

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

Beurteilung der Effektivität der Trochanterapophyseodese mittels zwei
Schrauben bei Kindern mit unilateralem Morbus Perthes

Dissertation

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

vorgelegt von
Ann-Carolin Osterholt
2024

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

gez.:

Dekan: Prof. Dr. med. Nikolaj Klöcker

Erstgutachterin: Prof. Dr. med. Bettina Westhoff

Zweitgutachter: PD Dr. med. Christoph Schleich

Diese Dissertation widme ich meinem verstorbenem Papa (*24.11.1942, †14.05.2021)

*Das Schönste, was ein Mensch hinterlassen kann,
ist ein Lächeln in den Gesichtern derjenigen, die an ihn denken*

Zusammenfassung

Im Rahmen der Erkrankung Morbus Perthes, eine avaskuläre Knochennekrose des kindlichen Hüftkopfes, kann es durch den verfrühten Schluss der Epiphysenfuge am Kopf-Hals-Übergang und ungebremsen Wachstum des Trochanter majors zu einem Trochanterhochstand kommen. Dies führt zu biomechanischen Veränderungen im Hüftgelenk. Eine Option dem Trochanterhochstand bei ausreichendem Wachstumspotenzial entgegenzuwirken, ist die Trochanterapophyseodese. Dieses Verfahren ist jedoch nicht allgemein etabliert, sodass es keine einheitlichen Ergebnisse in Bezug auf Effektivität, Wahl des Implantates und Zeitpunkt der Durchführung der Operation (OP) gibt.

Ziel dieser vorliegenden Arbeit war es die Ergebnisse und somit die Effektivität der in der Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie des Universitätsklinikums Düsseldorf durchgeführten Trochanterapophyseodese röntgenologisch zu evaluieren.

Für die Studie wurden retrospektiv 46 Patienten, 33 männlich und 13 weiblich, mit einem Durchschnittsalter von $8 \pm 1,3$ Jahren zum Zeitpunkt der OP, mit unilateralem Morbus Perthes untersucht, bei denen eine Trochanterapophyseodese mittels zwei Schrauben und Kürettage der Fuge durchgeführt worden ist. Es erfolgte eine radiologische Vermessung der prä- und postoperativ angefertigten Beckenübersichtsaufnahmen bis zur Adoleszenz über einen Nachbeobachtungszeitraum von durchschnittlich 3,5 Jahren. Dabei diente die gesunde Hüfte als Kontrollseite. Folgende Parameter wurden bestimmt: Trochanterhöhe (TH), artikulotrochantäre Distanz (ATD) und Centrum-Trochanter-Distanz (CTD). Die Auswertung umfasste einen Vergleich zwischen erkrankter und gesunder Hüfte über den gesamten Verlauf bis zur Adoleszenz. Der Einfluss des Geschlechts sowie des Alters (< 8 und ≥ 8 Jahre) wurde ebenfalls untersucht.

Durch die Trochanterapophyseodese konnte eine signifikante Hemmung des Trochanterwachstums um 28,9%, gemessen an der TH, erzielt werden ($p < 0,01$). Die Regressionsanalyse zeigte eine Hemmung des Trochanterwachstums um 0,92 mm pro Jahr. ATD und CTD der gesunden und operierten Hüften näherten sich über den gesamten Beobachtungszeitraum an. Gemessen an der ATD und CTD erzielten 31,8% ein optimales OP-Ergebnis.

Zusammenfassend zeigte die Trochanterapophyseodese positive Effekte zur Prophylaxe des Trochanterhochstandes und stellt ein effektives Verfahren zur Hemmung des Trochanterwachstums bei ausreichendem Wachstumspotenzial dar.

Um die biomechanische und funktionelle Verbesserung nach durchgeführter Trochanterapophyseodese zu eruieren, sollten in weiteren Studien die vorliegenden röntgenologischen Daten mit den klinischen und ganganalytischen Daten korreliert werden.

