

Aus der Klinik für Unfallchirurgie, Orthopädie und Plastische Chirurgie

Prof. Dr. med. W. Lehmann

der Medizinischen Fakultät der Universität Göttingen

**Korrektureffekte der subtalaren
Arthrorise mittels Sinus-tarsi-Implantat
bei der Behandlung des kindlichen
Knick-Senkfußes**

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung des Doktorgrades

der Medizinischen Fakultät der

Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von

Lara Odny Eysel

aus

Ratingen

Göttingen 2021

Dekan: Prof. Dr. med. W. Brück

Betreuungsausschuss

Betreuer/in: Prof. Dr. med. A.-K. Hell

Ko-Betreuer/in: Prof. Dr. med. T. Beil /Prof. Dr. med. J. Schmolders

Prüfungskommission

Referent/in: Prof. Dr. med. A.-K. Hell

Ko-Referent/in: Prof. Dr. med. G. Lewinski

Drittreferent/in: Prof. Dr. mult. T. Meyer

Datum der mündlichen Prüfung: 12.05.2022

Hiermit erkläre ich, die Dissertation mit dem Titel "Korrektureffekte der subtalaren Arthrorise mittels Sinus-tarsi-Implantat bei der Behandlung des kindlichen Knick-Senkfußes" eigenständig angefertigt und keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet zu haben.

Göttingen, den
.....
(Unterschrift)

Die Daten, auf denen die vorliegende Arbeit basiert, wurden teilweise publiziert:

Eysel LO, Lüders KA, Braunschweig L, Lorenz HM, Dörner J, Hell AK, Stinus H (2021): Foot Typology, Dynamic and Static Weight Distribution, and Radiographic Changes After Subtalar Arthroereisis in Juvenile Symptomatic Flexible Flat Feet. *J Foot Ankle Sur*

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis.....	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
1 Einleitung	1
1.1 Ätiologie und Pathogenese	1
1.2 Diagnostik	4
1.2.1 Radiologische Parameter.....	7
1.3 Therapieindikationen des kindlichen KSF	10
1.4 Fragestellung und Zielsetzung	11
2 Material und Methoden	12
2.1 Ethikkommission und Studiendesign	12
2.1.1 Einschluss- und Ausschlusskriterien.....	12
2.2 Diagnostik	13
2.3 Operationsverfahren der Arthrorise	14
2.3.1 Nachbehandlung	19
2.4 Nachuntersuchung.....	20
2.4.1 Datenerhebung.....	20
2.4.2 American Orthopaedic Foot and Ankle Society (AOFAS) Fragebogen.....	21
2.4.3 Podometrische Untersuchung.....	25
2.4.4 Dynamische Pedobarographie	26
2.4.5 <i>Laser Assisted Static Alignment Reference (L.A.S.A.R.) posture</i> der Firma Otto Bock HealthCare GmbH	29
2.4.6 Datenauswertung und Statistik	30
3 Ergebnisse	31
3.1 Patientendemographie.....	31
3.1.1 Komplikationen.....	35
3.2 Gesundes Vergleichskollektiv	35
3.3 American Orthopaedic Foot and Ankle Society (AOFAS) Fragebogen.....	36
3.4 Radiologische Parameter.....	39
3.5 Podometrische Untersuchung.....	40
3.6 Dynamische Pedobarographie	40
3.7 <i>Laser Assisted Static Alignment Reference (L.A.S.A.R.) posture</i> der Firma Otto Bock HealthCare GmbH	49
4 Diskussion	50
4.1 Komplikationen.....	50
4.2 Vergleich der prä- und postoperativen Datensätze des AOFAS Fragebogens.....	51

4.3	Vergleich der prä- und postoperativen radiologischen Parameter	51
4.4	Die dynamische Pedobarographie.....	52
4.5	Limitationen der Studie.....	56
4.6	Therapeutische Konsequenzen im Ausblick	57
5	Zusammenfassung.....	59
6	Anhang.....	61
7	Literaturverzeichnis	65

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Schematische Darstellung der knöchernen Strukturen eines rechten Fußes.....	3
Abbildung 2 Aufnahme eines Fersenvalgus mit vergrößertem Winkel.....	5
Abbildung 3 Testung des funktionellen Zehenspitzenstandes bei KSF auf dem <i>L.A.S.A.R. posture</i> der Firma Otto Bock HealthCare GmbH (Duderstadt).....	6
Abbildung 4 Durchführung des „Jack-Tests“.....	6
Abbildung 5 Der TMT-I-Winkel in seitlicher Ansicht.....	8
Abbildung 6 Der TMTB-I-Winkel in a.p. Aufnahme.....	9
Abbildung 7 Bestimmung des <i>Calcaneal pitch (CP)</i> in seitlicher Projektion.....	10
Abbildung 8 Darstellung des Bereiches unterhalb des Processus anterior calcanei intraoperativ und am Präparat.....	15
Abbildung 9 Hautschnitt und Eröffnung des Präparationsgebietes.....	16
Abbildung 10 Einführung des Führungsdrahtes in den Tarsalkanal in situ und am Präparat ...	16
Abbildung 11 Darstellung des Einsetzens des Probeimplantates zur Größenbestimmung intraoperativ und am Präparat.....	17
Abbildung 12 Intraoperative Röntgenaufnahme bei einer Arthrorise am rechten Fuß.....	18
Abbildung 13 Darstellung der korrekten Lage des Implantates mit eingezeichneten Hilfslinien.....	18
Abbildung 14 Zustand nach der Entfernung des Probeimplantates.....	19
Abbildung 15 ProStop®-Implantat der Firma Arthrex GmbH (München) beim intraoperativen Einsetzen, sowie die Darstellung der fertigen Implantation.....	19
Abbildung 16 Sagittaler Bewegungsumfang des Fußes.....	24
Abbildung 17 Bewegungsumfang im USG.....	24
Abbildung 18 Achse des Rückfußes bei einem physiologischen Pes rectus, einem Pes valgus und einem Pes varus.....	24
Abbildung 19 eigene Fotografie eines Podometers und eine beispielhafte Aufnahme eines physiologischen Fußabdruckes.....	25
Abbildung 20 Ausprägungsformen eines KFS und die Einteilung in vier Klassen.....	25
Abbildung 21 eigene Fotografien der emed® Fußdruckplattform und der pedobarographischen Messstrecke.....	26
Abbildung 22 eigene Fotografien der Arbeitsbildschirme.....	27
Abbildung 23 Darstellung der Fußeinteilung in zehn Abschnitte aus der emed® Software (novel GmbH, München).....	27
Abbildung 24 Darstellung eines Fußes mit normaler Abrolllinie aus der emed® Software (novel GmbH, München), sowie die Darstellung des Halluxwinkels.....	29
Abbildung 25 Fotografie des <i>L.A.S.A.R. posture</i> Gerätes der Firma Otto Bock HealthCare GmbH (Duderstadt).....	30
Abbildung 26 Darstellung der operierten Füße im Diagramm.....	31
Abbildung 27 Darstellung des mittleren Operationsalters der Patienten*innen im Säulendiagramm.....	32
Abbildung 28 Übersicht über die Metallentfernungen des Patientenkollektives.....	32
Abbildung 29 Darstellung des Gewichtes und Alters der postoperativen Arthrorisegruppe zum Zeitpunkt der Nachuntersuchung und der Vergleichsgruppe.....	36
Abbildung 30 Darstellung der erreichten Gesamtpunktzahl im AOFAS Fragebogen für die präoperative Arthrorisegruppe, die postoperative Arthrorisegruppe und die Vergleichsgruppe.....	37
Abbildung 31 Darstellung der Ergebnisse der signifikanten Steigerung der Teilbereiche Schmerzen, Funktion und Beschwerdefreie Gangstrecke.....	37

Abbildung 32 Darstellung der signifikant veränderten prä- und postoperativ erreichten Punktzahlen beim Gehen über unebene Oberflächen, sowie die Bewertung des Gangbildes	38
Abbildung 33 Auswertung der Teilbereiche sagittale Bewegung, Hinterfußbewegung, Gelenk-Hinterfuß-Stabilität und Hinterfußachse im prä- und postoperativen Vergleich.....	39
Abbildung 34 graphische Darstellung der Ergebnisse der postoperativen podometrischen Fußformbestimmung.....	40
Abbildung 35 Darstellung der pedobarographischen Auswertung der einzelnen Werte der relativen Kontaktzeit für jeden Sensor.....	42
Abbildung 36 Darstellung der pedobarographischen Auswertung der einzelnen Werte der Kraftmaxima in % zum Körpergewicht für jeden Sensor	43
Abbildung 37 Darstellung eines bei der Pedobarographie gemessenen Patientenfußes mit Angabe der einzelnen Werte des Spitzendrucks für jeden Sensor	44
Abbildung 38 Darstellung des Halluxwinkels und des Gewölbeindex der Arthrorisegruppe und der Vergleichsgruppe	45
Abbildung 39 Darstellung der relativen Kontaktfläche für die Ferse, den Mittelfuß, sowie den Vorfuß für die operierten Füße und die nicht operierten Füße.....	46
Abbildung 40 Darstellung der relativen Kontaktfläche für die Ferse, den Mittelfuß, sowie den Vorfuß für die Füße mit Implantat und die Füße ohne Implantat.....	46
Abbildung 41 Darstellung der prä- und postoperativen Abrolllinie	48
Abbildung 42 Darstellung der postoperativen Ergebnisse der <i>L.A.S.A.R. posture</i> Untersuchung	49

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 AOFAS Fragebogen Parameter 1-5.....	21
Tabelle 2 AOFAS Fragebogen Parameter 6-9.....	22
Tabelle 3 Erläuterungen der podometrischen Einteilung (modifiziert nach Hefti und Brunner 1999)	26
Tabelle 4 Darstellung des Patientenkollektives zum Zeitpunkt der Operation und der Nachuntersuchung	33
Tabelle 5 Darstellung der Subgruppe des Patientenkollektives mit Implantat und des Patientenkollektives ohne Implantat	34
Tabelle 6 Darstellung der postoperativen Gruppe zum Zeitpunkt der Nachuntersuchung und der Vergleichsgruppe	35
Tabelle 7 Darstellung der prä- und postoperativen Daten der radiologischen Parameter	39
Tabelle 8 Darstellung der Fußfläche und relativen Kontaktfläche für Vorfuß, Mittelfuß und Ferse von der Arthrorisegruppe und Vergleichsgruppe.....	41
Tabelle 9 Abrolllinien der postoperativen Gruppe zum Zeitpunkt der Nachuntersuchung und der Vergleichsgruppe	47
Tabelle 10 Abrolllinien prä- und postoperativ.....	48
Tabelle A1 Darstellung der Daten der dynamischen Pedobarographie für die Subgruppe von Kindern mit operierten und nicht operierten Fuß	62
Tabelle A2 Darstellung der Daten der dynamischen Pedobarographie für die Subgruppe von Kindern mit Implantat und Kindern mit bereits entferntem Implantat.....	63

Abkürzungsverzeichnis

AOFAS	American Orthopaedic Foot and Ankle Society
a.p.	anterior-posterior
AWMF	Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften
CP	<i>Calcaneal pitch</i> (Calcaneusneigungswinkel)
DGOOC	Deutsche Gesellschaft für Orthopädie und Orthopädische Chirurgie
fKSF	Flexibler Knick-Senk-Fuß
KSF	Knick-Senk-Fuß
L.A.S.A.R.	<i>Laser Assisted Static Alignment Reference</i>
M.	Musculus
MFK	Mittelfußknochen
OSG	Oberes Sprunggelenk
Pkt.	Punkte
ROP	<i>Roll over process</i> (Abrollverhalten)
TMT	Talo-Metatarsale
TMTB	Talo-Metatarsalebasis
UMG	Universitätsmedizin Göttingen
USG	Unteres Sprunggelenk

1 Einleitung

Der flexible Knick-Senk-Fuß (fKSF) ist die häufigste skelettale Störung im Kindesalter, bei der von einer Häufigkeit von 1:1000 im Kindesalter ausgegangen wird (Kuhn et al. 2010; De Pellegrin et al. 2014). Bei Erwachsenen wird eine Prävalenz von 26% beschrieben (Pita-Fernandez 2017). Ein Knick-Senk-Fuß (KSF) ist eine mehrdimensionale Veränderung des Fußes. Charakteristisch für einen KSF sind ein pronierter Rückfuß, ein dorsiflektiertes und außenrotiertes Subtalgelenk, sowie ein abduzierter Mittelfuß und ein supinierter Vorfuß (Mosca 2010). Physiologisch tritt der fKSF in den ersten Lebensjahren auf und korrigiert sich normalerweise bis etwa zum 10. Lebensjahr spontan (Hell et al. 2018). Bestehen Risikofaktoren wie Fettleibigkeit, Muskelinsuffizienzen oder eine erhöhte Elastizität des Bandapparates, kann dies zu einer unzureichenden spontanen Korrektur und Deformation des Fußes führen (Waizy et al. 2013). Nach der aktuellen S2k-Leitlinie „Kindlicher Knick-Senkfuß“ der Deutschen Gesellschaft für Orthopädie und Orthopädische Chirurgie (DGOOC) sollte bei älteren Kindern, deren fKSF sich nicht spontan korrigiert und symptomatisch wird, eine Behandlung eingeleitet werden (DGOOC 2017). Bei ausbleibender Verbesserung nach primär konservativer Therapie mittels Physiotherapie und Einlagen kann eine operative Versorgung notwendig werden. Als operative Behandlungsmöglichkeiten stehen für den fKSF verschiedene chirurgische Methoden wie Calcaneusverlängerungsosteotomien, Sehnentransfer, Arthrodesen oder Calcaneo-Stop-Verfahren zur Verfügung (Evans 1975; Masterson et al. 1994). Eine routinemäßig durchgeführte Operation ist zudem die subtalare Arthrorise. Bei diesem minimalinvasiven Verfahren wird ein Schraubenimplantat in den Sinus tarsi eingeführt, wodurch das Gelenk künstlich blockiert und das Fußgewölbe aufgerichtet werden soll (De Pellegrin 2005). Das Implantat verbleibt normalerweise bis zum Wachstumsabschluss im Fuß und kann danach minimalinvasiv entfernt werden. Indikationen für diese chirurgische Behandlungsmethode, sowie die Prävalenz dieser Technik und erwartete Ergebnisse wurden von Shah et al. (2015) analysiert.

Das Ziel dieser Studie war es, bei Jugendlichen mit einem fKSF die dynamischen und statischen Korrektoreffekte nach einer subtalaren Arthrorise mit gesunden Kinderfüßen zu vergleichen, sowie die Ergebnisse vor und nach der Entfernung des Implantates zu untersuchen.

1.1 Ätiologie und Pathogenese

Die Ätiologie des kindlichen KSF ist multifaktoriell. Neugeborene und Kleinkinder haben in den ersten Lebensjahren physiologisch einen fKSF (Matussek und Linhardt 2013). Da die mediale Aussparung durch ein plantares Fettpolster (Spitzzy-Fettkörper) ersetzt wird, wirken die kindlichen Füße breit und täuschen ein eingesunkenes Längsgewölbe vor (Wagner et al.

2013). Bis zum zweiten Lebensjahr wird daher eine Inzidenz des kindlichen fKSF von 97% beschrieben (Morley 1957). Ab dem zweiten Lebensjahr entwickelt sich das Fettpolster zurück und das Längsgewölbe wird im Sitzen erkennbar (Sullivan 1999; Speth und Hellmich 2017). Mit Beginn des Laufalters muss der Fuß das gesamte Körpergewicht tragen. Ein gesunder Fuß hält das Gewicht im Fußzentrum im Gleichgewicht und wird durch die Muskulatur unterstützt (Whitman 2010). Während der altersphysiologischen Durchgangsstadien zwischen dem dritten und sechsten Lebensjahr wird eine Inzidenz des fKSF von 54% bei Dreijährigen und von 24% bei Sechsjährigen beobachtet (Pfeiffer et al. 2006). Als Erklärung für den kindlichen KSF führen Wachowsky et al. (2017) an, dass bis zum fünften Lebensjahr das Längenwachstum im Fuß schneller ist als im Gesamtkörper. Ein weiterer Faktor bei der Entwicklung des fKSF ist die verstärkte Antetorsion der Schenkelhälfte in dieser Entwicklungsphase der Kinder (Dare und Dodwell 2014). Den dadurch entstehenden Einwärtsgang gleichen die Füße durch eine Valgisierung der Fersen aus (Hefti 2014). Im Normalfall korrigieren sich die Hüften im Laufe der Entwicklung durch eine dynamische Beintorsion und die Füße folgen dieser Korrektur (Speth und Hellmich 2017).

Durch Risikofaktoren wie Übergewicht, Muskelinsuffizienz und erhöhter Elastizität des Bandapparates kann es zu einem Ausbleiben der spontanen Korrektur und einer Verformung des Fußes kommen (Waizy et al. 2013). Häufig fallen die Fußveränderungen erst bei erhöhter sportlicher Aktivität und einem signifikanten Körpergewicht im typischen Alter zwischen sieben bis zehn Jahren auf (Miller 2006; Velasco 2012). Bei Zehnjährigen wird eine Inzidenz von 4% beobachtet (Morley 1957). Jungen scheinen ein höheres Risiko für die Entwicklung eines KSF zu haben (Pfeiffer et al. 2006; Speth und Hellmich 2017).

Pathophysiologisch kommt es beim KSF zu einer vermehrten Innenrotation von Talus und der Malleolengabel. Dabei verliert der Taluskopf die Unterstützung des Calcaneus und gleitet nach medial und plantar. Durch die Talushalswanderung werden das Os naviculare, das Os cuneiforme mediale und der erste Mittelfußknochen (MFK) nach plantar gedrängt, wodurch der Fußinnenrand länger wird. Daraufhin abduziert der Vorfuß im Chopart-Gelenk nach lateral und gerät in eine relative Supinationsstellung zum Rückfuß (Wülker 2015) (Abbildung 1). Der Calcaneus wird nach lateral in eine Valgusstellung gedrängt. Die Ursache liegt in der Regel neben einer ligamentären Laxizität auch in einer unzureichenden muskulären Kontrolle (Wirth et al. 2017). Es besteht kein Handlungsbedarf, solange der Fuß physiologisch abrollt, die Ferse deutlich vom Boden abgehoben werden kann und Schmerzfreiheit besteht.

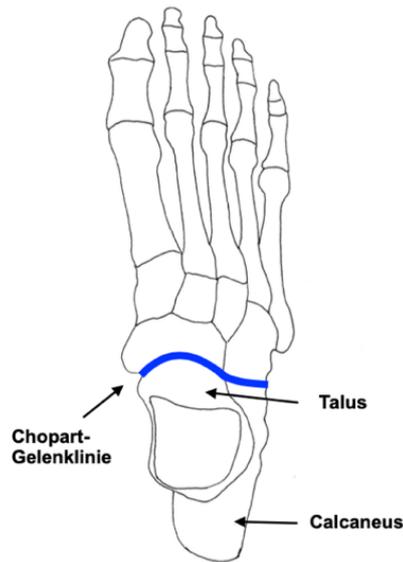


Abbildung 1 Schematische Darstellung der knöchernen Strukturen eines rechten Fußes mit Markierungen des Talus, des Calcaneus und der Chopart-Gelenklinie (modifiziert nach Schünke et al. 2007).

Bei einer ärztlichen Vorstellung von Kindern mit diesen KSF-Charakteristika muss zwischen einem altersentsprechenden, einem beobachtungspflichtigen und einem therapiebedürftigen KSF unterschieden werden. Dabei muss festgehalten werden, ob eine rigide oder flexible Ausprägung vorliegt. Der fKSF ist mit >95% die häufigste Form (Velasco 2012).

Charakteristisch für einen therapiepflichtigen rigiden KSF ist, dass sich das Fußgewölbe im Zehenspitzenstand nicht aufrichtet. Ursachen dafür können eine fehlende Beweglichkeit im unteren Sprunggelenk (USG) durch knöcherne Pathologien (z.B. Coalitiones im Mittelfußbereich, Talus verticalis), syndromale Erkrankungen (z.B. Trisomie 21, Rett-Syndrom) oder sekundäre Pathologien (z.B. Nekrosen, Infektionen) sein (Wagner et al. 2013; Hell et al. 2018).

Ein fKSF kann physiologisch vorliegen oder neurogene Erkrankungen als Ursache haben. Besonders Bindegewebserkrankungen wie z.B. das Marfan-Syndrom oder das Ehlers-Danlos-Syndrom können einen fKSF verursachen. Durch die erhaltene Flexibilität kann sich das Fußgewölbe in den physiologischen Fällen im Zehenspitzenstand mit Varisierung des Rückfußes aufrichten (DGOOC 2017).

KSF können sowohl schmerzlos, als auch schmerzhaft imponieren (Dare und Dodwell 2014). Bei übermäßiger Fehlstellung und Schmerzen ist eine therapeutische Intervention notwendig. Diese sollte vor Beendigung des Fußwachstums eingeleitet werden. Bei Mädchen wird die adulte Fußlänge mit etwa 12 Jahren erreicht, während bei Jungen der Fuß in der Regel bis zum 14. Lebensjahr wächst (Wachowsky et al. 2017).

1.2 Diagnostik

Die meisten Kinder mit einem fKSF werden von ihren Eltern wegen einer auffälligen Fußform bei einem Arzt vorgestellt oder werden bei den pädiatrischen Vorsorgeuntersuchungen diagnostiziert (Harris et al. 2004; De Pellegrin et al. 2014). Ein weiterer Grund für den Arztbesuch kann eine Schmerzsymptomatik sein. Um eine harmlose Fehllhaltung von einer therapiebedürftigen strukturellen Fußdeformität unterscheiden zu können, ist eine zielführende Anamnese und Diagnostik bei kindlichen Fußbeschwerden wichtig (Wachowsky et al. 2017; Hell et al. 2018). Aus diesem Grund wird bei der Erstvorstellung des Kindes eine umfangreiche allgemein pädiatrische Anamnese durchgeführt. Diese beinhaltet eine Familien- und Geburtsanamnese, die Betrachtung der Größen- und Gewichtsentwicklungen, Begleiterkrankungen und sportlichen Aktivitäten (Hell et al. 2018). Anschließend erfolgt eine symptomorientierte Anamnese, bei welcher auch vorangegangene Behandlungen erfragt werden sollten. Für die weitere Diagnostik und Therapieentscheidung sind für den Arzt die Funktion des Fußes sowie das Schmerzempfinden und die Belastungsfähigkeit im Alltag entscheidend. Falls die Kinder Schmerzen empfinden, sollen diese genau beschrieben und klassifiziert werden, um Differentialdiagnosen in Betracht ziehen zu können. Die genaue Lokalisation, die Schmerzausstrahlung, die Dauer und die Schmerzintensität sind dabei wegweisend (Hell et al. 2018). Die Schmerzen bei einem fKSF mit verkürzter Achillessehne äußern sich meistens plantar-medial und im Bereich des Sinus tarsi. Im medialen Rückfuß und im Mittelfuß werden vermehrt Schmerzen bei einem rigiden KSF beklagt. Auch bei Schmerzen über der Tibia, im Knie oder in der Hüfte sollte immer eine Untersuchung der Füße erfolgen. Häufig ist zu beobachten, dass die Schmerzen bei Aktivität zunehmen und sich in Ruhe bessern (Harris et al. 2004; Mosca 2010; Bresnahan und Juanto 2020).

Des Weiteren werden Funktionseinschränkungen im Alltag erfragt. Diese werden deutlich, wenn eine Verschlechterung der Belastbarkeit, eine Einschränkung der Beweglichkeit oder ein auffälliges Gangverhalten bemerkt wurden. Ein verändertes Gangbild äußert sich meistens durch Hinken und wird oftmals primär von den Eltern wahrgenommen (Matussek und Linhardt 2013).

Der Anamnese schließt sich die körperliche Untersuchung an. Zu Beginn sollte eine allgemein pädiatrische Untersuchung erfolgen. Zur körperlichen Untersuchung zählt die Inspektion des muskuloskelettalen Apparates (Mosca 2010). Zeichen von Bandlaxizität, der Muskeltonus, inklusive der Kraftgrade, der neurologische Status und die Koordination sollten beurteilt werden (Kerbl et al. 2016; Hell et al. 2018).

Anschließend kann sich der spezifischen klinischen Untersuchung gewidmet werden. Beginnend mit der Inspektion erhält der Untersuchende einen Gesamteindruck über die Statik, Körperhaltung und Beinachsen, bevor er die Füße im Seitenvergleich beurteilt. Auf mediale Beschwiellungen, abnormale Hornhautbildungen, Zehenfehlstellungen und Haut- und Nagelveränderungen sollte besonders geachtet werden (Hefti 2014; Füeßl et al. 2018).

Laut Mosca (1998) würde ein KSF bei der Inspektion aussehen, als ob ein Handtuch ausgewrungen würde, da der Rückfuß in Valgusstellung und der Vorfuß im Vergleich in Supinationsstellung steht. Außerdem kann bei der Betrachtung des Fußes aus Richtung der Ferse eine Abflachung des medialen Gewölbes und eine Abduktion des Vorfuß beobachtet werden (Breusch et al. 2019). Da aus dieser Perspektive die Kleinzeh seitlich des Fußes sichtbar wird, wird dieses Phänomen als „too many toes sign“ bezeichnet, welches pathognomonisch für den KSF ist (Speth und Hellmich 2017). Aus derselben Perspektive kann der Fersenvalgus beurteilt werden, welcher neben der Höhe des Längsgewölbes, als Messparameter für das Deformitätsausmaß des Fußes dient (Hamel und Kinast 2006). Bei gesunden Erwachsenen beträgt der Winkel des Fersenvalgus $<5^\circ$, bei Acht- bis Zwölfjährigen sollte dieser $<10^\circ$ betragen und bei Kleinkindern (2-5 Jahre) 20° . Ein KSF weist einen vergrößerten Winkel auf (Matussek und Linhardt 2013) (Abbildung 2).



Abbildung 2 Aufnahme eines Fersenvalgus mit vergrößertem Winkel eines kindlichen KSF links>rechts (eigene Fotografie, Einwilligung der sorgeberechtigten Eltern liegt vor).

Im Zuge einer erweiterten Fußinspektion können die Schuhe des Patienten*in betrachtet werden. Typischerweise ist bei einem KSF der Schuh vermehrt medial abgenutzt. Druckstellen oder offene Wunden am Fuß können ebenfalls ein Hinweis für einen KSF sein (DGOOC 2017).

Bei der anschließenden Palpation des Fußes wird versucht, über dem Sinus tarsi und dem Musculus (M.) tibialis posterior ein Druckschmerz auszulösen (Wülker 2015). Zusätzlich werden die Durchblutung, Motorik und Sensorik am Fuß überprüft. Durch die Palpation können stark kontrahierte Muskeln bemerkt und die benachbarten Gelenke mitbeurteilt werden (Matussek und Linhardt 2013).

Bevor spezifischere Tests folgen, wird das Gangbild des Kindes beurteilt. In manchen Fällen ist ein Hinken oder Humpeln auffällig und eine Beinlängendifferenz, Lähmungen und Muskelinsuffizienzen müssen kontrolliert werden. Das einbeinige Stehen wird in diesem Zuge analysiert; eine Instabilität und ein Kippeln erhärtet die Diagnose des KSF. Um den

kindlichen Fuß im Stand unter Belastung beurteilen zu können, kann eine podometrische Untersuchung durchgeführt werden. Dieses Verfahren, seine Bewertung und Einteilung werden in Kapitel 2.4.3 erläutert.

Bei einem Verdacht auf einen KSF sollte nun die Unterscheidung zwischen rigider und flexibler Ausprägung erfolgen. Dafür muss sich der Patient*in auf die Zehenspitzen stellen. Bei einem fKSF richtet sich im Zehenspitzenstand das Fußgewölbe auf und der Rückfuß variiert (Abbildung 3). Zum selben Zweck kann der „Jack-Test“ durchgeführt werden. Dafür wird die Großzehe passiv dorsal flektiert. Als Folge spannt sich die Plantarfaszie an und das Fußgewölbe richtet sich auf (Abbildung 4) (Speth und Hellmich 2017). Bleibt das Fußgewölbe flach, besteht ein rigider KSF (Mosca 2010).



