knochengewebe entsteht (73). Der Kallus wird nicht gleichmäßig als Einheit geformt, sondern erfährt je nach Anteil unterschiedliche Varianten (72). Im Artikel „Overview of the fracture healing cascade“ von Phillips A.M. et al (72) werden die Anteile des Kallus beschrieben mit „The four main zones are the medullary canal, the area between the cortices, the subperiosteal layer and the surrounding soft tissues“ (72). Aus den ersten beiden entsteht ein weicher Kallus und in weiterer Folge durch indirekte (chondrale) Ossifikation der neue Knochen. Letztere zwei Zonen bilden um den Spalt den harten Kallus; aus jenem wird durch direkte (desmale) Ossifikation der Knochen gebildet (72,74).

1.4.1 Begutachtung des Heilungsfortschrittes

Im Verlauf werden Röntgenbilder angefertigt, um die Konsolidierung zu analysieren. Diese Untersuchungen erfolgen im Zeitraum von vier bis fünf Wochen nach der Frakturentstehung.

Wie bereits im Kapitel 1.1.3.3.1 erwähnt, ist für diese Beurteilung das Standardprozedere das Anfertigen eines Röntgenbildes. Das Hauptaugenmerk der Begutachtung liegt dabei auf der Dichte der Kortikalis und dem Frakturspalt (5).

Die Beurteilung des Heilungsfortschrittes mittels CT erweist sich als präziser. Ihr bleibt jedoch ein geringerer Stellenwert zugeschrieben, da der erzielte Nutzen im Missverhältnis zum Mehraufwand und zu den Kosten steht. Insbesondere die Strahlenbelastung wäre bei der CT signifikant erhöht (75).

Bildgebende Verfahren geben keinen Aufschluss über die Biomechanik des frakturierten Knochens. Der Schmerz ist zusätzlich ein subjektiver Parameter, welcher erhoben wird und in die Begutachtung miteinfließen muss. Die Erhebung des Schmerzniveaus über eine Anamnese und klinische Untersuchung ist essenziell, um präzise Aussagen über die Belastungsfähigkeit der Fraktur zu tätigen. Letztendlich ist oft erst eine Frakturbelastung notwendig, um den vollständigen Umbau vom Kallus zum regenerierten Knochen zu ermöglichen (5,71).

2 Material und Methoden

2.1 Studiendesign

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde eine retrospektive, epidemiologische Beobachtungsstudie an der Universitätsklinik für Kinderchirurgie, bzw. an der Universitätsklinik für Orthopädie und Traumatologie, durchgeführt. In diese Studie wurden alle Patient*innen inkludiert, die in der Notaufnahme der Kinderchirurgie und der Orthopädie und Traumatologie Graz im Zeitraum 2007 bis 2021 aufgrund einer pathologischen Fraktur vorstellig wurden.

Diese Diplomarbeit hat als Ziel pathologische Frakturen zu identifizieren, welche für die jeweiligen Altersgruppen am wahrscheinlichsten sind, und Charakteristika zu eruieren, welche die Diagnosestellung unterstützen und erleichtern sollen.

Bezugnehmend auf die Ursache der pathologischen Frakturen, auch im Hinblick auf den Unfallhergang, wurden Unfallmechanismen in die Analyse miteinbezogen. Die Alterseinteilung der Kinder und Jugendlichen erfolgte nach dem Schema, welches im Kapitel Alterskategorien beschrieben wird.

Die Studie wurde von der Ethik- Kommission Graz genehmigt (EK Nr. 34-350 ex 21_22 1154-202). Eine Einverständniserklärung der Patient*innen ist aufgrund der Tatsache, dass es sich um eine retrospektive Studie handelt, nicht erforderlich. Die Patient*innendaten wurden pseudonymisiert und vertraulich behandelt.

2.2 Patient*innenkohorte

Für die vorliegende Studie wurde eine Datenabfrage mit dem zentralen Patient*innenverwaltungssystem des Krankenhauses (Medocs) durchgeführt. Dieses System wird von der gesamten steiermärkischen Krankenanstaltsgesellschaft zur digitalen Dokumentation von Patient*innendaten und auch deren Befunde verwendet. Die dadurch generierte Liste inkludiert Patient*innen im Alter von 0 bis 18 Jahren, welche im Zeitraum 2007 bis 2021 an der Universitätsklinik für Kinderchirurgie in Graz in Behandlung waren. An dieser Abteilung werden Kinder und Jugendliche bis zum 18. Lebensjahr behandelt,

welche aus dem Einzugsgebiet Steiermark und aus den angrenzenden Nachbarbundesländern (Kärnten, Salzburg, Niederösterreich) und darüber hinaus aus benachbarten Ländern (Slowenien, Kroatien, Deutschland und Tschechien) stammen.

Es erfolgte eine Suche mit Freitext im Patient*innenverwaltungssystem (Medocs) mit den folgenden Schlagwörtern

- pathologische Fraktur Humerus
- pathologische Fraktur Radius
- pathologische Fraktur Unterarm
- etc....

Durch diese primäre Datenabfrage ergab sich eine Patient*innenkohorte von 340 Patient*innen. Es wurden Name, Geburtsdatum, Gewicht, Körpergröße, Unfalldynamik, Unfallmechanismus, Behandlungsart und Langzeitergebnisse abgefragt und ausgewertet.

2.2.1 Alterskategorien

Um die Daten in Bezug auf das Alter der Patient*innen auswerten zu können, wurden Alterskategorien definiert.

Säuglinge: jünger als ein Jahr

Vorschulkinder: ein bis sechs Jahre

Präpubertierende Schulkinder: sieben bis zehn Jahre

frühjugendliche Patient*innen: elf bis 14 Jahre

Spätpubertierende Patient*innen: 15 bis 18 Jahre (76)

2.3 Einschlusskriterien

In diese Studie miteingeschlossen wurden Patient*innen im Wachstumsalter von 0-18 Jahren. Sowohl weibliche als auch männliche Patient*innen wurden in die Datenauswertung miteinbezogen. Grundlegend für die Aufnahme in die Studie war das Vorliegen einer pathologischen Fraktur, welche am Universitätsklinikum Graz im Zeitraum 2007 bis 2021 operativ oder konservativ versorgt wurde. Bereits erwachsene Patient*innen über 18 Jahre wurden aus der Studie ausgeschlossen. Es wurden 105 Patient*innen durch Nicht-Erfüllen der Einschlusskriterien exkludiert. Die folgende Grafik erlaubt einen Überblick der ein- und ausgeschlossenen Fälle.

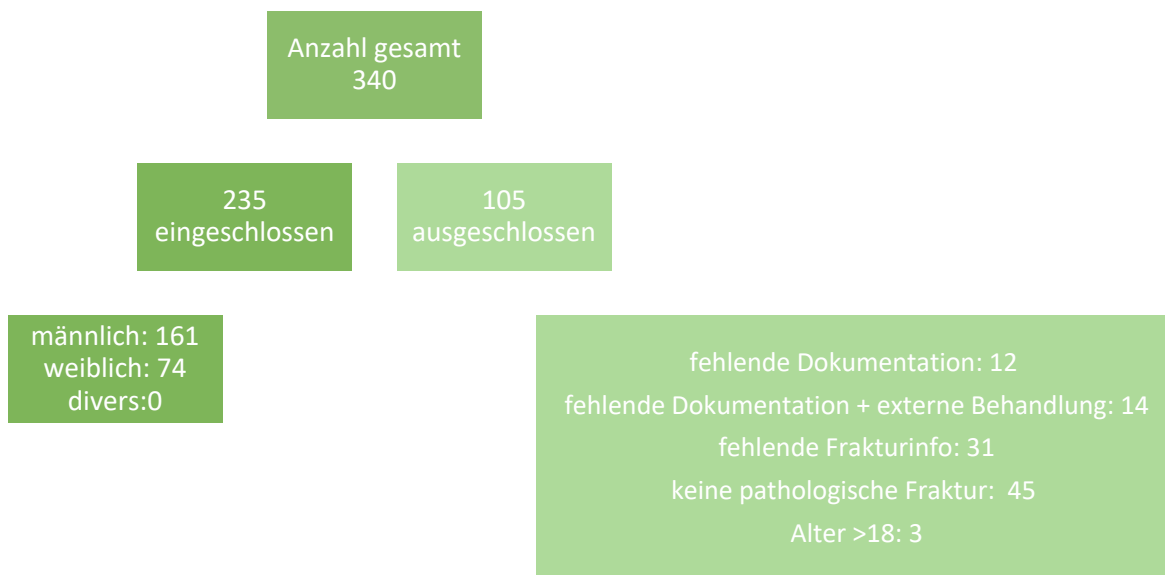


Abbildung 1: Patient*innenkohorte

Bei 12 Patient*innen konnten aufgrund von fehlender Dokumentation nicht ausreichend Daten zum Fall gesammelt werden, sodass mehr als fünf Datenfelder nicht befüllt werden konnten und der Fall somit nicht ausgewertet werden konnte. Durch externe Behandlungen ist es in 14 Fällen zu fehlender Dokumentation gekommen. In 31 Fällen bestand keine Information über eine stattgefundene Fraktur – diese waren im Rahmen der initialen Suche fälschlich zugeordnet worden. Bei 41 Fällen war keine pathologische Fraktur vorliegend – auch hier handelte es sich um einen initialen Fehler bei der Datensuche. Diese genannten Ursachen führten zum Ausschluss. Letztendlich wurden von den anfänglich 340 Patient*innenfällen insgesamt 105 ausgeschlossen. 235 Patient*innen wurden für die Datenauswertung herangezogen. Im Kapitel Ergebnisse – Resultate mit graphischen

Darstellungen werden die Ergebnisse der Auswertung dieser eingeschlossenen Fälle dargestellt.

2.4 Befunde und Datenerhebung

Die Datenerhebung erfolgte einerseits über das zentrale Patient*innenverwaltungssystem des Krankenhauses („Medocs“) und andererseits über das Bildbetrachtungsprogramm „PACS-View“. Dabei wurden ambulante Dekurse, Arztbriefe, Operationsberichte, histologische Befunde, sowie Ergebnisse von Nachuntersuchungen systematisch ausgewertet und die relevanten Informationen in eine Excel-Datenbank übertragen.

Parallel dazu wurde eine Literaturrecherche durchgeführt. Fachliteratur wurde über die Datenbanken und Suchmaschinen PubMed, Google Scholar und ScienceDirect identifiziert, um bereits vorliegende Forschungsergebnisse in die Arbeit einzubeziehen. Ergänzend wurden einschlägige Fachbücher herangezogen, die sich mit der Thematik pathologischer Frakturen im Kindes- und Jugendalter befassen.

Die Studie wurde in Übereinstimmung mit den Leitlinien der „Guten Klinischen Praxis“ (ICH-GCP) durchgeführt. Da ausschließlich bereits vorhandene Daten ausgewertet wurden und keine zusätzlichen diagnostischen oder therapeutischen Maßnahmen erfolgten, ergaben sich für die Patient*innen keinerlei Risiken oder Belastungen. Alle erhobenen Daten wurden vor der Analyse pseudonymisiert, sodass keine Rückschlüsse auf individuelle Patient*innen möglich waren.

2.5 Erhebungen – Key Dataset

2.6 Unfallmechanismus

Diese Diplomarbeit soll überdies erläutern, ob es einen Zusammenhang des Unfallherganges mit dem Auftreten von pathologischen Frakturen gibt. Hierzu wurden Daten des Unfallmechanismus erhoben. Vordefiniert waren diesbezüglich folgende Mechanismen:

- Stürze auf ebener Fläche (Fußball, Treppe, Spielen, Gehen, Radfahren, Laufen, andere Sportarten)
- Stürze aus einer Höhe über drei Meter (Trampolinspringen, Wintersportarten, Gymnastik)

- Stürze aus einer Höhe unter drei Metern (Trampolinspringen, Wintersportarten, Gymnastik)
- Zusammenstöße (Fußball, Wintersportarten, Straßenverkehr, Spielen, direkte Gewalteinwirkung, Rollschuhfahren)
- Straßenverkehr
- Andere

2.7 Unfallort

Eruiert wurde der Ort des Unfalls, um ggf. Zusammenhänge mit pathologischen Frakturen herzustellen. Hierfür wurden folgende Orte differenziert:

- Bildungseinrichtungen (Schule, Kindergarten)
- Spiel- und Sportstätten (Freizeit, Sportverein)
- Zuhause (Privates Umfeld)
- Straßenverkehr
- Kein Trauma erkennbar

2.8 Lokalisation

Hierbei wurde grundsätzlich zwischen links und rechts unterschieden. Weiters gab es die Unterteilung in Obere Extremität, Untere Extremität und Rumpf. Die nachstehende Tabelle fasst die jeweilige Region in definierte Bereiche zusammen.

Obere Extremität	Untere Extremität	Rumpf
Schulter	Glutealregion	Kopf/Hals
Axillaregion	Leistenregion	Rippen
Oberarm	Oberschenkel	Wirbelsäule
Ellenbogen	Knie	
Unterarm	Unterschenkel	
Hand	Fuß	

Tabelle 1: Lokalisationen

2.9 Diagnosen

Die verschiedenen Diagnosen wurden zur vereinfachten Datenauswertung zusammengefasst. Dies wird in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Diagnosen	
primär maligne skeletale Tumoren	Ewing-Sarkom, Chondrosarkom, Osteosarkom
Knochendichterduktion	Osteoporose, Osteopenie, Muskeldystrophie
primäre Ossifikationsstörung	Fibröse Dysplasie, Osteogenesis imperfecta, Epiphysäre Dysplasie
Metastasen	Neuroblastom, Hämangioperizytom
Langerhans-Zell-Histiozytose	Langerhanszellhistiozytose, Eosinophiles Granulom
Kochenzyste	Knochenzyste
Chondroblastom	Chondroblastom
Enchondrom	Enchondrom
Myofibrom	Myofibrom
NOF	NOF
Osteomyelitis	Osteomyelitis
Stressfraktur	Stressfraktur

Tabelle 2: Diagnosen

2.10 Statistik

Für die explorativ-deskriptive statistische Auswertung der Daten aus der Erstaufnahme sowie den Nachuntersuchungen wurde eine Tabelle in MS Office Excel erstellt. Quantitative Daten wurden mithilfe von deskriptiven Kennwerten (absolute und relative Häufigkeiten, Mittelwerte, Standardabweichungen, Medianwerte) dargestellt. Qualitative Variablen wurden inhaltlich kategorisiert und in Bezug auf ihre Häufigkeitsverteilung analysiert. Zur besseren Veranschaulichung der Ergebnisse erfolgte eine graphische Aufbereitung in Form von Tabellen und Diagrammen. Jene Excel-Tabelle beinhaltet folgende Daten:

- Identifikationsnummer
- Geburtsdatum
- Alter zum Frakturzeitpunkt
- Geschlecht
- Körpergröße
- Gewicht
- BMI
- Frakturdatum
- Datum der Röntgenaufnahme

- Unfallort
- Unfallmechanismus
- Frakturlokalisierung
- Behandlungsart
- Operationsdatum
- Biopsiedatum
- Histologisches Ergebnis
- Tumorhistologie
- Tumorlokalisierung
- Tumorthherapie
- Frakturergebnis
- Revisionsdaten
- Datum und Ergebnis der letzten Untersuchung

3 Ergebnisse – Resultate mit graphischen Darstellungen

3.1 Gesamte Patient*innenkohorte

3.1.1 Geschlechterverteilung

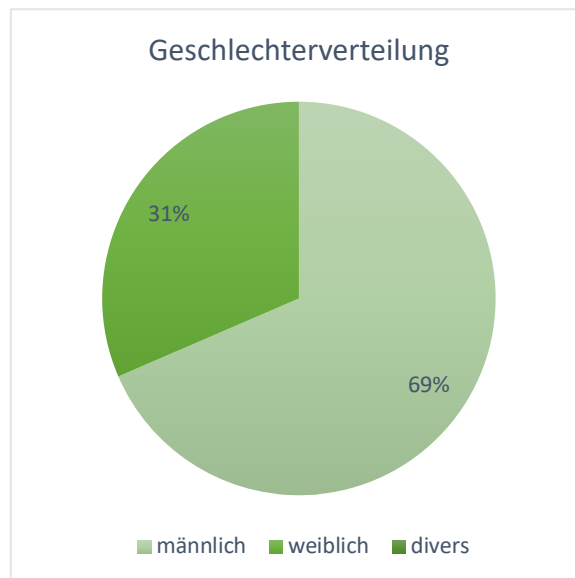


Abbildung 2: Geschlechterverteilung in Prozent

Die gesamte Patient*innengruppe setzte sich mit einem Anteil aus 161 männlichen Patienten (69%) und 74 weiblichen Patientinnen (31%) zusammen.

3.1.2 Altersverteilung

Das Durchschnittsalter zum Zeitpunkt der Fraktur der Untersuchungsgruppe lag bei 10,4 Jahren. Der Median betrug 11 Jahre. Es erfolgte eine Einteilung in Altersgruppen: Säuglinge (<1 Jahr), Vorschulkinder (1-6 Jahre), präpubertierende Schulkinder (7-10 Jahre), frühjugendliche Patient*innen (11-14 Jahre), spätpubertierende Patient*innen (15-18 Jahre). Die Patient*innen verteilten sich auf die entsprechenden Altersgruppen wie folgt.

