

Aus der Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie
der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf
Direktor: Univ.-Prof. Dr. med. Joachim Windolf

Radiologische Auswertung der subtalaren Schraubenarthrorise bei
flexiblem kindlichen Knick-Senkfuß

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin
der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

vorgelegt von

Carina Susanne Lipp

2023

Als Inauguraldissertation gedruckt mit der Genehmigung der
Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

gez.:

Dekan: Prof. Dr. med. Nikolaj Klöcker

Erstgutachter: PD Dr. med. Bernd Bittersohl

Zweitgutachter: PD Dr. med. Daniel B. Abrar

Für meine Eltern

Teile dieser Arbeit wurden veröffentlicht:

Kubo H, Lipp C, Hufeland M, Ruppert M, Westhoff B, Krauspe R, Pilge H, 2020:
Outcome after subtalar screw arthroereisis in children with flexible flatfoot depends on
time of treatment: Midterm results of 95 cases. J Orthop Sci. 2020 May;25(3):497-502.
<https://doi.org/10.1016/j.jos.2019.06.007>

Kubo H, Krauspe R, Hufeland M, Lipp C, Ruppert M, Westhoff B, Pilge H, 2019:
Radiological outcome after treatment of juvenile flatfeet with subtalar arthroereisis: a
matched pair analysis of 38 cases comparing neurogenic and non-neurogenic patients.
J Child Orthop. 2019 Aug 1;13(4):346-352. doi: 10.1302/1863-2548.13.190046.

Zusammenfassung

Als eine häufige Symptomatik bei älteren Menschen, die Orthopäd:innen oder Allgemeinmediziner:innen aufsuchen, zeigen sich Fußbeschwerden, insbesondere Fußschmerzen. Diese Fußbeschwerden sind häufig auf einen Plattfuß, den sogenannten Pes planovalgus, zurückzuführen. Häufig bestand bei diesen Patient:innen bereits im Kindesalter das Krankheitsbild des symptomatischen Pes planovalgus, auch flexibler Knick-Senkfuß (KSF) genannt. Wäre zu diesem Zeitpunkt bei symptomatischen Patient:innen bereits eine Therapie erfolgt, hätten Folgen wie persistierende Beschwerden in vielen Fällen vermieden werden können. Eine Behandlungsoption nach konservativen Maßnahmen für den symptomatischen flexiblen kindlichen Knick-Senkfuß ist die subtalare Schraubenarthrorise (SSA). Die Vorteile dieser Behandlungsoption sind neben dem guten Behandlungsergebnis, die minimale Invasivität und kurze Operationszeiten bei niedrigen Kosten und geringen Komplikationsraten. Trotz dieser zahlreichen Vorteile wird der beste Operationszeitpunkt weiterhin kontrovers diskutiert.

In dieser Arbeit erfolgte eine radiologische Auswertung in Bezug auf die Herausarbeitung des günstigsten Alters zum Operationszeitpunkt mit langfristigem Therapieerfolg. Außerdem sollte in dieser Arbeit gezeigt werden, dass der Naviculocuboidale Index (NC-Index, NCI) ein valides Maß für die, durch Arthrorise entstandene, Aufrichtung des Fußgewölbes ist und somit einen wertvollen Index zur Verlaufskontrolle darstellt. Dazu wurden von 2007 bis 2015 in dieser Studie 80 Patient:innen mit insgesamt 149 Plattfüßen untersucht und unter Beachtung von Ein- und Ausschlusskriterien 50 Patient:innen mit 95 operierten Pes planovalgus in die Arbeit eingeschlossen [1, 2].

Die standardisierten Röntgenaufnahmen in zwei Ebenen nach Simons, die präoperativ, postoperativ und zur Follow-up-Kontrolle aufgenommen wurden, dienten der retrospektiven radiologischen Auswertung. Es wurden folgende Winkel gemessen und folgende Indizes bestimmt: der Calcaneusneigungswinkel, der Talocalcaneare Winkel a. p. und lateral, der Talo-Metatarsale-I-Winkel a. p. und lateral, der TMT-Index und der NC-Index.

Im Rahmen der Bestimmung des besten Operationszeitpunktes wurden die Patient:innen je nach Alter in drei verschiedene Gruppen eingeteilt: Gruppe A: 5–8 Jahre, Gruppe B: 9–12 Jahre und die Gruppe C: 13–15 Jahre.

In der vorliegenden Arbeit zeigten sich die besten Ergebnisse der Fußkorrektur in der Altersgruppe der 9- bis 12-jährigen Patient:innen. Innerhalb dieser Gruppe verbesserten sich die gemessenen Parameter und es gab keine klinisch relevante Verschlechterung in den Follow-up-Messungen. Für die Gruppe der 5- bis 8-Jährigen zeigte sich, dass die Langzeitergebnisse nicht so stabil wie die der Gruppe B waren und lediglich ein gemessener Winkel langfristig gebessert war. In der Gruppe C, dem ältesten Patientenkollektiv, zeigten sich keine einheitlichen Ergebnisse. Insgesamt stellt diese Arbeit heraus, dass das Alter zwischen 9 und 12 Jahren zum Zeitpunkt einer subtalaren Schraubenarthrorise die besten Langzeitergebnisse bewirkt, wohingegen ein früherer Operationszeitpunkt keine günstigen Langzeitergebnisse erbrachte und ein späterer Operationszeitpunkt mit gemischten Ergebnissen und einer erneuten Verschlechterung einherging.

Eine deutliche Verbesserung des NC-Index vom präoperativen Zeitpunkt zum postoperativen Zeitpunkt wurde in allen Vergleichsgruppen beobachtet. Für das Kollektiv der 5- bis 8-Jährigen ergab sich aber in der Follow-up-Kontrolle eine erneute Verschlechterung des NC-Index. Der NCI stellte sich als valider Parameter zur Abgrenzung des gesunden Fußes zum Pes planovalgus sowie zur Kontrolle des Operationsergebnisses dar.

Summary

Older adults who visit the orthopaedist or the family doctor often show up with foot complaints, particularly foot pain. These foot complaints are regularly due to a flat foot, the so-called pes planovalgus. Often, these patients already had the clinical picture of symptomatic pes planovalgus, also called flexible flat foot, in childhood. If symptomatic patients had already been treated at this time, consequences and persistent complaints could probably have been avoided. One treatment option after conservative measures for symptomatic flexible infantile flatfoot is the subtalar screw arthroereisis (SSA). The advantages of this treatment option, in addition to good treatment outcomes, are minimal invasiveness and short operative times at low cost and low complication rates. Despite these numerous advantages the best surgical timing remains controversial.

In this work, a radiological evaluation was performed in relation to the elaboration of the most favorable age at the time of surgery with long-term therapeutic success. In addition, this work aimed to show that the Navicular-cuboidal-index (NCI) is a valid measure for the, as a result of arthroereisis, straightening of the foot arch and thus represents a valuable index for monitoring progress. For this purpose, 80 patients with a total of 149 flat feet were examined in this study from 2007 to 2015, and attention to inclusion and exclusion criteria included 50 patients with 95 operated pes planovalgus [1, 2].

Standardized radiographs in two planes according to Simons, which were taken preoperatively, postoperatively, and for follow-up control, were used for the retrospective radiological evaluation. The following angles were measured, and the following indices were determined: the calcaneus inclination angle, the talocalcaneal angle a. p. and lateral, the talus-first metatarsal angle a. p. and lateral, the talometatarsal-index (TMT index), and the Navicular-cuboidal-index.

In determining the best time for surgery, patients were divided into three different groups according to their age: Group A: 5–8 years, Group B: 9–12 years, and Group C: 13–15 years.

In this work the best results of foot correction were shown in the age group of 9–12 years old patients. Within this group, the measured parameters improved, and the follow-up measurements showed no significant decline.

For the group of 5–8-year-olds, it was found that the long-term results were not as stable as those of group B and only one measured angle was improved long-term. Group C, the oldest patient population, did not show consistent results.

Overall, this work highlights that patients between 9–12 years of age at the time of subtalar screw arthroereisis revealed the best long-term results, whereas the earlier surgery did not produce promising long-term effects and the later timing of surgery yielded mixed results with renewed deterioration.

A significant improvement in the Navicular-cuboidal-index from the preoperative time point to the postoperative time point was observed in all comparison groups. However, for the collective of 5–8-year-olds, there was a renewed deterioration of the NC index in the follow-up control. Nevertheless, the NCI was a valid parameter for differentiating the healthy foot from the pes planovalgus and for monitoring the surgical outcome.

Abkürzungsverzeichnis

KSF	Knick-Senkfuß
SSA	subtalare Schraubenarthrorise, <i>subtalar screw arthroereisis</i>
OSG	oberes Sprunggelenk
USG	unteres Sprunggelenk
Abb.	Abbildung
TMT-I-Winkel	Talo-Metatarsale-I-Winkel, <i>Talus-first metatarsal angle</i>
TCA	Talocalcaneärer Winkel, <i>Talocalcaneal angle</i>
CP	Calcaneal pitch, Calcaneusneigungswinkel
NC-Index, NCI	Naviculocuboidaler Index, <i>Navicular-cuboidal-index</i>
TMT-Index	Talo-Metatarsal-Index, <i>Talometatarsal-index</i>
M.	Musculus
Lig.	Ligamentum
a. p.	anterior-posterior
lat.	lateral
PACS	<i>Picture Archiving and Communication System</i> , Bildarchivierungs- und Kommunikationssystem
KS	Kolmogorov-Smirnov-Test
SD	Standardabweichung
v.o.n.u.	von oben nach unten

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Sinus Tarsi	4
Abb. 2: Bilder flexibler Pes planovalgus beim Kind	9
Abb. 3: Röntgenbild nach Simons	15
Abb. 4: Calcaneusneigungswinkel.....	25
Abb. 5: Talocalcaneärer Winkel	26
Abb. 6: lateraler Talocalcaneärer Winkel	27
Abb. 7: Talo-Metatarsale-I-Winkel	28
Abb. 8: Talo-Metatarsale-I-Winkel (Meary-Winkel)	29
Abb. 9: Naviculocuboidaler Index.....	30
Abb. 10: Flussdiagramm Patientenselektion	33
Abb. 11: Übersicht Patientenkollektiv	33
Abb. 12: Ergebnisse Gesamtkollektiv	36
Abb. 13: Ergebnisse Gruppe A	39
Abb. 14: Ergebnisse Gruppe B	42
Abb. 15: Ergebnisse Gruppe C	45
Abb. 16: Röntgenbilder a. p.-Strahlengang	47
Abb. 17: Röntgenbilder lat. Strahlengang	48
Abb. 18: Naviculocuboidaler Index präoperativ.....	50
Abb. 19: Naviculocuboidaler Index postoperativ	50
Abb. 20: Naviculocuboidaler Index Follow-up	50
Abb. 21: Übersicht der Röntgenbilder	51

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht Mittelwerte Gesamtkollektiv.....	37
Tabelle 2: Mittelwerte der gemessenen Winkel in den Gruppen A-C.....	46

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Einführung.....	1
1.2	Anatomie des Fußes	2
1.2.1	Sinus tarsi.....	4
1.2.2	Fußgewölbe und Statik des Fußes	5
1.3	Fuß im Wachstum/Knochenentwicklung.....	6
1.4	Pes planovalgus.....	7
1.5	Ätiologie und Differentialdiagnosen.....	7
1.6	Anamnese und Diagnostik	8
1.6.1	Anamnese und klinische Diagnostik.....	8
1.6.2	Bildgebende Diagnostik.....	9
1.6.3	Radiologische Parameter	10
1.6.4	Pedobarographische Untersuchung.....	10
1.7	Therapie.....	10
1.7.1	Therapieindikationen	10
1.7.2	Konservative Therapie.....	11
1.7.3	Operative Therapie des flexiblen kindlichen Knick-Senkfußes	12
1.7.4	Weichteiloperationen des medialen Fußes	12
1.7.5	Calcaneusverlängerungsosteotomie nach Evans	13
1.7.6	Extraartikuläre Arthrodesen nach Grice	13
1.7.7	Operatives Vorgehen bei der subtalaren Schraubenarthrorise.....	13
1.7.8	Additive operative Therapien bei Spitzfuß-Komponente.....	15
1.8	Ziele der Arbeit	16
2	Material und Methoden.....	18
2.1	Patientenrekrutierung	18
2.2	Patientenakten	18

2.3	Einschluss- und Ausschlusskriterien.....	19
2.4	Studienkollektiv	19
2.5	Altersverteilung zum Operationszeitpunkt	20
2.6	Nebendiagnosen	20
2.7	Prozess Diagnose- und Indikationsstellung	20
2.8	Indikation für die subtalare Schraubenarthrorise	21
2.9	Schrauben.....	21
2.10	Klinische Untersuchung	22
2.11	Radiologische Untersuchung.....	23
2.12	Röntgenuntersuchung nach Simons	23
2.13	Auswertung der Röntgenbilder.....	24
2.14	Knochenalter.....	25
2.15	Winkelmaße und Indizes	25
2.15.1	Calcaneusneigungswinkel.....	25
2.15.2	Talocalcaneärer Winkel anterior-posterior nach Kite.....	26
2.15.3	Talocalcaneärer Winkel lateral	26
2.15.4	Talo-Metatarsale-I-Winkel in a. p.	27
2.15.5	Talo-Metatarsale-I-Winkel lateral nach Meary	28
2.15.6	Talo-Metatarsal-Index (TMT-Index).....	29
2.15.7	Naviculocuboidaler Index (NCI)	29
2.16	Statistik.....	30
2.17	Ethikvotum	31
3	Ergebnisse.....	32
3.1	Gesamtkollektiv	32
3.2	Ergebnisse Gruppe A (5–8 Jahre)	37
3.3	Ergebnisse Gruppe B (Altersgruppe 9–12 Jahre).....	40
3.4	Ergebnisse Gruppe C (Altersgruppe 13–15 Jahre).....	43

3.5	Knöcherne Reifung	48
3.6	Ergebnisse Naviculocuboidaler Index.....	50
4	Diskussion.....	52
4.1	Zielsetzung	52
4.2	Diskussion der Diagnostik und Behandlung	53
4.3	Subtalare Schraubenarthrorise	55
4.4	Radiologische Winkelmaße und Diskussion der Ergebnisse	57
4.5	Vergleich Naviculocuboidaler Index und Talometatarsale Index.....	61
4.6	Knöcherne Reifung	62
4.7	Einflüsse des Alters zum Zeitpunkt der Operation auf das Outcome	64
4.8	Komplikationen.....	65
4.9	Limitationen	66
4.10	Fazit	67
4.11	Ausblick.....	68
5	Literatur- und Quellenverzeichnis	70

1 Einleitung

1.1 Einführung

Ein vielfach vorkommendes Krankheitsbild in der orthopädischen oder allgemeinmedizinischen Praxis sind Fußbeschwerden, die häufig auf einen Knick-Senkfuß, auch Plattfuß genannt, zurückzuführen sind und meist seit der Kindheit bestehen. Ältere Menschen mit Knick-Senkfüßen beklagen häufig Schmerzen durch Verschleiß oder durch ein falsches Gangbild. Auch beklagen sie die Schwierigkeit, adäquates Schuhwerk aufgrund ihrer Fußfehlstellung zu finden. Dadurch ergibt sich eine große Anzahl an verordneten Orthesen oder physiotherapeutischen Therapien. Diese enden oft mit frustrierendem Therapieerfolg für die Patient:innen und das ärztliche Fachpersonal. Viele dieser Beschwerden ließen sich vielleicht vermeiden, wenn in der Kindheit der noch flexible Knick-Senkfuß bei vorhandener Symptomatik mittels geeigneter Therapie bereits behandelt wird [3].

Zwar ist der Knicksenkfuß auch im Kindesalter einer der häufigsten Gründe für eine Vorstellung bei Ärztinnen und Ärzten der Pädiatrie oder Orthopädie, jedoch beruht dies meist auf ästhetischen und kosmetischen Aspekten und der Sorge der Eltern, dass sich der Kinderfuß fehlentwickle [4, 5]. Der flexible kindliche Knick-Senkfuß ist eine der häufigsten Fußdeformitäten, bei der es sich um eine Fußfehlstellung mit einem Rückfußvalgus und einem abgeflachten Fußlängsgewölbe handelt [6].

Zur Feststellung des Krankheitsbildes des symptomatischen flexiblen Knick-Senkfußes wird eine ausführliche Anamnese erhoben. Diese beinhaltet neben Schmerzbeginn und -dauer, auslösende Faktoren und Beschwerdezunahme sowie Hinweise auf eine Bandlaxität. Nach Inspektion, bei der bereits eine mediale Mehrbeschwielung der Füße sowie das abgeflachte mediale Fußlängsgewölbe und mit Betrachtung des Rückfußes, ein Fersenvalgus auffällt, wird bei der klinischen Untersuchung insbesondere auf die Testung der Flexibilität des Knick-Senkfußes geachtet. Dazu gehören beispielsweise der Jack`s Test, oder der „*single-heel-rise*“ Test. Weiterhin findet sich häufig eine allgemeine Bandlaxität, wozu weitere Gelenke des Körpers untersucht werden. Diese zeigen in der Regel eine Hyperextendierbarkeit [5]. Zur weiteren Diagnostik schließen sich konventionelle Röntgenaufnahmen nach Simons im Stand im anterior-posterioren und lateralen Strahlengang an [7]. Im lateralen Strahlengang ist ein Durchhängen des talo-navicularen und naviculo-cuneiformen Gelenkkomplexes zu sehen, das als „*sag sign*“

bezeichnet wird [8]. Zusätzlich zeigt sich häufig eine Abflachung des Calcaneusneigungswinkels [9]. In der anterior-posterioren Röntgenaufnahme im Stand finden sich vor allem eine Abduktion des Vorfußes und ein vergrößerter Talocalcaneärer Winkel [4].

Dadurch, dass die Fußfehlstellung im Kleinkindalter und Kindesalter bis zum ca. 6. Lebensjahr meistens physiologisch ist, ist es schwer die Grenze zum Pathologischen zu ziehen [6, 10, 11]. Kenntnis über die physiologische Entwicklung des Fußes und der gesamten unteren Extremität sind dafür unerlässlich.

Wird ein symptomatischer flexibler Knick-Senkfuß diagnostiziert, so wird meist zunächst eine konservative Therapie eingeleitet. Dies beinhaltet neben häufigem Barfußlaufen und regelmäßiger Fußgymnastik beziehungsweise Physiotherapie auch Dehnübungen der Wadenmuskulatur [4, 5]. Zusätzlich werden in ausgeprägten Fällen Schuheinlagen und Orthesen verschrieben. Reicht dies im Verlauf aufgrund einer Beschwerdepersistenz oder gar -verschlechterung nicht aus, können operative Verfahren in Betracht gezogen werden. Eine dieser Therapien ist die subtalare Schraubenarthrorise. Diese stellt ein minimalinvasives Operationsverfahren dar, das – im richtigen Alter angewandt – gute Langzeitergebnisse zur Behandlung des kindlichen flexiblen Pes planovalgus erzielt. So können Langzeitfolgen wie ein verfrühter Verschleiß, falsche Belastungen oder Muskelabbau vermindert werden. Über den richtigen Operationszeitpunkt wird in der Literatur kontrovers diskutiert [4, 12, 13]. Dieser wird in der vorliegenden Arbeit, von der Teile bereits veröffentlicht wurden [1, 2], erörtert.

1.2 Anatomie des Fußes

Mit seiner Morphologie sowie seiner Funktion im Stand oder in Bewegung gehört der Fuß zu den komplexesten Körperteilen des menschlichen Körpers. Ein Fuß besteht aus 26 Knochen, 2 Sesambeinen und zahlreichen Bändern und Muskeln. Diese bedingen in einem komplizierten Zusammenwirken die Statik und Funktion des Fußes. Im Stand und während des Gangzyklus wird der Fuß unterschiedlich stark durch das Körpergewicht belastet und somit zeitweise fixiert und in seiner Beweglichkeit eingeschränkt [14]. Anatomisch lässt sich der Fuß einteilen in Tarsus, Metatarsus und Antetarsus. Zum Tarsus gehören Talus und Calcaneus sowie alle Fußwurzelknochen: Os naviculare, Os

cuboideum und Ossa cuneiformia (mediale, intermedium und laterale). Der Metatarsus setzt sich aus den fünf Ossa metatarsalia zusammen und grenzt an den Antetarsus, der wiederum aus den Ossa digitorum besteht. Dazu gehören die Phalanges proximales, Phalanges mediales und die Phalanges distales, wobei die Großzehe nur aus Phalanx proximalis und Phalanx distalis besteht.

Funktionell wird dies in Vorfuß, Mittelfuß und Rückfuß eingeteilt. Der Vorfuß entspricht den Knochen des Antetarsus. Der Mittelfuß und der Rückfuß weichen in dieser Einteilung ab: Der Mittelfuß besteht, zusätzlich zu den Ossa metatarsalia, aus dem Os cuboideum, dem Os naviculare und den Ossa cuneiformia. Zum Rückfuß gehören somit nur Calcaneus und Talus.

Das Sprungbein, Talus, ist der zentrale Knochen des oberen Sprunggelenkes (OSG). Dieser Knochen wird in Corpus, Collum und Caput eingeteilt [14]. Eine genauere Betrachtung des Talus von kaudal lässt drei Flächen finden: die Facies articularis calcanea anterior und media, die durch den Sulcus tali von der dritten Gelenkfläche der Facies articularis posterior getrennt wird [15]. Nach lateral hin verbreitert sich der Sulcus tali zum Sinus tarsi, der von kaudal vom Calcaneus begrenzt wird.

Der Calcaneus ist unter den Fußwurzelknochen der größte Knochen. Auf ihm lastet im Bereich des Tuber calcanei, neben den Köpfchen der Metatarsalia I und V, das gesamte Gewicht des Körpers. Die Gelenkflächen des Calcaneus liegen zum Talus hin gelegen, leicht schräg nach vorn geneigt und heißen Facies articularis talaris posterior, Facies articularis talaris media und Facies articularis anterior [15]. Darüber hinaus gibt es eine weitere, nach ventral gerichtete, Gelenkfläche, die Facies articularis cuboidea, die mit dem Os cuboideum artikuliert.

Die physiologische Stellung des Rückfußes beträgt 0° – 10° Fersenvarus.

Am menschlichen Fuß gibt es mehr als 30 gelenkige Verbindungen. Zu den größeren Gelenken gehören das obere und untere Sprunggelenk sowie das Chopard- und Lisfranc-Gelenk. Neben diesen gibt es weitere Gelenke der Fußwurzel, des Mittelfußes und der Zehen. Die beiden Sprunggelenke stellen eine funktionelle Einheit dar, obwohl ihre Gelenkspalten getrennt sind. Ihre annähernd kreuzförmig stehenden Achsen, die erst in Kombination eine umfassende Beweglichkeit ermöglichen, lassen alleinstehend im OSG nur die Dorsal- und Plantarflexion und im unteren Sprunggelenk (USG) die Inversion und Eversion zu. Erst im Zusammenspiel mit den übrigen Gelenken des Fußes resultieren die Supination und Pronation des Fußes [16].

1.2.1 Sinus tarsi

Zwischen Calcaneus und Talus verläuft eine Knochenrinne, die Canalis tarsi genannt wird und sich aus dem Sulcus tali taluswärts und dem Sulcus calcanei cranialseits des Calcaneus bildet (siehe Abb. 1). In diesem Kanal verläuft unter anderem das Ligamentum talocalcaneum interosseum, welches das USG in zwei Kammern teilt. Lateral erweitert sich der Canalis tarsi trichterförmig zum Sinus tarsi [16]. Im Sinus tarsi liegen neben Ligamenten, die zur Stabilität des Rückfußes beitragen, auch Blutgefäße und Nerven umbettet von Fett und Bindegewebe. Bei instabilitätsbedingten Fehlstellungen wie einem Rückfußvalgus kommt es wiederholt zu Rotation und Subluxation im Subtalargelenk [17].

In einer Studie von Rein et al. am Leichenfuß konnte gezeigt werden, dass sich insbesondere im Fettpolster des subtalaren Gelenkkomplexes signifikant mehr freie Nervenendigungen finden, als im oberflächlichen Bereich des Fettes [18]. Dies führt zu der Hypothese, dass dieses Fettpolster eine propriozeptive Funktion innehält. Eine Innervation des weißen Fettgewebes wurde bereits sehr viel früher nachgewiesen [19]. In der Literatur wird aufgrund der Dichte der Mechanorezeptoren und freien Nervenendigungen eine propriozeptive Funktion des Sinus tarsi vermutet [6, 20, 21].

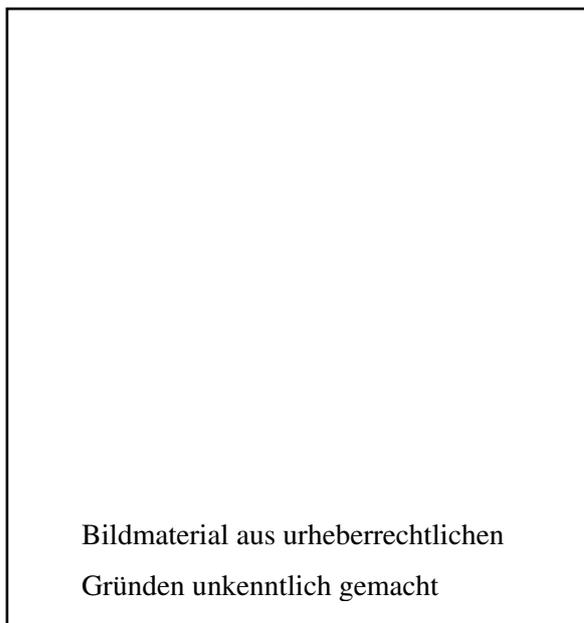


Abb. 1: Sinus Tarsi mit Calcaneusstopschraube [22]

1.2.2 Fußgewölbe und Statik des Fußes

Vor- und Mittelfuß verfügen über fünf Zehenstrahlen, diese lassen sich unterteilen in drei mediale Strahlen, die zum Talus ziehen und zwei laterale Strahlen, die sich zum Calcaneus fortsetzen. Für die Statik des Fußes haben die Tragstrahlen eine wichtige Rolle und bilden durch ihre besondere Anordnung, im Vorfuß nebeneinanderliegend und zum Mittel- bis Rückfuß hin übereinander liegend, das Längs- und Quergewölbe [23]. Das Längsgewölbe bezeichnet die Fußwölbung in der Sagittalebene zwischen Tuber calcanei und den Metatarsalköpfchen und bildet sich aus dem Zusammenspiel von Knochen, Muskeln und Bändern. Es hat die stärkste Wölbung im Bereich des Großzehenstrahls [15]. Für die Stabilität des Längsgewölbes ist die Plantaraponeurose von entscheidender Bedeutung. Diese verbindet den Calcaneus mit den Zehengrundgelenken und ist Teil der passiven Verspannung des Längsgewölbes. Weiterhin gehören alle längs ausgerichteten Bänder und Bandanteile der Planta pedis zu dieser Verspannung [14]. Die passive Verspannung mindert die Biegebeanspruchung der Mittelfußknochen. Die aktive Verspannung des Längsgewölbes wird vor allem durch die kurzen Fußmuskeln gewährleistet, umfasst aber alle plantaren Fußmuskeln. Das Längsgewölbe soll insgesamt die bei Bewegung entstehenden einwirkenden Kräfte abmildern.