Abbildung 3 Testung des funktionellen Zehenspitzenstandes bei KSF auf dem *L.A.S.A.R. posture* der Firma **Otto Bock HealthCare GmbH (Duderstadt)** (eigene Fotografie). Im linken Bild zeigt sich ein vergrößerter Rückfußvalgus, welches durch den Laserstrahl zusätzlich verdeutlicht wird. Beim Zehenspitzenstand rechts variiert der Rückfuß deutlich (Laser ist nun medial) (Einwilligung der sorgeberechtigten Eltern liegt vor).



Abbildung 4 Durchführung des „Jack-Tests“ (eigene Fotografie). Abgeflachtes Fußgewölbe im linken Bild und Aufrichtung des Fußgewölbes durch passive Dorsalflexion der Großzehe im rechten Bild (Einwilligung der sorgeberechtigten Eltern liegt vor).

Da für den Alltag die Beweglichkeit wichtiger als das Aussehen ist, wird im Anschluss das Gelenk und dessen Bewegungsumfang im Liegen untersucht, wobei die Beweglichkeit im USG und oberen Sprunggelenk (OSG) geprüft wird (Mosca 2010). Um eine verkürzte Wadenmuskulatur oder Achillessehne als Ursache ausschließen zu können, wird der „Silverskjöld-Test“ durchgeführt (Miller 2006; Götz et al. 2016). Dafür liegt das Kind in Rückenlage mit einer 90° Flexion in Hüft- und Kniegelenk. In dieser Position wird die Dorsalextension im OSG geprüft. Im Anschluss wird das Knie gestreckt und abermals die Dorsalextension überprüft. Das Bewegungsausmaß des OSG sollte bei 20°-0°-40° (Dorsalextension/Neutralstellung/Plantarflexion) liegen und in beiden Positionen identisch sein (Hase 2015; Hefti 2015). Für die Untersuchung der Eversion und Inversion im USG wird die Ferse festgehalten und im Verhältnis zum Unterschenkel bewegt und die Beweglichkeit überprüft. Zuletzt sollte die Beweglichkeit des Vorfußes bei fixierter Ferse untersucht werden. Der Bewegungsumfang sollte bei der Supination 10-20° und bei der Pronation 30-40° betragen (Hefti 2015).

Als Differentialdiagnosen müssen beim kindlichen Fußschmerz neben dem KSF, der kongenitale Plattfuß (*Talus verticalis*), der neurogene Plattfuß (z.B. bei infantile Zerebralparese oder Myelomeningozele) und Coalitions (knöcherne oder straff bindegewebige Fusionen im Fußbereich) in Betracht gezogen werden. Bei Nachtschmerzen und/oder Fieber muss darüber hinaus eine Infektion oder eine Neoplasie ausgeschlossen werden.

1.2.1 Radiologische Parameter

Die Indikation für eine radiologische Diagnostik ist gegeben, wenn der Verdacht einer morphologischen Fußveränderung besteht oder eine operative Versorgung vorbereitet wird. Für die radiologischen Aufnahmen ist es wichtig, dass diese standardisiert im Stehen unter Belastung durchgeführt werden. Um aussagekräftige Angaben über den Fuß treffen zu können, sollte der Fuß in mindestens zwei Ebenen geröntgt werden (Flechtenmacher und Abolmaali 2014). Für die Beschreibung und Beurteilung der Füße gibt es verschiedene Winkelmessungen zur Hilfestellung. Diese unterstützen bei der Charakterisierung der Deformitäten und der Einschätzung des Schweregrades und können bei der weiteren Behandlungsempfehlung hilfreich sein. Bei einem kindlichen Fuß muss berücksichtigt werden, dass sich dieser noch in der Wachstumsphase befindet und die Normwerte an das Alter angepasst werden müssen. Zu beachten ist dabei, dass es wenig vergleichendes Material für den gesunden kindlichen Fuß gibt. In der vorliegenden Arbeit wurde für die Bewertung der Füße der Calcaneusneigungswinkel (*Calcaneal pitch*) (Abbildung 7) im seitlichen Strahlengang zur Beurteilung des Längsgewölbes bestimmt. Für die Stellung des Rückfußes zum Vorfuß wurde der Talo-Metatarsale-I-Winkel (TMT) (Abbildung 5) im seitlichen Strahlengang und der Talo-Metatarsalebasis-I-Winkel (TMTB) (Abbildung 6) im anterior-posterioren (a.p.) Strahlengang ermittelt.

1.2.1.1 Talo-Metatarsale-I-Winkel (seitliche Aufnahme)

Der TMT-I-Winkel wird oft zur Beschreibung von Fußdeformitäten eingesetzt und hilft bei der Beurteilung der Rückfuß- zur Vorfußstellung. Der Winkel wird in der Röntgenaufnahme im seitlichen Strahlengang bestimmt und setzt sich aus der Längsachse durch den Talus und der Längsachse des MFK1 zusammen (Abbildung 5). Durch die seitliche Ansicht kann die Plantarflexion des Talus mit sekundärer Rückfuß-Eversion und die Destabilisierung der drei Gelenkverbindungen zwischen Talus, Os naviculare und Ossa metatarsales analysiert werden (Hamel et al. 2006). Bei Erwachsenen wird der Winkel als normwertig beschrieben, wenn die Achsen parallel und deckungsgleich verlaufen und ein Winkel von 0° vorliegt (Vanderwilde R et al. 1988; Flores et al. 2019). Ein offener Winkel auf der Fußrückseite ist als negative Zahl angegeben. Definitionsgemäß wird ein KSF ab einem Winkel von $< -4^\circ$ festgelegt (Waldt et al. 2017). Ein kindlicher Fuß muss differenzierter betrachtet werden. Als Mittelwert ist bei Neugeborenen ein Winkel von 20° ($9-31^\circ$) und bei Achtjährigen von 5° ($10-18^\circ$) bestimmt worden (DGOOC 2017).

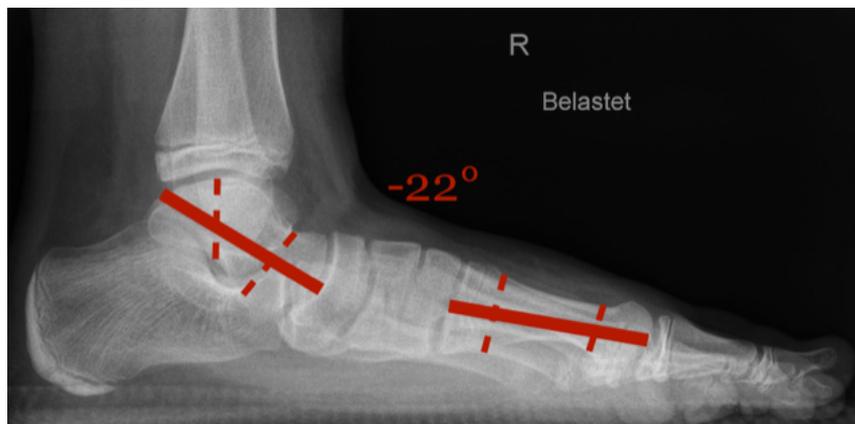


Abbildung 5 Der TMT-I-Winkel in seitlicher Ansicht setzt sich auch der Längsachse durch den Talus und der Längsachse des ersten Mittelfußknochens (MFK) zusammen. Die Lage der Referenzlinien wird jeweils durch die Mitte der gestrichelten Linien vorgegeben. Das Röntgenbild zeigt einen pathologischen Befund mit negativem TMT-I-Winkel.

1.2.1.2 Talo-Metatarsalbasis-I-Winkel (a.p. Aufnahme)

Im a.p. Strahlengang wird der TMTB-I-Winkel bestimmt. Dieser soll ebenfalls Auskunft über die Stellung von Rück- zu Vorfuß geben, allerdings kann in der a.p. Aufnahme hauptsächlich das Abweichen des Os naviculare vom Talus erfasst werden. Dafür wird die Längsachse durch den Talus bestimmt. Die zweite Linie wird von dem geometrischen Mittelpunkt des Taluskopfes durch das Os cuneiforme mediale zur Mitte der Basis des MFK1 gezogen (Abbildung 6). Dadurch sollen Messabweichungen durch Fehlstellungen, wie zum Beispiel bei einem Pes adductus oder einem Hallux valgus, minimiert werden. Wenn der Winkel lateral geöffnet ist, erhält dieser ein negatives Vorzeichen (Hamel und Kinast 2006). Normwerte liegen bei Erwachsenen zwischen $15-30^\circ$, bei Kindern gelten Werte von 10° ($\pm 7^\circ$) als normal (Vanderwilde R et al. 1988; Thomas et al. 2006; DGOOC 2017).



Abbildung 6 Der TMTB-I-Winkel in a.p. Aufnahme wird durch die Längsachse des Taluskopfmittelpunktes und der Achse durch das Os cuneiforme mediale bis zur Basis des ersten Mittelfußknochens (MFK) bestimmt. Das Röntgenbild zeigt einen pathologischen Befund mit negativem TMTB-I-Winkel.

1.2.1.3 Talo-Metatarsale-Index

Der Verlust des Längsgewölbes ist ein dreidimensionaler Prozess und lässt sich nicht eindeutig in einem Röntgenbild darstellen. Daher haben Hamel und Kinast (2006) den Talo-Metatarsale-Index eingeführt. Die Summierung des TMT-I-Winkels im seitlichen und des TMTB-I-Winkels im a.p. Strahlengang zu einer einzigen Messgröße berücksichtigt das Ausmaß der Deformität in beiden Ebenen und sollte daher einer eindimensionalen Betrachtung vorgezogen werden (Arbab et al. 2018). Die vorangegangene Problematik bestand darin, dass durch interindividuelle Unterschiede einige Fußdeformitäten eher in der a.p. Projektion aufgefallen waren, während andere vor allem in seitlicher Ansicht imponierten. Durch die Summation der Winkel wird eine Gesamtgröße geschaffen, die beide Ebenen berücksichtigt.

1.2.1.4 Der seitliche Calcaneusneigungswinkel (*Calcaneal pitch*)

Der seitliche *Calcaneal pitch* (CP) ist als Winkel definiert, der zwischen der Auftrittsebene des Fußes und der Tangente der inferioren Calcaneuskontur entsteht. Durch diesen Winkel kann das Längsgewölbe des Fußes mit seiner Aufrichtung und die Stellung des Calcaneus unter Belastung beurteilt werden.

Als Auftrittfläche wird die Verbindungslinie zwischen dem tiefsten Punkt des MFK5 und des Calcaneus definiert. Zur Bestimmung der Tangente wird eine Linie durch die anteriore und plantare Ausziehung der *Tuber calcanei* und der inferioren Ecke des Calcaneus gezogen (Abbildung 7). Bei Erwachsenen gilt ein Winkel von 20-30° als Normwert (Davids et al.

2005; Flores et al. 2019). Ein KSF wird ab einem Winkel von $<20^\circ$ definiert (Waldt et al. 2017).

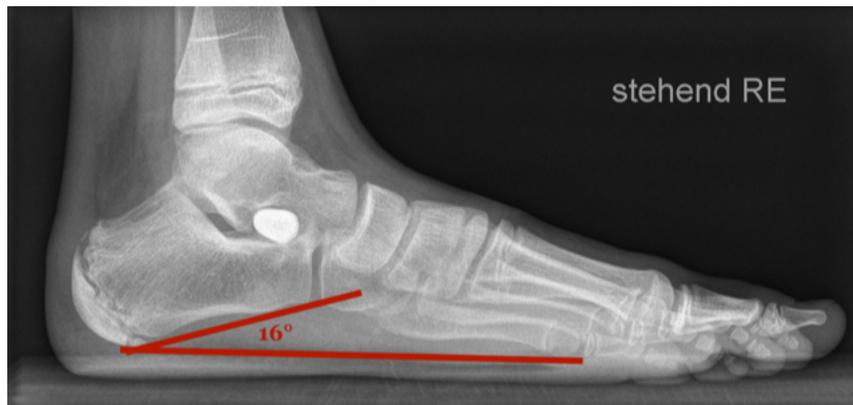


Abbildung 7 Bestimmung des *Calcaneal pitch* (CP) in seitlicher Projektion unter Belastung als Winkel zwischen der Auftrittsebene und der Unterkante des Calcaneus.

1.3 Therapieindikationen des kindlichen KSF

Nach erfolgter Diagnose eines kindlichen KSF muss entschieden werden, ob und wann eine Behandlungsindikation gestellt werden muss. Ein physiologischer schmerzloser kindlicher fKSF ist nicht therapiebedürftig (Hell et al. 2018). Wird der fKSF symptomatisch oder rechtfertigen objektive Parameter (Rückfußvalgus, Röntgenparameter) die Indikation einer Therapie, sollte primär mit konservativen Maßnahmen (weites Schuhwerk, individuelle Fußorthesen, Übungen) begonnen werden, bevor operative Verfahren in Betracht gezogen werden (Ruiz-Picazo et al. 2019).

Von einem symptomatischen KSF spricht man, wenn die Kinder über Ermüdungssymptome nach längeren Gehstrecken, dem Gefühl von Instabilität oder über Schuhabnutzungen mit Druckstellen oder Ulcera klagen (Wirth et al. 2017). Dabei können auch einseitige Deformitäten die Körpersymmetrie beeinträchtigen und zu Symptomen führen (De Pellegrin 2005). Schmerzen treten eher selten als primäres Beschwerdebild auf, entwickeln sich aber häufig im Verlauf. Diese können persistieren, die Kinder im Alltag einschränken und sie in ihren Aktivitäten limitieren (Carr et al. 2016; Bernasconi et al. 2017).

Von einer Behandlungsindikation ist bei einem negativen „Jack-Test“ oder der fehlenden Korrektur des Rückfußvalgus im Zehenspitzenstand auszugehen. Auch ein Fersenvalgus von $>20^\circ$ im Vorschulalter gilt als pathologisch und indiziert eine Therapie. Reichen die klinischen Tests nicht aus, um eine sichere Indikation zu stellen, können eine podometrische Untersuchung (2.4.3) und die radiologischen Parameter (1.2.1) helfen, die Fußdeformität zu objektivieren (Matussek und Linhardt 2013; Wagner et al. 2013).

Wird eine Behandlung des kindlichen fKSF begonnen, ist es wichtig, zum richtigen Zeitpunkt zu intervenieren, sodass langfristige Folgen wie Schmerzen und Instabilität vorgebeugt und spätere schwerwiegende skelettale Eingriffe verhindert werden können

(Wirth et al. 2017). Allerdings sollte das Potential des Fußwachstums bis zum zehnten Lebensjahr abgewartet werden, um dem Fuß die Möglichkeit zu geben, sich selbst zu korrigieren und eine Übertherapie des Fußes zu vermeiden (De Pellegrin et al. 2014; DGOOC 2017). Wird keine korrektive Therapie begonnen, können als langfristige Folgen Schmerzen im medialen Fußgewölbe bis in das Erwachsenenalter persistieren, Schwäche und ein Instabilitätsgefühl bestehen bleiben und eine Insuffizienz der Sehne des M. tibialis posterior auftreten. In seltenen Fällen kann es zu einer Ermüdungsfraktur der distalen Fibula kommen (Wirth et al. 2017). Kinder zwischen fünf und zehn Jahren mit fKSF oder einem Rückfußvalgus $>10^\circ$ sollten daher regelmäßig kontrolliert werden (De Pellegrin 2005; Matussek und Linhardt 2013).

Eine Therapie des kindlichen fKSF wird primär konservativ begonnen und führt bei vielen Kindern zu einer Linderung. Bei weniger als 2% der therapierten Kinder reichen konservative Maßnahmen nicht aus und die Kinder entwickeln eine Schmerzsymptomatik (Hell et al. 2018). Eine operative Versorgung sollte zu diesem Zeitpunkt besprochen werden.

Ziel einer Operation ist es die Gelenkausrichtung und Knochenstellung zu korrigieren und das Muskelgleichgewicht wiederherzustellen. Sowohl knöcherner Verfahren (Arthrodesen, Arthrorise), als auch Weichteil-Operationen (Sehnentransfer, -verlängerungen) können für diesen Zweck in Betracht gezogen werden (Döderlein und Multerer 2012). Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Effekte und die Versorgung des fKSF mit dem ProStop®-Implantat der Firma Arthrex GmbH (München) untersucht. Durch die subtalare Arthrorise soll die gesteigerte Überbeweglichkeit reduziert werden, der Rückfuß ausgerichtet und das Fußgewölbe aufgebaut werden. Die Voraussetzung für eine Arthrorise ist, dass die Deformitätskomponenten in allen Ebenen passiv korrigierbar sind (Wagner et al. 2013; DGOOC 2017). Als Kontraindikationen werden für die Arthrorise nach bisherigen Erfahrungen rigide Fußdeformitäten, ein Talus verticalis und degenerative Veränderungen angegeben (De Pellegrin 2005; Abbara-Czardybon et al. 2014).

1.4 Fragestellung und Zielsetzung

In der vorliegenden Arbeit wurde als Hauptfragestellung untersucht, wie hoch die Korrektoreffekte bei der subtalaren Arthrorise mit dem ProStop®-Implantat der Firma Arthrex GmbH (München) bei der Behandlung des kindlichen KSF sind und inwieweit diese die Beschwerden der Patienten*innen verbessern konnten.

Als Nebenfragestellungen wurde darüber hinaus folgendes bearbeitet.

- Entspricht das Abrollverhalten eines mittels Arthrorise operativ behandelten jugendlichen Fußes dem eines gesunden Vergleichskollektives?
- Geben die drei Erfolgsparameter Radiologie, Fragebogen und Gangbild eine ähnliche Einschätzung zu den Korrektoreffekten?
- Gibt es erneut Veränderungen und Unterschiede nach der Entfernung des Implantates?

2 Material und Methoden

Für die Beurteilung der Therapieeffekte wurden im Rahmen dieser Arbeit alle kindlichen Patienten*innen kontaktiert, die im Zeitraum von 2011 bis 2019 in der UMG oder im Orthopaedicum Northheim mit einer subtalaren Arthrorise mittels ProStop®-Implantat der Firma Arthrex GmbH (München) bei fKSF operativ versorgt wurden. Von den 30 kontaktierten Patienten*innen meldeten sich 18 Patienten*innen und wurden nach entsprechender Aufklärung und Einwilligung nachuntersucht.

2.1 Ethikkommission und Studiendesign

Das Studienprotokoll wurde der Ethikkommission der UMG zur Prüfung vorgelegt und am 21.01.2019 unter der Antragsnummer 25/11/18 genehmigt. In der vorliegenden Arbeit wurden die Daten von 18 kindlichen und jugendlichen Patienten*innen, bei denen eine Arthrorise mittels ProStop®-Implantat der Firma Arthrex GmbH (München) zur Behandlung ihres kindlichen KSF durchgeführt wurde, retrospektiv untersucht, wobei prä- und postoperative Ergebnisse, mit denen der letzten Nachuntersuchung verglichen wurden. Alle Probanden*innen wurden im Rahmen dieser Studie anamnestisch, klinisch und mittels Pedobarographie evaluiert.

Um die Ergebnisse der dynamischen Pedobarographie der operierten Füße auswerten zu können, wurde eine Vergleichsgruppe von 13 Kindern (7 Mädchen, 6 Jungen) mit gesunden Füßen im Alter von 11-16 Jahren (im Mittel 13,6 Jahre) mit der gleichen Methodik untersucht. Als Teilnahmevoraussetzung wurde bestimmt, dass bis zum Zeitpunkt der Messung keine Pathologien oder Beschwerden der Füße bekannt waren, die Füße daher weder voroperiert noch in irgendeiner Weise therapiert worden waren, keine Unfälle oder Frakturen stattgefunden hatten und bei der aktuellen Untersuchung keine klinischen Pathologien gefunden wurden.

2.1.1 Einschluss- und Ausschlusskriterien

Das Studienkollektiv wurde anhand folgender Einschlusskriterien ausgewählt:

- Vorliegen eines operativ behandelten fKSF (einseitig oder beidseitig)
- Alter bei Operation zwischen 8 und 16 Jahren
- Vorherige konservative Behandlung von mindestens sechs Monaten
- Einverständnis der Jugendlichen sowie ihrer sorgeberechtigten Eltern

Folgende Ausschlusskriterien bestanden:

- Ablehnung der Studie und damit nicht Einwilligung in die Untersuchung
- Kinder, die der deutschen Sprache nicht so folgen konnten, dass sie die Aufforderungen der Untersuchungen nicht nachkommen konnten
- Alte oder frische Frakturen oder schwerwiegende Verletzungen sowie Fehlbildungen an den unteren Extremitäten

- Kinder, die bereits andere Implantate oder Operationen primär am betroffenen Fuß erhalten hatten
- Kinder mit einer neuromuskulären, syndromalen oder systemischen Grunderkrankungen

Das Patientenkollektiv dieser Arbeit wurde für mindestens sechs Monate konservativ mit individuell angefertigten Einlagen und Physiotherapie behandelt, ohne dass eine Beschwerdereduktion erreicht werden konnte.

2.2 Diagnostik

Die Patienten*innen dieser Arbeit äußerten Fußbeschwerden und wurden daher von ihren Eltern ärztlich vorgestellt. Als Vorstellungsgründe wurden vor allem Ermüdungserscheinungen beim Laufen, das Gefühl von Instabilität, auffällige Schuhabnutzungen und Fußschmerzen angegeben.

Im Rahmen der Erstvorstellung wurde zuerst eine umfassende allgemein pädiatrische sowie symptomorientierte Anamnese durchgeführt. Sowohl das Entwicklungs- und Wachstumsverhalten, die Familien- und Geburtsanamnese und mögliche Risikofaktoren der Kinder wurden erfragt. In der symptomorientierten Anamnese wurde speziell auf das Schmerzempfinden (Lokalisation, Intensität, Dauer, Ausstrahlung) und die Fußfunktion (Bewegungseinschränkungen, Umknicken, Hinken) sowie auf mögliche Einschränkungen im Alltag oder bei sportlicher Aktivität eingegangen.

Anschließend wurden die Kinder sowohl allgemein pädiatrisch (Begleiterkrankungen, Muskeltonus, Kraftgrade, neurologischer Status, Koordination) als auch kinderorthopädisch untersucht. Bei der allgemein orthopädischen Untersuchung wurde die Statik, mögliche Fehlhaltungen (Beinlängendifferenzen, Skoliose) und die gesamte Körperhaltung (inklusive Gangbild) inspiziert und der Bewegungsumfang im Hüft- und Kniegelenk, OSG, USG, sowie Vor- und Rückfuß bestimmt. Zum Ausschluss einer verkürzten Achillessehne wurde der „Silverskjöld-Test“ durchgeführt.

Nachdem ein Gesamteindruck des Kindes und eine Einschätzung über den muskuloskelettalen Apparat gewonnen werden konnte, wurde sich der spezifischen klinischen Untersuchung der Füße gewidmet. Während der Inspektion fiel ein abgeflachtes Längsgewölbe auf und es wurde verstärkt auf abnormale Verhornungen, medial verstärkte Beschwiellungen oder Zehenfehlstellungen (Hallux valgus) geachtet, welche die Verdachtsdiagnose bekräftigten würden.

Nachfolgend wurden die Durchblutung, Motorik und Sensorik getestet und auf Druckschmerzen, Schwellungen oder Kontraktionen während der Palpation geachtet.

Im Stand wurde bei allen untersuchten Kindern dieser Arbeit die typischen KSF-Charakteristika (pronierter Rückfuß, dorsiflektiertes und außenrotiertes Subtalgelenk, abduzierter Mittelfuß und supinierter Vorfuß) festgestellt. Neben einem vergrößerten

Rückfußvalgus wurde zusätzlich das „too many toe sign“ bemerkt, welches die Diagnose KSF erhärtete. Ergänzend wurde der einbeinige Stand der Kinder untersucht, welcher sich bei Instabilität durch Kippen äußerte.

Für die Unterscheidung zwischen einem rigiden und flexiblen KSF, wurden die Kinder aufgefordert sich auf Zehenspitzen zu stellen. Bei allen Patienten*innen dieser Arbeit variierten die Fersen im Zehenspitzenstand, sodass die Diagnose eines fKSF gestellt wurde.

Bei besonders schwerer Beschwerdesymptomatik oder wenn durch konservative Therapieoptionen im Verlauf keine Linderung erzielt werden konnte, wurde die Indikation zur radiologischen Untersuchung gestellt. Der betroffene Fuß wurde unter Belastung in zwei Ebenen (seitlich und a.p.) geröntgt und das Deformitätsausmaß durch Winkelmessungen objektiviert.

In der a.p. Aufnahme wurde der TMTB-I-Winkel gemessen. Mithilfe von Referenzlinien wurde der geometrische Mittelpunkt für den Taluskopf und -körper bestimmt und durch die Verbindung dieser Punkte die Längsachse des Talus festgelegt. Anschließend wurde durch Referenzlinien die Basismitte des MFK1 bestimmt. Nachdem der geometrische Mittelpunkt des Taluskopfes mit der Basismitte des MFK1 verbunden wurde, wurde der Winkel zwischen beiden Linien bestimmt.

In der seitlichen Aufnahme wurde der TMT-I-Winkel und der *CP* bestimmt. Für die Bestimmung des TMT-I-Winkels wurde durch Referenzlinien jeweils die Längsachse des Talus und des MFK1 eingezeichnet und der Winkel bestimmt. Durch Addition der beiden TMT-Winkel wurde der TMT-Index berechnet.

Für den *CP* wurde die Auftrittsebene des Fußes eingezeichnet, indem der tiefste Punkt des MFK5 mit dem tiefsten Punkt des Calcaneus verbunden wurde. Als zweite Linie wurde die Tangente von der anterioren und plantaren Ausziehung der *Tuber calcanei* zur inferioren Ecke des Calcaneus eingezeichnet und der Winkel gemessen.

In Zusammenschau der klinischen Pathologien und radiologischen Deformitäten wurde bei allen untersuchten Patienten*innen dieser Arbeit die Diagnose eines therapiebedürftigen symptomatischen fKSF gestellt. Bei allen Patienten*innen konnten die mehrdimensionalen Deformitätskomponenten passiv korrigiert werden.

2.3 Operationsverfahren der Arthrorise

Ziel der operativen Arthrorise ist es die abnormale Gelenkbeweglichkeit bei einem fKSF zu blockieren. Durch die künstliche Sperrung des Gelenkes mittels einer konischen Schraube soll bei einem flexiblen KSF das weitere Absinken des Mittelfußes und die nicht physiologische Abweichung des Talus nach anterior verhindert werden. Ohne einen Funktionsverlust der Gelenke hervorzurufen, führt die Blockade zu einer besseren Stabilität im Subtalar- und Talonavikulargelenk. Des Weiteren reduziert die Anschlagssperre den beim

fKSF vermehrt auftretenden Stress auf die Plantarfaszie und auf die Sehne des M. tibialis posterior (Breusch et al. 2019).

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die subtalare Arthrorise mittels ProStop®-Implantat der Firma Arthrex GmbH (München) als Operationstechnik untersucht, bei welcher eine Poly-L-Laktid- oder Titanschraube in den Tunnel zwischen Talus und Calcaneus eingebracht wird.

Für die minimalinvasive Durchführung wird zuerst das Operationsgebiet steril abgedeckt und sorgfältig desinfiziert, bevor ein Hautschnitt über dem Sinus tarsi gesetzt wird. Die Inzisionsstelle befindet sich unmittelbar proximal des Processus anterior calcanei im tastbaren weichen Bereich (Abbildung 8).

