

AUS DEM LEHRSTUHL
FÜR CHIRURGIE
PROF. DR. MED. HANS J. SCHLITT
DER FAKULTÄT FÜR MEDIZIN
DER UNIVERSITÄT REGENSBURG

**Das Kompartmentsyndrom nach Unterschenkelfraktur bei Kindern und
Jugendlichen – Retrospektive Analyse eines monozentrischen Kollektivs**

Inaugural – Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin

der Fakultät für Medizin
der Universität Regensburg

vorgelegt von
Elena Kuhn

2024

AUS DEM LEHRSTUHL
FÜR CHIRURGIE
PROF. DR. MED. HANS J. SCHLITT
DER FAKULTÄT FÜR MEDIZIN
DER UNIVERSITÄT REGENSBURG

**Das Kompartmentsyndrom nach Unterschenkelfraktur bei Kindern und
Jugendlichen – Retrospektive Analyse eines monozentrischen Kollektivs**

Inaugural – Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin

der Fakultät für Medizin
der Universität Regensburg

vorgelegt von
Elena Kuhn

2024

Dekan: Prof. Dr. Dirk Hellwig

1. Berichterstatter: Prof. Dr. Hans J. Schlitt

2. Berichterstatter: Prof. Dr. Dr. Volker Alt

Tag der mündlichen Prüfung: 17. Oktober 2024

Inhalt

Abkürzungsverzeichnis.....	5
1 Einleitung	7
2 Zusammenfassung.....	8
3 Theoretische Grundlagen.....	11
3.1 Unterschenkelfrakturen	11
3.1.1 Anatomie Unterschenkel.....	11
3.1.2 Frakturarten	14
3.1.3 Therapieoptionen	15
3.1.3.1 konservativ	15
3.1.3.2 operativ.....	16
3.2 Das Kompartmentsyndrom.....	17
3.2.1 Definition Kompartmentsyndrom.....	17
3.2.2 Kompartmentsyndromarten	17
3.2.3 Ätiologie	18
3.2.4 Pathophysiologie.....	19
3.2.5 Anzeichen Kompartmentsyndrom	22
3.2.5.1 klinische Symptome	22
3.2.5.2 intrakompartimenteller Druck.....	24
3.2.5.3 Analgetika.....	25
3.2.6 Therapie.....	26
3.2.7 Komplikationen Kompartmentsyndrom	29
3.2.8 Outcome	30
3.3 Zielsetzung Doktorarbeit.....	30
4 Patienten und Methodik	32
4.1 Patienten	32
4.1.1 Einschlusskriterien	33
4.1.2 Ausschlusskriterien	34
4.1.3 Variablen.....	34
4.2 Methodik.....	36
4.2.1 Studiendesign	36
4.2.2 zeitlicher Ablauf.....	36
4.2.2.1 retrospektive Datenerhebung	36
4.2.2.2 Nachuntersuchung	37

5	Ergebnisse	39
6	Diskussion.....	47
	Abbildungsverzeichnis	58
	Literaturregister	59
	Danksagung	

Abkürzungsverzeichnis

A.	Arteria
AO-PCCF	AO pediatric comprehensive classification of long bone fractures
BMI	body mass index (kg/m^2)
bzw.	beziehungsweise
CPP	kapillärer Perfusionsdruck
CRPS	complex regional pain syndrome
Dig.	Digitum
Dr.	Doktor
ESIN	elastisch stabile intramedulläre Nagelung
et al.	et alia/et alii/et aliae
etc.	et cetera
ICD-10-GM	International statistische Klassifikation der Krankheiten und verwandter Gesundheitsprobleme, 10. Revision, German Modification
ICP	intrakompartimenteller Druck
kg	Kilogramm
LBF	lokaler Blutfluss
m	Meter
M	Mittelwert
M.	Musculus
MAP	mittlerer arterieller Druck
Mm	Musculi
mmHg	Millimeter Quecksilbersäule
MVA	motor vehicle accident
N.	Nervus
OP	Operation
o.n.A.	ohne nähere Angabe
Pa	lokaler arterieller Druck
PACS	pediatric acute compartment syndrome

pDMS	periphere Durchblutung, Motorik und Sensibilität
PKW	Personenkraftwagen
Prof.	Professor
Pv	lokaler venöser Druck
R	lokaler Gefäßwiderstand
SD	Standardabweichung
WHO	Weltgesundheitsorganisation
z.B.	zum Beispiel

1 Einleitung

Richard von Volkmann, ein deutscher Chirurg, veröffentlichte 1881 im Zentralblatt für Chirurgie [1] erstmals einen Artikel, in dem er seine Beobachtungen hinsichtlich zu fest angelegter Verbände, die Paresen und Kontrakturen als Folge hatten, beschrieb. Nicht, wie zuvor angenommen, ist dies die Folge einer nervalen Kompression, sondern vielmehr als Zellzerfall des myogenen Gewebes sowie dessen Folgereaktion zu werten [1]. In neun Punkten erläuterte Richard von Volkmann seine Beobachtungen, prägte den Begriff der ischämischen Muskellähmungen und -kontrakturen und schuf damit die Grundlage für weitere Arbeiten, welche das heutige Bild des Kompartmentsyndroms definieren.

Angelehnt an Volkmann's Beobachtungen veröffentlichte Frederick A. Matsen in den 80er und 90er Jahren diverse Arbeiten, durch die er den modernen Begriff des Kompartmentsyndroms prägte.

„Frederick A. Matsen beschreibt es treffend in seinem Buch „Compartmental Syndroms“ aus dem Jahre 1980: ‘*A compartmental syndrome is a condition in which increased pressure within a limited space compromises the circulation and function of the tissues within that space.*’“ [2]

Dabei entstehen Kompartmentsyndrome sowohl bei Erwachsenen als auch bei Kindern häufig im Bereich der unteren Extremität [2,3]. Im Speziellen durch Traumata [4] des Unterschenkels entsteht hier eine gefährdete Lokalisation [5,6]. Bei Kindern gehören Tibiafrakturen zu den am dritthäufigsten vorliegenden Frakturen langer Röhrenknochen [7].

Aufgrund dieser Häufung der Kompartmentsyndrome nach Frakturen lokalisiert im Bereich des Unterschenkels, welche in der Literatur vielfach beschrieben wird, entstand die Frage nach der Inzidenz in unserem entsprechenden Patientenkollektiv. Aufgrund in diesem Kollektiv nicht aufgetretener Fälle eines Kompartmentsyndroms entstand die Frage nach Gründen beziehungsweise Faktoren hierfür.

2 Zusammenfassung

Das Auftreten eines Kompartmentsyndroms ist selten, kann allerdings bei Nichterkennen oder zu spätem Handeln zu irreversiblen Folgeschäden führen. Dabei kann, überall wo es zu einer Begrenzung eines Volumens oder fehlender Möglichkeit der Ausdehnung kommt, ein Kompartmentsyndrom entstehen. Besonders im Unterschenkel tritt dies, gerade im Zusammenhang mit einer stattgehabten Fraktur, gehäuft auf.

In der pädiatrischen Traumatologie stellen Unterschenkelfrakturen eine häufige Frakturart dar. Zudem zeigte sich in verschiedenen veröffentlichten Arbeiten zu diesem Thema eine Häufung der Inzidenz des Kompartmentsyndroms nach Unterschenkelfraktur.

Eine Betrachtung der Fälle, welche in mehreren Jahren in der Klinik St. Hedwig mit einer Unterschenkelfraktur behandelt wurden, zeigte, dass bei keinem dieser Patienten zusätzlich ein Kompartmentsyndrom diagnostiziert wurde. Hierbei stellt sich die Frage, welche Faktoren dazu geführt haben könnten, dass sich in diesen Fällen kein Kompartmentsyndrom entwickelt hat, beziehungsweise ob es möglich ist, aus diesen Faktoren auf eine größere Gruppe Rückschlüsse zu ziehen.

Diese Arbeit ist eine retrospektive Qualitätssicherungsstudie des Ist- und Sollzustands. Dabei wurden insgesamt 75 Fälle (74 Patienten, 76 Frakturen) betrachtet, die aufgrund einer Unterschenkelfraktur in der Klinik St. Hedwig in Regensburg zwischen dem 01.01.2012 und 30.06.2018 behandelt wurden. Die retrospektive Datenanalyse wurde durch eine Nachuntersuchung an insgesamt 41 der 74 Patienten ergänzt, welche ebenfalls in der Klinik St. Hedwig in Regensburg durchgeführt wurde.

Dabei wurde zunächst die Frage behandelt, ob korrekterweise tatsächlich kein Kompartmentsyndrom nach Unterschenkelfraktur vorlag.

Die Folgen eines nicht erkannten und nicht behandelten Kompartmentsyndroms würden zu schweren Funktionseinschränkungen und Sensibilitätsausfällen führen und müssten in der Nachtuntersuchung detektierbar sein.

Im Rahmen der Nachuntersuchungen gab es einen Patienten mit leichten motorischen Einschränkungen sowie einen Patienten, der im Verlauf ein CRPS entwickelt hat. Bei keinem dieser Patienten stellte sich das zu erwartende Vollbild ein. Die durch die

retrospektive Datenerhebung gewonnenen Informationen zeigten, dass es in einigen Fällen Symptome gab, die in Zusammenhang mit einem Kompartmentsyndrom stehen können. Diese lagen allerdings lediglich vereinzelt vor und konnten, bis auf einen Fall, welcher nicht nachuntersucht wurde, nachfolgend als unauffälliges Outcome gezeigt werden. Auch hinsichtlich eines steigenden Analgetikabedarfs beleuchtete Fälle boten entweder keine entsprechende Symptomkonstellation oder hatten eine unauffällige Nachuntersuchung. In zwei Fällen konnte ein stattgehabtes Kompartmentsyndrom, aufgrund auffälliger Symptomkonstellation und fehlender Nachuntersuchung, nicht ausgeschlossen werden.

Anschließend wurde das Patientenkollektiv aus Literatur, welche sich mit einer ähnlichen Fragestellung beschäftigen, zum Vergleich herangezogen. Daraus wurden mögliche Faktoren erarbeitet, welche Einfluss auf die Entstehung eines Kompartmentsyndroms haben könnten.

Dabei lag das Durchschnittsalter der in dieser Arbeit betrachteten Gruppe unter dem aus vergleichbaren Arbeiten, in denen ein Kompartmentsyndrom auftrat. Zudem lag das Patientengewicht entsprechend niedriger, eine Aussage hinsichtlich BMI ließ sich jedoch nicht treffen.

Der größte Teil der Frakturen in dieser Arbeit war die Folge eines Sportunfalls oder eines Sturzes. Sogenannte Hochrasanztraumata beziehungsweise motorisierte Unfälle, welche oft in Zusammenhang mit der Entstehung eines Kompartmentsyndrom kommen, traten deutlich weniger häufig auf. Das und die häufig erfolgte konservative Versorgung zeigt ein überwiegendes Vorliegen von weniger komplexen Frakturen mit wenig Weichteilschädigung.

Des Weiteren wird in dieser Arbeit diskutiert, inwiefern es zu Schwierigkeiten bei der richtigen Diagnosestellung eines Kompartmentsyndroms in Kliniken kommen kann.

Eine korrekte und zeitnahe Diagnosestellung ist wichtig, wird allerdings aufgrund der besonderen Patientengruppe sowie nicht immer eindeutigen Klinik erschwert und kann zu Fehleinschätzungen führen. Neben gut geschultem Personal und Behandlung in fachkundigen Zentren kann ein Versuch der Objektivierbarkeit mittels festgelegter Analgetikagrenzen zu einem Detektionsmittel werden. Intrakompartimentelle Druckmessungen sind, gerade bei pädiatrischen Patienten, wenig toleriert und größtenteils nur in Narkose durchführbar. Zudem beziehen sich Cut-off-Werte des

intrakompartimentellen Drucks für die Indikation zur Dermatofasziotomie häufig auf Erwachsene und lassen sich so nicht direkt auf pädiatrische Patienten übertragen.

Abschließend werden die Nachteile und Limitationen dieser Arbeit beleuchtet sowie mögliche Verbesserungen für zukünftige Arbeiten zu diesem Thema dargestellt.

3 Theoretische Grundlagen

3.1 Unterschenkelfrakturen

Die Prävalenz für Kinder und Jugendliche im mitteleuropäischen Raum, eine Fraktur der langen Röhrenknochen zu erleiden, beträgt jährlich 21-25 pro 1000 Kinder. So geht man davon aus, dass sich 15-45 Prozent der Kinder und Jugendlichen, bis zum Schluss der Wachstumsfugen, eine Fraktur zuziehen [8].

Von diesen Frakturen der langen Röhrenknochen befinden sich circa 15-20 Prozent im Bereich des Unterschenkels [8–10]. Am häufigsten ist dabei der Unterschenkelschaft betroffen [8,9], seltener der distale beziehungsweise proximale Anteil [9]. Betrachtet man die Frakturen genauer, zeigt sich, dass in mehr als zwei Dritteln der Fälle eine isolierte Tibiaschaftfraktur, ohne Beteiligung der Fibula, vorliegt [10–12].

Grundsätzlich ist die Frakturinzidenz, so auch bei Unterschenkelfrakturen, bei Jungen höher als bei Mädchen [10,13]. Das Verhältnis der Häufigkeit variiert zwischen 1,2:1 und 1,6:1 [8,9,14].

3.1.1 Anatomie Unterschenkel

Tibia und Fibula sind die führenden, knöchernen Strukturen des Unterschenkels, verbunden durch die bindegewebige Membrana interossea.

Die einzelnen umgebenden Muskeln, jedoch auch ganze Muskelgruppen, werden im Körper durch eine derbe, bindegewebige Hülle umgeben. Diese Muskelfaszien, die knöchernen Anteile des Unterschenkels sowie die Strukturen verbindenden Membranen unterteilen das Weichteilgewebe in vier Logen (Abbildung 1) [15,16]. Diese werden als anteriores, laterales, tiefes posteriores, sowie oberflächlich posteriores Kompartiment bezeichnet [17].

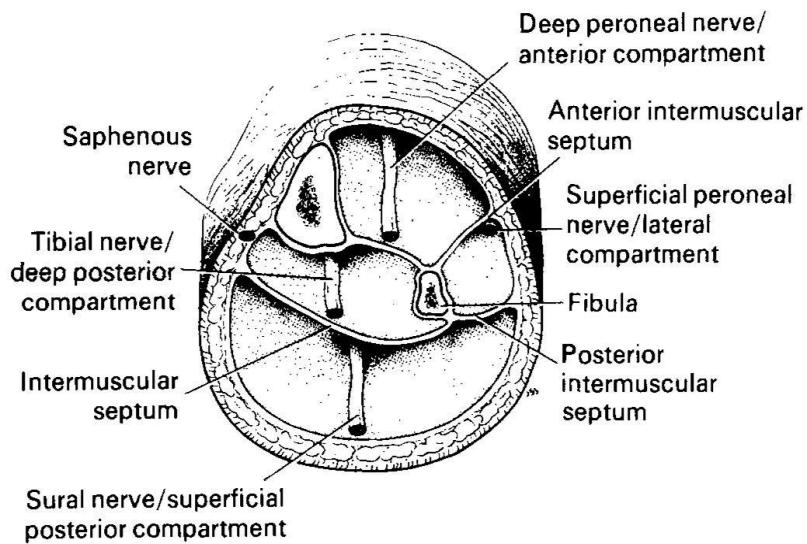


Abbildung 1: Querschnitt des Unterschenkels, Höhe Übergang mittleres zu distalem Drittel, Darstellung der vier Kompartimente und entsprechender Nerven [16]

Die osteofaszialen Köcher führen dabei sowohl Muskeln als auch Nerven und Blutgefäße, welche entsprechend die Unterschenkel beziehungsweise Füße versorgen (Abbildung 2). Durch die osteofaziale Begrenzung wird die Effizienz der enthaltenen muskulären Strukturen unterstützt [16].

Structure	Compartments			
	Anterior	Lateral	Superficial Posterior	Deep Posterior
Muscles	Tibialis anterior muscle	Peroneus longus	Gastrocnemius	Tibialis posterior
	Extensor hallucis longus	Peroneus brevis	Soleus	Flexor hallucis longus
	Extensor digitorum longus		Plantaris	Flexor digitorum longus
Vessels	Anterior tibial artery			Peroneal artery
	Anterior tibial veins			Peroneal vein
Nerves	Deep peroneal nerve	Common peroneal nerve		Posterior tibial artery
				Posterior tibial vein
				Tibial nerve

Abbildung 2: Kompartimente des Unterschenkels [17]

Aus der A. poplitea geht zunächst die A. tibialis anterior hervor, welche durch die Membrana interossea cruris zieht und primär für die Versorgung des anterioren

Unterschenkels zuständig ist [18]. In diesem Durchtrittsbereich in der Membrana interossea ist die Anfälligkeit für mögliche Gefäßverletzungen und die Entstehung eines Kompartmentsyndroms besonders hoch [19]. Die A. tibialis anterior läuft, unter anderem zusammen mit dem N. peroneus profundus, nach distal, um schließlich als A. dorsalis pedis den Fußrücken zu versorgen [18].

Im Weiteren wird die A. poplitea zur A. tibialis posterior. Nach Abgang der A. fibularis verläuft die A. tibialis posterior weiter in der tiefen Flexorenloge, versorgt sowohl diese als auch Tibia und anliegendes Periost. Hier anastomosieren zudem Äste der A. tibialis anterior und posterior für ein periostales Gefäßnetz [19]. Weiter distal zieht die A. tibialis posterior gemeinsam mit dem N. tibialis hinter dem Malleolus medialis zur Fußsohle [18].

Die A. fibularis verläuft ebenfalls in der tiefen Flexorenloge entlang der Fibularückseite bis hin zum Malleolus lateralis, wo sie schließlich endet. Auf ihrem Weg versorgt sie unter anderem sowohl die Muskeln der Flexoren- als auch der Fibularisgruppe [18].

Die nervale Versorgung des Unterschenkels erfolgt zum einen über den N. peroneus (N. fibularis). Dieser gibt auf Höhe der Kniekehle zwei Hautäste ab, welche später als N. cutaneus surae und N. suralis für die sensible Versorgung des lateralen und hinteren Unterschenkels bis zum lateralen Fußrand zuständig sind [20,21].

Der N. peroneus communis legt sich direkt um den Fibulakopf, bevor er sich in einen tiefen und oberflächlichen Nerv teilt, wobei er dadurch besonders bei Frakturen in dieser Lokalisation schädigungsanfällig ist [19,21]. Während der N. peroneus profundus in der Extensorenmuskelloge verläuft und diese motorisch sowie die Haut im ersten Zehenzwischenraum sensibel innerviert, liegt der N. peroneus superficialis lateral zwischen den versorgenden Fibularmuskeln und innerviert schließlich den Fußrücken sensibel [20,21].