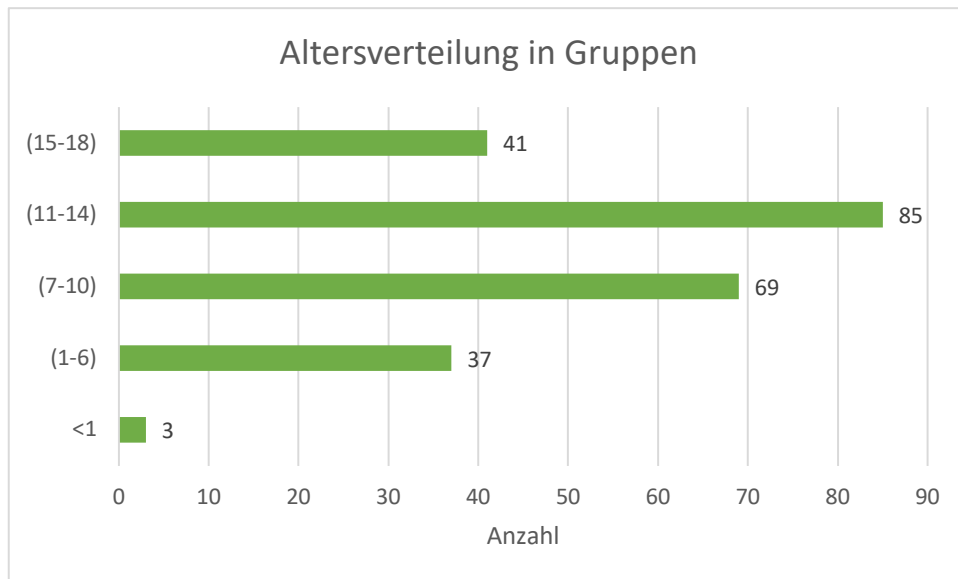


Abbildung 3: Altersverteilung in Alterskategorien

3.1.3 Entitäten

Das hier abgebildete Diagramm listet die Diagnosen nach deren Häufigkeit in Bezug auf die gesamte Studienpopulation.

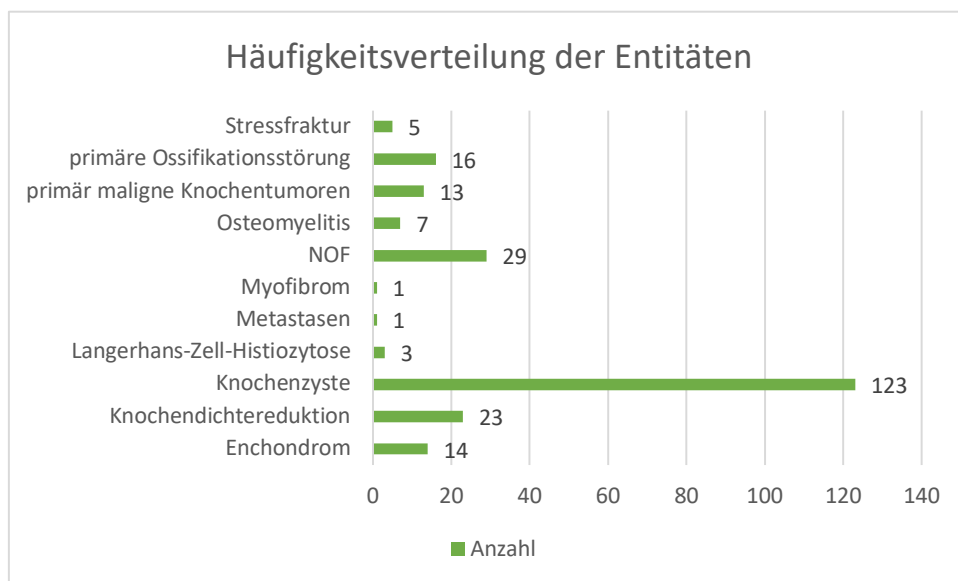


Abbildung 4: Häufigkeitsverteilung der Entitäten

3.1.4 Lokalisationen

Die nachstehende Grafik beschreibt die Verteilung der Lage der Frakturen auf den Körperregionen: Obere Extremität, Untere Extremität und Rumpf.

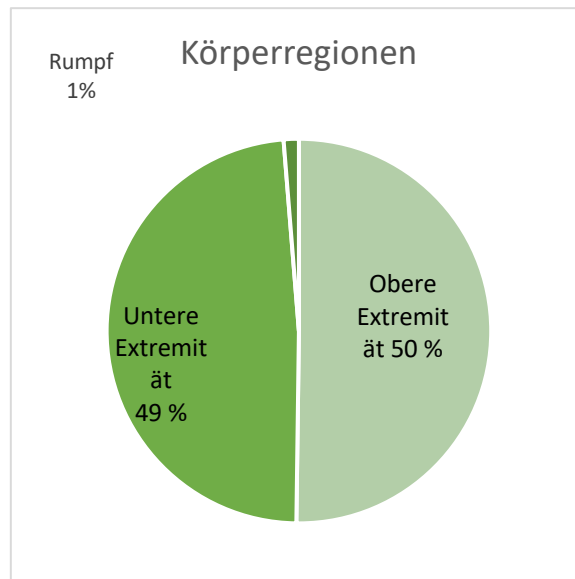


Abbildung 5: Körperregionen in absoluter Häufigkeit

Die Verteilung, welche in Abbildung 5 dargestellt ist, ergab innerhalb der Patient*innengruppe 118 pathologische Frakturen (50%) im Bereich der oberen Extremität, 114 pathologische Frakturen (49%) der unteren Extremität und drei pathologische Frakturen (1%) am Rumpf.

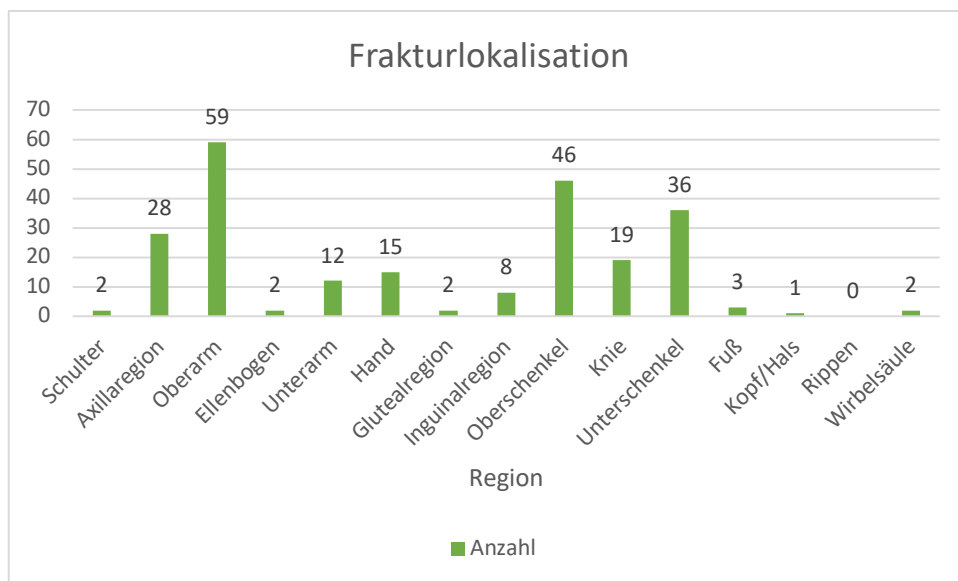


Abbildung 6: Frakturlokalisation in absoluter Häufigkeit

Der Oberarm war am häufigsten von pathologischen Frakturen betroffen (n=59). Am zweithäufigsten der Oberschenkel (n=46). Diese beiden Lokalisationen werden in der Verteilung gefolgt vom Unterschenkel (n=36) und von der Axillaregion (n=28). Die Rippen waren in dieser Patient*innengruppe nicht betroffen (n=0).

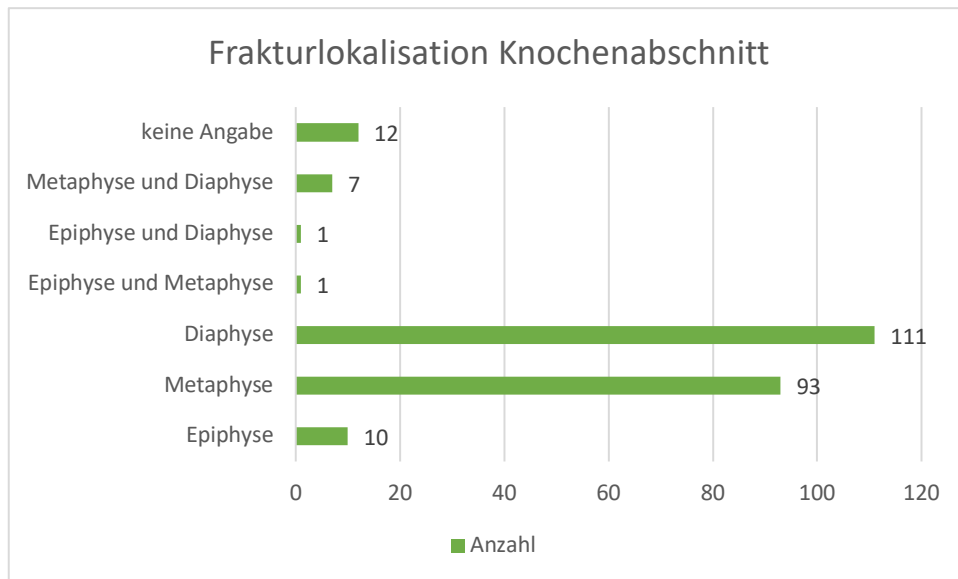


Abbildung 7: Knochenabschnitte

Die Abbildung 7 zeigt, dass mit einem überwiegenden Anteil die Diaphyse (n=111) und Metaphyse (n=93) betroffen waren. Beide gemeinsam haben einen Anteil an der Gesamtfallzahl von 87%. 10 Fälle wurden im Bereich der Epiphyse detektiert. Zu 12 Patient*innen gibt es hierzu keine Angaben.

3.1.5 Unfallmechanismus

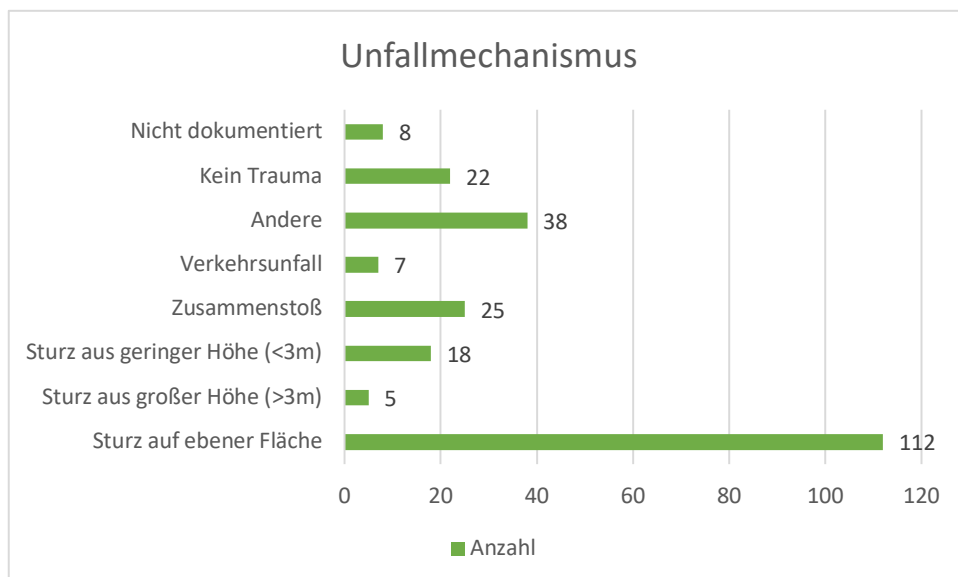


Abbildung 8: Unfallmechanismus

3.1.6 Unfallort

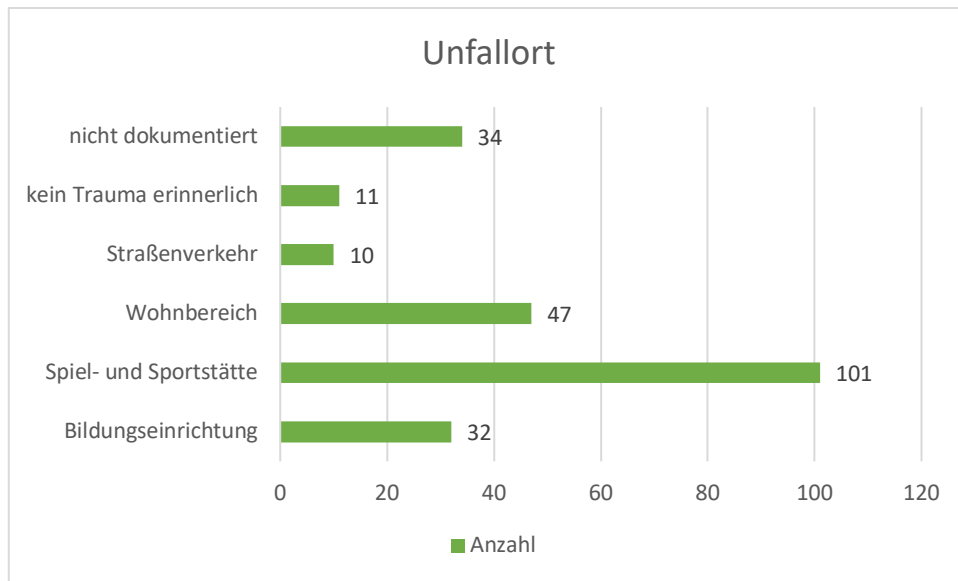


Abbildung 9: Unfallort

3.1.7 Die obere Extremität

Es wurden 118 Fälle mit pathologischen Frakturen im Bereich der oberen Extremität detektiert. In Bezug auf die Geschlechterverteilung hatten 30 Patientinnen (25%) und 88 Patienten (75%) eine pathologische Fraktur an der oberen Extremität. Das Durchschnittsalter zum Frakturzeitpunkt beträgt 10,6 mit einem Minimum bei zwei Jahren und einem Maximum bei 17 Jahren. Die Verteilung des Alters in Bezug auf Patient*innen mit pathologischen Frakturen der oberen Extremität wird in der folgenden Grafik dargestellt.