Summary

In the context of Legg-Calvé-Perthes disease (LCPD), an osteonecrosis of the femoral head presenting at childhood, a relative greater trochanteric overgrowth by premature physeal closure of the proximal femoral physis can occur, which can cause biomechanical impairment of the hip joint. For prevention there is the possibility to slow down the growth in skeletally immature patients by greater trochanteric epiphysiodesis. But this procedure is not generally established, so there is still no consensus regarding the effectiveness, use of implant and timing of surgery.

The aim of this study was to determine radiologically the effectiveness of greater trochanteric epiphysiodesis, which was performed at the Department of Orthopedics and Traumatology at the University Hospital of Düsseldorf.

For analysis, 46 children, 33 male and 13 female, mean age at time of surgery 8 ± 1.3 years with unilateral LCPD undergoing greater trochanteric epiphysiodesis with two screws and curettage of the epiphysis were retrospectively included. The radiological evaluation was performed on a.p.-views of the pelvis pre- and postoperatively until skeletal maturity with an average follow-up-period of 3.5 years. The untreated contralateral side served as control. The following parameters were determined: trochanteric height (TH), articulo-trochanteric distance (ATD) and center-trochanteric distance (CTD). The statistical analysis included the comparison of the affected and unaffected hip up to skeletal maturity. The impact of gender and age (< 8 and ≥ 8 years) was investigated as well.

Greater trochanteric epiphysiodesis significantly reduced trochanteric growth by 28.9% ($p < 0.01$) by means of TH. Regression analysis revealed an inhibition of trochanteric growth of 0.92 mm per year. ATD and CTD of the affected and unaffected hip converged over the investigation period up to maturity. Measured by ATD and CTD 31.8% achieved an optimal result.

In conclusion greater trochanteric epiphysiodesis had a positive effect and presented as an effective procedure in skeletally immature patients to prevent trochanteric overgrowth. Further studies have to show whether these positive effects also result in biomechanical and functional benefits.

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
a.p.	anterior-posterior
ATD	Artikulotrochantäre Distanz
BV	Bildverstärker
bzw.	beziehungsweise
CCD-Winkel	Centrum-Collum-Diaphyse-Winkel
CTD	Centrum-Trochanter-Distanz
FU1	Untersuchungszeitraum 10 bis < 24 Monate postoperativ
FU2	Untersuchungszeitraum 24 bis < 46 Monate postoperativ
FU3	Untersuchungszeitraum 46 bis < 72 Monate postoperativ
FU4	Untersuchungszeitraum $\geq$ 72 Monate/Anzeichen der Adoleszenz
FVO	Femurvarisierungsosteotomie
ICC	Intraklassen-Korrelationskoeffizient
K-Draht	Kirschner-Draht
LJ	Lebensjahr
M.	<i>Musculus</i>
Max	Maximalwert
Min	Mindestwert
mm	Millimeter
Mm.	<i>Musculi</i>
MRT	Magnetresonanztomographie
MW	Mittelwert
n	Fallzahl
OP	Operation
SD	Standardabweichung
T0	Ausgangsbefund präoperativ
TH	Trochanterhöhe
U8	Altersgruppe unter 8 Jahren
Ü8	Altersgruppe gleich/über 8 Jahren
vs.	<i>versus</i>