Als zweiter wichtiger Nerv zieht der N. tibialis ebenfalls an der Unterschenkelrückseite nach distal. Dieser verläuft gemeinsam mit den Unterschenkelflexoren, um dann gemeinsam mit der A. tibialis posterior zur Fußsohle zu laufen. Motorisch wird die gesamte Beugermuskulatur sowie die plantare Fußmuskulatur innerviert, sensibel als zweiter Teil des N. suralis, entsprechende Innervationsgebiete, sowie die plantare Fußfläche [20,21].

3.1.2 Frakturarten

Bezieht man sich auf das in Kliniken bestehende Kodierungssystem (ICD-10-GM) [22], wird zunächst nach betroffenem Segment der Tibia (proximal, distal, Schaft) unterschieden. Danach erfolgt die Unterteilung, ob eine isolierte Fraktur (lediglich Tibia) oder eine Beteiligung der Fibula vorliegt. Vorliegende Weichteilschäden oder offene Wunden werden zusätzlich verschlüsselt.

Eine genauere Klassifikation der Frakturen im Kindesalter kann auch nach der AO-PCCF (Pediatric comprehensive classification of long bone fractures) erfolgen. Die Unterteilung erfolgt zunächst ebenfalls nach dem betroffenen Segment und ob Tibia und/oder Fibula betroffen sind. Später wird zudem das Subsegment beschrieben (epiphysär, metaphysär, diaphysär) [23]. Als letzte Unterscheidung erfolgt die Einordnung der vorliegenden Morphologie.

Dabei spielt bei Verletzungen der Wachstumsfuge die Einteilung nach Aitken eine Rolle. Hier erfolgt eine Unterteilung nach Epiphysenlösung ohne (Aitken 0) oder mit epiphysärem/metaphysärem/epi-metaphysärem Keil (Aitken I-III), zuletzt gibt es noch die Kompression der Epiphyse (Aitken IV) [24]. Zudem unterscheidet man Tillaux-, Triplane- Eminentia-intercondylaris-Frakturen sowie Flake-Frakturen [23].

Die metaphysären Frakturen unterteilen sich nach inkomplett (Wulst-, Spiral- und Grünholzfrakturen), komplett sowie Avulsionsfrakturen [23].

Die Schaftfrakturen werden nach Grünholzfrakturen, Querfrakturen (einfach/komplex) und Schräg-/Spiralfrakturen (einfach/komplex) unterschieden. Zusätzliche Frakturformen stellen diaphysär die Bowing-, Toddler-, Monteggia- und Galeazzi-Läsionen dar [23].

Eine Unterschenkelschaftfraktur stellt eine kombinierte Tibia- und Fibulaschaftfraktur dar. Dies tritt lediglich in 30% der Fälle von Frakturen des Unterschenkels auf. Deutlich häufiger liegt eine isolierte Tibiaschaftfraktur vor (70%) [11,12]. Zu überwiegenden Teilen (80%) handelt es sich bei Schaftfrakturen um Schräg- oder Spiralfrakturen. Allerdings sind altersbedingte Veränderungen des Verletzungsmusters festzustellen. So finden sich bei Kleinkindern zumeist nicht dislozierte Torsions-/Spiralfrakturen, während ab dem 6. Lebensjahr vermehrt Querfrakturen, entweder isoliert oder in Kombination mit Torsions-/Spiralfrakturen, auftreten. Bei Adoleszenten lassen sich wiederum vermehrt Schräg- und Spiralfrakturen, vor allem im distalen Schaftdrittel des

Unterschenkels, finden [25]. In den meisten Fällen liegt eine geschlossene Fraktur vor [25].

3.1.3 Therapieoptionen

Grundsätzlich gibt es die Möglichkeit, eine Unterschenkelfraktur konservativ oder operativ zu versorgen. Die Entscheidung für eine bestimmte Therapieform erfolgt nach verschiedenen Gesichtspunkten.

Der Großteil der Frakturen kann konservativ behandelt werden, beispielsweise bei Gothe fors et al. (2023) in knapp 80% der Fälle mit Unterschenkelfraktur [9]. Die konservative Therapie beinhaltet eine zeitnahe Versorgung mittels Gipsverbandes sowie vorherige Reposition der Fraktur im Falle einer Dislokation [9,10,19,26].

Liegt eine instabile Fraktur (z.B. Querfraktur, kombinierte Femur- und Tibiafraktur etc.) oder Polytraumata vor, ist eine operative Versorgung indiziert. Auch bei dislozierten Frakturen, welche mit einer Rotation oder Verkürzung einhergehen, neurovaskulären Schädigungen, offenen Frakturen oder dem Vorliegen eines Kompartmentsyndroms ist eine konservative Therapie nicht mehr ausreichend [11,12,27].

Operative Möglichkeiten einer Schaftfraktur stellen die elastisch-stabile intramedulläre Nagelosteosynthese (ESIN), die Plattenosteosynthese, die Marknagelosteosynthese sowie die Versorgung mittels Fixateur externe, nach individueller Abwägung, dar [9,10,12]. Im Anschluss erfolgt in einigen Fällen eine zusätzliche Anlage eines Gipsverbandes [10].

Liegt eine epiphysäre oder metaphysäre Fraktur vor, kommen als operative Optionen neben dem Fixateur externe die Kirschner-Draht-Osteosynthese sowie die Schraubenosteosynthese hinzu [9].

In den seltenen Fällen einer offenen Fraktur, muss, ungeachtet des gewählten Osteosyntheseverfahrens, ein umfangreiches Wunddébridement erfolgen. Zudem sollte auf eine hinreichende antibiotische Prophylaxe sowie einen ausreichenden Tetanusschutz geachtet werden [10,25].

3.1.3.1 konservativ

In den meisten Fällen erfolgt eine konservative Behandlung mittels Gipsverbandes [9,10,19]. Diese Frakturen sind oftmals nicht oder lediglich leicht disloziert. Im Falle einer Dislokation soll eine vorherige geschlossene Reposition zur Risikominimierung

möglicher Folgeweichteilschäden erfolgen [28]. Eine radiologische Kontrolle sollte im Verlauf nach Gipsanlage erfolgen [26].

Wichtig ist hierbei im Anschluss an die konservative Versorgung, dass sowohl Veränderungen des neurovaskulären Status sowie eine Zunahme der Weichteilschwellung im Hinblick auf ein mögliches Kompartmentsyndrom regelmäßig überwacht werden [10].

Der Gips wird für 4-6 Wochen belassen werden, vorausgesetzt es liegt keine weitere Verletzung oder eine deutliche Weichteilschwellung vor. Im Verlauf kann auf einen Unterschenkelgipsverband gefolgt von Gewichtsbelastung für weitere 4-6 Wochen umgestellt werden [10,19].

3.1.3.2 operativ

Deutlich seltener ist eine operative Versorgung erforderlich [19]. Welche Technik hierbei gewählt wird, hängt von verschiedenen Faktoren wie Alter, Gewicht und Größe des Patienten ab. Zudem spielen Art und Lokalisation der Fraktur eine wichtige Rolle [19,29].

Ein Fixateur externe wird vor allem bei schweren Trümmerfrakturen sowie denen, die mit einem schweren Weichteilschaden oder großer Instabilität einhergehen, gewählt [10]. Sowohl Anbringung und korrekte Einstellung als auch die spätere Versorgung gestaltet sich einfach. Dies bietet einen großen Vorteil speziell bei Kindern mit Multisystemerkrankungen sowie Kopfverletzungen [10,19].

Die Kirschner-Draht-Osteosynthese ist bei stabilen Frakturen geeignet. Hierdurch wird die Länge und Ausrichtung des Knochens erhalten. Ein zusätzlicher Gips kann bei mehrfragmentären und schiefen Frakturen erforderlich werden [10,19].

Eine elastische stabile intramedulläre Nagelung (ESIN) kann sowohl bei stabilen als auch instabilen Frakturen genutzt werden. Diese werden durch den proximalen und distalen Teil der Metaphyse eingeführt und unter der Haut abgeschnitten. Dadurch ist eine komplikationslose zusätzliche Anlage eines Gipsverbandes, falls erforderlich, möglich. Die ESIN wird bevorzugt bei Kindern <10 Jahre und <50 kg eingesetzt [10,12,19].

Die Marknagelosteosynthese kann bei nahezu allen Tibiaschaftfrakturen eingesetzt werden, kommt allerdings nur in Fällen mit geschlossener Wachstumsfuge in Frage

und ist daher eher bei adoleszenten Patienten eine Option, da es sonst aufgrund der Anlagetechnik zur Schädigung der Tibiaphyse kommen kann [12,19].

Die Plattenosteosynthese wird nur in besonderen Fällen genutzt [11]. Durch die zur stabilen Versorgung benötigte Fläche entsteht ein deutlich größeres Zugangstrauma verglichen mit anderen Therapiemöglichkeiten. Somit wird diese Therapieform gewählt, wenn keine der anderen operativen Optionen möglich ist [19].

Auch die Schraubenosteosynthese wird eher selten genutzt [12].

3.2 Das Kompartmentsyndrom

3.2.1 Definition Kompartmentsyndrom

Das Kompartmentsyndrom ist definiert durch eine Drucksteigerung in einem begrenzten Raum, beispielsweise einem fasziell beziehungsweise weichteilumschlossenen Kompartiment, welche somit den Druck der umliegenden, versorgenden Gefäße übersteigt. Die daraus resultierende verringerte Gewebeperfusion führt zu einem Zustand der Minderversorgung. Darauf folgen anfangs funktionelle Einschränkungen sowie reversible und später irreversible Muskel-, Organ-, oder auch Nervenschäden [2,30,31].

3.2.2 Kompartmentsyndromarten

Grundsätzlich lässt sich das Kompartmentsyndrom auf vielerlei Weise unterteilen. Die Lokalisation sorgt für eine anatomische Unterscheidung unter anderem nach

- intrakranalem
- intraartikulärem
- intraabdominalem sowie
- lokalem muskulären Kompartmentsyndrom mit Gefahr der ischämischen Kontraktur [32].

Bei letztgenanntem differenziert man zwischen akutem, „oft als Folge eines Traumas oder eines Gefäßverschlusses“ [2] entstandenen, und chronischem, durch funktionelle Überlastung hervorgerufenen, Kompartmentsyndrom [2].

Bei dieser Arbeit und daher auch im Folgenden wird speziell auf akute, lokale, muskuläre Kompartmentsyndrome Bezug genommen.

Die Betrachtung des klinischen Schweregrades lässt eine Einteilung in ein drohendes und manifestes Kompartmentsyndrom zu. Zusätzlich zu den anfänglichen starken Schmerzen und druckempfindlicher, harter, ballonierter Muskulatur finden sich beim manifesten Kompartmentsyndrom motorische Ausfälle und Sensibilitätsstörungen [28,32].

Dabei wird der Großteil der muskulären Kompartmentsyndrome im Bereich der Unterschenkel und Unterarme diagnostiziert. Aufgrund der hier ausgeprägten faszienbedingten Enge liegt hier eine besondere Prädisposition vor [2].

Bei Kompartmentsyndromen des Unterschenkels im Speziellen ist dabei am häufigsten eine Betroffenheit des anterioren Kompartiments (Tibialis-anterior-Loge) beschrieben. Auch das laterale Kompartiment (Peroneusloge) kann beteiligt sein. Deutlich seltener betroffen beziehungsweise diagnostiziert wird das Kompartmentsyndrom in einer der posterioren Logen [6].

3.2.3 Ätiologie

Meist erfolgt die Unterscheidung der Ursache nach intrinsischen und extrinsischen Gesichtspunkten.

Intrinsischen Ursachen folgt ein Anstieg des Kompartmentinhaltes [30]. Oft führen durch Frakturen verursachte Blutungen zu einem Druckanstieg, auch durch Muskelfaserrisse und Distorsionen hervorgerufene Gewebsschwellungen spielen eine Rolle. Durch postischämische Schwellungen hervorgerufene Ödeme, beispielsweise nach Arterienverletzungen, Gefäßverschlüsse oder eine vorliegende lokale Hypotonie können ebenfalls Ursachen sein [15,28,33]. Auch das Implantieren von Fremdkörpern bei Frakturversorgung sowie die erforderliche intraoperative mechanische Manipulation können Auslöser sein [15]. Entzündliche Prozesse, wie Myositiden, stellen eine nichttraumatische Ursache dar [28].

Extrinsische Ursachen führen wiederum zu einer Zunahme des, auf das betroffene Kompartiment, ausgeübten Drucks durch Begrenzung des Kompartmentvolumens [30,33]. Dies ist beispielsweise bei zu engen Gipsen, Schienen oder Verbänden der Fall, welche eine möglicherweise nötige Ausbreitung des Kompartmentinhaltes verhindern [28,33]. Durch einengende Fasziennähte wird eine Komprimierung des

Rauminhaltes hervorgerufen [15]. Weitere Gründe, welche eine Einschränkung des Kompartimentvolumens hervorrufen, sind schwere Verbrennungen beziehungsweise Erfrierungen. Auch die falsche Extremitätenlagerung, v.a. bei narkotisierten und bewusstlosen Patienten, stellt eine Ursache dar [28].

Durch die eingeschränkte Elastizität der umfassenden Faszien kommt es anfangs zu einem langsamen, später jedoch exponentiellen Anstieg des intrafaszialen Drucks in der betroffenen Muskelloge [2,17,34].

3.2.4 Pathophysiologie

Es gibt verschiedene Ansätze zur pathophysiologischen Erklärung des Kompartmentsyndroms, wobei die arteriovenöse Gradienten-Theorie nach aktuellem Kenntnisstand wohl die am häufigsten vertretene ist [2].

Durch oben genannte intrinsische und extrinsische Faktoren entsteht die bereits beschriebene Druckerhöhung im Kompartiment, womit der lokale arteriovenöse Gradient sinkt [2]. Dadurch nimmt der Blutfluss ab. Dabei ist wichtig, dass der Blutfluss nicht allein vom Druck im Kompartiment, sondern vielmehr von intrakompartimentellen Druck und Blutdruck abhängt [34].

Dazu stellt Feigl 1974 folgende Formel auf:

$$LBF = Pa - Pv/R$$

LBF = lokaler Blutfluss

Pa = lokaler arterieller Druck

Pv = lokaler venöser Druck

R = lokaler Gefäßwiderstand

Wenn nun der Druck im umliegenden Gewebe steigt, erhöht sich auch der im venösen System und senkt damit den arteriovenösen Gradienten. Dieser ist für eine intakte Gewebeperfusion zuständig, welche dadurch gestört wird. Durch die hervorgerufene Ischämie sind sowohl die Muskulatur, Nerven, als auch Gefäßwände betroffen und rufen eine schlaffe Lähmung sowie eine ischämische Kontraktur hervor [15,35,36].

Zwar kann der Körper durch Anpassung des lokalen Gefäßwiderstands den Gradienten wiederherstellen, jedoch ist diese Form der Autoregulation nur begrenzt

möglich. Wenn sich der Gradient zu weit senkt, ist kein Ausgleich mehr möglich und das Gewebe wird inadäquat versorgt [34].

Die Minderversorgung führt zu einer Schädigung der Endothelzell- und Kapillarpermeabilität [31]. Der vermehrte Flüssigkeitsaustritt ins Interstitium fördert die Ödembildung. Zum Ausgleich des nun verschobenen Gradienten zwischen hydrostatischem und osmotischem Druck zwischen Interstitium und Kapillaren wandern Plasmaproteine durch die geschädigten Kapillarwände und führen zu einem Sistieren der Flüssigkeitsresorption (Abbildung 3) [6]. Diese Faktoren führen dazu, dass das Ödem die Diffusionsstrecke des Sauerstoffes verlängert [2,32].

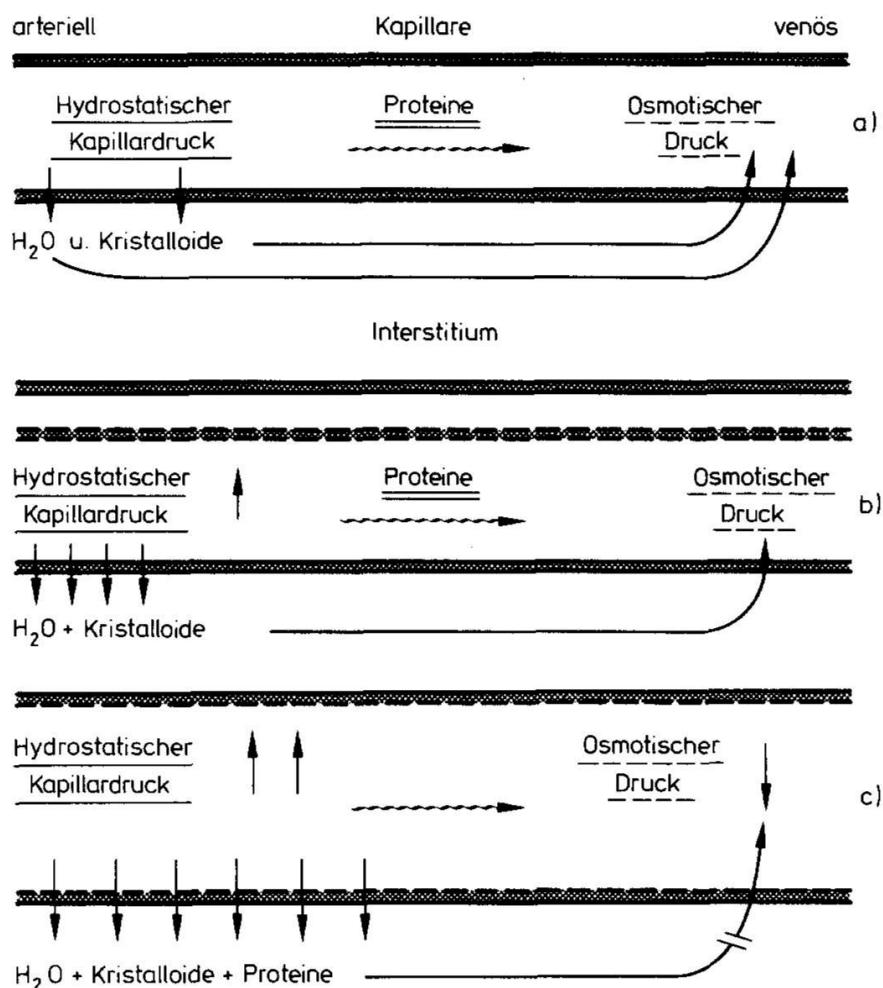


Abbildung 3: Auswirkung veränderter Druckverhältnisse in den Kapillaren [6]

Der Körper reagiert auf die Hypoxie mit einem Anstieg der anaeroben Glykolyse, welche nach und nach zu einer Laktatazidose führt. Die Azidose setzt wiederum die Permeabilität der Gefäße hoch und unterstützt damit den ganzen Mechanismus des Flüssigkeitsaustritts weiter, ein sogenannter Circulus vitiosus (Abbildung 4) [2,6,28,32].