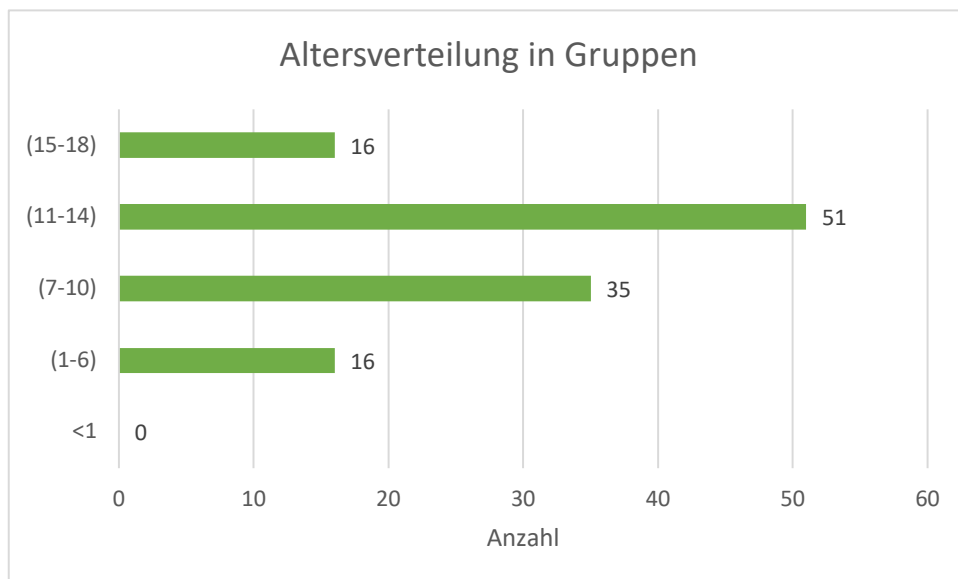


Abbildung 10: Altersverteilung in Gruppen: Obere Extremität

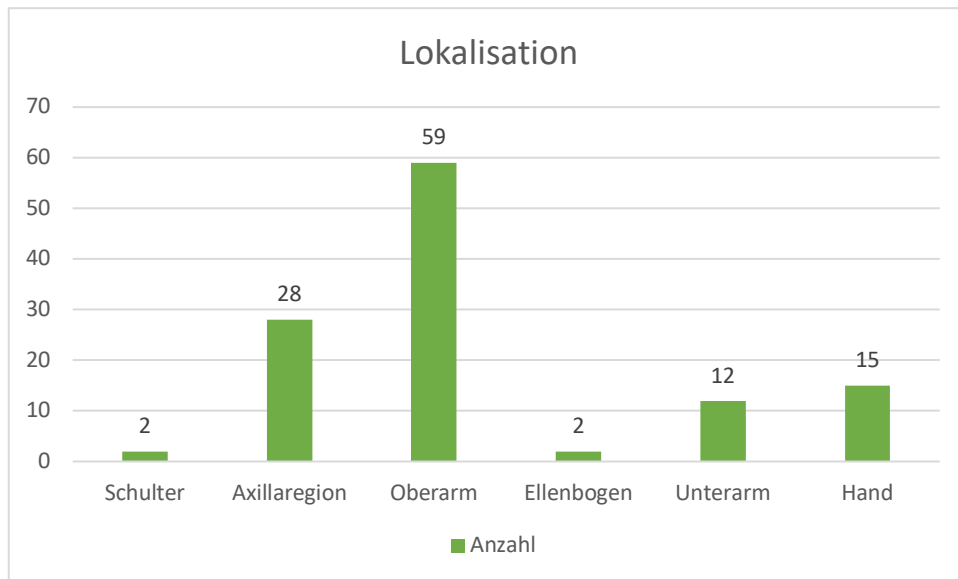


Abbildung 11: Lokalisationen der pathologischen Frakturen: Obere Extremität

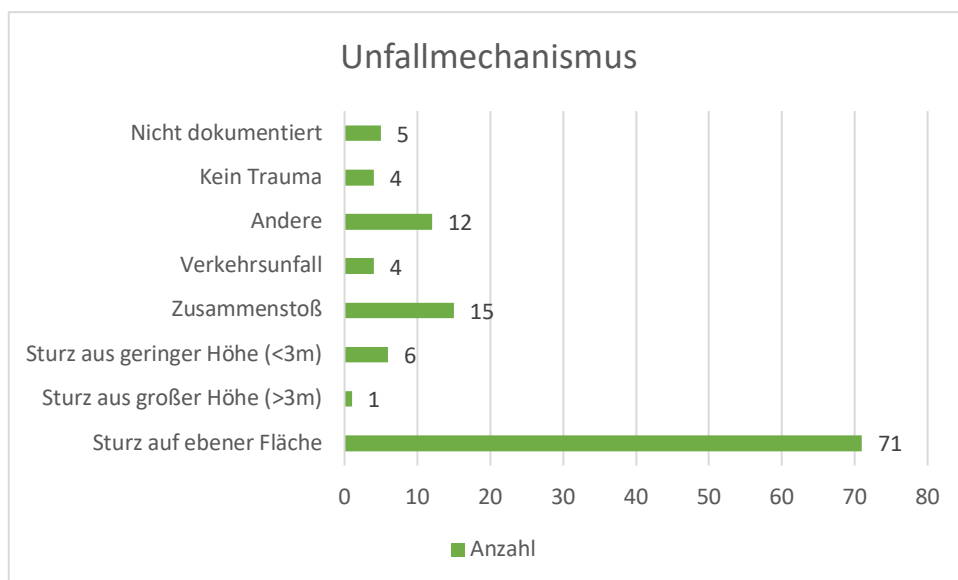


Abbildung 12: Unfallmechanismen der pathologischen Frakturen: Obere Extremität

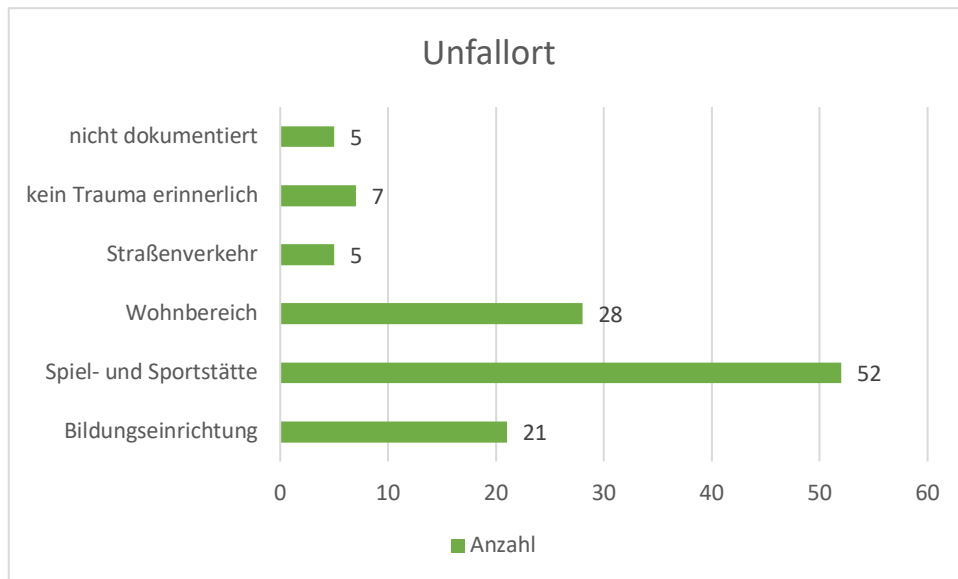


Abbildung 13: Unfallorte der pathologischen Frakturen: Obere Extremität

3.1.8 Die untere Extremität

In die Datenanalyse wurden 114 Fälle mit pathologischen Frakturen der unteren Extremität miteinbezogen. Hierbei wurden Daten von 43 weiblichen Patientinnen (38 %) und 71 männlichen Patienten (62%) erhoben. Der Mittelwert des Alters zum Zeitpunkt der Fraktur liegt bei 10,2 Jahren. Die Verteilung des Alters in Bezug auf Patient*innen mit pathologischen Frakturen der unteren Extremität wird in der folgenden Grafik dargestellt.

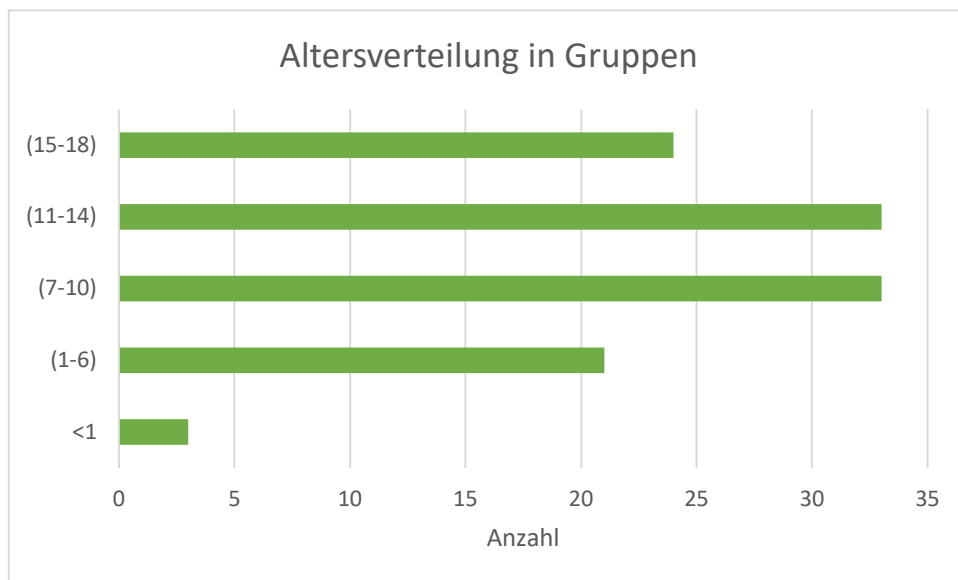


Abbildung 14: Altersverteilung in Gruppen: Untere Extremität

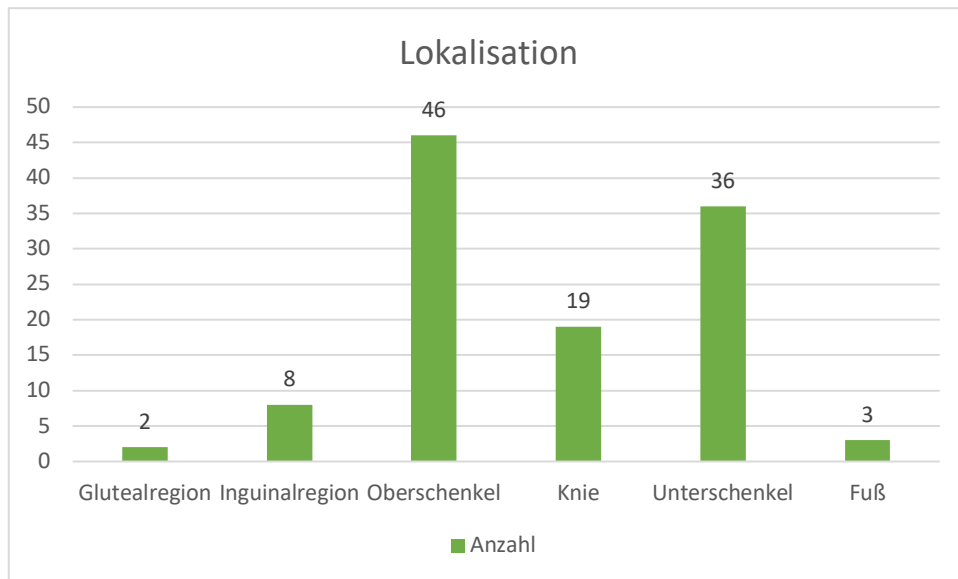


Abbildung 15: Lokalisationen der pathologischen Frakturen: Untere Extremität

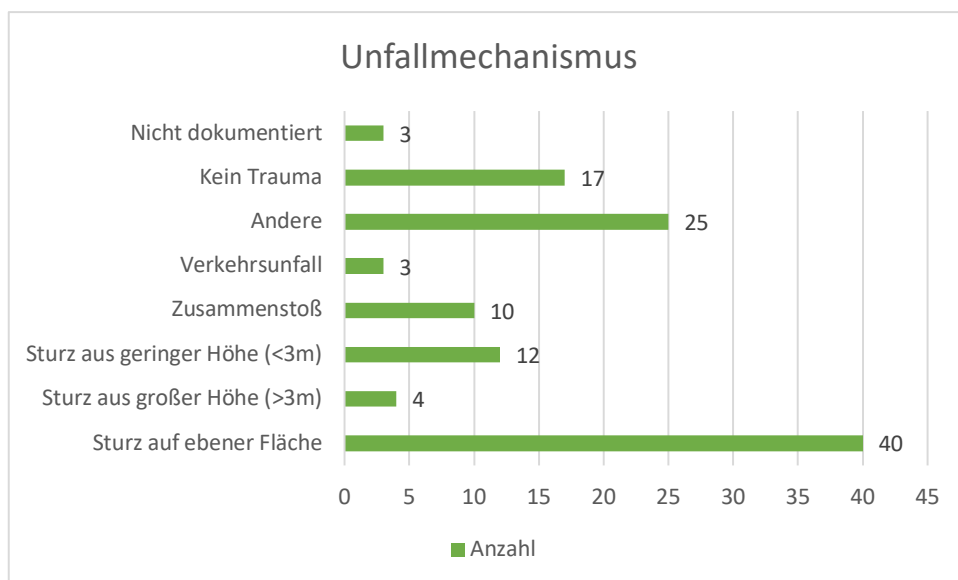


Abbildung 16: Unfallmechanismen der pathologischen Frakturen: Untere Extremität

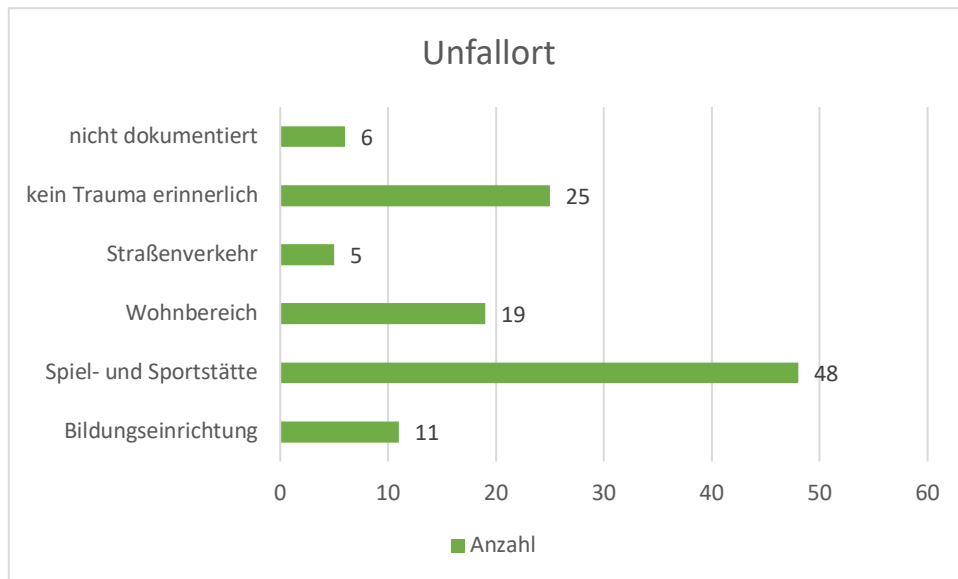


Abbildung 17: Unfallorte der pathologischen Frakturen: Untere Extremität

3.1.9 Der Körperstamm

Drei Fälle mit pathologischen Frakturen des Körperstammes wurden ausgewertet. Davon wurden zwei männliche Patienten (67%) und eine weibliche Patientin (33%) eingeschlossen. Das durchschnittliche Alter zum Zeitpunkt der Fraktur liegt bei 12 Jahren. Die Verteilung des Alters in Bezug auf Patient*innen mit pathologischen Frakturen des Körperstammes wird in der folgenden Grafik dargestellt.

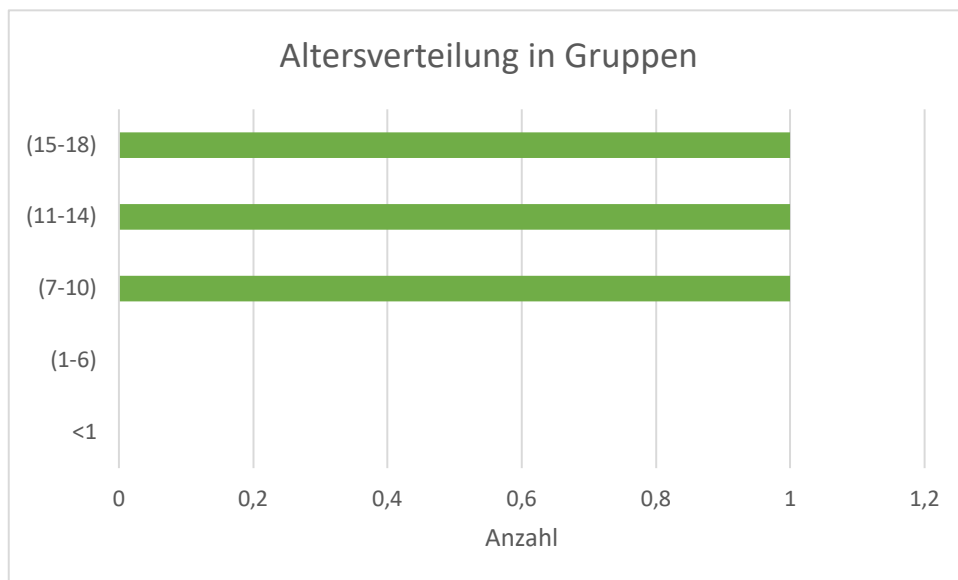


Abbildung 18: Altersverteilung in Gruppen: Körperstamm

Eine pathologische Fraktur war in der Kopf/Hals-Region lokalisiert, weitere zwei im Bereich der Wirbelsäule. Eine pathologische Fraktur resultierte aus einem Sturz auf ebener Fläche,

bei einem weiteren Fall hat kein Trauma stattgefunden. Beim dritten Fall war der Mechanismus nicht näher definiert. Der Sturz auf ebener Fläche hat in einer Spiel- und Sportstätte stattgefunden.

3.2 Datenanalyse der einzelnen Diagnosen

In diesem Abschnitt werden die Auswertungen der einzelnen Diagnosen näher beschrieben und dargestellt. Die Auflistung erfolgt in der Reihenfolge der Häufigkeit der einzelnen Entitäten aus der gesamten Patient*innenkohorte. Jene Verteilung kann man der Grafik Abbildung 4: Häufigkeitsverteilung der Entitäten entnehmen.

3.2.1 Knochenzysten

Aneurysmatische und simple Knochenzysten wurden in der Datenanalyse zusammengefasst. Die Analyse ergab 123 von 235 Fällen, welche eine pathologische Fraktur, basierend auf Knochenzysten, vorwiesen. Das entspricht gerundet 52% der gesamten Diagnosen. Die Geschlechterverteilung der Fälle mit Knochenzysten beläuft sich auf 91 männliche (74%) und 32 weibliche Patient*innen (26%). Der Mittelwert des Alters zum Zeitpunkt der Fraktur beträgt 9,8 Jahre. 43 Fälle hatten im Alter von elf bis 14 Jahren eine pathologische Fraktur durch eine Knochenzyste und präpubertierende Schulkinder im Alter zwischen sieben bis zehn Jahren waren mit 41 Fällen am zweithäufigsten betroffen. Die genaue Altersverteilung in den jeweiligen Alterskategorien kann man der nachstehenden Grafik (Abbildung 19) entnehmen. Die genauere Aufschlüsselung der verschiedenen Unfallmechanismen folgt in der zweiten Grafik (Abbildung 20) und danach wird die Grafik zu den Unfallorten (Abbildung 21) dargestellt.