Das Quergewölbe unterteilt sich in Vorfußbogen und Mittelfußbogen und endet mit der Berührung des Tuber calcanei mit dem Boden im Rückfuß. Entscheidenden Einfluss auf die Form des Quergewölbes haben dabei zwei Knochen der distalen Fußwurzel: das Os cuneiforme intermedium und das Os cuneiforme laterale. Durch ihre Keilform ergeben diese mit den restlichen Knochen einen nach plantar geöffneten Halbkreis. Auch im Quergewölbe gibt es aktive und passive Verspannungsstrukturen. Zu der passiven Verspannung tragen vor allem die interossären Bänder und die Basen der Mittelfußknochen bei und sichern so die nur im Vorfuß vorliegende passive Verspannung des Quergewölbes, wohingegen die aktive Verspannung des Quergewölbes nur im Mittelfuß- und Fußwurzelbereich vorliegt. Vor allem das Caput transversum des M. adductor hallucis, der M. fibularis longus und die fächerförmige Sehne des M. tibialis posterior sichern die aktive Verspannung des proximalen Quergewölbes [15].

Die Hauptbelastungsstellen des gesunden Fußes sind der Großzehenballen, die Ferse und der laterale Fußrand.

Besteht eine Fußfehlstellung, so ändert sich die Hauptbelastung. Dies ist unter anderem durch vermehrte Schwielenbildung und einseitige Abnutzung der Schuhsohlen sichtbar.

1.3 Fuß im Wachstum/Knochenentwicklung

Die Skelettreifung mit Verknöcherung der knorpeligen Skelettstücke, die – ausgenommen der Schädelkalotte, der Gesichtsknochen und des Schüsselbeins – alle anderen Knochen des Körpers betrifft, beginnt bereits gegen Ende der 6. Entwicklungswoche und zieht sich bis zum Ende des Längenwachstums hin [15].

In den ersten drei Jahren entwickelt sich der Fuß in Form und Länge am schnellsten. Volpon konnte mithilfe von Fußabdruckanalysen zeigen, dass sich das mediale Fußlängsgewölbe besonders im Alter zwischen 2 und 6 Jahren entwickelt, danach sind signifikante Veränderungen unwahrscheinlicher [24]. Bis zu diesem Alter findet sich physiologischerweise ein Fettpolster, das das mediale Längsgewölbe bedeckt. Dies erweckt den Anschein, dass Säuglinge und Kleinkinder einen Scheinplattfuß haben [4]. Es kann bis zum 6. Lebensjahr dauern, bis sich dieses Fettpolster verwachsen hat und sich ein Fußgewölbe abzeichnet [5]. Dies geschieht durch die veränderte Belastung des Fußes, sobald ein Kind zu stehen und zu laufen anfängt. Zu Beginn bietet dieses plantare Fettpolster dazu zunächst einen Schutz vor Überbelastung. Für die Aufrichtung des Fußgewölbes ist die aktive Nutzung der Fußmuskeln unerlässlich. In den ersten 4 Jahren des freien Laufens verringert sich die Kontaktfläche des Mittelfußbereiches im Schnitt um 9 %, während die restlichen Bereiche des Fußes an Fläche gewinnen [25]. Es wird vermutet, dass sich bei Kindern, die bis zum 10. Lebensjahr kein mediales Fußgewölbe entwickelt haben, dieses später auch nicht mehr natürlich entwickelt [26].

Von Geburt an ist das Femur physiologischerweise anterotiert, durchschnittlich bis zu 30°. Im Laufe des Wachstums vermindert sich diese Antetorsion auf ca. 15° als Adoleszenter und schließlich Erwachsener [27]. Aus der Antetorsion des Femurs folgt die Einwärtsdrehung der Femurkondylen sowie der Kniescheibe. Diese Innendrehung wird auch als „*kneeing in*“ bezeichnet [11]. Der Einwärtsgang wird vom Kleinkind durch eine Auswärtsdrehung der Füße kompensiert. Durch die kompensatorische Fuß-Außendrehung flacht das mediale Fußlängsgewölbe ab und es kommt zur Valgusstellung der Ferse. Im weiteren Wachstum kommt es dann durch die Außenrotationsstellung des Fußes wieder durch Derotation des Femurs und der Tibia zur Normalstellung, aufgrund dessen sich dann die Stellung des Fußes wieder neutralisiert [11].

1.4 Pes planovalgus

Beim Pes planovalgus handelt es sich um eine Außenrotationsfehlstellung des subtalaren Gelenkkomplexes mit einem Rückfußvalgus und einem abgeflachten Fußlängsgewölbe [4, 26]. Resultierend aus dieser Fehlstellung verringert sich die Aussparung der Belastungsfläche am medialen Fußrand [27]. Wird das Pfannenband längerfristig durch einen Verlust des Längsgewölbes gedehnt, kann dies auch zu einer Pes planovalgus-Deformität führen [23]. In vielen Fällen geht der Knick-Senkfuß mit einer Verkürzung der Wadenmuskulatur einher. Betroffen sind dabei meist in Kombination die M. soleus und M. gastrocnemius.

Der pädiatrische Pes planovalgus ist häufig asymptomatisch und die Mehrzahl der betroffenen Kinder bleiben es auch bis über das Adoleszentenalter hinaus. Ein Großteil der schmerzlosen flexiblen Knick-Senkfüße braucht keine Therapie [26].

1.5 Ätiologie und Differentialdiagnosen

Die Prävalenz des flexiblen kindlichen Knick-Senkfußes wird in unseren Breitengraden als < 1:1000 angenommen und ist damit eine häufige Krankheit [5, 27]. Ursächlich wird für den primären Knick-Senkfuß eine allgemeine Kapsel- und Bandlaxität sowie Muskelschwäche diskutiert, die durch eine vorliegende Adipositas noch zusätzlich verstärkt wird [28]. Zudem konnten Pfeiffer et al. zeigen, dass auch das Geschlecht einen Einfluss auf die Prävalenz des Plattfußes hat und dies bei Jungen häufiger diagnostiziert wird [28]. Darüber hinaus gibt es assoziierte Anomalien, die mit einer verstärkten Bandlaxität einhergehen, wie beispielsweise das Ehlers-Danlos-Syndrom, das Marfan-Syndrom oder die Trisomie 21 [29-32]. Da sich im Patientenkollektiv keine Patient:innen mit diesen Anomalien finden, soll in dieser Arbeit darauf nicht weiter eingegangen werden.

In Indien zeigten Rao und Joseph den Einfluss von Schuhen auf die Prävalenz von Plattfüßen [33]. Bei Kindern, die nie festes Schuhwerk trugen, fand sich eine Prävalenz von 2,8 % für die Entwicklung eines Knick-Senkfußes, wohingegen die Häufigkeit bei Kindern, die festes Schuhwerk trugen bei 8,6 % lag. Die Ausbildung eines

physiologischen Fußgewölbes scheint demnach durch das Tragen von festem Schuhwerk eingeschränkt zu sein [33].

Differentialdiagnostisch müssen unter anderem der kongenitale Plattfuß und der rigide Plattfuß in Betracht gezogen werden [34]. Außerdem gibt es den Knick-Plattfuß in Zusammenhang mit neuromuskulären Erkrankungen. Bei diesen findet sich häufig zusätzlich eine Verkürzung der Achillessehne. Weiterhin können eine Insuffizienz des M. tibialis posterior und die bereits o. g. Syndrome mit vermehrter Bandlaxität ursächlich für einen sekundären Knick-Senkfuß sein.

Den kontrakten Plattfüßen liegt häufig eine tarsale Koalition zugrunde [35, 36]. Diese ist in den meisten Fällen eine Coalitio talocalcaneare, bei der das Sprung- mit dem Fersenbein entweder fibrocartilaginös oder knöchern-überbaut verwachsen ist.

Der kongenitale Plattfuß ist durch eine bei Geburt bereits bestehende Valgisierung der Ferse, pronierten Vorfuß und fehlendes Längsgewölbe gekennzeichnet. Diese kommt durch die Steilstellung des Talus zustande und wird mittels Röntgenbildgebung nachgewiesen.

1.6 Anamnese und Diagnostik

1.6.1 Anamnese und klinische Diagnostik

In der Diagnostik ist, neben der ausführlichen Anamnese, eine detaillierte klinische Untersuchung wichtig zur Unterscheidung zwischen dem physiologischen, flexiblen und dem pathologischen, fixierten Plattfuß [4].

In der Anamnese sollte geklärt werden, ob es eine familiäre Häufung von Plattfüßen gibt, ob die Plattfüße des Kindes mit Schmerzen einhergehen oder ob es nach Belastung zur Ermüdung der Füße kommt. Auch sollten Kind und Eltern nach bisherigen Instabilitäten in den Gelenken, vor allem den Sprunggelenken, gefragt werden. Weiterhin müssen etwaige Vorerkrankungen wie neurologische Grunderkrankungen oder Syndrome, die mit einer vermehrten Bandlaxität einhergehen, besprochen werden.

Zu Beginn können sich durch Inspektion des Gangbildes erste Hinweise auf ein Hinken, das Abrollverhalten des Fußes oder Haltungsanomalien der Füße ergeben. Die weitere Inspektion kann die Valgisierung der Ferse, die Abflachung des medialen Fußgewölbes und die Hyperpronation des Vorfußes zeigen. Zur klinischen Untersuchung gehört die Feststellung des Bewegungsausmaßes des betroffenen Sprunggelenkes und die Palpation der Wadenmuskulatur im Hinblick auf eine mögliche Verkürzung sowie die Untersuchung der Bänder auf Laxität [4, 11].

Um die mögliche Aufrichtung des medialen Längsgewölbes zu testen, bedient man sich der Dorsalextension der Großzehe und dem Zehenspitzenstand wie anhand der Abbildung 2 gezeigt wird [4]. In beiden Fällen sollte sich medial ein Längsgewölbe abzeichnen [37].

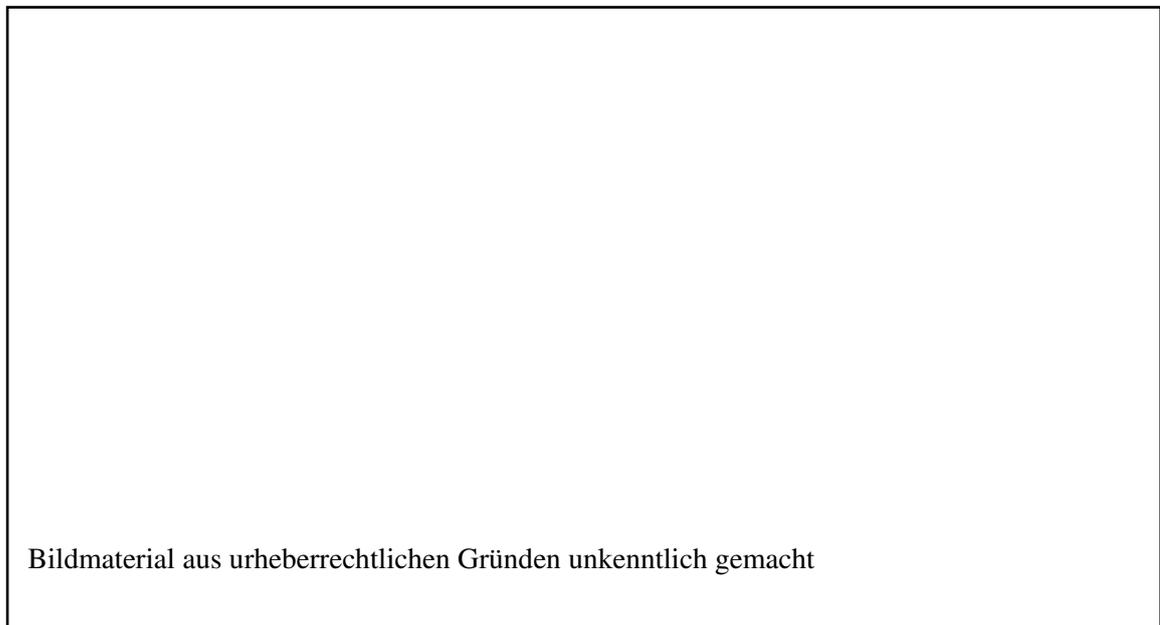


Abb. 2: Bilder flexibler Pes planovalgus beim Kind : a: laterale Darstellung Längsgewölbe, b: Fersenvalgus, c: Aufrichtung Längsgewölbe, d: Jack's Test, e: Aufrichtung Längsgewölbe durch Rotation; nach Genehmigung aus [4]

1.6.2 Bildgebende Diagnostik

In der frühen Kindheit ist eine radiologische Diagnostik bei beschwerdefreien flexiblen kindlichen Knick-Senkfüßen, die im Zehenspitzenstand das Längsgewölbe aufrichten, nicht indiziert, da die Verknöcherung des Fußes noch nicht annähernd abgeschlossen ist und der flexible kindliche Knick-Senkfuß bis zum ca. 6.–10. Lebensjahr spontan ausheilt. Nur bei symptomatischen Knick-Senkfüßen oder rigiden Plattfüßen sollte sich eine

radiologische Untersuchung mittels konventionellem Röntgen im Stand unter Belastung in lateralem (lat.) Strahlengang sowie einer anterior-posterioren (a. p.-) Aufnahme anschließen, um mögliche Fehlstellungen der Knochen darzustellen [26].

1.6.3 Radiologische Parameter

Für die Bestimmung der Achsverhältnisse ist es wichtig, sich an vorgegebene Referenzpunkte zu halten [38]. Als Voraussetzung dafür und für die Bestimmung von Winkelmaßen in Röntgenbildern gilt die standardisierte und reproduzierbare Aufnahme. Im Beidbein-Stand unter Belastung und bei entspanntem Muskeltonus aufgenommene Röntgenbilder dienen dazu, die Planovalgus-Deformität korrekt und in vollem Ausmaß darzustellen [39]. In der Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie des Universitätsklinikums Düsseldorf werden dabei standardisierte Röntgenaufnahmen nach Simons angefertigt [7].

1.6.4 Pedobarographische Untersuchung

Eine pedobarographische Untersuchung kann Aufschluss über die Abflachung des medialen Fußgewölbes geben. Diese stellt eine einfache Methode zur Objektivierung der Abflachung des Längsgewölbes und Darstellung der Belastungszonen des Fußes dar [40, 41].

1.7 Therapie

1.7.1 Therapieindikationen

Grundsätzlich wird die Indikation zu jedweder Therapie – sei diese konservativ oder operativ – gestellt, wenn ein Kind mit Plattfüßen mit Beschwerden wie Schmerzen, Gangauffälligkeiten, Ermüdungserscheinungen oder auffälliger Fußhaltung bei Orthopäd:innen vorgestellt wird. Anlass jeder Therapie ist die Vermeidung von

Spätfolgen und langfristigen Problemen sowie die Besserung der Beschwerdesymptomatik.

Beschwerden bei kindlichen flexiblen Knick-Senkfüßen äußern sich unter anderem durch „Müdigkeit“ der Fußmuskeln und die Angabe von Schmerzen. Diese treten meist im Bereich des Ansatzes der Sehne des M. tibialis posterior auf [21]. Dabei können die Schmerzen kontinuierlich oder intermittierend sein und sowohl in Ruhe auftreten oder belastungsabhängig sein [4].

Zunächst wird nach klinischer und gegebenenfalls radiologischer Untersuchung festgestellt, ob es sich um kindliche Knick-Senkfüße handelt, die sich bereits zu einem Plattfuß entwickeln, oder ob es sich bereits um Knick-Senkfüße handelt, bei denen eine Abflachung des Längsgewölbes festgestellt werden kann und bereits eine Verschiebung des Sprungbeinkopfes erfolgt ist [21]. Ist dies der Fall, kann zunächst mit konservativen Methoden versucht werden, die Entwicklung des Fußgewölbes positiv zu beeinflussen. Dazu gehören neben viel Barfußlaufen und Gymnastik auch krankengymnastische Beübungen [4]. Persistieren die oben genannten Beschwerden oder verschlechtern sich im Verlauf, wird die Indikation zur operativen Therapie bei symptomatischem flexiblen kindlichen Knick-Senkfuß gestellt [42]. Empfehlenswert ist hierbei, dass die Kinder nicht jünger als 6 Jahre und nicht älter als 13 Jahre sind [21]. Welche Therapieform die individuell Richtige für die Patient:innen ist, muss sorgfältig erwogen und nach dem klinischen und radiologischen Gesamtbild entschieden werden.

1.7.2 Konservative Therapie

Wird ein kindlicher flexibler Knick-Senkfuß festgestellt und sind Differentialdiagnosen ausgeschlossen, so kann bei milden Formen zunächst viel Barfußlaufen und spielerische Fußgymnastik, wie Zehenspitzengang, einem Plattfuß entgegenwirken. Auch eine regelmäßige Dehnung der Wadenmuskulatur kann zu einer Verbesserung führen. Mithilfe von Physiotherapie kann insbesondere die Muskulatur zur Stärkung des Längsgewölbes trainiert werden [4, 5, 11]. Als häufigste Therapie, vor allem bei sehr ausgeprägten Befunden, werden Schuheinlagen verschrieben. Diese sollen die Stellung des Fußes korrigieren, das Wachstum lenken und insbesondere bei Bandlaxität unterstützen [4]. Eine Studie von Wenger zeigte jedoch, dass sich kein signifikanter therapeutischer Effekt durch das Tragen von Einlagen erzielen ließ [43]. Zur Stabilisierung des Fußes können

zusätzlich Orthesen dienen, die neben der Stabilisierung des Fußes bei dynamischen Fußorthesen einen ausgleichenden Effekt auf den Tonus bewirken.

1.7.3 Operative Therapie des flexiblen kindlichen Knick-Senkfußes

Nur bei einem geringen Anteil der Kinder mit flexiblem Pes planovalgus ist eine Operation notwendig. Im Folgenden sind die unterschiedlichen operativen Möglichkeiten aufgeführt. Alle operativen Eingriffe zielen auf eine Wiederherstellung des Fußgewölbes und einen ausbalancierten Fuß und somit auf eine Funktionsverbesserung und Rezidivprophylaxe ab. Zur Erreichung der Operationsziele zeigen Döderlein et al. drei Säulen auf: die Korrektur der Deformität, die Stabilisation des Gelenkes und den Erhalt der Gelenkmobilität [44].

1.7.4 Weichteiloperationen des medialen Fußes

Zu den medialen Weichteiloperationen des Pes planovalgus gehören der Transfer der Sehne des M. tibialis anterior, die Verstärkung der M. tibialis posterior-Sehne mittels M. flexor digitorum longus-Sehne und Fixierung im Os naviculare, die Umschlingung des Os naviculare mit Anteilen der Sehne des M. tibialis anterior sowie die Pfannenbandraffung. Diese dienen der Wiederherstellung des Fußgewölbes. Heutzutage werden mediale Weichteiloperationen aufgrund der hohen Rezidivrate als Monotherapie nicht mehr eingesetzt und nur noch in Kombination mit knöchernen Eingriffen durchgeführt [13].

Die als Tenosuspension bezeichnete Versetzung der Sehne des M. tibialis anterior mittels Änderung des Sehnenverlaufs über eine künstliche Einkerbung im Os naviculare zur Aufrichtung des medialen Fußlängsgewölbes nach Young beschrieb De Pellegrin 2005 [12]. Ebenso wurde die Verlegung dieser Sehne von Lowman bereits 1923 beschrieben. Er versetzte die Sehne nach dorsal und umschlang dadurch das Os naviculare [45].

Weiterhin kann eine Versetzung des Ansatzes des M. tibialis posterior nach distal nach Giannestras erfolgen. Dies wurde häufig mit einer Raffung des Lig. calcaneonaviculare plantare kombiniert [44].

1.7.5 Calcaneusverlängerungsosteotomie nach Evans

Eine Methode, um die Valgisierung des Calcaneus zu korrigieren und eine Abkippung des Talus zu verringern, stellt die Calcaneusverlängerungsosteotomie dar. Diese Methode wurde zuerst von Evans im Jahre 1975 beschrieben [46]. Dazu wird ein Knochenspan von lateral in Höhe des Sinus tarsi in den osteotomierten Calcaneus eingebracht. Dabei ist zu beachten, dass der Knochenspan von lateral nach medial etwas schmaler wird, um neben der Verlängerung des Calcaneus zugleich eine Varisierung dessen zu bewirken [5, 46].

1.7.6 Extraartikuläre Arthrodesese nach Grice

Die extraartikuläre Arthrodesese nach Grice fand eine häufige Anwendung in der operativen Versorgung des Plattfußes, insbesondere bei der Behandlung des spastischen Knick-Senkfußes [12]. Dabei beschrieb Grice die Entnahme eines kortikospongiösen Knochenspans aus der Tibia, der nach Darstellung und Präparation des Sinus tarsi in diesen eingebracht wurde. Somit konnte eine Stabilisierung erreicht und eine Verkippung des Calcaneus verhindert werden [47]. Modifizierungen dieser Methode finden bis heute Anwendung [48].

1.7.7 Operatives Vorgehen bei der subtalaren Schraubenarthrorise

Die Arthrorise stellt eine sichere und effektive Methode in der Behandlung des flexiblen kindlichen Pes planovalgus dar [12, 49-51]. Dabei wird in der Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie des Universitätsklinikums Düsseldorf mittels folgender Operationstechnik operiert: Es erfolgt das Anlegen einer sterilen Oberschenkelblutleere bzw. -sperre mit einem, an die Patientenkonstitution angepassten, Druck. Anschließend erfolgt die circa 1–2 cm lange Hautinzision lateral am Fuß über dem Sinus tarsi. Danach erfolgt die Präparation des Fettpolsters im Sinus tarsi und, falls notwendig, Teilablösung des Ursprungs des Musculus extensor digitorum brevis [52]. Dabei ist die Erhaltung des sensiblen Hautnervenastes essenziell. Es wird der Calcaneus und der Processus lateralis

tali dargestellt und der Sinus tarsi exponiert [52]. Unter verstärkter Varisierung und Supination des Rückfußes wird nun ein Kirschner-Draht in kranio-kaudaler und dorso-ventraler Richtung in den Calcaneus unterhalb des lateralen Processus tali eingebracht und die Lage unter Bildwandlerkontrolle in 2 Ebenen kontrolliert. Bei korrekter Lage des Kirschner-Drahtes wird dieser mit einem kanülierten Bohrer überbohrt und mittels eines Längenmessgerätes die korrekte Schraubenlänge ermittelt. Es gilt zu beachten, dass die Implantatgröße entsprechend zur Fußgröße individuell ausgewählt wird, um eine normale Bewegungsfreiheit weiterhin zu gewährleisten und andererseits die Hypermobilität in der Articulatio subtalaris zu begrenzen [53]. Es wird eine entsprechende AO-Spongiosa-Schraube mit Kurzgewinde über den Kirschner-Draht eingeführt. Unter klinischer Kontrolle wird die Schraube nun so tief eingedreht, dass diese knapp die Gegenkortikalis erreicht und der Schraubenkopf in korrigierter Fußstellung exakt am Processus lateralis tali steht. Dies zeigt sich in der seitlichen Bildwandlerkontrolle dadurch, dass sich der Kopf der Schraube knapp auf Höhe des Processus lateralis tali befindet (siehe Abb. 3). Diese Schraubenlage soll eine Verschiebung des Talus verhindern. Der Kirschner-Draht wird entfernt und durch eine Röntgenkontrolle mit dem Bildwandler in zwei Ebenen die regelrechte Implantatlage dokumentiert. Ferner werden die OSG-Beweglichkeit und ein gutes Korrekturergebnis kontrolliert. Sollte der Calcaneus noch in Valgusstellung stehen, muss die Schraube ein wenig herausgedreht werden. Eine Varusstellung des Calcaneus wird durch entsprechend weiteren Eindrehens der Schraube korrigiert. Nach erneuter Kontrolle der Position wird der Schraubenkopf dann mit dem Fettpolster bedeckt und die Wunde schichtweise mittels einer Subcutan- und Hautnaht verschlossen.

Zeigt sich in der anschließenden klinischen Kontrolle durch Dorsalextension des Gelenks unter 5° in Rückfußkorrektur eine Verkürzung des M. triceps surae und/oder der Achillessehne, so schließt sich eine Verlängerung der Achillessehne mittels Z-Plastik oder Operation nach Strayer-Thom an [54]. Häufiger wird aber eine Verlängerung des M. gastrocnemius durch Faszienpaltung durchgeführt [55]. Sofern dies durchgeführt wurde, erfolgt postoperativ die Anlage eines Unterschenkeltherapiegipses.



Abb. 3: Röntgenbild nach Simons gewichtsbelastet im lateralen (links) und a. p. Strahlengang (mittig und rechts), vor und nach SSA (subtalarer Schraubenarthrorise) (Bestand Universitätsklinikum Düsseldorf, genehmigte Nutzung von Univ.-Prof. Dr. med. Antoch) [2]

1.7.8 Additive operative Therapien bei Spitzfuß-Komponente

Besteht die Pes-planovalgus-Deformität längerfristig oder sehr ausgeprägt, so kann sich eine Verkürzung der Wadenmuskulatur oder der Achillessehne mit dem Bild eines Spitzfußes manifestieren. Um die Spitzfußkomponente zu korrigieren, werden ergänzende operative Methoden wie die Operation nach Baumann, die Operation nach Strayer oder die Achillessehnenverlängerung genutzt.

Die Operation nach Baumann ist eine intramuskuläre Wadenmuskelverlängerung, bei der die Aponeurosen des M. gastrocnemius und des M. soleus eingeschnitten werden und dann der jeweilige Muskel gedehnt wird [56]. Bei dieser Technik wird die Kontinuität des Muskels bewahrt. Von Vorteil ist es, dass es nur zu einer vorübergehenden Schwächung der Muskelkraft kommt, nachteilig hingegen, dass eine hohe Rezidivgefahr besteht [57].

Bei der Operation nach Strayer-Thom handelt es sich um ein operatives Verfahren zur Behandlung der Spitzfußdeformität zum Beispiel bei infantiler Zerebralparese. In der Mehrzahl der Fälle liegt die Ursache des Spitzfußes in einer Erhöhung des Muskeltonus

der Wadenmuskulatur. Bei diesem Verfahren wird der M. gastrocnemius distal verlängert über eine Inzision ca. 3 cm proximal der Achillessehne. Nach Aufsuchen der V. saphena magna wird die Gastrocnemiusfaszie von der Soleusfaszie gelöst und die Gastrocnemiusfaszie möglichst distal durchtrennt. Es erfolgt die transversale Durchtrennung der Soleusfaszie mit anschließend z-förmiger Adaptation der Faszienblätter in Neutralnullstellung [54].