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung: Theoretische Grundlagen des Morbus Perthes.....	1
1.1 Definition	1
1.2 Ätiologie.....	1
1.3 Klinische Erscheinung und Diagnostik.....	2
1.4 Klassifikation.....	3
1.4.1. Morphologische Einteilung nach Waldenström.....	3
1.4.2. Einteilung nach Herring.....	6
1.4.3. Einteilung nach Catterall	6
1.4.4. Einteilung des Endstadiums nach Stulberg.....	7
1.5 Prognose	8
1.6 Auswirkungen des Morbus Perthes auf den proximalen Femur	8
1.6.1. Wachstumszonen des proximalen Femurs.....	8
1.6.2. Deformitäten des proximalen Femurs	10
1.6.3. Trochanterhochstand und dessen Folgen	12
1.7 Therapieprinzipien	14
1.7.1. Etablierte operative Therapien	14
1.7.2. Trochanterapophyseodese	17
1.8 Ziel der Studie	18
2. Methodik.....	19
2.1 Ethikvotum.....	19
2.2 Patientenkollektiv	19
2.3 Operative Technik der Trochanterapophyseodese	20
2.4 Radiologische Auswertung	21
2.4.1. Auswahl der radiologischen Parameter.....	21
2.5 Datenanalyse.....	24
2.5.1. Statistisch-analytische Auswertung.....	24
2.5.2. Beurteilung der Effektivität.....	26
3. Ergebnisse	27
3.1 Soziodemographische Merkmale.....	27
3.1.1. Deskriptive Übersicht der Vergleichsgruppe „Alter zum Zeitpunkt der OP“	28

3.1.2. Deskriptive Übersicht der Vergleichsgruppe „Geschlecht“	28
3.2 Intrarater-Reliabilität.....	28
3.3 Auswertung - Trochanterhöhe (TH).....	30
3.3.1. Entwicklung der gesunden Hüfte.....	30
3.3.2. Vergleich zwischen Kontroll- und Interventionsseite	33
3.3.3. Vergleich der Altersgruppen	38
3.3.4. Vergleich der Geschlechter	44
3.4 Auswertung - Centrum-Trochanter-Distanz (CTD)	46
3.4.1. Entwicklung der gesunden Hüfte.....	46
3.4.2. Vergleich zwischen Kontroll- und Interventionsseite	49
3.4.3. Vergleich der Altersgruppen	53
3.4.4. Vergleich der Geschlechter	54
3.5 Auswertung - Artikulotrochantäre Distanz (ATD).....	57
3.5.1. Entwicklung der gesunden Hüfte.....	57
3.5.2. Vergleich zwischen Kontroll- und Interventionsseite	59
3.5.3. Vergleich der Altersgruppen	62
3.5.4. Vergleich der Geschlechter	64
3.6 Ermittlung der Über- und Unterkorrekturen	67
4. Diskussion	69
4.1 Diskussion der Methodik	70
4.1.1. Patientenkollektiv.....	70
4.1.2. OP-Indikation.....	70
4.1.3. OP-Technik	71
4.1.4. Radiologische Untersuchung	72
4.1.5. Statistische Auswertung.....	74
4.2 Diskussion der Ergebnisse	75
4.2.1. Patientenkollektiv	75
4.2.2. Trochanterhöhe (TH)	77
4.2.3. Centrum-Trochanter-Distanz (CTD).....	79
4.2.4. Artikulotrochantäre Distanz (ATD)	81
4.3 Diskussion der Effektivität.....	83
4.3.1. im Hinblick auf das Alter	83

4.3.2. im Hinblick auf das Geschlecht	85
4.4 Limitierungen	86
4.5 Schlussfolgerung	87
5. Literaturverzeichnis	88

1. Einleitung: Theoretische Grundlagen des Morbus Perthes

Im Folgenden sollen das Krankheitsbild Morbus Perthes und die für das Verständnis der Studie notwendigen Grundkenntnisse dargestellt werden.

1.1 Definition

Die Erkrankung Morbus Perthes gehört zum Formenkreis der aseptischen Osteonekrosen des Femurkopfes im Kindesalter. Synonyme dieser Erkrankung sind Morbus Legg-Calvé-Perthes oder Arthrosis deformans juvenilis. Im Jahre 1910 wurde der Morbus Perthes nahezu gleichzeitig von G.C. Perthes in Deutschland, von J. Calvé in Frankreich und A.T. Legg in Amerika erstbeschrieben (1–3).

Der Morbus Perthes betrifft vor allem die proximale Femurepiphyse und kann zu einer Wachstumsstörung und dementsprechender Deformierung des proximalen Femurs führen (4).