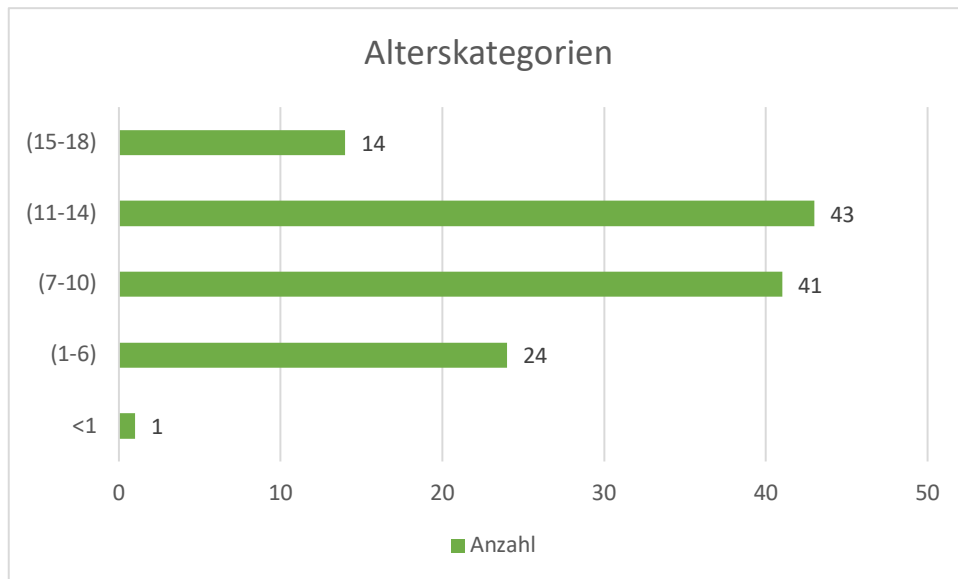


Abbildung 19: Alterskategorien: Knochenzysten

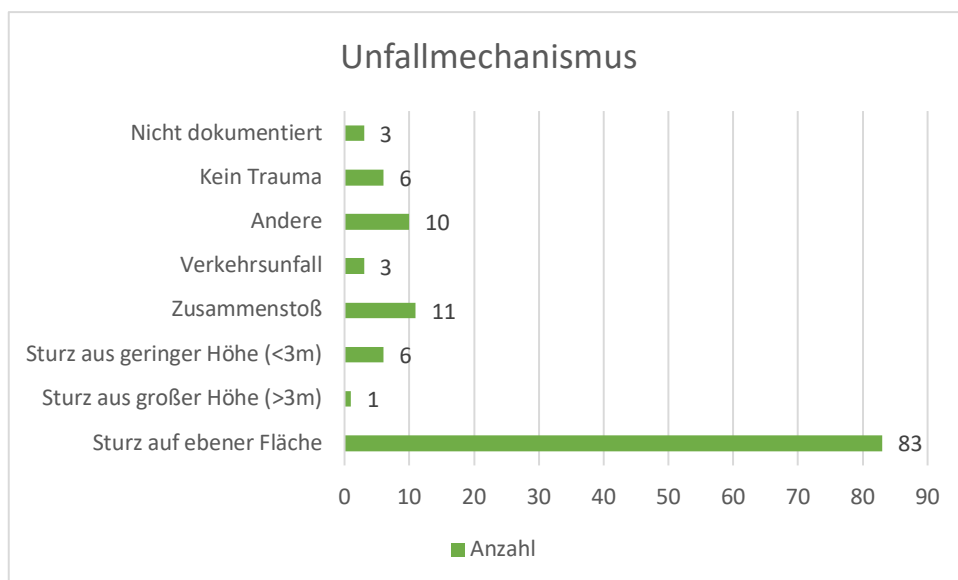


Abbildung 20: Unfallmechanismus: Knochenzysten

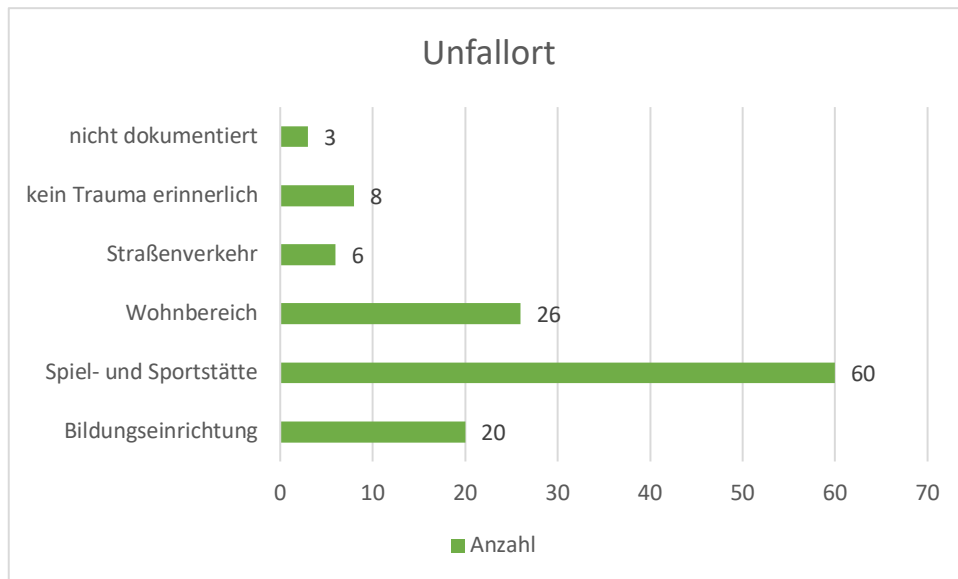


Abbildung 21: Unfallort: Knochenzysten

3.2.2 NOF

Die Datenauswertung lieferte das Ergebnis von 29 Patient*innen, welche eine pathologische Fraktur aufgrund eines nicht ossifizierenden Fibroms erlitten. Die Verteilung nach dem Geschlecht stellt sich bei diesen Fällen wie folgt dar: 18 männliche Patienten (62%) und 11 weibliche Patientinnen (38%). Der Mittelwert des Alters der betroffenen Patient*innen liegt bei 11,4 Jahren. Die genaue Verteilung der Altersgruppen (Abbildung 22), die Unfallmechanismen (Abbildung 23), sowie die Unfallorte (Abbildung 24) kann man der folgenden Abbildungen entnehmen.

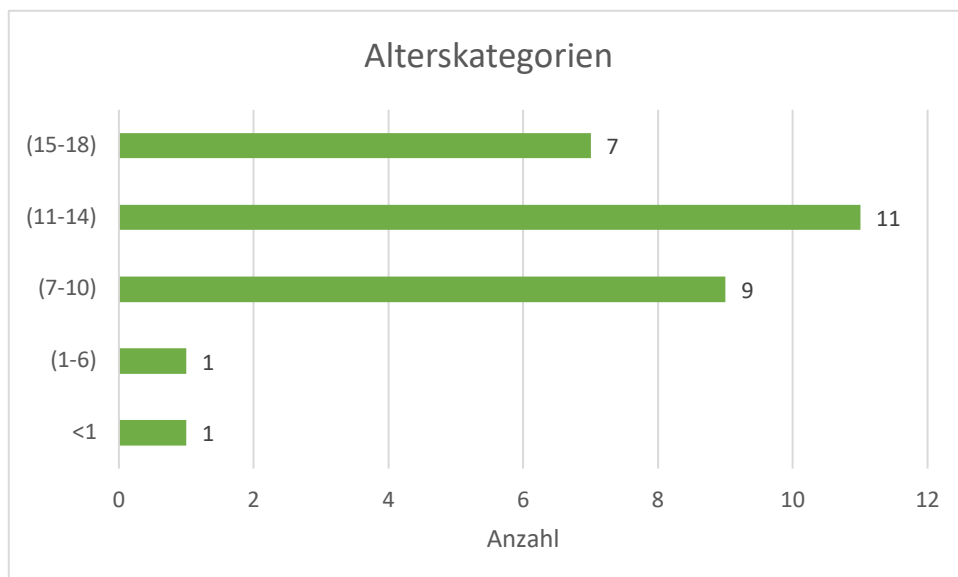


Abbildung 22: Alterskategorien: NOF

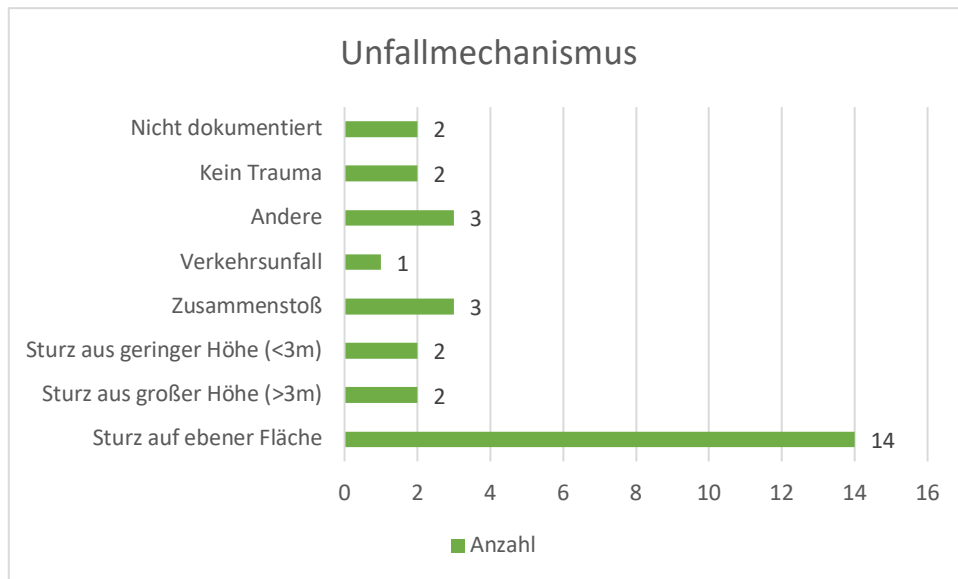


Abbildung 23: Unfallmechanismen: NOF

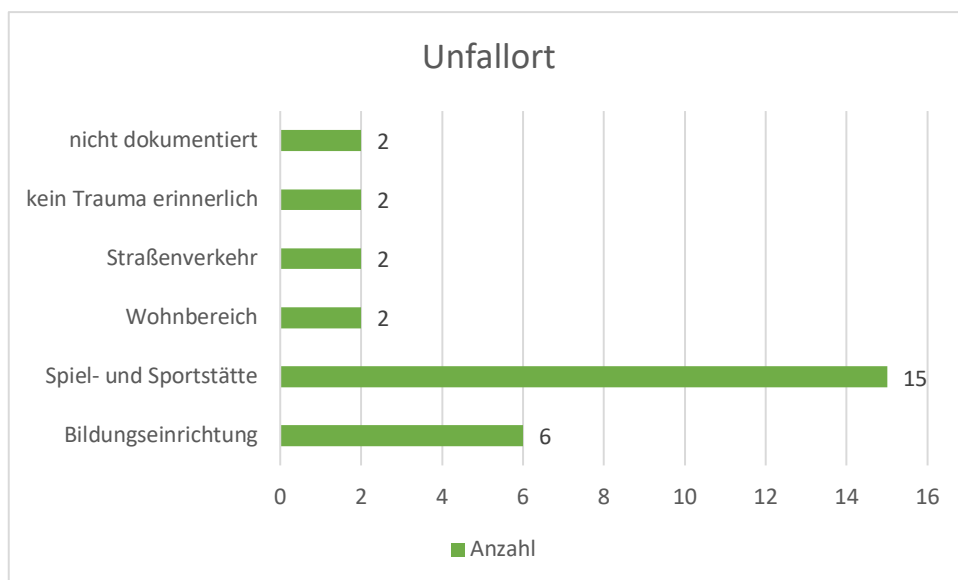


Abbildung 24: Unfallorte: NOF

3.2.3 Primäre Ossifikationsstörung

Die Durchsicht der Daten ergab 16 Fälle, bei welchen durch eine primäre Ossifikationsstörung eine pathologische Fraktur resultierte. Elf Fälle waren männliche Patienten (69%) und fünf davon waren weibliche Patientinnen (31%). Der Mittelwert des Alters der Fälle mit primärer Ossifikationsstörung lag zum Frakturzeitpunkt bei 10,5 Jahren. Die genaue Verteilung in Bezug auf primäre Ossifikationsstörungen in den jeweiligen Alterskategorien (Abbildung 25), die Unfallmechanismen (Abbildung 26) und die Unfallorte (Abbildung 27) kann aus den folgenden Diagrammen entnommen werden.

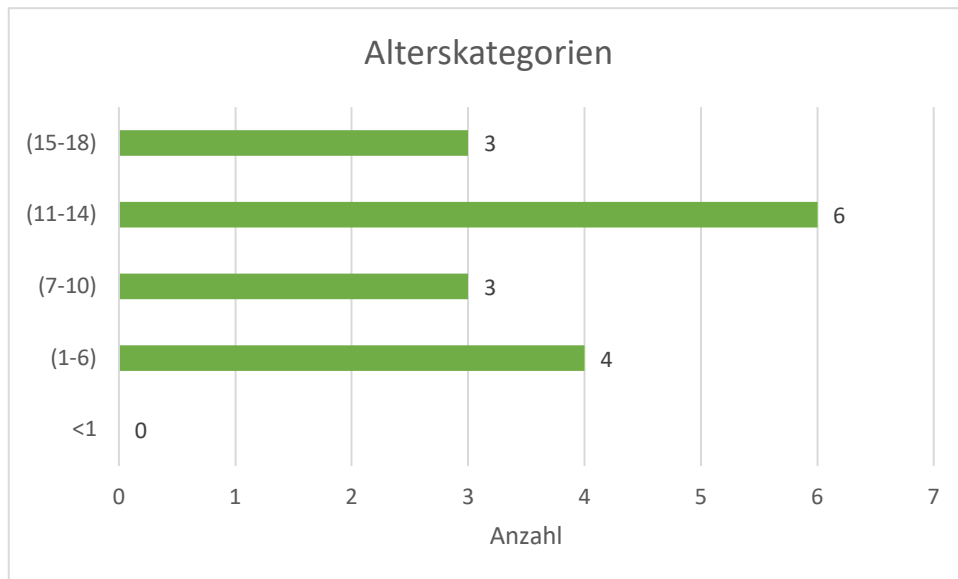


Abbildung 25: Alterskategorien: primäre Ossifikationsstörung

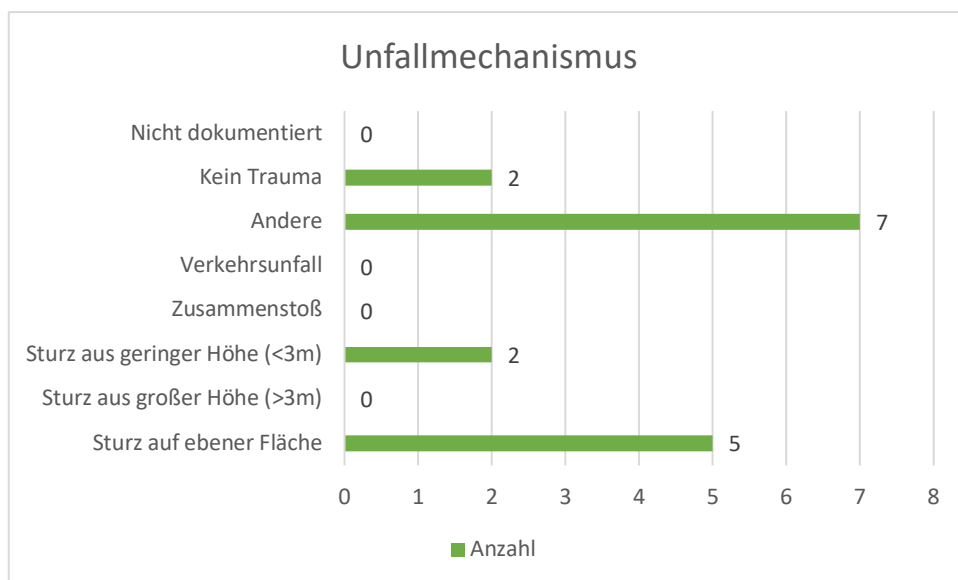


Abbildung 26: Unfallmechanismen: primäre Ossifikationsstörung

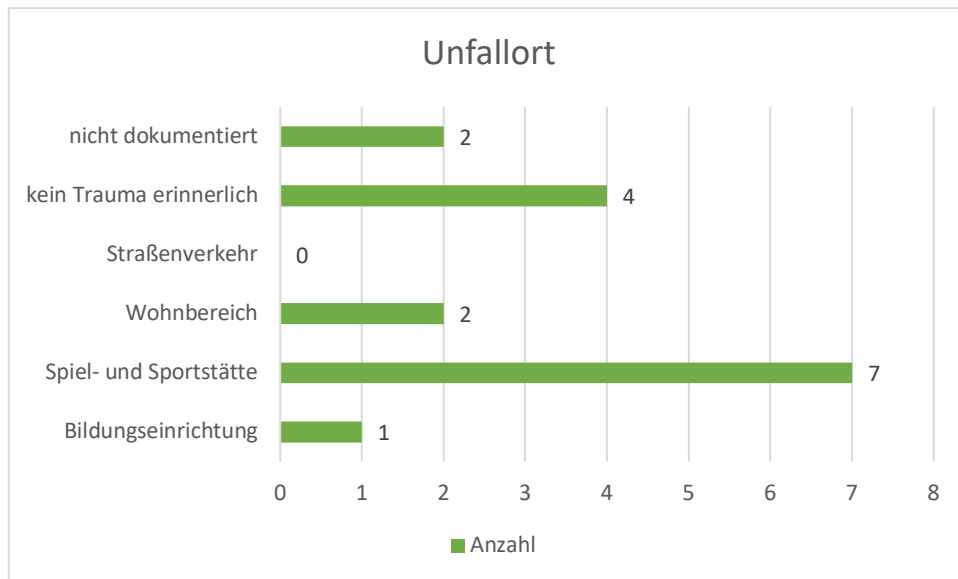


Abbildung 27: Unfallorte: primäre Ossifikationsstörung

3.2.4 Enchondrom

Die Datenanalyse ergab 14 Fälle; davon 12 (86%) Patienten und zwei (14%) Patientinnen mit einem Enchondrom (Abbildung 28). Das Durchschnittsalter zum Zeitpunkt der Frakturdiagnose liegt bei 12,8 Jahren mit einem Minimum bei sieben Jahren und einem Maximum bei 17 Jahren.