Die Achillessehnenverlängerung kann notwendig werden, wenn mittels Silfverskjöld-Testes eine Verkürzung der Achillessehne festgestellt wird [11, 58]. Dies ist der Fall, wenn sich bei sowohl flektiertem und auch extendiertem Knie eine eingeschränkte Dorsalextension des Fußes von kleiner 10° zeigt [11, 59]. In diesem Fall sind sowohl M. gastrocnemius als auch M. soleus verkürzt. Auch soll mittels Achillessehnenverlängerung ein verbesserter Bewegungsumfang im Sprunggelenk ermöglicht werden [60]. Die Verlängerung der Achillessehne kann perkutan mittels zwei oder drei Inzisionen erfolgen oder mittels Z-Plastik. Dabei erfolgt die z-förmige Inzision der Sehne mit anschließender Naht. Nachteilig bei der Verlängerung der Achillessehne ist der resultierende Kraftverlust durch veränderte Längenverhältnisse zwischen Sehne und Muskel [56].

1.8 Ziele der Arbeit

Der flexible Knick-Senkfuß ist eine der häufigsten Fußdeformitäten bei Kindern. Im Rahmen des Wachstums gehört der flexible Knick-Senkfuß zunächst zu der physiologischen Entwicklung des kindlichen Fußes und sollte sich im Alter von 8 bis 10 Jahren ausgewachsen und zu einer normalen Fußform entwickelt haben. Persistiert dieser oder führt die Fußdeformität vor einem Alter von ca. 10 Jahren zu Schmerzen, Hinken oder eingeschränkter Mobilität im Gelenk, so kann die Indikation zu einer Schraubenarthrorise gestellt werden [60]. Nach wie vor wird der optimale Operationszeitpunkt kontrovers diskutiert. Eines der Ziele dieser Arbeit ist die Herausarbeitung des günstigsten Alters zum Operationszeitpunkt mit langfristigem Therapieerfolg.

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der Aufrichtung des Fußlängsgewölbes nach subtalarer Schraubenarthrorise. Von besonderem Interesse ist der Vergleich des radiologischen Befundes anhand etablierter Winkelmaße unter Röntgen-Belastungsaufnahmen des betroffenen Fußes vor und nach Schraubenarthrorise. Dies soll mithilfe des Naviculocuboidalen Index, der die Rotation und Caudalisierung des Os naviculare als prädiktiven Faktor für die postoperative Aufrichtung des Längsgewölbes abbildet, geschehen. Es soll gezeigt werden, dass der Naviculocuboidale Index ein valides Maß für die, durch Arthrorise entstandene, Aufrichtung des Fußgewölbes ist und somit einen wertvollen Index zur Verlaufskontrolle darstellt.

2 Material und Methoden

Für die vorliegende retrospektive Studie wurden 80 pädiatrische Patient:innen mit insgesamt 149 flexiblen Plattfüßen untersucht. Teile dieser Arbeit wurden bereits veröffentlicht [1, 2].

2.1 Patientenrekrutierung

Die Rekrutierung der Patient:innen für die Studie wurde mittels computerbasierter Suche innerhalb einer Datenbank der Klinik für Orthopädie (heute Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie, Direktor Univ.-Prof. Dr. med. Windolf) des Universitätsklinikums Düsseldorf durchgeführt und ergab ein Kollektiv mit insgesamt 80 Patient:innen. Betrachtet wurden Fälle von August 2007 bis Dezember 2015. Das Vorliegen von präoperativen, postoperativen und Follow-up standardisierten Röntgenbildern wurde für jeden Fall überprüft.

2.2 Patientenakten

Die Daten der Patient:innen wurden aus den digitalen Akten entnommen, die in der Universitätsklinik Düsseldorf über das elektronische Datenbanksystem Medico (Cerner Health Services Deutschland) und das digitale Krankenhausarchiv Pegasos gespeichert werden. Aus diesen digitalen Akten ließen sich über digitalisierte stationäre Entlassbriefe und Ambulanzdokumentationen die Diagnosen inklusive Nebendiagnosen, Anamnesen und Untersuchungsergebnisse der jeweiligen klinischen präoperativen, postoperativen oder Follow-up-Untersuchungen entnehmen. Die Operationsberichte gaben Auskunft über das Operationsdatum, das Alter zum Operationszeitpunkt, die individuell verwendete AO-Schraube und gegebenenfalls additive Operationsverfahren.

2.3 Einschluss- und Ausschlusskriterien

Eingeschlossen wurden Patient:innen mit schmerzhaften flexiblen Knick-Senkfüßen im Alter vom 5. bis zum vollendeten 15. Lebensjahr. Weiterhin wurden nur Patient:innen eingeschlossen, die eine operative Versorgung mittels subtalarer Schraubenarthrorise erhalten hatten. Zudem mussten bei jeder Person die Routine-Röntgenbilder in zwei Ebenen mit voller Gewichtsbelastung im Stand im anterior-posterioren (a. p.) und lateralen Strahlengang vorliegen, welche präoperativ, postoperativ und als Follow-up-Kontrolle aufgenommen worden waren.

Ausgeschlossen wurden Patient:innen mit Grunderkrankungen wie infantiler spastischer bilateraler Cerebralparese, spastischer Hemiparese oder einer posttraumatischen spastischen Hemiparese. Auch Erkrankte mit Epilepsien oder psychomotorischen Retardierungen unklarer Genese sowie Zustand nach Traumata oder anderen Fußdeformitäten, beispielsweise rigiden Plattfüßen, wurden ausgeschlossen. Außerdem wurden voroperierte Patient:innen und diese, bei denen nicht alle erforderlichen Röntgenbilder, insbesondere nicht die Follow-up-Bilder vorlagen, ausgeschlossen. Extern aufgenommene präoperative Röntgenbilder wurden nicht ausgewertet und führten ebenfalls zum Ausschluss von der Studie.

2.4 Studienkollektiv

Von den initial 80 Patient:innen mit 149 flexiblen Plattfüßen für die Untersuchung zum optimalen Alter zum Operationszeitpunkt konnten nach Anwendung der Ein- und Ausschlusskriterien insgesamt 50 pädiatrische Patient:innen in die Studie eingeschlossen werden. Bei den 50 pädiatrischen Patient:innen fanden sich meist beidseitige Beschwerden, sodass sich eine Anzahl von 95 flexiblen Plattfüßen ergab.

Die Patient:innen wurden in 3 Altersgruppen unterteilt:

- Gruppe A: 5–8 Jahre
- Gruppe B: 9–12 Jahre
- Gruppe C: 13–15 Jahre

Der durchschnittliche Nachuntersuchungszeitpunkt beim Follow-up-Röntgen aller Patient:innen (Gruppe A, B und C) lag bei $35,8 \pm 16,6$ Monaten (13-79 Monate).

Von den 50 Patient:innen mit flexiblen Plattfüßen waren 16 (32 %) weiblich und 34 (68 %) männlich.

2.5 Altersverteilung zum Operationszeitpunkt

Das Alter der Kohorte zum Operationszeitpunkt lag zwischen 5,1 und 15,5 Jahren. Dabei betrug das mittlere Alter $11,7$ Jahre $\pm 2,0$ Jahre. 12 Prozent der Kinder waren zwischen 5 und 8 Jahre alt, 66 Prozent der Kohorte zwischen 9 und 12 Jahre alt und 22 Prozent der Kinder zwischen 13 und 15 Jahre alt.

2.6 Nebendiagnosen

Zu den Nebendiagnosen des Patientenkollektives gehörten die Verkürzung der Wadenmuskulatur oder die Verkürzung der Achillessehne mit konsekutivem Spitzfuß. In 32 Fällen wurde die subtalare Schraubenarthrorise um eine Operation nach Baumann und in einem Fall um eine Achillessehnenverlängerung ergänzt. Eine Operation nach Strayer-Thom erfolgte in zwei Fällen.

2.7 Prozess Diagnose- und Indikationsstellung

Sämtliche Kinder wurden in Begleitung ihrer Eltern in der Spezialsprechstunde der Ambulanz der damaligen Klinik für Orthopädie (heute Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie, Direktor Univ.-Prof. Dr. med. Windolf) vorstellig. Es erfolgte die klinische Untersuchung nach fachärztlichem Standard. Bei entsprechender Diagnose, hohem Leidensdruck bei Schmerzen oder hinkendem Gangbild und anhand der Auswertung von gewichtstragenden Röntgenbildern des Fußes wurde die Indikation zur Operation gestellt [61]. Daran schloss sich die Planung des stationären Aufenthaltes zur Operation an. Poststationär erfolgten die Kontrollen in der hiesigen Ambulanz.

2.8 Indikation für die subtalare Schraubenarthrorise

Um eine Indikation zu einer operativen Versorgung mittels subtalarer Schraubenarthrorise (*subtalar screw arthroereisis*, SSA) stellen zu können, muss zunächst die Diagnose des symptomatischen flexiblen kindlichen Plattfußes gestellt werden. Eine Indikation zur operativen Versorgung sollte erst gestellt werden, wenn konservative Methoden nicht ausreichend waren [37]. Ein führendes Kriterium zur Indikationsstellung sind persistierende Schmerzen, wie beispielsweise Schmerzen im Bereich des M. tibialis posterior Ansatzes mit Insuffizienzerscheinungen. Daneben wird auch ein durch Hinken eingeschränktes, pathologisches Gangbild als Kriterium in Betracht gezogen. Weiterhin wurde für die Indikationsstellung ein pathologischer Rückfußvalgus definiert. Darüber hinaus mussten mindestens ein oder mehr pathologische Winkelmaße in den gemessenen radiologischen Parametern der Röntgenbilder der folgenden Winkelmaße vorliegen: der Calcaneusneigungswinkel (CP), der laterale Talocalcaneare Winkel (lat. TCA) oder der anterior-posteriore Talocalcaneare Winkel (a. p. TCA, Winkel nach Kite), außerdem der Naviculocuboidale Index oder der Talo-Metatarsale-I-Winkel a. p. und lateral sowie der TMT-Index [2].

2.9 Schrauben

Bei dem in der Operation eingebrachten Schraubenmaterial handelt es sich um AO-Schrauben benannt nach der Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen (AO Foundation). Es wurden kanülierte Spongiaschrauben aus Stahl mit einem Kurzgewinde und einem Durchmesser von 7 mm benutzt. Die Länge der eingebrachten Schrauben wurde intraoperativ individuell mittels Längenmesslehre ermittelt und sollte kurz vor der Gegenkortikalis enden.

2.10 Klinische Untersuchung

Für Erkrankungen des Fußes ist eine systematische klinische Untersuchung essenziell [62]. Bei der Inspektion sind das abgeflachte Längsgewölbe sowie die mediale Mehrbeschwielung auffällig. Weiterhin wird die Beinachse beurteilt, die Auskunft über das Alignment von Hüfte, Knie und Sprunggelenk und insbesondere der Rückfußachse gibt [4, 62]. Eine Abweichung nach lateral von circa 7° zur Geraden ist ein Normalwert für die Rückfußachse. Bei einem Pes planovalgus ist dieser Winkel größer und die Ferse somit in Valgusstellung. Um beurteilen zu können, ob es sich um einen flexiblen Knick-Senkfuß handelt, bedient man sich dem „*single-heel-rise test*“ oder dem Jack's Test. Beim „*single-heel-rise-test*“ wird bei einem Fuß die Ferse beim Zehenspitzenstand angehoben und in dieser Position bildet sich das mediale Längsgewölbe aus. Bleibt die Varisierung der Ferse beim „*single-heel-rise-test*“ aus, so kann von einer Insuffizienz der Tibialis posterior-Sehne ausgegangen werden.

Bei der Beurteilung des Längsgewölbes wird die Ausprägung der Abflachung in drei Schweregrade eingeteilt, bei der, bei Grad 1 bereits eine Abflachung vorliegt, aber grundsätzlich noch ein Längsgewölbe erkennbar ist. Bei Grad 3 zeigt sich ein konvexer medialer Fußrand [4].

Dabei darf nicht außer Acht gelassen werden, dass sich das mediale Fußgewölbe erst mit dem Wachstum ausbildet. Dies geschieht meist bis zum 6. Lebensjahr.

Der Jack's Test beschreibt die Dorsalextension der Großzehe (s. Abb. 2d). Diese führt, ebenso wie die Rumpftorsion, über eine Verkürzung der Strukturen der Plantaraponeurose, im Fall eines flexiblen Knick-Senkfußes, zur Aufrichtung des medialen Längsgewölbes [62, 63].

Sind beim Blick von dorsal auf den Rückfuß fast alle Zehen lateral der Ferse zu sehen, so wird vom „*too-many-toe-sign*“ gesprochen [64, 65]. Dies geschieht infolge der veränderten Rückfußachse und Auswärtsdrehung des Vorfußes. Hierbei handelt es sich um ein weiteres Diagnostik-Kriterium für den Knick-Senkfuß.

Ein rigider Plattfuß lässt sich aktiv und passiv nicht aufrichten.

Es erfolgte präoperativ auch eine Untersuchung der Wadenmuskulatur und der Länge der Achillessehne. Bei einer – in Dorsalflexion des Sprunggelenks in einer 5° Rückfußkorrektur – festgestellten deutlich verkürzten Achillessehne wurde im Anschluss an die subtalare Schraubenarthrorise eine Operation nach Baumann, Strayer-Thom oder eine Z-Plastik der Achillessehne durchgeführt.

2.11 Radiologische Untersuchung

Die radiologische Untersuchung des symptomatischen flexiblen Knick-Senkfußes erfolgt ergänzend zur Beurteilung möglicher Ursachen. Dabei ist es von entscheidender Wichtigkeit, dass die Röntgenaufnahmen unter standardisierten Bedingungen aufgenommen werden, um die Reproduzierbarkeit der messbaren Winkel zu erhöhen und vergleichbar zu machen [66]. Dazu werden standardisierte Röntgenaufnahmen in zwei Ebenen im Stand nach Simons erstellt (siehe Abb.16 und Abb. 17) [7]. Diese wurden im Rahmen der präoperativen Diagnostik, zur Kontrolle des Operationsergebnisses postoperativ und im Verlauf der Follow-up-Untersuchung bei den Kindern, die in der Klinik für Orthopädie des Universitätsklinikums Düsseldorf im Zeitraum von 2007 bis 2015 mittels einer subtalaren Schraubenarthrorise behandelt wurden, durchgeführt.

Um die Qualität und Vergleichbarkeit der Messungen zu garantieren, wurden Röntgenbilder, die präoperativ extern aufgenommen wurden, nicht ausgewertet. Diese wurden von der Studie ausgeschlossen.

2.12 Röntgenuntersuchung nach Simons

Die an der Klinik für Orthopädie der Universitätsklinik Düsseldorf nach Simons aufgenommenen Röntgenbilder erfolgten in 2 Ebenen [67]. Dazu stehen die Patient:innen auf einem standardisierten Holzblock, in den eine Vertiefung für die Röntgenkassette eingelassen ist. Von großer Wichtigkeit ist hierbei, dass die Füße der Kinder richtig aufliegen und vollständig belastet sind. Auch muss der mediale Fußrand und die Großzehe unmittelbar an der Röntgenkassette anliegen. Die Röntgenröhre befindet sich in einem Abstand von 110 cm zum Mittelfuß und wird in anterior-posteriorem

Strahlengang mit einer Kippung bei kleinen Kindern bis zu einem Alter von 12 Jahren von 30° und bei Kindern > 12 Jahren mit einem Kippungswinkel von nur noch 20° eingestellt. Dies ist anatomisch begründet, um Talus und Calcaneus optimal darzustellen. Die benutzten Speicherfolien der Röntgenkassetten reagieren mit einer 400er-Empfindlichkeit auf Belichtung und reduzieren durch die hohe Empfindlichkeit die benötigte Strahlendosis. Dies trägt dazu bei, dass die nicht zu vermeidende Strahlendosis standardmäßig auf ein Minimum beschränkt wird. Sie ist im Wesentlichen von der Feldgröße, vereinfacht gesagt, von der Schuhgröße abhängig. Die reguläre Strahlendosis bewegt sich in einem Bereich um 52–55 kV und 1 mAs im lateralen Strahlengang und 2 mAs im anterior-posterioren Strahlengang bei Schulkindern. Bei größeren Kindern oder Erwachsenen werden ungefähre Werte von ca. 57 kV und 3 mAs im seitlichen Röntgenbild erreicht. Die Werte im anterior-posterioren Strahlengang entsprechen circa den Werten bei Schulkindern. Es erfolgte eine automatische Reduzierung der Strahlendosis je nach Alter und Körperkonstitution.

2.13 Auswertung der Röntgenbilder

Die Auswertung der Röntgenbilder erfolgte im Universitätsklinikum Düsseldorf mit dem zertifizierten radiologischen Bildgebungsarbeitsplatz Sectra Workstation IDS7 (Linköping, Schweden) mit dem *Picture Archiving and Communication System* (PACS) an einem Befundungsmonitor. Die digitalen Röntgenbilder wurden gesichtet und anschließend in pseudonymisierter und verblindeter Form zweimal ausgemessen und ausgewertet.

Die Messungen erfolgten durch zwei Untersucher. Es wurden Messtechniken und radiologische Landmarken festgelegt und von jedem Untersucher überprüft und angewendet.

2.14 Knochenalter

Angelehnt an die Knochenalter-Klassifikation nach Birkner wurden die gemessenen Winkel und Indizes erneut analysiert, um die Bedeutung des Einflusses des Knochenalters auf den radiologischen Outcome darzustellen [68].

2.15 Winkelmaße und Indizes

Zur Beurteilung der Pes planovalgus Deformität wurden die im Folgenden aufgeführten Winkel bestimmt:

2.15.1 Calcaneusneigungswinkel

Der Calcaneusneigungswinkel, auch Calcaneus-Boden-Winkel oder im Englischen *Calcaneal pitch* (CP) genannt, wird in der lateralen Projektion der Röntgenaufnahme im Stehen unter Belastung bestimmt. Dabei wird im Röntgenbild eine horizontale Linie auf der Auflagefläche gezogen (siehe Abb. 4) und mit einer Achse, die am Unterrand des Fersenbeins verläuft, verbunden. Der Winkelursprung ist der unterste Punkt des Fersenbeins. Die Normwerte dieses Winkels liegen bei Erwachsenen bei circa 20° – 30° und bei Kindern bei circa $17^{\circ} \pm 6^{\circ}$ [4, 69].

Winkel kleiner 20° gelten als niedrig und können Anhalt auf eine Pes-planovalgus-Deformität geben [70].



Abb. 4: *Calcaneusneigungswinkel* im lateralen Röntgenbild im Stand (Bestand Universitätsklinikum Düsseldorf, genehmigte Nutzung von Univ.-Prof. Dr. med. Antoch)

2.15.2 Talocalcaneärer Winkel anterior-posterior nach Kite

In der anterior-posterioren gewichtsbelasteten Röntgenaufnahme im Stand kann der Talocalcaneare Winkel oder im Englischen *Talocalcaneal angle a. p.* (TCA a. p.) erfasst werden. Hierbei werden je eine Gerade entlang der mittleren Taluslängsachse und eine Gerade entlang der mittleren Calcaneusachse gelegt (siehe Abb. 5). Die Normwerte für diesen Winkel liegen zwischen 30° – 50° [4, 71]. Ein vergrößerter Winkel bedeutet eine vermehrte Valgisierung des Rückfußes [72]. Der Talocalcaneare Winkel in a. p. wird auch Winkel nach Kite genannt [17].



Abb. 5: *Talocalcaneärer Winkel* in a. p. im Stand (Bestand Universitätsklinikum Düsseldorf, genehmigte Nutzung von Univ.-Prof. Dr. med. Antoch)

2.15.3 Talocalcaneärer Winkel lateral

Normwerte des lateralen Talocalcanearen Winkels liegen bei circa 40° bzw. zwischen 25° – 55° [73]. Der Winkel wird aus der mittleren Längsachse des Talus und der Tangente

am Unterrand des Calcaneus gebildet und beschreibt den Rückfußvalgus (siehe Abb. 6). Je größer dieser Winkel, umso größer ist der Grad der Rückfußabduktion und des Valgus [61].

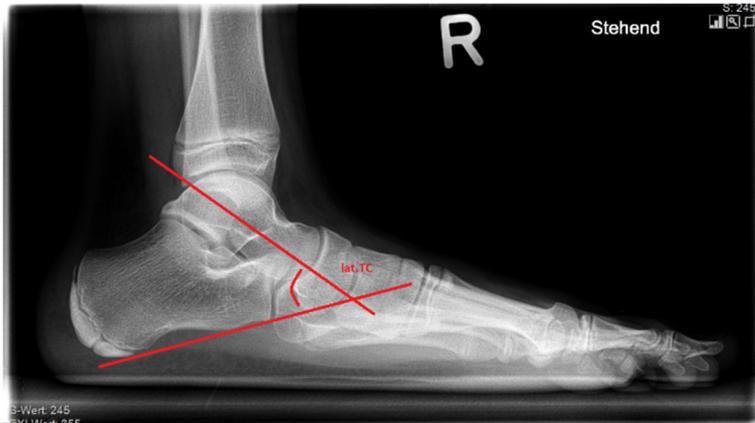


Abb. 6: **lateraler Talocalcaneärer Winkel** (lat.TC = lateraler Talocalcaneärer Winkel): im seitlichen Röntgenbild im Stand (Bestand Universitätsklinikum Düsseldorf, genehmigte Nutzung von Univ.-Prof. Dr. med. Antoch)

2.15.4 Talo-Metatarsale-I-Winkel in a. p.

Im a. p.-Röntgenbild wird für den Talo-Metatarsale-I-Winkel die mittlere Längsachse des Metatarsale I und die Längsachse des Talus erfasst (siehe Abb. 7) [74]. Nach Hamel und Kinast wird die Längsachse des Talus durch Parallelverschiebung als Linie entlang der gut erkennbaren medialen Talusbegrenzung bestimmt [39]. Winkel, die nach dorsal in a. p. bzw. nach medial im seitlichen Bild hin offen sind, werden mit negativen Gradzahlen beschrieben und kennzeichnen eine Adduktion des Vorfußes [75]. Mittels des Talo-Metatarsale-I-Winkels wird das talonaviculäre Alignment dargestellt [76]. Normwerte für den Talo-Metatarsale-I-Winkel werden in der Literatur mit 0° bis -20° angegeben [61, 77].

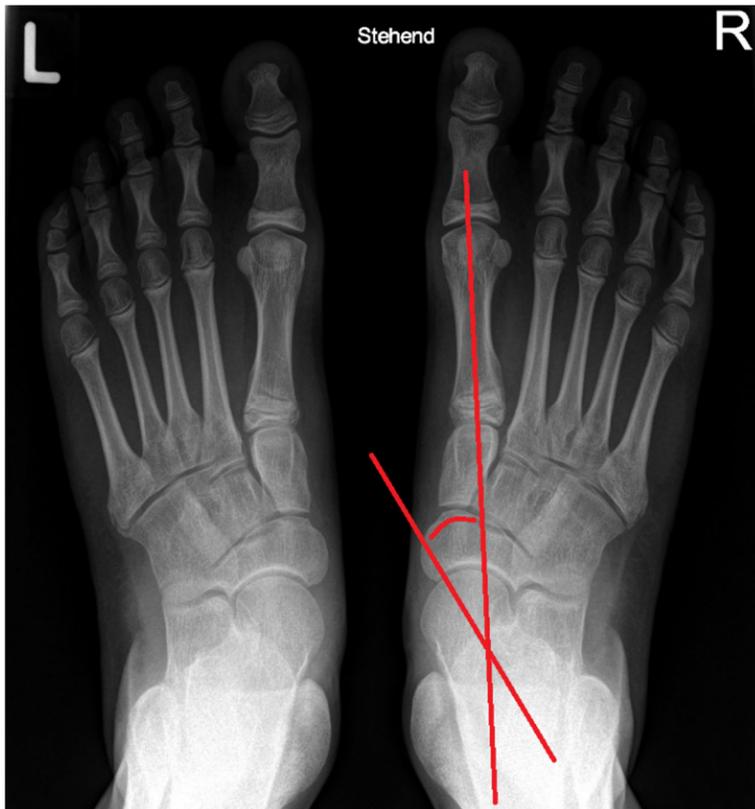


Abb. 7: Talo-Metatarsale-I-Winkel im anterior-posterioren Strahlengang (Bestand Universitätsklinikum Düsseldorf, genehmigte Nutzung von Univ.-Prof. Dr. med. Antoch)

2.15.5 Talo-Metatarsale-I-Winkel lateral nach Meary

Zur Bestimmung des lateralen Talo-Metatarsale-I-Winkels, auch Meary Winkel genannt, wird zunächst die Mittelachse des Talus genommen. Hier ist es hilfreich, die Achse über zwei verschiedene Messpunkte zu bestimmen. Es wird die Gesamtbreite des Talus in Höhe des Talushalses und zu Beginn der Konvexität des Taluskopfes bestimmt, davon jeweils die Mitte eruiert und nun eine Gerade durch diese beiden Punkte gelegt. Anschließend wird mittels zweier Messpunkte und deren Mittelpunkten die Mittelachse des Metatarsale-I bestimmt. Der sich aus den schneidenden Geraden ergebende Winkel wird als lateraler Talo-Metatarsal-I-Winkel bezeichnet (siehe Abb. 8).

Der laterale Talo-Metatarsal-I-Winkel lässt sich in der Regel gut bestimmen und zeigt deutlich die Plantarflexion des Talus sowie die Abflachung des medialen Längsgewölbes. Je flacher das Längsgewölbe, umso größer wird der laterale TMT-I-Winkel. Im gesunden Fuß ist der TMT-I-Winkel eine gerade Linie und entspricht somit 0° . In der Literatur

werden Werte um 0° , beziehungsweise zwischen -4° und $+4^\circ$ angegeben, wobei Werte bei Kindern zwischen 10° – 18° betragen können [37, 77].

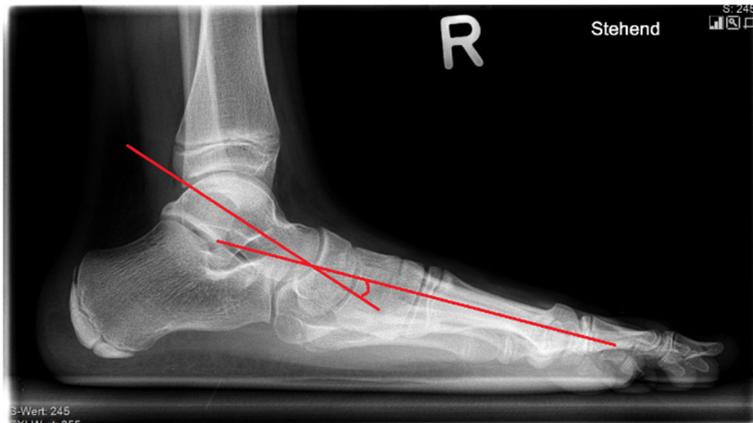


Abb. 8: Talo-Metatarsale-I-Winkel (Meary-Winkel) im lateralen Strahlengang (Bestand Universitätsklinikum Düsseldorf, genehmigte Nutzung von Univ.-Prof. Dr. med. Antoch)

2.15.6 Talo-Metatarsal-Index (TMT-Index)

Mit dem Talo-Metatarsal-Index werden die Plantarflexion des Sprungbeins durch die Eversion des Rückfußes sowie die Destabilisierung der drei tarsometatarsalen Gelenke (talometatarsal, talonavicular, naviculocuneiform) in sagittaler Ebene gleichzeitig erfasst [39]. Der TMT-Index setzt sich zusammen aus dem Talo-Metatarsale-I-Winkel im lateralen Röntgenbild und dem Winkel von Talus und Metatarsale-I-Basis im anterior-posterioren Röntgenbild. Diese werden summiert [39, 49]. Eine Zusammenfassung der Winkel durch Summation zu einem Index ist möglich, da beide Winkel ähnliche Normalwerte aufweisen [39]. Diese Normalwerte variieren je nach Autor geringfügig.