Die Erkrankung tritt typischerweise zwischen dem vierten und achten Lebensjahr (LJ) auf und betrifft überwiegend Jungen. Das Verhältnis Jungen zu Mädchen beträgt 4:1 (5). Untersuchungen von Purry et al. (6) zeigten, dass die Erkrankung bei der weißen Bevölkerung gehäuft mit einer Inzidenz von 10,8 pro 100.000 Kindern und Jugendlichen auftritt. Bei der dunkelhäutigen Bevölkerung lediglich mit einer Inzidenz von 0,45 pro 100.000 Kindern.

1.2 Ätiologie

Die Entstehung des Morbus Perthes ist bis heute nicht eindeutig geklärt. Es werden verschiedene Ursachen diskutiert, die zur Entstehung der Hüftkopfnekrose beitragen.

Die wichtigsten Theorien sind die des repetitiven Mikrotraumas und die Gefäßtheorie (5). Man vermutet, dass es durch wiederholte Mikrotraumata des Hüftkopfes zu kleinen Frakturen im kindlichen Hüftkopf kommt. Diese Theorie wird durch die Tatsache gestützt, dass die Erkrankung gehäuft bei überaktiven Kindern auftritt. Der Gefäßtheorie liegt zugrunde, dass bei Kindern dieser Altersgruppe die intraartikulären Gefäße, die für die Durchblutung des Hüftkopfes zuständig sind, besonders vulnerabel sind (7). Gerinnungsstörungen und Viskositätsstörungen der Blutgefäße können ebenso wie Veränderungen der Blutgefäße zur epiphysären Knochennekrose führen.

Ein in der Kondensationsphase der Erkrankung nachgewiesener Desoxypyridinolin/Kreatinin-Quotient im Urin spricht für einen verringerten Knochenstoffwechsel und damit für eine systemische Ursache der Erkrankung. Dies wird gestützt durch die Erkenntnis, dass bei den meisten an Morbus Perthes erkrankten Kindern eine temporäre Skelettretardierung vorliegt, was jedoch später wieder aufgeholt wird (8).

1.3 Klinisches Erscheinungsbild und Diagnostik

Ein erstes Symptom der Erkrankung Morbus Perthes ist gehäuft die Angabe von Hüft-/Leistenschmerzen und ein dadurch bedingtes Hinken mit teils Schmerzausstrahlung in den Oberschenkel und das Kniegelenk mit teilweise resultierender „Gehverweigerung und -faulheit“ (5). Die Beschwerdesymptomatik wechselt aufgrund von Belastung und Reizzustand des Gelenkes. In den Anfangsstadien des Morbus Perthes kann die klinische Untersuchung häufig unauffällig sein. Mit Fortschreiten der Erkrankung folgt eine zunehmende Bewegungseinschränkung des betroffenen Hüftgelenkes, insbesondere sind die Hüftextension, die Abduktion und die Innenrotation limitiert (7).

Die Diagnose erfolgt üblicherweise durch Röntgenaufnahmen in zwei Ebenen: Beckenübersichtsaufnahme und eine Seitenaufnahme des betroffenen Hüftgelenkes.

Die Röntgenaufnahme dient zudem zur Klassifikation, Prognoseeinschätzung und Verlaufskontrolle. Im Frühstadium, wenn das Röntgenbild noch unauffällig sein kann, kann die Diagnose mittels Magnetresonanztomographie (MRT) gestellt werden (5).

1.4 Klassifikation

Es gibt unterschiedliche Einteilungen des Morbus Perthes. In dieser Arbeit sollen nur die wichtigsten aufgezeigt werden.

1.4.1. Morphologische Einteilung nach Waldenström

Die Einteilung nach Waldenström (9) orientiert sich an den radiologischen Gegebenheiten und unterteilt die Erkrankung in fünf Stadien, die jedes erkrankte Kind durchläuft. Der Krankheitsverlauf ist eingeteilt in Initial-, Kondensations-, Fragmentations-, Reparations- und Ausheilungsstadium (Abb. 1).

Die Zeitdauer vom Beginn der Erkrankung bis zum Erreichen des Endstadiums beträgt mehrere Jahre (7).