Ein weiterer Punkt ist der eingeschränkte Abtransport toxisch-metabolischer Stoffwechselprodukte durch das venöse und lymphatische System. Die Ansammlung von im Muskel entstandenen Myoglobin führt nach einiger Zeit zum sogenannten „Crush-Syndrom“ [32].

Der durch die Ischämie hervorgerufene Zellzerfall der Myozyten führt zur Freisetzung und Aktivierung abbauender Enzyme, welche die Muskel- und Gewebsnekrosen agravieren und somit zu einer weiteren Schädigung führen [36].

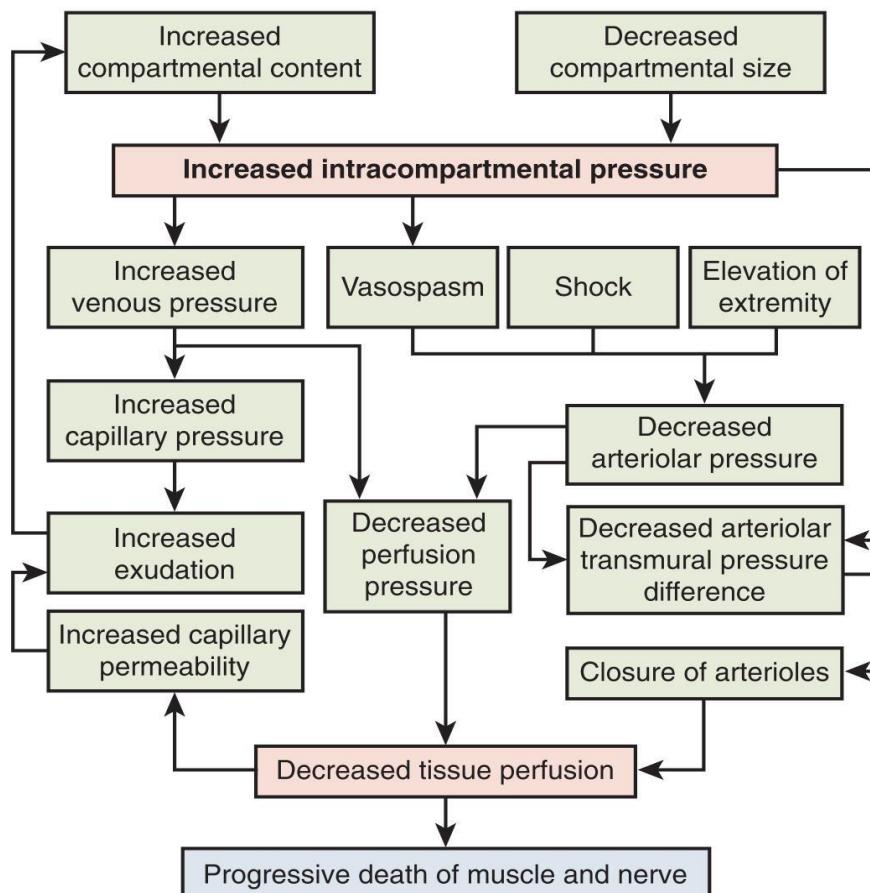


Abbildung 4: Pathophysiologie Kompartmentsyndrom, angelehnt an Holden C: The pathology and prevention of Volkmann's ischaemic contracture. J Bone Joint Surg Br 61(3):296– 300, 1979; und Matsen FA, 3rd: Compartmental syndrome: a unified concept. Clin Orthop Relat Res 113:8–14, 1975 [36]

3.2.5 Anzeichen Kompartmentsyndrom

Für die Diagnosestellung eines Kompartmentsyndroms ist die vorherrschende Klinik entscheidend, anderweitige diagnostische Möglichkeiten sind sekundär [5,37,38].

Dabei kann man unterscheiden zwischen Symptomen, welche zu einem frühen Zeitpunkt, im Rahmen eines drohenden Kompartmentsyndroms, auftreten. Im Gegensatz dazu sind Symptome in späteren Stadien, bei Vorliegen eines manifesten Kompartmentsyndroms.

Mit Auftreten der ersten Symptome eines Kompartmentsyndroms dauert es wenige Stunden, bis irreversible neurologische Schäden verursacht und Muskelnekrosen im betroffenen Gebiet vorliegen können, welche bis hin zur Amputation führen [31]. Mit Beginn der Ischämie treten erste Gewebsschäden meist nach circa vier Stunden auf, von einer Irreversibilität ist nach ungefähr acht Stunden Ischämiezeit auszugehen [4]. Aus diesem Grund gilt es, schnellstmöglich den Verdacht auf erhöhten Gewebedruck abzuklären und rasch die passende Therapie einzuleiten [31].

In Bezug auf pädiatrische Patienten kann die Diagnosestellung eines Kompartmentsyndroms erschwert sein. Sowohl Anamnese als auch Äußerungen hinsichtlich bestimmter Symptome können je nach Alter eingeschränkt sein. Durch eine teils verminderte Kooperativität der pädiatrischen Patienten liegen erschwerte Untersuchungsbedingungen vor, welche alternative Herangehensweisen erfordern [3–5]. Gerade bei pädiatrischen Patienten kann die Zunahme des Analgetikabedarfs einen wichtigen Hinweis geben und somit eine Diagnosestellung erleichtern [27,30,39]. Neben der klinischen Beurteilung gibt es zudem die invasive Möglichkeit der intrakompartimentellen Druckmessung [19].

3.2.5.1 klinische Symptome

Am häufigsten wird im Zuge der Diagnosestellung eines drohenden oder manifesten akuten Kompartmentsyndroms von einer klinischen Konstellation gesprochen, welche sechs Symptome beziehungsweise klinische Auffälligkeiten beinhaltet. Dabei müssen nicht alle Punkte vorhanden sein, sie treten vielmehr je nach Patienten in unterschiedlicher Ausprägung auf [3,39].

Die eben erwähnten Symptome, oftmals als sechs P's betitelt, lauten [40,41]:

- pain
- increased pressure/swelling
- pink extremity
- paresthesia
- paralysis
- pulselessness.

Pain: Schmerzen, welche unverhältnismäßig zur Schwere der Verletzung stehen, wurden in vielen Fällen von akuten Kompartmentsyndromen beschrieben. Dieses Symptom gilt als erstes und wichtigstes Indiz für ein beginnendes oder auch manifestes Kompartmentsyndrom [30]. Anfangs wird nur ein Druckschmerz, später auch ein passiver Dehnungsschmerz beschrieben [15,32].

Increased pressure/swelling: Oftmals harte, glänzende Extremitäten, teilweise auch Blasenbildung [32].

Pink extremity: Verfärbung der Haut, blass, teils livide Bereiche [15,28].

Paresthesia/Paralysis: Sensibilitätsausfälle in den vom betroffenen Nerven versorgten Gebieten. Motorikausfälle der Muskeln des betroffenen Kompartiments [32].

Pulselessness: Verminderte beziehungsweise ausbleibende Tastbarkeit der Pulse wird nur in den seltensten Fällen beschrieben und gilt als Anzeichen für ein sehr weit fortgeschrittenes Kompartmentsyndrom [3,39].

Eine regelmäßige Überprüfung während des stationären Aufenthalts ist unabdingbar, gerade bei jungen Patienten. Dabei ist zur Einschätzung eines Kompartmentsyndroms der unteren Extremität die Palpation der A. tibialis posterior und A. dorsalis pedis zur Überprüfung der Perfusion sowie die Sensibilitätstestung der peripheren Hautnerven notwendig [19]. Zusätzlich sollte im Rahmen dessen eingeschätzt werden, inwiefern eine Schwellung und gespannte Haut im Bereich der Logen vorliegt und ob ein passiver Dehnungsschmerz der Zehen und des Sprunggelenks ausgelöst werden kann [19].

Im Hinblick auf das akute Kompartmentsyndrom bei pädiatrischen Patienten (PACS) stehen nicht zwangsläufig die oben genannten Symptome für eine rasche

Diagnosestellung. Gerade junge, verängstigte Patienten lassen kaum die Überprüfung aller obengenannten Zeichen zu [42].

Bae et al. (2001) sahen beispielsweise einen Anstieg des Analgetikabedarfs, sowohl hinsichtlich Dosis als auch Frequenz, noch bevor andere Symptome des akuten Kompartmentsyndroms eindeutig wurden [39].

Eine häufig genannte Konstellation werden als drei A's betitelt, diese lauten [4,42]:

- increasing analgesic requirement
- anxiety
- agitation

Auch Livingston et al. (2017) halten ein pädiatrisches akutes Kompartmentsyndrom, weniger durch Fokus auf die oben, initial genannten Anzeichen, sondern vielmehr durch rechtzeitiges Erkennen der drei A's sicherer und frühzeitiger diagnostizierbar [4]. Hosseinzadeh et al. (2016) sehen ebenfalls einen steigenden Analgetikabedarf als erstes Warnzeichen [5].

Der pädiatrische Patient, bei dem sowohl ein Anstieg des Schmerzmittelgebrauchs als auch vermehrte Unruhe und Ängstlichkeit auftreten, sollte als Risikopatient für ein Kompartmentsyndrom erkannt werden und weitere Überwachungsmaßnahmen der soeben genannten Kriterien sowie die Überprüfung von Sensibilität und Schmerzempfinden sollten erfolgen. Erforderliche druckentlastende Maßnahmen sollten umgehend durchgeführt werden [42].

3.2.5.2 intrakompartimenteller Druck

Neben der Beurteilung der Klinik gibt es die invasive Möglichkeit der intrakompartimentellen Druckmessung.

Neben der günstigen und einfachen Methode der Nadelmanometrie haben sich mit der Zeit verschiedene andere Optionen wie Wick-Katheter, Slit-Katheter etc. etabliert [38,43].

Bae et al. (2001) legten hierbei beispielsweise als abnorm erhöhte Werte einen gemessenen intrakompartimentellen Druck über 30 mmHg fest [39]. Alternativ wurde der kapillare Perfusionsdruck als Differenz zwischen mittlerem arteriellen und intrakompartimentellem Druck berücksichtigt (CPP=MAP-ICP). Wenn dieser unter 30 mmHg sinkt, werden therapeutische Maßnahmen eingeleitet [7,17,32,44].

Wichtig ist dabei zu beachten, dass die es unterschiedliche Druckverhältnisse bei Erwachsenen und Kindern gibt. So stellten Staudt et al. (2008) fest, dass die physiologischen Kompartimentdrücke bei Erwachsenen niedriger sind als bei Kindern. In der adulten Gruppe lagen die Drücke zwischen 5,2 mmHg und 9,7 mmHg, während man bei der jüngeren Altersgruppe Werte zwischen 13,3 mmHg und 16,6 mmHg feststellen konnte [5,38].

Tendenziell lagen im anterioren Kompartiment dabei die höchsten Drücke vor, wobei die Druckunterschiede zwischen den einzelnen Kompartimenten insgesamt gering ausfielen [38].

Insgesamt spielt bei Kindern die Messung des intrakompartimentellen Drucks im klinischen Alltag eine untergeordnete Rolle, da sie ohne ausreichende Anästhesie kaum toleriert wird [3] und gerade bei den jungen Patienten kein eindeutiger Behandlungsstandard existiert [4].

3.2.5.3 Analgetika

Ein weiterer zu beachtender Faktor zur Diagnosestellung eines drohenden oder manifesten akuten Kompartmentsyndroms kann ein steigender Analgetikagebrauch darstellen.

Vor allem bei pädiatrischen Patienten wird immer wieder von einem starken Anstieg, sowohl der Häufigkeit der Schmerzmittelgaben als auch der verabreichten Dosis, berichtet [39]. Unter anderem Hosseinzadeh et al. (2016) sprechen von dem ersten Anzeichen für ein beginnendes Kompartmentsyndrom [5]. Auch Bae et al. (2001) berichten von einer Zunahme der Analgetikamedikation, noch bevor sich andere klinische Symptome bemerkbar machen [39]. Ein Anstieg der Dosis oder Frequenz der Schmerzmittelgaben war laut Bae et al. (2001) im Schnitt 7,3 Stunden vor dem ersten Auftreten neurovaskulärer Symptome beziehungsweise nicht-kontrollierbarem Schmerz bei derselben Patientengruppe zu verzeichnen, bevor nachfolgend eine operative Intervention erforderlich wurde [39]. Bei Yang et al. (2010) zeigte sich ein Anstieg der verabreichten Analgetikaboli 12 Stunden bevor ein passiver Dehnungsschmerz zu verzeichnen war. Hierbei wurde eine Dosis und Frequenz, in der patientenkontrollierte Analgetikgaben möglich waren, definiert. Das Überschreiten dieser stellte ein effektives Mittel zur frühzeitigen Detektion drohender Kompartmentsyndrome dar [45].

Von Regionalanästhesien bei Kindern, welche gefährdet sind, ein postoperatives Kompartmentsyndrom zu entwickeln, wird oftmals abgeraten. Diese kann zur Maskierung der Schmerzen und nachfolgend einer verzögerten Diagnosestellung und Therapieeinleitung führen [4,5]. Des Weiteren kann eine Sympathikusblockade durch veränderte intravasale Flussverhältnisse Einfluss auf die Entstehung eines Kompartmentsyndroms haben [42].

Nichtsdestotrotz, unabhängig der gewählten prä- und postoperativen analgetischen und anästhesiologischen Therapie, ist eine aufmerksame, regelmäßige Einschätzung und Reevaluation der klinischen Situation maßgeblich [46].

3.2.6 Therapie

Liegt ein drohendes beziehungsweise manifestes Kompartmentsyndrom vor, sollte umgehend eine Dermatofasziotomie der betroffenen Extremität durchgeführt werden. Diese erfolgt als Notfalloperation, da es gilt, das Risiko irreversibler Schäden aufgrund Verzögerungen möglichst gering zu halten [28]. Dabei geht man von ersten Gewebeschäden nach vier Stunden Ischämiezeit aus, eine irreversible Schädigung ist nach acht Stunden zu erwarten [4].

Die Dermatofasziotomie des Unterschenkels sollte alle vier Logen umfassen [2]. Bei Unterschenkelfrakturen sind zumeist alle Kompartimente gefährdet, ein Kompartmentsyndrom zu entwickeln [15].

Dabei gibt es zwei mögliche Optionen, die Fasziotomie durchzuführen.

Zum einen kann ein unilateraler Schnitt gewählt werden (Abbildung 5) [17]. Dieser führt entlang der Fibula zu lateralem und ventralem Kompartment. Zudem erlangt man Zugang zum dorsal liegenden oberflächlichen Kompartment und zum tiefen dorsalen Kompartment durch Weghalten von M. triceps surae und den Mm. Peronaei [2].

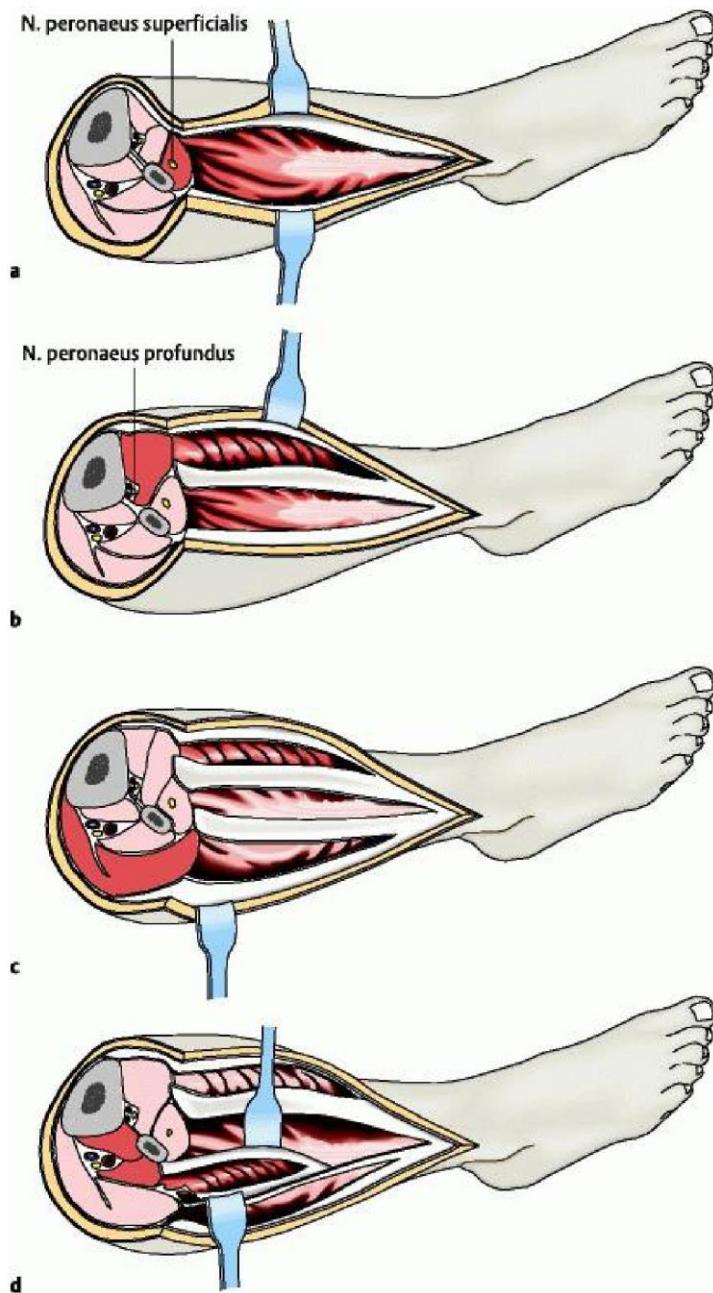


Abbildung 5: Unilateraler Schnitt nach Matsen [47]

Eine weitere Option ist die bilaterale Fasziotomie (Abbildung 6). Hier erhält man Zugang zu ventralem und lateral Kompartiment über einen anterolateralen Schnitt in proximalen und mittleren Dritteln. Über eine zweite, posteromediale Inzision erreicht man sowohl das dorsale oberflächliche als auch das tiefe dorsale Kompartiment [2].