2.15.7 Naviculocuboidaler Index (NCI)

Der Naviculocuboidale Index oder auch die Naviculocuboidale Überlappung, im Englischen *Naviculocuboid overlap*, beschreibt die relative Überlappung des Os naviculare und des Os cuboideum in der lateralen gewichtsbelasteten Röntgenaufnahme des Fußes (siehe Abb. 9). Dabei wird der Quotient aus der Messung der Strecke zwischen dem Oberrand des Os cuboideum und dem unteren überlappenden Rand des Os

naviculare mit der Höhe des Os cuboideum gebildet [74]. Dieser Index wird in Prozent ausgedrückt und genutzt, um das Alignment des Mittelfußes zu beschreiben. Davids et al. veröffentlichte 2005 einen Mittelwert von $47\% \pm 13,8\%$ für die Naviculocuboidale Überlappung [61].

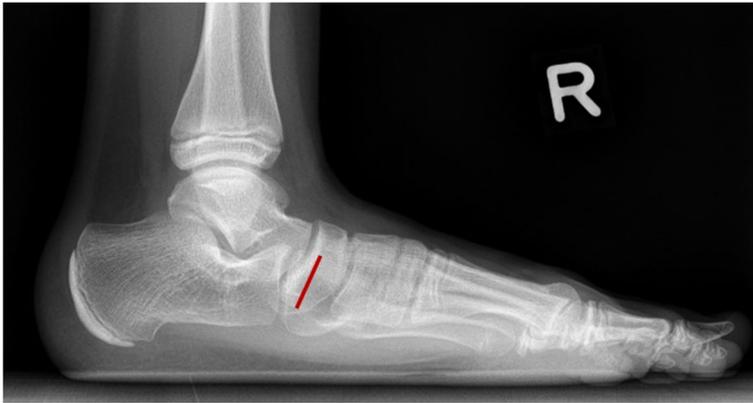


Abb. 9: **Naviculocuboidaler Index** im lateralen Strahlengang (Bestand Universitätsklinikum Düsseldorf, genehmigte Nutzung von Univ.-Prof. Dr. med. Antoch)

2.16 Statistik

Die erhobenen, pseudonymisierten Daten wurden mittels Microsoft Excel gespeichert. Anschließend wurden alle statistischen Analysen der Daten mithilfe von IBM SPSS Statistics Version 25 (SPSS, Chicago, IL, USA) durchgeführt.

Die Analyse der Daten erfolgte nach Prüfung auf Normalverteilung mittels Kolmogorov-Smirnov-Tests (KS) für das Gesamtkollektiv und ergänzend mittels Shapiro-Wilk für die Altersgruppen. Für die intervallskalierten Variablen wurden jeweils Mittelwerte und Standardabweichungen (SD) berechnet. Die statistische Signifikanz der verschiedenen Parameter wurde mit ungepaarten T-Tests miteinander verglichen.

Das Signifikanzniveau wurde auf $p < 0,05$ festgelegt und mit * markiert. Höhere Signifikanzniveaus wurden wie folgt gekennzeichnet: ** = $\leq 0,001$ und *** = $\leq 0,0001$. Analog dazu wurden die Signifikanzniveaus im Vergleich postoperativ zu Follow-up folgendermaßen mit # = $\leq 0,05$ und ## = $\leq 0,001$ gekennzeichnet.

2.17 Ethikvotum

Die Studie wurde von der Ethikkommission der medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf geprüft und durch ein positives Ethikvotum (Studiennummer: 5571) zugelassen.

3 Ergebnisse

3.1 Gesamtkollektiv

In dieser Arbeit wurden Patient:innen mit einem kindlichen Knick-Senkfuß und konsekutiver subtalarer Schraubenarthrorise untersucht. Teile dieser Arbeit wurden bereits veröffentlicht [1, 2]. Alle Kinder stellten sich mit persistierenden Schmerzen der Füße in der Fußsprechstunde der Ambulanz der damaligen Klinik für Orthopädie (heute Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie) des Universitätsklinikums Düsseldorf vor. In der Zeit von August 2007 bis Dezember 2015 wurden 80 Patient:innen mit 149 Plattfüßen mit einer subtalaren Schraubenarthrorise versorgt.

Abbildung 10 stellt das Flussdiagramm zur Patientenselektion dar, nach dem die untersuchten Patient:innen in drei Alterskategorien des Alters zum Operationszeitpunkt eingeteilt wurden, die der Literatur nach [6, 51] unterschiedlich gute Ergebnisse erzielten. Die erste Gruppe stellten die 5- bis 8-jährigen Patient:innen dar. Als zweite Gruppe wurden die 9–12 Jahre alten Kinder eingeteilt und somit gehörten die Kinder im Alter von 13–15 Jahren zur dritten Gruppe. Insgesamt 30 Patient:innen wurden ausgeschlossen. Gründe hierfür waren neurologisch bedingt oder durch eine neurologische Grunderkrankung bedingte Fußdeformitäten ebenso wie rigide Plattfüße. Außerdem wurden bereits voroperierte Füße in dieser Arbeit ausgeschlossen. Zusätzlich mussten auch Patient:innen mit unvollständigen Röntgenbildern ausgeschlossen werden.

Das mittlere Alter der 50 Kinder in dieser Studie zum Operationszeitpunkt lag bei $11,7 \pm 2,0$ Jahren. Die Altersspanne vom jüngsten zum ältesten Kind betrug 10,4 Jahre. Davon waren 16 Kinder (32 %) weiblich und 34 Kinder (68 %) männlich. Aus den 50 eingeschlossenen Fällen ergaben sich 95 Füße, die untersucht wurden. Für jeden Fuß wurden alle radiologischen Winkel-Messungen durchgeführt. Bei 45 Kindern wurde bilateral operiert (siehe Abb. 11).

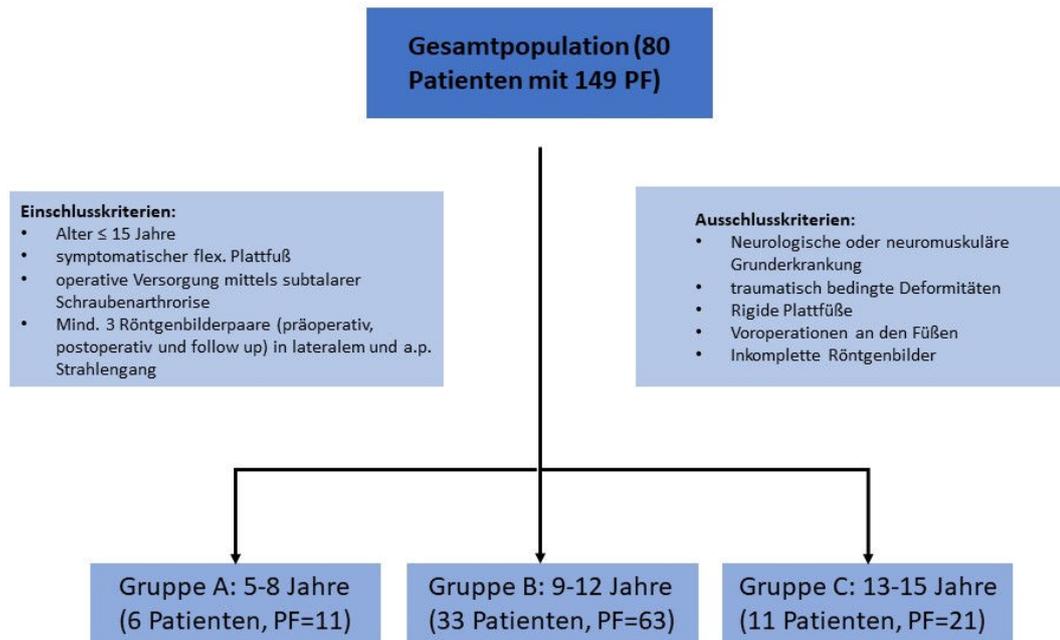


Abb. 10: Flussdiagramm Patientenselektion (PF, Plattfüße)

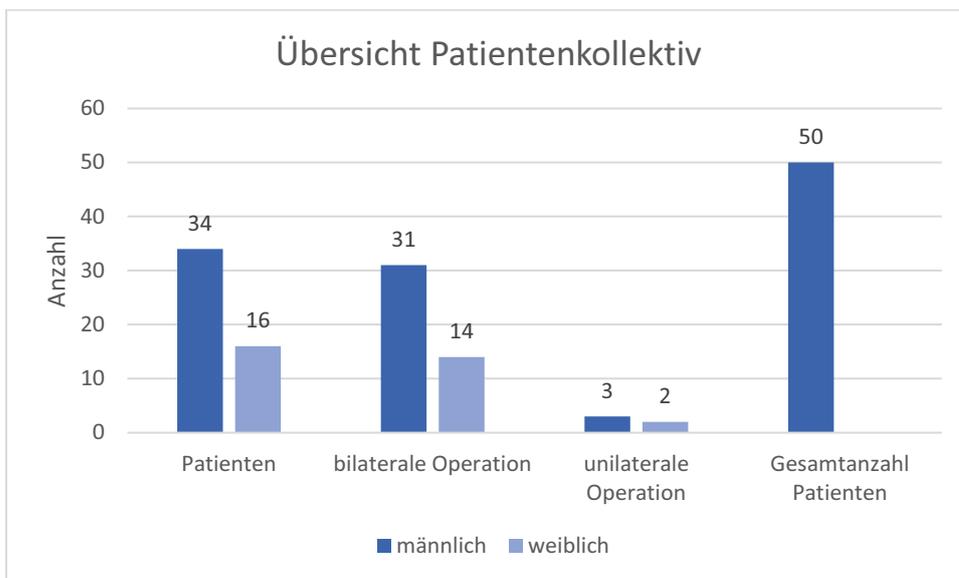


Abb. 11: Übersicht Patientenkollektiv

Die ermittelten Mittelwerte mit Standarddeviationen der gemessenen Winkel der präoperativen, postoperativen und Follow-up-Röntgenbilder finden sich für das Gesamtkollektiv in Tabelle 1.

Für das Gesamtkollektiv zeigte sich für den Calcaneusneigungswinkel im Mittel präoperativ ein Wert von $11,9^\circ \pm 4,3^\circ$, der sich zu postoperativ auf durchschnittlich

12,5° ± 4,5° geringfügig verbesserte (siehe Abb. 12). Im Vergleich der präoperativen Messung zur Follow-up-Messung besserte sich der Calcaneusneigungswinkel auf den Mittelwert 13,5° ± 5,2° (t(93) = 4,74; p < 0,001; d = 0,49). Die Daten des Calcaneusneigungswinkel im Follow-up im Gesamtkollektiv zeigten sich mit KS(94) = 0,11; p = 0,004 nicht normalverteilt und sind deshalb nur eingeschränkt zu betrachten.

Abbildung 12 zeigt, dass sich der Talocalcaneare Winkel in der a. p.-Projektion in der Gesamtpopulation verglichen zwischen prä- und postoperativem Zeitpunkt (t(84) = 3,44; p < 0,001; d = 0,37) und zwischen präoperativem Zeitpunkt und Follow-up (t(88) = 3,88; p = 0,008; d = 0,41) verringerte. Ebenso verhielt sich der laterale Talocalcaneare Winkel in der präoperativen und postoperativen Messung (siehe Abb. 12). Hier verringerte sich der präoperativ gemessene laterale Talocalcaneare Winkel im Vergleich zu postoperativ im Mittelwert um 3,7° (t(94) = 5,75; p < 0,001; d = 0,59). Die Messung des lateralen Talocalcanearen Winkel zum Follow-up-Zeitpunkt zeigte eine erneute Verschlechterung verglichen mit dem postoperativen Wert. Auch der Vergleich des präoperativ gemessenen Wertes zum Follow-up gemessenen Wert ergab mit p = 0,128 keinen signifikanten Unterschied.

Hinsichtlich des lateralen Talo-Metatarsale-I-Winkels (Meary Winkel) zeigte sich, wie in Abbildung 12 zu sehen, für alle 50 Patient:innen des Gesamtkollektivs im präoperativen zum postoperativen Vergleich eine Verbesserung vom Mittelwert von 19,1° ± 8,7° zu 13,3° ± 6,8° (t(94) = 7,56; p < 0,001; d = 0,76). Auch die präoperative Messung zur Follow-up-Messung verglichen konnte noch eine Verbesserung, das heißt eine Reduktion des Meary Winkel um 5°, nachweisen. Auch hier ist auf die eingeschränkte Vergleichbarkeit der Werte des Meary Winkels zum Follow-up-Zeitpunkt hinzuweisen bei KS(94) = 0,11; p = 0,005. Festzustellen war anschließend eine Verschlechterung des postoperativen Ergebnisses verglichen mit der Follow-up-Kontrolle. So zeigte sich hier ein Korrekturverlust dieses Winkels von postoperativ 13,3° ± 6,8° zum Follow-up von 14,1° ± 7,6° (p < 0,001). Abbildung 12 zeigt die Messung des Talo-Metatarsale-I-Winkels in der anterior-posterioren Projektion, die präoperativ durchschnittlich -14,2° ± 8,8° ergab, postoperativ im Durchschnitt bei -8,9° ± 7,4° (p < 0,001) und im Follow-up bei durchschnittlich -9,7° ± 7,2° (p < 0,001) lag. Für die Werte postoperativ und im Follow-up ergaben sich nicht normalverteilte Werte im Gesamtkollektiv KS(83) = 0,17; p = 0,001 und KS(83) = 0,10; p = 0,032.

Die statistische Auswertung des Naviculocuboidalen Index zeigte einen signifikanten Rückgang der prozentualen Überlappung von Os naviculare und Os cuboideum mit Mittelwerten von präoperativ $45,2 \% \pm 15,6 \%$ und postoperativ $24,3 \% \pm 12,3 \%$ ($t(94) = 12,76$; $p < 0,001$; $d = 1,31$) (siehe Abb.15). Auch im Vergleich zwischen präoperativer Messung und Follow-up-Messung verbesserten sich die Mittelwerte für das Gesamtkollektiv signifikant von präoperativ $45,2 \% \pm 15,6 \%$ auf Follow-up $24,1 \% \pm 12,7 \%$ ($t(93) = 12,70$; $p < 0,001$; $d = 1,31$).

Der TMT-Index für das Gesamtkollektiv ergab in der präoperativen Messung im Mittel $-33,0^\circ \pm 13,5^\circ$. Die Messung des TMT-Index zum postoperativen Kontrollzeitpunkt ergab $-21,7^\circ \pm 9,8^\circ$ und im Follow-up ergab sich ein Mittelwert von $-23,5^\circ \pm 10,6^\circ$ (siehe Abb.16). Bei fehlender Normalverteilung des TMT-Index postoperativ und im Follow-up für das Gesamtkollektiv mit $KS(89) = 0,18$; $p = 0,001$ (postoperativ) und $KS(93) = 0,10$; $p = 0,019$ (Follow-up) erfolgte keine weitere Betrachtung dieses Index für das Gesamtkollektiv.

Bei keinem der in dieser Studie untersuchten Kinder wurden bis zur letzten Follow-up-Kontrolle Komplikationen wie Wundheilungsstörungen, postoperative Schmerzen, Implantatversagen beziehungsweise Implantatbruch oder Frakturen festgestellt.

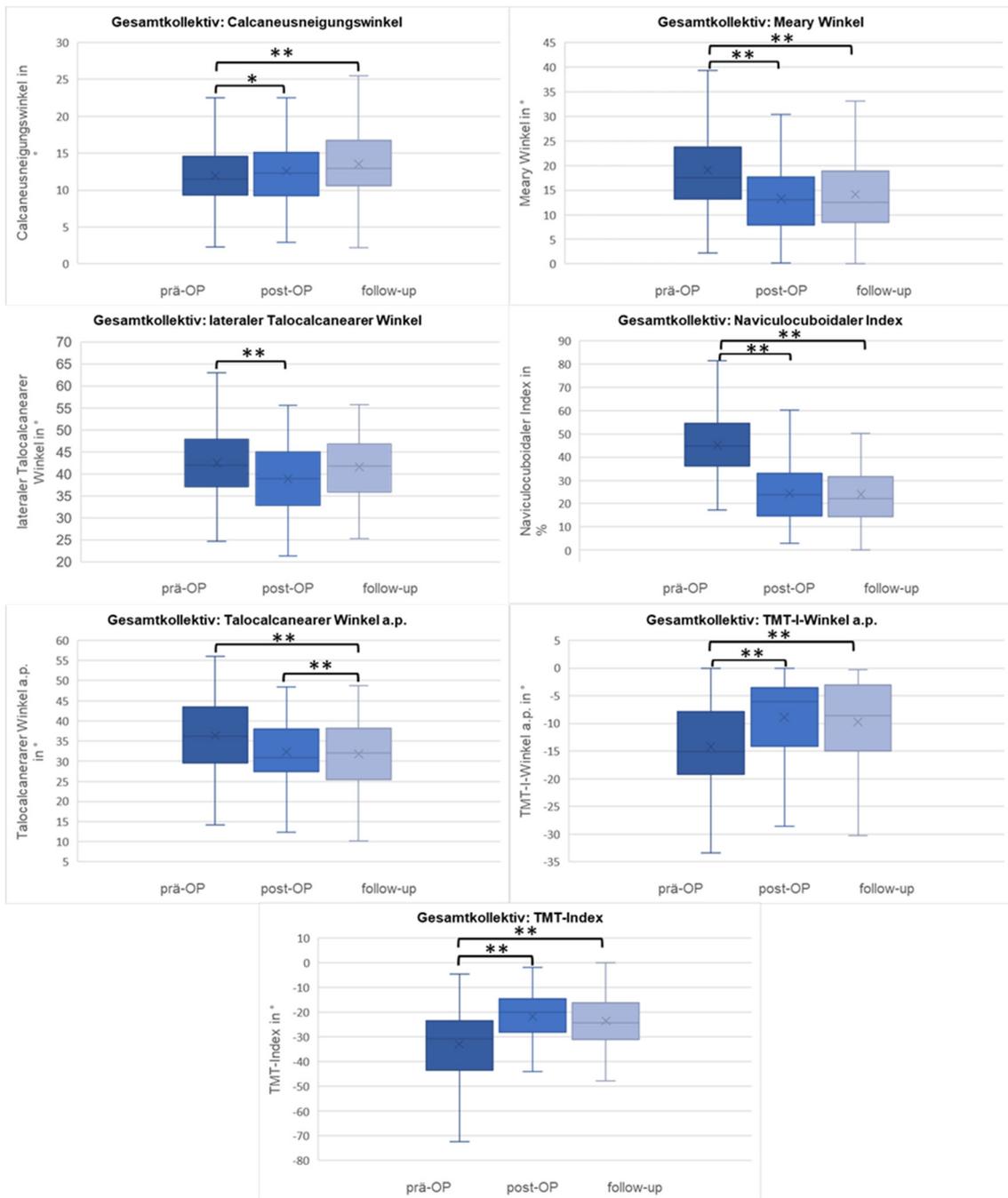


Abb. 12: **Ergebnisse Gesamtkollektiv** Calcaneusneigungswinkel in °, Meary Winkel in °, TMT-I-Winkel a. p., lateraler Talocalcaneärer Winkel in °, Talocalcaneärer Winkel a. p., TMT-Index in °, Naviculocuboidaler Index in Prozent; Zeitpunkte präoperativ, postoperativ und Follow-up; Signifikanzniveaus: $p \leq 0,05$ mit * markiert. Höhere Signifikanzniveaus wurden wie folgt gekennzeichnet: ** = $\leq 0,001$ und *** = $\leq 0,0001$.

Gesamt-kollektiv	Winkel / Indices	Prä-op	Post-op	Follow-up
	CP	11,9 ± 4,3	12,6 ± 4,5*	13,5 ± 5,2**
	lat. TC	42,5 ± 8,1	38,8 ± 7,4**	41,6 ± 7,4
	a.p. TC	36,3 ± 9,3	32,3 ± 8,8**	31,8 ± 9,0**
	NCI	45,2 ± 15,6	24,3 ± 12,3**	24,1 ± 12,7**
	Meary	19,1 ± 8,7	13,3 ± 6,8**	14,1 ± 7,6**
	TMT-I a.p.	-14,2 ± 8,8	-8,9 ± 7,4 **	-9,7 ± 7,2 **
	TMT-Index	-33,0 ± 13,5	-21,7 ± 9,8**	-23,5 ± 10,6**

Tabelle 1: Übersicht Mittelwerte Gesamtkollektiv mit Standardabweichung der bestimmten Winkel und Indices zu den Zeitpunkten präoperativ, postoperativ und Follow-up; Winkel und TMT-Index in ° und NC-Index in Prozent, Signifikanzniveaus: * = $\leq 0,05$, ** = $\leq 0,001$

3.2 Ergebnisse Gruppe A (5–8 Jahre)

In Gruppe A wurden die Kinder mit einem Alter von 5–8 Jahren zum Operationszeitpunkt eingeteilt, entsprechend einem Anteil dieser Gruppe von 12 % an der Gesamtpopulation. Insgesamt wurden in dieser Gruppe 6 Patient:innen mit 11 flexiblen Plattfüßen untersucht. Davon wurde bei 5 Kindern beidseitig eine operative Versorgung mittels subtalarer Schraubenarthrorise durchgeführt. Zusätzlich wurde die Arthrorise-Operation bei 72,7 % der Fälle (n = 8) aufgrund einer Spitzfuß-Deformität in 7 Fällen durch eine Operation nach Baumann und bei einem Fall durch eine Achillessehnenverlängerung ergänzt. Das mittlere Alter zum Operationszeitpunkt betrug $7,4 \pm 1,2$ Jahre.

Im Mittel lag der Zeitraum bis zur ersten postoperativen Kontrolle bei $8,5 \pm 7,1$ Monaten (Zeitspanne 1–19 Monate). Die Follow-up-Röntgenaufnahme wurde im Durchschnitt nach $38,5 \pm 17,0$ Monaten angefertigt, hier lag die Zeitspanne zwischen 15–62 Monaten.

Wie in Tabelle 2 zu sehen ist, ergab die Messung des Calcaneusneigungswinkel sowohl in der postoperativen als auch in der Follow-up-Röntgenaufnahme eine diskrete Zunahme des Winkels, jedoch keine signifikante Veränderung ($p = 0,174$ und $p = 0,095$). Auch fehlte die signifikante Besserung des lateralen Talocalcanearen Winkels zu beiden Zeitpunkten. Dieser maß präoperativ durchschnittlich $37,2^\circ \pm 7,9^\circ$ und veränderte sich postoperativ im Durchschnitt zu $34,9^\circ \pm 7,7^\circ$ ($p = 0,304$). Im Follow-up lag dieser bei durchschnittlich $37,3^\circ \pm 5,6^\circ$ ($p = 0,923$). Auch der Meary Winkel veränderte sich zu

beiden Kontroll-Zeitpunkten nur gering von postoperativ $13,1^\circ \pm 6,9^\circ$ ($p = 0,072$) auf $15,4^\circ \pm 8,1^\circ$ ($p = 0,079$) im Follow-up.

Divergente Ergebnisse erbrachte der Naviculocuboidale Index, der sich zunächst im präoperativen zum postoperativen Vergleich ($t(10) = 2,59$; $p = 0,027$; $d = 0,78$) besserte und eine geringere Überlappung aufwies. So fand sich für den Naviculocuboidalen Index eine um circa die Hälfte reduzierte Überlappung von im Mittel $40,0\% \pm 24,2\%$ auf $20,4\% \pm 12,3\%$ ($t(10) = 2,59$; $p = 0,027$; $d = 0,78$) von präoperativ auf postoperativ. Ein Vergleich der postoperativen zur Follow-up-Messung ergab jedoch wieder eine Verschlechterung des Korrekturergebnisses ($t(10) = 3,16$; $p = 0,010$; $d = 0,96$), also eine verstärkte Überlappung um durchschnittlich $8,3\%$, sodass insgesamt keine langfristige Verbesserung des Index zu beobachten war. Hingegen zeigte der a. p.-Talocalcaneare Winkel im präoperativen zum postoperativen Vergleich signifikante Verbesserungen bei $t(10) = 2,79$; $p = 0,019$; $d = 0,84$. Hier verringerte sich der Talocalcaneare Winkel in anterior-posteriorer Projektion von im Mittel $38,7^\circ \pm 10,5^\circ$ auf $30,8^\circ \pm 7,0^\circ$. Auch hinsichtlich des Vergleichs vom präoperativen Zeitpunkt zur Follow-up-Röntgenkontrolle (siehe Tabelle 2 [2]) des a. p.-Talocalcanearen Winkels zeigte sich eine signifikante Besserung ($t(10) = 3,03$; $p = 0,013$; $d = 0,91$) [2].

Wie Abbildung 13 veranschaulicht, ergab die Messung des Talometatarsale-1-Winkels in anterior-posteriorer Projektion eine Verbesserung nach Arthrorise mit einer Verringerung des Winkels von im Mittel $12,6^\circ \pm 9,6^\circ$ auf $6,9^\circ \pm 5,2^\circ$ präoperativ zu postoperativ ($t(10) = 2,76$; $p = 0,02$; $d = 0,83$). Im Vergleich vom postoperativ gemessenen Winkel zur Follow-up-Röntgenkontrolle fand sich kein signifikanter Unterschied zwischen den Werten ($p = 0,391$), sodass das Korrekturergebnis nahezu gleich blieb.

Der berechnete Talometatarsal-Index (TMT-Index) für die Altersgruppe der 5- bis 8-Jährigen ergab präoperativ im Mittel $-31,4^\circ \pm 17,0^\circ$ und verbesserte sich auf postoperativ gemessen $-20,0^\circ \pm 8,8^\circ$ ($t(10) = 2,67$; $p = 0,024$; $d = 0,80$). Im Vergleich vom postoperativen Zeitpunkt zum Follow-up-Zeitpunkt konnte kein signifikanter Unterschied ($p = 0,191$) gefunden werden. Hier zeigte sich ein Mittelwert von $-23,9^\circ \pm 8,7^\circ$.