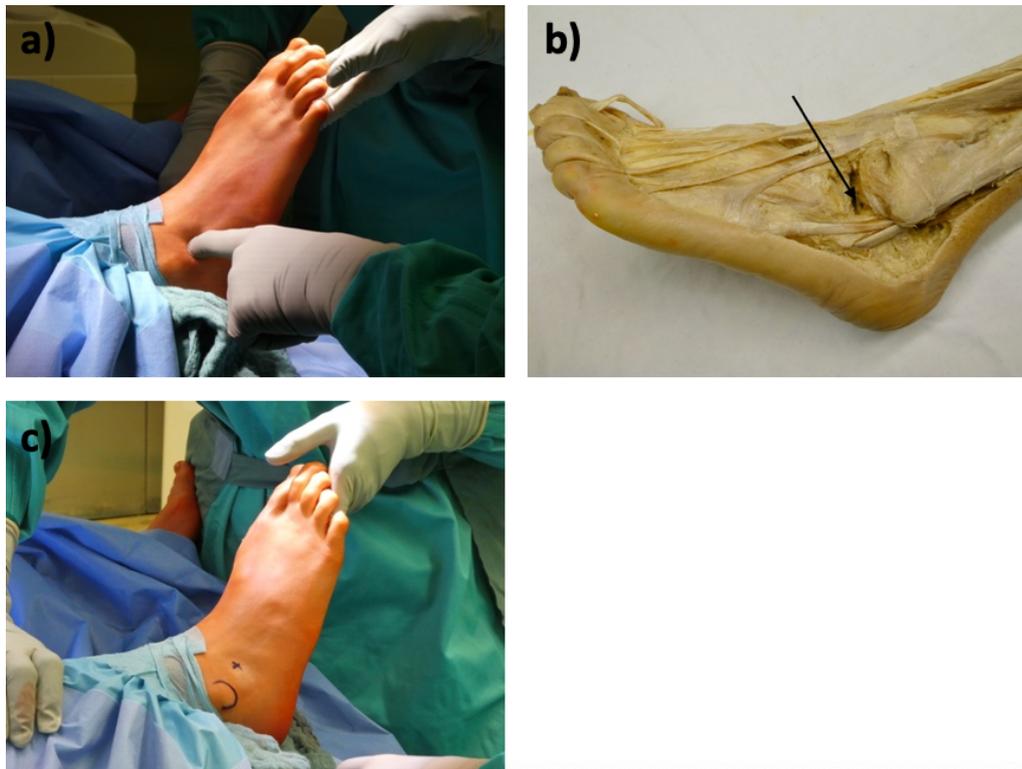


Abbildung 8 Darstellung des Bereiches unterhalb des Processus anterior calcanei intraoperativ (a) und am Präparat (b), sowie die intraoperative Markierung der Inzisionsstelle (c) (eigene Fotografie, Einwilligung der sorgeberechtigten Eltern liegt vor).

Um eine Beschädigung des Nervus peroneus zu vermeiden, wird der Schnitt in Verlaufsrichtung des Ramus superficialis durchgeführt (Abbildung 9a). Anschließend wird das Subkutangewebe mit Hilfe einer kleinen Gefäßklemme präpariert (Abbildung 9b).

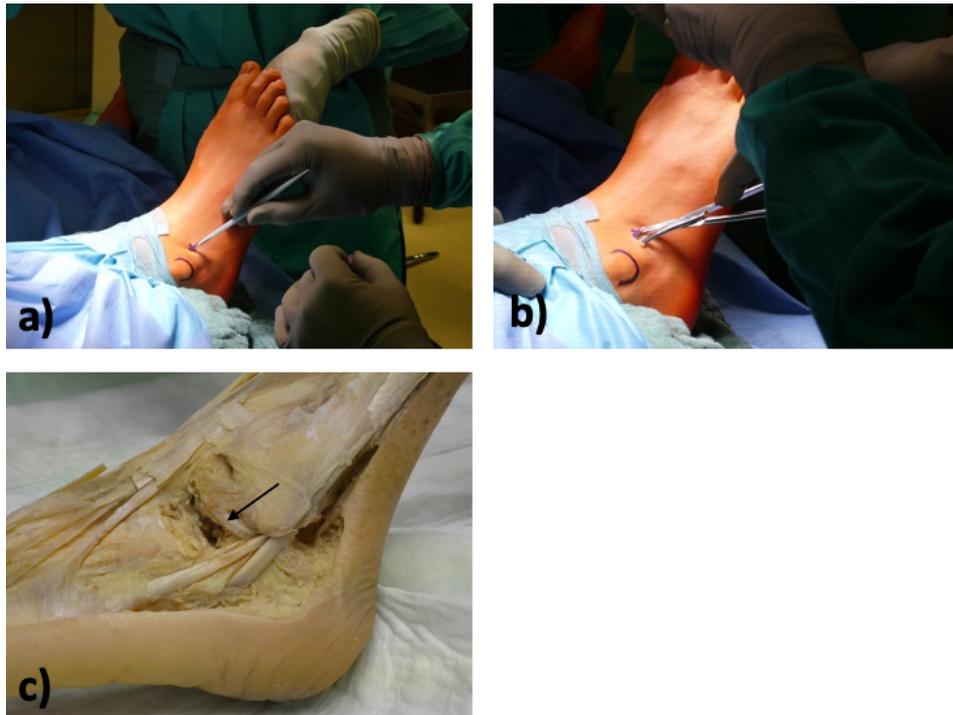


Abbildung 9 Hautschnitt (a) und Eröffnung des Präparationsgebietes mittels einer Schere oder Klemme (b). Darstellung am Präparat (c) (eigene Fotografie, Einwilligung der sorgeberechtigten Eltern liegt vor).

Mit einem Führungsdraht wird die korrekte Stellung der Schraube im Gelenk bestimmt. Hierfür muss der Führungsdraht in den Tarsalkanal eingeführt werden (Abbildung 10). Der Draht tritt unterhalb der Sehne des M. tibialis posterior aus und kann auf der medialen Seite durch die Hautanhebung erkannt werden.

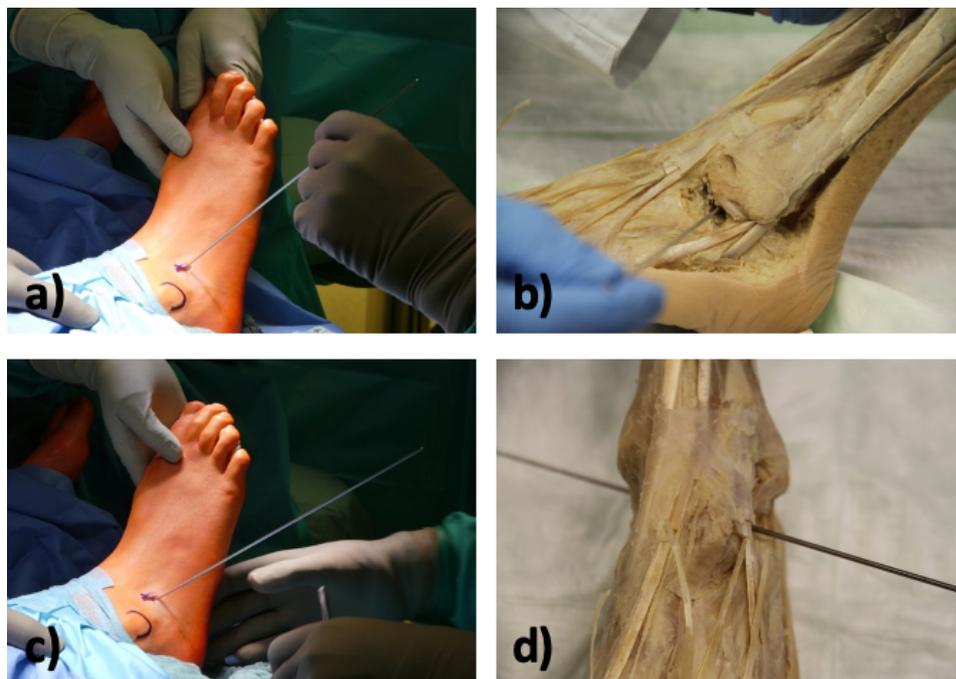


Abbildung 10 Einführung des Führungsdrahtes in den Tarsalkanal in situ (a) und am Präparat (b). Darstellung des Führungsdrahtes im Tarsalkanal intraoperativ (c) und am Präparat (d) (eigene Fotografie, Einwilligung der sorgeberechtigten Eltern liegt vor).

Nachfolgend werden Probeimplantate mit Hilfe eines kannülierten Schraubendrehers über den Führungsdraht eingeführt, um die richtige Größe der Schraube bestimmen zu können (Abbildung 11).



Abbildung 11 Darstellung des Einsetzens des Probeimplantates zur Größenbestimmung intraoperativ (a) und am Präparat (b). Eingesetztes Probeimplantat intraoperativ (c) und am Präparat (d) (eigene Fotografie, Einwilligung der sorgeberechtigten Eltern liegt vor).

Die passende Schraubengröße wird klinisch ermittelt, indem das Bewegungsausmaß intraoperativ untersucht wird. Eine zu stark ausgeprägte Eversion ist ein Zeichen für eine zu klein gewählte Schraubengröße. Falls der Fuß zu weit in die Supinationsbewegung abweicht, muss eine kleinere Schraube gewählt werden. Sobald die klinische Beurteilung abgeschlossen ist, wird ein intraoperatives Röntgenbild (Abbildung 12) erstellt, um die korrekte Position der Schraube überprüfen zu können.



Abbildung 12 Intraoperative Röntgenaufnahme bei einer Arthrorise am rechten Fuß (eigene Fotografie, Einwilligung der sorgeberechtigten Eltern liegt vor).

Das Implantat sollte medial über dem Taluskopfmittelpunkt liegen und lateral nicht über den äußeren Talusrand reichen (Abbildung 13). Bei korrekter Lage kann die Eindringtiefe durch die Markierung am Setzinstrument abgelesen werden.

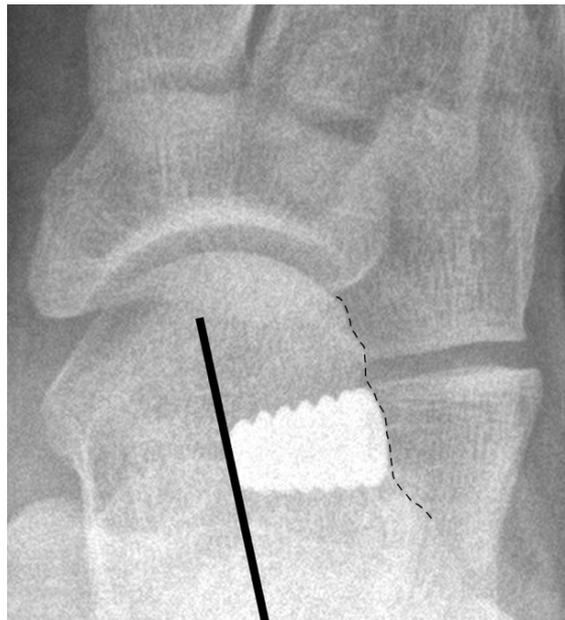


Abbildung 13 Darstellung der korrekten Lage des Implantates mit eingezeichneten Hilfslinien für den Taluskopfmittelpunkt (dicke Linie) und den äußeren Talusrand (gestrichelte Linie) (eigene Fotografie, Einwilligung der sorgeberechtigten Eltern liegt vor).

Nachdem die richtige Schraubengröße bestimmt wurde, wird das Probeimplantat entfernt und das ProStop®-Implantat der Firma Arthrex GmbH (München) mit Hilfe eines Setzinstrumentes eingesetzt (Abbildung 14, Abbildung 15). Der Führungsdraht kann anschließend entfernt und eine abschließende Röntgenkontrolle durchgeführt werden. Daraufhin folgt der schichtweise Wundverschluss inklusive der Hautnaht.



Abbildung 14 Zustand nach der Entfernung des Probeimplantates am Präparat.

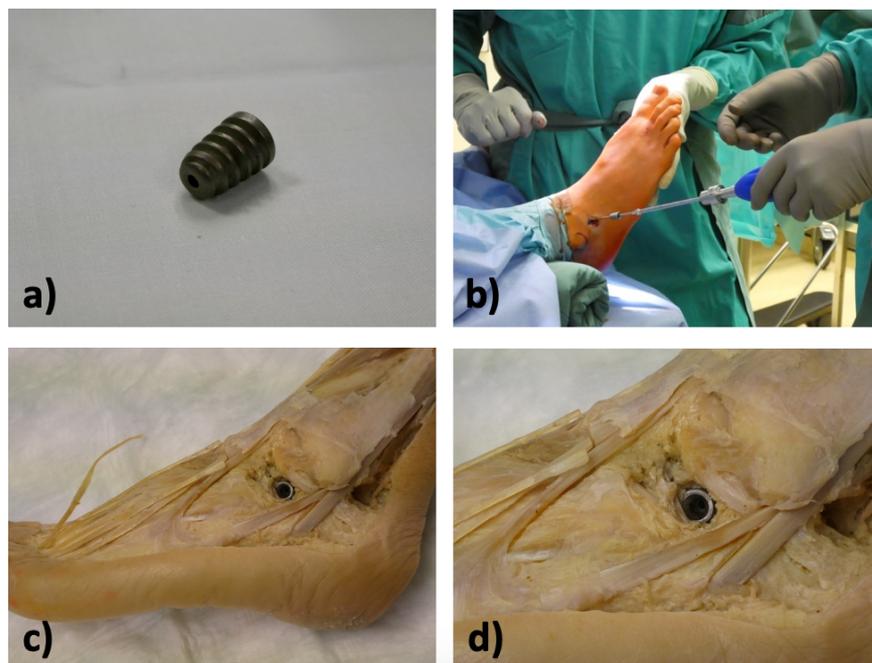


Abbildung 15 ProStop®-Implantat der Firma Arthrex GmbH (München) (a) beim intraoperativen Einsetzen (b), sowie die Darstellung der fertigen Implantation eines ProStop®-Implantates am Präparat in der Übersicht (c) und mit Vergrößerung (d) (eigene Fotografie, Einwilligung der sorgeberechtigten Eltern liegt vor).

2.3.1 Nachbehandlung

Nach erfolgreicher Operation wurden alle untersuchten Patienten*innen postoperativ für vier Wochen mit einer Unterschenkel-Fußorthese zur Stabilisierung versorgt. Eine schmerzadaptierte Teilbelastung durfte ab dem ersten postoperativen Tag erfolgen. Zur

Schmerztherapie bekamen die Patienten*innen Nurofensaft oder Paracetamol in Tablettenform verordnet. Wenn nötig erfolgte eine Thromboseprophylaxe.

Eine postoperative Wundkontrolle erfolgte nach sieben bis zehn Tagen mit Entfernung des Nahtmaterials im Verlauf. Als Nachbehandlung wurde eine standardisierte Unterschenkel-Fußorthese (Dual Relief Walker der Firma DARCO GmbH (Raisting)) für vier bis sechs Wochen getragen und danach durch eine Sprunggelenksorthese (Malleosprint Brace der Firma Otto Bock HealthCare GmbH (Duderstadt)) ersetzt. Nach dem Wechsel auf eine Sprunggelenksorthese konnte eine uneingeschränkte Vollbelastung erfolgen. Zum gezielten Muskelaufbau und der Steigerung des vollen Bewegungsausmaßes wurde Krankengymnastik verordnet. Den Patienten*innen wurde eine insgesamt vierteljährige Sportpause nach dem operativen Eingriff empfohlen. Bei Leistungssportlern*innen sollte eine sechsmonatige Pause eingehalten werden.

In der Regel verbleibt das Implantat mindestens ein Jahr, besser bis zur Wachstumsausreifung im Fuß und kann danach minimalinvasiv entnommen werden. Dafür wird der für die Implantation genutzte Hautschnitt wiedereröffnet. Das Gewebe wird soweit präpariert, bis die Schraube sichtbar und zugänglich ist. Anschließend wird der Führungsdraht in die Schraube eingeführt. Über den Führungsdraht kann die Schraube entfernt werden und im Anschluss die Hautnaht erfolgen. Wie bei der Implantation können, bei einer reizlosen Wunde, die Fäden nach sieben bis zehn Tagen gezogen werden. Nach der Metallentfernung sollte für zwei Wochen eine Sprunggelenksorthese getragen und der Fuß teilbelastet werden. Anschließend kann der Fuß wieder vollbelastet werden. Eine vier- bis sechswöchige Sportpause wird nach der Metallentfernung empfohlen.

2.4 Nachuntersuchung

2.4.1 Datenerhebung

Die Akten von Patienten*innen, die die Einschlusskriterien erfüllten, wurden retrospektiv ausgewertet und folgende Parameter erhoben:

- Alter
- Geschlecht
- Körpergewicht
- Körpergröße
- Diagnose
- Nebendiagnosen
- Operationszeitpunkt
- Komplikationen
- Metallentfernung

Es wurden 30 Patienten*innen identifiziert und angeschrieben, von denen letztendlich 18 in die Nachuntersuchung einwilligten. Diese wurden einbestellt und anamnestisch, klinisch, statisch, dynamisch mittels Pedobarographie und radiologisch untersucht.

2.4.2 American Orthopaedic Foot and Ankle Society (AOFAS) Fragebogen

Bei der Untersuchung wurde gemeinsam mit den Patienten*innen -bei Minderjährigen im Beisein ihrer Eltern- ein Fragebogen ausgefüllt, um die präoperative Ausgangssituation mit dem postoperativen Zustand zu vergleichen. Der verwendete Fragebogen wurde von der American Orthopaedic Foot and Ankle Society (AOFAS) im Jahre 1994 für den Bereich des Rückfußes entwickelt. Seitdem hat sich dieser zur Beurteilung von Fußfehlstellungen in orthopädischen Einrichtungen etabliert. Durch ein validiertes 100 Punktesystem werden neun Themenblöcke untersucht, die bei der Punktevergabe unterschiedlich gewichtet werden (Kostuj et al. 2014). Die ersten fünf Parameter des Fragebogens werden von den Patienten*innen ausgefüllt und erfragen die subjektive Schmerzwahrnehmung und das Beschwerdebild im Alltag (Tabelle 1).

Tabelle 1 AOFAS Fragebogen Parameter 1-5

Parameter	Abstufung	Erklärung
Schmerz	40 Pkt.: kein Schmerz	Der am stärksten gewichtete Parameter fragt das subjektive Schmerzempfinden des Patienten*in ab.
	30 Pkt.: leicht, gelegentlich	
	20 Pkt.: mittelmäßig, täglich	
	00 Pkt.: heftig, fast immer	
Funktion	10 Pkt.: keine Einschränkung, keine Hilfsmittel	Viele Patienten*innen haben Schwierigkeiten bei der Bewältigung ihres Alltages und benötigen unterstützende Hilfsmittel. Bei Kindern soll durch diesen Parameter vor allem die Beschwerdesymptomatik bei sportlichen Tätigkeiten und eine mögliche Beeinträchtigung in der Schule ermittelt werden.
	07 Pkt.: keine Einschränkung im Alltag, Einschränkungen bei Freizeitaktivitäten, keine Hilfsmittel	
	04 Pkt.: Einschränkungen im Alltag und bei Freizeitaktivitäten, Stock notwendig	
	00 Pkt.: starke Einschränkung, Hilfsmittel nötig (Gehstütze, Korsett, etc.)	
Gehstrecke (in Blocks)	05 Pkt.: mehr als 6	Das uneingeschränkte Gehen hat für die Lebensqualität einen hohen Stellenwert. Die AOFAS nutzt amerikanische Häuserblocks
	04 Pkt.: 4 bis 6	

	02 Pkt.: 1 bis 3	als Maßeinheit zur Messung der beschwerdefreien Gangstrecke. Ein Block entspricht in etwa 80m.
	00 Pkt.: weniger als 1	
Gehen auf Oberflächen	05 Pkt.: keine Schwierigkeiten 03 Pkt.: geringe Schwierigkeiten auf unebenem Terrain, Treppen, Neigungen 00 Pkt.: große Schwierigkeiten auf unebenem Terrain, Treppen, Neigungen	Viele Patienten*innen mit KSF klagen beim Gehen und Stehen über Instabilität. Diese wird häufig auf unebenen Oberflächen verstärkt.
Gang-abnormalität	08 Pkt.: keine, leichte 04 Pkt.: augenscheinlich 00 Pkt.: erheblich	Das Abflachen des Längsgewölbes beim KSF kann zu einem fehlerhaften und sichtbar veränderten Abrollverhalten führen. Oftmals geben die Eltern an, dass ihnen ein verändertes Gangbild aufgefallen sei.

Durch vier weitere Parameter werden von einem Arzt die anatomische Stellung und das Bewegungsausmaß des Fußes beurteilt (Tabelle 2, Abbildung 16, Abbildung 17, Abbildung 18). Ein schmerz- und beschwerdefreier Patient*in mit physiologischen Achsenverhältnissen wird mit einer Maximalpunktzahl von 100 Pkt. bewertet. Null Pkt. werden bei einem schmerzhaften und im Alltag stark eingeschränkten Patienten*in vergeben, dessen Fuß erhebliche Abweichungen von einem physiologischen Bewegungsausmaß aufweist.

Tabelle 2 AOFAS Fragebogen Parameter 6-9

Parameter	Abstufung	Erklärung
Sagittale Bewegung	08 Pkt.: normal, leichte Einschränkung (>30°) 04 Pkt.: mäßige Einschränkung (15-29°) 00 Pkt.: starke Einschränkung (<15°)	Der Fuß steht physiologischerweise in ca. 16° Abweichung zur Sagittalachse, wobei die Bewegungsachse des Chopart- und Lisfranc-Gelenkes annähernd sagittal vom Calcaneus bis zum 2. Strahl des Fußes zieht. Das Bewegungsausmaß in der Sagittalachse wird bei fixiertem Rückfuß untersucht. Als Supinationsbewegung (normal ca. 40°) wird das Heben des inneren Fußrandes benannt und als Pronationsbewegung

		(normal ca. 20°) ist das Heben des äußeren Fußrandes definiert (Abbildung 16).
Hinterfußbewegung (Inversion/Eversion)	06 Pkt.: normal, leichte Einschränkung (75%-100%) 03 Pkt.: mäßige Einschränkung (25-74%) 00 Pkt.: starke Einschränkung (<25%)	Bei der Hinterfußbewegung wird der Unterschenkel fixiert und die Drehbewegung des Calcaneus nach innen (Inversion) und außen (Eversion) gemessen. Die Calcaneusachse dient als Richtlinie zur Abschätzung des Bewegungsausmaßes. Im Fragebogen wurden Abweichungen im Vergleich zur physiologischen Beweglichkeit bewertet. Normwertig sind 10° bei Eversion und 20° bei Inversion (Abbildung 17).
Gelenk-Hinterfuß-Stabilität (ap, varus/valgus)	08 Pkt.: stabil 00 Pkt.: definitiv instabil	Die Rückfußinstabilität kann durch 3 Faktoren beeinflusst werden. Die durch die Insuffizienz der lateralen Bandstrukturen bedingte Instabilität nennt man passive Instabilität. Die Varusachse im Rückfuß (0-10°) wird als statische Instabilität bezeichnet und eine gesteigerte Aktivität des M. fibularis longus ist als dynamische Komponente definiert (Vienne und Schöttle 2003).
Achse	10 Pkt.: gut plantigrader Fuß, normale Gelenk-Hinterfußachse 05 Pkt.: ausreichend plantigrader Fuß, einige Grad abweichende Gelenk-Hinterfußachse, ohne Symptome 00 Pkt.: nicht plantigrader Fuß, erhebliche Abweichung der Gelenk-Hinterfußachse, mit Symptomen	Bei einer physiologischen Rückfußachse liegen die Unterschenkelachse und die Calcaneusachse auf einer Linie. Eine verstärkte Pronationsstellung bezeichnet man als Pes valgus und eine gesteigerte Supinationsstellung als Pes varus (Abbildung 18).

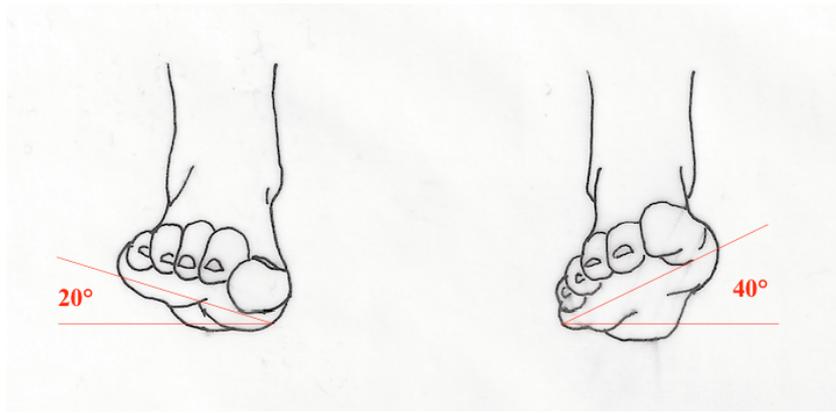


Abbildung 16 Sagittaler Bewegungsumfang des Fußes (eigene Zeichnung basierend auf Schünke et al., S.457).

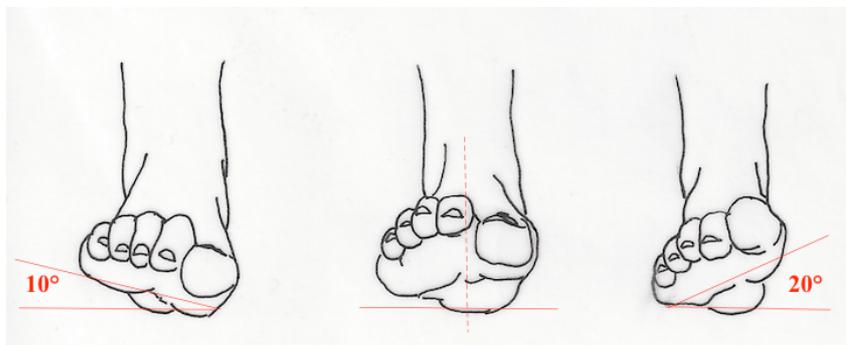


Abbildung 17 Bewegungsumfang im USG (eigene Zeichnung basierend auf Schünke et al., S.457).

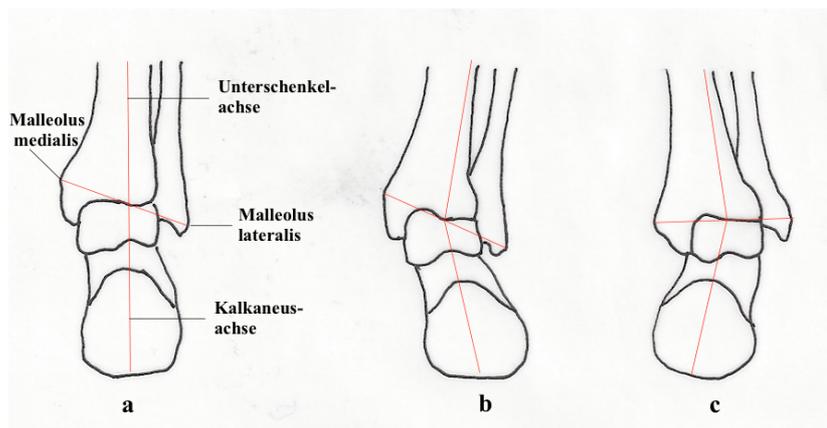


Abbildung 18 Achse des Rückfußes bei einem physiologischen Pes rectus (a), einem Pes valgus (b) und einem Pes varus (c) (eigene Zeichnung, basierend auf Schünke et al., S.457).

2.4.3 Podometrische Untersuchung

Das Podometer ist ein diagnostisches Gerät zur Beurteilung der Belastung der Fußsohle im Stehen (Abbildung 19). Durch die Darstellung der Belastungszonen können die Ausprägungen des Längs- und Quergewölbes des Fußes direkt beobachtet und bewertet werden. Zur Auswertung werden die Fußabdrücke fotografisch dokumentiert.