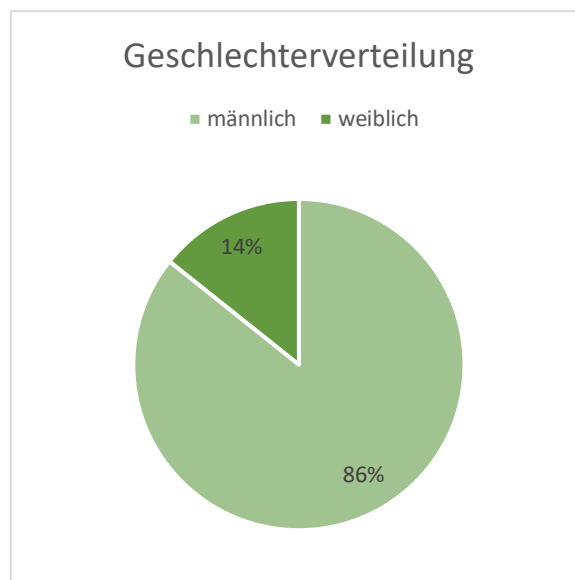


Abbildung 28: Geschlechterverteilung: Enchondrom

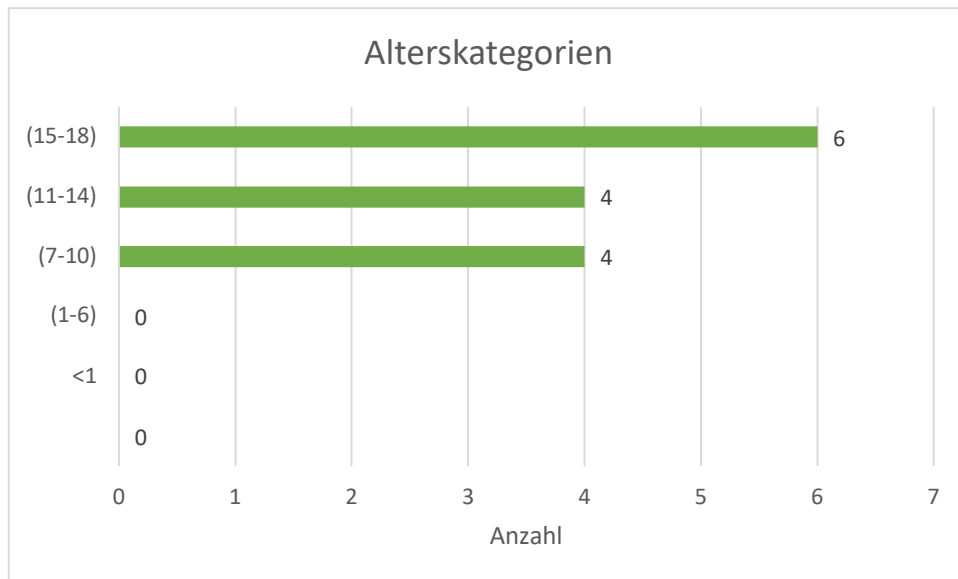


Abbildung 29: Alterskategorien: Enchondrom

Diese darüberstehende Abbildung (Abbildung 29) zeigt die Verteilung der Alterskategorien des Enchondroms. Die meisten Frakturen (acht Fälle) entstanden im Rahmen eines Zusammenstoßes. Am zweithäufigsten ist der Sturz auf ebener Fläche bei drei pathologischen Frakturen. Den häufigsten Unfallort stellen Spiel- und Sportstätten dar, gefolgt vom Wohnbereich und der Bildungseinrichtung.

3.2.5 Primär maligne Knochentumore

Für Patient*innen mit pathologischen Frakturen, welche als Grunderkrankung einen primär malignen Knochentumor hatten, konnten 13 Fälle in der Datenanalyse gefunden werden. Davon waren sieben männlich (54%) und 6 weiblich (46%). Das durchschnittliche Alter zum Zeitpunkt der Frakturdiagnose liegt bei 13 Jahren. Die genaue Verteilung in den jeweiligen Alterskategorien (Abbildung 30), die Unfallmechanismen (Abbildung 31) und die Unfallorte (Abbildung 32) kann man den nachstehenden Abbildungen entnehmen.

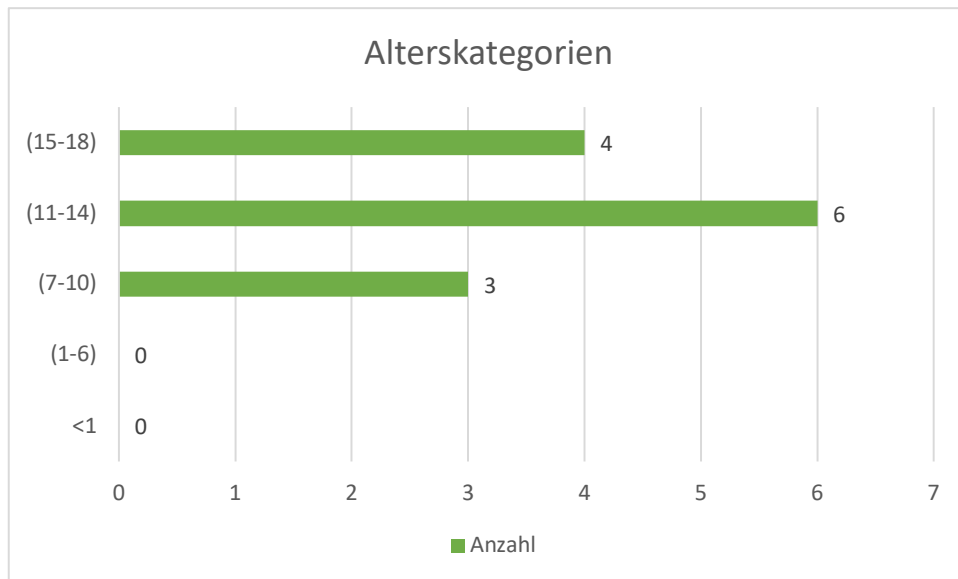


Abbildung 30: Alterskategorien: primär maligne Knochentumore

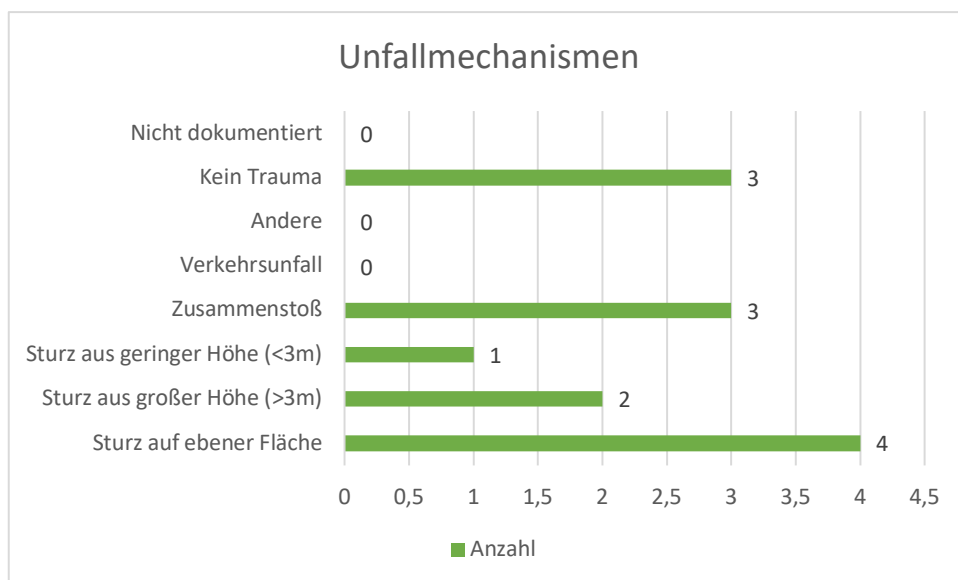


Abbildung 31: Unfallmechanismen: primär maligne Knochentumore

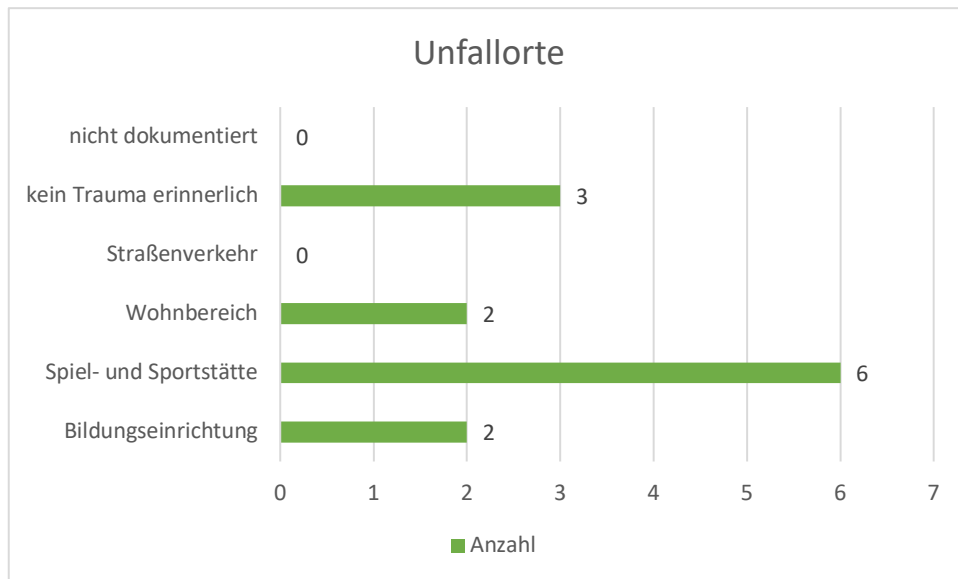


Abbildung 32: Unfallorte: primär maligne Knochentumore

3.2.6 Osteomyelitis

Die Analyse ergab sieben pathologische Frakturen aufgrund einer Osteomyelitis. Davon waren fünf männliche (71%) und 2 weibliche Patient*innen (29%) betroffen. Der Mittelwert des Alters liegt bei 7,9 Jahren. Die genaue Verteilung in den jeweiligen Alterskategorien (Abbildung 33), die Unfallmechanismen (Abbildung 34) und die Unfallorte (Abbildung 35) werden in den nachstehenden Grafiken dargestellt.

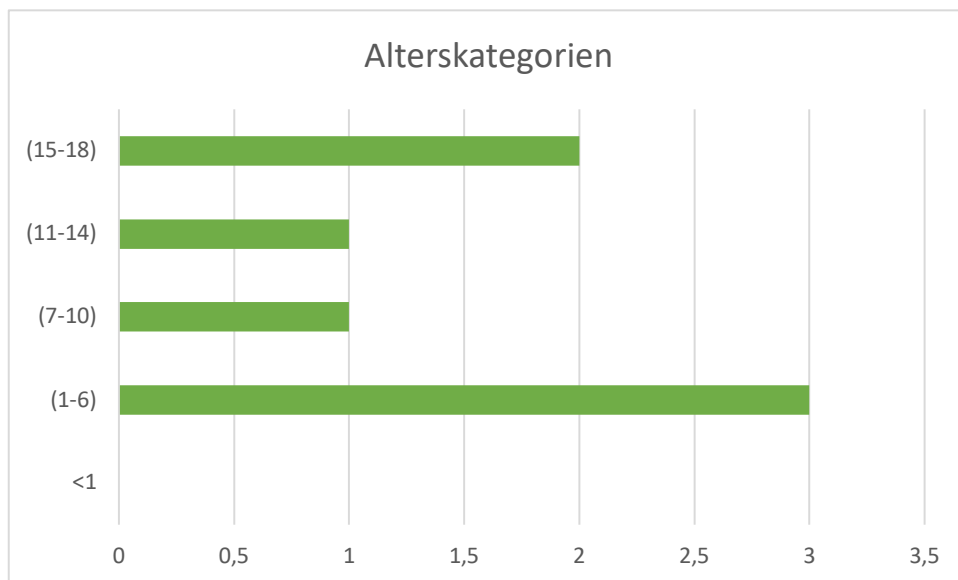


Abbildung 33: Alterskategorien: Osteomyelitis

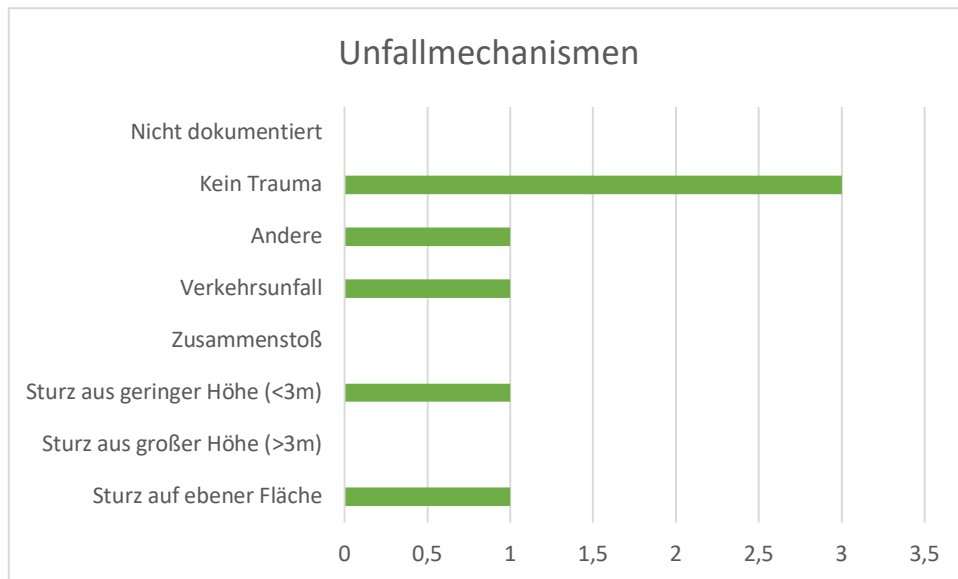


Abbildung 34: Unfallmechanismen: Osteomyelitis

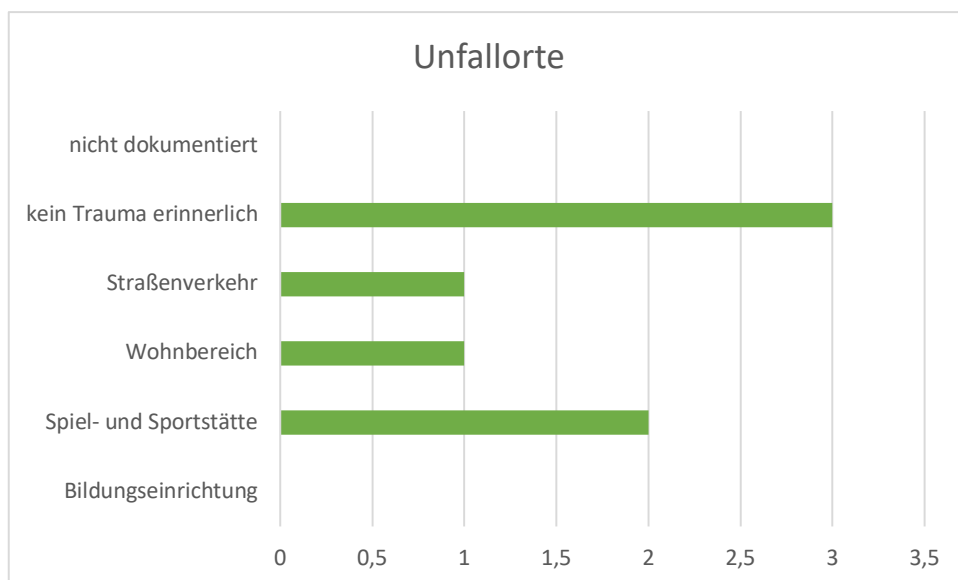


Abbildung 35: Unfallorte: Osteomyelitis

3.2.7 Stressfrakturen

Es zeigten sich fünf Fälle von Patient*innen mit einer Stressfraktur; zwei männliche (40%) und drei weibliche (60%) Patient*innen im Alter von fünf bis zwölf mit einem Mittelwert von 8,6 Jahren. Die Alterskategorien der Fälle waren wie folgt: Ein Vorschulkind, zwei präpubertierende Schulkinder und zwei frühjugendliche Patient*innen. Eine Fraktur entstand durch einen Sturz auf der Ebene, eine weitere war das Resultat eines Sturzes aus unter drei Metern Höhe. Beide Stürze erfolgten in einer Spiel- oder Sportstätte. Bei drei weiteren Stressfrakturen wurde kein Trauma dokumentiert.

3.2.8 Langerhanszellhistiozytose

Die gesamte Datenanalyse ergab drei Fälle mit einer Langerhanszellhistiozytose. Zwei davon waren männliche Patienten und einer war vom weiblichen Geschlecht. Der Mittelwert des Alters zum Zeitpunkt der pathologischen Fraktur lag bei 9,3 Jahren mit einem Minimum bei acht und Maximum bei elf Jahren. Zwei Fälle wurden der Alterskategorie präpubertierende Schulkinder und ein Fall wurde zur Kategorie frühjugendliche Patient*innen zugeordnet. Diese Frakturen waren kein Resultat eines Traumas.

3.2.9 Metastasen

Es gab einen Fall, bei welchem die pathologische Fraktur das Ergebnis eines geschwächten Knochens durch eine Metastase war. Der männliche Patient war ein Säugling im 1. Lebensjahr. Es wurde kein Trauma bemerkt.

3.2.10 Myofibrom

Die Analyse zeigte einen Fall mit einer Patientin im Alter von drei Jahren, welche als Diagnose ein Myofibrom hatte, welches schlussendlich zu einer pathologischen Fraktur geführt hat. Hierbei war anamnestisch kein Trauma erinnlich.

3.3 Alterskategorien

Dieser Abschnitt bildet die Analysen der einzelnen Alterskategorien, wie sie in der Abbildung 3 dargestellt sind, ab. Die Alterskategorien werden in aufsteigender Reihenfolge gelistet und deren Ergebnisse präsentiert.

3.3.1 Säuglinge im ersten Lebensjahr

Drei Fälle der gesamten Untersuchungsgruppe (1,3%) waren im Alter eines Säuglings. Diese Kohorte bestand aus zwei Buben und einem Mädchen. Bei allen war die untere Extremität betroffen, genauer definiert: zweimal der Oberschenkel und einmal der Unterschenkel. Vorgefunden wurde eine Metastase, ein NOF und eine Knochenzyste. In einem Fall war kein Trauma erinnlich. Eine pathologische Fraktur war das Resultat eines Sturzes auf der Ebene in einer Spiel- oder Sportstätte. Die zweite entstand im Rahmen eines Verkehrsunfalls im Straßenverkehr.

3.3.2 Vorschulkinder im Alter vom ersten bis sechsten Lebensjahr

In dieser Alterskategorie konnten 37 von 235 Fällen (16%) detektiert werden. Es waren 14 weibliche (38%) und 23 männliche (62%) Patient*innen. Das durchschnittliche Alter zum Zeitpunkt der Diagnose der pathologischen Fraktur liegt bei 4,3 Jahren. 16 pathologische Frakturen konnten der oberen Extremität zugeordnet werden und 21 der unteren Extremität. Die nachfolgenden Grafiken geben einen Überblick über die betroffenen Lokalisationen (Abbildung 36), die Unfallmechanismen (Abbildung 37) und die Unfallorte (Abbildung 38).