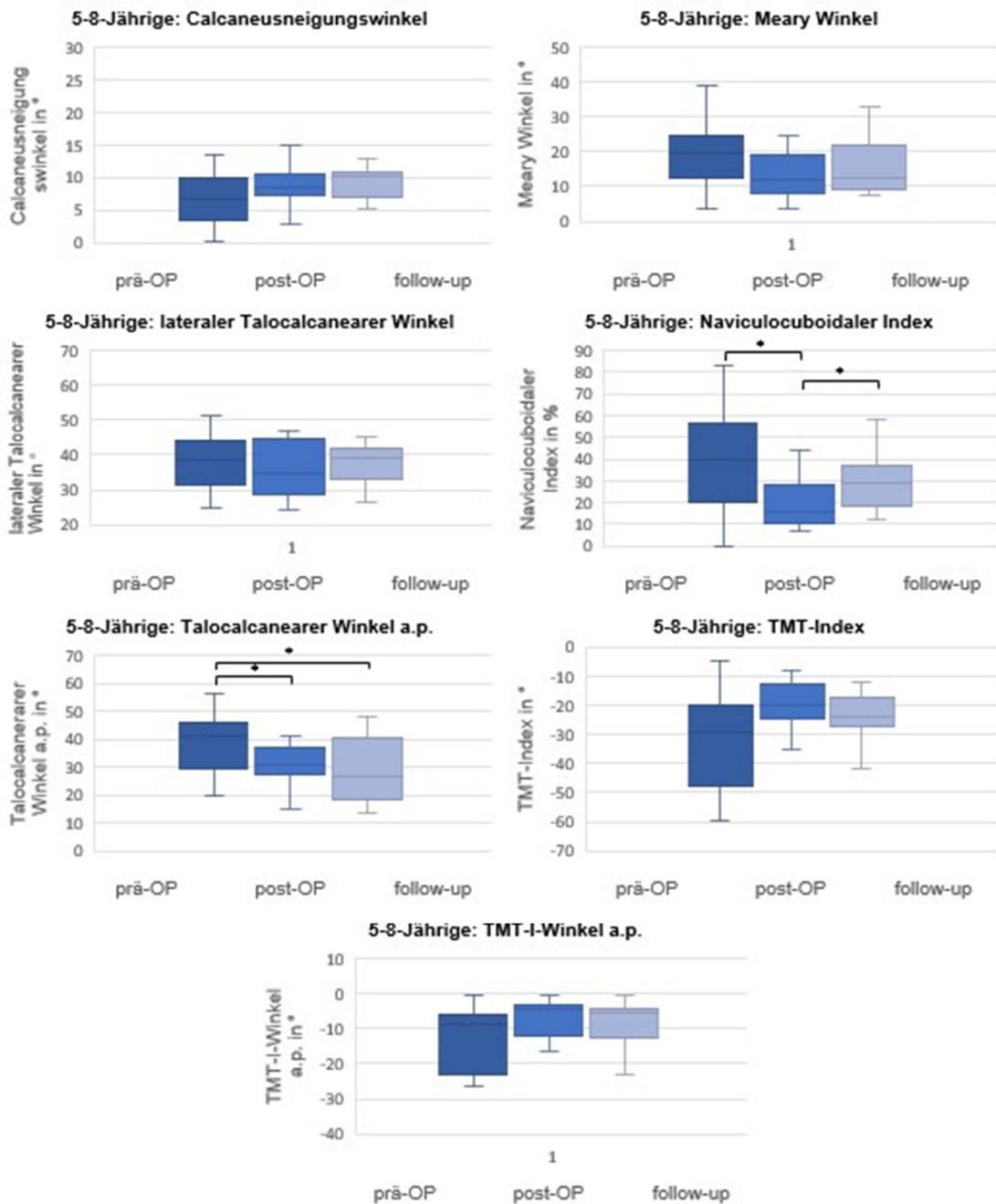


Abb. 13: **Ergebnisse Gruppe A** 5- bis 8-Jährige, Calcaneusneigungswinkel in °, Meary Winkel in °, TMT-I-Winkel a. p., lateraler Talocalcaneärer Winkel in °, Talocalcaneärer Winkel a. p., TMT-Index in °, Naviculocuboidaler Index in Prozent; Zeitpunkte präoperativ, postoperativ und Follow-up; Signifikanzniveaus: $p \leq 0,05$ mit * markiert. Höhere Signifikanzniveaus wurden wie folgt gekennzeichnet: ** = $\leq 0,001$ und *** = $\leq 0,0001$, modifiziert nach [2]

3.3 Ergebnisse Gruppe B (Altersgruppe 9–12 Jahre)

Mit einem Anteil von 66 % der Gesamtpopulation stellt die Altersgruppe der 9- bis 12-Jährigen das Kollektiv der Gruppe B dar und die somit insgesamt umfangreichste Datengruppe. So umfasst die Gruppe B 33 Patient:innen mit 63 flexiblen Plattfüßen. Davon waren bei 90,9 % der Kinder (30 Patient:innen) beide Füße betroffen und wurden mittels subtalarer Schraubenarthrorise operativ versorgt. Ergänzend zur subtalaren Schraubenarthrorise wurde bei 33,3 % der Fälle, entsprechend $n=21$, bei vorliegendem Spitzfuß eine Operation nach Baumann durchgeführt. Zum Operationszeitpunkt lag das mittlere Alter der Kinder bei $11,2 \pm 1,0$ Jahren (Altersspanne 9–12 Jahre). Die Zeitspanne bis zur ersten postoperativen Röntgenkontrolle lag zwischen 1–65 Monaten. So wurde die erste postoperative Röntgenkontrolle im Durchschnitt nach $6,3 \pm 9,1$ Monaten durchgeführt. Das letzte Follow-up-Röntgenbild wurde im Mittel nach $37,7 \pm 17,4$ Monaten erstellt, hier lag die Spanne zwischen 13–79 Monaten.

Insgesamt zeigten alle dargestellten Winkel, ausgenommen des Calcaneusneigungswinkels, im Vergleich vom präoperativen zum postoperativen Zeitpunkt eine signifikante Verbesserung der Werte. Der Calcaneusneigungswinkel zeigte sich jedoch im Vergleich präoperativ zu Follow-up signifikant gebessert ($t(61) = 3,12$; $p = 0,003$; $d = 0,18$) und mit noch höherer Signifikanz ($t(61) = 3,60$; $p < 0,001$; $d = 0,40$) im Vergleich postoperativ gegenüber der Follow-up-Röntgenkontrolle, sodass auch hier eine langfristige Besserung gezeigt werden konnte.

Im Vergleich zur Gesamtpopulation fanden sich in dieser Altersgruppe in Summe die größten Korrekturerfolge mit konstantem Therapieerfolg im Follow-up wie der Tabelle 2 zu entnehmen ist [2].

Anders als bei den 5- bis 8-Jährigen verringerte sich in dieser Kohorte der laterale Talocalcaneare Winkel verglichen zwischen prä- und postoperativ ($t(62) = 5,04$; $p < 0,001$; $d = 0,64$) mit Werten präoperativ bei $43,2^\circ \pm 8,1^\circ$ zu postoperativ $39,2^\circ \pm 7,7^\circ$. Auch im Vergleich postoperativ gemessen zur Follow-up-Röntgenkontrolle findet sich eine Verbesserung ($t(61) = 2,76$; $p = 0,008$; $d = 0,35$) wie es der Tabelle 2 zu entnehmen ist. Ähnlich verhielt sich der anterior-posteriore Talocalcaneare Winkel. Dieser verringerte sich ebenfalls signifikant sowohl präoperativ im Vergleich zu postoperativ mit einem p-Wert von 0,005 ($t(54) = 2,95$; $d = 0,40$) als auch präoperativ verglichen zum Follow-up mit einem p-Wert von 0,002 ($t(56) = 3,33$; $d = 0,44$). So maß der

Talocalcaneare Winkel in der a. p.-Projektion im Durchschnitt $36,5^\circ \pm 9,7^\circ$, postoperativ im Mittel $32,0^\circ \pm 9,9^\circ$ und im Follow-up durchschnittlich $31,6^\circ \pm 8,9^\circ$.

Wie in Abbildung 14 veranschaulicht ist die Verringerung des Meary Winkels zwischen präoperativem Röntgen und postoperativen Röntgen ($t(62) = 6,26$; $p < 0,001$; $d = 0,79$), als auch präoperativ zum Follow-up-Röntgenbild ($t(61) = 5,88$; $p < 0,001$; $d = 0,75$) hervorzuheben. Dieser maß präoperativ durchschnittlich $19,0^\circ \pm 8,5^\circ$ und lag postoperativ im Durchschnitt bei $13,3^\circ \pm 7,2^\circ$ sowie konstant im Follow-up bei durchschnittlich $13,3^\circ \pm 7,4^\circ$. Es ist auf die eingeschränkte Vergleichbarkeit des Meary Winkels präoperativ hinzuweisen bei $KS(53) = 0,13$; $p = 0,018$.

Die Messung des Talometatarsale-1-Winkels im anterior-posterioren Strahlengang im Vergleich von präoperativ zu postoperativ ($t(54) = 5,64$; $p < 0,001$; $d = 0,76$) als auch von präoperativ gemessen zum Follow-up ($t(56) = 4,62$; $p < 0,001$; $d = 0,75$) ergab eine Verkleinerung des Winkels. So verringerte sich der Winkel von präoperativ $-14,1^\circ \pm 8,0^\circ$ auf $-8,9^\circ \pm 7,1^\circ$ postoperativ und im Follow-up fand sich ein Winkel von $-9,4^\circ \pm 6,6^\circ$. Es ist auf die eingeschränkte Vergleichbarkeit des a. p.-Talometatarsale-I-Winkels postoperativ hinzuweisen bei $KS(53) = 0,18$; $p < 0,001$.

Die Analyse des Naviculocuboidalen Index zeigte eine nahezu Halbierung der prozentualen Überlappung von Os naviculare und Os cuboideum. Die Mittelwerte dieser Alterskohorte sind sowohl im präoperativen zum postoperativen Vergleich ($t(62) = 12,34$; $p < 0,001$; $d = 1,55$) als auch vom präoperativen Vergleich zum Follow-up ($t(61) = 11,98$; $p < 0,001$; $d = 1,52$) signifikant verringert (siehe Tabelle 2, Abb. 14) [2]. Hinsichtlich des TMT-Index zeigte sich für die 9- bis 12-jährigen Patient:innen präoperativ verglichen mit postoperativ eine Verbesserung vom Mittelwert von $-32,6^\circ \pm 12,3^\circ$ zu $-21,5^\circ \pm 10,1^\circ$ ($t(62) = 7,35$; $p < 0,001$; $d = 0,93$). Präoperativ gemessen verglichen zur Follow-up Röntgenkontrolle betrug der TMT-Index in der Follow-up-Messung $-22,2^\circ \pm 9,6^\circ$ ($t(62) = 6,68$; $p < 0,001$; $d = 0,84$).

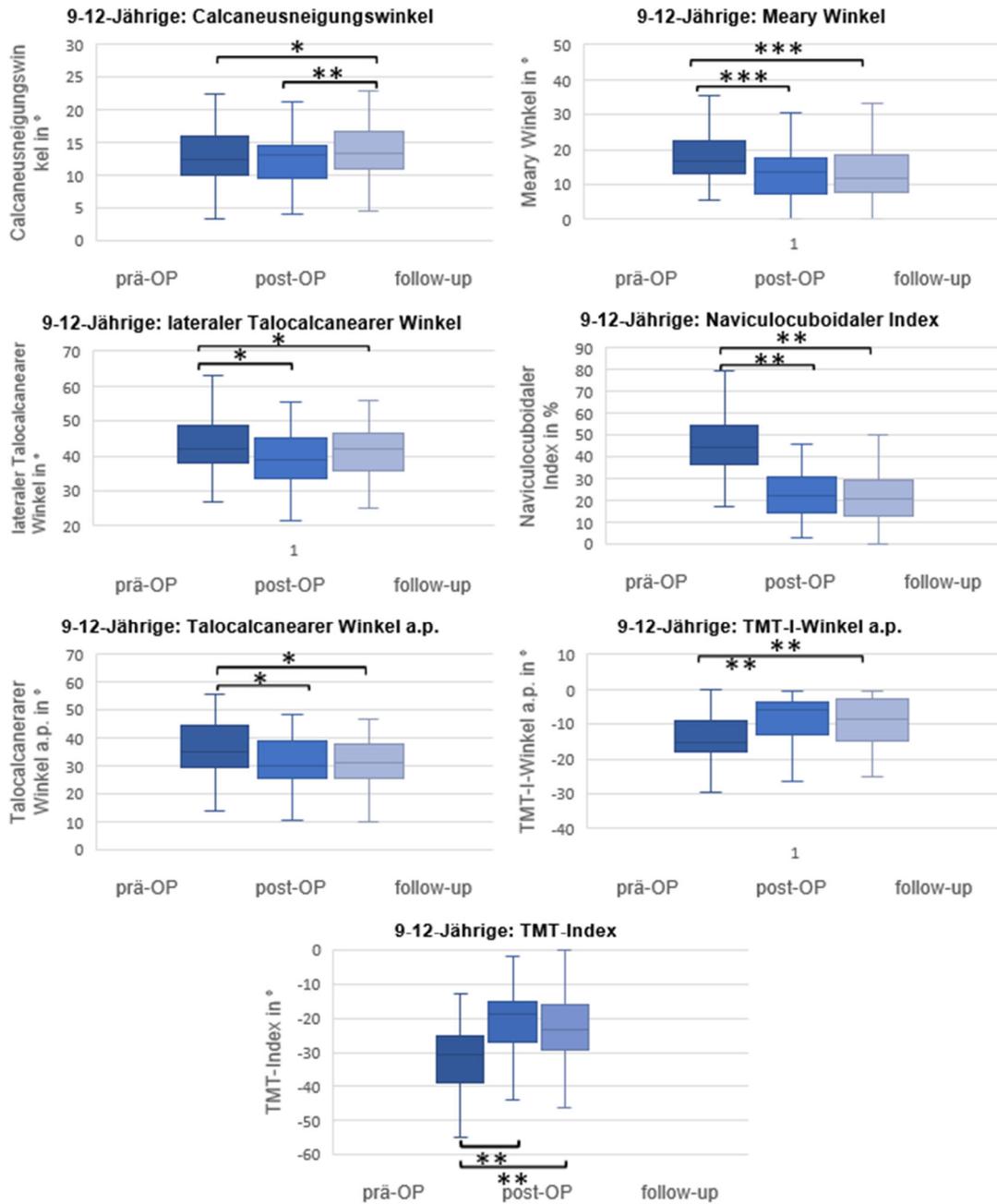


Abb. 14: **Ergebnisse Gruppe B** 9- bis 12-Jährige, Calcaneusneigungswinkel in °, Meary Winkel in °, TMT-I-Winkel a. p., lateraler Talocalcaneärer Winkel in °, Talocalcaneärer Winkel a. p., TMT-Index in °, Naviculocuboidaler Index in Prozent; Zeitpunkte präoperativ, postoperativ und Follow-up; Signifikanzniveaus: $p \leq 0,05$ mit * markiert. Höhere Signifikanzniveaus wurden wie folgt gekennzeichnet: ** = $\leq 0,001$ und *** = $\leq 0,0001$, modifiziert nach [2]

3.4 Ergebnisse Gruppe C (Altersgruppe 13–15 Jahre)

In der Gruppe C wurden die Kinder im Alter von 13–15 Jahren untersucht. Diese waren zum Operationszeitpunkt im Durchschnitt $13,6 \pm 0,7$ Jahre alt. Insgesamt konnten in diesem Kollektiv 11 Patient:innen mit 21 flexiblen Plattfüßen eingeschlossen werden. Davon wurde bei einem Kind nur ein Fuß operativ versorgt. Bei den restlichen 10 Kindern wurde eine beidseitige subtalare Schraubenarthrorise durchgeführt. Bei 6 Kindern (57,0 %) wurde bei einer Spitzfußdeformität entweder zusätzlich ein Release nach Baumann ($n = 4$) oder eine Verlängerung des M. gastrocnemius nach Strayer ($n = 2$) durchgeführt. In dieser Altersgruppe wurde durchschnittlich nach $6,7 \pm 10,3$ Monaten (Zeitspanne 1–37 Monate) nach SSA das erste postoperative Röntgenbild im Rahmen der Routinenachsorge angefertigt und nach durchschnittlich $28,8 \pm 10,1$ Monaten erfolgte die letzte Follow-up-Röntgenkontrolle. Hier lag die Zeitspanne zwischen 16–48 Monaten.

Wie in Abbildung 15 dargestellt ist, veränderte sich der Talocalcaneare Winkel in der anterior-posterioren Aufnahme im Mittel zu keinem der Nachsorgezeitpunkte maßgeblich. Dies spiegelt sich in allen Vergleichen mit $p > 0,05$ wider.

Divergente Ergebnisse hingegen erbrachte die Analyse des lateralen Talocalcanearen Winkels (Abb. 15, Tabelle 2). Zunächst zeigte sich dieser im präoperativen zum postoperativen Vergleich verbessert mit einem Mittelwert von $42,9^\circ \pm 17,5^\circ$ präoperativ zu $39,4^\circ \pm 5,8^\circ$ postoperativ mit einem p-Wert von 0,014 ($t(20) = 2,71$; $d = 0,59$). In der Follow-up-Kontrolle verschlechterte sich der laterale TCA jedoch auf das präoperative Niveau. Hinsichtlich des Vergleichs des postoperativen Wertes zum Follow-up-Wert bestätigte sich diese Verschlechterung mit einer Signifikanz von ($t(20) = 4,19$; $p < 0,001$; $d = 0,92$). Es konnte so kein langfristiger Korrekturerfolg gezeigt werden.

Sowohl der Calcaneusneigungswinkel als auch der Naviculocuboidale Index zeigten in der Auswertung Verbesserungen der Werte. So fand sich eine Verbesserung des Calcaneusneigungswinkels im Vergleich vom präoperativen zum postoperativen Zeitpunkt ($t(20) = 3,61$; $p < 0,001$; $d = 0,79$) als auch im Vergleich präoperativ gemessen zum Follow-up ($t(20) = 4,05$; $p < 0,001$; $d = 0,88$).

Die prozentuale Überlappung des NCI verringerte sich signifikant hinsichtlich der präoperativen Werte verglichen zu den postoperativen Werten ($t(20) = 5,71$; $p < 0,001$; $d = 1,25$), als auch im Vergleich der präoperativen- zu den Follow-up-Werten. Hier lag das Signifikanzniveau bei $p < 0,001$ ($t(20) = 6,47$; $d = 1,41$).

Der präoperative zu postoperative Vergleich ergab eine signifikante Verbesserung des Meary-Winkels mit Verringerung des Winkels von präoperativ $19,5^\circ \pm 8,7^\circ$ zu postoperativ $13,1^\circ \pm 5,9^\circ$ und einem Signifikanzniveau von $p = 0,001$ ($t(20) = 3,75$; $d = 0,82$). Auch im präoperativen Vergleich zur Follow-up-Messung konnte noch eine signifikante Verbesserung mit einem p-Wert von $0,012$ ($t(20) = 2,78$; $d = 0,61$) nachgewiesen werden. Hinsichtlich des postoperativen Ergebnisses zur Follow-up-Kontrolle zeigte sich jedoch ein deutlicher Korrekturverlust dieses Winkels mit einem Signifikanzniveau von $p < 0,05$ ($t(20) = 2,49$; $d = 0,54$) (siehe Abb. 15).

Wie in Abbildung 15 zu erkennen ist, verringerte sich der Talometatarsale-1-Winkel im anterior-posterioren Strahlengang von präoperativ gemessen verglichen sowohl zu postoperativ gemessen ($t(18) = 3,03$; $p = 0,007$; $d = 0,70$) als auch zum Follow-up-Röntgenbild ($t(20) = 3,43$; $p = 0,003$; $d = 0,75$). Der Talometatarsal-Index (TMT-Index) zeigte in dieser Altersgruppe präoperativ im Mittel $-34,9^\circ \pm 15,5^\circ$ und verbesserte sich postoperativ durchschnittlich auf $-22,9^\circ \pm 9,3^\circ$ ($t(20) = 5,18$; $p < 0,001$; $d = 1,13$). Auch präoperativ verglichen zur Follow-up-Messung fand sich mit $p < 0,001$ ($t(20) = 5,16$; $d = 1,13$) eine konstante langfristige Verbesserung des Index. So ergab sich im Follow-up ein Wert von $-27,3^\circ \pm 13,7^\circ$. Im Vergleich vom postoperativen Zeitpunkt zum Follow-up blieb der TMT-Index mit $p = 0,72$ konstant.

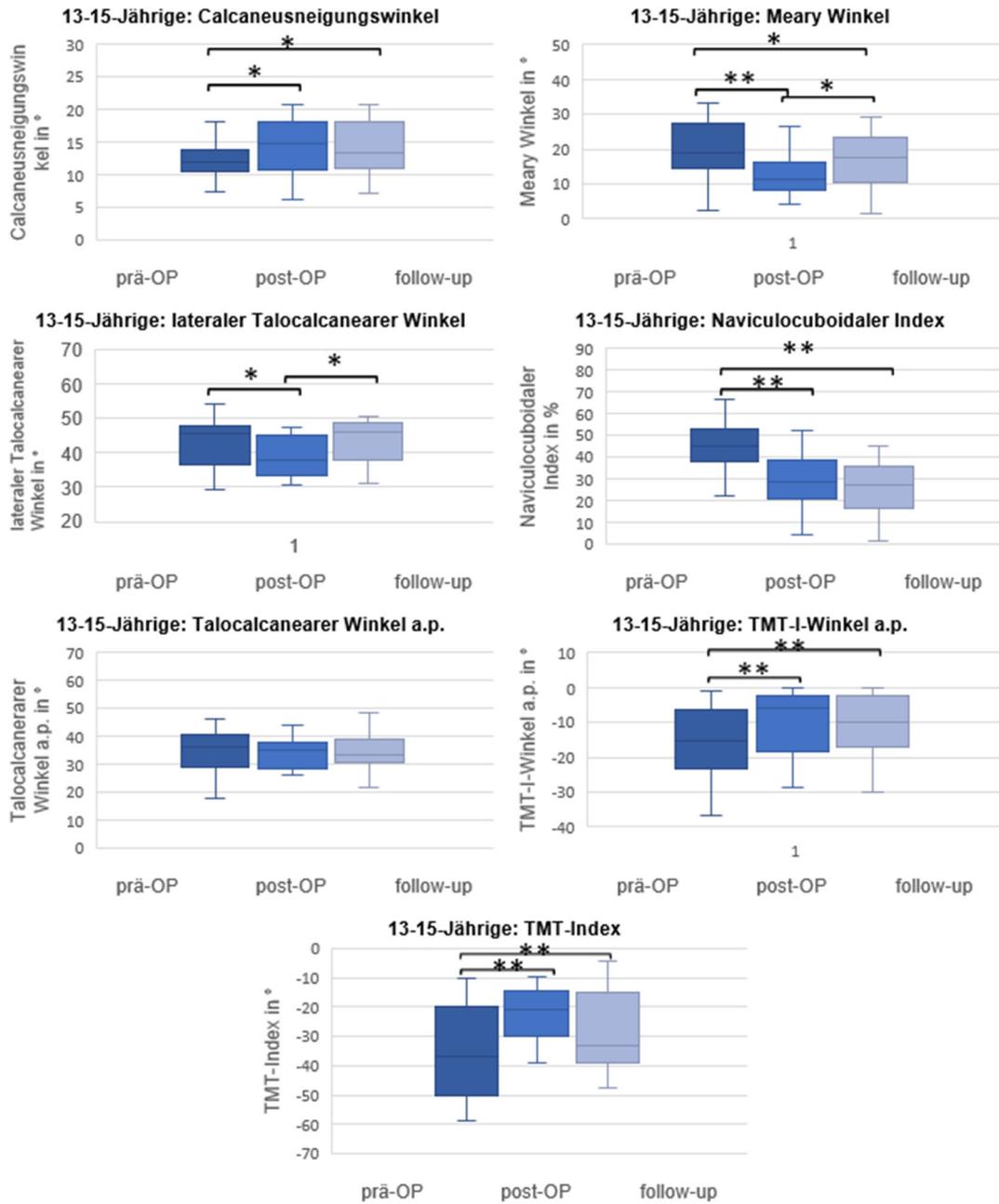


Abb. 15: **Ergebnisse Gruppe C:** 13–15-Jährige, Calcaneusneigungswinkel in °, Meary Winkel in °, TMT-I-Winkel a. p., lateraler Talocalcaneärer Winkel in °, Talocalcaneärer Winkel a. p., TMT-Index in °, Naviculocuboidaler Index in Prozent; Zeitpunkte präoperativ, postoperativ und Follow-up; Signifikanzniveaus: $p \leq 0,05$ mit * markiert. Höhere Signifikanzniveaus wurden wie folgt gekennzeichnet: ** = $\leq 0,001$ und *** = $\leq 0,0001$, modifiziert nach [2]

5-8 Jährige	Prä-op	Post-op	Follow-up
CP	6,7 ± 4,0	8,8 ± 3,0	9,1 ± 4,9
lat. TC Winkel	37,2 ± 7,9	34,9 ± 7,7	37,3 ± 5,6
a.p. TC Winkel	38,7 ± 10,5	30,8 ± 7,0*	28,3 ± 11,9*
NCI	40,0 ± 24,2	20,4 ± 12,3*	28,7 ± 13,0 [#]
Meary Winkel	18,9 ± 10,0	13,1 ± 6,9	15,4 ± 8,1
9-12 Jährige	Prä-op	Post-op	Follow-up
CP	12,7 ± 4,2	12,7 ± 4,4	14,1 ± 5,2 ^{###}
lat. TC Winkel	43,2 ± 8,1	39,2 ± 7,7*	41,7 ± 7,8*
a.p. TC Winkel	36,5 ± 9,7	32,0 ± 9,9*	31,6 ± 8,9*
NCI	46,5 ± 14,2	23,3 ± 11,2*	22,4 ± 12,9*
Meary Winkel	19,0 ± 8,5	13,3 ± 7,2 ^{***}	13,3 ± 7,4 ^{***}
13-15 Jährige	Prä-op	Post-op	Follow-up
CP	12,3 ± 2,8	14,3 ± 4,2*	14,2 ± 4,2*
lat. TC Winkel	42,9 ± 17,5	39,4 ± 5,8*	43,4 ± 6,3 [#]
a.p. TC Winkel	34,6 ± 7,4	34,1 ± 5,3	34,3 ± 7,1
NCI	44,2 ± 14,1	29,4 ± 13,0 ^{**}	26,5 ± 11,7 ^{**}
Meary Winkel	19,5 ± 8,7	13,1 ± 5,9 ^{**}	16,1 ± 7,6 [#]

Tabelle 2: Mittelwerte der gemessenen Winkel in den Gruppen A-C : mit Standardabweichung: CP, lat. TC Winkel, a. p. TC Winkel, NCI und Meary Winkel zu den drei Zeitpunkten: prä-op, post-op und Follow-up; Signifikanzniveaus: * = $\leq 0,05$, ** = $\leq 0,001$ und *** = $\leq 0,0001$ signifikant bei Vergleich prä-op zu post-op beziehungsweise Follow-up; # = $\leq 0,05$ und ## = $\leq 0,001$ signifikant post-op im Vergleich zu Follow-up, modifiziert nach [2]