Im Initialstadium (Abb. 1 a) finden sich auf dem Röntgenbild keine Veränderungen, allenfalls lässt sich eine leichte Verbreiterung des Gelenkspaltes erkennen. In dieser Phase sind die Kinder meist inapparent. Mittels MRT kann bereits in diesem Stadium die Minderperfusion der Epiphyse nachgewiesen werden (Abb.1 b) (5).

Im zweiten Stadium, dem Kondensationsstadium (Abb. 1 c), kommt es zu einer im Röntgenbild sichtbaren Verdichtung der Knochenstruktur, die Epiphyse nimmt an Höhe ab.

Darauf folgt das Fragmentationsstadium (Abb. 1 d). Zeitgleich kommt es zu einer Resorption des nekrotischen Knochens und Bildung von neuem Knochen, der allerdings nicht ossifiziert ist. Radiologisch zeigen sich osteolytische und osteoplastische Areale, der Hüftkopf erscheint fragmentiert. In dieser Phase weist der Hüftkopf eine erhöhte plastische Deformierbarkeit auf.

Der Übergang zum Reparationsstadium ist fließend (Abb. 1 e). Durch die Gefäßeinsprossung können sich wieder Knochenzellen ansiedeln und Knochengrundsubstanz bilden (10). Es kommt zu einer zunehmenden Ossifikation der Epiphyse mit Remodellierung des Hüftkopfes.

Im Ausheilungsstadium zeigt sich das Ergebnis der knöchernen Umbauvorgänge (Abb.1 f). Es erfolgt die Ausheilung entweder in einem kongruenten Gelenk (Abb. 2 a) oder in einer Deformität mit einer etwaigen Gelenkinkongruenz (Abb. 2 b).