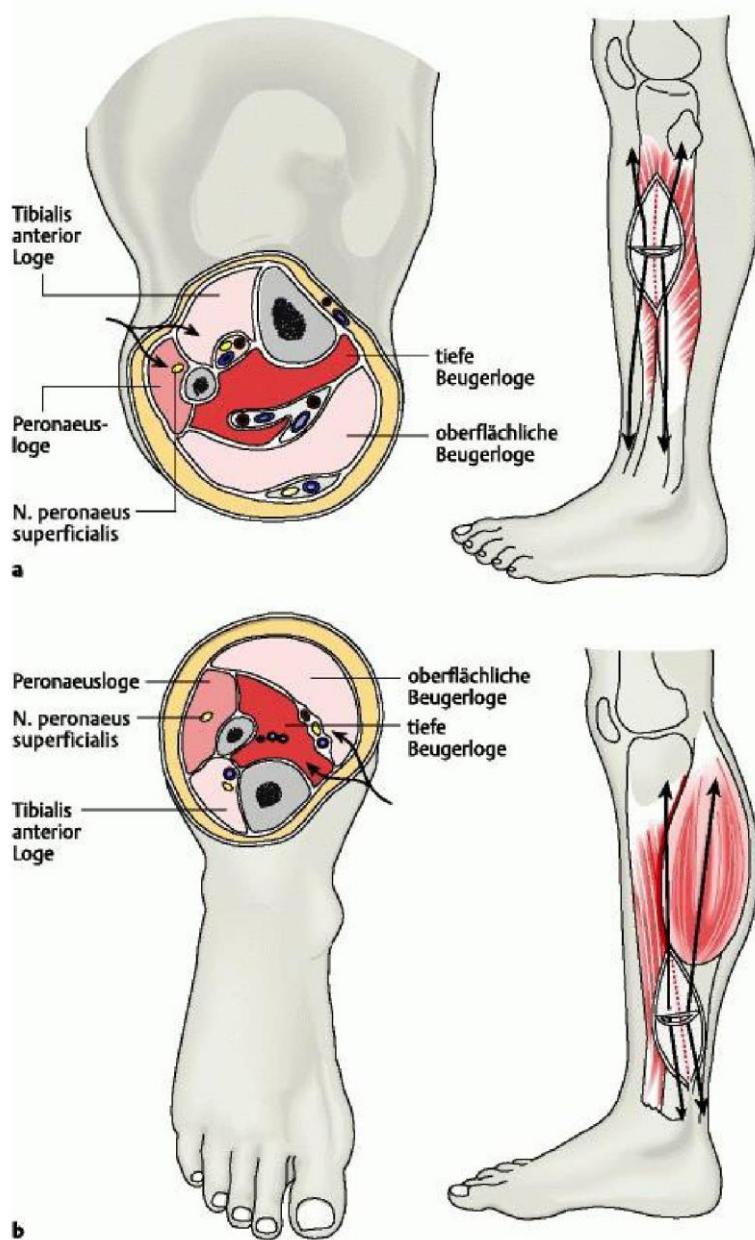


Abbildung 6: Bilateraler Schnitt nach Mubarak; anterolateraler Zugang (oben) und posteromedialer Zugang (unten) [47]

Wichtig ist hierbei eine ausreichend große Schnittlänge, da nur so eine volle Druckentlastung gewährleistet werden kann. Im Falle einer offenen Fraktur sollte ein umfassendes Wunddébridement sowie eine entsprechende Wundreinigung mit Kochsalzlösung sowie einer Antibiose erfolgen [42].

3.2.7 Komplikationen Kompartmentsyndrom

Zu unterscheiden sind Komplikationen, welche als Folge eines zu spät behandelten beziehungsweise nicht behandelten Kompartmentsyndroms auftreten, mit möglichen Komplikationen oder Folgen, die im Anschluss an eine erfolgte Dermatofasziotomie zu beobachten sind.

Bei zu spätem Erkennen beziehungsweise Nicht-Erkennen stellt das Crush-Syndrom eine wichtige Komplikation, als Folge eines ausgeprägten Zellzerfalls und Schockgeschehens ausgelöst, dar. Dies kann durch die ausgedehnte Weichteilschädigung und damit verbundene mögliche Kompartmentdruckerhöhung verursacht werden [2].

Mau et al. (1982) beschreiben, bei verspäteter Diagnosestellung und Therapiebeginn, häufig das CRPS (Morbus Sudeck) mit trophischen Hautveränderungen sowie atrophen Extremitäten und Wachstumsverzögerungen [15]. Das CRPS (complex regional pain syndrome) ist ein chronisches Schmerzsyndrom nach stattgehabtem Trauma, welches mit autonomen Neuropathien, regionaler Inflammation und (auto-)immuner Dysfunktion einhergeht [48–50].

Des Weiteren können Kontrakturen infolge eines nicht diagnostizierten und behandelten Kompartmentsyndroms auftreten. Hinzu kommen Infektionen, neurologische Ausfälle, chronische Schmerzen und in seltenen Fällen Amputationen der betroffenen Extremität als Folge der Muskelnekrosen [2,6,17,32].

Die hervorgerufenen Kontrakturen der Muskelgruppen zeigen sich sowohl durch einen motorischen Funktionsverlust als auch durch entsprechende Sensibilitätsausfälle [51]. Speziell in Bezug auf ein Kompartmentsyndrom des Unterschenkels können eine Fuß- und Zehenheberschwäche, durch Ausfall des Nervus peroneus profundus bei Kompartmentsyndrom der Tibialis-anterior-Loge, auftreten [32]. Dies zeigt sich durch einen Fallfuß beziehungsweise Steppergang. Ein Ausfall des Nervus peroneus superficialis führt zu einer Elevationsschwäche und somit fehlender Pronation des betroffenen Fußes [21].

Ist der Nervus tibialis betroffen, ist weder ein Zehenspreizen noch eine Zehennspitzengang möglich [21].

Eine Kurzfußbildung mit Krallenzehen und Hohl- und Sichelfuß zeigt sich bei Betroffenheit des kompletten Unterschenkels [32].

Komplikationen, welche im Zusammenhang mit der Dermatofasziotomie stehen, beinhalten Wundinfektionen, Muskelschäden und im Rahmen der Operation verursachte Nerven- oder Gefäßschäden. Zudem können Hautkontrakturen aufgrund der Operation oder Wundheilungsstörungen auftreten, welche zu Parästhesien, Juckreiz oder Schmerzen im betroffenen narbigen Bereich führen können [17,52].

3.2.8 Outcome

Ziel der Therapie ist es nach Möglichkeit, eine rasche, komplikationslose Genesung ohne nachfolgende Funktionseinschränkung zu erzielen.

Im Falle einer stattgehabten Dermatofasziotomie, welche im empfohlenen Zeitraum stattfindet, zeigt sich ein gutes Outcome. Hierbei ist in der überwiegenden Mehrheit eine uneingeschränkte Funktionsfähigkeit erhalten [39,52,53]. Bae et al. (2001) berichten bei über 90% ihrer Patienten von einem sehr guten Outcome ohne Einschränkungen [39], bei Erdös et al. (2011) sind sogar in lediglich 4,2% der Fälle Langzeitfolgen beschrieben, wobei der Rest vollständig genesen ist [54].

Trotzdem wird von einer prophylaktischen Dermatofasziotomie aufgrund des bestehenden Risikos möglicher Komplikationen sowie Langzeitfolgen abgeraten [52]. Dabei spielen sowohl die kurzfristigen Komplikationen wie Infektionen als auch die langfristigeren Folgen wie Schmerzen, Sensibilitätsstörungen und motorische Einschränkungen sowie kosmetische Aspekte und Juckreiz eine Rolle [52,55].

3.3 Zielsetzung Doktorarbeit

Zur Inzidenz des Kompartmentsyndroms nach Unterschenkelfraktur bei Kindern existieren in der Literatur unterschiedliche Zahlen. Diese reichen von 2-3% [17,53] über 11,6% bis hin zu knapp 20% nach erfolgter intramedullärer Nagelung bei Unterschenkelfraktur [41].

In keinem der 101 Fälle, die zwischen 01.01.2012 und 30.06.2018 in der Klinik St. Hedwig Regensburg mit einer Unterschenkelfraktur behandelt wurden und in dieser Arbeit betrachtet werden, wurde das Vorliegen eines akuten Kompartmentsyndroms diagnostiziert.

Ziel dieser Arbeit ist es deshalb, Unterschiede zwischen den verschiedenen Patientengruppen herauszuarbeiten und so Rückschlüsse auf mögliche Faktoren

ziehen zu können, welche das Entwickeln eines Kompartmentsyndroms, als Folge einer Unterschenkelfraktur, wahrscheinlicher oder unwahrscheinlicher machen können.

Dazu werden im Folgenden diese Punkte betrachtet:

- Wurde ein akutes Kompartmentsyndrom nach Unterschenkelfraktur in dem zugrundeliegenden Kollektiv übersehen beziehungsweise fälschlicherweise nicht diagnostiziert?
- Wie erfolgt die Diagnosestellung eines akuten Kompartmentsyndroms und welche Faktoren müssen hierfür erfüllt sein
- Wie unterscheiden sich die in der Literatur beschriebenen Patientengruppen, mit höheren Inzidenzen des akuten Kompartmentsyndroms nach Unterschenkelfraktur, von dem hier vorliegenden Patientenkollektiv
- Welche Schlüsse lassen sich aus der in dieser Arbeit durchgeföhrten Analyse ziehen und lassen sich diese Ergebnisse auf die interessierende Grundgesamtheit übertragen

4 Patienten und Methodik

4.1 Patienten

Das Kollektiv bestand ursprünglich aus 101 Patienten, welche zwischen 01.01.2012 und 30.06.2018 aufgrund einer Unterschenkelfraktur in der Klinik St. Hedwig Regensburg in Behandlung waren.

Dazu wurden zunächst alle Patienten, welche im zuvor genannten Zeitraum in unserer Datenbank unter der ICD-10-GM-Codierung S.82.18, S.82.21, S.82.28 vorgeschlagen wurden, eingeschlossen.

Mit Festlegung bestimmter Ein- und Ausschlusskriterien, welche nachfolgend genannt werden, reduzierte sich die Gruppe auf 74 Probanden. Dies stellte das Patientenkollektiv dar, bei dem eine retrospektive Datenerhebung anhand elektronisch vorliegender Akten durchgeführt wurde.

Für die geplante Nachuntersuchung wurden die 74 Personen des Patientenkollektivs zunächst postalisch kontaktiert. Unter den 74 potenziellen Studienteilnehmern konnten wir 64 Patienten erreichen, zehn Patienten waren telefonisch nicht erreichbar. 16 Personen lehnten eine Teilnahme an einer Nachuntersuchung im Krankenhaus im Rahmen der Studie ab. Drei weitere Patienten hatten sich kurz vor dem geplanten Untersuchungszeitraum eine Verletzung zugezogen, welche die Nachuntersuchung beeinflussen würde, woraufhin sie somit ausgeschlossen wurden. Ein weiterer Proband befand sich zur Zeit der Testdurchführung für einen längeren Zeitraum im Ausland.

44 Patienten konnten schlussendlich für eine Nachuntersuchung in der Klinik gewonnen werden, wobei drei von ihnen nicht zum vereinbarten Termin erschienen und auch kein Ausweichtermin möglich war.

Die klinische Untersuchung sowie das nachfolgende Interview wurde schließlich an einem Kollektiv von 41 Personen durchgeführt (Abbildung 7).

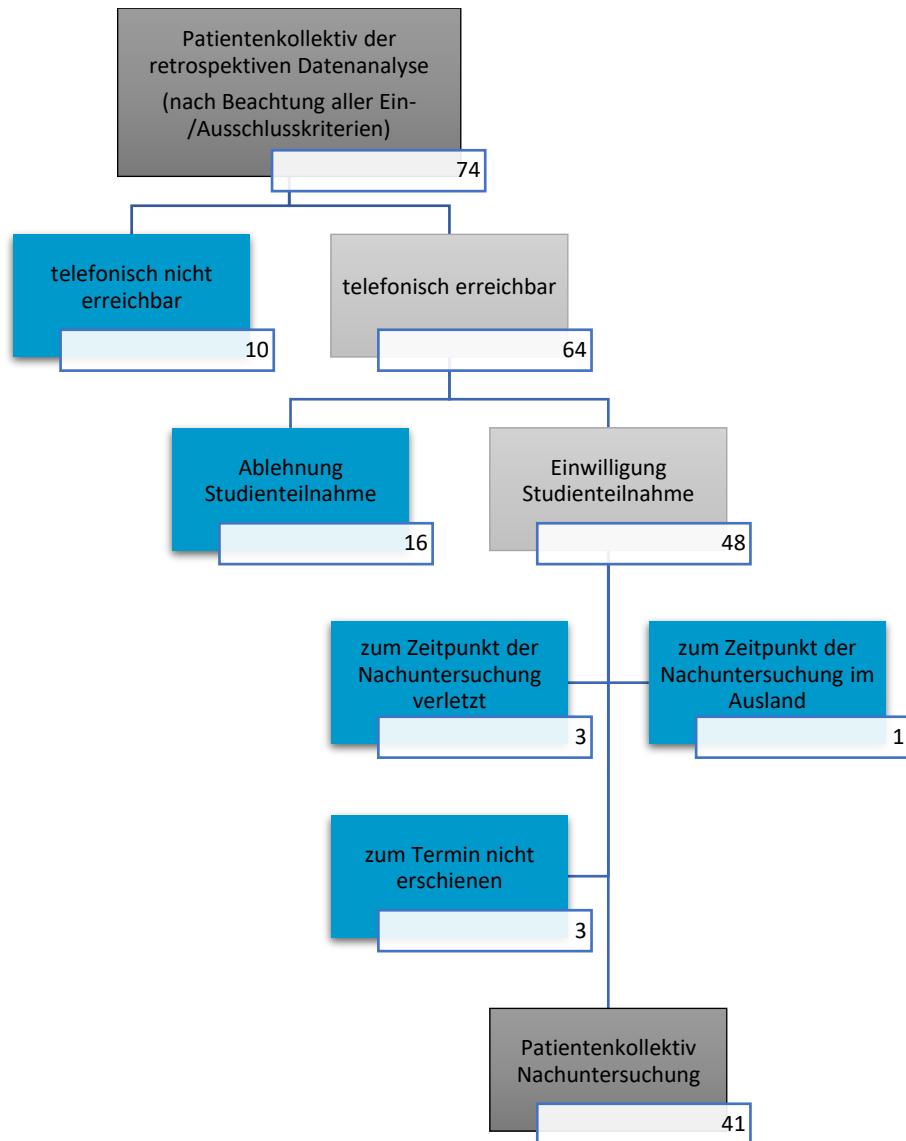


Abbildung 7: Flussdiagramm Patienten Nachuntersuchung

4.1.1 Einschlusskriterien

Der Zeitraum, in dem Patienten mit Unterschenkelfrakturen eingeschlossen wurden, lag zwischen 01.01.2012 und 30.06.2018.

Dabei lag das Patientenalter der Kinder und Jugendlichen zum Unfallzeitpunkt unter 18 Jahren.

Eingeschlossene Frakturarten waren nach ICD-10-GM-2018 Code [22]:

- S.82.18
- S.82.21
- S.82.28
- S.82.21 + S.81.87

Darunter befanden sich Unterschenkelschaft- und isolierte Tibiaschaftfrakturen. Diese waren sowohl einfach- als auch mehrfragmentiert. Des Weiteren wurden Epiphysiolysen nach Aitken 0 bis III eingeschlossen.

Dabei durften die Frakturen sowohl disloziert als auch nicht-dislozierte sowie offen oder geschlossen sein.

4.1.2 Ausschlusskriterien

Ausgeschlossen wurden Patienten, welche sich vor 2012 sowie nach Juni 2018 die Unterschenkelfraktur zugezogen hatten.

Des Weiteren wurden folgende Fälle ausgeschlossen

- Hinweis auf nicht-akzidentelles Traumageschehen
- Knöcherner Ausriß der Eminentia intercondylaris oder Tuber os tibiae
- Infraktionen
- Kniebinnentraumata
- Apophysenausriß

Zwei Probanden des ursprünglichen Kollektivs wurden schließlich in externen Häusern operiert. Aufgrund der fehlenden Möglichkeit der vollständigen Datenerhebung konnten diese Fälle nicht in dieser Studie berücksichtigt werden. Wenn lediglich ein Verfahrenswechsel beziehungsweise eine Materialentfernung im oben genannten Zeitraum erfolgt ist, und somit das Primärverfahren außerhalb des festgelegten Zeitraums stattgefunden hat, wurden auch diese Fälle ausgeschlossen.

4.1.3 Variablen

Ein Großteil der Daten des Kollektivs wurde retrospektiv mittels archivierter Patientendaten erhoben. Ein weiterer Teil der Erhebung erfolgte anhand einer körperlichen Nachuntersuchung sowie einer persönlichen Befragung.

Retrospektiv wurden Alter, Gewicht sowie Größe zum Zeitpunkt des Unfallgeschehens bestimmt. Zudem wurde die Unfallursache ermittelt und in Kategorien unterteilt.

Es erfolgte eine Einteilung der Unfallart in Sportunfälle (beispielsweise Fußball, Skifahren etc.), motorisierte Unfälle (z.B. PKW-, Rollerunfall) und nicht-motorisierte Unfälle (wie Schlitten-/Schlittschuhunfälle). Zudem wurden Stürze kategorisiert, diese wurden in drei verschiedene Sturzhöhen ($\leq 0,75\text{m}$; $> 0,75\text{m}$ und $< 2\text{m}$; $\geq 2\text{m}$) unterteilt. Falls keine der genannten Kategorien zutreffend war, wurde die Unfallart unter Sonstige eingeordnet.

Eine Unterteilung der Frakturart erfolgte anhand der ICD-10-GM-Codierung. Dies wurde durch die Information über das Vorliegen einer Dislokation ergänzt.

Die anschließende Therapie wurde in Kategorien eingeteilt. Hierbei wurde primär zwischen konservativer Therapie, welche eine Versorgung mittels Gipses beinhaltet, sowie operativer Therapie unterschieden. Bei der operativen Therapie wurde weiter in eine Versorgung mittels elastisch stabiler intramedullärer Nagelosteosynthese (kurz: ESIN), Schraubenosteosynthese, Kirschner-Draht-Osteosynthese und Fixateur externe unterschieden.

Zusätzlich wurden Informationen über Unfallzeitpunkt, Zeitpunkt der Ankunft in der Notaufnahme sowie, falls eine operative Versorgung im Anschluss erfolgt ist, Uhrzeit des OP-Beginns und OP-Endes dokumentiert.