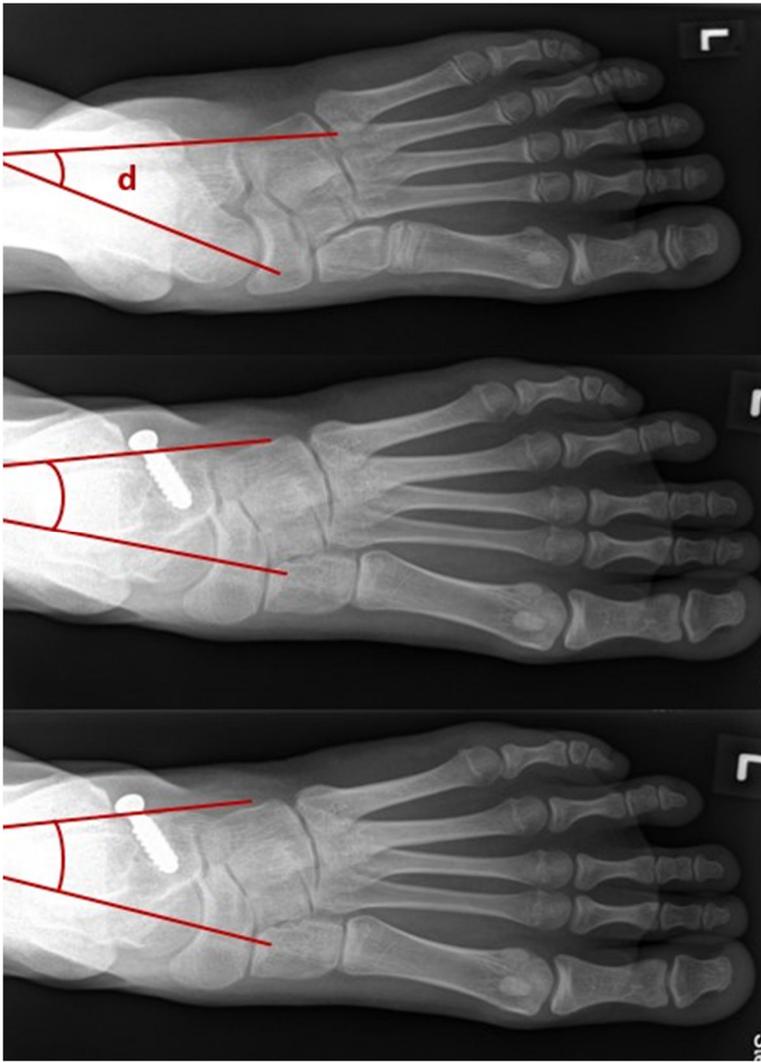


Abb. 16: Röntgenbilder a. p.-Strahlengang : Fuß links, präoperativ, postoperativ, Follow-up (v.o.n.u.); d = TCA a. p.; (Bestand Universitätsklinikum Düsseldorf, genehmigte Nutzung von Univ.-Prof. Dr. med. Antoch), modifiziert nach [2]

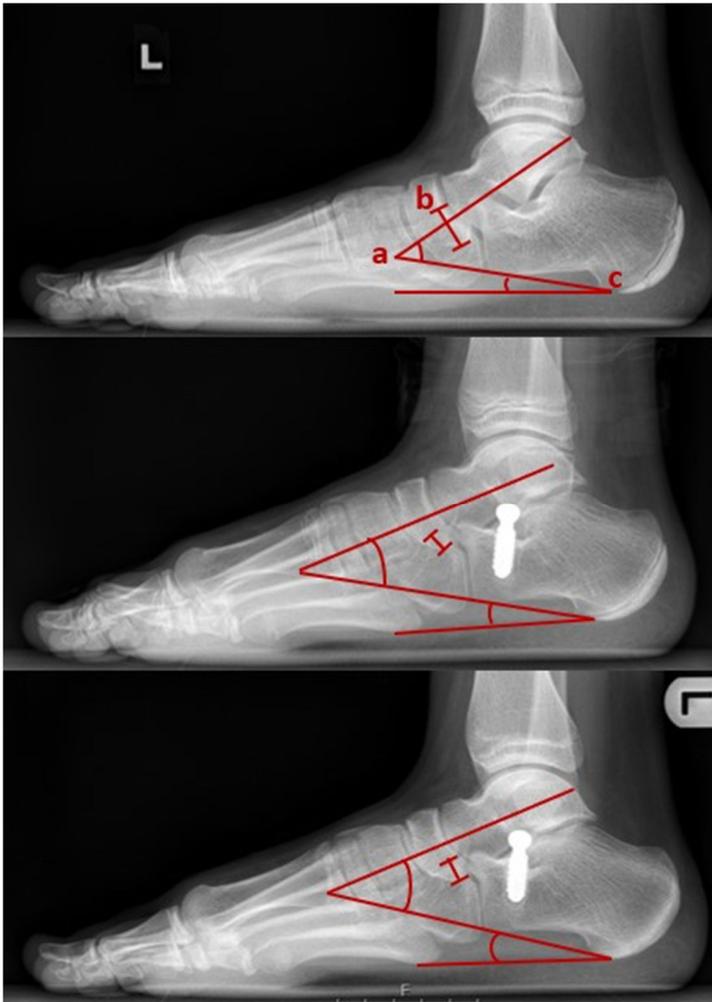


Abb. 17: Röntgenbilder lat. Strahlengang : Fuß links, präoperativ, postoperativ, Follow-up (v.o.n.u.); a=TCA lat., b=NCI, c=CP; (Bestand Universitätsklinikum Düsseldorf, genehmigte Nutzung von Univ.-Prof. Dr. med. Antoch), modifiziert nach [2]

3.5 Knöcherner Reifung

Es erfolgte zusätzlich die Auswertung der gemessenen Winkel und Indizes nach Anwendung der Klassifikation des Knochenalters in Röntgenbildern von Birkner [2, 68]. Nach Anwendung dieser Klassifikation fand sich in Gruppe A der 5- bis 8-jährigen Kinder ein mittleres Knochenalter zum Operationszeitpunkt von $6,9 \pm 2,0$ Jahren. Bei zwei Kindern war das Knochenalter zwei Jahre jünger als das reale Alter. Verglichen mit dem Knochenalter lag das durchschnittliche reale Alter der Kinder bei $7,4 \pm 1,2$ Jahren. Insgesamt konnte die Auswertung der neuen Knochenaltergruppe A der 5- bis 8-jährigen mit nun $n = 12$ eine neue Signifikanz hinsichtlich der Verbesserung des Meary Winkels sowohl präoperativ zu postoperativ als auch postoperativ zu Follow-up zeigen. Die

entsprechenden p-Werte lagen bei $p = 0,044$ und $p = 0,031$. In der vorherigen Gruppeneinteilung konnte keine Signifikanz nachgewiesen werden. Für alle anderen Parameter konnten keine signifikanten Veränderungen aufgezeigt werden [2].

Für die Gruppe B (9–12 Jahre) zeigte sich nach Birkner [68] ein mittleres knöchernes Alter von $11,4 \pm 1,4$ Jahren zum Operationszeitpunkt. Das reale Alter zum Operationszeitpunkt lag im Vergleich dazu bei $11,2 \pm 1,0$ Jahren. In dieser Alterskohorte fand sich in einem Fall mit 8 Jahren statt 9 Jahren ein niedrigeres Knochenalter. In 9 Fällen ergab sich ein höheres Knochenalter. Dieses lag anstatt bei vorher 10 Jahren (2 Fälle), beziehungsweise 11 Jahren (2 Fälle) und 12 Jahren (5 Fälle) nun bei 13 Jahren. Trotz der Anpassung des Knochenalters mit nun einer Fallzahl von $n = 51$ statt zuvor $n = 63$ zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zu den Vorwerten bei konstanter Verbesserung aller gemessenen Parameter [2].

In der Alterskohorte der 13–15 Jahre alten Kinder der Gruppe C lag das mittlere reale Alter bei $13,6 \pm 0,7$ Jahren zum Zeitpunkt der Operation. Nach Modifikation betrug das mittlere Knochenalter bei der Operation nun $13,9 \pm 0,9$ Jahre. Hier konnte in zwei Fällen ein niedrigeres Knochenalter von 12 Jahren anstatt der realen 13 Jahre festgestellt werden. In dieser neu formierten Gruppe der 13- bis 15-Jährigen mit nun 32 Fällen konnte die initial beobachtete Verschlechterung des Meary-Winkels postoperativ verglichen zum Follow-up nicht mehr beobachtet werden.

3.6 Ergebnisse Naviculocuboidaler Index



Abb. 18: Naviculocuboidaler Index präoperativ (Bestand Universitätsklinikum Düsseldorf, genehmigte Nutzung von Univ.-Prof. Dr. med. Antoch)



Abb. 19: Naviculocuboidaler Index postoperativ (Bestand Universitätsklinikum Düsseldorf, genehmigte Nutzung von Univ.-Prof. Dr. med. Antoch)



Abb. 20: Naviculocuboidaler Index Follow-up (Bestand Universitätsklinikum Düsseldorf, genehmigte Nutzung von Univ.-Prof. Dr. med. Antoch)

Der Naviculocuboidale Index zeigte für das Gesamtkollektiv präoperativ einen Mittelwert von $45,2 \% \pm 15,6 \%$. Postoperativ verringerte sich die prozentuale Überlappung des Index auf $24,3 \% \pm 12,3 \%$ bei $p < 0,001$ ($t(94) = 12,76$; $d = 1,31$).

Auch der Vergleich der präoperativen Überlappung zur Überlappung im Follow-up war im Mittel bei $24,1 \% \pm 12,7 \%$ mit $p < 0,001$ ($t(93) = 12,70$; $d = 1,31$) deutlich verringert. In Abbildung 21 findet sich oben links mit einem + markiert die Überlappung von Os naviculare und Os cuboidale präoperativ dargestellt. Hier stellt sich verglichen zum postoperativen Röntgenbild (siehe Abb. 22, Bild Mitte links) eine deutlich größere Überlappung als postoperativ dar. Weiterhin zeigt sich im Bild unten links in Abb. 22 eine weitgehend konstante Überlappung im Vergleich von postoperativ zum Follow-up-Röntgenbild [2].

Es zeigt sich, dass die prozentuale Überlappung von Os naviculare und Os cuboideum neben der Verbesserung im Gesamtkollektiv auch in allen Alterskategorien in den Vergleichen präoperativ zu postoperativ bzw. präoperativ zu Follow-up eine signifikante Verbesserung erzielte (siehe Tabelle 2, Abb. 18–21).



Abb. 21: **Übersicht der Röntgenbilder** : präoperativ, postoperativ (3 Monate postoperativ) und Follow-up (40 Monate postoperativ) (von oben nach unten) in lateral (links) und a. p. (rechts) mit Darstellung der gemessenen Winkel: * = CP, # = lat. TCA, + = NCI, § = a. p. TCA; linker Pes planovalgus (weiblich, 10 Jahre) [2]

4 Diskussion

4.1 Zielsetzung

Der flexible kindliche Knick-Senkfuß ist eine der häufigsten Diagnosen bei der Vorstellung bei Ärztinnen und Ärzten der Pädiatrie oder Orthopädie [9, 26, 78]. Obwohl der kindliche Plattfuß eine der häufigsten Fußdeformitäten ist, bei der es sich um eine Fußfehlstellung mit einem Rückfußvalgus und einem abgeflachten Fußlängsgewölbe handelt [6], herrscht in der Literatur und Praxis Dissens über die genaue Definition, die exakte Abgrenzung zwischen Physiologie und Pathologie sowie das beste Therapiekonzept [9, 20, 79]. Nach Ausschöpfung der konservativen Therapie stehen bei Patient:innen mit symptomatischen Knick-Senkfüßen operative Therapieverfahren zur Verfügung. Eine minimalinvasive und komplikationsarme Operationsmethode stellt die subtalare Schraubenarthrorise dar [12, 60].

In der Literatur wird der optimale Operationszeitpunkt der subtalaren Schraubenarthrorise immer noch kontrovers diskutiert. Meist rangiert die Empfehlung des Operationsalters zwischen 5 und 15 Jahren [12, 52, 80].

Ein Ziel dieser Arbeit war die Herausstellung des optimalen Operationszeitpunktes für eine subtalare Schraubenarthrorise bei flexiblem kindlichen Knick-Senkfuß anhand radiologischer Auswertungen.

In der vorliegenden retrospektiven Arbeit wurde das radiologische Outcome von 80 Kindern mit 149 flexiblen kindlichen Knick-Senkfüßen (KSF) untersucht, die mit einer subtalaren Schraubenarthrorise behandelt wurden. Dazu konnten insgesamt 50 Kinder mit 95 kindlichen KSF in die Studie eingeschlossen werden. Es wurden im Rahmen der Routineuntersuchung in der Klinik für Orthopädie des Universitätsklinikums Düsseldorf präoperativ, postoperativ und Follow-up-Röntgenbilder nach Simons im anterior-posterioren und lateralen Strahlengang erstellt. Diese wurden analysiert und verschiedene Winkelmaße gemessen und verglichen.

Weiterhin sollte gezeigt werden, dass die Abbildung des Naviculocuboidalen Index ein valides Messinstrument für das Fußgewölbe ist, beziehungsweise anhand dessen die Aufrichtung des Fußgewölbes bei flexiblen kindlichen Plattfüßen festgestellt werden kann und dass der Naviculocuboidale Index auch ein valides Maß für die Verlaufskontrolle darstellt.

In dieser Studie, von der Teile bereits veröffentlicht wurden, konnte gezeigt werden, dass die besten Korrekturergebnisse nach subtalarer Schraubenarthrorise postoperativ und im Follow-up in der Altersgruppe der 9- bis 12-jährigen Kinder erzielt werden. Wurde die Operation im Alter zwischen 9–12 Jahren durchgeführt, konnte eine signifikante Korrektur der gemessenen radiologischen Parameter festgestellt werden. In dieser Altersgruppe konnte keine spätere Verschlechterung in den Follow-up-Kontrollen gefunden werden, sodass hier ein stabiles Langzeitergebnis erwarten werden kann [2].

4.2 Diskussion der Diagnostik und Behandlung

Während bei Kindern bis zum 6.–10. Lebensjahr ein flexibler Plattfuß physiologisch ist und sich bis dahin zumeist ein physiologisches Fußgewölbe ausgebildet hat, kommt es bei nur 1 % der 3- bis 6-Jährigen nach Pfeiffer et al. zu symptomatischen, pathologischen Knick-Senkfüßen mit persistierenden Schmerzen und Gangauffälligkeiten [28].

Die Diagnose des flexiblen kindlichen Knick-Senkfußes beruht auf einer ausführlichen Anamnese, der gründlichen klinischen Untersuchung sowie standardisierten Röntgenbildern in 2 Ebenen im Stand nach Simons.

Nach erfolgter ausführlicher Diagnostik und festgestellter Indikation zur Therapie soll gemäß aktuellem Konsens eine Behandlung des symptomatischen kindlichen flexiblen Knick-Senkfuß zunächst immer mittels konservativer Maßnahmen erfolgen [4, 37]. Dabei wird die Stärkung der Muskulatur und Bänder im Rahmen von Barfuß-Gang, Zehenspitzenang und Fußgymnastik möglichst in den Alltag integriert und bedarfsweise durch krankengymnastische Beübungen ergänzt [4]. Zudem sollte die Dehnung der Wadenmuskulatur im Falle einer Spitzfußkomponente erfolgen. Die Verschreibung von Einlagen ist eine weitverbreitete konservative Therapiemaßnahme vornehmlich zur Schmerzreduktion. Dabei zeigte Jani bereits 1986 in seiner Studie mit zwei Gruppen (eine Gruppe trug Einlagen konsequent über 6 Jahre, die andere Gruppe trug Einlagen nur sporadisch oder gar nicht), dass die Kinder, die die Einlagen nicht getragen haben, keinen Nachteil gegenüber den Kindern mit Einlagen hatten. Es konnte sogar gezeigt werden, dass sich in dieser Gruppe vermehrt ein physiologisches Fußgewölbe ausgebildet hat [41]. Dies konnte durch weitere Studien bestätigt werden [33, 43]. Bernius befürwortet besonders die Versorgung mit sensomotorischen Einlagen [81]. Verbleiben weiterhin

Beschwerden wie Schmerzen oder Einschränkungen der Mobilität und des Gangbildes, oder tritt eine weitere Verschlechterung ein, so wird die Indikation zur operativen Versorgung gestellt [42].

In der vorliegenden Studie wurde die Indikation zur operativen Therapie mittels subtalarer Schraubenarthrorise bei folgenden Aspekten gestellt: Zunächst musste es sich um einen symptomatischen Knick-Senkfuß handeln und dieser mit persistierenden Schmerzen und/oder Hinken und dadurch mit einem pathologischen Gangbild einhergehen. Ein weiteres Kriterium war ein pathologischer Rückfußvalgus. Wichtig war zudem, dass die Kinder aufgrund des flexiblen Knick-Senkfußes bereits konservativ behandelt worden waren und dies zu keiner ausreichenden Beschwerdebesserung geführt hatte. Radiologisch zeigten sich pathologische Winkelmaße im anterior-posterioren und lateralen Röntgenbild, die nur in Zusammenschau mit der Symptomatik, die Indikation stärkten. In der Literatur herrscht bezüglich der Indikationsstellung zur operativen Therapie insofern Einigkeit, dass eine frustrane konservative Therapie symptomatischer Plattfüße vorliegen muss und eine Besserung durch das Wachstum nicht mehr zu erwarten ist [6, 24, 51].

Bei der Behandlung des symptomatischen flexiblen kindlichen Plattfußes haben sich im Laufe der Zeit viele unterschiedliche Methoden und unterschiedlich invasive Methoden etabliert. Trotzdem sollte weiterhin betont werden, dass der symptomlose kindliche flexible Knick-Senkfuß keiner ausgedehnten Diagnostik oder jeglicher Therapie bedarf [40, 43, 70].

Fällt die Entscheidung für eine operative Therapie, so gibt es auch hier verschiedene Ansätze. Viele davon sind langjährig etablierte Methoden.

Gute Langzeitergebnisse hat dabei die Calcaneusverlängerung nach Evans vorzuweisen, bei der mittels eines autologen Beckenkammspanns eine Verlängerung der lateralen Fußsäule erzeugt wird. So wird die Valgisierung des Calcaneus korrigiert und die Plantaraponeurose gespannt mit folgender Aufrichtung des Fußgewölbes [82]. Erstmals beschrieb Evans diese Methode im Jahre 1975 [27, 46]. Nachteilig bei dieser Technik ist die hohe Invasivität und längere Rehabilitationszeit, bei der eine Teilbelastung für 6 Wochen vorgesehen ist. Dies setzt eine höhere Compliance der Patient:innen voraus, was im Kindesalter nicht zu erwarten ist.

Die extraartikuläre Arthrodese nach Grice zeigt ebenfalls gute Ergebnisse in der Behandlung des symptomatischen flexiblen kindlichen Knicksenkfußes und wird häufig angewandt [12]. Dabei wird ein kortikospongiöser Knochenspan aus der Tibia in den

Sinus tarsi eingebracht und eine knöchernen Verbindung zwischen Talus und Calcaneus erzeugt. Dadurch wird dieser Bereich irreversibel versteift und es verbleibt eine unumkehrbare Bewegungsumfangseinschränkung [47]. Hierbei handelt es sich um einen bedeutenden Nachteil dieser Methode, der lebenslang zu Einschränkungen führt. Für das Patientenkollektiv im Alter von 5–15 Jahren ist dies keine tragbare Option. Um diesen Nachteil zu umgehen, wurde die Methode von Giannini angepasst und entsprechend die Implantation eines Kunststoffdübels in den Sinus tarsi durchgeführt [83]. Diese Technik wurde wiederum von anderen Operateuren getestet, doch bei erhöhter Anzahl an Komplikationen wie Schmerzen oder Dislokation des Implantates wieder ersetzt oder modifiziert [27].

4.3 Subtalare Schraubenarthrorise

Eine häufig angewandte operative Therapieoption ist die subtalare Schraubenarthrorise (SSA). Die SSA ist eine Technik, die sich durch minimale Invasivität auszeichnet und sich somit vorteilhaft auf Operationszeiten und Kosten auswirkt. Diese hat sich bei vielen Operateuren zu einer beliebten und sicheren Methode entwickelt [12, 20, 49-51]. Bereits 2007 konnte De Pellegrin in 95,4 % der Fälle über positive Resultate in seiner 15-jährigen Erfahrung mit dieser Therapiemethode berichten, die er von Buruturan übernommen hatte [21].

Erstmals wurde über dieses minimalinvasive und komplikationsarme Therapieverfahren 1970 von Alvarez informiert und dieses erstmalig 1979 von Buruturan publiziert [9, 84]. Mittlerweile existieren viele verschiedene Varianten dieser Operationsmethode, bei der das Prinzip der Verhinderung der medialen Abkipfung des Talus und der Blockierung der Valgisierung des Calcaneus verfolgt wird [26, 83, 85]. Bisher konnte der genaue Wirkmechanismus um die Aufrichtung des Fußgewölbes noch nicht geklärt werden. Es wird von einem Zusammenspiel aus mechanischen und propriozeptiven Komponenten ausgegangen [12, 51, 52]. In der histologischen Arbeit von Rein et al. konnten überdurchschnittlich viele freie sensorische Nervenendigungen im weißen Fett des Sinus tarsi nachgewiesen werden [18]. Es wird vermutet, dass diese mittels der neuronalen Propriozeption einen Einfluss auf die Interaktion zwischen den Bändern und Muskeln im Bereich des Sinus tarsi haben.

In dieser Arbeit wurde die subtalare Schraubenarthrorise mittels AO-Spongiosa-Schraube mit Kurzgewinde, die in den Calcaneus unterhalb des lateralen Processus tali eingebracht wurde, durchgeführt. Entgegen der Kritik von Mosca, der diese Methode infrage stellt, weil sie noch nicht auf weitere Gelenke des Körpers ausgeweitet worden sei, sehen viele Autoren die Vorteile der subtalaren Schraubenarthrorise mit guten postoperativen Ergebnissen und Langzeitergebnissen sowie einer geringen Komplikationsrate [13, 21]. Mosca fordert zudem mehr Langzeitstudien, bevor eine SSA als Therapieoption bei Kindern mit schmerzhaften flexiblen Knick-Senkfüßen in Betracht gezogen werden sollte [13]. Grundsätzlich sind weitere Langzeitstudien mit unterschiedlichen Gesichtspunkten wie längeren Follow-up-Zeiten und beispielsweise die Altersklassifikation zu empfehlen, jedoch dürfen auch bisherige Langzeiterfahrungen, wie die über 15-jährige Erfahrung von De Pellegrin zur SSA nicht unberücksichtigt sein.

Der wichtigste aktiv haltgebende und stabilisierende Muskel des Fußlängsgewölbes ist der M. tibialis posterior. Im Rahmen einer Band- und Geweblaxität und Muskeldegeneration kann es zu einer unzureichenden Wirkung des M. tibialis posterior kommen [4]. Dies kann als ein Faktor zur Abflachung des Fußlängsgewölbes führen. Nicht nur bei Kindern, sondern noch häufiger auch bei Erwachsenen ist dies neben der Adipositas ein Grund für Pes planovalgus. Die aktuelle Studienlage zeigt trotz nur wenigen Studien bisher, dass die subtalare Schraubenarthrorise eine potente Methode mit ähnlich guten Erfolgsquoten wie bei Kindern zur Verbesserung der Beschwerden bei Pes planovalgus als auch dem radiologischen Outcome ist [86-89]. Ceccarini et al. fanden für Erwachsene jünger als 60 Jahre mit einer pathologischen Funktion der Sehne des M. tibialis posterior im Stadium IIA1 nach Bluman in den Follow-up-Kontrollen ähnlich gute Ergebnisse nach subtalarer Schraubenarthrorise [86].

Möglicherweise sind diese positiven Ergebnisse ebenfalls als Hinweis, neben dem mechanischen Einfluss, auf die propriozeptiven Auswirkungen auf die Aufrichtung des Fußgewölbes zu sehen.

Begründete Kritik wird von Bernasconi geäußert, der auf die fehlenden Langzeitergebnisse für die subtalare Schraubenarthrorise bei Erwachsenen hinweist [20].

4.4 Radiologische Winkelmaße und Diskussion der Ergebnisse

Welche Winkelmaße für die Pes-planovalgus-Deformität gemessen werden sollen und welche in Kombination den Plattfuß am besten beschreiben, wird unter den Operateuren unterschiedlich betrachtet. Viele gemessenen radiologischen Parameter finden sich jedoch bei den meisten orthopädischen und radiologischen Studien wieder [6, 76, 90].

Zu den in dieser Arbeit gemessenen Winkeln gehört der Calcaneusneigungswinkel (CP), der die Plantarflexion des Calcaneus angibt [13]. Dieser wird im lateralen gewichtsbelasteten Röntgenbild bestimmt, indem eine Achse, die am Unterrand des Fersenbeins verläuft, mit einer Achse, die der Auflagefläche auf dem Boden entspricht, den Winkel bilden. In der vorliegenden Studie, von der Teile bereits veröffentlicht wurden, zeigte sich im Gesamtkollektiv für den Calcaneusneigungswinkel eine signifikante Besserung der gemessenen Werte mit einer Vergrößerung des Winkels im Vergleich präoperativ zu postoperativ und präoperativ zum Follow-up [2]. Dies entsprach jedoch nicht in allen Altersgruppen den Ergebnissen. Bei den jüngsten Kindern in Gruppe A (5–8 Jahre) ergab sich zu beiden postoperativen Zeitpunkten keine signifikante Besserung des Winkels. In der Literatur beschreibt Mosca diesen Winkel als einen recht zuverlässig und akkurat zu bestimmenden Winkel [13]. In der Literatur wird der Normwert dieses Winkels zwischen $17^\circ \pm 6^\circ$ bei Kindern und durchschnittlich $24,5^\circ \pm 3,0^\circ$ bei Erwachsenen angegeben [4, 69, 75].

Die Feststellungen dieser Arbeit decken sich hier mit denen der Literatur, dass der Calcaneusneigungswinkel ein solider Parameter ist, um die Abflachung des Calcaneus darzustellen. Auch, dass sich dieser Winkel nach subtalarer Schraubenarthrorise vergrößert, spiegelt sich in der Literatur wider. Allerdings lässt sich dies nur für die Darstellung der Gesamtkohorte bestätigen. Selbst in der Altersgruppe mit dem insgesamt solidesten Outcome, den 9- bis 12-Jährigen, verschlechterte sich der CP zunächst postoperativ. Nur im Vergleich präoperativ zu Follow-up konnte eine signifikante Besserung festgestellt werden. Anders verhielt es sich bei den 13- bis 15-Jährigen. Hier fand sich der CP zu beiden Nachsorgezeitpunkten signifikant verbessert. Hamel et al. ist bei der Beurteilung dieses Winkels kritischer. Er zeigt auf, dass sich dieser Winkel nicht immer kongruent zum Ausmaß der Deformität verhält und auch bei stark ausgeprägten

Deformitäten nahezu normale Werte ergeben kann [91]. Auch weist er auf die Eindimensionalität dieses Winkels hin.