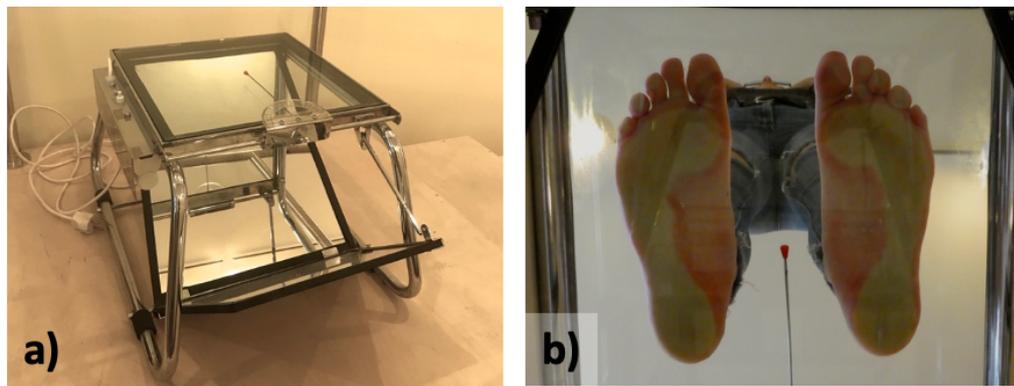


Abbildung 19 eigene Fotografie eines Podometers (a) und eine beispielhafte Aufnahme eines physiologischen Fußabdruckes (b) (Einwilligung vorhanden).

Bei 16 der 18 nachuntersuchten Patienten*innen wurde eine postoperative podometrische Untersuchung durchgeführt und fotodokumentiert. Die Fußformen wurden entsprechend der Einteilung von Hefti und Brunner (Hefti und Brunner 1999; Abbildung 20; Tabelle 3) klassifiziert.

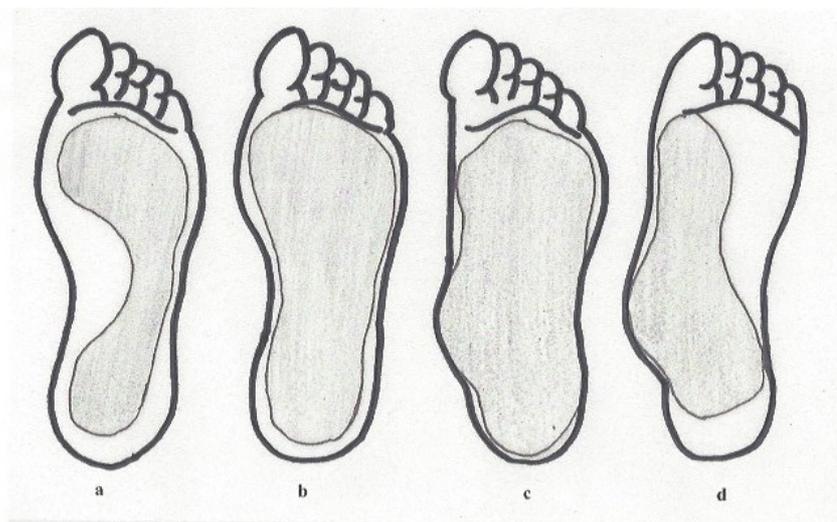


Abbildung 20 Ausprägungsformen eines KFS und die Einteilung in vier Klassen als eigene Zeichnung (basierend auf Hefti und Brunner 1999).

Tabelle 3 Erläuterungen der podometrischen Einteilung (modifiziert nach Hefti und Brunner 1999)

Abbildungsbezeichnung	Fußabdruck	Erläuterung
a	normal	Normaler Fußabdruck mit medialer Aussparung und normaler Belastungsverteilung.
b	mild	fKSF mit fehlender medialer Aussparung. Das normale Belastungsmuster ist noch vorhanden, allerdings werden vermehrte Beschwiellungen unter der Ferse und den MFK1 und 5 erkennbar.
c	schwer	Schwerer KSF mit medialer Hauptbelastung, vor allem unter dem Talus.
d	sehr schwer	Sehr schwerer KSF mit Eversion und Pronation des gesamten Fußes. Außerdem starke Abduktion des Vorfußes bei fehlender lateraler Belastung.

2.4.4 Dynamische Pedobarographie

Um den postoperativen Zustand des Fußes und dessen Abrollverhalten zu ermitteln, wurde von den 18 operierten Patienten*innen eine dynamische Pedobarographie mit der emed® Fußdruckplattform (Abbildung 21) der Firma novel GmbH (München) angefertigt.

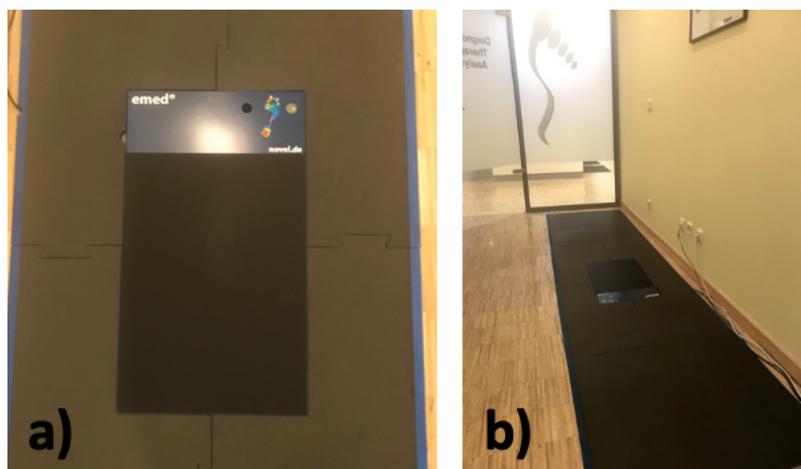


Abbildung 21 eigene Fotografien der emed® Fußdruckplattform (a) und der pedobarographischen Messstrecke (b) der Firma novel GmbH (München).

Durch die digitale Fußdruckmessung wird der Fuß statisch erfasst und die Druckverhältnisse unter dynamischen Bedingungen werden ausgewertet. Damit die Messungen direkt in Daten umgewandelt und abgespeichert werden können, ist die Plattform über einen Transformator an einen Computer angeschlossen. Dieser Computer dient ebenfalls zur Steuerung der

Fußdruckmessung. Vor Beginn des Messverfahrens wird der Name, das Geburtsdatum, die Größe, das Gewicht und die Schuhgröße der Patienten*innen in die emed® Software (novel GmbH, München) (Abbildung 22) eingegeben und somit die Messung individuell auf den Patienten*in angepasst.

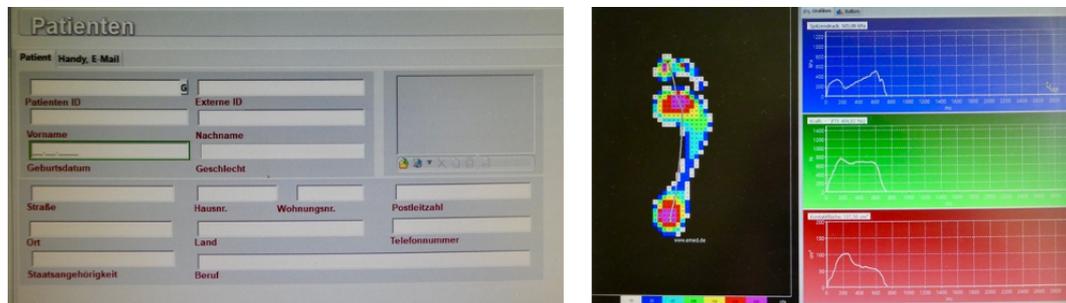


Abbildung 22 eigene Fotografien der Arbeitsbildschirme der emed® Software (novel GmbH, München).

Zur Durchführung der Messung laufen die Kinder barfuß bei normalen Raumgegebenheiten über die circa 5m lange Bahn, um im Lauffluss mit einem Fuß auf die Messplatte zu treten. Die Anlaufphase entspricht dadurch circa 2m und die Auslaufphase circa 3m, wodurch ein natürliches Laufverhalten gewährleistet werden soll. Für jedes Kind werden jeweils fünf gültige Messungen des rechten und linken Fußes durchgeführt. Eine Messung wird als gültig gewertet, wenn der gesamte Fuß auf der Sensorenfläche der Plattform erfasst wurde. Für die Auswertung des Fußes wird dieser als gesamtes Objekt beurteilt und zusätzlich in zehn Abschnitte unterteilt (Abbildung 23) (Hafer et al. 2013). Diese entsprechen den anatomischen Strukturen des Fußes.

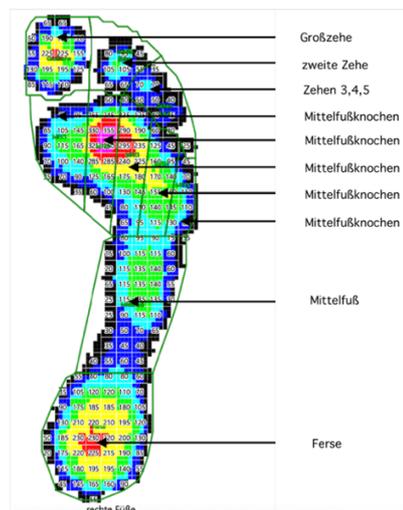


Abbildung 23 Darstellung der Fußenteilung in zehn Abschnitte aus der emed® Software (novel GmbH, München) mit Beschriftung

Die Software ermittelt anschließend die Mittelwerte der fünf Messungen und berechnet in den zehn Fußabschnitten das Kraftmaximum in Newton (N), den Spitzendruck in Kilopascal

(kPa) und die Kontaktfläche in Quadratcentimeter (cm²). Zusätzlich wird die Kontaktzeit der einzelnen Regionen im Verhältnis zur Kontaktzeit des gesamten Fußes ausgewertet und als prozentualer Anteil des *Roll over process* (%ROP) (deutsch: Abrollvorgang) angegeben. Aufgrund der Unterschiede im Alter der Kinder, der Körpergrößen und der Körpergewichte wurden die Parameter in dieser Arbeit für die Auswertung und zwecks Vergleichbarkeit normiert.

Die Kontaktflächen der einzelnen Fußanteile wurden in Relation zur Gesamtfläche des Fußes bestimmt und somit die relativen Kontaktflächen berechnet. Für die Berechnung des relativen Kraftmaximums wurde die Kraft bestimmt, die das Körpergewicht des Kindes ausübt (Formel 1). Die Kraftmaxima der einzelnen Fußbereiche wurden dann in Relation zu dieser berechneten Kraft gesetzt.

Formel 1 Berechnung der Kraft des Körpergewichtes (N)

$$\text{Kraft des Körpergewichtes} = \text{Körpergewicht (kg)} * \text{Erdbanziehung} \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)$$

Um den relativen Spitzendruck auswerten zu können, wurde ein Referenzwert berechnet. Dieser gibt an, wie hoch der Druck ist, den das Körpergewicht im Mittel auf die Fläche des Fußes ausübt, wenn die Person auf einem Fuß steht (Formel 2). Der relative Spitzendruck wird anschließend berechnet, indem der Spitzendruck eines Fußabschnittes in Relation zum Referenzwert gesetzt wird.

Formel 2 Berechnung des Referenzwertes (kPa)

$$\text{Referenzwert} = \frac{\text{Körpergewicht (kg)} * \text{Erdbanziehung} \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)}{\text{Fußfläche (m}^2\text{)}}$$

Um einen KSF von einem gesunden Fuß in einer Pedobarographie abgrenzen zu können, gibt es bestimmte Charakteristika, die herangezogen werden können. Ein gesunder Fuß zeichnet sich dadurch aus, dass alle Zehen einzeln erkennbar sind und eine deutliche Aussparung im Mittelfuß sichtbar ist. Auch ein normales Abrollverhalten vom Mittelpunkt der Ferse, über den Mittelfuß, der MFK2 und 3 bis zur Großzehe, spricht für einen gesunden Fuß (Abbildung 24a). Eine gezackte Abrolllinie gibt Hinweise auf eine Dysbalance während des Gehens, welches ein Anzeichen für einen KSF sein kann (Fritsch und Haslbeck 2004; Mitternacht und Lampe 2006).

Mithilfe der emed® Software (novel GmbH, München) wird der Halluxwinkel des Fußes bestimmt, indem eine mediale Tangente an den Konturen der Ferse und des Fußballens gezogen wird und eine Tangente an den Konturen des Fußballens zu der Großzehe gezogen wird (Janssen et al. 2014; Akins et al.) (Abbildung 24b).

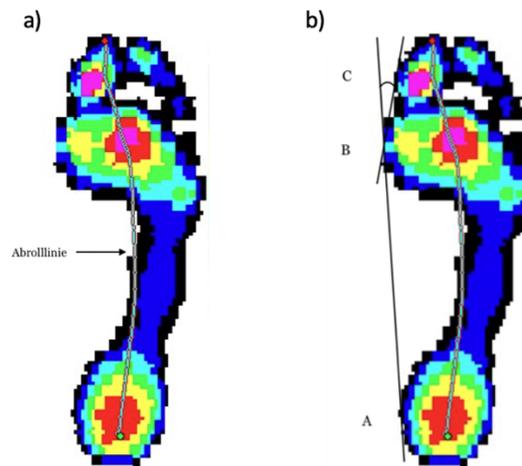


Abbildung 24 Darstellung eines Fußes mit normaler Abrolllinie (a) aus der emed® Software (novel GmbH, München), sowie die Darstellung des Halluxwinkels durch die Anlage einer medialen Tangente an die Fußkonturen der Ferse (A) und des Fußballens (B), sowie eine Tangente an den Konturen des Fußballens (B) und der medialen Großzehenbegrenzung (C). Die Strecken AB und BC ergeben den Halluxwinkel.

Zusätzlich wird mit der emed® Software (novel GmbH, München) der Gewölbeindex des Fußes berechnet, welcher bei der Objektivierung des Gewölbes hilft. Zur Berechnung werden die Längen der einzelnen Fußabschnitte in cm herangezogen, wobei die Messung der Vorfußlänge ohne die Zehen erfolgt (Murley et al. 2009; Halabchi et al. 2013) (Formel 3).

Formel 3 Berechnung des Gewölbeindex

$$\text{Gewölbeindex} = \frac{\text{Länge Mittelfuß}}{(\text{Länge Vorfuß} + \text{Länge Mittelfuß} + \text{Länge Rückfuß})}$$

2.4.5 *Laser Assisted Static Alignment Reference (L.A.S.A.R.) posture* der Firma Otto Bock HealthCare GmbH

Der *Laser Assisted Static Alignment Reference (L.A.S.A.R.) posture* wurde von der Firma Otto Bock HealthCare GmbH (Duderstadt) entwickelt und besteht aus einer Kraftmessplatte, die aus vier integrierten Kraftmesszellen und einem Projektionssystem mit Laser und Strichoptik aufgebaut ist (Abbildung 25). Mithilfe dieses Gerätes können die Vektorkräfte des Körpers in Echtzeit dargestellt und Stellungen sowie Achsen des Bewegungsapparates analysiert werden.

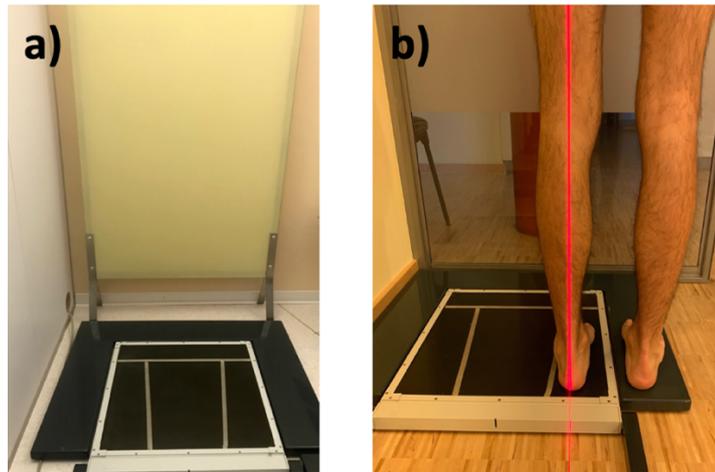


Abbildung 25 Fotografie des *L.A.S.A.R. posture* Gerätes der Firma **Otto Bock HealthCare GmbH (Duderstadt)** (a), sowie eine Fotografie bei der Durchführung einer Patientenuntersuchung mit Bestimmung der Beinachse (rote Linie) (b) (Einwilligung vorhanden).

Für die richtige Nutzung des *L.A.S.A.R. posture* Gerätes muss dieses in einem trockenen, normal temperierten Raum mit mittleren Lichtverhältnissen aufgebaut werden, um den Laserstrahl gut erkennen zu können. Nach dem Einschalten des Gerätes kalibriert sich der Apparat automatisch und steht für die Benutzung zur Verfügung.

In der vorliegenden Arbeit wurde der *L.A.S.A.R. posture* eingesetzt, um die Beinachsen der behandelten Patienten zu untersuchen. Die Untersuchung wurde durchgeführt, um die Statik nach der Arthrorise bewerten zu können. Zur Beurteilung der Beinachse wird die „Mikulicz-Linie“ verwendet, welche als Traglinie des Beines definiert ist (Wirtz et al. 2011). Physiologischerweise liegen das Hüftgelenk, das Kniegelenk und das OSG auf einer geraden Linie, wodurch das Drehzentrum des Femurkopfes, die Eminentia intercondylaris des Tibiaplateaus und die Mitte der Malleolengabel miteinander verbunden werden. Eine normale Achse liegt zwischen $0-5^\circ$ (Schünke et al. 2007; Reilingh et al. 2010). Bei Einstellung der klassischen „Mikulicz-Linie“ kann auch der Rückfuß beurteilt werden. Dieser zeigt physiologisch einen Rückfußvalgus von $<5^\circ$ im Erwachsenenalter (Matussek und Linhardt 2013).

2.4.6 Datenauswertung und Statistik

Die Ergebnisse wurden mit Excel Version 2016 (Microsoft Corporation, Redmond, Washington, USA) und Graph Pad Prism Version 8 (GraphPad Software Inc. San Diego, Kalifornien, USA) statistisch ausgewertet. Als statistische Tests wurden für gepaarte Werte der paired t-test und bei nicht gepaarten Werten der unpaired t-test bei normalverteilten Daten verwendet. Wenn keine Normalverteilung vorlag, wurde für gepaarte Daten der Wilcoxon-signed-rank Test und bei ungepaarten Daten der Mann-Whitney-U Test durchgeführt. Die Signifikanzniveaus wurden für $p < 0,05$ (*), $p < 0,01$ (**) und $p < 0,001$ (***) festgelegt.

3 Ergebnisse

3.1 Patientendemographie

Bei der präoperativen Evaluation zeigten alle 18 nachuntersuchten Patienten*innen (10 männlich, 8 weiblich) Fußbeschwerden, welche sich durch Schmerzen in Ruhe, Einschränkungen im Alltag, beim Bewältigen langer Gehstrecke, sowie durch ein Instabilitätsgefühl äußerten. Bei 15 Patienten*innen wurde ein beidseitiger fKSF, bei zwei Patienten*innen ein linker fKSF und bei einer Patientin ein rechter fKSF diagnostiziert. Bis zum Zeitpunkt der Nachuntersuchung wurden bei sieben Patienten*innen beide fKSF, bei drei Patienten*innen der rechte und bei acht Patienten*innen der linke fKSF mit einer subtalaren Arthrorise therapiert (Abbildung 26).

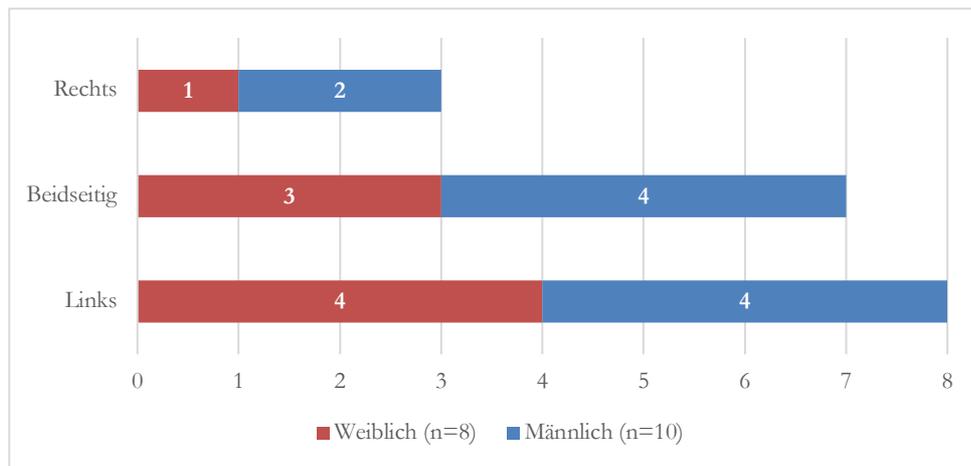


Abbildung 26 Darstellung der operierten Füße im Diagramm (rot=weiblich (n=8), blau=männlich (n=10)).

Im Rahmen der Nachuntersuchung wurden acht weibliche und zehn männliche Patienten*innen mit insgesamt 25 operierten Füßen untersucht, davon waren 15 linke und 10 rechte Füße. Dies entspricht 60% linksseitige und 40% rechtsseitige Operationen.

Das durchschnittliche Alter bei der Arthrorise betrug 12,5 Jahre ($\pm 1,76$). Bei der Operation waren die weiblichen Patientinnen im Mittel 12,1 Jahre ($\pm 1,47$) und die männlichen Patienten durchschnittlich 12,8 Jahre ($\pm 1,97$) alt (Abbildung 27).

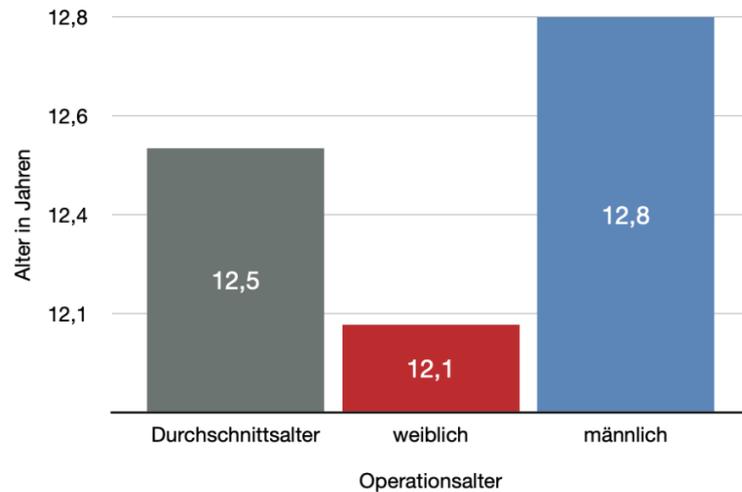


Abbildung 27 Darstellung des mittleren Operationsalters der Patienten*innen im Säulendiagramm (grau=Durchschnittsalter gesamt, rot=weiblich, blau=männlich).

Das Sinus-tarsi-Implantat sollte mindestens ein Jahr, besser bis zum Wachstumsende, im Fuß verbleiben. Zum Zeitpunkt der Nachuntersuchung war bei 13 Füßen die Schraube bereits entfernt worden. Die Entfernung der Schraube erfolgte im Mittel nach 2,6 (\pm 1,19) Jahren, dabei waren sechs Jahre der längste und ein Jahr der kürzeste Zeitraum. Bei 12 Füßen wurde die Schraube noch nicht entfernt (Abbildung 28). Dies betraf acht Patienten*innen, bei denen alle Untersuchungen für diese Arbeit mit implantierter Schraube durchgeführt worden sind.

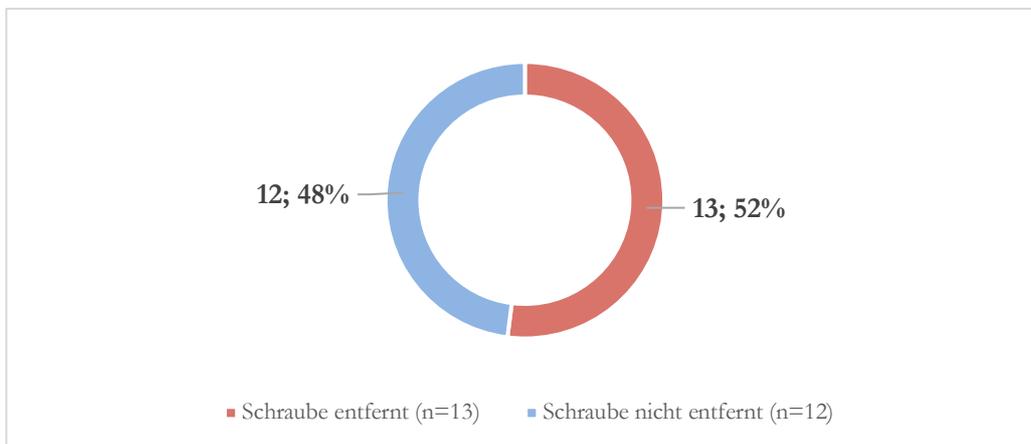


Abbildung 28 Übersicht über die Metallentfernungen des Patientenkollektives (rot=Schraube entfernt (n=13), blau=Schraube nicht entfernt (n=12)).

Als allgemeine Begleiterkrankungen wurden anamnestisch ein Diabetes mellitus Typ 1 (n=1) und eine arterielle Hypertonie (n=1) erhoben.

Bei neun Füßen lagen relevante Begleiterkrankungen des betroffenen KSF vor. Dies waren tarsale Coalitiones (n=3), verkürzte Wadenmuskulaturen (n=3), Hallux valgus (n=1) und Genu valgum (n=2). Diese Pathologien führten bei drei Patienten*innen (12%) zusätzlich

zur Arthrorise zu folgenden Eingriffen: Gastrocnemius Release (n=2), operative Hallux valgus Korrektur (n=1).

3,9 Jahre ($\pm 2,3$) nach der Operation erfolgte die Nachuntersuchung. Die operierte Gruppe hatte zu diesem Zeitpunkt ein durchschnittliches Alter von 16,4 Jahren (11-20).

Die Daten des Patientenkollektives zum Zeitpunkt der Operation und der Nachuntersuchung sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4 Darstellung des Patientenkollektives zum Zeitpunkt der Operation und der Nachuntersuchung

Parameter	Wert
Anzahl der Patienten*innen	18
weiblich	8
männlich	10
Anzahl der operierten Füße insgesamt	25
rechte Füße	10
linke Füße	15
Anzahl der operierten Füße pro Person	
beidseits	7
einseitig rechter Fuß	3
einseitig linker Fuß	8
Durchschnittsalter bei Arthrorise in Jahren (Spanne)	12,5 (10-16)
Nebendiagnosen	
Diabetes mellitus Typ 1	1
Arterielle Hypertonie	1
Coalitio talocalcaneare und calcaneonaviculare	3
Verkürzung der Achillessehne/ Wadenmuskulatur	3

Hallux valgus	1
Genu valgum	2
Zum Zeitpunkt der Nachuntersuchung	
Durchschnittsalter in Jahren (Spanne)	16,4 (11-20)
Anzahl der Füße ohne Metallentfernung	12
Anzahl der Füße mit Metallentfernung	13
Durchschnittsverweildauer des Implantates bei den Füßen mit Metallentfernung in Jahren (Spanne)	2,6 (1-6)

Ergänzend wurden als eine Subgruppe (n=11) die Kinderfüße ausgewertet, die nur an einem Fuß operiert wurden. Bei diesen Kindern wurden die Daten der dynamischen Pedobarographie des operierten und des nicht operierten Fußes miteinander verglichen.

Zusätzlich wurden alle operierten Füße aufgeteilt, ob sie noch ein Implantat enthielten oder ob dieses bereits entfernt worden war. Diese beiden Gruppen wurden miteinander verglichen (Tabelle 5). Erwartungsgemäß war die Gruppe nach Entfernung des Implantates älter und schwerer.