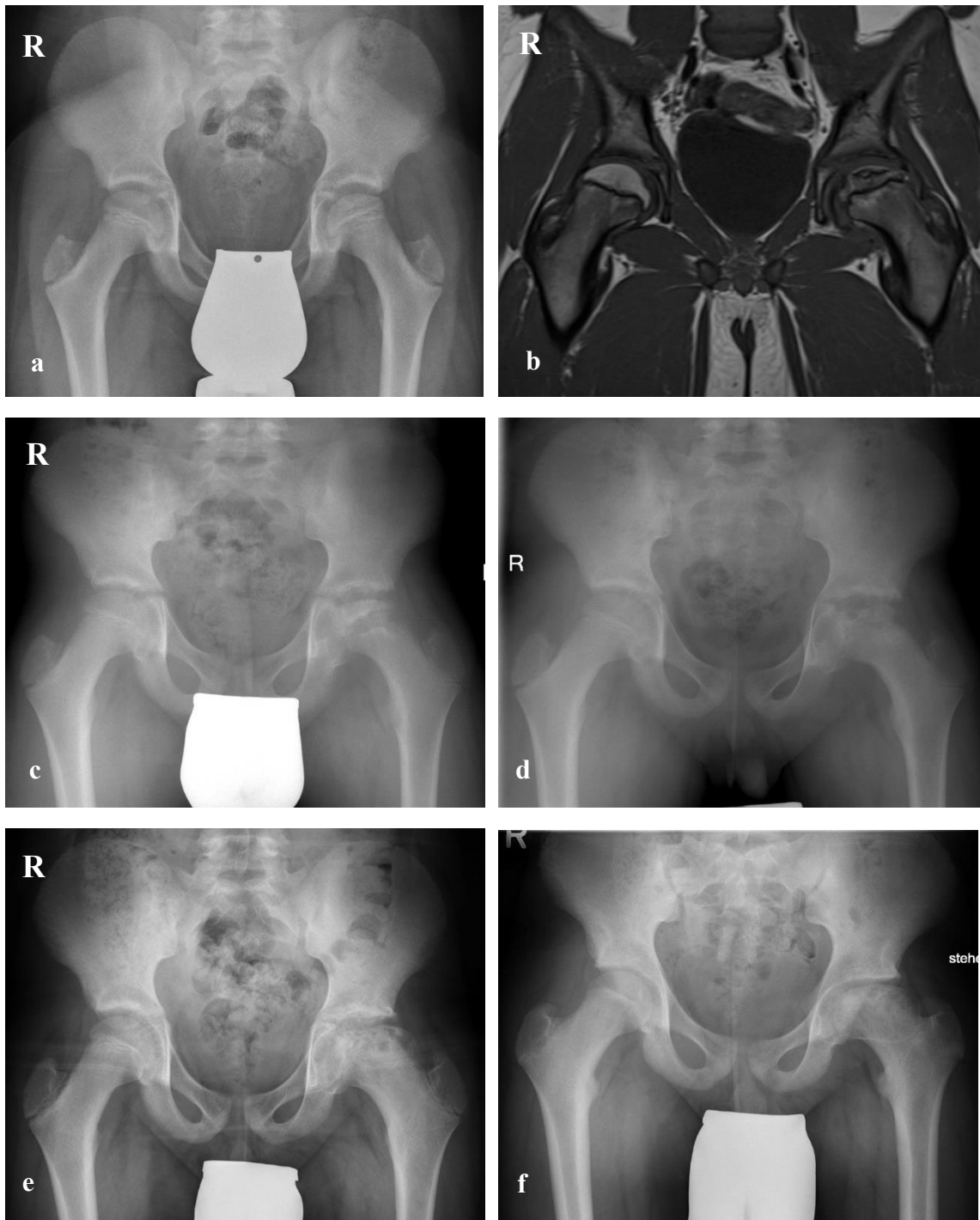


Abb. 1: Verlaufsstadien nach Waldenström bei einem männlichen Patienten mit Morbus Perthes links

a: Initialstadium im konventionellen Röntgenbild; **b:** Initialstadium im MRT; **c:** Kondensationsstadium, **d:** Fragmentationsstadium; **e:** Reparationsstadium; **f:** Endstadium. Klinikinterne Röntgenaufnahmen



Abb. 2: Endstadium des Morbus Perthes

a: erhaltene Gelenkkongruenz, bei einem männlichen Patienten mit Morbus Perthes links;

b: Gelenkinkongruenz bei einem männlichen Patienten Morbus Perthes rechts.

Klinikinterne Röntgenaufnahmen

1.4.2. Einteilung nach Herring

Die Klassifikation nach Herring (11) stützt sich auf die Morphologie des lateralen Pfeilers (*lateral pillar*) der Femurkopfepiphyse auf dem anterior-posterior (a.p.) -Röntgenbild während des Fragmentationsstadiums.

Es erfolgt eine Einteilung in drei Gruppen anhand der Höhe des lateralen Pfeilers. Da in *Multicenter*-Studien viele Hüften einen Grenzbefund zwischen B und C zeigten, wurde die Einteilung um die sogenannte B/C-Gruppe (*border group*) ergänzt (5).

In Gruppe A ist der laterale Pfeiler nicht betroffen, bei Gruppe B sind über 50 Prozent des lateralen Pfeilers erhalten und bei Gruppe C unter 50 Prozent (Abb. 3).