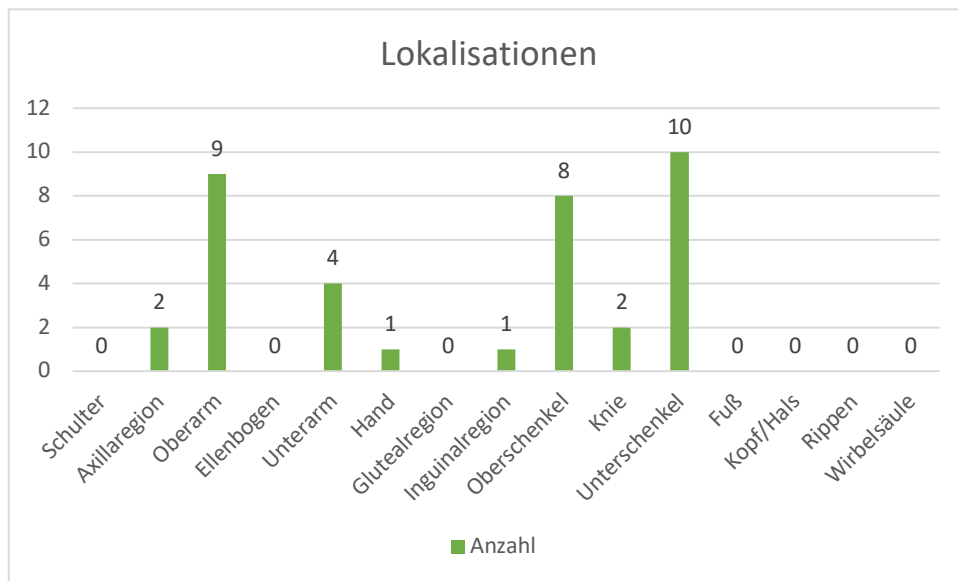


Abbildung 36: Lokalisationen: Vorschulkinder

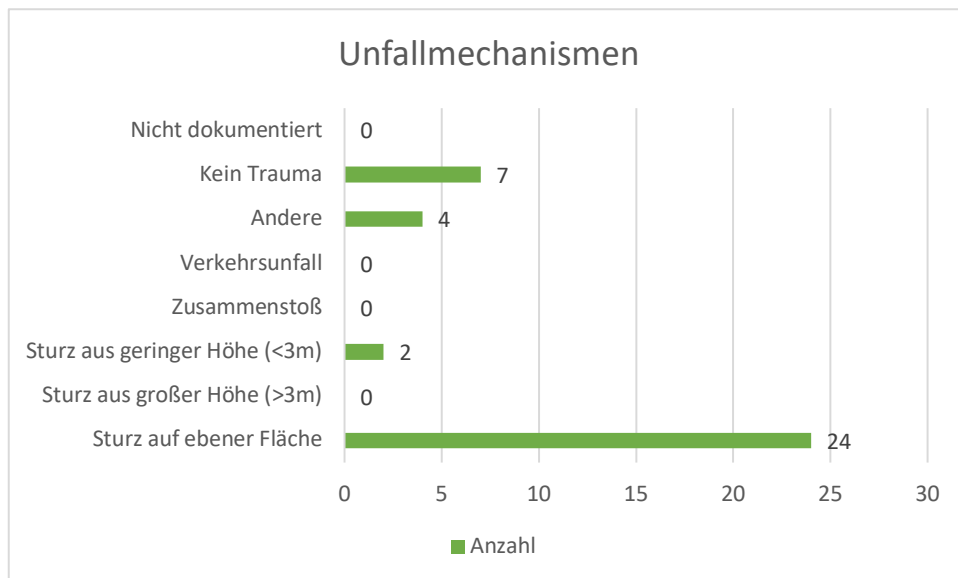


Abbildung 37: Unfallmechanismen: Vorschulkinder

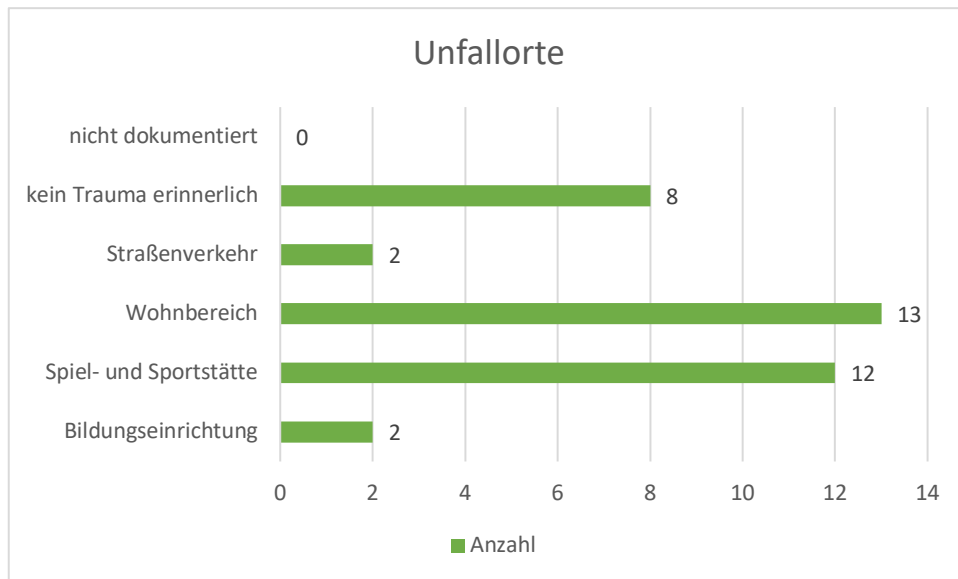


Abbildung 38: Unfallorte: Vorschulkinder

3.3.3 Präpubertierende Schulkinder im Alter vom siebten bis zehnten Lebensjahr

In dieser Alterskategorie wurden 69 Datensätze (29%) gefunden. Hiervon sind 14 (20%) weiblich und 55 (80%) männlich. Der Mittelwert des Alters zum Zeitpunkt der pathologischen Fraktur liegt bei 8,5 Jahren. 35 Fälle wurden der oberen Extremität zugeordnet und 33 Fälle der unteren Extremität, ein Fall betraf den Körperstamm. Die nachfolgenden Grafiken geben einen Überblick über die betroffenen Lokalisationen (Abbildung 39), die Unfallmechanismen (Abbildung 43) und die Unfallorte (Abbildung 44).

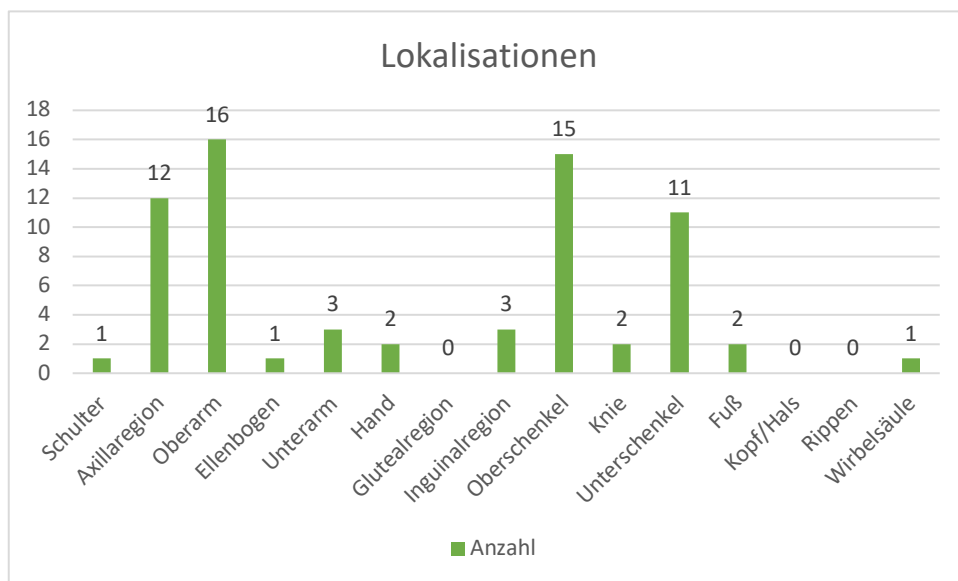


Abbildung 39: Lokalisationen: Präpubertierende Schulkinder

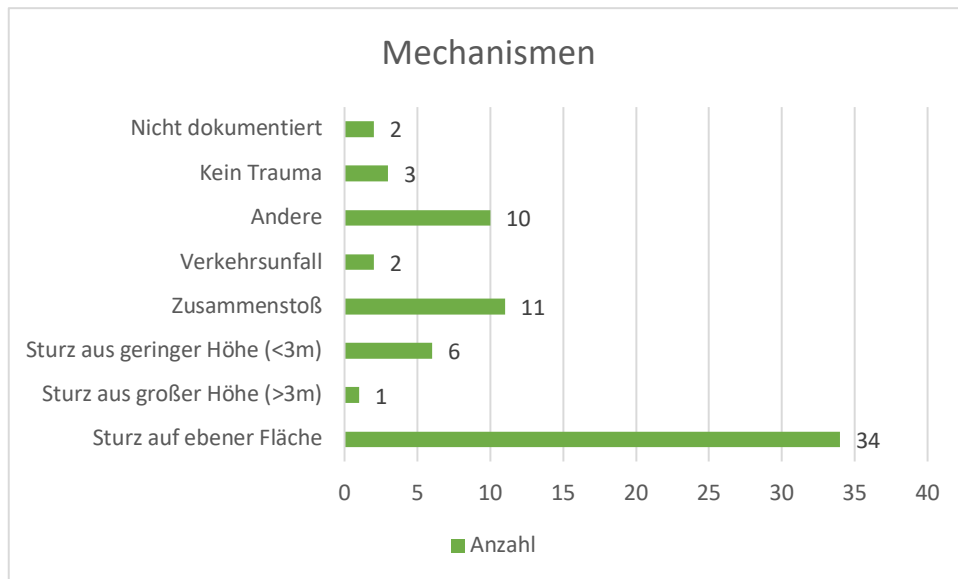


Abbildung 40: Unfallmechanismen: Präpubertierende Schulkinder

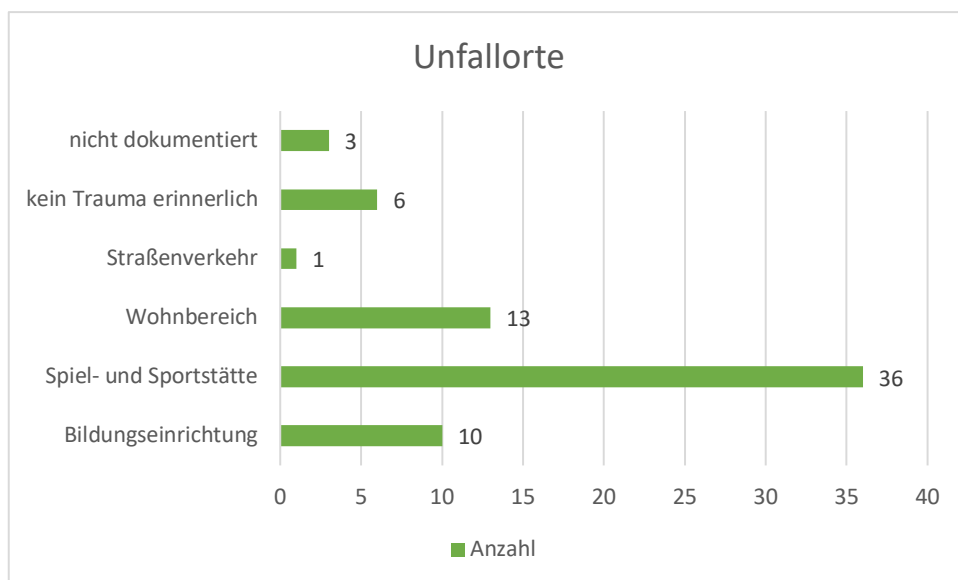


Abbildung 41: Unfallorte: Präpubertierende Schulkinder

3.3.4 Frühjugendliche Patient*innen im Alter vom zehnten bis vierzehnten Lebensjahr

85 Patient*innen (36%) konnten der Alterskategorie der frühjugendlichen Patient*innen zugeordnet werden. 30 (35%) hatten das weibliche Geschlecht und 55 (65%) das männliche. Das durchschnittliche Alter zum Zeitpunkt der pathologischen Fraktur betrug 12,3 Jahre. In dieser Altersgruppe verzeichnete die obere Extremität 51 pathologische Frakturen und die untere Extremität 33. Der Körperstamm war einmal betroffen. Die nachfolgenden Grafiken

geben einen Überblick über die betroffenen Lokalisationen (Abbildung 42), die Unfallmechanismen (Abbildung 43) und die Unfallorte (Abbildung 44).

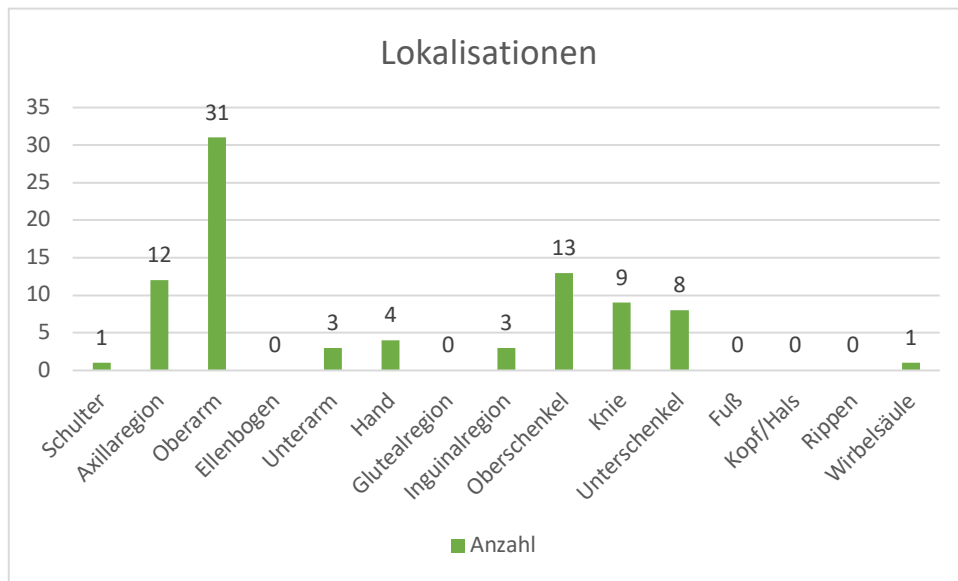


Abbildung 42: Lokalisationen: Frühjugendliche Patient*innen

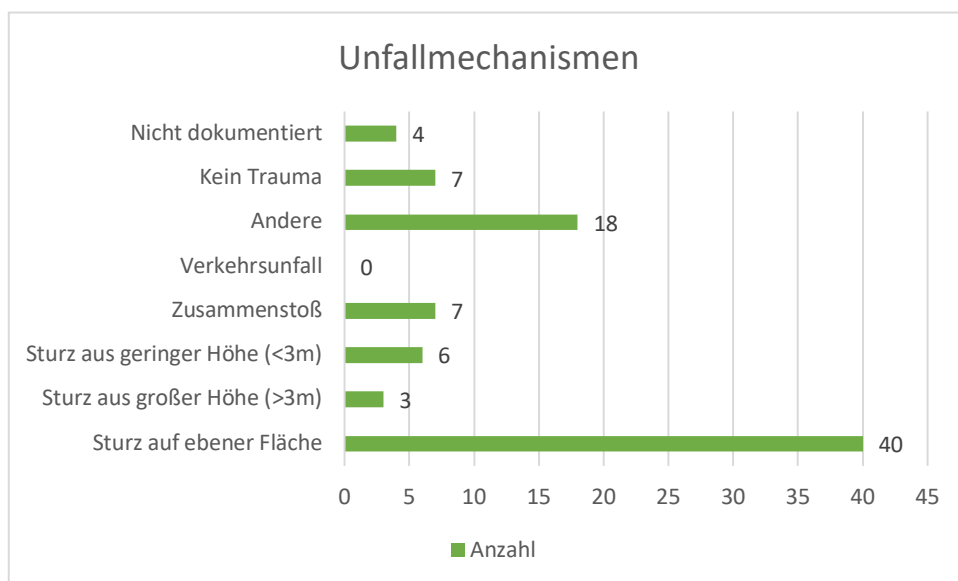


Abbildung 43: Unfallmechanismen: Frühjugendliche Patient*innen

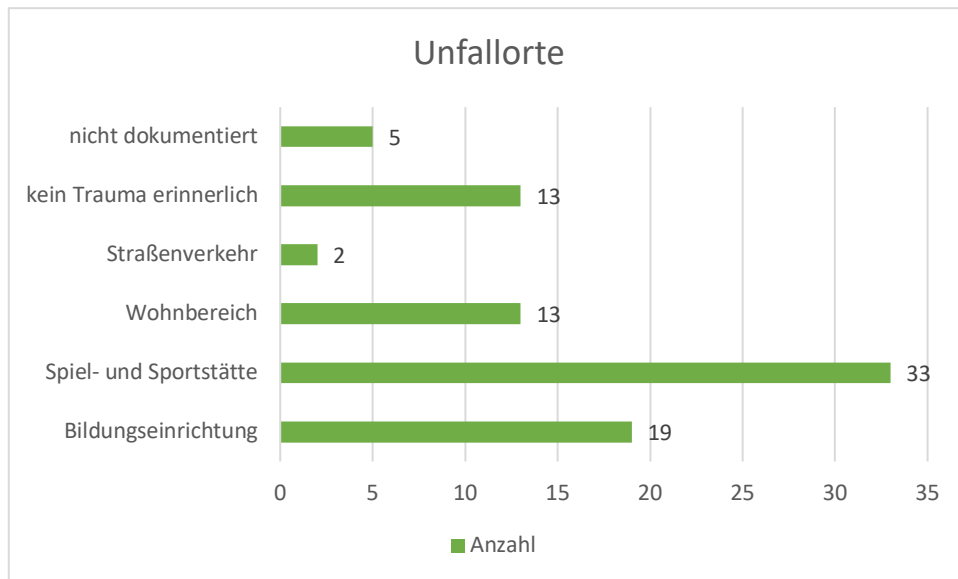


Abbildung 44: Unfallorte: Frühjugendliche Patient*innen

3.3.5 Spätpubertierende Patient*innen im Alter vom fünfzehnten bis achtzehnten Lebensjahr

Die Analyse des gesamten Datensatzes ergab 41 Patient*innen (18%) in dieser Kategorie, wovon 15 Patientinnen weiblich (48%) waren und 26 Patienten männlich (52%). Das Durchschnittsalter zum Frakturzeitpunkt lag bei 15,6 Jahren. In 16 Fällen zeigte sich die pathologische Fraktur auf der oberen Extremität und 24-mal an der unteren Extremität. Ein Fall hat den Körperstamm betroffen. Die nachfolgenden Grafiken geben einen Überblick über die betroffenen Lokalisationen (Abbildung 45), die Unfallmechanismen (Abbildung 46) und die Unfallorte (Abbildung 47).