Tabelle 5 Darstellung der Subgruppe des Patientenkollektives mit Implantat (n=12) und des Patientenkollektives ohne Implantat (n=13, unpaired t-test)

	postoperative Gruppe mit Implantat zum Zeitpunkt der Nachuntersuchung (n=12 Füße)	postoperative Gruppe ohne Implantat zum Zeitpunkt der Nachuntersuchung (n=13 Füße)	Signifikanzniveau (p<0,05 (*), p<0,01 (**), p<0,001 (***))
Gewicht (kg)	56,1 ± 17,7 (33-77)	72,5 ± 17 (50-105)	*
Alter (Jahre)	14,8 ± 2,4 (11-19)	17,8 ± 1,8 (15-20)	**
Geschlecht	8 männlich/ 4 weiblich	6 männlich/ 7 weiblich	

Fuß	5 rechts/ 7 links	5 rechts/ 8 links	
Fußfläche (cm²)	146,6 ± 16,4 (125,7-178,4)	157,6 ± 20,6 (121,9-196,4)	ns

3.1.1 Komplikationen

Nach Durchsicht der Patientenakten und Operationsprotokolle wurden als direkt mit der Operation in Verbindung stehende Komplikation postoperative Schmerzen von den Patienten*innen geäußert. Diese beschränkten sich auf ein als normal anzusehendes Ausmaß und Zeitraum. Bei einem Patienten kam es während der Narkoseeinleitung zu einem anaphylaktischen Schock aufgrund eines Narkose-Medikamentes, sodass die Operation nicht durchgeführt werden konnte. Zu einem späteren Zeitpunkt konnte die Arthrorise komplikationslos nachgeholt werden.

Bei der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Nachuntersuchung beklagte eine Patientin neu aufgetretene Fußschmerzen und ein Druckschmerz über der Narbe. Bei dieser Patientin wurde nach der Untersuchung die Entnahme der Schraube geplant, welche bis zur Fertigstellung dieser Arbeit erfolgte. Mittlerweile gibt sie an, dass sie seit der Metallentfernung schmerzfrei sei. In der Arbeit werden die Daten der Patientin mit noch vorhandener Schraube verwendet. Schraubenbrüche, Infektionen oder andere schwerwiegende Komplikationen traten bei den untersuchten Patienten*innen nicht auf.

3.2 Gesundes Vergleichskollektiv

Für die Auswertung der dynamischen Pedobarographie wurde eine gesunde Vergleichsgruppe aus 13 Kindern im Alter zwischen 11 und 16 Jahren evaluiert. Eine Übersicht der postoperativen Gruppe zum Zeitpunkt der Nachuntersuchung und der Vergleichsgruppe ist in Tabelle 6 und Abbildung 29 aufgeführt.

Tabelle 6 Darstellung der postoperativen Gruppe (n=25) zum Zeitpunkt der Nachuntersuchung und der Vergleichsgruppe (n=26, unpaired t-test)

	postoperative Gruppe (n=25 Füße; n=18 Patienten*innen)	Vergleichsgruppe (n=26 Füße; n=13 Personen)	Signifikanzniveau (p<0,05 (*), p<0,01 (**), p<0,001 (***))
Gewicht (kg)	64,6 ± 19,2 (33-105)	53,5 ± 12,9 (31,5-74)	*

Alter (Jahre)	16,4 ± 2,6 (11-20)	13,6 ± 1,7 (11-16)	***
Geschlecht	14 männlich/ 11 weiblich	14 männlich/ 12 weiblich	
Fuß	10 rechts/ 15 links	13 rechts/ 13 links	
Implantat	12 mit/ 13 ohne	-	

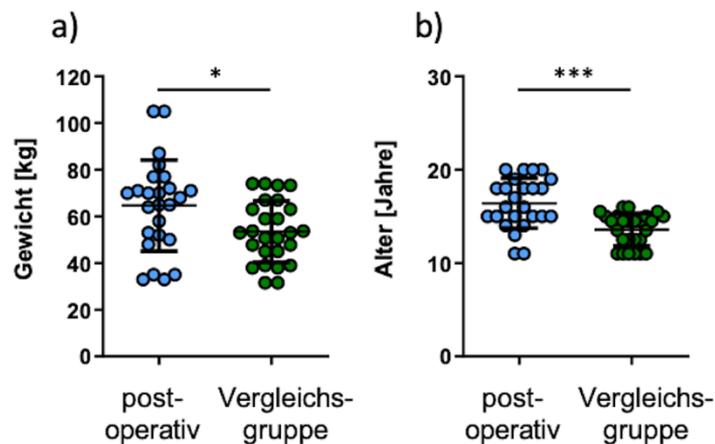


Abbildung 29 Darstellung des Gewichtes und Alters der postoperativen Arthrorisegruppe zum Zeitpunkt der Nachuntersuchung und der Vergleichsgruppe (unpaired t-test, n=25 für postoperative Arthrorisegruppe, n=26 für Vergleichsgruppe. $p < 0,05$ (*), $p < 0,001$ (***)).

3.3 American Orthopaedic Foot and Ankle Society (AOFAS) Fragebogen

Der im Rahmen der Nachuntersuchung ausgefüllte AOFAS Fragebogen wurde von allen 18 untersuchten Patienten*innen ausgefüllt. Patienten*innen, die an beiden Füßen operiert wurden, beantworteten den Fragebogen für jeden Fuß einzeln. Daraus resultierten jeweils 25 Datensätze für den prä- und postoperativen Zustand. Diese wurden ausgewertet und miteinander verglichen.

Von den maximal 100 erreichbaren Pkt. im Fragebogen lag der Mittelwert der präoperativen Angaben bei 69,08 (Spannweite 38-90 Pkt.) und im Mittel bei der postoperativen Befragung bei 93,96 Pkt. (Spannweite 70-100 Pkt.) (Abbildung 30). Dies ist ein signifikanter Unterschied von 24,88 Pkt. (Wilcoxon-signed-rank Test, $p < 0,001$ (***)). Die gesunde Vergleichsgruppe (n=13 Personen; n=26 Füße) erzielte bei der Befragung die Maximalpunktzahl von 100. Im Folgenden wird nur auf die Auswertung des prä- und postoperativen Vergleiches des Patientenkollektives eingegangen.

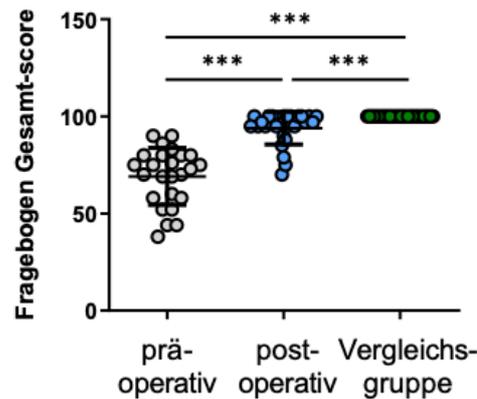


Abbildung 30 Darstellung der erreichten Gesamtpunktzahl im AOFAS Fragebogen für die präoperative Arthrorisegruppe (n=25), die postoperative Arthrorisegruppe (n=25) und die Vergleichsgruppe (n=26) (Wilcoxon-signed-rank Test für prä- und postoperative Arthrorisegruppe, $p < 0,001$ (***) , Mann-Whitney-U Test für präoperative Arthrorisegruppe und Vergleichsgruppe, $p < 0,001$ (***) , Mann-Whitney-U Test für postoperative Arthrorisegruppe und Vergleichsgruppe, $p < 0,001$ (***)). Alle drei Gruppen weisen zum Zeitpunkt der Befragung ein unterschiedliches Alter auf.

Die einzelnen Teilbereiche unterschieden sich in den prä- und postoperativen Angaben. Die Erhebung der Schmerzsymptomatik ergab einen präoperativen Mittelwert von 27,2 Pkt. (Spannweite 0-40 Pkt.) und einen postoperativen Mittelwert von 36,8 Pkt. (Spannweite 20-40 Pkt.) (Abbildung 31a). Bei der Befragung des präoperativen Zustandes empfanden 56% der Patienten*innen keine Einschränkungen der täglichen Aktivität, aber nannten Einschränkungen bei Freizeitaktivitäten. Nach der Operation gaben 68% der behandelten Patienten*innen an keine Einschränkungen zu haben (Abbildung 31b). Durchschnittlich konnten die Kinder vor der Operation maximal 4-6 Blocks gehen, postoperativ gaben 92% der Kinder an, die mit der höchsten Punktzahl bewerteten Strecke von mehr als 6 Blocks zu schaffen (Abbildung 31c). Dies ist eine signifikante Steigerung in allen drei Teilbereichen (Wilcoxon-signed-rank Test, $p < 0,001$ (***)).

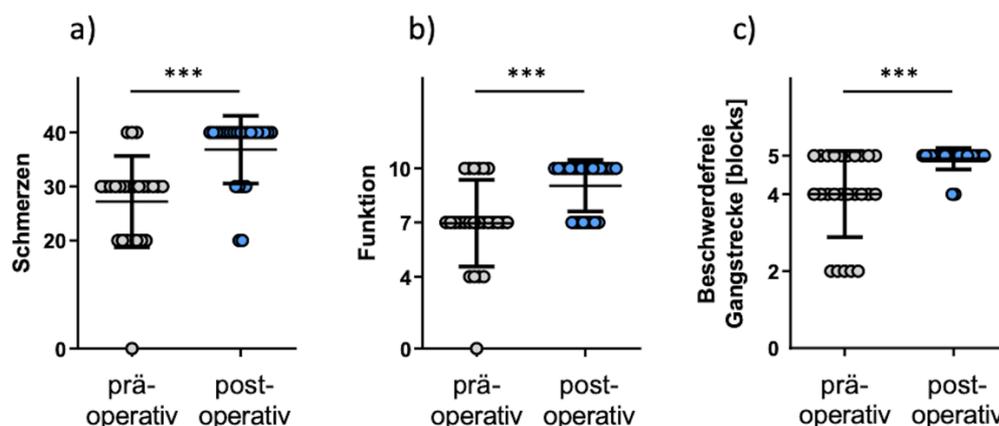


Abbildung 31 Darstellung der Ergebnisse der signifikanten Steigerung der Teilbereiche Schmerzen (a), Funktion (b) und Beschwerdefreie Gangstrecke (c) (Wilcoxon-signed-rank Test, $n = 25$ für prä- und postoperative Arthrorisegruppe, $p < 0,001$ (***)).

Beim Gehen auf unebenen Flächen erreichten die Patienten*innen präoperativ einen Mittelwert von 2,8 Pkt. (Spannweite 0-5 Pkt.). Maximal wären 5 Pkt. erreichbar gewesen. Postoperativ stieg der Mittelwert signifikant auf 4,52 Pkt. (Spannweite 3-5 Pkt.) (Wilcoxon-signed-rank Test, $p < 0,001 (***)$) (Abbildung 32a). Auch das Gangbild veränderte sich signifikant. Postoperativ erhielten alle Patienten*innen die maximale Punktzahl von 8, während sie präoperativ 5,28 Pkt. (Spannweite 0-8 Pkt.) im Mittel erzielten (Wilcoxon-signed-rank Test, $p < 0,001 (***)$) (Abbildung 32b).

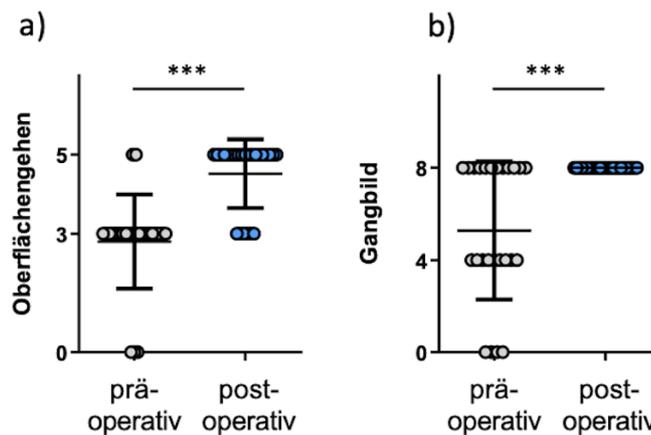


Abbildung 32 Darstellung der signifikant veränderten prä- und postoperativ erreichten Punktzahlen beim Gehen über unebene Oberflächen (a), sowie die Bewertung des Gangbildes (b) (Wilcoxon-signed-rank Test, $n=25$ für prä- und postoperative Arthrorisegruppe, $p < 0,001 (***)$).

Im Rahmen der Nachuntersuchung wurden die folgenden vier Parameter ärztlich untersucht und bewertet. Bei der postoperativen Untersuchung des Bewegungsumfanges der Füße zeigten alle Füße einen normalen sagittalen Bewegungsumfang des Sprunggelenkes. Bei einem Fuß wurde eine mäßige Einschränkung in der Rückfußbeweglichkeit festgestellt; die anderen 24 Füße hatten ein normale Rückfußbeweglichkeit (Statistik siehe Abbildung 33a, b). Die Gelenk-Hinterfuß-Stabilität wurde bei allen untersuchten Kinderfüßen sowohl prä- als auch postoperativ mit voller Punktzahl vom untersuchenden Arzt bewertet (Statistik siehe Abbildung 33c). Eine signifikante Veränderung war bei der Rückfußachse zu erkennen. Die Bewertung der Patientenfüße ändert sich im Mittel von präoperativen 2,6 Pkt. (Spannweite 0-10 Pkt.) auf 8,8 Pkt. (Spannweite 5-10 Pkt.) postoperativ (Wilcoxon-signed-rank Test, $p < 0,001 (***)$). Dabei wurde bei 76% der operierten Füße die Rückfußachse postoperativ als normal bewertet (Abbildung 33d).

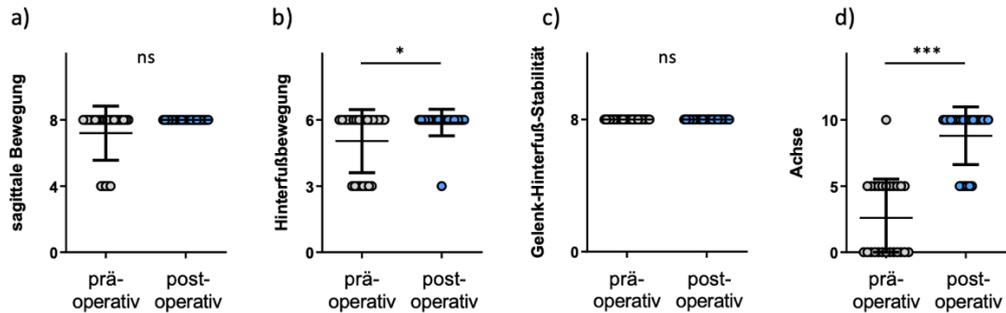
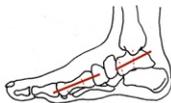


Abbildung 33 Auswertung der Teilbereiche sagittale Bewegung (a), Hinterfußbewegung (b), Gelenk-Hinterfuß-Stabilität (c) und Hinterfußachse (d) im prä- und postoperativen Vergleich (Wilcoxon-signed-rank Test, n=25 für prä- und postoperative Arthrorisegruppe, $p < 0,05$ (*), $p < 0,001$ (***)).

3.4 Radiologische Parameter

Zur Kontrolle des Korrektur-effektes wurden die prä- und postoperativen Röntgenbilder der operierten Füße verglichen und die Winkel, wie in Kapitel 1.2.1 beschrieben, bestimmt. Für jeden Fuß wurde ein Röntgenbild in seitlicher und in a.p. Projektion angefertigt, sodass insgesamt 100 Röntgenbilder (50 präoperativ, 50 postoperativ) ausgewertet wurden. Der Mittelwert des jeweiligen Parameters wurde für die 25 Füße bestimmt (Tabelle 7).

Tabelle 7 Darstellung der prä- und postoperativen Daten der radiologischen Parameter (n=25, paired t-test)

		präoperativ (n=25)	postoperativ (n=25)	Signifikanz- niveau ($p < 0,05$ (*), $p < 0,01$ (**), $p < 0,001$ (***))
	TMT seitlich	$-11 \pm 9,1$ (-32-7)	$-4,4 \pm 3,6$ (-14-2)	**
	TMTB a.p.	$-36,1 \pm 8$ (-58-(-22))	$-22 \pm 5,6$ (-34-(-11))	***
Summe aus TMT seitlich und a.p.	TMT- Index	$-47,1 \pm 13,4$ (-81-(-20))	$-26,3 \pm 6,8$ (-36-(-12))	***
	CP	$16,2 \pm 7,7$ (4-38)	$17,4 \pm 4,8$ (8-26)	ns

Bei der Betrachtung der einzelnen Patienten*innen fiel auf, dass sich der TMT-Index bei 23 Füßen von 17 Patienten*innen postoperativ verringert hat. Bei der 18. Patientin wies der linke Fuß einen vergrößerten TMT-Index auf, während der rechte Fuß in der Summe gleich blieb.

3.5 Podometrische Untersuchung

Bei der podometrischen Untersuchung wurde bei 14 Füßen (56%) die Fußform postoperativ als normal bewertet; bei den anderen 11 Füßen wurde die Fußform als milde Ausprägung eines KSF eingestuft (44%). Schwer veränderte Fußformen konnten nicht gefunden werden (Abbildung 34). Präoperative Vergleichswerte lagen nicht vor.

Podometrische Klassifizierung

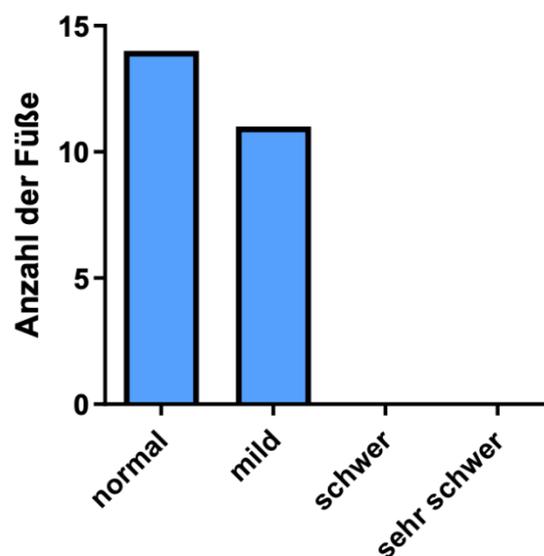


Abbildung 34 graphische Darstellung der Ergebnisse der postoperativen podometrischen Fußformbestimmung nach der Klassifizierung von Hefti und Brunner (1999) (n=25).

3.6 Dynamische Pedobarographie

Die Ergebnisse der dynamischen Pedobarographie wurden mit den Werten der gesunden Kontrollgruppe verglichen.

Hier zeigte sich, dass die Kontaktfläche der Fußfläche in der postoperativen Gruppe größer war und sich zu der Vergleichsgruppe signifikant unterschied (unpaired t-test, $p < 0,001 (***)$).

Bei der Aufteilung des Fußes fand sich ein signifikanter Unterschied (unpaired t-test, $p < 0,001 (***)$) zwischen den relativen Kontaktflächen von Ferse, Mittel- und Vorfuß. Die operierten Füße zeigten eine größere relative Kontaktfläche im Mittelfuß. Die Ferse und der Vorfuß waren in der Vergleichsgruppe größer. Die Auswertung der Kontaktflächen der

Zehen 2-5 sind nicht dargestellt, da hier keine signifikanten Unterschiede gefunden wurden (Tabelle 8).

Tabelle 8 Darstellung der Fußfläche und relativen Kontaktfläche für Vorfuß, Mittelfuß und Ferse von der Arthrorisegruppe (n=25) und Vergleichsgruppe (n=26) (unpaired t-test)

Parameter der dynamischen Pedobarographie	postoperierter Fuß (n=25)		Vergleichsgruppe (n=26)	Signifikanzniveau (p<0,05 (*), p<0,01 (**), p<0,001 (***))
	Fußfläche (cm²)	152,3 ± 19,5 (121,9-196,4)	127,6 ± 22,2 (93-172,7)	
Relative Kontaktfläche (% der Gesamtfläche)				
Ferse	24 ± 2% (20-27%)	26 ± 2% (22-29%)		***
Mittelfuß	22 ± 4% (15-31%)	16 ± 6% (3-26%)		***
Vorfuß	54 ± 3% (49-58%)	58 ± 5% (49-67%)		***

Als Grundlage für die Berechnung der relativen Kontaktzeit wurde die gesamte Kontaktzeit auf 100 normiert und die Zeiten für die einzelnen Fußabschnitte in Relation zur Gesamtzeit bestimmt. Im Unterschied zu der relativen Kontaktzeit der Vergleichsgruppe von 53%*ROP* (\pm 9%*ROP*) hatten die operierten Füße eine signifikant höhere relative Kontaktzeit von 62%*ROP* (\pm 7%*ROP*) mit dem Mittelfuß. Wohingegen sie eine signifikant kürzere relative Kontaktzeit mit den MFK1-4 aufwiesen. Die Ferse und die Zehen unterschieden sich in beiden Gruppen nicht für die relative Kontaktzeit (Statistik siehe Abbildung 35).

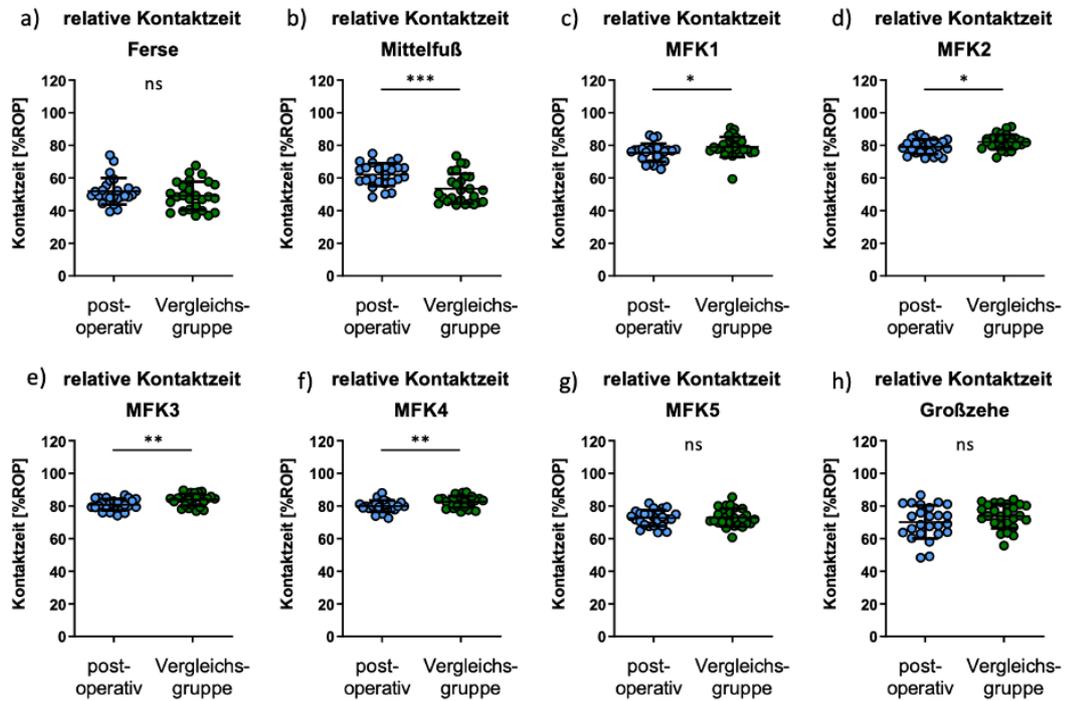


Abbildung 35 Darstellung der pedobarographischen Auswertung der einzelnen Werte der relativen Kontaktzeit für jeden Sensor (MFK=Mittelfußknochen). Vergleich der relativen Kontaktzeit für alle Fußabschnitte für die Vergleichsgruppe und die Arthrorisegruppe (unpaired t-test, $n=25$ für postoperative Arthrorisegruppe, $n=26$ für Vergleichsgruppe, $p<0,05$ (*), $p<0,01$ (**), $p<0,001$ (***)).

Der Parameter Kraftmaximum wurde für die Auswertung in Relation zur Kraft des Körpergewichtes des Kindes gesetzt und die relativen Kraftmaxima der einzelnen Fußabschnitte miteinander verglichen. Die Kraftverteilung der Arthrorisegruppe lag bei 67% ($\pm 13\%$) für die Ferse und 28% ($\pm 10\%$) für den Mittelfuß. Das Gesamtobjekt erreichte ein relatives Kraftmaximum von 109% ($\pm 10\%$). Es ist physiologisch, dass das Kraftmaximum beim Gehen das Körpergewicht übersteigt und kann daher in Relation größer als 100% sein (Mitternacht und Lampe 2006). Bei der Vergleichsgruppe wurde ebenfalls ein relatives Kraftmaximum für das Gesamtobjekt von 109% ($\pm 5\%$) gemessen und eine Kraftverteilung von 15% ($\pm 9\%$) für den Mittelfuß und 71% (± 9) für die Ferse ausgewertet. Das relative Kraftmaximum im Mittelfußbereich war somit bei der Vergleichsgruppe signifikant niedriger (unpaired t-test, $p<0,001$ (***)). Bei der Betrachtung der restlichen Fußabschnitte zeigten sich kaum Unterschiede im Bezug zu der Vergleichsgruppe. Die Vergleichsgruppe erreichte höhere Werte über dem MFK1 (unpaired t-test, $p<0,01$ (**)), während bei der Arthrorisegruppe ein höherer Wert über MFK3 gemessen wurde (unpaired t-test, $p<0,05$ (*)) (Abbildung 36).

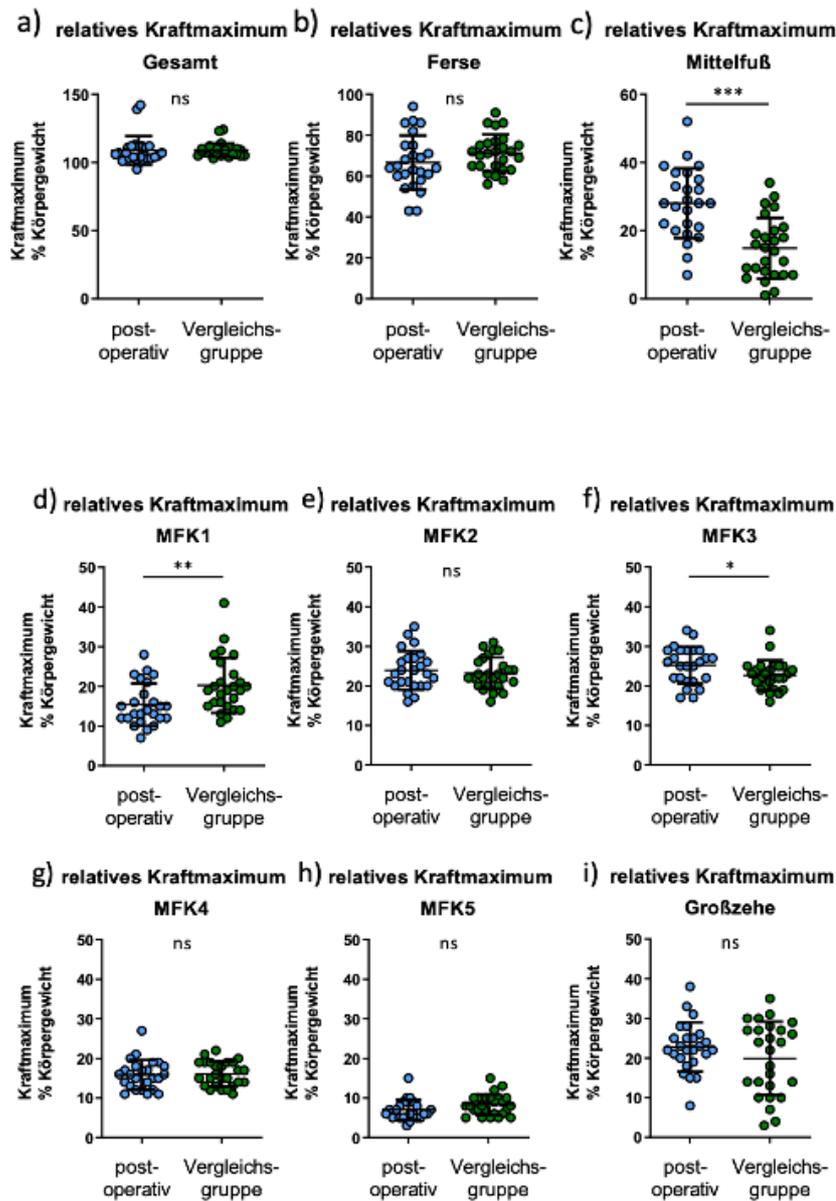


Abbildung 36 Darstellung der pedobarographischen Auswertung der einzelnen Werte der Kraftmaxima in % zum Körpergewicht für jeden Sensor (MFK=Mittelfußknochen). Vergleich der relativen Kraftmaxima für alle Fußabschnitte für die Vergleichsgruppe und die Arthrorisegruppe (unpaired t-test, n=25 für postoperative Arthrorisegruppe, n=26 für Vergleichsgruppe, $p < 0,05$ (*), $p < 0,01$ (**), $p < 0,001$ (***)).