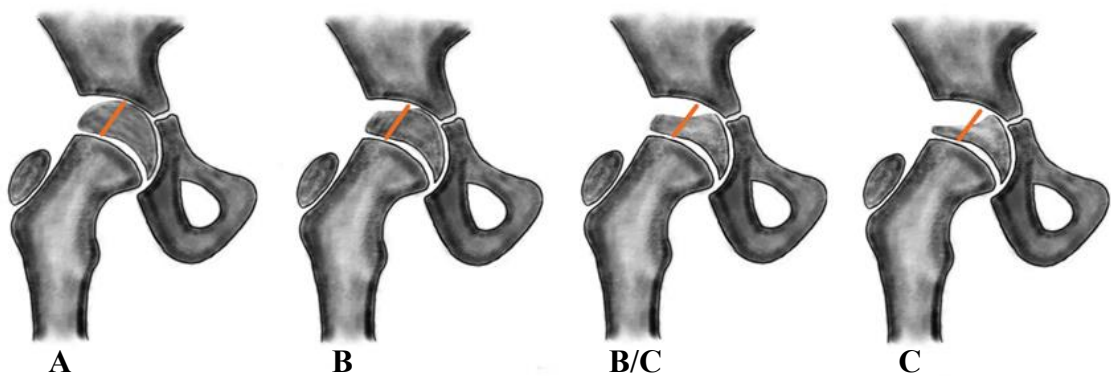


Abb. 3: Einteilung des Morbus Perthes nach Herring

A: lateraler Pfeiler intakt; B: lateraler Pfeiler über 50% intakt; B/C: *border group*; C: lateraler Pfeiler unter 50% intakt. Lateraler Pfeiler in orange dargestellt. Eigene Abbildung

1.4.3. Einteilung nach Catterall

Im Jahre 1971 stellte Catterall (12) eine Klassifikation vor, die den Schweregrad in Abhängigkeit vom Ausmaß der Nekrosezone des Femurkopfes in a.p. und axialen Röntgenbildern während des Fragmentationsstadiums in vier Gruppen einteilt (Tabelle 1, Abb. 4).

Grad	Merkmal
I <25%	Anterolateraler Anteil betroffen
II 25-50%	Vorderes Drittel oder Hälfte des Femurkopfes betroffen
III 50-75%	Bis zu $\frac{3}{4}$ des Femurkopfes betroffen, nur dorsaler Anteil intakt
IV >75%	Ganzer Femurkopf betroffen

Tabelle 1: Klassifikation des Morbus Perthes nach Catterall

Einteilung in 4 Gruppen I bis IV. Die Prozentzahl bezieht sich auf das Ausmaß der Nekrosezone

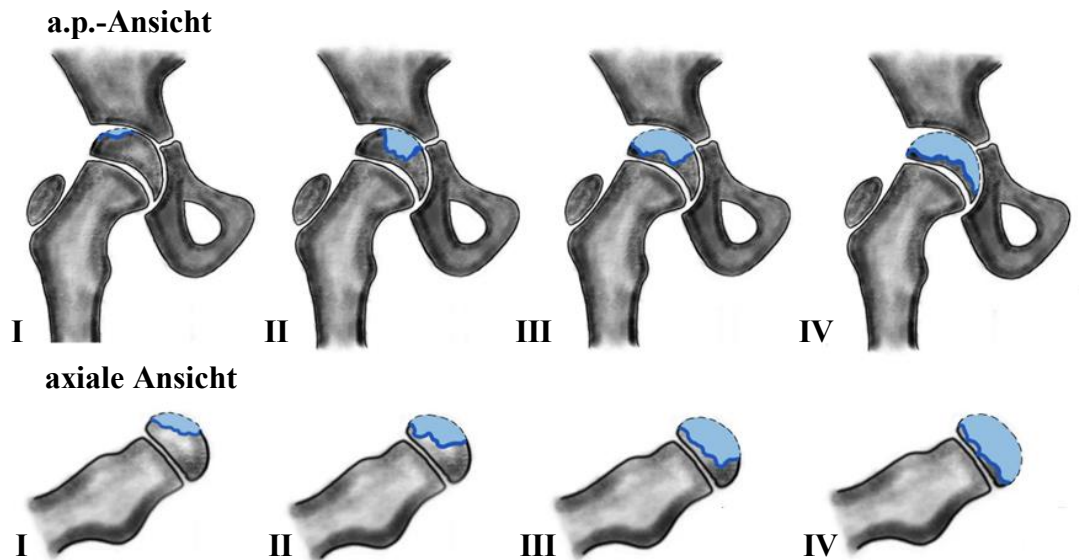


Abb. 4: Einteilung nach Catterall

Einteilung in Gruppen I bis IV anhand des Ausmaß der Nekrosezone (Bezug zu Tabelle 1).