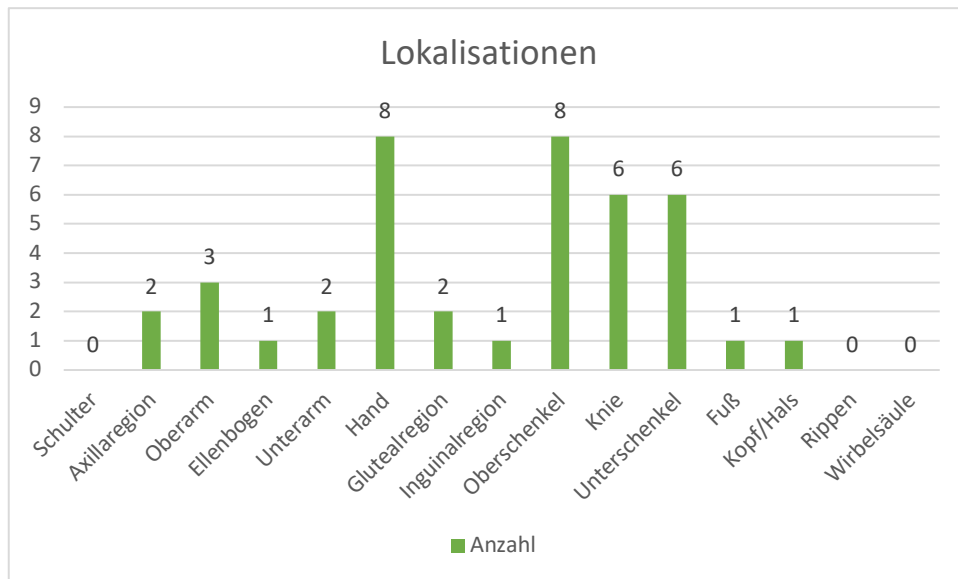


Abbildung 45: Lokalisationen: Spätpubertierende Patient*innen

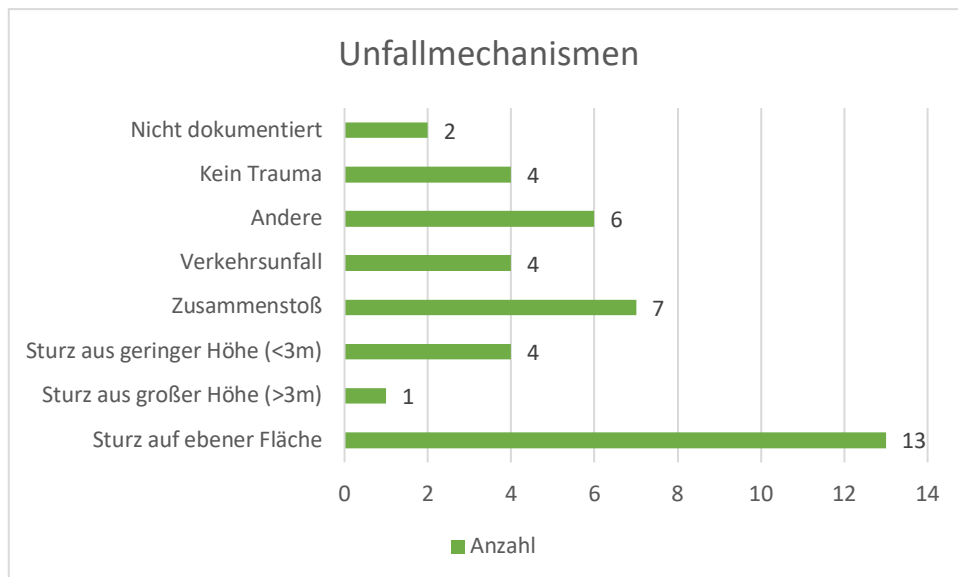


Abbildung 46: Unfallmechanismen: Spätpubertierende Patient*innen

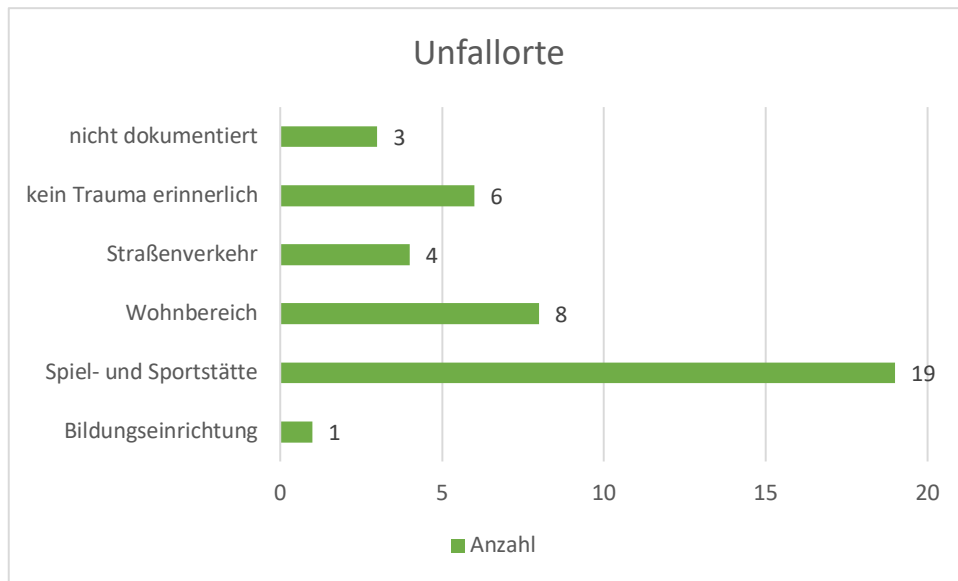


Abbildung 47: Unfallorte: Spätpubertierende Patient*innen

4 Diskussion

Nicht-Pathologische Frakturen im Kindesalter sind häufige Ursachen, welche zu einer Behandlung im Krankenhaus führen. Das Risiko bis zum 16. Lebensjahr eine nicht-pathologische Fraktur zu erleiden, liegt zwischen 30 und 50 Prozent (77). Im Vergleich zu Mädchen haben Buben im Alter von 13 bis 15 Jahren ein doppelt so großes Risiko, sich eine nicht-pathologische Fraktur zuzuziehen (78). Generell haben Buben eine höhere Wahrscheinlichkeit, sich zu verletzen (79,80).

Demgegenüber stehen pathologische Frakturen – epidemiologisch gibt es dazu weniger Daten. Ziel dieser Arbeit war es, die Häufigkeitsverteilung pathologischer Frakturen in den jeweiligen Altersgruppen sowie deren Ursachen zu untersuchen. Anhand dieser Dokumentation, ergänzt durch detaillierte Daten zum Unfallhergang und zum Verletzungsmuster, soll eine Definition für Risikopatient*innen mit pathologischen Frakturen erarbeitet werden.

4.1 Geschlechterverteilung

In diese Studie wurden 235 Patient*innen eingeschlossen. Davon wurden 161 Buben und 74 Mädchen mit einer pathologischen Fraktur identifiziert. Das bedeutet, dass mit einem Anteil von 69%, etwas mehr als zwei Drittel, Buben nahezu doppelt so häufig betroffen waren als Mädchen (31%). Annähernd dasselbe Verhältnis (68% Buben, 32% Mädchen) konnte in der Studie über die Verteilung von nicht-pathologischen Frakturen im Kindesalter von Kaewpornsawan & Sukvanich (81) verifiziert werden (81).

Ein Vergleich mit weiteren Datensätzen legt nahe, dass die beobachtete Geschlechterverteilung unter anderem auf eine erhöhte Risikobereitschaft von Buben zurückzuführen ist. Laut der Studie "Gender Biases in Children's Appraisals of Injury Risk and Other Children's Risk-Taking Behaviors" von Morrongiello & Midgett (80) schätzen Kinder Mädchen grundsätzlich als verletzungsanfälliger ein. Diese Einschätzung stellt jedoch einen Geschlechter-Bias dar, da bereits die in der Studie durchgeführte Befragung eine Tendenz zu dieser Voreingenommenheit erkennen ließ. Tatsächlich zeigen die Zahlen, dass in der Realität mehr Buben als Mädchen Verletzungen erleiden (80).

In einer Analyse von Morrongiello & Dawber (82) wurde vor allem das Verhalten der Mutter in Bezug auf die Kindererziehung beobachtet. Das Ergebnis hiervon zeigte, dass Mütter von Töchtern eine Tendenz haben, Kinder früher vor Gefahren zu warnen und Grenzen strenger und schneller zu setzen als jene Mütter, welche selbst einen Sohn haben. Mütter von Söhnen greifen im Vergleich später bei gefährlichen Situationen ein. Söhne werden eher motiviert, in gewissen Situationen mehr Risiko einzugehen und erleben dafür mehr Lob und Anerkennung in der Gesellschaft als Mädchen (82).

4.2 Altersverteilung

Die Analyse zeigt, dass 85 Fälle der Alterskategorie zwischen dem elften und vierzehnten Lebensjahr zuzuordnen waren. Am zweithäufigsten (69 pathologische Frakturen) konnten im Alter von sieben bis zehn Jahren verzeichnet werden. Nur drei pathologische Frakturen wurden im Säuglingsalter gefunden. Die genaue Altersverteilung und die Verteilung innerhalb der Altersgruppen kann man der Abbildung 3 entnehmen. Das durchschnittliche Alter zum Zeitpunkt der pathologischen Fraktur liegt laut dieser Erhebung bei 10,4 Jahren. Dies konnte auch durch Ortiz & Isler (83) verifiziert werden. Diese Studie gibt das mittlere Alter mit 10 Jahren an, eine pathologische Fraktur zu erleiden (83). Die Patient*innen wurden in verschiedene Alterskategorien eingeteilt. Die meisten Frakturen wurden Patient*innen im Alter von elf bis 14 Jahren zugeordnet. Verglichen mit den bereits angeführten Daten, kann diese Altersspanne durch diese Analyse für pathologische Frakturen enger eingegrenzt werden. In der Single-Center-Studie von Sharma & Lahoti (84) konnte detektiert werden, dass die meisten Traumen im Kindesalter in einem Alter von sechs bis zwölf Jahren geschehen. Hierbei konnte in dieser Altersspanne ebenfalls validiert werden, dass Buben annähernd doppelt so häufig betroffen waren als Mädchen (84).

4.3 Unfallmechanismus

Der Sturz aus einer Höhe unter drei Metern wurde als häufigster Unfallmechanismus beschrieben (84). Im Vergleich dazu, erläutern Kaewpornsawan & Sukvanich (81), dass häufige Mechanismen, die zu einer nicht-pathologischen Fraktur führen, Stürze auf der Ebene, Unfälle im Straßenverkehr und Stürze über drei Metern wären (81). Die Datenanalyse der pathologischen Frakturen in der gesamten Untersuchungsgruppe ergibt, dass mit einem überwiegenden Anteil von 112 von 235 Fällen (48%) die pathologischen Frakturen durch Stürze auf ebener Fläche geschehen sind. 38 Fälle (16%) konnten keinem

Unfallmechanismus zugeordnet werden. 25 Patient*innen (11%) erlitten einen Zusammenstoß. Bei 22 Fällen (9%) konnte kein Trauma festgestellt werden. 18 pathologische Frakturen (8%) resultierten aus Stürzen mit geringer Höhe, sieben Patient*innen (3%) hatten einen Verkehrsunfall, der in einer pathologischen Fraktur gipfelte, und nur drei (1%) frakturierten sich die Knochen durch einen Sturz aus großer Höhe.

4.4 Unfallorte

Das eigene Zuhause ist laut dieser Single-Center-Studie (84) der Ort, an welchem die meisten Unfälle geschehen (84). In dieser Datenerhebung konnte festgehalten werden, dass Spiel- und Sportstätten mit einem überwiegenden Anteil (43%) der Ort des häufigsten Unfallgeschehens für pathologische Frakturen war. Der Wohnbereich liegt mit 20% an zweiter Stelle. In einer Studie des Robert-Koch-Instituts für nicht-pathologische Frakturen wird außerdem verdeutlicht, dass sich die Häufigkeiten in Bezug auf Orte des Unfalls mit den Alterskategorien verschieben. Zu Beginn des Lebens verunfallen Kinder überwiegend zu Hause, danach eher in Sportstätten, bzw. in Bildungseinrichtungen, entsprechend den Aufenthaltszeiträumen im jeweiligen Alter (85). In dieser Analyse konnten im Rahmen dieser Auswertung im Säuglingsalter nur zwei pathologische Frakturen detektiert werden, wovon eine in einer Spiel- oder Sportstätte und die zweite zu Hause erfolgt sind. In den höheren Alterskategorien sind Spiel- und Sportstätten der Ort für die meisten Unfälle und zwischen dem 10. und 15. Lebensjahr konnte eine vermehrte Aufzeichnung an Unfällen in den Bildungseinrichtungen festgestellt werden (Abbildung 44). Der überwiegende Anteil liegt demnach in Spiel- und Sportstätten. Dies kann auch in der Kategorie der spätpubertierenden Patient*innen bestätigt werden. An zweiter Stelle liegt der Wohnbereich. Bildungseinrichtungen liegen an Stelle vier und nehmen dementsprechend einen geringeren Anteil ein (Abbildung 47).

4.5 Lokalisationen der pathologischen Fraktur

In dieser Patient*innenpopulation konnten 50% der Frakturen der oberen Extremität, 49% der unteren Extremität und 1% dem Rumpf zugeordnet werden. Dies unterscheidet sich zu Daten von nicht-pathologischen Frakturen, denn in dieser Studie von Valerio & Gallè (86) konnte ein überwiegender Anteil von 84% im Bereich der oberen Extremität und nur 16% im Bereich der unteren Extremität gefunden werden. Fälle, die den Rumpf betroffen hätten, konnten nicht detektiert werden (86). Die häufigste nicht-pathologische Fraktur im

Kindesalter ist die Fraktur des Unterarms im Bereich des distalen Radius (87). Der Oberarm war bei den Patient*innen mit pathologischen Frakturen dieser Analyse mit 25% am häufigsten betroffen. Demnach folgen mit 46% der Oberschenkel und mit 15% der Unterschenkel (Abbildung 11). Laut Literatur verhalten sich nicht-pathologische Frakturen nach dem Salter-Harris-Prinzip, das heißt, sie kommen metaphysär und epiphysär gehäuft vor (88). Im Bereich der langen Röhrenknochen dominieren nicht-pathologische Frakturen der Metaphyse. Diaphysär gelegene nicht-pathologische Frakturen machen laut Kraus (63) nur ein Viertel aller nicht-pathologischen Frakturfälle im Wachstum aus (63).

In dieser Datenerhebung wurden 87% der pathologischen Frakturen den diaphysären und metaphysären Knochenanteilen zugeordnet. Die Diaphyse war mit 111 von 235 Fällen am häufigsten betroffen. 93 pathologische Frakturen sind im Bereich der Metaphyse gelegen. Die Studie „Pathological fractures in children: Diagnosis and treatment options“ von Canavese & Samba (7) besagt, dass Knochenzysten gehäuft diaphysär und metaphysär liegen (7). Diese Aussage kann durch Frank Traub & Oliver Eberhardt (89) bestätigt werden (89). Das könnte ursächlich für die häufiger vorkommende diaphysäre Frakturlokalisation der pathologischen Frakturen sein, ein Fakt, der sich von normalen Frakturen unterscheidet.

4.6 Entitäten

Der weitaus größte Anteil (52%) der pathologischen Frakturen wurde durch Knochenzysten verursacht. An zweithäufigster Stelle liegt mit 12% das NOF und das wird gefolgt von der Knochendichtereduktion. Die genauen Verteilungen der Entitäten kann man der Abbildung 4 entnehmen. Das NOF konnte in der Studie von Joeris & Slongo (4) mittels Zufallsbefunden im Röntgen bei einem Viertel der untersuchten Kinder entdeckt werden (4). Das NOF ist somit sehr weit verbreitet. Trotzdem führt diese Entität in Relation zu ihrer Häufigkeit nur selten zu einer pathologischen Fraktur, bleibt meist klinisch unentdeckt und zeigt sehr selten Symptome. Dies spiegelt sich auch in dieser Datenanalyse wider. In der Literatur wird die Knochenzyste als häufigste Ursache für eine pathologische Fraktur beschrieben (4,83,90). Dies ist deckungsgleich mit den Ergebnissen dieser Studie.

4.7 Schlussfolgerungen

Der überwiegende Anteil des männlichen Geschlechts wird in der Literatur erklärt durch die erhöhte Aktivität und durch die Bereitschaft, mehr Risiko einzugehen (80). Restriktive

Erziehungsmethoden für Mädchen könnten zu geringerer Risikobereitschaft der Töchter und somit zu weniger Verletzungen und dementsprechend weniger Frakturen führen (82). Somit ist das männliche Geschlecht laut unserer Datenerhebung definitiv ein Risikofaktor, eine pathologische Fraktur diagnostiziert zu bekommen.