Im Rahmen des stationären Aufenthaltes war sowohl die Dauer als auch das Stattfinden einer gesonderten Kompartiment-Überwachung von Interesse. Zudem wurden aus der postoperativen bzw. postinterventionellen Dokumentation Informationen über Parästhesien, Motorik, Paresen, Pulsstatus, Schmerzen, Verfärbungen und Schwellung der betroffenen Extremität ermittelt.

Des Weiteren wurde der Analgetikabedarf dokumentiert und anhand des WHO-Stufenschemas unterteilt. Dabei stellt Stufe 1 die Therapie mit Nicht-Opioidanalgetika dar, Stufe 2 die Kombination aus niederpotenten Opioidanalgetika und Nicht-Opioidanalgetika und Stufe 3 die Kombination aus hochpotenten Opioidanalgetika und Nicht-Opioidanalgetika.

Im Rahmen der Nachuntersuchung konnten weitere Daten bezüglich Motorik und Sensibilität ermittelt werden. Dies erfolgte zur besseren Vergleichbarkeit sowohl an der ehemals betroffenen Extremität als auch an der nicht betroffenen, gegenüberliegenden Seite.

Im nachfolgenden Gespräch wurden aufgetretene Besonderheiten und vorliegende Einschränkungen sowie das subjektive Outcome nach Fraktur ermittelt.

4.2 Methodik

4.2.1 Studiendesign

Die zwischen dem 27.04.2018 und 10.07.2018 durchgeführte Datenerhebung ist eine retrospektive Qualitätssicherungsstudie zum Vergleich des Ist- und Sollzustandes. Nachuntersuchung und Interview wurden in der Klinik St. Hedwig in Regensburg durchgeführt.

4.2.2 zeitlicher Ablauf

Zunächst wurden die im entsprechenden Zeitraum stattgehabten Fälle geprüft und anhand der erläuterten Ein- und Ausschlusskriterien angepasst. Im Anschluss erfolgte die retrospektive Datenerhebung des hierdurch entstandenen Kollektivs aus den elektronisch vorliegenden Patientenakten.

Während der Datenerfassung wurde zu den potenziellen Probanden postalisch, später auch telefonisch, Kontakt aufgenommen. Als letzter Schritt wurden die sich bereit erklärenden Patienten in die Klinik St. Hedwig eingeladen, wo schließlich die Nachuntersuchung als auch ein anschließendes Interview stattfanden.

4.2.2.1 retrospektive Datenerhebung

Die retrospektive Datenerhebung anhand der elektronisch vorliegenden Akten fand hauptsächlich zwischen April und Mai 2018 statt.

Dabei wurden zunächst Name, Alter, Adresse sowie Diagnose erfasst. Außerdem wurden Datum und Uhrzeit des Unfalls, der Aufnahme im Krankenhaus und der jeweiligen Zeitpunkte weiterer therapeutischer Schritte festgehalten. Des Weiteren wurden genauere Informationen über die Verletzungsursache, genaue Diagnose, entsprechende Therapiewahl und ob eine anschließende Kompartmentüberwachung erfolgt ist, dokumentiert. Abschließend wurden Informationen bezüglich des

stationären Aufenthaltes, unter anderem zu Dauer, Analgetikagebrauch während dieser Zeit sowie klinische Auffälligkeiten des Patienten, erfasst.

4.2.2.2 Nachuntersuchung

Für die anschließend geplante Nachuntersuchung wurden die ins Kollektiv eingeschlossenen Patienten postalisch über die Möglichkeit der Teilnahme an der Studie informiert sowie später telefonisch kontaktiert. Im Telefongespräch wurde das Vorgehen besprochen und abgefragt, ob ein Einverständnis zur Teilnahme an der klinischen Untersuchung vorliegt. Dabei wurden bei zu diesem Zeitpunkt minderjährigen Patienten die verantwortlichen Erziehungsberechtigten einbezogen. Bei vorliegendem Einverständnis wurde nachfolgend ein Termin zur ausführlichen klinischen Nachuntersuchung mit anschließendem Interview in der Klinik St. Hedwig in Regensburg vereinbart.

4.2.2.2.1 Tests

Bei der Nachuntersuchung wurden sowohl Motorik als auch Sensibilität des betroffenen Beines sowie der Gegenseite getestet.

Da sowohl die vom potenziellen Kompartmentsyndrom im Unterschenkel betroffenen Nerven als auch Muskeln Auswirkung auf Funktion und Empfinden des jeweiligen Fußes haben, wurden dort die Tests durchgeführt.

Die Motorik des Fußes wurde anhand der Kraftgrade nach Janda [56] überprüft. Dabei sollten die Probanden eine Dorsalextension und Plantarflexion sowie Inversion und Eversion des Fußes ausführen. Das Ganze wurde nacheinander auf beiden Seiten getestet. Die Kraftgradeinteilung nach Janda [56] erfolgt in 6 Stufen von 0 bis 5. Bei dem Muskelfunktionstest des zu untersuchenden Bereichs wird die Muskelkraft gegen die Schwerkraft sowie gegen äußere Widerstände geprüft und je nach Kraftausmaß in die jeweilige Stufe eingeteilt.

Die Sensibilität wurde ebenfalls an den Füßen getestet. Dabei wurde sowohl über Fußsohle, Fußrücken als auch die Außen- und Innenseite des Fußes gestrichen und mögliche Seitenunterschiede beziehungsweise anderweitige Auffälligkeiten notiert. Dies geschah gleichermaßen beidseits.

Die periphere Durchblutung der unteren Extremität wurde anhand des Pulsstatus der A. tibialis posterior und A. dorsalis pedis geprüft.

Sind während der körperlichen Untersuchung Schmerzen geäußert worden oder sind Verfärbungen, Paresen oder anderweitige Besonderheiten aufgefallen, wurde dies dokumentiert.

4.2.2.2 Interview

Im anschließenden Gespräch wurden Informationen über den Verlauf und das funktionelle Outcome nach dem Krankenhausaufenthalt bis zum Zeitpunkt der Nachuntersuchung erfragt. Die Patienten sollten hierzu Auskunft über andauernde Beschwerden wie Schmerzen, Schwellungen oder anderweitige Auffälligkeiten geben. Zudem erfolgte eine persönliche Bewertung des eigenen Outcomes.

5 Ergebnisse

Ergebnisse der retrospektiven Datenerhebung:

In dem sechsjährigen Zeitraum gab es 74 Patienten, welche sich eine Unterschenkelfraktur zugezogen haben und den festgelegten Kriterien entsprachen. Ein Patient erlitt im zeitlichen Abstand von wenigen Jahren zweimalig eine Unterschenkelfraktur, einmal auf der linken und einmal auf der rechten Seite, die Fälle wurden somit einzeln behandelt. In einem Fall zog sich ein Patient in einem Unfallgeschehen Frakturen an beiden Unterschenkeln zu. Aus diesem Grund beziehen sich die nachfolgenden Ergebnisse auf ein Patientenkollektiv von 75 behandelten Fällen, bei denen 76 Frakturen auftraten.

Patientenbezogenen Daten:

54 Patienten waren männlich (72,0 %) und 21 Patienten weiblich (28,0 %). Die Altersspanne zum Zeitpunkt des Unfalls lag dabei zwischen zwei und 16 Jahren, im Mittel bei 9,01 Jahren ($SD = 4,348$; $n = 75$). Die Mädchen waren dabei im Schnitt jünger ($M = 7,95$; $SD = 3,708$; $n = 21$), als die Jungen ($M = 9,43$; $SD = 4,537$; $n = 54$).

Das durchschnittliche Gewicht lag bei den Patienten bei 38,75 kg ($SD = 20,483$; $n = 75$). Dabei waren die Jungen mit 41,61 kg ($SD = 21,486$; $n = 54$) zum Zeitpunkt des Unfalls im Schnitt schwerer als die Mädchen ($M = 31,39$; $SD = 15,811$; $n = 21$). Bei 27 Patienten (36,0 %) lag das Gewicht über 50 kg.

Die Daten zur Patientengröße wurden unvollständig erfasst. Bei insgesamt 38 Patienten konnte durch die Größe und das Gewicht der BMI berechnet werden, dieser lag im Mittel bei $18,77 \text{ kg/m}^2$ ($SD = 4,279$; $n = 38$).

Unfallgeschehen:

Die Verletzungsursache stellte in 50,7 % ($n = 38$) eine Sportverletzung dar. In 10,7 % ($n = 8$) der Fälle war ein motorisierter Unfall, in 6,7 % ($n = 5$) ein nicht-motorisierter Unfall ursächlich. Des Weiteren war bei 22,7 % ($n = 17$) ein Sturz der Grund für die Fraktur. Hier wurde unterteilt in eine niedrige Sturzhöhe ($\leq 0,75 \text{ m}$) bei 5,3 % ($n = 4$), eine mittelhohe Sturzhöhe ($> 0,75 \text{ m}$ und $< 2 \text{ m}$) bei 14,7 % ($n = 11$) und eine hohe Sturzhöhe ($\geq 2 \text{ m}$) bei 2,7 % ($n = 2$). Die restlichen Unfallursachen (8,0 %; $n = 6$) konnten keiner der genannten Kategorien zugeordnet werden (Abbildung 8).

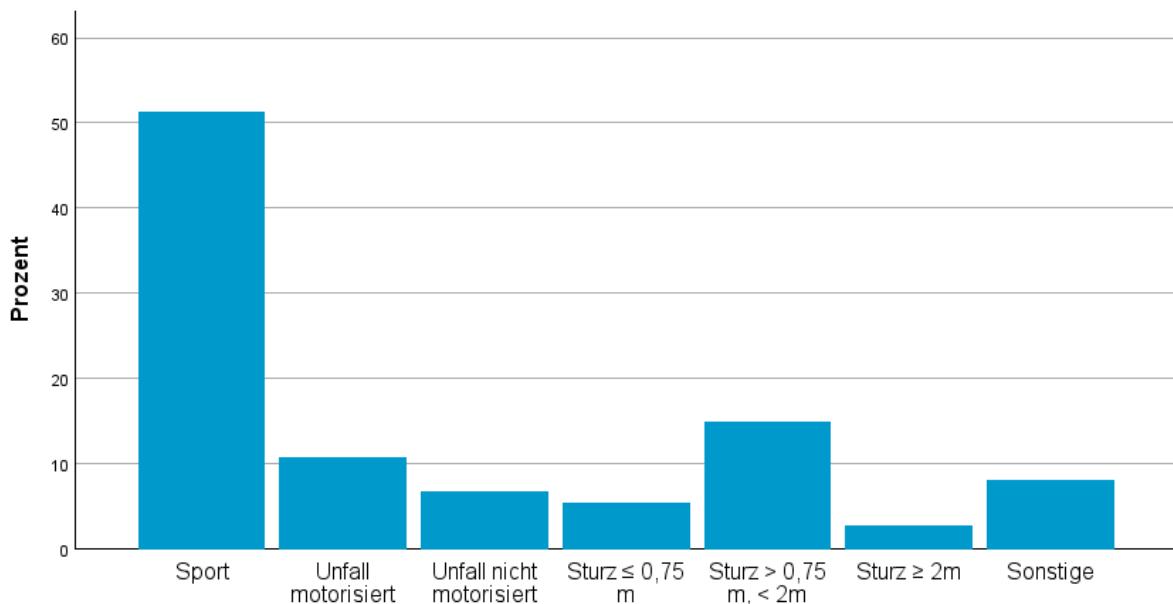


Abbildung 8: Einteilung der Unfallkategorien und Häufigkeit

Fraktureinteilung:

Die Einteilung der Frakturarten anhand der ICD-10 Klassifikation (ICD-10-GM Version 2018) [22] ergab eine Häufigkeit von S82.18-Verletzungen in 17 Fällen (22,4 %), S82.21 bei sieben Patienten (9,2 %), sowie S82.21 und S81.87 bei zwei Patienten (2,6 %). Am häufigsten war dabei die Diagnose S82.28 (65,8 %; $n = 50$) gestellt worden (Abbildung 9).

- S82.18 = Fraktur des proximalen Endes der Tibia, Sonstige (isoliert bzw. o.n.A.)
- S82.21 = Fraktur des Tibiaschaftes, mit Fraktur der Fibula (jeder Teil)
- S82.28 = Fraktur des Tibiaschaftes, Sonstige (Tibia o.n.A, Tibiaschaft isoliert, Tibiaschaft o.n.A.)
- S82.21, S81.87 = Fraktur des Tibiaschaftes, mit Fraktur der Fibula (jeder Teil); Weichteilschaden I. Grades bei offener Fraktur oder Luxation des Unterschenkels, fehlende oder geringe Kontusion, unbedeutende bakterielle Kontamination, einfach bis mittelschwere Bruchformen, offene Fraktur oder Luxation nicht näher bezeichneten Grades [22]

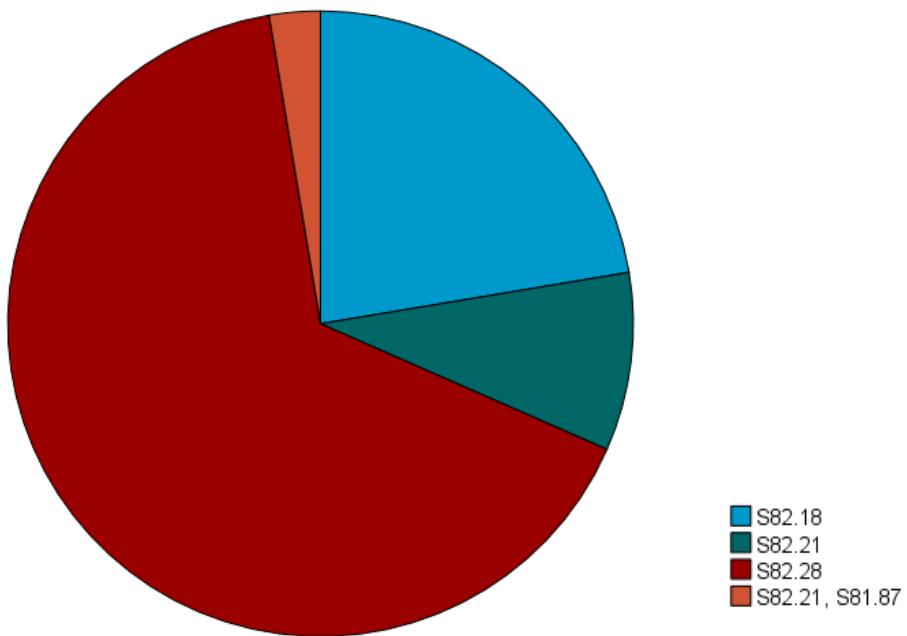


Abbildung 9: Diagnose gemäß ICD-10-GM Version 2018

Die Zahl an dislozierten Frakturen (48,7 %; $n = 37$) hielt sich annähernd die Waage mit den nicht-dislozierten Brüchen (51,3 %; $n = 39$).

Therapie:

Die Therapieoptionen gliedern sich in einen konservativen Therapieansatz sowie eine operative Versorgung.

46 Patienten (60,5 %) erhielten eine konservative Versorgung mittels Gipsverband. Im Falle einer Operation wurden 21 Patienten (27,6 %) durch eine elastisch stabile intramedulläre Nagelosteosynthese (ESIN), sechs Patienten (7,9 %) mittels Kirschner-Draht-Osteosynthese und drei Patienten (3,9 %) durch eine Schraubenosteosynthese versorgt (Abbildung 10).

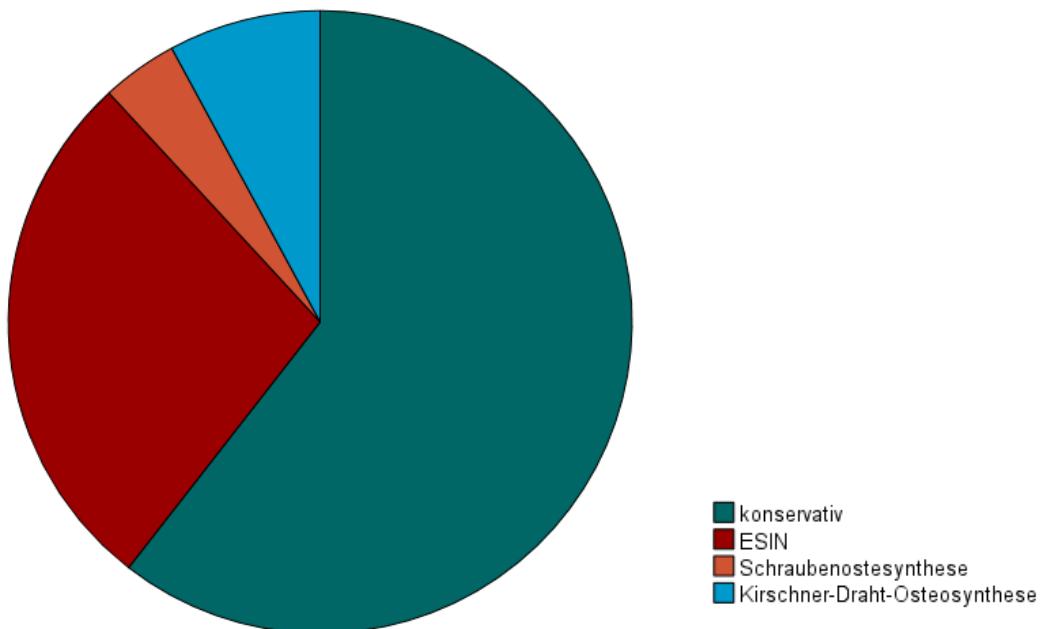


Abbildung 10: Initiale Versorgung/Therapie

Zeiträume:

Die Zeit zwischen Unfall und Erstkontakt in der Notaufnahme betrug im Mittel 9,3464 Stunden, dabei lag die Spanne zwischen minimal 0,72 Stunden und maximal 285,37 Stunden. In zwei Fällen erfolgte eine konservative Versorgung extern und die Erstvorstellung in der Notaufnahme der Klinik St. Hedwig elf beziehungsweise zwölf Tage nach Unfall.

Im Falle einer operativen Versorgung vergingen im Mittel weitere 9,5522 Stunden (min. 1,13 Stunden; max. 117,55 Stunden) bis Operationsbeginn, wobei der maximale Zeitraum von fast fünf Tagen aufgrund einer sekundären Dislokation in einem Fall entstanden ist. Insgesamt belief sich die Zeit zwischen Unfallgeschehen und Operation auf mindestens 2,38 Stunden, maximal 313,93 Stunden ($M = 24,2196$ Stunden).

Die Dauer des operativen Eingriffs betrug zwischen 0,12 Stunden und 3,03 Stunden, im Mittel 0,8075 Stunden.