Bei einem KSF kann es zur Verschiebung der Belastungszonen kommen. Zur Beurteilung der Belastungszonen wurden die Spitzendrücke auf das Körpergewicht und die Fußfläche der Kinder normiert und die relativen Spitzendrücke ausgewertet. Dieser war für das Gesamtobjekt und für den Mittelfuß in der Arthrorisegruppe signifikant höher als in der Vergleichsgruppe. Über den MFK2 und 3, sowie der Großzehe wurden signifikant höhere Werte für die Arthrorisegruppe gemessen. Die Vergleichsgruppe erzielte einen signifikant höheren Wert über dem MFK1 (Statistik siehe Abbildung 37).

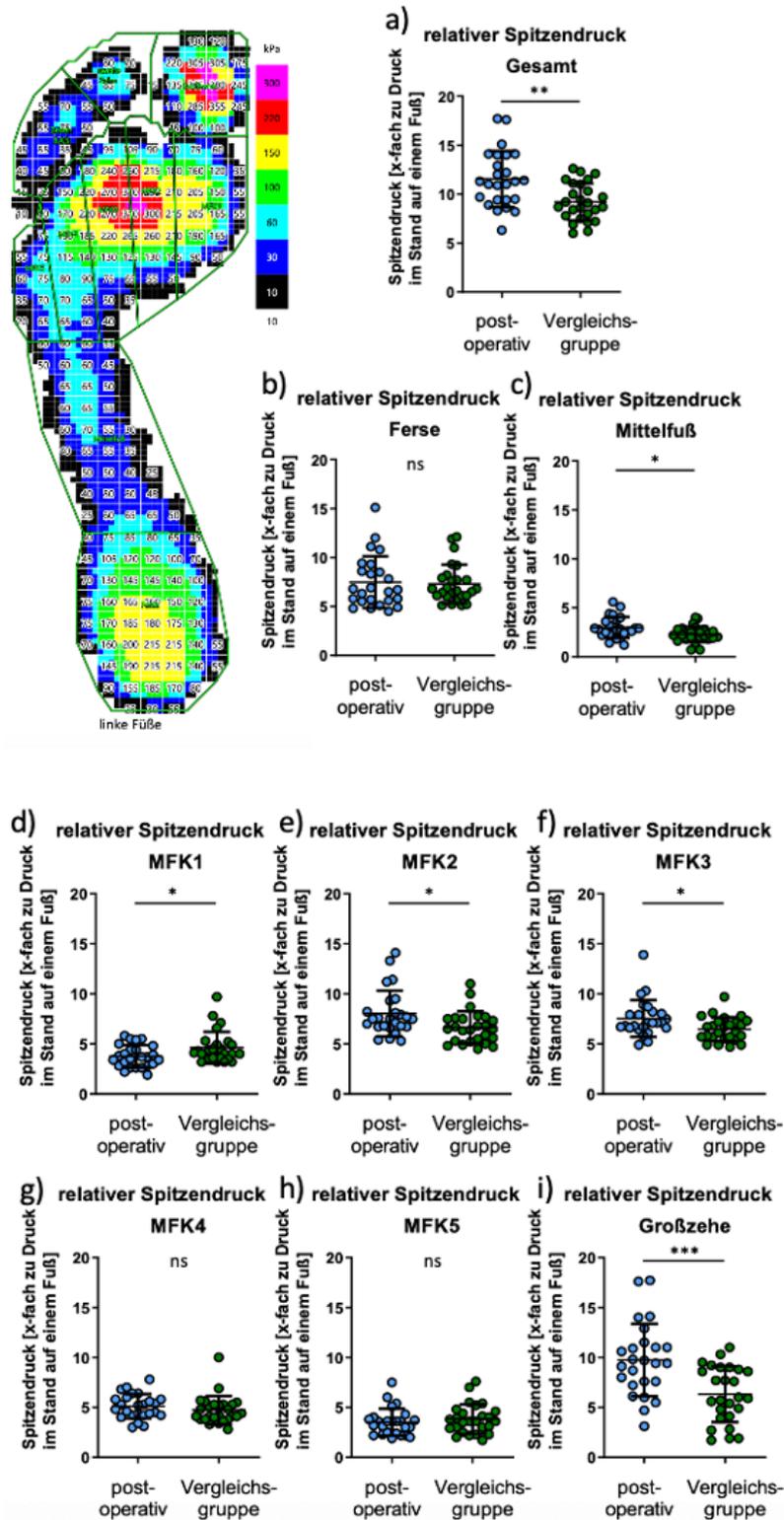


Abbildung 37 Darstellung eines bei der Pedobarographie gemessenen Patientenfußes mit Angabe der einzelnen Werte des Spitzendruckes für jeden Sensor (links). Darstellung der relativen Spitzendrücke (x-fach zu Druck im Stand auf einem Fuß) für die postoperative Arthrorisegruppe verglichen mit der Vergleichsgruppe für jeden Sensor (MFK=Mittelfußknochen) (unpaired t-test, n=25 für postoperative Arthrorisegruppe, n=26 für Vergleichsgruppe, p<0,05 (*), p<0,01 (**), p<0,001 (***)).

Zur Objektivierung der Beurteilung des Therapieerfolges sind der Halluxwinkel und der Gewölbeindex geeignete Parameter (Murley et al. 2009; Halabchi et al. 2013). Die Auswertung der operierten KSF ergab im Mittel einen Halluxwinkel von $-0,64^\circ$ ($\pm 5,5^\circ$ (Spannweite $-12,4$ - $11,3^\circ$)) und in der Vergleichsgruppe von $0,86^\circ$ ($\pm 6,3^\circ$ (Spannweite $-16,3$ - $11,9^\circ$)) (keine Signifikanz). In der Arthrorisegruppe wurde ein Gewölbeindex von $0,272$ ($\pm 0,04$ (Spannweite $0,18$ - $0,36$)) bestimmt, während die Füße der Vergleichsgruppe einen signifikanten Unterschied bei einem Gewölbeindex von $0,192$ ($\pm 0,065$ (Spannweite $0,04$ - $0,29$)) aufwiesen (unpaired t-test, $p < 0,001$ (***)) (Abbildung 38).

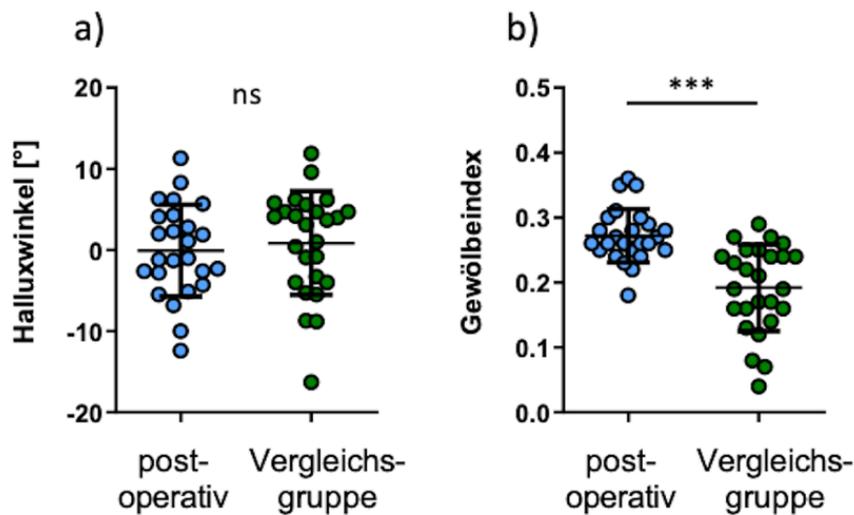


Abbildung 38 Darstellung des Halluxwinkels (a) und des Gewölbeindex (b) der Arthrorisegruppe und der Vergleichsgruppe (unpaired t-test, $n=25$ für postoperative Arthrorisegruppe, $n=26$ für Vergleichsgruppe, $p < 0,001$ (***)).

Zusätzlich wurde aus den Datensätzen der dynamischen Pedobarographie eine Subgruppe von 11 Kindern gebildet, die nur an einem Fuß operiert wurden. Bei dieser Auswertung wurde der operierte Fuß, mit dem nicht operierten Fuß verglichen. Sowohl bei der relativen Kontaktfläche wie auch der relativen Kontaktzeit konnten keine signifikanten Unterschiede beobachtet werden (Abbildung 39). Lediglich bei einzelnen Parametern fielen Unterschiede auf, welche sehr gering waren und keinen systematischen Unterschied aufwiesen (siehe Anhang Tabelle).

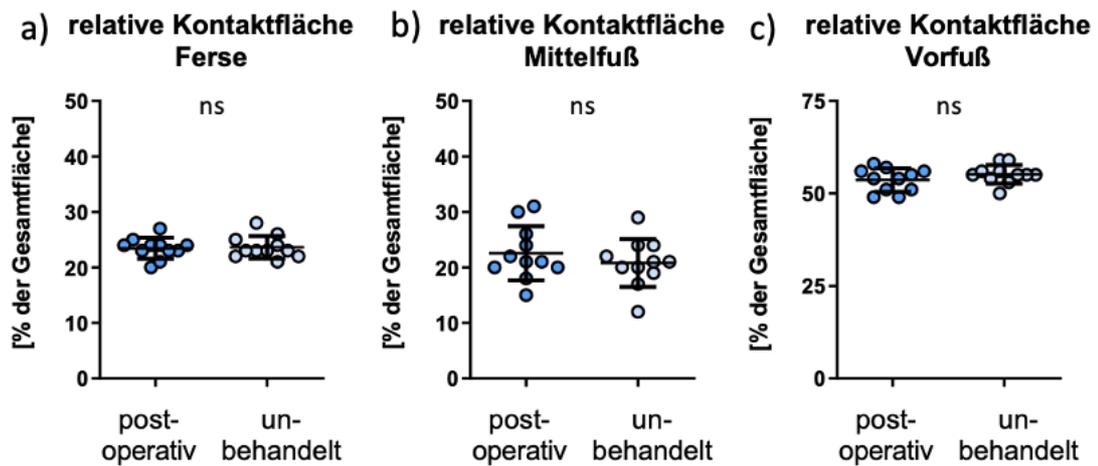


Abbildung 39 Darstellung der relativen Kontaktfläche für die Ferse (a), den Mittelfuß (b), sowie den Vorfuß (c) für die operierten Füße und die nicht operierten Füße (paired t-test, $n=11$ für postoperative Füße, $n=11$ für unbehandelte Füße).

Ergänzend wurden die Patienten*innen mit Implantat und die Patienten*innen deren Implantat bereits entfernt wurde miteinander verglichen. Hierbei fiel ein geringer signifikanter Unterschied (unpaired t-test, $p < 0,05$ (*)) bei den Kindern mit Implantat bei der relativen Kontaktfläche im Vorfuß auf (Abbildung 40). Die restlichen Parameter zeigten, wie in der anderen Subgruppe, nur vereinzelt geringfügige Unterschiede. Dabei gab es keine Unterschiede, die auf einen stärker oder schwächer ausgeprägten KSF in einer der Gruppen hinwiesen (siehe Anhang Tabelle).

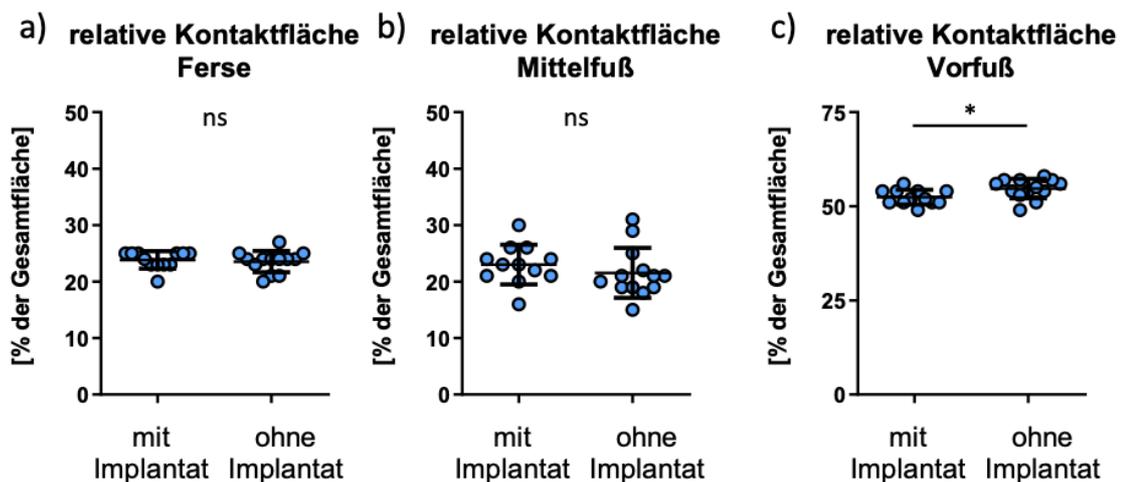


Abbildung 40 Darstellung der relativen Kontaktfläche für die Ferse (a), den Mittelfuß (b), sowie den Vorfuß (c) für die Füße mit Implantat und die Füße ohne Implantat (unpaired t-test, $n=12$ für Füße mit Implantat, $n=13$ für Füße ohne Implantat, $p < 0,05$ (*)).

Zur Bewertung des Abrollvorganges der Kinderfüße wurde die Abrolllinie analysiert und in drei Gruppen eingeteilt (medialisiert, normal, lateralisiert). Der normale Abrollvorgang wurden in Kapitel 2.4.4 erläutert und eine entsprechende pedobarographische Darstellung abgebildet. In dem untersuchten Patientenkollektiv wiesen vier der operierten Füße eine

medialisierte Abrolllinie auf (16%), 21 eine normale (84%) und bei keinem der Kinderfüße wurde eine Lateralisierung des Abrollvorganges festgestellt. Die Auswertung der Vergleichsgruppe ergab, dass 25 Füße normal abrollten und nur ein Fuß medialisierte. Ergänzend wurde untersucht, ob die Abrolllinie einen gezackten Verlauf aufwies. Dies wäre ein Hinweis für eine Gangunsicherheit. Sowohl in der Vergleichsgruppe als auch in der Arthrorisegruppe konnte postoperativ bei keinem der Kinder eine gezackte Abrolllinie festgestellt werden (Tabelle 9).

Tabelle 9 Abrolllinien der postoperativen Gruppe zum Zeitpunkt der Nachuntersuchung (n=25) und der Vergleichsgruppe (n=26)

		Anzahl der Füße	Prozent
postoperativ (n=25)	medialisiert	4	16%
	mittig/ normal	21	84%
	lateralisiert	0	0%
	gezackt	0	0%
	normal	25	100%
Vergleichsgruppe (n=26)	medialisiert	1	4%
	mittig/ normal	25	96%
	lateralisiert	0	0%
	gezackt	0	0%
	normal	26	100%

Von sieben der operierten Füße liegen zudem präoperative Aufnahmen des Abrollvorganges vor. Auf diesen ist zu erkennen, dass die Abrolllinien bei drei Füßen medialisierten. Die vier anderen Füße waren unauffällig. In der postoperativen Auswertung wurde das Abrollverhalten bei den drei medialisierten Füßen als normal eingestuft. Bei einem Patienten fiel postoperativ eine medialisierte Abrolllinie auf, welche präoperativ als normal eingestuft wurde. Bei zwei Füßen fielen bei den präoperativen Abrolllinien ein gezackter Verlauf auf (Tabelle 10, Abbildung 41).

Tabelle 10 Abrolllinien prä- und postoperativ (n=7)

		Anzahl der Füße	Prozent
präoperativ (n=7)	medialisiert	3	43%
	mittig/ normal	4	57%
	lateralisiert	0	0%
postoperativ (n=7)	gezackt	2	29%
	normal	5	71%
	medialisiert	1	14%
	mittig/ normal	6	86%
	lateralisiert	0	0%
	gezackt	0	0%
	normal	7	100%

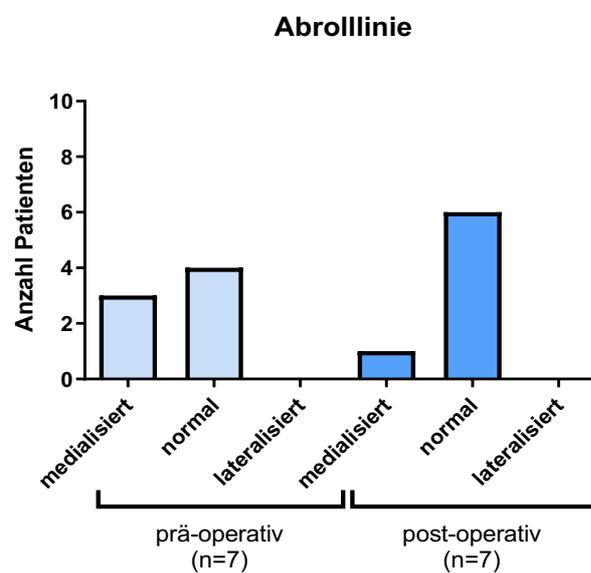


Abbildung 41 Darstellung der prä- und postoperativen Abrolllinie von sieben Füßen.

3.7 *Laser Assisted Static Alignment Reference (L.A.S.A.R.) posture* der Firma Otto Bock HealthCare GmbH

Um die Statik der Beinachsen beurteilen zu können, wurde im Rahmen der Nachuntersuchung die *L.A.S.A.R. posture* Untersuchung durchgeführt. Der Untersuchungsablauf wurde in Kapitel 2.4.5 erläutert. Die Untersuchung konnte bei 16 der behandelten Patienten*innen postoperativ durchgeführt werden. Eine normale Beinachse wurde bei 10 Patienten*innen (62,5%) ausgewertet. Bei 5 Patienten*innen (31,25%) wurde eine lateralisierte Beinachse festgestellt und bei einem Patienten (6,25%) medialisierte die Beinachse (Abbildung 42).

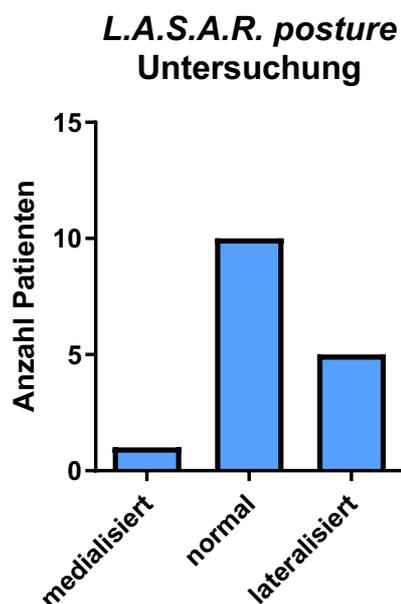


Abbildung 42 Darstellung der postoperativen Ergebnisse der *L.A.S.A.R. posture* Untersuchung (n=16).

4 Diskussion

Ein häufiger Vorstellungsgrund muskuloskelettaler Probleme bei Kindern ist die Fußregion (Jordan et al. 2010), wobei im Kindesalter von einer Häufigkeit von 1:1000 für einen KSF ausgegangen wird (Kuhn et al. 2010). Für die Behandlung eines therapiebedürftigen fKSF im Kindes- und Jugendalter ist die Arthrorise in Europa das am häufigsten durchgeführte Verfahren (DGOOC 2017; Faldini et al. 2018).

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein junges Patientenkollektiv untersucht, welches nach der Diagnose eines fKSF zunächst für mindestens sechs Monate konservativ therapiert wurde und dann einer operativen Versorgung durch eine subtalare Arthrorise mittels ProStop®-Implantat des Herstellers Arthrex GmbH (München) zugeführt wurde. Zur Objektivierung der postoperativen Korrektoreffekte wurden in dieser Arbeit multiple Verfahren angewendet. In Zusammenschau aller Ergebnisse wurde das Patientenbefinden und die anatomischen Veränderungen der Füße und Fußformen, Änderungen der radiologischen Parameter und das dynamische Pedobarographie- und Abrollverhalten analysiert.

4.1 Komplikationen

Ein Vorteil der Arthrorise Operation besteht darin, dass es ein minimalinvasives und komplikationsarmes Verfahren ist (Arnold und Weber 2010; Shah et al. 2015). Bei diesem Verfahren kann während der Operation die Größe des Implantates durch Probeimplantate genau bestimmt, das Bewegungsausmaß kontrolliert und auf individuelle Anatomien eingegangen werden (Kuhn et al. 2010; Kamawal und Raab 2020). Die Kegelform des ProStop®-Implantates (Arthrex GmbH, München) ist ein großer Vorteil, da sie sich in den trichterförmigen Sinus tarsi einfügt und durch die Formanpassung in der Regel nicht wandert. Mögliche postoperative Komplikationen einer Arthrorise beschrieb Miller (2006). Er führte in seiner Studie Schraubendislokationen, Schmerzen über dem Sinus tarsi und eine unzureichende Fußstellungskorrektur auf. Sowohl Zhu und Xu (2015), als auch Kamawal und Raab (2020) stellten in ihren Veröffentlichungen als Hauptkomplikation den postoperativen Schmerz über dem Sinus tarsi, sowie Verletzungen an neurovaskulären Strukturen heraus.

Nach Durchsicht der Patientenakten und Befragung des Patientenkollektives gaben alle Patienten*innen an, nach der Operation Schmerzen gehabt zu haben. Die Schmerzen traten in einem aushaltbaren Ausmaß und Zeitraum nach einem invasiven Eingriff auf. Bei der postoperativen Befragung 3,9 Jahre nach der Arthrorise gaben 76% der Kinder im AOFAS Fragebogen an schmerzfrei zu sein. Giannini et al. (2003) beschreiben in ihrer Arbeit bei 85,7% der untersuchten Patienten*innen eine postoperative Verbesserung des Parameters Schmerzen.

Bei einer Patientin wurde im Rahmen der Nachuntersuchung eine neuauftretende Schmerzsymptomatik festgestellt. Nach der klinischen Untersuchung wurde die Explantation der Schraube geplant und durchgeführt. Intraoperativ wurden eine Dislokation und eine Lockerung der Schraube festgestellt. Nach erfolgreicher Entfernung der Schraube, gab die Patientin an schmerzfrei zu sein. Diese Einzelfallbeschreibung entspricht einem prozentuellen Anteil von 4% bezogen auf das Patientenkollektiv dieser Arbeit. Bis zur Fertigstellung der Arbeit fielen keine anhaltenden Langzeitfolgen oder schwerwiegende Komplikationen auf. Die Komplikationsrate von 4% in dieser Arbeit ist vergleichbar mit den in der Literatur angegebenen Daten anderer Arthroriseverfahren. Kuhn et al. (2010) dokumentierten in ihrer Studie eine Komplikationsrate von 5% durch Schraubendislokation bei einer subtalaren Arthrorise mit dem Kalix-Implantat. Bei Cao et al. (2017) wurde eine Komplikationsrate von 3,7% bei der Versorgung mittels Kalix II-Implantat festgehalten. Der von Hamel (2010a) beschriebene schmerzhafte Peronealspasmus bei der Calcaneostop-Arthrorise trat bei dem untersuchten Patientenkollektiv dieser Arbeit nicht auf.

4.2 Vergleich der prä- und postoperativen Datensätze des AOFAS Fragebogens

Bei der Auswertung der AOFAS Fragebögen gab es eine signifikante Steigerung der Gesamtpunktzahl von 68,08 auf 93,96 Pkt. nach der Operation. Dieses Ergebnis deckt sich mit der Studie von Megremis und Megremis (2019), die ebenfalls eine subtalare Arthrorise verwendetet und eine signifikante Verbesserung in allen Parametern des AOFAS Fragebogens beschrieben. Megremis und Megremis (2019) verzeichneten eine Steigerung der Gesamtpunktzahl von 65,14 Pkt. auf 88,85 Pkt. postoperativ.

Zudem ähneln die in dieser Arbeit ausgewerteten AOFAS Fragebögen den Ergebnissen von Kuhn et al. (2010). In ihrer Arbeit konnte mit dem Kalix-Implantat eine Verbesserung der präoperativen Punktzahl im AOFAS Fragebogen von 70 auf 96 Pkt. nach der Operation erzielt werden.

Auch bei der Auswertung der ärztlich evaluierten Parameter (Frage 6 bis 9) konnte eine signifikante Steigerung in der Beweglichkeit der Hinterfußbewegung erzielt werden, sowie eine signifikante Verbesserung von 2,6 auf 8,8 Pkt. in der Rückfußachse. Diese Werte ähneln den in der Literatur angegebenen Zahlen (Giannini et al. 2003; Jay und Din 2013).

Als kritisch muss die Erhebung des präoperativen Zustandes des AOFAS Fragebogens zum Zeitpunkt der Nachuntersuchung gewertet werden. Aus der Literatur ist bekannt (Sessler und Imrey 2015), dass retrospektiv erhobene Datensätze weniger valide sind.

4.3 Vergleich der prä- und postoperativen radiologischen Parameter

Zur Beurteilung der Korrekturereffekte mittels Röntgenbildern, wurde in dieser Arbeit der von Hamel und Kinast (2006) entwickelte TMT-Index angewendet. Einige Autoren (z.B. Davids

et al. 2005; Megremis und Megremis 2019) verwenden für die Bestimmung des TMT-I-Winkels in der a.p. Aufnahme die Mittellinie durch den ersten Mittelfußknochen. Hierbei kann es bei Vorliegen eines Pes adductus oder eines Hallux valgus zu Abweichungen des 1. Strahles kommen und die Winkelbestimmung in der a.p. Aufnahme bei einem KSF beeinflusst werden. Aus diesem Grund wurde in dieser Arbeit für die Bestimmung des TMTB-I-Winkels in der a.p. Projektion die Linie vom geometrischen Taluskopfmittelpunkt durch das Os cuneiforme mediale zur Basis des TMT-I-Gelenkes bestimmt und somit mögliche Abweichungen minimiert (Hamel und Kinast 2006).

In der Veröffentlichung von Hamel und Kinast (2006) hatte das Normalkollektiv einen Mittelwert des TMT-Index von $-20,26^\circ$ (seitlicher TMT-I-Winkel: $-9,73^\circ$; a.p. TMTB-I-Winkel: $-10,53^\circ$) und die Patientengruppe mit einer Planovalgus-Deformität vor einer Arthrorise einen TMT-Index von $-51,47^\circ$ (seitlicher TMT-I-Winkel: $-29,13^\circ$; a.p. TMTB-I-Winkel: $-22,33^\circ$). 2010 veröffentlichte Hamel zudem prä- und postoperative Werte nach einer Arthrorise. Dort konnte eine Differenz von $22,8^\circ$ im TMT-Index im prä- und postoperativen Vergleich beobachtet werden. In der vorliegenden Arbeit erhielten wir vergleichbare Werte wie Hamel in 2010. Der TMT-Index verringerte sich bei dem untersuchten Patientenkollektiv im Mittel von $-47,08^\circ$ auf $-26,34^\circ$ (Differenz $20,74^\circ$) nach der Operation. Die Reliabilität der radiologischen Parameter für symptomatische KSF wurden von Younger (2005) und Choi et al. (2019) nachgewiesen. Eingeordnet in die Literatur (Younger 2005; Hamel und Kinast 2006), scheint der TMT-Index ein geeigneter Parameter zu sein, um den Fuß mehrdimensional beurteilen zu können und Korrektoreffekte zu registrieren. Die Korrektoreffekte dieser Arbeit lassen sich aufgrund der signifikanten Verringerung des TMT-Index als Erfolg einstufen.