Beim Talocalcanearen Winkel im anterior-posterioren Strahlengang wurden in der vorliegenden Studie die Achsen der mittleren Taluslängsachse und mittleren Calcaneuslängsachse erfasst. Zwischen 35° – 50° liegt der Normbereich für diesen Winkel. Je größer dieser Winkel, umso mehr Rückfußvalgus stellt sich dar [72].

Bei Betrachtung des Gesamtkollektivs lässt sich eine signifikante Verringerung verglichen zwischen prä- und postoperativ und zwischen präoperativ und Follow-up erkennen. Präoperativ zeigte sich ein Mittelwert von $36,3^{\circ} \pm 9,3^{\circ}$, postoperativ von $32,3^{\circ} \pm 8,8^{\circ}$ ($p < 0,001$) und im Follow-up wurde im Mittel $31,8^{\circ} \pm 9,0^{\circ}$ ($p = 0,008$) gemessen.

In dieser Arbeit konnte eine signifikante Verbesserung des Talocalcanearen Winkels in a. p. zu beiden postoperativen Vergleichszeitpunkten sowohl in der Altersklasse 5–8 Jahre, als auch in der Alterskategorie 9–12 Jahre erreicht werden. Interessanterweise verbesserte sich der Talocalcaneare Winkel in a. p. zu keinem der Vergleichszeitpunkte signifikant für die Altersgruppe der 13- bis 15-Jährigen. In der Literatur lässt sich beispielsweise bei Nelson et al. ein vergleichbares Ergebnis nach subtalarer Schraubenarthrorise mit Verbesserung unter anderem des Talocalcanearen Winkels in der a. p.-Projektion finden [92].

Hinsichtlich des Talocalcanearen Winkels im lateralen Strahlengang zeigt sich in der Literatur eine Verbesserung nach durchgeführter Arthrorise-Operation [61, 92]. Dies korreliert je nach Gruppe auch mit den Daten dieser Studie. Es fand sich in Bezug auf das Gesamtkollektiv eine signifikante Verringerung des lateralen Talocalcanearen Winkels präoperativ im Vergleich zu postoperativ, jedoch blieb dieser Effekt im Vergleich von präoperativ zu Follow-up-Kontrolle aus. Auch in der Altersgruppe A konnte keine Verbesserung des Winkels nachgewiesen werden. Anders zeigten sich die Daten für die Altersgruppe B. Dort verbesserte sich der laterale Talocalcaneare Winkel im Vergleich prä- und postoperativ und präoperativ und Follow-up signifikant. Je größer der Rückfußvalgus ist, umso größer ist entsprechend dieser Winkel [61]. Der Normwert des lateralen Talocalcanearen Winkels liegt bei circa 40° , dies konnten auch Chen et al. wiedergeben [73]. Bei den 13- bis 15-Jährigen konnte keine konstante Verbesserung dieses Winkels gezeigt werden. Im Gegenteil, im Follow-up fand sich eine Verschlechterung auf das präoperative Maß und somit auf denselben Grad an Rückfußvalgus. Indino et al. zeigten in ihrer Arbeit mit 56 Patient:innen mit insgesamt

112 Füßen, dass sich das radiologische Outcome nach Implantation eines konischen Subtalarimplantates bei den Patient:innen im Alter zwischen 9 und 14 Jahren signifikant besserte [93]. Dies korreliert sehr mit der Altersgruppe B in dieser Arbeit und unterstützt weiter die Hypothese des besten Interventionszeitraumes. Während Indino et al. zusätzlich eine Unterscheidung zwischen rechtem und linkem operiertem Fuß vornahm, wurde dies in dieser Studie, wie auch den meisten anderen Studien in der Literatur, vernachlässigt [89, 92-94].

Der Talo-Metatarsale-I-Winkel in der anterior-posterioren Projektion wurde in dieser Studie, wie von Hamel und Kinast beschrieben, über die mittlere Längsachse des Metatarsale I und die Längsachse des Talus erfasst [39, 74]. In ihrer Arbeit fanden Hamel und Kinast in der von ihnen definierten Gruppe des Normalkollektives mit $n = 15$ einen durchschnittlichen Wert von $-10,53^\circ \pm 6,81^\circ$. Normwerte für den Talo-Metatarsale-I-Winkel werden in der weiteren Literatur mit 0° bis -20° angegeben [61, 77]. Für Kinder mit einer Planovalgus-Deformität konnten Hamel und Kinast im Mittel einen Wert von $-21,87^\circ \pm 5,28^\circ$ aufzeigen. Im Vergleich mit den Daten liegen die Werte der vorliegenden Arbeit im Mittel zwischen den Normwerten und Werten aus den Planovalgus-Gruppen. Hierzu muss erwähnt werden, dass Hamel von sehr ausgeprägten Befunden berichtet [39]. Dies spiegelte nicht den Durchschnitt des Kollektivs dieser Arbeit wider. Kritisch zu sehen ist hier auch die relativ geringe Fallzahl. In dieser Arbeit konnte für den TMT-1 Winkel für das Kollektiv der 5- bis 8-Jährigen nach Arthrorise eine Verringerung des Winkels von im Mittel $-12,6^\circ \pm 9,6^\circ$ auf $-6,9^\circ \pm 5,2^\circ$ präoperativ zu postoperativ gezeigt werden.

Für die 9- bis 12-Jährigen ergab sich präoperativ zu postoperativ ($p < 0,001$) als auch von präoperativ gemessen zum Follow-up ($p < 0,001$) eine Verkleinerung des Winkels mit $-14,1^\circ \pm 8,0^\circ$ (präoperativ), $-8,9^\circ \pm 7,1^\circ$ (postoperativ) und im Follow-up $-9,4^\circ \pm 6,6^\circ$. Auf für die 13- bis 15-Jährigen fanden sich präoperativ gemessen verglichen sowohl zu postoperativ gemessen ($p < 0,01$) als auch zum Follow-up-Röntgenbild ($p < 0,01$) eindeutige Verbesserungen.

Zur Bestimmung des lateralen Talo-Metatarsale-I-Winkels wurde in dieser Studie die Mittelachse des Talus genommen und eine Gerade in die Mittelachse des Metatarsale-I gelegt. Aus der Überschneidung der Geraden ergibt sich der laterale TMT-I-Winkel, im folgenden Meary genannt. Vanderwilde zeigte in seiner Studie mit 74 pädiatrischen Patient:innen Werte zwischen 7° und 18° für den Meary Winkel [95]. Hamel wiederum $-9,73^\circ \pm 3,88^\circ$ für das Normalkollektiv und $-28,87^\circ \pm 11,26^\circ$

und $-29,13^\circ \pm 7,61^\circ$ für die Gruppen der Kinder mit Pes planovalgus [90, 95]. In der Literatur gibt u. a. Wagner et al. Normwerte zwischen -4° und $+4^\circ$ an [37, 77]. Younger et al. bewiesen zudem die Signifikanz des Wertes in der Bildgebung zur Unterscheidung zwischen gesunden Füßen und Plattfüßen bei Erwachsenen [96].

Für die Daten dieser Arbeit konnte außer bei den 5- bis 8-Jährigen eine deutliche Verbesserung des Winkels nach subtalarer Schraubenarthrorise nachgewiesen werden. Dies korreliert mit den von Hamel 2010 veröffentlichten Ergebnissen vor und nach SSA [97].

Durch Addition des lateralen und in a. p.-Projektion gemessenen Talometatarsale-I-Winkels ergibt sich der Talo-Metatarsal-Index (TMT-Index) [39, 49].

2006 veröffentlichte Hamel die ersten erfassten Normwerte zum TMT-Index von durchschnittlich $-51,5^\circ$ bzw. $-50,7^\circ$ im Planovalgus-Kollektiv [39].

Der TMT-Index hat den Vorteil, dass der Pes planovalgus mehrdimensional abgebildet werden kann [39].

Für das Gesamtkollektiv konnte in der präoperativen Messung des Talo-Metatarsale-I-Winkels in der anterior-posterioren Projektion im Mittel $-14,2^\circ \pm 8,8^\circ$ festgestellt werden. Die Messung des TMT-I-Winkels zum postoperativen Kontrollzeitpunkt ergab $-8,9^\circ \pm 7,4^\circ$ ($p < 0,001$). Nach initialer Verbesserung zwischen präoperativem und postoperativem Zeitpunkt zeigte sich im Follow-up der Mittelwert von $-9,7^\circ \pm 7,2^\circ$ ($p < 0,001$) (siehe Abb. 12).

Der Talometatarsal-Index (TMT-Index) für das Gesamtkollektiv ergab in der präoperativen Messung im Mittel $-33,0^\circ \pm 13,5^\circ$. Postoperativ wurde im Mittel $-21,7^\circ \pm 9,8^\circ$ ($p < 0,001$) gemessen. Im Follow-up zeigte sich nach initialer Verbesserung zwischen präoperativem und postoperativem Zeitpunkt der Mittelwert von $-23,5^\circ \pm 10,6^\circ$ ($p < 0,001$). Insgesamt lassen sich diese Mittelwerte als signifikanter Effekt einstufen und zeigen somit die konstante Besserung des Parameters. Dies konnten auch Abbara-Czardybon et al. in ihrer Veröffentlichung mit einem Kollektiv von 35 Kindern und 68 durchgeführten Arthrorisen zeigen [52].

4.5 Vergleich Naviculocuboidaler Index und Talometatarsale Index

Ein weiteres Ziel neben der Verifizierung eines optimalen Operationszeitpunktes für die subtalare Schraubenarthrorise war es, herauszufinden, inwieweit sich der Naviculocuboidale Index als valides Messinstrument für die Pes-planovalgus-Deformität und insbesondere als Vergleichsindex für postoperative Verlaufskontrollen eignet.

Der Naviculocuboidale Index beschreibt das Alignment des Mittelfußes. Gebildet wird der NCI als Quotient aus der überlappenden Strecke vom Oberrand des Os cuboideum und dem überlappenden Unterrand des Os naviculare (siehe Abb. 18–21) [74]. Gemessen wird der NCI in der lateralen gewichtsbelasteten Röntgenaufnahme nach Simons und wird in Prozent ausgedrückt. Vorteil dieser Methode ist, dass sich die Fußlänge nicht als Einflussgröße darstellen kann, weil eine reine Betrachtung eines Längenmaßes durch Erstellung eines Quotienten und prozentualer Angabe umgangen wird [91].

In der Literatur finden sich unterschiedliche Methoden zur Berechnung des Naviculocuboidalen Index, daher ist ein genereller Vergleich schwierig. Davids et al. gab in seiner Studie einen Mittelwert von $47 \% \pm 13,8 \%$ für die Naviculocuboidale Überlappung an [61].

Für das Gesamtkollektiv konnte in der vorliegenden Studie gezeigt werden, dass sich der Index im präoperativen zum postoperativen Vergleich von durchschnittlich $45,2 \% \pm 15,6 \%$ zu postoperativ $24,3 \% \pm 12,3 \%$ bei einem p-Wert $< 0,001$ signifikant besserte. Auch hinsichtlich des Vergleichs präoperativ und Follow-up konnte eine signifikante Verbesserung des Index und somit verringerte Überlappung mit einem Mittelwert von $24,1 \% \pm 12,7 \%$ ($p < 0,001$) festgestellt werden. Für die Altersgruppe der 5- bis 8-Jährigen zeigte diese Studie im Vergleich präoperativ zu postoperativ zunächst eine statistisch signifikant verringerte Überlappung von Os cuboideum und Os naviculare. In der Follow-up-Kontrolle fand sich jedoch eine Befundverschlechterung mit erneuter Überlappung. Möglicherweise ist der Korrekturverlust durch eine noch nicht vollständige Fußentwicklung in dieser Altersgruppe diesem Effekt zuträglich [6].

In den Altersgruppen 9–12 Jahre und 13–15 Jahre verringerte sich die prozentuale Überlappung des NCI signifikant hinsichtlich der präoperativen auf die postoperativen Werte ($p < 0,001$), als auch im Vergleich der präoperativen zu den Follow-up-Werten. Hier lag das Signifikanzniveau bei $p < 0,001$.

Frenkel Rutenberg et al. maßen den NCI wie in dieser vorliegenden Arbeit. Sie verglichen gesunde Füße erwachsener Patient:innen mit Patient:innen mit asymptomatischen Plattfüßen und Patient:innen mit symptomatischen Plattfüßen und konnten in ihrer Studie zeigen, dass die Naviculocuboidale Überlappung in diesen drei Gruppen unterschiedlich ausgeprägt war [98]. Auffällig war, dass auch in ihrem Patientenkollektiv die Mehrzahl der Patient:innen männlich waren. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die Naviculocuboidale Überlappung für sowohl asymptomatische als auch symptomatische Plattfüße stärker ausgeprägt war als im Normalkollektiv. Kritisch anzumerken ist der Vergleich von pädiatrischen Patient:innen dieser Arbeit zu den adulten Patient:innen der Arbeit von Frenkel Rutenberg et al. [98].

Durch die SSA wird versucht das physiologische Alignment des Fußes wiederherzustellen. Korrelierend dazu passen die Daten in der Studie im Follow-up mit gesunden Füßen nahezu überein. In ihrer Studie mit 60 Kindern im Alter von durchschnittlich 10 Jahren mit hemiplegischer Cerebralparese veröffentlichten Davids et al. 2005 einen Mittelwert von $47 \% \pm 13,8 \%$ für die Naviculocuboidale Überlappung [61].

Ein genauer Vergleich ist durch das unterschiedliche Kollektiv nicht in Gänze möglich, da in der vorliegenden Studie Kinder mit neurologischen Plattfüßen ausgeschlossen wurden. Trotzdem lassen sich Parallelen erkennen.

Kritisch zu sehen im Vergleich mit der weiteren Literatur ist, dass dieser Index nur Daten aus der lateralen Röntgenaufnahme beinhaltet und somit eine gänzliche Abbildung dieser dreidimensionalen Fehlstellung nur eingeschränkt möglich ist. Dies wird bei Betrachtung der Studie von Hamel und Kinast zum TMT-Index deutlich. Dabei legen sie bei dem TMT-Index die Pathomorphologie zugrunde. Sie erfassen die Pes-planovalgus-Deformität in einer Maßzahl, die beide Röntgenebenen vereint und die Dimensionen des Plattfußes somit umfassender beschreibt [39].

4.6 Knöcherner Reifung

Im klinischen Alltag wird eine Indikationsstellung für die subtalare Schraubenarthrorise vom chronologischen Alter der Patient:innen mitbestimmt. Häufig ist die Entwicklung der Kinder jedoch sehr individuell, sodass das chronologische Alter nicht immer dem

Knochenalter oder biologischen Alter entspricht. Birkner beschrieb, dass die Skelettreifung und das Wachstum der Knochen von unterschiedlichen Gegebenheiten abhänge, aber dennoch gewissen Gesetzmäßigkeiten folge [68]. Für gewöhnlich ist die Skelettreifung synchron zum Reifegrad des Körpers. Es kann aber zu Verschiebungen in beide Richtungen durch Störungen in der hormonalen Homöostase kommen [68]. Weiterhin findet sich beim weiblichen Geschlecht eine bis zu 4 Jahre frühere Ossifikation als beim männlichen Geschlecht.

Nach Abgleich mit der Klassifikation nach Birkner wurde eine Neugruppierung nach dem Knochenalter vorgenommen. Diese zeigte ähnliche Ergebnisse zu den bestehenden Gruppen mit einer tendenziellen Verbesserung in der Knochenalter-Gruppe.

Dies lässt vermuten, dass das radiologische Outcome vom Grad der knöchernen Reifung des Skeletts abhängt. Es ist jedoch eine rechtzeitige Operation vor Abschluss des Knochenwachstums und der Skelettreifung, also vor Schluss der Epiphysenfugen, notwendig, um eine gewisse Lenkung zu erzielen und Anpassungsfähigkeit zu erhalten. Diese Hypothese müsste jedoch durch weitere Studien geprüft werden. Aktuell wird, soweit bekannt, in den behandelnden Kliniken routinemäßig das chronologische Alter der Patient:innen genutzt und zur Entscheidungsfindung bei Einleiten einer operativen Therapie gewählt. Eine Einstufung nach dem tatsächlichen Knochenalter hat sich bisher in den täglichen Abläufen in der Klinik noch nicht etabliert und ist im klinischen Alltag auch schwer durchzuführen. In der vorliegenden Arbeit konnte jedoch gezeigt werden, dass bei 14 von 50 Patient:innen eine Neueinstufung bei Divergenz zwischen chronologischem Alter und Knochenalter notwendig war [2]. Dies ist ein nicht zu vernachlässigender Anteil an der Gesamtpopulation. Weitere Untersuchungen mit größeren Fallzahlen und anderem Studiendesign wären dazu wünschenswert. Es bleibt abzuwarten, ob sich diese Anpassung langfristig durchsetzen wird. So lange wird sich an dem chronologischen Alter der Patient:innen und dem Erscheinungsbild der Epiphysenfugen im konventionellen Röntgenbild orientiert, wenn es um die obere Altersgrenze zur Operation geht. Meist zeigen sich verschmälerte Epiphysenfugen oder teils auch geschlossene Epiphysenfugen bereits im Alter von 13 Jahren. Nach Birkner ist der Abschluss der Ossifikation der Fußknochen regelhaft zwischen dem 17. und 19. Lebensjahr zu erwarten. Auch das Auftreten von Sesambeinen bezeichnet er als Reifezeichen des Skeletts [68].

4.7 Einflüsse des Alters zum Zeitpunkt der Operation auf das Outcome

Die Fußentwicklung schreitet in den ersten 3 Lebensjahren sehr schnell voran und der Fuß entwickelt sich in Form und Länge. Zunächst findet sich ein Fettpolster, das das mediale Fußlängsgewölbe bedeckt und den Fuß vor einer Überbeanspruchung bewahrt [4, 5]. Besonders nach Änderung der Belastungszonen des Fußes, zu Beginn des Laufens, entwickelt sich zunehmend ein mediales Längsgewölbe. In der Literatur wird davon ausgegangen, dass sich das mediale Längsgewölbe bis zu einem Alter von 6–10 Jahren entwickelt und danach keine dynamischen Prozesse mehr zu erwarten sind [5, 24, 60].

Bleiben diese Entwicklungsprozesse teilweise oder vollständig aus, so bleibt die Aufrichtung des Fußlängsgewölbes aus. Die genaue Entstehung des flexiblen kindlichen Plattfußes wird allerdings immer noch diskutiert. Weiterhin wichtig für die Entwicklung und Stabilisierung des medialen Längsgewölbes sind die Bänder und Muskeln. Zwischen dem 2. bis 10. Lebensjahr kommt es zur Straffung der Kapselbänder durch Quervernetzung der Kollagenfasern. Die aktive Querverspannung des Gewölbes wird durch die kurzen Fußmuskeln erreicht [15]. Für die normale Entwicklung ist eine ausreichende Beanspruchung der Fuß- und Beinmuskulatur unerlässlich.

Möglicherweise ist dieser Stand der Fußentwicklung und insbesondere der Entwicklung des Fußgewölbes ein wichtiger Aspekt für den operativen Erfolg der subtalaren Schraubenarthrorise. So würden sich die Erfolgsraten und stabilen Langzeitergebnisse nach erfolgter subtalarer Schraubenarthrorise in der Altersgruppe der 9- bis 12-Jährigen erklären. Zudem lässt sich vermuten, dass sich der kindliche Fuß zu diesem Zeitpunkt noch in einer vulnerablen Entwicklungsphase befindet und nach Korrektur in die physiologische Position eine weitere normale Entwicklung des Halte- und Stützapparates stattfinden kann. In der vorliegenden Studie verbesserten sich bei den 9- bis 12-jährigen Kindern alle untersuchten Winkelmaße sowie der Naviculocuboidale Index signifikant. Sehr deutlich zeigte sich dies für den Meary Winkel sowie den lateralen und anterior-posterioren Talocalcarearen Winkel. Eine ausreichende Verbesserung zeigte zudem der Calcaneusneigungswinkel, der sich aber geringfügig im postoperativen zum Follow-up-Vergleich verschlechterte. Sehr ähnliche Ergebnisse fanden sich auch in der Arbeit von De Pellegrin hinsichtlich des Calcaneusneigungswinkels [6].

Dies ist konform mit den bisherigen Ergebnissen in der Literatur. Studien von Kellermann et al. oder Arbab et al. bestätigten ähnlich gute radiologische Ergebnisse nach subtalarer Schraubenarthrorise [99, 100]. Die Altersspanne der in der Arbeit von Arbab et al. mit mittels SSA versorgten Plattfüße lag bei 9–14 Jahren [100]. Es erfolgte bei der Auswertung keine weitere Altersunterteilung. Eine Einschränkung im Vergleich mit der Studie von Arbab et al. sind die unterschiedlichen betrachteten Winkelmaße und Indizes. Der Costa-Bartani-Winkel wurde speziell in dieser Studie betrachtet, der in der vorliegenden Arbeit nicht eingeschlossen wurde. Nach Hamel et al. bildet dieser Winkel die Pes-planovalgus-Deformität teils auch nur unzureichend ab [91]. Bei Kellermann et al. wurden Patient:innen im Alter von 7 bis 14 Jahren mit einem Altersdurchschnitt von $10 \pm 2,2$ Jahren mittels subtalarer Schraubenarthrorise behandelt. Auch hier wurde die Analyse nicht dem Alter entsprechend strukturiert, jedoch ließ sich eine deutliche Zunahme der lateralen Sohlenfläche und des Druck-Zeit-Integrals in der durchgeführten pedographischen Untersuchung erkennen [99]. Kritisch zu sehen wäre hier die mittlere Follow-up-Zeit von $9,7 \pm 5,5$ Monaten, die eher kurz bemessen ist.

Der Naviculocuboidale Index zeigte im Vergleich zum Gesamtkollektiv in der Altersgruppe der 9- bis 12-Jährigen deutlich signifikante Verbesserungen in der postoperativen und Follow-up-Kontrolle.

4.8 Komplikationen

In der vorliegenden Arbeit stellte sich die subtalare Schraubenarthrorise als sichere Operationsmethode dar. Insgesamt gab es in dieser Studie in keiner Gruppe Komplikationen wie Frakturen, Materialausbruch und Materialversagen und -bruch, Wundheilungsstörungen oder postoperative Schmerzen.

In verschiedenen Vorstudien ließ sich zeigen, dass die Komplikationsraten bei subtalarer Schraubenarthrorise stark variierten. Dabei muss beachtet werden, dass bei den Vergleichen alle Arten von Sinus tarsi Implantaten inkludiert waren. Metcalfe et al. stellten fest, dass die Komplikationsrate nach subtalarer Arthrorise mit unterschiedlichen Implantaten zwischen 4,8 %–18,6 % rangierte [50]. Mosca berichtet über Komplikationsraten bis 30 % nach subtalarer Schraubenarthrorise [13]. Auch Über- und Unterkorrekturen wurden beschrieben [12, 20, 51, 52]. De Pellegrin zeigte in seiner

Studie, dass sich Überkorrekturen in den ersten 6 Monaten spontan korrigierten, wobei bei Unterkorrekturen die Schraube im Durchschnitt 8 Monate eher entfernt wurde. Auch postoperative Schmerzen lagen bei De Pellegrin nur passager in den ersten 20 Tagen postoperativ vor, danach wurde diese Komplikation nicht mehr angegeben [12]. Nun lässt sich hinterfragen, inwieweit der Zeitpunkt der Feststellung die Häufigkeit der Komplikationen beeinflusst. In der vorliegenden Studie wurde die postoperative Kontrolle im Durchschnitt nach 6,3–8,5 Monaten durchgeführt, sodass zu diesem Zeitpunkt postoperative Schmerzen der ersten 20 Tage gegebenenfalls nicht mehr als so gravierend erinnert wurden. Dies ist somit kritisch zu sehen. Eine Implantatmigration in den Processus tali lateralis ist vermutlich aufgrund des auflastenden Körpergewichts selten.

Andere Autoren beschrieben die Komplikationsraten mit 0 % – 6,3 % deutlich niedriger [6, 10, 101]. Richter und Zech wiederum berichteten in ihrer 2012 veröffentlichten Studie auch von einer Komplikationsrate von Null, jedoch dürfen hier die insgesamt geringen Fallzahlen von 18 Patient:innen mit n = 18 Füßen nicht außer Acht gelassen werden [49]. Interessanterweise gab es in dieser Studie neben den ausgebliebenen Komplikationen auch keinen Hinweis auf einen relevanten Korrekturverlust in dem untersuchten Kollektiv.

Mit einer höheren Fallzahl und einem im Durchschnitt längeren Follow-up-Zeitraum in der vorliegenden Arbeit könnte eine präzisere Aussagefähigkeit getroffen werden. Verglichen mit der Studie von Richter und Zech, in der das Follow-up im Schnitt 6 Monate nach Implantatentfernung erfolgte, findet sich in dieser Studie eine Follow-up-Zeit nach Implantatentfernung von im Durchschnitt 2 Jahren. Dies könnte zusätzlich zu den Altersgruppeneinteilungen erklären, warum sich insgesamt häufiger ein Korrekturverlust finden lässt.

4.9 Limitationen

Kritisch zu sehen ist, dass es keine einheitlichen Zeitpunkte für eine postoperative und Follow-up-Röntgenkontrolle in dieser Studie gab, so wäre eine bessere Vergleichbarkeit innerhalb der Gesamtkohorte und zwischen den einzelnen Altersgruppen möglich gewesen. Dies war leider im Rahmen des retrospektiven Studiendesigns nicht

beeinflussbar. Für weitere Studien wäre daher eine prospektive Fall-Kontrollstudie wünschenswert.

Zudem ist anzumerken, dass sich das initial noch größere Patientenkollektiv aufgrund der Ausschlusskriterien wie fehlender Röntgenbilder verkleinert hat. Bei prospektiv geplanten Studien wäre eine Erinnerung an die anstehende Kontrolle sinnvoll. Dies war aufgrund des retrospektiven Studiendesigns nicht möglich. So muss dazu angemerkt werden, dass die Vergleichbarkeit der Altersgruppen miteinander aufgrund unterschiedlicher Stichprobenumfänge eingeschränkt ist. Der Vergleich innerhalb der Altersgruppe bleibt davon unbeeinflusst.