Bei einem Patienten führte eine in der Nachkontrolle neu entdeckte Triplane-Fraktur zwölf Tage postoperativ zur Therapieumstellung von ESIN zu einer Osteosynthese mittels Magnesium-Schrauben. In einem weiteren Fall erhielt ein Patient zwölf Tage nach konservativer Erstversorgung einen Fixateur externe, aufgrund ungenügender Frakturfixation und sekundärer Dislokation. Beide Fälle wurden als Komplikation

gewertet und sowohl die Therapiewahl als auch die aus der Zweitversorgung entstandenen Zeiträume nicht in dieser Studie betrachtet.

Klinik stationärer Aufenthalt:

Bei den 75 Fällen betrug die Dauer des stationären Aufenthaltes zwischen zwei und neun Tagen. Der Median lag bei 3,5.

Während des stationären Aufenthaltes wurde in regelmäßigen Abständen das Entstehen eines Kompartmentsyndroms mittels Überprüfung der pDMS (periphere Durchblutung, Motorik, Sensibilität) kontrolliert. In einem Fall gab es hierzu keine pflegerische Dokumentation. Die periphere Durchblutung wurde in keinem Fall als minderperfundiert beschrieben, auch die Motorik der betroffenen Extremität wurde bei keinem Patienten als eingeschränkt dokumentiert, in einem Fall (1,3 %) wurden Parästhesien im frakturierten Bein dokumentiert.

Bei 28 Frakturen (37,3 %) wurde von pflegerischer Seite eine starke Schwellung des betroffenen Beines dokumentiert. Zudem wurden von 18 Patienten (9 %) starke Schmerzen geäußert, welche dadurch zusätzlich dokumentiert wurden. In zwei Fällen (2,6 %) wurde eine Verfärbung des frakturierten Beines dokumentiert.

Analgesie während des stationären Aufenthaltes:

Der Analgetikagebrauch während des stationären Aufenthaltes wurde anhand des WHO-Schmerzschemas ausgewertet (Abbildung 11). Hierbei war bei 76 % ($n = 57$) der Fälle eine Schmerztherapie mittels Nicht-Opioidanalgetika (Stufe 1) ausreichend, bei 16 % ($n = 12$) der Patienten war Stufe 2 (niederpotente Opioidanalgetika + Nicht-Opioidanalgetika) erforderlich und bei 4 % ($n = 3$) war die Eskalation auf Stufe 3 (hochpotente Opioidanalgetika + Nicht-Opioidanalgetika) des WHO-Stufenschemas notwendig. In 3 Fällen (4 %) wurden keine Analgetikagaben im stationären Setting dokumentiert.

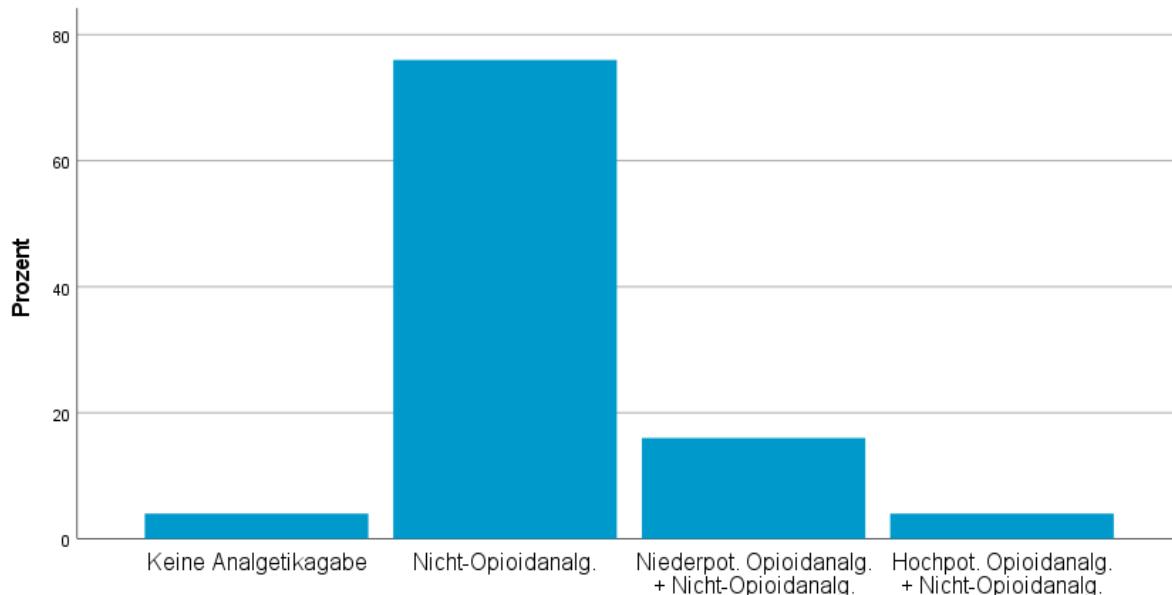


Abbildung 11: Analgetikagebrauch gemäß WHO-Stufenschema

Ergebnisse der Nachuntersuchung:

Die Nachuntersuchung und das Interview wurden bei 41 Patienten durchgeführt. Der Patient mit den Frakturen zeitgleich an beiden Unterschenkeln war ebenfalls Teil der Nachuntersuchung, weshalb es um 42 dokumentierte Frakturen geht.

Die Zeit zwischen Unfallgeschehen und Nachuntersuchung im Rahmen der Studie betrug zwischen 7 Wochen und 75 Monaten, im Mittel 32,619 Monate ($n = 42$).

Körperliche Untersuchung:

Bei der körperlichen Untersuchung gaben sechs Patienten (14,3 %) Auffälligkeiten bei der Sensibilitätstestung an, bei drei Patienten befanden sich diese auf der ehemals frakturierten Seite, bei drei Patienten auf der jeweiligen Gegenseite. Dabei wurde von den betroffenen Probanden ein pelziges Gefühl beziehungsweise eine verminderte Sensibilität im Seitenvergleich beschrieben.

Bei der Testung der Motorik wurde in einem Fall (2,4 %) eine leichte Einschränkung festgestellt. Dies betraf die Inversion des ehemals betroffenen Beins, welche nach Kraftgrad nach Janda [56] bei 3/5 lag. Anderweitige Bewegungseinschränkungen konnten an dem Bein nicht festgestellt werden. Die Gegenseite war uneingeschränkt mobilisierbar.

Es lagen keine Anzeichen einer vollständigen Parese vor. Die Tastbarkeit der Pulse an A. dorsalis pedis sowie A. tibialis posterior war bei allen Probanden beidseits möglich. Trophische Hautveränderungen beziehungsweise livide Verfärbungen lagen bei keinem Probanden vor. Keiner der Patienten äußerte während der Nachuntersuchung Schmerzen.

Subjektive Beschwerden:

Im Interview berichteten vier Patienten (9,5 %) über nachfolgend aufgetretene Bewegungseinschränkungen, über wiederkehrende Schmerzen klagten sieben Probanden (16,7 %). Vier dieser Patienten hatten wiederkehrende Schmerzen bei längerer Belastung beziehungsweise Sport, wobei einer dieser Patienten die Beschwerden am nicht frakturierten Bein angab. Die Nachuntersuchung dieser Patienten fand zwischen 13 und 64 Monaten nach Unfallgeschehen statt. Zwei Patienten (4,8 %) litten temporär, in der unmittelbaren Zeit nach dem stationären Aufenthalt, an wiederkehrenden Schmerzen. Ein Patient (2,4 %) gab, 45 Monate nach dem Unfall, rezidivierende nächtliche Schmerzen im gesamten Bein an.

Eine intermittierend auftretende Verfärbung des betroffenen Beines beschrieben zwei Patienten (4,8 %), einer dieser beiden Patienten gibt seit dem Unfall ein CRPS an.

Von den Patienten gesondert erwähnte Besonderheiten, die seit der Behandlung aufgetreten waren, beinhalteten unter anderem wiederkehrende Lymphödeme beziehungsweise eine anhaltende Schwellung des ehemals betroffenen Beines, leichte Parästhesien auf Höhe oder unterhalb der Frakturstelle sowie Auffälligkeiten bei Bewegung wie leichtes Hinken, Knacken oder Schmerzen unter längerer Belastung.

In einzelnen Fällen trat eine verzögerte Wundheilung von drei Monaten auf, ein Patient entwickelte ein CRPS. Zudem berichtete ein Patient, nachfolgend eine Arthrose im Knie an der Gegenseite entwickelt zu haben. In einem weiteren Fall wurde von einer Abszessentwicklung nach der Gipsanlage berichtet. Ein Proband hatte in der Folgezeit ein Tumorgeschehen im zuvor betroffenen Bein.

Das persönliche Outcome wurde von 40 Patienten (95,2 %) mit „gut“, zwei Probanden (4,8 %) schätzten ihr Outcome als „schlecht“ ein. Keiner der Patienten, bei denen es zu einer verzögerten Therapie kam, war bereit, an der Nachuntersuchung

teilzunehmen, weshalb in diesen Fällen keine Aussage über das persönliche Outcome getroffen werden kann.

6 Diskussion

Wurde ein Kompartmentsyndrom als Folge einer Unterschenkelfraktur bei der stationären Behandlung übersehen?

Das rechtzeitige Erkennen der Hinweise auf das Vorliegen eines Kompartmentsyndroms ist entscheidend. Im Falle eines Kompartmentsyndroms ist rasches Handeln und eine sofortige Dermatofasziotomie erforderlich. Geschieht dies nicht oder erfolgt dies zu spät, drohen irreversible Folgeschäden.

Diese Folgeschäden werden vielfach als narbige Kontrakturen als Folge von Muskelnekrosen beschrieben. Klinisch äußert sich das durch einen Funktionsausfall der entsprechenden Muskelgruppen sowie Sensibilitätsstörungen [51]. Dabei zeigt sich häufig das Bild eines Spitz- und Klumpfußes. Auch Krallenzehen sowie ein Hallux flexus (Beugekontraktur des Großzehengelenkes) sind mögliche Folgen [15]. Sofern die Tibialis-anterior-Loge befallen ist, zeigt sich eine Fuß- und Zehenheberschwäche. Das häufigere Bild des Kompartmentsyndroms des gesamten Unterschenkels zeigt sich sowohl durch eine Kurzfuß- und Krallenzehenbildung als auch einen Hohl- und Sichelfuß [32].

Im Rahmen der Arbeit wurde eine Nachuntersuchung der Patienten durchgeführt, welche aufgrund einer Unterschenkelfraktur in der Klinik St. Hedwig in Regensburg zwischen 01.01.2012 und 30.06.2018 behandelt wurden. Dabei wurde der Fokus dieser Nachuntersuchung auf die Erkennung motorischer oder neurologischer Defizite als Folge eines unentdeckten Kompartmentsyndroms gelegt.

Es wurde von sechs Patienten (14,3 %) eine Sensibilitätsveränderung beziehungsweise -verlust beschrieben. Diese bezogen sich in der Hälfte der Fälle auf das ehemals frakturierte Bein, in der anderen Hälfte der Fälle standen die Äußerungen nicht in Bezug zur Fraktur. Dies lässt die Vermutung zu, dass zum einen die Testung der Sensibilität allein anhand einfachen Streichens über die betroffenen Stellen sehr subjektiv ist und gerade bei jüngeren Kindern zu einer gewissen Fehleranfälligkeit führt. Zum anderen ist zu bedenken, dass durch eine Operation Traumen gesetzt werden können, welche oberflächliche Hautnerven betreffen und damit nicht in direktem Zusammenhang mit einem Sensibilitätsverlust in Folge einer Kompartmentsyndrom bedingten Druckerhöhung stehen müssen. In zwei dieser Fälle

erfolgte eine operative Therapie mit einer ESIN, dies geht in der Regel mit wenig Trauma oberflächlicher Hautnerven einher, welches zudem weiter proximal zu erwarten ist. Ein Fall wurde konservativ behandelt.

Bei der körperlichen Untersuchung zeigte sich bei einem Patienten (2,4 %) eine motorische Einschränkung bei der Inversion (Kraftgrad 3/5 nach Janda [56]). Dies ist am ehesten mit einer isolierten Läsion des Nervus tibialis erklärbar. Ein Funktionsausfall der entsprechenden Muskelgruppen zeigte sich allerdings nicht, zudem lag keine rigide Fußfehlstellung vor. Die Gegenseite war in der Bewegung uneingeschränkt. Andere Auffälligkeiten beziehungsweise vorliegende Parästhesien oder Hypästhesien boten sich nicht. Der Patient berichtete über eine protrahierte physiotherapeutische Behandlungsdauer, bewertete sein funktionelles Outcome allerdings als gut. Die vielfach beschriebenen Langzeitfolgen schwerer Funktionseinschränkungen, Schmerzen sowie Muskelkontrakturen [19,51] waren hier nicht vorzufinden.

Durchblutungsstörungen, trophische Hautveränderungen oder livide Verfärbungen waren bei keinem der Patienten in der Nachuntersuchung zu sehen.

Ein Patient berichtete über ein CRPS seit dem Unfallgeschehen. Der Patient hatte eine dislozierte distale Tibiaschaftfraktur, welche konservativ behandelt wurde. Zwar ist das Entstehen einer Sudeckschen Dystrophie unter anderem durch Mau et al. (1982) häufig in Folge eines unentdeckten Kompartmentsyndroms beschrieben [15], allerdings ist dies nicht spezifisch, sondern kann auch als Folge von Frakturen oder Weichteilverletzungen teils postoperativ auftreten [57]. Betrachtet man Angaben und Untersuchungsbefund dieses Patienten hinsichtlich weiterer Anzeichen eines unentdeckten Kompartmentsyndroms, zeigen sich motorisch keine Auffälligkeiten. Ein pelziges Gefühl gibt der Patient bei der Untersuchung am Dig. II des betroffenen Fußes an. Zudem falle ihm wiederkehrend eine Rötung und Schwellung des Beines auf, dies ließ sich in der Nachuntersuchung nicht bestätigen.

Die während des stationären Aufenthaltes durchgeführte Dokumentation hinsichtlich Prüfung der peripheren Durchblutung, Motorik und Sensibilität (pDMS), zeigte keine Auffälligkeiten der Motorik im Sinne von Paresen oder eingeschränkter Perfusion. In einem Fall gab ein Patient während der stationären Überwachung Parästhesien des frakturierten Beines an, allerdings konnte kein weiteres Anzeichen für ein

Kompartmentsyndrom gefunden werden. Auch in der Nachuntersuchung boten sich keine Auffälligkeiten, der Patient gab keinerlei Einschränkungen an.

Eine Verfärbung der Haut wurde in zwei Fällen dokumentiert, in beiden Fällen trat zudem eine Schwellung auf. Einer der beiden Patienten gab zudem starke Schmerzen stationär an, weitere Symptome der sechs P's lagen nicht vor. In der Nachuntersuchung gab er ein pelziges Gefühl unterhalb der ehemals frakturierten Stelle an, sonst ergaben sich keine Auffälligkeiten. Der zweite Patient hatte keine weiteren Auffälligkeiten im stationären Monitoring, das Outcome ist bei diesem Patienten, aufgrund einer nicht erfolgten Nachuntersuchung, unklar.

Eine Schwellung trat nach insgesamt 28 der Frakturen auf. Insgesamt ist zu vermerken, dass sich bei keinem dieser Patienten Hinweise für Parästhesien, Paresen oder Durchblutungsstörungen ergaben. In elf dieser 28 Fälle traten zudem kombiniert stärkere Schmerzen auf, diese waren jedoch nur in zwei Fällen mit Analgetika der WHO-Stufe III zu kompensieren.

Beleuchtet man nun die Patienten zum Zeitpunkt ihres stationären Aufenthaltes bezogen auf die drei A's (agitation, anxiety, analgesic requirement), lässt sich lediglich der Schmerzmittelbedarf quantifizieren. Hierbei zeigte sich bei über dreiviertel der Patienten ein Schmerzniveau, welches sich durch keine oder leichte Schmerzmittel der WHO-Stufe 1 kontrollieren ließen. Der überwiegende Rest ließ sich durch niederpotente Opioidanalgetika ausreichend behandeln. In 4% der Fälle war eine Analgesie in WHO-Stufe 3 erforderlich. Insgesamt ist jedoch, trotz Möglichkeit der Einordnung in die unterschiedlichen WHO-Stufen, ein Vergleich gerade aufgrund der subjektiven Einordnung der eigenen Schmerzen sowie der altersabhängig unterschiedlichen Kommunikation dieser nur eingeschränkt möglich. Ein steigender Schmerzmittelbedarf, welcher vielmals als erster Indikator eines drohenden Kompartmentsyndroms gesehen wird [5,17,39], kann anhand unserer retrospektiven Daten nicht aufgezeigt werden.

Die weiteren beiden A's (agitation, anxiety) ließen sich nicht quantifizieren und somit nur schwer vergleichen.

Bezogen auf die sechs P's, speziell im Falle der Patientengruppe mit erhöhtem Schmerzmittelbedarf (WHO-Stufe III), lassen sich bei keinem der Patienten dieser Gruppe nachfolgend Auffälligkeiten im Hinblick auf beschriebene Paresen, Durchblutungsstörungen oder Parästhesien finden. Eine Schwellung wird bei zwei der drei Patienten, wie zuvor bereits erläutert, beschrieben. Einer dieser beiden Patienten

erschien nicht zur Nachuntersuchung, der zweite Patient gab nachfolgend bis auf eine leichte Sensibilitätsstörung des Knöchels des frakturierten Beines keine Einschränkung an. Der Patient mit dem starken Schmerzmittelgebrauch, jedoch ohne weitere Symptome, gab in der Nachuntersuchung keinerlei Auffälligkeiten oder Einschränkungen an.

Geht man bei dem Vorliegen eines Kompartmentsyndroms von stärksten Schmerzen [7,15,17,30] aus, scheint es unwahrscheinlich, dass Patienten mit Schmerzmitteln der WHO-Stufe I oder II ausreichend schmerzkompensiert sind, sodass wir in dieser Patientengruppe kein nicht-diagnostiziertes Kompartmentsyndrom erwarten würden. Insgesamt zeigen sich anhand der Informationen aus stationärer Überwachung vereinzelt Fälle, welche Hinweise für ein beginnendes Kompartmentsyndrom zeigen könnten, allerdings wird dies aufgrund der entweder guten Schmerzkompensation oder anderweitig fehlenden Symptomen unwahrscheinlich. In den verbliebenen weniger eindeutigen Fällen ließ sich schlussendlich im Rahmen der Nachuntersuchung ein gutes Outcome zeigen. Die bei nichtdiagnostizierten Kompartmentsyndromen zu erwartenden Langzeitfolgen fanden sich bei keinem der im Rahmen der Nachuntersuchung gesehenen Patienten. Lediglich in zwei Fällen zeigte sich eine uneindeutige Symptomkonstellation, welche sich aufgrund einer nichterfolgten Nachuntersuchung nicht widerlegen ließ.