Laut der Studie „Pathological fractures in children: Diagnosis and treatment options“, verfasst von Canavase et al. (7) stellen das triviale Trauma, untypische Frakturlokalisation und veränderte Knochenstrukturen in der Bildgebung, jeweils oder in Kombination, ein Warnsignal für das Vorliegen einer pathologischen Fraktur dar (7). Diese Aussage kann auch mit dem Artikel „Strategisches Vorgehen bei pathologischen Frakturen“ von Streitbürger et al. (35) durch zusätzliche Evidenz verifiziert werden (35). Im Rahmen dieser Analyse wurden 48% der pathologischen Frakturen dem Unfallmechanismus „Sturz auf ebener Fläche“ zugeordnet. Dementsprechend kann man in diesen Fällen auch von minimalen Traumata ausgehen. Diagnostisch sollte vor allem im Rahmen der Anamnese der Unfallmechanismus erfragt werden und hier sollte sich im Hinblick auf ein Bagatelltrauma der Verdacht auf eine pathologische Fraktur stellen lassen.

Im Unterschied zu nicht-pathologischen Frakturen kommen pathologische Frakturen gehäuft diaphysär vor. Die Metaphyse war auch mit einem überwiegenden Anteil betroffen. Demnach könnte eine Fraktur im Bereich der Diaphyse hinweisend auf einen pathologischen Ursprung der Fraktur sein.

Zusammenfassend kann hiermit gesagt werden, dass der*die Risikopatient*in mit den Eigenschaften: männlich, nicht alterstypische Knochenabschnitte (diaphysär, statt meta-epiphysär), Frakturlokalisation bevorzugt an den langen Röhrenknochen (Oberarm, Oberschenkel, Unterschenkel,), Bagatelltrauma, Vorliegen einer Grunderkrankung- für eine pathologische Fraktur im Wachstumsalter einen Hinweis gibt. Vor Einleitung einer therapeutischen Intervention ist bei Verdacht auf eine pathologische Fraktur zwingend eine Abklärung maligner Ursachen erforderlich, um neben der durch die Fraktur bereits bestehenden lokalen Tumoraussaat das Risiko einer weiteren Tumorstreuung mit prognostisch ungünstigen Konsequenzen zu vermeiden (7).

4.8 Ausblick und Anregungen für weiterführende Arbeiten

Durch die Analyse einer Vergleichsgruppe mit Frakturen im Wachstumsalter in den gleichen Alterskategorien können potenzielle Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen traumatischen und pathologischen Frakturen identifiziert werden. Diese Ergebnisse könnten die Grundlage für die Entwicklung eines klar definierten diagnostischen Algorithmus beim Verdacht auf eine pathologische Fraktur bilden.

5 Literaturverzeichnis

- 1.SchmittenebecherDiagnostik der Frakturen im Kindesalter. Trauma und Berufskrankheit 2010;12(3):316–322.
- 2.Jackson, Theologis. Early management of pathological fractures in children. Injury 2007;38(2):194–200.
- 3.ErlemannRadiologische Diagnostik von KnochentumorenTeil 2. Radiologe 2001;41(11):1009–1025.
- 4.Joeris, Slongo. Pathologische Frakturen. Praxis der Kinder- und Jugendtraumatologie. 1. Aufl. ed. Heidelberg: Springer; 2011. p. 531–545.
- 5.Pathologische FrakturenIn: Lutz von Laer, Ralf Kraus, editors. Frakturen und Luxationen im Wachstumsalter. 6. überarbeitete und erweiterte Auflage ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2012. p. 465–475.
- 6.Dormans, Pill. Fractures through bone cysts: unicameral bone cysts, aneurysmal bone cysts, fibrous cortical defects, and nonossifying fibromas. Instr Course Lect 2002;51:457–467.
- 7.Canavese, Samba. Pathological fractures in children: Diagnosis and treatment options. Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research 2016;102(1, Supplement):S149–S159.
- 8.De Mattos, Binitie. Pathological fractures in children. Bone Joint Res 2012 Oct 1;1(10):272–280.
- 9.Ciancia, van Rijn. Osteoporosis in children and adolescents: when to suspect and how to diagnose it. Eur J Pediatr 2022;181(7):2549–2561.
- 10.Baghdadi, Nguyen. Nonossifying Fibroma of the Distal Tibia: Predictors of Fracture and Management Algorithm. Journal of Pediatric Orthopaedics 2021;41(8).

11. Bergovec, Scheipl. Tumorähnliche Läsionen im Kindesalter. In: Engelhardt, Raschke, editors. Orthopädie und Unfallchirurgie Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2020. p. 1–7.
12. Bowers, Cohen. The Non-ossifying Fibroma: A Case Report and Review of the Literature. Head and Neck Pathology 2013;7(2):203–210.
13. Betsy, Kupersmith. Metaphyseal Fibrous Defects. JAAOS - Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons 2004;12(2).
14. Patel, Damron. The Role of Surveillance in Predicting Fracture in Pediatric Patients With Incidentally Discovered Nonossifying Fibromas and Fibrous Cortical Defects: Is It Worth It? Journal of Pediatric Orthopaedics 2024;44(6).
15. Bergovec, Friesenbichler. Intermediäre Knochentumoren im Kindesalter. In: Engelhardt, Raschke, editors. Orthopädie und Unfallchirurgie Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2020. p. 1–7.
16. Mascard, Gomez-Brouchet. Bone cysts: Unicameral and aneurysmal bone cyst. Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research 2015;101(1, Supplement):S119–S127.
17. Struhl, Edelson. Solitary (unicameral) bone cyst. The fallen fragment sign revisited. Skeletal Radiol 1989;18(4):261–265.
18. Jordanov. The “rising bubble” sign: a new aid in the diagnosis of unicameral bone cysts. Skeletal Radiol 2009;38(6):597–600.
19. Restrepo, Zahrah. Update on aneurysmal bone cyst: pathophysiology, histology, imaging and treatment. Pediatr Radiol 2022;52(9):1601–1614.
20. Titze, Köhler. Pathomorphologie von Knochensarkomen. Der Onkologe 2013;19(8):620–628.
21. Rogozhin, Bulycheva. Classical osteosarcoma in children and adolescent. Arkh Patol 2015;77(5):68–74.

- 22.Menendez, Epelman. Pediatric Osteosarcoma: Pearls and Pitfalls. *Seminars in Ultrasound, CT and MRI* 2022;43(1):97–114.
- 23.Isakoff, Bielack. Osteosarcoma: Current Treatment and a Collaborative Pathway to Success. *J Clin Oncol* 2015 Sep 20;33(27):3029–3035.
- 24.Matussek Tumoren im Wachstumsalter. *Kinderorthopädie und Kindertraumatologie*; 2013. p. 119–127.
- 25.Ismann, Kampmann. Ewing-Sarkom. In: Lehnert, Schellong, editors. *DGIM Innere Medizin: herausgegeben von Hendrik Lehnert Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg*; 2015. p. 1–7.
- 26.Zöllner, Amatruda. Ewing Sarcoma-Diagnosis, Treatment, Clinical Challenges and Future Perspectives. *J Clin Med* 2021 Apr 14;10(8):1685. doi: 10.3390/jcm10081685.
- 27.Sapiai, Che Jalil. Pathological Fracture of Distal Femur in a Child: What is the Culprit? *Çocuk enfeksiyon dergisi* 2023 Sep 1;17(3):201–204.
- 28.Formosa, Christou. Bone fragility and osteoporosis in children and young adults. *J Endocrinol Invest* 2024;47(2):285–298.
- 29.Cannalire, Biasucci. Osteoporosis and Bone Fragility in Children: Diagnostic and Treatment Strategies. *Journal of Clinical Medicine* 2024;13(16).
- 30.Bachrach, Hastie. Bone Mineral Acquisition in Healthy Asian, Hispanic, Black, and Caucasian Youth: A Longitudinal Study¹. *J Clin Endocrinol Metab* 1999;84(12):4702–4712.
- 31.Baxter-Jones, Faulkner. Bone mineral accrual from 8 to 30 years of age: An estimation of peak bone mass. *J Bone Miner Res* 2011;26(8):1729–1739.
- 32.Costantini, Mäkitie. Early-Onset Osteoporosis: Rare Monogenic Forms Elucidate the Complexity of Disease Pathogenesis Beyond Type I Collagen. *J Bone Miner Res* 2022 Sep;37(9):1623–1641.

- 33.Sillence, Senn. Genetic heterogeneity in osteogenesis imperfecta. J Med Genet 1979 Apr;16(2):101–116.
- 34.Formosa, Bergen. A Roadmap to Gene Discoveries and Novel Therapies in Monogenic Low and High Bone Mass Disorders. Frontiers in Endocrinology 2021;12.
- 35.Streitbürger, Nottrott. Strategisches Vorgehen bei pathologischen Frakturen. Unfallchirurg 2021;124(9):687–694.
- 36.Fernandez, Eberhardt. Prinzipien der Frakturbehandlung beim Kind. OP-Journal 2018 Nov;34(3):201–206.
- 37.Jansson, Reinhardt. Knochenschmerzen. Monatsschrift Kinderheilkunde 2009;157(7):645–646.
- 38.MatussekKindertraumatologie. In: Grifka, Kuster, editors. Orthopädie und Unfallchirurgie: Für Praxis, Klinik und Facharztprüfung Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2011. p. 1025–1034.
- 39.FreyschmidtDiagnostic strategies in bone tumors and tumor-like lesions. Radiologe 1998;38(4):287–300.
- 40.Peitz, Schönau. Knochenschmerzen aus endokrinologischer Sicht. Monatsschrift Kinderheilkunde 2009;157:661–663.
- 41.LehnerNotfallmaßnahmen am Kind. Praxis der Kinder- und Jugendtraumatologie 2011:9–20.
- 42.MoritzSonographic Fracture Diagnosis in Children and Adolescents. RöFo : Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen und der bildgebende Verfahren 2023 Sep;195(9):790–796.
- 43.Richard Derby, Anthony Beutler. General principles of acute fracture management. 2022; . Accessed 03.04, 2025.

- 44.Claudia BierwirthBildgebende Diagnostik bei Frakturen im Kindes- und Jungendalter. 2023; . Accessed 06.05, 2025.
- 45.StraussPediatric interventional radiography equipment: safety considerations. *Pediatr Radiol* 2006;36(2):126–135.
- 46.Vogl, Marzi. Bildgebung Kindertraumatologie – diagnostische Besonderheiten. *OP-Journal* 2018 Nov;34(3):208–218.
- 47.ClarkeNormal bone anatomy and physiology. *Clin J Am Soc Nephrol* 2008 Nov;3 Suppl 3(Suppl 3):131.
- 48.Allgemeine HistologieIn: Lüllmann-Rauch, Asan, editors. Taschenlehrbuch Histologie. 5., vollständig überarbeitete Auflage. ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2015. p. 103–342.
- 49.Ackermann O, Fischer C, Grosser K, Hauenstein C, Kluge S, Moritz JD, Berthold D, Tesch C, von Kaisenberg CAWMF 085-003 S2e Leitlinie, Fraktursonografie. 2023 01.02.
- 50.Christoph Röder, Johannes Mayr, Annelie M. WeinbergFrakturen der Klavikula beim Kind. Accessed 03.05, 2025.
- 51.Wang, Linden. Sonographic Evaluation of Fractures in Children. *Journal of Diagnostic Medical Sonography* 2017;33:875647931668889.
- 52.Henrichs, Streitbürger. Die Biopsie von Knochentumoren. *OP-Journal* 2010 Dec;26(3):172–176.
- 53.Körber, Paquet. Bildgebende Diagnostik kindlicher Knochenerkrankungen. *Radiologie up2date* 2019 Mar;19(1):19–36.
- 54.Abel Al, Abou Chaar. “Whoops” fixation of proximal humerus pathological fracture ended with forequarter amputation – Case report. *International Journal of Surgery Case Reports* 2020;75:53–60.
- 55.Bruns, Yazigee. Biopische Sicherung muskuloskelettaler Tumoren. *Der Onkologe* 2006;12(2):119–127.

56. Platzer Allgemeine Anatomie. In: Platzer Taschenatlas Anatomie. 11., überarb. Aufl. ed. Stuttgart [u.a.]: Thieme; 2013. p. 2–34.
57. Wang, Ren. Osteocytes but not osteoblasts directly build mineralized bone structures. *Int J Biol Sci* 2021 Jun 11;17(10):2430–2448.
58. Streicher Johannes, Pretterklieber Michael. Bewegungsapparat. In: Waldeyer, Anderhuber, editors. Waldeyer - Anatomie des Menschen. 19., vollst. überarb. und aktualisierte Aufl. ed. Berlin [u.a.]: De Gruyter; 2012. p. 95–426.
59. Gewebe In: Faller, Schünke, editors. Der Körper des Menschen. 16., überarb. Aufl. ed. Stuttgart [u.a.]: Thieme; 2012. p. 66–111.
60. Hormone, Reproduktion In: Silbernagl, Despopoulos, editors. Taschenatlas Physiologie. 9., vollständig überarbeitete Auflage ed. Stuttgart ; New York: Georg Thieme Verlag; 2018. p. 294–342.
61. Sommerfeldt Gelenknahe Frakturen der oberen Extremität im Kindes- und Jugendalter. *Trauma und Berufskrankheit* 2013;15(1):59–66.
62. Atanelov, Bentley. Greenstick Fracture. StatPearls Treasure Island (FL): StatPearls Publishing LLC; 2025.
63. Kraus Klassifikation von Frakturen im Wachstumsalter. *OP-Journal* 2010 Oct;26(2):70–76.
64. Täger, Hussmann. Epiphysäre und epiphysennahe Frakturen bei Kindern. *Unfallchirurg* 2009;112(2):185–201.
65. Täger, Podleska. Epiphysennahe Frakturen bei Kindern. *Unfallchirurg* 2007;110(10):867–883.
66. Cottrell, Turner. The Biology of Bone and Ligament Healing. *Foot Ankle Clin* 2016;21(4):739–761.

67. Benjamin Frei Frakturen im Wachstumsalter. Was ist daran besonders? Pädiatrie 02/2021 2021 30. April.
68. Dimitriou, Jones. Bone regeneration: current concepts and future directions. BMC Med 2011 May 31;9:66–66.
69. Kobayashi, Takahashi. Trabecular minimodeling in human iliac bone. Bone 2003 Feb;32(2):163–169.
70. Pschyrembel Redaktion Kallus [Knochen]. 2023; . Accessed 22.01, 2024.
71. Bizzoca, Vicenti. Assessment of fracture healing in orthopaedic trauma. Injury 2023;54:S46–S52.
72. Phillips Overview of the fracture healing cascade. Injury 2005;36(3, Supplement):S5–S7.
73. Haffner-Luntzer, Ignatius. Biologische Einflussfaktoren auf die Knochenbruchheilung. OP-Journal 2019 Apr;35(1):5–10.
74. Aumüller, Aust. Duale Reihe Anatomie. 5., korrigierte Auflage. ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2020.
75. Dijkman, Sprague. When is a fracture healed? Radiographic and clinical criteria revisited. J Orthop Trauma 2010 Mar;24 Suppl 1:76.
76. Kraus, Švehlík. The epidemiology of knee injuries in children and adolescents. Arch Orthop Trauma Surg 2012 Jun;132(6):773–779.
77. Kraus Epidemiologie. Kindertraumatologie 2009:31–35.
78. Brudvik, Hove. Childhood Fractures in Bergen, Norway: Identifying High-Risk Groups and Activities. Journal of Pediatric Orthopaedics 2003;23(5).
79. Moon, Harvey. Ethnic and geographic variations in the epidemiology of childhood fractures in the United Kingdom. Bone 2016;85:9–14.

- 80.Morrongiello, Midgett. Gender Biases in Children's Appraisals of Injury Risk and Other Children's Risk-Taking Behaviors. *J Exp Child Psychol* 2000;77(4):317–336.
- 81.Kaewpornawan, Sukvanich. Prevalence and patterns of fractures in children. *J Med Assoc Thai* 2014 Sep;97 Suppl 9:116.
- 82.Morrongiello, Dawber. Mothers' Responses to Sons and Daughters Engaging in Injury-Risk Behaviors on a Playground: Implications for Sex Differences in Injury Rates. *J Exp Child Psychol* 2000;76(2):89–103.
- 83.Ortiz, Isler. Pathologic fractures in children. *Clin Orthop Relat Res* 2005 Mar;(432):116-26. doi(432):116–126.
- 84.Sharma, Lahoti. Epidemiological trends of pediatric trauma: A single-center study of 791 patients. *J Indian Assoc Pediatr Surg* 2011 Jul;16(3):88–92.
- 85.Saß, Poethko-Müller. Das Unfallgeschehen im Kindes- und Jugendalter – Aktuelle Prävalenzen, Determinanten und Zeitvergleich. *Bundesgesundheitsbl* 2014 Jul;57(7):789–797.
- 86.Valerio, Gallè. Pattern of fractures across pediatric age groups: analysis of individual and lifestyle factors. *BMC Public Health* 2010;10(1):656.
- 87.Sundermann, Mörs. Unterarmfrakturen und distale Radiusfrakturen bei Kindern. *OP-Journal* 2018 Nov;34(3):290–301.
- 88.Sophie Merckaert und Nicolas LutzKlassifikation für Frakturen im Kindesalter. *Orthopädie und Unfallchirurgie* 2022 11.01.
- 89.Frank Traub, Oliver Eberhardt. Solitary bone cyst: a comparison of treatment options with special reference to their long-term outcome. *BMC Musculoskeletal Disorders* 2016 Apr 14;17(1):162.
- 90.Akinyoola, Orimolade. Pathologic fractures of long bones in Nigerian children. *J Child Orthop* 2008 Dec;2(6):475–479