Bei der Beurteilung des CP konnte bei dem in dieser Arbeit untersuchten Patientenkollektiv keine signifikante Veränderung nach der Operation festgestellt werden. Ähnliche Ergebnisse konnten bei Abbara-Czardybon et al. (2014) und Megremis und Megremis (2019) nach einer Arthrorise beobachtet werden. Hamel (2010b) verzeichnete einer Differenz von $2,6^\circ$.

4.4 Die dynamische Pedobarographie

Zur weiteren Auswertung der Korrektoreffekte wurde zusätzlich zu den radiologischen Parametern eine dynamische Pedobarographie durchgeführt. Hierdurch soll ergänzend zu den klinischen und radiologischen Parametern eine funktionelle Beurteilung und Analyse der einzelnen Fußabschnitte ermöglicht werden (Rosenbaum 2016). Bereits 2005 bestätigten Thometz et al. die Korrelation zwischen radiologischen Parametern und der dynamischen Pedobarographie bei der Beurteilung von Klumpfüßen. Westberry et al. (2013) verwendeten für die Kontrolluntersuchungen ihrer Evans-Osteotomien ebenfalls beide Kriterien. In beiden Studien wurde das emed® System (novel GmbH, München) verwendet, welches auch

in dieser Arbeit verwendet wurde. Die Reliabilität der emed® Plattform wurden von Hafer et al. (2013) und die Wiederholbarkeit von Putti et al. (2008) bewiesen.

In der bestehenden Literatur (Papamerkouriou et al. 2019; Hagen et al. 2020) liegen nur wenige Arbeiten vor, die eine dynamische Pedobarographie zur Überprüfung der Korrektoreffekte einer kindlichen Arthrorise verwendet haben und die Datensätze der Pedobarographie zur besseren Vergleichbarkeit in Relation zum Körpergewicht oder zur Fußfläche gesetzt haben. Franz et al. (2020) untersuchten die prä- und postoperativen Unterschiede nach extraartikulären Schraubenarthrorise mittels Pedobarographie und verglichen diese mit gesunden Erwachsenenfüßen. Anhand aktueller Literaturrecherchen konnten keine Daten gefunden werden, die mittels Pedobarographie gesunde kindliche Füße mit fKSF nach subtalarer Arthrorise vergleichen.

Für die vorliegende Arbeit wurden für die Auswertung der dynamischen Pedobarographie die postoperativen Datensätze mit einer gesunden Vergleichsgruppe verglichen und vereinzelt mit der Auswertung von Subgruppen ergänzt. Hierbei ist zu beachten, dass sich das Durchschnittsalter der beiden Gruppen signifikant unterscheidet. Für die einzelnen Parameter wurden daher die Daten auf das Gewicht und die Kontaktfläche der Kinder genormt. Um zu überprüfen, ob der Altersunterschied einen Einfluss auf die Ergebnisse nimmt, wurde die Auswertung mit einer verkleinerten Alters- und Gewichtsangepassten Gruppe durchgeführt. Bei der Testung konnte kein Einfluss durch den Altersunterschied festgestellt werden, sodass im Folgenden die gesamte Kohorte analysiert wurde. Allerdings bestätigte sich in der verkleinerten Gruppe –wie auch im Gesamtkollektiv–, dass die gesamte Kontaktfläche der operierten Füße signifikant größer war als bei gesunden Vergleichsfüßen. Bei der Verteilung der relativen Kontaktflächen fiel auf, dass bei den operierten Füßen der prozentuale Kontaktflächenanteil im Mittelfuß signifikant größer war bei gleichzeitiger Reduktion für Ferse und Vorfuß im Vergleich zur Kontrollgruppe. Dies kann dadurch erklärt werden, dass sich bei einem gesunden Fuß die Hauptbelastungszonen über der Ferse, den MFK2 und 3 sowie über der Großzehe befinden (Fritsch und Haslbeck 2004). Dabei liegt die Kraftverteilung zu 61% auf dem Rückfuß, zu 35% auf dem Vorfuß und nur zu 4% auf dem Mittelfuß (Sullivan 1999). Bei einem KSF verändert sich typischerweise die Druckverteilung. Durch das Absinken des Längsgewölbes, vergrößert sich die Kontaktfläche des Mittelfußes und die Kraftverteilung kann dadurch von 4% auf 17-30% im Mittelfußbereich steigen (Sullivan 1999). Trotz Operation und verbesserten klinischen und radiologischen Parametern verblieb im Mittelfußbereich eine größere Kontaktfläche im Vergleich zu Normalfüßen. Dies ist ebenfalls bei Hagen et al. (2020) beschrieben.

Bei dem in dieser Arbeit untersuchten Patientenkollektiv wurde das relative Kraftmaximum in Bezug zur Gesamtkraft der Person bestimmt. Dieses unterschied sich für das Gesamtobjekt bei der Arthrorise- und Vergleichsgruppe nicht signifikant voneinander. Allerdings fiel ein fast doppelt so hoher Wert im Mittelfußbereich der Arthrorisegruppe (28% ($\pm 10\%$)) verglichen mit der Vergleichsgruppe (15% ($\pm 9\%$)) auf. Dies passt zu den Daten

der relativen Kontaktfläche, da auch dort höhere Werte im Mittelfußbereich für die Arthrorisegruppe (22% (\pm 4%)) verglichen mit der Vergleichsgruppe (16% (\pm 6%)) zu verzeichnen waren. Ergänzend lässt sich die relative Kontaktzeit einordnen, welche für den Mittelfuß bei der Arthrorisegruppe bei 62%*ROP* (\pm 7%*ROP*) und bei der Vergleichsgruppe bei 53 %*ROP* (\pm 9%*ROP*) lag. Es scheint, dass aus einer größeren relativen Kontaktfläche, eine längere Kontaktzeit und damit ein höheres relatives Kraftmaximum entsteht und sich diese drei Parameter beeinflussen. Die hier zusammengestellten Ergebnisse sind bisher für das operative Verfahren der Arthrorise in der Literatur nicht beschrieben.

Eine vergleichbare Beobachtung lässt sich im Vorfuß feststellen, dort erzielte die Vergleichsgruppe signifikant höhere Werte in der relativen Kontaktfläche (58% (\pm 5%)) bezogen auf die Arthrorisegruppe (54% (\pm 3%)). Zusätzlich fielen längere Kontaktzeiten über den MFK1-4 auf, sowie höhere Werte für die relativen Kraftmaxima über den MFK1 und 3.

Putti et al. (2008) führten bei 53 Erwachsenen mit gesunden Füßen eine dynamische Pedobarographie durch, ohne die Werte im Anschluss zu normieren. Der MFK3 wies hierbei die längste und die Ferse die kürzeste relative Kontaktzeit auf. Bei der Beurteilung der Kontaktfläche erzielte bei Putti et al. (2008) die Ferse den höchsten Wert, gefolgt vom Mittelfuß, MFK1, MFK3 und MFK2. Diese Angaben der Rangfolge stimmen mit den Daten dieser Arbeit überein und zeigen, dass die einzelnen Fußabschnitte der Arthrorisegruppe für die relative Kontaktzeit und relative Kontaktfläche mit der Rangfolge eines gesunden Fußes übereinstimmen. Im Vergleich zu den gesunden Füßen der Vergleichsgruppe dieser Arbeit fiel allerdings auf, dass bei normierten Werten die operierten Füße signifikant höhere Werte für den Mittelfuß erreichen, während die Vergleichsgruppe höhere Werte im Vorfuß und vereinzelt für die Fersen erreichen. Diese Ergebnisse zeigen, dass die Reihenfolge der einzelnen Fußabschnitte der Arthrorisegruppe bei der Verteilung der relativen Kontaktzeit und Kontaktfläche der von gesunden Füßen angeglichen werden kann, aber in Relation zum Gesamtfuß weiterhin eine vergrößerte Kontaktfläche und höhere Werte im Mittelfußbereich bestehen bleiben. Eine Normalisierung an die gesunden Füße konnte somit nicht vollständig erreicht werden.

Das Abrollverhalten wurde in dieser Arbeit anhand der relativen Spitzendrücke und der Abrolllinie untersucht. Als Korrekturerfolg ist zu werten, dass keines der Kinder postoperativ eine gezackte Abrolllinie aufwies und kein Gefühl von Instabilität angegeben wurde. Bei der Auswertung der relativen Spitzendrücke fiel auf, dass sowohl in der Vergleichsgruppe als auch in der Arthrorisegruppe die höchsten Drücke über den MFK2 und 3, der Großzehe sowie der Ferse gemessen wurde. Dies lässt sich in die Arbeit von Fritsch und Haslbeck (2004) einordnen. Dort wurde ein Belastungsprofil als normal bezeichnet, wenn über der Ferse, den MFK2 und 3 und der Großzehe die relativen Drücke am höchsten waren. Auch Mitternacht und Lampe (2006) charakterisierten ein gesundes Abrollverhalten, wenn die Druckmaxima vergleichbare Werte über der Ferse, dem

Vorfußballen und der Großzehe aufwiesen. Bei der Beurteilung der Arthrorisegruppe fällt auf, dass das Verhältnis der relativen Spitzendrücke der einzelnen Fußbereiche mit der Literatur übereinstimmt (Mitternacht und Lampe 2006). Allerdings wurden in der Arthrorisegruppe signifikant höhere Werte im gesamten Fuß, dem Mittelfuß, MFK2 und 3 und der Großzehe gemessen.

Bei der Beurteilung des Abrollvorganges ist zu beobachten, dass sich die Ferse nicht signifikant zu den gesunden Füßen unterscheidet und der Mittelfuß bei der Arthrorisegruppe signifikant höhere Werte aufweist. Im Vorfußbereich fällt auf, dass die Vergleichsgruppe und die unbehandelten Füße signifikant höhere Werte für MFK1 erzielten, wohingegen die operierten Füße höhere Werte für MFK2 und MFK3 und in der Subgruppe zusätzlich MFK4 erreichen. Die Zusammenschau der Datensätze, sowie der Abrolllinien lässt dies dahingehend einordnen, dass die gesunden Füße homogen über MFK1-3 abrollen, während die operierten Füße eine erhöhte Druckspitze über MFK2, 3 und 4 aufweisen. Kompensatorisch scheinen die operierten Füße im Verlauf des Abrollvorganges mit vermehrtem Druck über die Großzehe abzustößen, da auch dort signifikant erhöhte Werte für die operierten Füße gemessen wurden. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die operierten Füße ein ähnliches Abrollverhalten wie gesunde Füße aufweisen, allerdings im Vorfußbereich eine breitere Streuung mit Tendenz zur Lateralisierung der Druckverteilung aufweisen. Dieser Effekt lässt sich auch in der Literatur finden (Kellermann et al. 2011; Papamerkouriou et al. 2019; Hagen et al. 2020).

Der bei der Pedobarographie bestimmte Gewölbeindex ist ein geeigneter Parameter zur Bewertung des Längsgewölbes. Murley (2009) definierte in seiner Arbeit ein abgeflachtes Fußgewölbe ab einem Gewölbeindex $>0,32$. Buldt et al. definierten 2018, dass der Normwert eines Gewölbeindex bei Erwachsenen zwischen 0,11 und 0,25 läge. Das normale Patientenkollektiv, welches Buldt et al. (2018) untersuchten wies einen mittleren Gewölbeindex von $0,22 (\pm 0,03)$ auf. Die gesunde Vergleichsgruppe dieser Arbeit erzielte einen mittleren Gewölbeindex von $0,192 (\pm 0,065)$ und entspricht damit den vorangegangenen Definitionen und den Daten der Literatur (Murley et al. 2009; Buldt et al. 2018). In der Arbeit von Müller et al. (2012) konnte zusätzlich gezeigt werden, dass die Gewölbeindexe bei Kindern in unterschiedlichen Altersgruppen stark variieren. So erzielte das dort untersuchte Patientenkollektiv im Mittel einen Gewölbeindex von $0,21 (\pm 0,04)$. Bei genauerer Betrachtung der Altersgruppen erzielten die Einjährigen Werte von $0,32 (\pm 0,04)$ und die Dreizehnjährigen Werte von $0,20 (\pm 0,06)$. Bei Ludwig et al. (2013) erzielten Probanden*innen mit normalem Fußlängsgewölbe Werte von $0,21-0,28$. Das in dieser Arbeit untersuchte Patientenkollektiv liegt mit einem mittleren Gewölbeindex von $0,272 (\pm 0,04)$ für die Arthrorisegruppe und $0,27 (\pm 0,05)$ für die behandelten Füße in der Subgruppe nicht im definierten Normbereich von Buldt et al. (2018) und ähnelt den Daten von Ludwig et al. (2013). Der von Murley et al. (2009) definierte pathologische Grenzwert von $>0,32$ wurde im untersuchten Patientenkollektiv nicht erreicht. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass sich

das Gewölbe der Patienten*innen auch nach der Operation von gesunden Kindern unterscheidet und noch abgeflacht ist. Dies lässt sich in Zusammenhang mit den veränderten Parametern im Mittelfuß bringen. Da die relative Kontaktfläche des Mittelfußes bezogen auf die Gesamtfläche prozentual vergrößert ist und den Anteil des Vorfußes und der Ferse prozentual verkleinert, ist nur ein größerer Gewölbeindex rechnerisch möglich. Da dies auch bei der Alters- und Gewichtsangepassten Kontrolle zu beobachten war, können Einflüsse aufgrund des höheren Gewichtes ausgeschlossen werden.

Aufgrund der Pathogenese eines KSF und der auftretenden Abduktion im Vorfuß kann es bei einem KSF zu einer Koinzidenz mit einem Hallux valgus führen (DGOOC 2014). Dies lag bei einer Patientin dieser Studie im operationswürdigen Bereich und wurde in der gleichen Operation behandelt. Bei der Auswertung des Halluxwinkels mit der emed® Software (novel GmbH, München) traten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen auf, sodass dieser als normal eingestuft werden konnte. Dies ist vergleichbar mit den Daten der Studie von Franz et al. (2020).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass in dem hier untersuchten Kollektiv durch die Arthrorise ein physiologisches Abrollverhalten erreicht werden konnte und eine gute Annäherung der dynamischen Parameter an einen gesunden Fuß geschaffen werden konnte. Auffällig blieben Veränderungen im verbreiterten Mittelfußbereich, sowie eine Verschiebung der Krafteinwirkung und des relativen Spitzendruckes im Vorfußbereich nach lateral. Besonders erfreulich ist, dass im Vergleich der operierten Füße mit den nicht behandelten Füßen keine nennenswerten Unterschiede gefunden werden konnten, sodass ein Angleichen an die Gegenseite erreicht werden konnte. Ebenso ist als Erfolg zu werten, dass bei der Auswertung der Patienten*innen, ohne versus mit Implantat keine nennenswerten Unterschiede zu verzeichnen sind und sich die Füße nach der Entfernung des Implantates nicht von den Füßen mit Implantat unterscheiden. Bisher wurden nur Ergebnisse für den Mittelfußbereich nach der Entfernung des Implantates in der Literatur beschrieben (Richter und Zech 2013), diese sind mit den Ergebnissen dieser Arbeit vergleichbar.

4.5 Limitationen der Studie

In Bezug auf die Daten der vorliegenden Arbeit muss kritisch bewertet werden, dass das untersuchte Patientenkollektiv nicht alle operierten Patienten*innen umfasst. Dies hat als Ursache, dass sich von den insgesamt 30 operierten Patienten*innen nach mehrfachen Kontaktversuchen nur 18 Patienten*innen zurückgemeldet haben. Dadurch konnten 25 operierte Füße untersucht und bewertet werden, welches 60% der Patienten*innen und 57% der operierten Füße entspricht. Ob die nicht untersuchten Patienten*innen bessere oder schlechtere Ergebnisse aufwiesen, bleibt unbekannt.

Weiterhin war der Nachuntersuchungszeitpunkt sehr variabel und fand 6 Monate bis 8 Jahre nach der Operation statt. Dadurch wurden Patienten*innen mit unterschiedlichen

Zeitspannen nach der Operation untersucht. In das Kollektiv wurden Patienten*innen mit bereits explantierter und Patienten*innen mit noch implantierter Schraube eingeschlossen. Als Konsequenz ergab sich, dass die Kinder und Jugendlichen kein einheitliches Alter bei der Nachuntersuchung hatten. Dabei muss berücksichtigt werden, dass es bei Kindern zu entwicklungs- und altersbedingten Unterschieden kommen kann. Aus diesem Grund wurden die Parameter der Pedobarographie auf das Körpergewicht und die Fußfläche der Kinder genormt. Da nur wenige Daten für die kindliche Pedobarographie bekannt sind, wurde für die Auswertung ein gesundes Vergleichskollektiv untersucht.

Die größte Limitation der Studie besteht darin, dass die erhobenen Daten nicht mit Untersuchungen vor der Operation verglichen werden konnten. Dies trifft sowohl auf die Fragebögen als auch auf die klinischen, statischen und dynamischen pedobarographischen Untersuchungen zu. Bei der Beurteilung des AOFAS Fragebogens sollte berücksichtigt werden, dass diese retrospektiv im Rahmen der Nachuntersuchung ausgefüllt wurden und die subjektive Wahrnehmung der Kinder abbildet. Lediglich radiologische Parameter und klinische Akteneinträge konnten prä- und postoperativ verglichen werden.

Darüber hinaus ist zu beachten, dass aus Strahlenschutzgründen keine radiologischen Aufnahmen von gesunden Kinderfüßen angefertigt wurden und dementsprechend kein eigenes Vergleichsmaterial zur Verfügung stand. In dieser Arbeit wurde daher der Vergleich der prä- und postoperativen Bilder bewertet und die Daten mit den in der Literatur veröffentlichten Werten verglichen.

4.6 Therapeutische Konsequenzen im Ausblick

In der podometrischen Untersuchung, sowie bei der Auswertung der relativen Kontaktfläche und des relativen Kraftmaximums fiel auf, dass auch nach der Operation eine vergrößerte Fläche im Mittelfußbereich mit erhöhter Kraftverteilung bestehen blieb. Um diesen Parameter besser beurteilen und interindividuelle Korrektoreffekte darstellen zu können, wäre die Durchführung einer prospektiven Studie sinnvoll. In dieser sollte präoperativ eine podometrische Untersuchung, eine *L.A.S.A.R. posture* Untersuchung, sowie eine dynamische Pedobarographie durchgeführt werden. Dadurch könnten die prä- und postoperativen Daten für den einzelnen Patienten*in verglichen werden. Bei einer prospektiven Studie könnte darüber hinaus eine einheitliche Regelung für den Zeitpunkt der Nachuntersuchungen festgesetzt werden. Dadurch könnten potentielle Unterschiede zwischen den Ergebnissen detektiert und Messdifferenzen vermieden werden. Zusätzlich wäre ein besserer Vergleich in verschiedenen Alters- und Entwicklungsstadien bis zur Kontrolle im Erwachsenenalter möglich, um langfristige Komplikationen (z.B. Arthrose, muskuläre Differenzen) in Folge des leicht veränderten Abrollverhalten und der unterschiedlichen relativen Kraftverteilung zu erfassen. Eine erneute Beteiligung einer Vergleichsgruppe wäre zu empfehlen, dabei sollte darauf geachtet werden, dass die

Altersgruppen auf den Zeitpunkt der Pedobarographie abgestimmt werden und die Kinder als langfristige Kontrollgruppe eingesetzt werden können.

5 Zusammenfassung

Der kindliche Knick-Senk-Fuß (KSF) ist eine mehrdimensionale Fußfehlstellung mit proniertem Rückfuß, dorsiflektiertem und außenrotiertem Subtalargelenk, einem abduzierten Mittelfuß und supiniertem Vorfuß, die im Allgemeinen gar nicht oder konservativ behandelt wird. Bei den wenigen persistierenden, symptomatischen flexiblen KSF (fKSF) ist die subtalare Arthrorise ein mögliches operatives Korrekturverfahren. Ziel dieser Studie war es, die dynamischen und statischen Korrekturreffekte einer subtalaren Arthrorise mit einem ProStop®-Implantat (Firma Arthrex GmbH, München) bei Jugendlichen mit fKSF im Vergleich zu normalen Probanden*innen sowie den Vergleich der Ergebnisse vor und nach der Metallentfernung zu untersuchen.

Im Rahmen einer Nachuntersuchung wurde eine Befragung mittels American Orthopaedic Foot and Ankle Society (AOFAS) Fragebogen, eine dynamische Pedobarographie, eine podometrische Fußformbestimmung und eine *Laser Assisted Static Alignment Reference (L.A.S.A.R.) posture* Untersuchung durchgeführt und die prä- und postoperativen radiologischen Aufnahmen analysiert. Für die Auswertung der dynamischen Pedobarographie wurde eine kindliche Vergleichsgruppe mit gesunden Füßen untersucht.

Von 30 identifizierten Patienten*innen nahmen 18 (60%; 10 männlich; 8 weiblich) an der Nachuntersuchung teil, welche im durchschnittlich 3,9 Jahre nach der Operation stattfand. Hier hatten 13 Patienten*innen bereits eine Metallentfernung erhalten. Im AOFAS Fragebogen zeigte sich eine signifikante Verbesserung von 69,08 prä- zu 93,96 Punkten (Pkt.) postoperativ. Das gesunde Vergleichskollektiv erzielte 100 Pkt. Radiologisch zeigte der Talo-Metatarsale-Index (TMT-Index) eine signifikante Verbesserung um 20,74 Pkt. zwischen den prä- und postoperativen Aufnahmen. Die postoperativen Datensätze der dynamischen Pedobarographie zeigten, dass die Druckverteilung beim Abrollvorgang, der Verteilung von gesunden Kindern entsprach. Allerdings war eine leichte Lateralisierung der Krafteinwirkung und relativen Spitzendrücke im Vorfußbereich zu erkennen. Im Bereich des Mittelfußes blieben nach der Arthrorise sowohl in der relativen Kontaktfläche, der relativen Kontaktzeit und im relativen Kraftmaximum signifikant höhere Werte bestehen als im gesunden Kollektiv. Bei der Beurteilung des Halluxwinkels fiel kein signifikanter Unterschied auf. Die Differenz des Gewölbeindex lag bei 0,08 zwischen der Arthrorise- und der Vergleichsgruppe. Ergänzend konnte gezeigt werden, dass Füße mit bereits entfernten Implantaten sich nicht von Füßen mit einliegenden Implantaten unterschieden.

Die Ergebnisse dieser Arbeit belegen eine deutliche Symptomminderung und eine signifikante Verbesserung der radiologischen Parameter durch die Arthrorise. Mit der dynamischen Pedobarographie konnte gezeigt werden, dass sich die operierten Füße an die gesunde Vergleichsgruppe angenähert hatten, eine physiologische Abrolllinie aufwiesen, jedoch keine Normalisierung im Mittelfußbereich erreicht werden konnte. Hervorzuheben ist hierbei, dass der Vorstellungsgrund der Kinder (Schmerzen, Einschränkungen,

Funktionsverlust) durch die Arthrorise behoben werden konnte und den Kindern ihrer Alltagsfähigkeit wieder ermöglicht wurde. Trotz vorliegender Limitationen der Arbeit – besonders dem nicht Vorliegen von präoperativen Untersuchungen- konnte hier gezeigt werden, dass die Arthrorise ein geeignetes Verfahren zur operativen Behandlung des symptomatischen fKSF im Kindes- und Jugendalter zu sein scheint.

6 Anhang

Name, Vorname:

Geburtsdatum:

American Orthopaedic Foot and Ankle Society (AOFAS) Score

Rückfuß Section / Hindfoot Section

(Validierte deutsche Version, max. 100 Punkte)

Schmerz:	1: kein	<input type="checkbox"/>	40 Pkt.
	2: leicht, gelegentlich	<input type="checkbox"/>	30 Pkt.
	3: mittelmäßig, täglich	<input type="checkbox"/>	20 Pkt.
	4: heftig, fast immer	<input type="checkbox"/>	00 Pkt.
Funktion:	1: keine Einschränkung, keine Stütze/ Hilfe	<input type="checkbox"/>	10 Pkt.
	2: keine Einschränkung bei den täglichen Aktivitäten Einschränkung bei Freizeitaktivitäten, keine Hilfen	<input type="checkbox"/>	07 Pkt.
	3: Einschränkungen bei den tägl. Aktivitäten, Freizeitaktivitäten, Stock	<input type="checkbox"/>	04 Pkt.
	4: Starke Einschränkungen bei tägl. Aktivitäten, Gehstütze, Krücke, Rollstuhl, Korsett	<input type="checkbox"/>	00 Pkt.
Gehstrecke (In Blocks): 1 Block = ca. 80m	1: mehr als 6	<input type="checkbox"/>	05 Pkt.
	2: 4 bis 6	<input type="checkbox"/>	04 Pkt.
	3: 1 bis 3	<input type="checkbox"/>	02 Pkt.
	4: weniger als 1	<input type="checkbox"/>	00 Pkt.
Gehen auf Oberfläche:	1: keine Schwierigkeiten auf sämtlichen Oberflächen	<input type="checkbox"/>	05 Pkt.
	2: geringe Schwierigkeiten auf unebenem Terrain, Treppen, Neigung, Leiter	<input type="checkbox"/>	03 Pkt.
	3: große Schwierigkeiten auf unebenem Terrain, Treppen, Neigungen, Leiter	<input type="checkbox"/>	00 Pkt.
Gangabnormalität:	1: keine, leichte	<input type="checkbox"/>	08 Pkt.
	2: augenscheinlich	<input type="checkbox"/>	04 Pkt.
	3: erhebliche	<input type="checkbox"/>	00 Pkt.
Sagittale Bewegung:	1: normal, leichte Einschränkung. (30° oder mehr)	<input type="checkbox"/>	08 Pkt.
	2: mäßige Einschränkung (15°-29°)	<input type="checkbox"/>	04 Pkt.
	3: starke Einschränkung (weniger als 15°)	<input type="checkbox"/>	00 Pkt.
Hinterfußbewegung (Inversion/ Eversion):	1: normal, oder leichte Einschränkungen (75%- 100% von normal)	<input type="checkbox"/>	06 Pkt.
	2: mäßige Einschränkungen (25%-74%)	<input type="checkbox"/>	03 Pkt.
	3: massive Einschränkungen (weniger als 25%)	<input type="checkbox"/>	00 Pkt.
Gelenk-Hinterfuß-Sta- bilität (ap, varus/valgus)	1: stabil	<input type="checkbox"/>	08 Pkt.
	2: definitiv instabil	<input type="checkbox"/>	00 Pkt.
Achse:	1: gut plantigrader Fuß, Gelenk-Hinterfußachse norm.	<input type="checkbox"/>	10 Pkt.
	2: ausreichend plantigrader Fuß, um einige Grad der Gelenk-Hinterfußachse abweichend o. Symptome	<input type="checkbox"/>	05 Pkt.
	3: nicht plantigrader Fuß, erhebliche Abweichung der Gelenk-Hinterfußachse mit Symptomen	<input type="checkbox"/>	00 Pkt.