Eine intrakompartimentelle Druckmessung, bei Verdacht auf Kompartmentsyndrom beziehungsweise perioperativ, wurde in keinem der beschriebenen Fälle des Kollektivs durchgeführt.

In welchen Punkten unterscheidet sich das in dieser Arbeit betrachtete Kollektiv von anderen Gruppen mit Kompartmentsyndrom nach Unterschenkelfraktur? Gibt es Hinweise auf Faktoren, die eine Entstehung begünstigen?

Im Hinblick auf diese Frage ist ein Vergleich des vorliegenden Patientenkollektivs mit dem aus vergleichbarer Literatur erforderlich.

Das mittlere Alter der Patienten lag bei circa 9 Jahren. Während das Durchschnittsalter bei den Mädchen, welche gut ein Viertel der betroffenen Patienten ausmacht, bei knapp 8 Jahren liegt, sind die männlichen Probanden mit 9,43 Jahren fast zwei Jahre älter.

In vergleichbaren Publikationen [7,41,53] lag das durchschnittliche Alter der Patienten, welche schlussendlich ein Kompartmentsyndrom entwickelt haben, höher als das Alter der in dieser Arbeit beschriebenen Gruppe. In der von Shore et al. (2013) veröffentlichten Studie liegt die Inzidenz des Kompartmentsyndroms nach Tibiaschaftfraktur bei 11,6 % [7]. Das Alter lag in 88 % der Fälle über 14 Jahren, wobei das generelle Durchschnittsalter mit 13,8 Jahren [7] deutlich höher lag als bei der Vergleichsgruppe. Ferlic et al. (2012) sahen bei 3 % nach Unterschenkelfraktur ein Kompartmentsyndrom, wobei die Wahrscheinlichkeit bei einem Alter >12 Jahren höher lag (4 %) als bei einem Alter <12 Jahren (1,3 %) [53]. Bei einer Studie von Pandya et al. (2011), welche Bezug auf die Inzidenz speziell nach Therapie mittels ESIN nimmt, wird sogar Kompartmentsyndromen bei 19,3 % der Patienten gesprochen [41]. Ein Altersunterschied war hierbei kaum ersichtlich (mit Kompartmentsyndrom circa 12 Jahre, ohne Kompartmentsyndrom circa 11 Jahre) [41], insgesamt aber auch hier älter als in der verglichenen Gruppe.

Ein Zusammenhang mit dem in diesen Fällen höher liegenden Alter könnte an dem teils rapide steigenden Muskelvolumen sowie der fehlenden Dehnbarkeit der Faszien gegen Ende des Wachstums im Adoleszentenalter liegen. Dadurch ist der intrakompartimentelle Druck bereits ohne Trauma im Vergleich erhöht [4,58,59]. Danach, stellten McQueen et al. (1996) fest, sei das Risiko für ein Kompartmentsyndrom wiederum abnehmend [60].

Da das Alter bei den Patienten dieser Arbeit im Schnitt deutlich niedriger lag und davon auszugehen ist, dass ein steigendes Muskelvolumen sowie ein bereits beendetes Wachstum der Faszien unwahrscheinlich sind, könnte dies ein möglicher protektiver Punkt in Bezug auf die Entwicklung eines Kompartmentsyndroms darstellen.

Pandya et al. (2011) wiederum werten die Volumenerhöhung als Folge der tendenziell vorliegenden Adipositas ihres Kollektivs und nicht als Folge der Muskelzunahme im Adoleszentenalter [41]. Die Gruppe der Patienten nach ESIN-Therapie, welche ein Kompartmentsyndrom entwickelt haben, sowie die Gruppe ohne Kompartmentsyndrom war hierbei annähernd gleich alt. Das Gewicht unterschied sich allerdings deutlich, weshalb von Pandya et al. (2011) dahingehend ein Zusammenhang angenommen wurde. Hier wurde die Grenze der gefährdeten Patientengruppe für Patienten über 50 Kilogramm nach ESIN-Therapie gesetzt [41].

Das Gewicht des in dieser Arbeit betrachteten Kollektivs lag im Schnitt bei 38,75 kg. Dabei gab es insgesamt 27 Kinder, die zum Unfallzeitpunkt über 50 kg wogen, von

denen sieben eine ESIN-Therapie erhielten. Durch die geringe Fallzahl an Probanden mit einem Körpergewicht über 50 kg ist die Aussagekraft eingeschränkt.

Aufgrund der unvollständigen Datenlage konnte im vorliegenden Patientenkollektiv nur bei 38 Patienten ein BMI berechnet werden, dieser lag im Mittel bei 18,77 kg/m², somit waren die Patienten im Schnitt normgewichtig. Aufgrund der unterschiedlichen Datensätze war eine Vergleichbarkeit und mögliche Auswirkungen hinsichtlich des Einflusses bei Vorliegen einer Adipositas nur schwer möglich.

Ein weiterer zu beachtender Aspekt, welcher im Zusammenhang mit dem Alter stehen kann, ist die Ursache und die Schwere des Unfalls sowie die daraus abzuleitende Schwere der Verletzung. Shore et al. (2013) beschrieben den Zusammenhang zwischen steigendem Alter (speziell Kinder über 14 Jahren) und Hochgeschwindigkeitsunfällen sowie das steigende Risiko eines Kompartmentsyndroms. Eine Unterscheidung erfolgte nach high velocity (MVA) und low velocity (Sport, Sturz) [7]. Auch Ferlic et al. (2012) sahen eine Häufung der Kompartmentsyndrome nach Hochrasanztraumata (25 von 31) im Vergleich zur Niedrigrasanztraumata [53], wobei bis auf die Nennung von Motorradunfällen keine genauere Definition von Hochrasanztraumata erfolgte. Pandya et al. (2016) stellten ebenfalls diesen Zusammenhang fest und sahen Kompartmentsyndrome als Folge der stärkeren Weichteilverletzung sowie der Frakturfixation mittels ESIN unter erschwerten Bedingungen [27].

Flynn et al. (2011) sehen den Großteil (83%) ihrer Kompartmentsyndrome als Folge eines Motorradunfalls, wobei die Kinder in 91% der Fälle als Fußgänger oder Fahrradfahrer erfasst wurden, der Rest war Mitfahrer in einem Auto [3].

Im Patientenkollektiv dieser Arbeit waren gut die Hälfte der Verletzungen Sportunfälle, in den meisten Fällen durch Fußballspielen oder Skifahren verursacht. Als zweitgrößter Punkt sind Stürze zumeist mittelhoher Fallhöhe zu nennen, bevor an dritter Stelle motorisierte Unfälle bei circa jedem zehnten Unfallgeschehen ursächlich waren. Diese motorisierten Unfälle entsprechen, angelehnt an die zuvor genannten Arbeiten, unter anderem von Shore et al. (2013), der Kategorie des Hochrasanztraumas. Sport- und nicht-motorisierte Unfälle sowie Stürze entsprechen der Kategorie des Niedrigrasanztraumas. Diese machen somit den Großteil der Unfallursache aus. Die Zahl, in der ein Hochrasanztrauma ursächlich war, ist bedeutend geringer.

In Zusammenhang mit dem Alter und einer eventuellen Schwere des Unfallhergangs kann auch ein Bezug zur Schwere der Verletzung gezogen werden. So lassen sich möglicherweise auch erhöhte Kompartmentsyndrom-Zahlen in Zusammenhang mit den bestimmten Therapien bringen.

Pandya et al. (2011) zogen bei ihrer Patientengruppe mit Kompartmentsyndrom nach ESIN den Schluss, dass nicht der Unfallmechanismus an sich ein Risiko für die Entwicklung eines Kompartmentsyndroms darstellt, sondern die mitverursachten Weichteilschäden [41]. Zudem ließ sich zeigen, dass durch die intramedulläre Nagelung der intrakompartimentelle Druck, aber nicht das Risiko für ein Kompartmentsyndrom ansteigt [17]. Auch wenn verschiedene Arbeiten teils Kompartmentsyndrome in bis zu 32% der Fälle mit ESIN aufzeigen, ist unklar, ob diese erst nach einer elastischen intramedullären Marknagelung oder schon präoperativ entstanden [27]. Bei Sankar et al. (2007) war die Dermatofasziotomie bei 3 von 4 der pädiatrischen Patienten mit Kompartmentsyndrom vor der eigentlichen operativen Versorgung der Fraktur erfolgt [61].

Bei Shore et al. (2013) wurde, unabhängig von der gewählten operativen Technik, in 80% der Fälle die Diagnose Kompartmentsyndrom präoperativ gestellt. Bei 4 der 25 Patienten wurde intraoperativ die Diagnose gestellt [7].

Durch eine höhere Krafteinwirkung während des Unfallhergangs entstehen oftmals komplexere Frakturen [41].

Sind mehrere Repositionsmanöver im Rahmen der ESIN-Osteosynthese erforderlich, führt das zu einer Weichteilschädigung und zunehmender Schwellung [27]. Gerade Patienten mit schwierigen anatomischen Bedingungen (Gewicht) [27] als auch komplexeren Frakturen begünstigen erschwerte Operationsbedingungen und provozieren so Fehlversuche [41].

Bei McQueen et al. (2000) zeigte sich bei mehr als doppelt so vielen erwachsenen Patienten mit Fixateur externe (12,2%) die Entstehung eines Kompartmentsyndroms als bei Patienten mit intramedullärer Nagelung (5,5%) [58].

Geht man erneut davon aus, dass komplexere Frakturen das Risiko eines Kompartmentsyndroms erhöhen und die bevorzugte Technik bei komplexen Frakturen der Fixateur externe ist, könnte ein Zusammenhang vermutet werden.

Betrachtet man nun das vorliegende Patientenkollektiv, zeigte sich in über 60% der Fälle ein konservatives Vorgehen. Hinsichtlich des Vorliegens einer dislozierten gegenüber einer nichtdislozierten Fraktur, zeigt sich eine annähernd gleiche

Verteilung. Insgesamt kann allerdings von überwiegend unkomplizierten Frakturen mit wenig Weichteilschädigung und anschließend erforderlicher geringer zusätzlicher Manipulation ausgegangen werden.

Dass eine komplexe Fraktur mittels Fixateur externe operativ versorgt werden musste, gab es im vorliegenden Kollektiv nicht. Die Verteilung bezüglich der weiteren operativen Therapie zeigte in gut einem Viertel der Frakturen eine elastisch stabile intramedulläre Nagelung. Deutlich weniger häufig war eine Kirschner-Draht-Osteosynthese oder Schraubenosteosynthese erfolgt.

Betrachtet man zuletzt den Zeitraum zwischen Unfallgeschehen und Erstvorstellung in der Notaufnahme, zeigt sich, dass im Mittel 9,3464 Stunden vergangen sind. Bei Flynn et al. (2011) erfolgte die Diagnosestellung im Schnitt 18,2 Stunden nach Trauma [3]. Auch bei Ferlic et al. (2012) spricht man ohne statistische Signifikanz von einer durchschnittlichen Zeitspanne von circa 19 Stunden, nach Hochrasanztraumata sogar im Mittel nach 17 Stunden bis zur Diagnosestellung [53]. Allerdings zeigte sich bei dem Kollektiv dieser Arbeit eine Spannbreite von 2,38 Stunden bis maximal 313,93 Stunden bis zur Erstvorstellung, sodass wir hieraus keine Schlüsse ziehen können, dass rechtzeitig Maßnahmen ergriffen wurden.

Werden Kompartmentsyndrome fälschlicherweise zu häufig diagnostiziert? Findet zu schnell eine Dermatofasziotomie statt?

Um die Diagnose eines Kompartmentsyndroms und damit die Indikation für eine Dermatofasziotomie zu stellen, bedarf es der korrekten klinischen Einschätzung. Wie bereits genannt, sind vor allem in der Erwachsenenmedizin die klinischen Anzeichen der sechs P's geläufig. Schon durch mehrere Autoren wurde die Übertragung in die Kinder- und Jugendmedizin als kritisch erachtet, da für die zuverlässige Einschätzung nicht nur geschultes Personal erforderlich ist, sondern auch die Einschätzung und Mitarbeit des Patienten [5,31]. Gerade bei jüngeren Patienten stellt dies oftmals eine große Herausforderung aufgrund der eingeschränkten Kooperationsfähigkeit dar [4,19].

Um diese Problematik zu umgehen, wurde bei pädiatrischen Patienten häufig der Fokus auf die Bewertung der drei A's gelegt. Hierbei erhofft man sich, aufgrund einer objektivierbareren und einfacheren Detektion eine frühzeitigere Diagnosestellung zu erreichen und somit wichtige Zeit bis zur Dermatofasziotomie zu gewinnen.

Die Problematik, die sich bei beiden klinischen Beurteilungsansätzen ergibt, ist, dass in keinem der Fälle eine Objektivierbarkeit möglich ist.

In Arbeiten [3,39], welche eine klinische Einschätzung orientierend an den sechs P's durchgeführt haben, zeigt sich, dass ein gleichzeitiges Vorliegen dieser Anzeichen bereits für ein weit fortgeschrittenes Kompartmentsyndrom mit der Gefahr der irreversiblen Schädigung vorliegt. In der kritischen Zeit davor, in welcher man die Diagnose stellen möchte, sind selten alle Anzeichen zeitgleich vorhanden. Meist liegen zwei oder drei Symptome gleichzeitig vor, bei Bae et al. (2001) lagen in dreiviertel dieser Fälle Schmerzen zusammen mit einem oder zwei weiteren Symptomen vor [39]. Eine Kompartmentsyndrom-Überwachung erfordert daher ein gutes klinisches Urteilsvermögen. Auch Ulmer (2002) hinterfragte die Zuverlässigkeit dieser Anzeichen und stellte eine niedrige Sensitivität und positiv prädiktiven Wert fest, wohingegen Spezifität und negativ prädiktiver Wert hoch sind. Somit ist es einfacher, durch fehlende klinische Zeichen ein Kompartmentsyndrom auszuschließen, als dieses durch vorhandene Klinik zu bestätigen [62].

Betrachtet man nun die für die Pädiatrie empfohlenen drei A's, sind vor allem „agitation“ (Unruhe) und „anxiety“ (Angst) allein von der Einschätzung des Personals abhängig und nicht zu objektivieren. Zudem wird ein steigender Analgetika-Bedarf als Warnsignal für ein drohendes Kompartmentsyndrom deklariert. Aber auch in diesem Fall gibt es keine Möglichkeit, den Analgetika-Bedarf zu objektivieren, da sich Schmerzempfinden, persönliche Schmerztoleranzgrenzen sowie individuelles Ansprechen auf die verschiedenen Analgetika stark unterscheiden können [31]. In einer von Yang et al. (2010) veröffentlichten Arbeit wurde hierbei eine konservative Analgesie mittels fester Maximaldosierung zur frühen Detektion eines drohenden Kompartmentsyndroms festgelegt. Somit konnte dies ein erstes Anzeichen auf das Vorliegen eines Kompartmentsyndromes mehrere Stunden vor Eintreten der ersten klinischen Symptome angelehnt an die sechs P's liefern. Mit klinikinterner Festlegung der Analgesie bei Risikopatienten für ein Kompartmentsyndrom sowie gezielter Dokumentation könnte dies ein objektivierbarer Ansatz für die frühzeitige Detektion sein [45].

Eine Möglichkeit der Objektivierbarkeit stellt die Messung des intrakompartimentellen Drucks dar. Während es in der Erwachsenenmedizin, aufgrund einer besseren Datenlage, konkrete Aussagen hinsichtlich eines Cut-off-Wertes zur

Dermatofasziotomie gibt, findet man hinsichtlich intrakompartimenteller Drücke bei Kindern wenige Zahlen und unterschiedliche Aussagen.

Sowohl die zu erwartenden physiologischen Messwerte unterscheiden sich je nach Literatur und lassen sich schwer vergleichen. Auch die Anwendung in der Praxis erscheint schwierig, da eine Kompartimentdruckmessung gerade von jungen Patienten nicht toleriert und somit in Narkose durchgeführt werden müsste. Keiner dieser Punkte spricht für eine praktikable und gut durchführbare Methode, ein Kompartmentsyndrom in der Akutsituation zuverlässig zu diagnostizieren [3].

Zusammenfassend ist die zeitnahe Diagnosestellung eines Kompartmentsyndroms eine schwierige. Es erfordert sowohl eine engmaschige als auch geschulte Einschätzung durch das Personal als auch eine entsprechende Mitarbeit des Patienten. Eine verspätete oder verpasste Diagnosestellung kann weitreichende Konsequenzen haben. Zu welchem Zeitpunkt die Entscheidung einer Dermatofasziotomie gefällt wird, lässt sich nicht klar nachvollziehen. Daher muss sich auch die Frage stellen, ob die durchgeführten Dermatofasziotomien in jedem Fall notwendig waren, beziehungsweise in welchen Fällen ein beobachtendes Verhalten sowie konservative Maßnahmen ausreichend gewesen wären und eine Dermatofasziotomie irrtümlicherweise durchgeführt wurde.

Wichtig ist hierfür, dass Diagnose sowie Eingriffe dieser Art in entsprechenden fachkundigen Zentren durchgeführt werden. Gerade die fehlende Literatur und nicht ausreichende Kenntnisse und Erfahrungen bezüglich zu beachtender Unterschiede von Kompartmentsyndromen, speziell bei Kindern im Vergleich zu Erwachsenen, bieten das Risiko für möglicherweise übereilte Entscheidungen zur Dermatofasziotomie.

Nachteile und Limitationen dieser Arbeit

Durch die Retrospektivität dieser Arbeit war es nur möglich, die bereits vorhandenen Daten zu sammeln und zu nutzen. Aus diesem Grund musste die Analyse, wie oben erläutert, mit unvollständigen Daten auskommen. Insgesamt ist hierbei lediglich das Ziel, mögliche Kausalzusammenhänge anhand der vorhandenen Daten aufzuzeigen. Neue Fragestellungen sowie die gezielte Informationserhebung zur Beantwortung dieser, ist nicht möglich.

Die Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen anderer Studien ist aufgrund der sich oftmals unterscheidenden Patientengruppen und Studiendesigns eingeschränkt, bei der Beurteilung dieser sollte dies beachtet werden.

In der durchgeführten Nachuntersuchung sowie dem anschließenden Gespräch ist zu beachten, dass durch den teils großen zeitlichen Abstand des follow-ups zum eigentlichen stationären Aufenthalt von unvollständigen Erinnerungen des Patienten ausgegangen werden muss. Zudem waren nur 41 von 75 der zuvor eingeschlossenen Probanden auch für ein Interview und eine Nachuntersuchung bereit.