Aufgrund der Zahl der durchgeführten statistischen Tests kann ein alpha-Fehler mit einer Wahrscheinlichkeit von 5 % nicht ausgeschlossen werden. Auch muss kritisch betrachtet werden, dass nicht alle Daten einzelner Winkel normalverteilt waren. Daher sind diese nur eingeschränkt zu betrachten. Die Gesamtaussage dieser Studie ändert sich aber nicht. Eine allgemeine Limitation der Studie besteht darin, dass die Messungen der Winkelmaße und Indizes nur von zwei Untersuchern erfolgten und keine weitere dritte Messung vorliegt. Zusätzlich ist zu beanstanden, dass die Daten in dieser Studie nur auf den radiologischen Messungen beruhen und nicht wie in anderen Studien mittels klinischer Scores weitere Daten systematisch miterfasst und einbezogen wurden. Auch fehlt die systematische Erfassung des subjektiven Beschwerdebildes und der Schmerzwahrnehmung mittels Fragebogen der *American Orthopaedic Foot and Ankle Society* (AOFAS), der in anderen Studien genutzt wurde [102].

4.10 Fazit

Die subtalare Schraubenarthrorise ist eine verbreitete und sichere Operationsmethode zur Korrektur des flexiblen kindlichen Knick-Senkfußes. Diese zeichnet sich durch geringe Invasivität, niedrige Komplikationsraten und moderate Kosten aus [12, 20, 49-51].

Trotz eines initial großen Patientenkollektivs, das sich aufgrund der Ausschlusskriterien wie fehlender Röntgenbilder verkleinert hat, lässt sich feststellen, dass die SSA in der Altersgruppe der 9- bis 12-jährigen Patient:innen in Summe das beste Korrekturergebnis des flexiblen kindlichen Plattfußes erbrachte. Somit scheint der optimale Behandlungszeitraum zwischen 9 und 12 Jahren zu liegen [2]. Vermutlich ist eine

Behandlung mittels subtalarer Schraubenarthrorise vor dem Alter von 9 Jahren mit einer erhöhten Wahrscheinlichkeit einer erneuten Verschlechterung des flexiblen kindlichen Knick-Senkfußes assoziiert. Für die Altersgruppe der 13- bis 15-Jährigen konnten nur teilweise erfolgreiche Korrekturergebnisse erzielt werden. In diesem Kollektiv zeigte sich in dieser retrospektiven Studie auch eine wieder auftretende Verschlechterung zum Zeitpunkt der Follow-up-Kontrolle.

Bei keiner Person traten bis zur letzten dokumentierten Follow-up-Kontrolle Komplikationen wie Wundheilungsstörungen, postoperative Schmerzen, Implantatversagen oder Frakturen auf.

Der Naviculocuboidale Index zeigte für das Gesamtkollektiv in Summe einen deutlichen Effekt im Sinne einer reduzierten prozentualen Überlappung für die postoperative und Follow-up-Röntgenkontrolle. Anzumerken ist jedoch eine Verschlechterung vom postoperativen zum Follow-up-Zeitpunkt für die Altersgruppe der 5- bis 8-Jährigen. Trotzdem zeigt sich der NCI als valider Parameter zur Abgrenzung des gesunden Fußes zum Pes planovalgus sowie zur Kontrolle des Operationsergebnisses. Im Vergleich zum NCI ist der TMT-Index zur Abgrenzung und Kontrolle dem NCI durch die Erfassung der Mehrdimensionalität der Fußfehlstellung möglicherweise überlegen. Hierzu bedarf es weiterer, insbesondere prospektiver Fall-Kontrollstudien zur Prüfung der in dieser Studie erhobenen Ergebnisse.

4.11 Ausblick

Als ein weiterer Einflussfaktor auf die Ausbildung der Pes-planovalgus-Deformität beziehungsweise die Entwicklung einer physiologischen Fußstellung wird in der Literatur neben dem Geschlecht auch das Übergewicht diskutiert. Dazu konnten Pfeiffer et al. nachweisen, dass Adipositas beim männlichen Geschlecht mit dem überdurchschnittlich häufigen Auftreten von symptomatischen flexiblen Knick-Senkfüßen assoziiert war [28]. Neben dem Einfluss der Adipositas auf die reduzierte Ausbildung eines medialen Längsgewölbes oder die Fußentwicklung im Allgemeinen, ist es bekannt, dass insbesondere Jungen mit erhöhtem Körpergewicht zu weiteren Fehlentwicklungen neigen. Dies lässt sich bei der Epiphyseolysis capitis femoris, einer Wachstumsfugenlösung des Hüftkopfes, oder auch der Achsenveränderungen wie der

vermehrten Außenrotation des Unterschenkels zeigen [103, 104]. Eine vermehrte Außenrotation des Unterschenkels führt zu einer Valgisierung des Rückfußes und so zur Abflachung des medialen Fußgewölbes. Dies kann allein oder in Kombination wiederum zu behandlungsbedürftigen symptomatischen flexiblen Knick-Senkfüßen führen. In der vorliegenden Studie waren 68 % des Gesamtkollektivs Jungen. Zumindest für diese Studie lässt sich der prädiktive Faktor „männliches Geschlecht“ für das Auftreten von symptomatischen flexiblen Plattfüßen vermuten. Eine prospektive Studie mit einem größeren Patientenkollektiv beider Geschlechter wäre hierzu hilfreich. Hinsichtlich des Faktors Adipositas kann aufgrund des retrospektiven Studiendesigns dieser Arbeit rückblickend keine Aussage mehr getroffen werden. Auch dies wäre ein weiterer interessanter Aspekt für folgende Studien.

Insgesamt lässt sich dadurch aber ausdrücken, dass in der Therapie des symptomatischen flexiblen Knick-Senkfußes der ganze Mensch gesehen werden muss und eine holistische Behandlung notwendig ist, um das Risiko eines Rezidivs zu minimieren.

5 Literatur- und Quellenverzeichnis

1. Kubo, H., et al., *Radiological outcome after treatment of juvenile flatfeet with subtalar arthroereisis: a matched pair analysis of 38 cases comparing neurogenic and non-neurogenic patients*. J Child Orthop, 2019. **13**(4): p. 346-352.
2. Kubo, H., et al., *Outcome after subtalar screw arthroereisis in children with flexible flatfoot depends on time of treatment: Midterm results of 95 cases*. J Orthop Sci, 2019.
3. Harris, E.J., *The natural history and pathophysiology of flexible flatfoot*. Clin Podiatr Med Surg, 2010. **27**(1): p. 1-23.
4. Westhoff, B., K. Weimann-Stahlschmidt, and R. Krauspe, *Der Knicksenkfuß im Kindesalter - Pathomorphologie, Spontanverlauf, konservative Behandlungsansätze*. Fuss & Sprunggelenk, 2010. **8**: p. 5-15.
5. Hefti, F., *Flexible arch of the foot*. Der Orthopäde, 1999. **28**(2): p. 159.
6. De Pellegrin, M., et al., *Subtalar extra-articular screw arthroereisis (SESA) for the treatment of flexible flatfoot in children*. J Child Orthop, 2014. **8**(6): p. 479-87.
7. Simons, G.W., *A standardized method for the radiographic evaluation of clubfeet*. Clin Orthop Relat Res, 1978(135): p. 107-18.
8. Abbara-Czardybon, M., et al., *[Options and limits of subtalar arthroereisis in childhood]*. Orthopade, 2013. **42**(1): p. 12-9.
9. Döderlein, L., W. Wenz, and U. Schneider, *Der Knickplattfuß*, in *Fussdeformitäten: Der Knickplattfuß*. 2002, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg. p. 1-7.
10. Hagen, L., et al., *Pedobarographic changes during first month after subtalar extra-articular screw arthroereisis (SESA) operation of juvenile flexible flatfoot*. Arch Orthop Trauma Surg, 2020. **140**(3): p. 313-320.
11. Correll, J. and N. Berger, *[Diagnosis and treatment of disorders of the foot in children]*. Orthopade, 2005. **34**(10): p. 1061-72; quiz 1073-4.
12. De Pellegrin, M., *[Subtalar screw-arthroereisis for correction of flat foot in children]*. Orthopade, 2005. **34**(9): p. 941-53, quiz 954.
13. Mosca, V.S., *Flexible flatfoot in children and adolescents*. J Child Orthop, 2010. **4**(2): p. 107-21.
14. Putz, R. and M. Müller-Gerbl, *[Functional anatomy of the foot]*. Orthopäde, 1991(0085-4530 (Print)): p. 2-20.
15. Benninghoff, A., *Anatomie : makroskopische Anatomie, Histologie, Embryologie, Zellbiologie / Bd. 1 : Zellen- und Gewebelehre, Entwicklungslehre, Skelett- und Muskelsystem, Atemsystem, Verdauungssystem, Harn- und Genitalsystem*. 17., durchges. Aufl. ed, ed. A. Benninghoff, D. Drenckhahn, and B. Christ. 2008, München u.a.: Elsevier, Urban & Fischer.
16. Schiebler, T.H., *Anatomie : Histologie, Entwicklungsgeschichte, makroskopische und mikroskopische Anatomie, Topographie*. 2005, Belgium, Europe: Springer. 900.
17. Flores, D.V., et al., *Adult Acquired Flatfoot Deformity: Anatomy, Biomechanics, Staging, and Imaging Findings*. Radiographics, 2019. **39**(5): p. 1437-1460.
18. Rein, S., et al., *Distribution of sensory nerve endings around the human sinus tarsi: a cadaver study*. J Anat, 2014. **224**(4): p. 499-508.
19. Bartness, T.J., et al., *Sensory and sympathetic nervous system control of white adipose tissue lipolysis*. Mol Cell Endocrinol, 2010. **318**(1-2): p. 34-43.

20. Bernasconi, A., F. Lintz, and F. Sadile, *The role of arthroereisis of the subtalar joint for flatfoot in children and adults*. EFORT Open Rev, 2017. **2**(11): p. 438-446.
21. De Pellegrin, M., *15-jährige Erfahrung mit der subtalaren Schrauben-Arthrorise beim kindlichen Plattfuß*. Fuß & Sprunggelenk, 2007. **5**(1): p. 12-20.
22. Hamel, J., *Wachstumslenkung durch Arthrorise*, in *Der kindlich-jugendliche flexible Knick-Plattfuß: Für Orthopäden, Kinderorthopäden, Fußchirurgen und Kinderärzte*, J. Hamel, Editor. 2022, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg. p. 29-34.
23. Schünke, M., *Prometheus : LernAtlas der Anatomie / <AllAna> : Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem : 182 Tabellen*. 2., überarb. und erw. Aufl. ed, ed. M. Schünke, et al. 2007, Stuttgart u.a.: Thieme.
24. Volpon, J.B., *Footprint analysis during the growth period*. J Pediatr Orthop, 1994. **14**(1): p. 83-5.
25. Bosch, K., J. Gerss, and D. Rosenbaum, *Preliminary normative values for foot loading parameters of the developing child*. Gait Posture, 2007. **26**(2): p. 238-47.
26. Dare, D.M. and E.R. Dodwell, *Pediatric flatfoot: cause, epidemiology, assessment, and treatment*. Curr Opin Pediatr, 2014. **26**(1): p. 93-100.
27. Hefti, F., *Kinderorthopädie in der Praxis*. 2006: Springer Heidelberg.
28. Pfeiffer, M., et al., *Prevalence of flat foot in preschool-aged children*. Pediatrics, 2006. **118**(2): p. 634-9.
29. Wirth, C.-J., *7.6 Pes planovalgus beim Kind und Jugendlichen*, in *Fuß*. 2002, Georg Thieme Verlag KG: Stuttgart. p. 158.
30. Hoppen, T., *Bestandsaufnahme gut 150 Jahre nach der Erstbeschreibung*. Pädiatrie, 2021. **33**(1): p. 40-45.
31. Merrick, J., et al., *Musculoskeletal Problems in Down Syndrome European Paediatric Orthopaedic Society Survey: The Israeli Sample*. Journal of Pediatric Orthopaedics B, 2000. **9**(3).
32. Solomon, A.D., K.B. Avery, and R.B. Weber, *Surgical treatment of the pes planovalgus foot secondary to Ehlers–Danlos Syndrome with the Maxwell–Brancheau subtalar arthroereisis*. The Foot, 2002. **12**(3): p. 150-157.
33. Rao, U.B. and B. Joseph, *The influence of footwear on the prevalence of flat foot. A survey of 2300 children*. J Bone Joint Surg Br, 1992. **74**(4): p. 525-7.
34. Hefti, F. and R. Brunner, *[Flatfoot]*. Orthopade, 1999. **28**(2): p. 159-72.
35. Fregien, B., *Tarsale Coalitiones – aktuelle Literaturübersicht*. Fuß & Sprunggelenk, 2013. **11**(2): p. 101-105.
36. Giannini, S., et al., *Operative treatment of flatfoot with talocalcaneal coalition*. Clin Orthop Relat Res, 2003(411): p. 178-87.
37. Wagner, F., R. Hofbauer, and J. Matussek, *[Flexible flatfoot in children: variation within normal range or need for treatment?]*. Orthopade, 2013. **42**(6): p. 455-68.
38. Szeimies, U., *Bildgebende Diagnostik des Fußes*. 1. Aufl. ed, ed. U. Szeimies. 2012, Stuttgart u.a.: Thieme. 12-21; 79-80.
39. Hamel, J. and C. Kinast, *Der TMT-Index zur radiologischen Quantifizierung von Planovalgus-Deformitäten*. Fuß & Sprunggelenk, 2006. **4**(4): p. 221-226.
40. Schmidt, C. and K. Parsch, *[Pediatric flexible flatfoot]*. Orthopade, 2003. **32**(3): p. 253-62; quiz 263.
41. Jani, L., *[Pediatric flatfoot]*. Orthopade, 1986. **15**(3): p. 199-204.
42. Vulcano, E., C. Maccario, and M.S. Myerson, *How to approach the pediatric flatfoot*. World J Orthop, 2016. **7**(1): p. 1-7.

43. Wenger, D.R., et al., *Corrective shoes and inserts as treatment for flexible flatfoot in infants and children*. J Bone Joint Surg Am, 1989. **71**(6): p. 800-10.
44. Döderlein, L., W. Wenz, and U. Schneider, *Therapiealgorithmen*, in *Fussdeformitäten: Der Knickplattfuß*. 2002, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, p. 287-294.
45. LOWMAN, C.L., *AN OPERATIVE METHOD FOR CORRECTION OF CERTAIN FORMS OF FLATFOOT*. Journal of the American Medical Association, 1923. **81**(18): p. 1500-1502.
46. Evans, D., *Calcaneo-valgus deformity*. J Bone Joint Surg Br, 1975. **57**(3): p. 270-8.
47. Grice, D.S., *An extra-articular arthrodesis of the subastragalar joint for correction of paralytic flat feet in children*. J Bone Joint Surg Am, 1952. **34** a(4): p. 927-40; passim.
48. Bollmann, C., A. Franz, and J. Raabe, *[The Grice-Green subtalar arthrodesis using a fibular bone graft--follow-up of 92 patients]*. Z Orthop Unfall, 2015. **153**(1): p. 93-8.
49. Richter, M. and S. Zech, *Arthrorisis with calcaneostop screw in children corrects Talo-1st Metatarsal-Index (TMT-Index)*. Foot Ankle Surg, 2013. **19**(2): p. 91-5.
50. Metcalfe, S.A., F.L. Bowling, and N.D. Reeves, *Subtalar joint arthroereisis in the management of pediatric flexible flatfoot: a critical review of the literature*. Foot Ankle Int, 2011. **32**(12): p. 1127-39.
51. Roth, S., et al., *Minimally invasive calcaneo-stop method for idiopathic, flexible pes planovalgus in children*. Foot Ankle Int, 2007. **28**(9): p. 991-5.
52. Abbara-Czardybon, M., D. Frank, and D. Arbab, *[The talus stop screw arthroereisis for flexible juvenile pes planovalgus]*. Oper Orthop Traumatol, 2014. **26**(6): p. 625-31.
53. Kleipool, R.P., et al., *The dimensions of the tarsal sinus and canal in different foot positions and its clinical implications*. Clin Anat, 2017.
54. Herold, D., *Operation nach Strayer-Thom*. OP-Journal, 2007. **23**(2): p. 163.
55. Barske, H.L., et al., *Current concepts review: isolated gastrocnemius contracture and gastrocnemius recession*. Foot Ankle Int, 2012. **33**(10): p. 915-21.
56. Westhoff, B., K. Weimann-Stahlschmidt, and R. Krauspe, *[Spastic equinus foot]*. Orthopade, 2011. **40**(7): p. 637-47.
57. Brunner, R., et al., *Acute and long-term effects on muscle force after intramuscular aponeurotic lengthening*. Clin Orthop Relat Res, 2000(378): p. 264-73.
58. Molund, M., et al., *Validation of a New Device for Measuring Isolated Gastrocnemius Contracture and Evaluation of the Reliability of the Silfverskiöld Test*. Foot Ankle Int, 2018. **39**(8): p. 960-965.
59. Hase, C., *Die orthopädische Untersuchung des ausgewachsenen Fußes*. Orthopädie und Unfallchirurgie up2date, 2015. **153**(06): p. 505-520.
60. Carr, J.B., 2nd, S. Yang, and L.A. Lather, *Pediatric Pes Planus: A State-of-the-Art Review*. Pediatrics, 2016. **137**(3): p. 1-10.
61. Davids, J.R., T.W. Gibson, and L.I. Pugh, *Quantitative segmental analysis of weight-bearing radiographs of the foot and ankle for children: normal alignment*. J Pediatr Orthop, 2005. **25**(6): p. 769-76.
62. Leiss, F., et al., *[Clinical examination of the foot]*. Orthopade, 2019. **48**(6): p. 541-552.
63. Rose, G.K., E.A. Welton, and T. Marshall, *The diagnosis of flat foot in the child*. J Bone Joint Surg Br, 1985. **67**(1): p. 71-8.

64. Myerson, M., *Adult acquired flat foot deformity*. 2003: WB Saunders.
65. Wurm, M., et al., *Clinical Examination of Foot and Ankle Joint*. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 2016. **2016**: p. 111-116.
66. Exner, G.U., *Normalwerte in Wachstum und Entwicklung : die Basis für Diagnostik und Therapie ; 29 Tabellen*. 2., vollst. überarb. und aktualisierte Aufl. ed, ed. G.U. Exner. 2003, Stuttgart u.a.: Thieme.
67. Simons, G.W., *Analytical radiography of club feet*. J Bone Joint Surg Br, 1977. **59-B**(4): p. 485-9.
68. Birkner, R., *Das typische Röntgenbild des Skeletts : Standardbefunde und Varietäten vom Erwachsenen und Kind ; 803 Röntgenbilder in Originalgröße*. 4. Aufl. ed, ed. R. Birkner. 2009, München: Elsevier, Urban & Fischer.
69. Bourdet, C., et al., *Flatfoot in children and adolescents. Analysis of imaging findings and therapeutic implications*. Orthop Traumatol Surg Res, 2013. **99**(1): p. 80-7.
70. Döderlein, L., W. Wenz, and U. Schneider, *Praxis der Therapie, in Fussdeformitäten: Der Knickplattfuß*. 2002, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg. p. 233-284.
71. Waldt, S., *4 Fuß*, in *Messverfahren und Klassifikationen in der muskuloskelettalen Radiologie*. 2011, Georg Thieme Verlag KG: Stuttgart.
72. Yates, B. and L.M. Merriman, *Merriman's Assessment of the Lower Limb*. 2009: Churchill Livingstone/Elsevier.
73. Chen, C.H., et al., *The correlation between selected measurements from footprint and radiograph of flatfoot*. Arch Phys Med Rehabil, 2006. **87**(2): p. 235-40.
74. Lee, K.M., et al., *Reliability and validity of radiographic measurements in hindfoot varus and valgus*. J Bone Joint Surg Am, 2010. **92**(13): p. 2319-27.
75. Aebi, J., M. Horisberger, and A. Frigg, *Radiographic Study of Pes Planovarus*. Foot Ankle Int, 2017. **38**(5): p. 526-531.
76. Arbab, D., et al., *[Subtalare Screw Arthroereisis for the Treatment of Symptomatic, Flexible Pes Planovalgus]*. Z Orthop Unfall, 2017.
77. Waldt, S., *Messverfahren und Klassifikationen in der muskuloskelettalen Radiologie*. 2. unveränderte Auflage ed. 2017, Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
78. Zollinger, H. and J. Fellmann, *[Natural course of juvenile foot deformities]*. Orthopade, 1994. **23**(3): p. 206-10.
79. Arnold, H. and J. Weber, *Die subtalare Arthrorese mittels Endorthese zur Behandlung des „idiopathischen“ kindlichen Pes plano-valgus-Indikation und Ergebnisse*. Fuß & Sprunggelenk, 2010. **8**(4): p. 253-258.
80. Viladot, A., *Surgical treatment of the child's flatfoot*. Clin Orthop Relat Res, 1992(283): p. 34-8.
81. Bernius, P., *Sensomotorische Einlagenversorgung – was ist daran neu, was ist alt bekannt?* Fuß & Sprunggelenk, 2010. **8**(1): p. 16-27.
82. Hefti, F., *Kinderorthopädie in der Praxis [Elektronische Ressource]*. 3., vollständig überarbeitete Auflage ed, ed. F. Hefti. 2014, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
83. Giannini, S., M. Girolami, and F. Ceccarelli, *The surgical treatment of infantile flat foot. A new expanding endo-orthotic implant*. Ital J Orthop Traumatol, 1985. **11**(3): p. 315-22.
84. Chipaux, M., et al., *Epilepsy diagnostic and treatment needs identified with a collaborative database involving tertiary centers in France*. Epilepsia, 2016. **57**(5): p. 757-69.

85. Benedetti, M.G., et al., *Diagnosis of flexible flatfoot in children: a systematic clinical approach*. Orthopedics, 2011. **34**(2): p. 94.
86. Ceccarini, P., et al., *The arthroereisis procedure in adult flexible flatfoot grade IIA due to insufficiency of posterior tibial tendon*. Foot Ankle Surg, 2018. **24**(4): p. 359-364.
87. Viladot Voegeli, A., et al., *Results of subtalar arthroereisis for posterior tibial tendon dysfunction stage IIA1. Based on 35 patients*. Foot Ankle Surg, 2018. **24**(1): p. 28-33.
88. Zhu, Y. and X.Y. Xu, *Treatment of Stage II Adult Acquired Flatfoot Deformity With Subtalar Arthroereisis*. Foot Ankle Spec, 2015. **8**(3): p. 194-202.
89. Ozan, F., et al., *Symptomatic flexible flatfoot in adults: subtalar arthroereisis*. Ther Clin Risk Manag, 2015. **11**: p. 1597-602.
90. Johannes, H., *Die Calcaneostop-Arthrorise – eine retrospektive klinische Studie mit Komplikations-Analyse*. Fuß & Sprunggelenk, 2010. **8**(1): p. 35-41.
91. Hamel, J., H. Horterer, and N. Harrasser, *[The talometatarsal-index ("TMT-Index") : A valuable X-ray parameter for differentiating between normal feet and planovalgus deformity in children and adolescents]*. Orthopade, 2021. **50**(6): p. 481-488.
92. Nelson, S.C., D.M. Haycock, and E.R. Little, *Flexible flatfoot treatment with arthroereisis: radiographic improvement and child health survey analysis*. J Foot Ankle Surg, 2004. **43**(3): p. 144-55.
93. Indino, C., et al., *Effectiveness of subtalar arthroereisis with endorthesis for pediatric flexible flat foot: a retrospective cross-sectional study with final follow up at skeletal maturity*. Foot Ankle Surg, 2020. **26**(1): p. 98-104.
94. Ruiz-Picazo, D., et al., *Radiographic and Functional Results following Subtalar Arthroereisis in Pediatric Flexible Flatfoot*. Adv Orthop, 2019. **2019**: p. 5061934.
95. Vanderwilde, *Measurements on radiographs of the foot in normal infants and children*. Journal of Bone & Joint Surgery - American Volume, 1988. **70**(3): p. 407-415.
96. Younger, A.S., B. Sawatzky, and P. Dryden, *Radiographic assessment of adult flatfoot*. Foot Ankle Int, 2005. **26**(10): p. 820-5.
97. Hamel, J., *Radiologisch-dokumentierte Korrekturereffekte beim kindlichen Pes planovalgus mit der Calcaneostop-Arthrorise und der Calcaneus-Verlängerungosteotomie*. Fuß & Sprunggelenk, 2010. **8**(1): p. 43-47.
98. Frenkel Rutenberg, T., et al., *Lateral Column Lengthening for Flexible Flat Foot: Was It Short to Begin With?* Isr Med Assoc J, 2021. **23**(8): p. 506-509.
99. Kellermann, P., et al., *Calcaneo-stop procedure for paediatric flexible flatfoot*. Arch Orthop Trauma Surg, 2011. **131**(10): p. 1363-7.
100. Arbab, D., et al., *[Subtalare Screw Arthroereisis for the Treatment of Symptomatic, Flexible Pes Planovalgus]*. Z Orthop Unfall, 2018. **156**(1): p. 93-99.
101. Jerosch, J., J. Schunck, and H. Abdel-Aziz, *The stop screw technique--a simple and reliable method in treating flexible flatfoot in children*. Foot Ankle Surg, 2009. **15**(4): p. 174-8.
102. Kostuj, T., et al., *Analysis of agreement between the German translation of the American Foot and Ankle Society's Ankle and Hindfoot Scale (AOFAS-AHS) and the Foot Function Index in its validated German translation by Naal et al. (FFI-D)*. Arch Orthop Trauma Surg, 2014. **134**(9): p. 1205-10.
103. Krauspe, R., K. Seller, and B. Westhoff, *[Epiphyseolysis capitis femoris]*. Z Orthop Ihre Grenzgeb, 2004. **142**(5): p. R37-52; quiz R53-6.

104. Westhoff, B., A. Wild, and R. Krauspe, [*Development of the leg axis in childhood and treatment options for deformities near the knee joint*]. *Orthopade*, 2002. **31**(12): p. 1198-208; quiz 1208-9.

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn PD Dr. med. Bernd Bittersohl für die intensive Betreuung bei der Umsetzung der gesamten Arbeit und das Motivieren mein wissenschaftliches Denken und Arbeiten weiterzuentwickeln. Herrn Univ.-Prof. Dr. med. Rüdiger Krauspe sowie Herrn PD Dr. med. Hakan Pilge danke ich für die Überlassung des interessanten Themas und das damit ausgedrückte Vertrauen. Ich bedanke mich außerdem herzlich bei Herrn PD Dr. med. Hannes Kubo für die tatkräftige Unterstützung bei Fragen und sein offenes Ohr sowie die Gespräche, die diese Arbeit vorangebracht haben. Auch möchte ich Herrn Univ.-Prof. Dr. med. Joachim Windolf meinen besonderen Dank aussprechen für die Ermöglichung der Promotion in seiner Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie des Universitätsklinikums Düsseldorf.

Besonders möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die mir die Möglichkeit gegeben haben, meinen Traum zu verwirklichen und Ärztin zu werden. Gleicher Dank gilt meinen Geschwistern, die mich auch bedingungslos unterstützt und mir stets mit Rat zur Seite gestanden haben.

Danken möchte ich außerdem meinen Freund:innen, Kommiliton:innen und Kolleg:innen, die mich durch mein Studium und in der Weiterbildungszeit begleitet haben und die bei der Anfertigung meiner Dissertation immer ein offenes Ohr hatten oder ein aufbauendes Wort gefunden haben.