Tabelle A1 Darstellung der Daten der dynamischen Pedobarographie für die Subgruppe von Kindern mit operierten und nicht operierten Fuß (n=11) (paired t-test)

Parameter der dynamischen Pedobarographie	Operierter Fuß (n=11)		Signifikanzniveau (p<0,05 (*), p<0,01 (**), p<0,001 (***))
	Operierter Fuß (n=11)	Unbehandelter Fuß (n=11)	
Relative Kontaktfläche			
(% der Gesamtfläche)			
Ferse	23 ± 2% (20-27%)	24 ± 2% (21-28%)	ns
Mittelfuß	23 ± 5% (15-31%)	21 ± 4% (12-19%)	ns
Vorfuß	54 ± 3% (49-58%)	55 ± 2% (50-59%)	ns
Relative Kontaktzeit			
(%ROP)			
Ferse	51 ± 6%ROP (39-63%)	54 ± 7%ROP (42-67%)	ns
Mittelfuß	64 ± 5%ROP (56-70%)	64 ± 5%ROP (56-71%)	ns
MFK1	76 ± 6%ROP (68-86%)	77 ± 7%ROP (61-87%)	ns
MFK2	80 ± 4%ROP (73-87%)	81 ± 5%ROP (68-88%)	ns
MFK3	82 ± 3%ROP (77-87%)	82 ± 4%ROP (73-87%)	ns
MFK4	82 ± 3%ROP (76-88%)	81 ± 4%ROP (71-86%)	ns
MFK5	74 ± 5%ROP (64-82%)	75 ± 4%ROP (66-81%)	ns
Großzehe	73 ± 8%ROP (60-87%)	75 ± 10%ROP (52-87%)	ns
Kraftmaximum			
(% Körpergewicht)			
Gesamt	104 ± 5% (95-112%)	107 ± 5% (97-114%)	*
Ferse	62 ± 5% (54-71%)	64 ± 9% (52-86%)	ns
Mittelfuß	27 ± 12% (7-52%)	21 ± 9% (5-38%)	*
MFK1	16 ± 6% (9-28%)	20 ± 6% (10-29%)	ns
MFK2	24 ± 5% (17-35%)	25 ± 3% (20-31%)	ns
MFK3	26 ± 4% (17-29%)	23 ± 3% (19-29%)	ns
MFK4	15 ± 3% (11-21%)	13 ± 2% (9-17%)	*
MFK5	6 ± 2% (3-10%)	6 ± 2% (3-12%)	ns
Großzehe	20 ± 6% (8-33%)	22 ± 6% (9-30%)	ns

Spitzendruck**(x-fach zu Druck im Stand auf einem Fuß)**

Gesamt	11,7 ± 3,1 (8,2-17,7)	11,3 ± 2,9 (7-15,9)	ns
Ferse	7,3 ± 3,2 (4,5- 15,1)	7,4 ± 2,9 (4,7-14,3)	ns
Mittelfuß	2,7 ± 0,8 (1,2-4,4)	2,3 ± 0,6 (1,1-3,2)	*
MFK1	3,7 ± 1,2 (1,9-5,8)	4,6 ± 1,3 (2,7-6,6)	*
MFK2	8,1 ± 2,5 (5,4-13,3)	8,2 ± 2,9 (5,7-15,2)	ns
MFK3	8,1 ± 2,3 (5,2-13,9)	7 ± 1,5 (5,6-10,2)	ns
MFK4	5,1 ± 1,3 (3-7)	4,3 ± 1,1 (2,9-6,1)	*
MFK5	3,3 ± 1,3 (2-6)	3,1 ± 1,4 (1,6-6,6)	ns
Großzehe	9,5 ± 3,8 (3,1-17,7)	10,1 ± 3 (3,7-14,9)	ns
Halluxwinkel (°)	3,18 ± 5,08 (-5,5-11,3)	3,54 ± 6,8 (-7,1-17,2)	ns
Gewölbeindex	0,27 ± 0,05 (0,18-0,36)	0,257 ± 0,05 (0,15-0,35)	ns

Tabelle A2 Darstellung der Daten der dynamischen Pedobarographie für die Subgruppe von Kindern mit Implantat (n=12) und Kindern mit bereits entferntem Implantat (n=13) (unpaired t-test)

Parameter der dynamischen Pedobarographie	postoperative Gruppe mit Implantat zum Zeitpunkt der Nachuntersuchung (n=12)	postoperative Gruppe ohne Implantat zum Zeitpunkt der Nachuntersuchung (n=13)	Signifikanzniveau (p<0,05 (*), p<0,01 (**), p<0,001 (***))
Relative Kontaktfläche (% der Gesamtfläche)			
Ferse	24 ± 1% (20-25%)	24 ± 2% (20-27%)	ns
Mittelfuß	23 ± 3% (16-30%)	22 ± 4% (15-31%)	ns
Vorfuß	52 ± 2% (49-56%)	55 ± 3% (49-58%)	*
Relative Kontaktzeit (%ROP)			
Ferse	55 ± 9%ROP (48-74%)	49 ± 6%ROP (39-59%)	*
Mittelfuß	62 ± 7%ROP (50-75%)	62 ± 7%ROP (48-70%)	ns
MFK1	74 ± 5%ROP (65-86%)	77 ± 6%ROP (68-86%)	ns
MFK2	78 ± 4%ROP (72-86%)	80 ± 4%ROP (72-87%)	ns

MFK3	80 ± 3%ROP (76-85%)	81 ± 4%ROP (74-87%)	ns
MFK4	79 ± 3%ROP (74-84%)	80 ± 4%ROP (73-88%)	ns
MFK5	72 ± 5%ROP (64-79%)	74 ± 5%ROP (64-82%)	ns
Großzehe	66 ± 10%ROP (48-81%)	74 ± 9%ROP (63-87%)	*

Kraftmaximum**(% Körpergewicht)**

Gesamt	113 ± 13% (95-142%)	105 ± 3% (100-112%)	ns
Ferse	74 ± 12% (55-94%)	60 ± 9% (43-75%)	**
Mittelfuß	29 ± 7% (16-42%)	27 ± 12% (7-52%)	ns
MFK1	16 ± 5% (7-24%)	15 ± 5% (9-28%)	ns
MFK2	24 ± 4% (18-33%)	24 ± 5% (16-35%)	ns
MFK3	26 ± 5% (17-34%)	24 ± 4% (19-29%)	ns
MFK4	17 ± 4% (11-27%)	15 ± 3% (11-21%)	ns
MFK5	8 ± 3% (3-15%)	6 ± 2% (4-9%)	ns
Großzehe	23 ± 5% (15-33%)	23 ± 7% (8-38%)	ns

Spitzendruck**(x-fach zu Druck im
Stand auf einem Fuß)**

Gesamt	11,9 ± 2,8 (6,3-17,7)	11,3 ± 2,8 (8,2-17,6)	ns
Ferse	8,5 ± 2 (4,9- 12)	6,5 ± 2,7 (4,5-15,1)	ns
Mittelfuß	3 ± 1,1 (1,4-5,6)	2,9 ± 1 (1,2-4,4)	*
MFK1	4,1 ± 0,9 (2,6-5,5)	3,5 ± 1,1 (1,9-5,8)	*
MFK2	7,8 ± 2,1 (5,5-14,1)	8,2 ± 2,4 (5,3-13,3)	ns
MFK3	7,3 ± 1 (5,2-8,9)	7,7 ± 2,3 (4,9-13,9)	ns
MFK4	5,4 ± 1,1 (3,1-,78)	4,9 ± 1,2 (3-7)	*
MFK5	4 ± 1,6 (2-7,5)	3,1 ± 0,8 (1,9-4,3)	ns
Großzehe	10,2 ± 3,5 (4,7-17,7)	9,3 ± 3,5 (3,1-17,6)	ns

Halluxwinkel (°) -0,25 ± 5,59 (-10-11,3) 0,11 ± 5,51 (-12,4-6,3) ns

Gewölbeindex 0,28 ± 0,03 (0,25-0,35) 0,26 ± 0,05 (0,18-0,36) ns

7 Literaturverzeichnis

Abbara-Czardybon M, Frank D, Arbab D (2014): Die Talus-Stopp-Schraubenarthrorise beim flexiblen kindlichen Pes planovalgus. *Oper Orthop Traumatol* 26, 625–631

Akins JS, Keenan KA, Sell TC, Abt JP, Lephart SM Test–retest reliability and descriptive statistics of geometric measurements based on plantar pressure measurements in a healthy population during gait. *Gait Posture* 35, 167–169

Arbab D, Frank D, Bouillon B, Lüring C, Wingefeld C, Abbara-Czardybon M (2018): Die subtalare Schraubenarthrorise zur Behandlung des symptomatischen, flexiblen Pes planovalgus – Ergebnisse und eine aktuelle Literaturübersicht. *Z Orthop Unfall* 156, 93–99

Arnold H, Weber J (2010): Die subtalare Arthrorise mittels Endorthese zur Behandlung des „idiopathischen“ kindlichen Pes plano-valgus-Indikation und Ergebnisse. *Fuß & Sprunggelenk* 8, 253–258

Bernasconi A, Lintz F, Sadile F (2017): The role of arthroereisis of the subtalar joint for flatfoot in children and adults. *EFORT Open Rev* 2, 438–446

Bresnahan PJ, Juanto MA (2020): Pediatric Flatfeet—A Disease Entity That Demands Greater Attention and Treatment. *Front Pediatr* 8, 1-9

Breusch S, Clarius M, Mau H, Sabo D: *Klinikleitfaden Orthopädie Unfallchirurgie*. 9. Auflage; Elsevier Health Sciences München 2019

Buldt AK, Forghany S, Landorf KB, Murley GS, Levinger P, Menz HB (2018): Centre of pressure characteristics in normal, planus and cavus feet. *J Foot Ankle Res* 11, 1–9

Cao L, Miao X, Wu Y, Zhang X, Zhang Q (2017): Therapeutic Outcomes of Kalix II in Treating Juvenile Flexible Flatfoot: Juvenile Flexible Flatfoot. *Orthop Surg* 9, 20–27

Carr JB, Yang S, Lather LA (2016): Pediatric Pes Planus: A State-of-the-Art Review. *Pediatrics* 137, 1-12

Choi JY, Lee DJ, Kim SJ, Suh JS (2019): Does the long-term use of medial arch support insole induce the radiographic structural changes for pediatric flexible flat foot? — A prospective comparative study. *Foot Ankle Surg* 26, 1–8

Dare DM, Dodwell ER (2014): Pediatric flatfoot: cause, epidemiology, assessment, and treatment. *Curr Opin Pediatr* 26, 93–100

Davids JR, Gibson TW, Pugh LI (2005): Quantitative Segmental Analysis of Weight-Bearing Radiographs of the Foot and Ankle for Children. *J Pediatr Orthop* 25, 769–776

De Pellegrin M (2005): Die subtalare Schrauben-Arthrorise beim kindlichen Plattfuß. *Orthopäde* 34, 941–954

- De Pellegrin M, Moharamzadeh D, Strobl WM, Biedermann R, Tschauner C, Wirth T (2014): Subtalar extra-articular screw arthroereisis (SESA) for the treatment of flexible flatfoot in children. *J Child Orthop* 8, 479–487
- DGOOC (2014): S2e-Leitlinie „Hallux valgus“ 2014 der Deutschen Gesellschaft für Orthopädie und Orthopädische Chirurgie (DGOOC). https://www.awmf.org/uploads/tx_szleitlinien/033-018l_S2e_Hallux_Valgus_2014-04_abgelaufen_01.pdf; zuletzt abgerufen am 19.08.2021
- DGOOC (2017): S2k-Leitlinie „Kindlicher Knick-Senk-Fuß“ 2017 der Deutschen Gesellschaft für Orthopädie und Orthopädische Chirurgie (DGOOC). https://www.awmf.org/uploads/tx_szleitlinien/033-020l_S2k_KKSF_Kindlicher_Knick-Senk-Fuß_2017-06.pdf; abgerufen am 19.08.2021.
- Döderlein L, Multerer C (2012): Fußdeformitäten im Kindesalter – Wann behandeln? Wie behandeln? – Teil 2. *Orthopädie und Unfallchirurgie up2date* 7, 67–78
- Evans D (1975): Calcaneo-valgus deformity. *J Bone Joint Surg Br* 57-B, 270–278
- Faldini C, Mazzotti A, Panciera A, Persiani V, Pardo F, Perna F, Giannini S (2018): Patient-perceived outcomes after subtalar arthroereisis with bioabsorbable implants for flexible flatfoot in growing age: a 4-year follow-up study. *Eur J Orthop Surg Traumatol* 28, 707–712
- Flechtenmacher J, Abolmaali N (Hrsg.): *Praktische Röntgendiagnostik Orthopädie und Unfallchirurgie: Indikation, Einstelltechnik, Strahlenschutz*. Thieme, Stuttgart 2014
- Flores DV, Mejía Gómez C, Fernández Hernando M, Davis MA, Pathria MN (2019): Adult Acquired Flatfoot Deformity: Anatomy, Biomechanics, Staging, and Imaging Findings. *RadioGraphics* 39, 1437–1460
- Franz A, Herz D, Raabe J, Seeberger U, Bollmann C (2020): Pedobarographic outcome after subtalar screw arthroereisis in flexible juvenile flatfoot. *Foot Ankle Surg* 27, 389–394
- Fritsch C, Haslbeck M (2004): Significance of pedography in the diagnosis and treatment of the diabetic foot syndrome. *MMW Fortschr Med* 146, 51–54
- Füeßl H, Middeke M, Würtemberger G: *Anamnese und Klinische Untersuchung (Duale Reihe)*. 6. aktualisierte Auflage; Thieme, Stuttgart 2018
- Giannini S, Ceccarelli F, Vannini F, Baldi E (2003): Operative Treatment of Flatfoot With Talocalcaneal Coalition. *Clin Orthop Rel Res* 411, 178–187
- Götz J, Grifka J, Baier C (2016): Adulte Rückfußdeformitäten: Konservative und operative Therapie. *Orthopäde* 45, 97–110
- Hafer JF, Lenhoff MW, Song J, Jordan JM, Hannan MT, Hillstrom HJ (2013): Reliability

- of plantar pressure platforms. *Gait Posture* 38, 544–548
- Hagen L, Pape JP, Kostakev M, Peterlein C-D (2020): Pedobarographic changes during first month after subtalar extra-articular screw arthroereisis (SESA) operation of juvenile flexible flatfoot. *Arch Orthop Trauma Surg* 140, 313–320
- Halabchi F, Mazaheri R, Mirshahi M, Abbasian L (2013): Pediatric Flexible Flatfoot; Clinical Aspects and Algorithmic Approach. *Iran J Pediatr* 23, 247–260
- Hamel J (2010a): Die Calcaneostop-Arthrorise – eine retrospektive klinische Studie mit Komplikations-Analyse. *Fuß und Sprunggelenk* 8, 35–41
- Hamel J (2010b): Radiologisch-dokumentierte Korrektoreffekte beim kindlichen Pes planovalgus mit der Calcaneostop-Arthrorise und der Calcaneus-Verlängerungosteotomie. *Fuß und Sprunggelenk* 8, 43–47
- Hamel J, Kinast C (2006): Der TMT-Index zur radiologischen Quantifizierung von Planovalgus-Deformitäten. *Fuß und Sprunggelenk* 4, 221–226
- Harris EJ, Vanore JV, Thomas JL, Kravitz SR, Mendelson SA, Mendicino RW, Silvani SH, Gassen SC (2004): Diagnosis and treatment of pediatric flatfoot. *J Foot Ankle Surg* 43, 341–373
- Hase C (2015): Die orthopädische Untersuchung des ausgewachsenen Fußes. *Orthopädie und Unfallchirurgie up2date* 10 (06), 505–520
- Hefti F: Entwicklung des Bewegungsapparates. In: *Kinderorthopädie in der Praxis*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2014, 51–72
- Hefti F: *Kinderorthopädie in der Praxis*. 3. Auflage; Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2015
- Hefti F, Brunner R (1999): Flexible arch of the foot. *Orthopäde* 28, 159–172
- Hell A, Döderlein L, Eberhardt O, Hösl M, von Kalle T, Mecher F, Simon A, Stinus H, Wilken B, Wirth T (2018): S2-Leitlinie: der kindliche Knick-Senk-Fuß. *Z Orthop Unfall* 156, 306–315
- Janssen DM, Sanders AP, Guldmond NA, Hermus J, Walenkamp GH, van Rhijn LW (2014): A comparison of hallux valgus angles assessed with computerised plantar pressure measurements, clinical examination and radiography in patients with diabetes. *J Foot Ankle Res* 7, 1-9
- Jay RM, Din N (2013): Correcting Pediatric Flatfoot With Subtalar Arthroereisis and Gastrocnemius Recession: A Retrospective Study. *Foot Ankle Spec* 6, 101–107
- Jordan KP, Kadam UT, Hayward R, Porcheret M, Young C, Croft P (2010): Annual consultation prevalence of regional musculoskeletal problems in primary care: an observational study. *BMC Musculoskelet Disord* 11, 1-10

- Kamawal Y, Raab P: Kindlicher Knick-Senk-Fuß. In: Engelhardt M, Raschke M (Hrsg.): Orthopädie und Unfallchirurgie (Springer Reference Medizin). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2020, 1–12
- Kellermann P, Roth S, Gion K, Boda K, Tóth K (2011): Calcaneo-stop procedure for paediatric flexible flatfoot. *Arch Orthop Trauma Surg* 131, 1363–1367
- Kerbl R, Kurz R, Reiter K, Roos R, Wessel L: Checkliste Pädiatrie (Checklisten der aktuellen Medizin). 5. vollständig aktualisierte Auflage; Georg Thieme Verlag KG, Stuttgart, New York 2016
- Kostuj T, Schaper K, Baums MH, Lieske S (2014): Eine Validierung des AOFAS-Ankle-Hindfoot-Scale für den deutschen Sprachraum. *Fuß und Sprunggelenk* 12, 100–106
- Kuhn H, Zuther W, Heine A, Küster Hans-H (2010): Die subtalare Arthrorise mittels Kalix® Implantat beim flexiblen Knick-Senkfuß. *Fuß und Sprunggelenk* 8, 48–54
- Ludwig O, Quadflieg R, Koch M (2013): Einfluss einer Sensomotorischen Einlage auf die Aktivität des M. peroneus longus in der Standphase. *Dtsch Z Sportmed* 64, 77–82
- Masterson E, Jagannathan S, Borton D, Stephens MM (1994): Pes planus in childhood due to tibialis posterior tendon injuries. Treatment by flexor hallucis longus tendon transfer. *J Bone Joint Surg Br* 76, 444–446
- Matussek J, Linhardt O: Kinderorthopädie und Kindertraumatologie. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2013
- Megremis P, Megremis O (2019): Arthroereisis for Symptomatic Flexible Flatfoot Deformity in Young Children: Radiological Assessment and Short-Term Follow-Up. *J Foot Ankle Surg* 58, 904–915
- Miller SJ (2006): Extraarticular Arthroereisis Implant in the pediatric flexible flatfoot: A Comprehensive View of the Evidence. 4, 19–35
- Mitternacht J, Lampe R (2006): Ermittlung funktioneller kinetischer Parameter aus der plantaren Druckverteilungsmessung. *Z Orthop Ihre Grenzgeb* 144, 410–418
- Morley AJM (1957): Knock-knee in Children. *Br Med J* 2, 976–979
- Mosca VS (1998): The child's foot: principles of management (editorial). *J Pediatr Orthop* 18, 281–282
- Mosca VS (2010): Flexible flatfoot in children and adolescents. *J Child Orthop* 4, 107–121
- Müller S, Carlsohn A, Müller J, Baur H, Mayer F (2012): Static and dynamic foot characteristics in children aged 1-13 years: a cross-sectional study. *Gait Posture* 35, 389–394

- Murley GS, Menz HB, Landorf KB (2009): A protocol for classifying normal- and flat-arched foot posture for research studies using clinical and radiographic measurements. *J Foot Ankle Res* 2, 1-13
- Papamerkouriou Y-M, Rajan R, Chaudhry S, Kodumuri P, Evans H, Kerr M (2019): Prospective Early Clinical, Radiological, and Kinematic Pedobarographic Analysis Following Subtalar Arthroereisis for Paediatric Pes Planovalgus. *Cureus* 11, 1–13
- Pfeiffer M, Kotz R, Ledl T, Hauser G, Sluga M (2006): Prevalence of Flat Foot in Preschool-Aged Children. *Pediatrics* 118, 634–639
- Pita-Fernandez S (2017): Flat Foot in a Random Population and its Impact on Quality of Life and Functionality. *JCDR* 22–27
- Putti AB, Arnold GP, Cochrane LA, Abboud RJ (2008): Normal pressure values and repeatability of the Emed® ST4 system. *Gait Posture* 27, 501–505
- Reilingh ML, Beimers L, Tuijthof GJM, Stufkens SAS, Maas M, van Dijk CN (2010): Measuring hindfoot alignment radiographically: the long axial view is more reliable than the hindfoot alignment view. *Skeletal Radiol* 39, 1103–1108
- Richter M, Zech S (2013): Arthrorisis with calcaneostop screw in children corrects Talo-1st Metatarsal-Index (TMT-Index). *J Foot Ankle Surg* 19, 91–95
- Rosenbaum D: Assessing Pediatric Foot Deformities by Pedobarography. In: Müller B, Wolf SI, Brueggemann G-P, Deng Z, McIntosh A, Miller F, Selbie WS (Hrsg.): *Handbook of Human Motion*. Springer International Publishing, Cham 2016, 1–15
- Ruiz-Picazo D, Jiménez-Ortega P, Doñate-Pérez F, Gaspar-Aparicio N, García-Martín V, Ramírez-Villaescusa J, Losa-Palacios S (2019): Radiographic and Functional Results following Subtalar Arthroereisis in Pediatric Flexible Flatfoot. *Advances in Orthopedics* 2019, 1–8
- Schünke M, Schulte E, Schumacher U, Voll M, Wesker K (2007): *Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem - Prometheus - LernAtlas der Anatomie* (2007). 457, 615
- Sessler DI, Imrey PB (2015): Clinical Research Methodology 1: Study Designs and Methodologic Sources of Error. *Anesthesia & Analgesia* 121, 1034–1042
- Shah NS, Needleman RL, Bokhari O, Buzas D (2015): 2013 Subtalar Arthroereisis Survey: The Current Practice Patterns of Members of the AOFAS. *Foot Ankle Spec* 8, 180–185
- Speth B, Hellmich H (2017): Der kindliche Knick-Senkfuß – ein Problem? *Paediatrica* 28, 31–34
- Sullivan AJ (1999): Pediatric Flatfoot: Evaluation and Management: *J Am Acad Orthop Surg* 7, 44–53
- Thomas JL, Kunkel MW, Lopez R, Sparks D (2006): Radiographic Values of the Adult

- Foot in a Standardized Population. *J Foot Ankle Surg* 45, 3–12
- Thometz JG, Liu XC, Tassone JC, Klein S (2005): Correlation of Foot Radiographs With Foot Function as Analyzed by Plantar Pressure Distribution. *J Pediatr Orthop* 25, 249–252
- Vanderwilde R, Staheli Lt, Chew De, Malagon V (1988): Measurements on radiographs of the foot in normal infants and children. *J Bone Joint Surg Am* 70, 407–415
- Velasco VR (2012): Fußdeformitäten im Kindesalter. *Pädiatrie* 2, 9–16
- Vienne P, Schöttle P (2003): Die chronische Rückfussinstabilität: neue Konzepte in der Diagnostik und in der chirurgischen Behandlung. *Schweizerische Zeitschrift für „Sportmedizin und Sporttraumatologie“* 51, 107–111
- Wachowsky M, Eberhardt O, Wirth T (2017): Kinderorthopädie – Schwerpunkt Fuß. *Radiologie up2date* 17, 275–292
- Wagner F, Hofbauer R, Matussek J (2013): Der kindliche Knick-Senk-Fuß: Normvariante oder therapiebedürftige Deformität? *Orthopäde* 42, 455–468
- Waizy H, Plaass C, Brandt M, Herold D, Stukenborg-Colsman C, Windhagen H, Claassen L (2013): Extraartikuläre Arthrorise nach Grice/Green vs. Kalkaneusverlängerungsosteotomie nach Evans: Retrospektiver Vergleich zur Therapie des neurogenen Pes planovalgus. *Orthopäde* 42, 409–417
- Waldt S, Eiber M, Wörtler K: Messverfahren und Klassifikationen in der muskuloskelettalen Radiologie: 75 Tabellen. 2., unveränderte Aufl; Thieme, Stuttgart 2017
- Westberry DE, Davids JR, Anderson JP, Pugh LI, Davis RB, Hardin JW (2013): The operative correction of symptomatic flat foot deformities in children: The relationship between static alignment and dynamic loading. *Bone Joint J* 95-B, 706–713
- Whitman R (2010): The Classic: A Study of the Weak Foot, with Reference to its Causes, its Diagnosis, and its Cure; with an Analysis of a Thousand Cases of So-Called Flat-Foot. *Clin Orthop Relat Res* 468, 925–939
- Wirth SH, Viehöfer A, Schöni M (2017): Der erworbene Pes planovalgus beim Erwachsenen. *Swiss Medical Forum* 17, 630–636
- Wirtz C, Wanner R, Kohl S, Krüger A, Zumstein MA (2011): «Knie-Achsendeviationen – Ursache für Gonarthrose?». *Schweizerische Zeitschrift für «Sportmedizin und Sporttraumatologie»* 59, 169–173
- Wülker N: Taschenlehrbuch Orthopädie und Unfallchirurgie. Georg Thieme Verlag KG, Stuttgart, New York 2015
- Younger AS (2005): Radiographic Assessment of Adult Flatfoot. *Foot Ankle Int* 26, 820–

825

Zhu Y, Xu X (2015): Treatment of Stage II Adult Acquired Flatfoot Deformity With Subtalar Arthroereisis. *Foot Ankle Spec* 8, 194–202

Danksagung

Mein größter Dank gebührt Frau Professor Anna-Kathrin Hell für die Bereitstellung des Themas und der außergewöhnlichen Unterstützung bei der Durchführung und Fertigstellung dieser Arbeit. Zudem bedanke ich mich ganz herzlich bei Herrn Dr. med. Hartmut Stinus für den Zugang zu seinen Patientendaten, der fachlichen Unterstützung und die viele Zeit, die er für mich investiert hat.

Außerdem danke ich von Herzen Frau Dr. Katja Lüders und Frau Dr. Lena Braunschweig für Ihre liebevolle Betreuung, der großen Hilfe bei der Auswertung der Daten und die Unterstützung bis zur Fertigstellung dieser Arbeit.

Lebenslauf

Am 29. März 1995 wurde ich als Tochter von Sonja Susi Sabine Eysel, geborene Becker, und Dr. med. Michael Andreas Karl-Theodor Eysel in Ratingen geboren.

Im Rahmen meiner Schulausbildung besuchte ich in den Jahren von 2001 bis 2005 die Grundschule Harleshausen in Kassel. Im Jahr 2005 wechselte ich auf das Friedrichsgymnasium in Kassel. Dort erlangte ich 2013 die Allgemeine Hochschulreife mit der Endnote 1,7.

Anschließend begann ich im Oktober 2013 eine Ausbildung zur Medizinischen Fachangestellten in Kassel, welche ich im Juni 2015 erfolgreich abschloss. Im Oktober 2015 zog ich nach Göttingen, um an der Georg-August-Universität ein Semester Biologie im Bachelor of Science zu studieren.

Mein Studium der Humanmedizin konnte ich im anschließenden Sommersemester im April 2016 an der Georg-August-Universität in Göttingen beginnen und schloss den 1. Abschnitt der Ärztlichen Prüfung am 04.04.2018 ab. Im folgenden Herbst 2018 begann ich mit der Aufnahme meiner Arbeit für diese Doktorarbeit. Den 2. Abschnitt der Ärztlichen Prüfung schloss ich erfolgreich am 15.04.2021 ab.

Den 3. Abschnitt der Ärztlichen Prüfung werde ich voraussichtlich im Frühjahr 2022 ablegen.