Das Patientenkollektiv stellte mit 75 Probanden in sechs Jahren eine eher kleine Patientengruppe dar. Durch eine größere Fallzahl könnte man die Aussagekraft erhöhen, dazu wäre ein längerer Zeitraum der Datenerhebung oder eine Ausweitung der Einschlusskriterien erforderlich.

Für zukünftige Studien könnte durch ein prospektives Studiendesign eine gezieltere Datenerhebung erfolgen. Durch eine zum Zeitpunkt des Einschlusses der Patienten durchgeführte Vorstellung der Studie sowie aktive Zusage des Patienten zur Beteiligung an weiteren Untersuchungen könnte zudem die Zahl an Personen, welche sich für ein follow-up bereiterklären, erhöht werden.

Aus dem Studiendesign, den Ergebnissen und besonders den damit verbundenen Limitationen dieser Arbeit geht hervor, dass in zukünftigen Studien eine genauere Betrachtung und Differenzierung der Probanden anhand des Alters, des Gewichts und der Dauer bis zur Erstvorstellung nach stattgehabtem Unfall von Interesse sein könnten. Zudem zeigen die Ergebnisse dieser Untersuchung, dass in der Konzeption zukünftiger Arbeiten die genauere Abfrage der drei A's sinnvoll erscheint.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Querschnitt Unterschenkel, Höhe Übergang mittleres zu distalem Drittel, Darstellung der vier Kompartimente und entsprechender Nerven [16].....	12
Abbildung 2: Kompartimente des Unterschenkels [17]	12
Abbildung 3: Auswirkung veränderter Druckverhältnisse in den Kapillaren [6].....	20
Abbildung 4: Pathophysiologie Kompartmentsyndrom [36]	21
Abbildung 5: Unilateraler Schnitt nach Matsen [47]	27
Abbildung 6: Bilateraler Schnitt nach Mubarak [47]	28
Abbildung 7: Flussdiagramm Patienten Nachuntersuchung	33
Abbildung 8: Einteilung der Unfallkategorien und Häufigkeit	40
Abbildung 9: Diagnose gemäß ICD-10-GM Version 2018	41
Abbildung 10: Initiale Versorgung/Therapie.....	42
Abbildung 11: Analgetikagebrauch gemäß WHO-Stufenschema	44

Literaturregister

1. Richard von Volkmann, Übersetzung ins Englische durch Edgar M. Bick. Ischaemic Muscle, Paralyses and Contractures. 1881. doi:10.1097/BLO.0b013e318032561f Cited in: PubMed; PMID 17496749.
2. Mühlbacher J, Klinger M. Das Kompartmentsyndrom des Unterschenkels CE Diagnostik und Therapie. Zeitschrift für Gefäßmedizin. 2013;(10(2)):7-14.
3. Flynn JM, Bashyal RK, Yeger-McKeever M, Garner MR, Launay F, Sponseller PD. Acute traumatic compartment syndrome of the leg in children: diagnosis and outcome. J Bone Joint Surg Am. 2011;93(10):937–41. doi:10.2106/JBJS.J.00285 Cited in: PubMed; PMID 21593369.
4. Livingston KS, Glotzbecker MP, Shore BJ. Pediatric Acute Compartment Syndrome. J Am Acad Orthop Surg. 2017;25(5):358–64. doi:10.5435/JAAOS-D-15-00655 Cited in: PubMed; PMID 28323644.
5. Hosseinzadeh P, Talwalker VR. Compartment Syndrome in Children: Diagnosis and Management. The American Journal of Orthopedics. 2016;19–22.
6. Szyszkowitz R, Reschauer R. 33. Ätiologie, Pathophysiologie und anatomische Lokalisationen des Kompartmentsyndroms. Langenbecks Archiv für Chirurgie. 1982;358(1):215–9. doi:10.1007/BF01271785
7. Shore BJ, Glotzbecker MP, Zurakowski D, Gelbard E, Hedequist DJ, Matheney TH. Acute compartment syndrome in children and teenagers with tibial shaft fractures: incidence and multivariable risk factors. J Orthop Trauma. 2013;27(11):616–21. doi:10.1097/BOT.0b013e31828f949c Cited in: PubMed; PMID 23481923.
8. Kraus R, Schneidmüller D, Röder C. Häufigkeit von Frakturen der langen Röhrenknochen im Wachstumsalter. Deutsches Ärzteblatt. 2005;102(12):A 838–842.
9. Gothe fors M, Wolf O, Hailer YD. Epidemiology and treatment of pediatric tibial fractures in Sweden: a nationwide population-based study on 5828 fractures from the Swedish Fracture Register. Eur J Trauma Emerg Surg. 2023;49(2):911–9. doi:10.1007/s00068-022-02157-w Cited in: PubMed; PMID 36334101.
10. Mashru RP, Herman MJ, Pizzutillo PD. Tibial shaft fractures in children and adolescents. Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons. 2005;13(5):345–52. doi:10.5435/00124635-200509000-00008 Cited in: PubMed; PMID 16148360.
11. Kreis CA-A, Wähnert D, Raschke M. Schaftfrakturen – untere Extremitäten [Shaft Fractures of the Lower Extremity]. OP-Journal. 2018;34(03):220–30. DE. doi:10.1055/a-0623-8729
12. Strohm PC. Diametaphysäre Unterschenkelfraktur. Trauma Berufskrankh. 2018;20(S1):9–11. doi:10.1007/s10039-017-0324-0

13. Joeris A, Lutz N, Wicki B, Slongo T, Audigé L. An epidemiological evaluation of pediatric long bone fractures - a retrospective cohort study of 2716 patients from two Swiss tertiary pediatric hospitals. *BMC Pediatr.* 2014;14:314. doi:10.1186/s12887-014-0314-3 Cited in: PubMed; PMID 25528249.
14. Hedström EM, Svensson O, Bergström U, Michno P. Epidemiology of fractures in children and adolescents. *Acta Orthop.* 2010;81(1):148–53. doi:10.3109/17453671003628780 Cited in: PubMed; PMID 20175744.
15. Mau H. Kompartiment-Syndrome der unteren Extremitäten. *Z. Orthop.* 1982;202–6. doi:10.1055/s-2008-1051600
16. Mubarak SJ, Pedowitz RA, Hargens AR. Compartment syndromes. *Curr Orthop.* 1989;336–40. Cited in: PubMed; PMID 11537166.
17. Frink M, Hildebrand F, Krettek C, Brand J, Hankemeier S. Compartment Syndrome of the Lower Leg and Foot. *Clin Orthop Relat Res.* 2009;468(4):940–50. doi:10.1007/s11999-009-0891-x Cited in: PubMed; PMID 19472025.
18. Kalka C. Anatomie der Arterien: Untere Extremität. *Phlebologie.* 2020;49(06):363–77. doi:10.1055/a-1246-4236
19. Patel NK, Horstman J, Kuester V, Sambandam S, Mounasamy V. Pediatric Tibial Shaft Fractures. *Indian J Orthop.* 2018;52(5):522–8. doi:10.4103/ortho.IJOrtho_486_17 Cited in: PubMed; PMID 30237610.
20. Trepel M. Neuroanatomie: Struktur und Funktion. 5th ed. München: Urban & Fischer; 2012. 420 p.
21. Mattle H. Kurzlehrbuch Neurologie. 3rd ed. Stuttgart, New York: Thieme; 2010. 440 p. (Kurzlehrbücher).
22. ICD-10-GM Version 2020, Systematisches Verzeichnis, Internationale statistische Klassifikation der Krankheiten und verwandter Gesundheitsprobleme, 10. Revision, Stand: 22. September 2017 [Internet]. Köln. 2017. Available from: https://www.bfarm.de/SharedDocs/Downloads/DE/Kodiersysteme/klassifikation/en/icd-10-gm/vorgaenger-bis-2020/icd10gm2018_zip
23. Fernandez FF, Eberhardt O. Klassifikationen von Frakturen im Kindesalter. *Trauma Berufskrankh.* 2010;12(S3):323–8. doi:10.1007/s10039-009-1586-y
24. Rahmanzadeh R, Breyer H-G, editors. Verletzungen der unteren Extremitäten bei Kindern und Jugendlichen: 8. Steglitzer Unfalltagung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 1990. 349150 p. ger.
25. Fernandez FF. Unterschenkelschaftfrakturen. *Trauma Berufskrankh.* 2016;18(S4):398–403. doi:10.1007/s10039-016-0152-7
26. Martus JE. Operative Fixation Versus Cast Immobilization: Tibial Shaft Fractures in Adolescents. *J Pediatr Orthop.* 2021;41(Suppl 1):S33-S38. doi:10.1097/BPO.0000000000001806 Cited in: PubMed; PMID 34096535.

27. Pandya NK. Flexible Intramedullary Nailing of Unstable and/or Open Tibia Shaft Fractures in the Pediatric Population. *J Pediatr Orthop.* 2016;36 Suppl 1S19-23. doi:10.1097/BPO.0000000000000754 Cited in: PubMed; PMID 27078231.
28. Heyde C-E, Kayser R, Böhm H. Das Kompartmentsyndrom der Extremitäten. *Notarzt.* 2002;18(2):46–51. doi:10.1055/s-2002-25243
29. Osteosyntheseverfahren in der Kinder- und Jugendtraumatologie [Internet]. 2021 [updated 2021 Oct 9; cited 2021 Oct 9]. Available from: <https://www.online-oup.de/article/osteosyntheseverfahren-in-der-kinder-und-jugendtraumatologie/uebersichtsarbeiten/y/m/363?pageNumber=0> de.
30. Grottkau BE, Epps HR, Di Scala C. Compartment syndrome in children and adolescents. *J Pediatr Surg.* 2005;40(4):678–82. doi:10.1016/j.jpedsurg.2004.12.007 Cited in: PubMed; PMID 15852278.
31. Mar GJ, Barrington MJ, McGuirk BR. Acute compartment syndrome of the lower limb and the effect of postoperative analgesia on diagnosis. *Br J Anaesth.* 2009;102(1):3–11. doi:10.1093/bja/aen330 Cited in: PubMed; PMID 19022795.
32. Seifert J, Matthes G, Stengel D, Hinz P, Ekkernkamp A. Kompartmentsyndrom. Trauma und Berufskrankheit. 2002;4(1):101–6. doi:10.1007/s10039-002-0573-3
33. Willis RB, Rorabeck CH. Treatment of compartment syndrome in children. *Orthop Clin North Am.* 1990;21(2):401–12. Cited in: PubMed; PMID 2183136.
34. Tscherne H, Gotzen L, editors. *Fractures with Soft Tissue Injuries.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 1984. eng.
35. Lanz U, Schott H. 302. Ischämische Muskelnekrosen. *Langenbecks Archiv für Chirurgie.* 1979;349(1):628. doi:10.1007/BF01729763
36. Green DP, Hotchkiss RN, Pederson WC, Wolfe SW, Kozin SH, Cohen MS, editors. *Green's operative hand surgery.* 4th ed. Philadelphia, Pa.: Elsevier Churchill Livingstone; 1998. 1763-1787. eng.
37. Moore RE, Friedman RJ. Current concepts in pathophysiology and diagnosis of compartment syndromes. *The Journal of Emergency Medicine.* 1989;7(6):657–62. doi:10.1016/0736-4679(89)90015-2
38. Staudt JM, Smeulders MJC, van der Horst CMAM. Normal compartment pressures of the lower leg in children. *J Bone Joint Surg Br.* 2008;90(2):215–9. doi:10.1302/0301-620X.90B2.19678 Cited in: PubMed; PMID 18256091.
39. Bae DS, Kadiyala RK, Waters PM. Acute Compartment Syndrome in Children: Contemporary Diagnosis, Treatment, and Outcome. *Journal of Pediatric Orthopaedics.* 2001;21(5):680–8. doi:10.1097/01241398-200109000-00025
40. Janzing H, Broos P. Routine monitoring of compartment pressure in patients with tibial fractures: beware of overtreatment! *Injury.* 2001;32(5):415–21. doi:10.1016/S0020-1383(01)00005-5
41. Pandya NK, Edmonds EW, Mubarak SJ. The incidence of compartment syndrome after flexible nailing of pediatric tibial shaft fractures. *J Child Orthop.*

- 2011;5(6):439–47. doi:10.1007/s11832-011-0374-y Cited in: PubMed; PMID 23205145.
42. Noonan KJ, McCarthy JJ. Compartment Syndromes in the Pediatric Patient. *Journal of Pediatric Orthopaedics*. 2010;30S96-S101. doi:10.1097/BPO.0b013e3181d07118
 43. Thomas E. Whitesides, Jr, MD, and Michael M. Heckman, MD. Acute Compartment Syndrome: Update on Diagnosis and Treatment.
 44. McQueen MM, Court-Brown CM. Compartment monitoring in tibial fractures. The pressure threshold for decompression. *J Bone Joint Surg Br*. 1996;78(1):99–104. Cited in: PubMed; PMID 8898137.
 45. Yang J, Cooper MG. Compartment syndrome and patient-controlled analgesia in children--analgesic complication or early warning system? *Anaesth Intensive Care*. 2010;38(2):359–63. doi:10.1177/0310057X1003800219 Cited in: PubMed; PMID 20369773.
 46. Mubarak SJ, Wilton NC. Compartment syndromes and epidural analgesia. *Journal of Pediatric Orthopaedics*. 1997;17(3):282–4. Cited in: PubMed; PMID 9150011.
 47. Jäger C. EV. Das Kompartmentsyndrom. *Orthopädie und Unfallchirurgie up2date*. 2007;203–24. doi:10.1055/s-2007-966732
 48. Limerick G, Christo DK, Tram J, Moheimani R, Manor J, Chakravarthy K, Karri J, Christo PJ. Complex Regional Pain Syndrome: Evidence-Based Advances in Concepts and Treatments. *Curr Pain Headache Rep*. 2023;27(9):269–98. doi:10.1007/s11916-023-01130-5 Cited in: PubMed; PMID 37421541.
 49. Shim H, Rose J, Halle S, Shekane P. Complex regional pain syndrome: a narrative review for the practising clinician. *Br J Anaesth*. 2019;123(2):e424–e433. doi:10.1016/j.bja.2019.03.030 Cited in: PubMed; PMID 31056241.
 50. Taylor S-S, Noor N, Urits I, Paladini A, Sadhu MS, Gibb C, Carlson T, Myrcik D, Varrassi G, Viswanath O. Complex Regional Pain Syndrome: A Comprehensive Review. *Pain Ther*. 2021;10(2):875–92. doi:10.1007/s40122-021-00279-4 Cited in: PubMed; PMID 34165690.
 51. Sellei RM, Hildebrand F, Pape H-C. Das akute Kompartmentsyndrom der Extremitäten. *Unfallchirurg*. 2014;117(7):633–49. doi:10.1007/s00113-014-2610-7
 52. Dover M, Memon AR, Marafi H, Kelly G, Quinlan JF. Factors associated with persistent sequelae after fasciotomy for acute compartment syndrome. *J Orthop Surg (Hong Kong)*. 2012;20(3):312–5. doi:10.1177/230949901202000309 Cited in: PubMed; PMID 23255636.
 53. Ferlic PW, Singer G, Kraus T, Eberl R. The acute compartment syndrome following fractures of the lower leg in children. *Injury*. 2012;43(10):1743–6. doi:10.1016/j.injury.2012.06.025

54. Erdös J, Dlaska C, Szatmary P, Humenberger M, Vécsei V, Hajdu S. Acute compartment syndrome in children: a case series in 24 patients and review of the literature. *International Orthopaedics*. 2011;35(4):569–75.
doi:10.1007/s00264-010-1016-6 Cited in: PubMed; PMID 20401657.
55. Fitzgerald AM, Gaston P, Wilson Y, Quaba A, McQueen MM. Long-term sequelae of fasciotomy wounds. *Br J Plast Surg*. 2000;53(8):690–3.
doi:10.1054/bjps.2000.3444 Cited in: PubMed; PMID 11090326.
56. Janda V. Muscle function testing. 1st ed. London u.a.: Butterworth; 1983. 230 p.
57. Weissmann R, Uziel Y. Pediatric complex regional pain syndrome: a review. *Pediatr Rheumatol*. 2016;14(1). doi:10.1186/s12969-016-0090-8 Cited in: PubMed; PMID 27130211.
58. McQueen MM, Gaston P, Court-Brown CM. Acute compartment syndrome. Who is at risk? *J Bone Joint Surg Br*. 2000;82(2):200–3. Cited in: PubMed; PMID 10755426.
59. Court-Brown C, Byrnes T, McLaughlin G. Intramedullary nailing of tibial diaphyseal fractures in adolescents with open physes. *Injury*. 2003;34(10):781–5. doi:10.1016/S0020-1383(03)00060-3
60. McQueen MM, Christie J, Court-Brown CM. Acute compartment syndrome in tibial diaphyseal fractures. *J Bone Joint Surg Br*. 1996;78(1):95–8. Cited in: PubMed; PMID 8898136.
61. Sankar WN, Jones KJ, David Horn B, Wells L. Titanium elastic nails for pediatric tibial shaft fractures. *J Child Orthop*. 2007;1(5):281–6.
doi:10.1007/s11832-007-0056-y Cited in: PubMed; PMID 19308521.
62. Ulmer T. The Clinical Diagnosis of Compartment Syndrome of the Lower Leg: Are Clinical Findings Predictive of the Disorder? *J Orthop Trauma*. 2002;16(8):572–7. doi:10.1097/00005131-200209000-00006

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich von Herzen allen Personen danken, die mich bei der Entstehung dieser Dissertationsarbeit begleitet und unterstützt haben.

Prof. Dr. Hans J. Schlitt für die Möglichkeit, am Lehrstuhl für Chirurgie der Universität Regensburg zu promovieren.

PD Dr. Christian Knorr für die Bereitstellung des Patientenkollektivs und der Daten aus der Klinik für Kinderchirurgie und Kinderorthopädie sowie die Durchsicht und das Korrekturlesen dieser Arbeit und daraus entstandene konstruktive Kritik.

Besonderer Dank geht an Dr. Michael Kertai für die große Unterstützung bei der Ausarbeitung und Gestaltung dieser Arbeit und dass er über die Jahre für alle aufgekommenen Fragen ein hilfsbereiter und zuverlässiger Ansprechpartner war.

Den jungen Patienten sowie deren Eltern, die sich die Zeit genommen haben, an meiner Studie teilzunehmen und somit einen wichtigen Teil dieser Arbeit ermöglicht haben.

Zuletzt möchte ich meinen Freunden und besonders meiner Familie für ihre bedingungslose Unterstützung, die Motivation und all den Rückhalt, den ich während des Studiums und auch danach erleben durfte, danken. Ohne euch wäre das nicht möglich gewesen.