Schematische Darstellung der Ansicht auf den Röntgenbildern anterior-posterior (a.p.) und axial. Der blau eingezeichnete Bereich stellt die Nekrosezone dar. Eigene Abbildung

1.4.4. Einteilung des Endstadiums nach Stulberg

Die Einteilung von Stulberg et al. (13) aus dem Jahre 1981 orientiert sich an der anatomischen Form des Hüftkopfes im Ausheilungsstadium (Tabelle 2).

Klassifikation nach Stulberg	Merkmale
I	runder Hüftkopf, regelrechte Gelenkkongruenz
II	sphärischer Hüftkopf (Trochanterhochstand und/oder Coxa magna)
III	ovaler oder pilzförmiger Kopf
IV	abgeflachter Hüftkopf mit erhaltener Gelenkkongruenz
V	abgeflachter Hüftkopf mit Gelenkinkongruenz

Tabelle 2: Klassifikation des Endstadiums bei Morbus Perthes nach Stulberg

1.5 Prognose

Die Prognose des Morbus Perthes ist primär positiv, denn die Erkrankung besitzt eine gute Selbstheilungstendenz. Die Prognose der Erkrankung ist abhängig von Alter bei Erkrankungsbeginn, dem Ausmaß der Bewegungseinschränkung, sowie des Hüftkopfbefalls (5,14,15). So hat zum Beispiel eine vor dem 6. LJ auftretende Erkrankung eine bessere Prognose (7).

Die langfristige Prognose wird besonders durch die Verformung des Hüftkopfes und der Pfanne bestimmt. Es besteht das Risiko vor allem bei nicht erhaltener Sphärizität und Dezentrierung des Femurkopfes einer Arthrose im Erwachsenenalter, somit gilt der Morbus Perthes als eine präarthrotische Deformität (7). So zeigten einige Langzeitstudien, dass das Arthroserisiko mit der Stulberg-Klassifikation korreliert und ab der Stulberg-Klasse 3 signifikant steigt (16–19).

1.6 Auswirkungen des Morbus Perthes auf den proximalen Femur

Wie bereits beschrieben, besteht die Möglichkeit, dass der Morbus Perthes ohne Deformitäten ausheilt. Häufig finden sich jedoch residuelle Deformitäten des proximalen Femurs, die sehr vielfältig sein können (20).

Für das Verständnis der unterschiedlichen Deformitäten wird in dieser Arbeit auf die Entwicklung des proximalen Femurs eingegangen.

1.6.1. Wachstumszonen des proximalen Femurs

An den Epiphysen und Apophysen findet enchondrales Wachstum statt, das bedeutet, dass der Knochen sich aus einer knorpeligen Vorstufe bildet (7).

Heimkes (21) beschäftigte sich intensiv mit der Biomechanik, Funktion und Entwicklung des Hüftgelenkes. Beim Neugeborenen bildet die Hüftkopfeiphyse und der knorpelig angelegte Trochanter major zunächst eine chondrogene Einheit. Dies separiert sich noch im Kleinkindesalter in zwei Wachstumspole. Dabei orientiert sich der epiphysäre Anteil nach kranial und der apophysäre Anteil nach kranio-lateral (Abb. 5). Zwischen den beiden Polen senkt sich ein Schenkelhalsisthmus, der bis zum 12. LJ knorpelig bedeckt bleibt. Die Epiphysenfuge ist für das Längenwachstum verantwortlich. Innerhalb der Extremitäten tragen die Epiphysenfugen unterschiedlich zum Längenwachstum bei, so ist der proximale Femur zu zirka 15% am Längenwachstum der gesamten Extremität beteiligt (7,22).

Abb. 5: Schematische Darstellung der Wachstumszonen des proximalen Femurs eines Kindes

CCD-Winkel: Projizierter Centrum-Collum-Winkel. Eigene Abbildung



1.6.2. Deformitäten des proximalen Femurs

Im Rahmen des Morbus Perthes kann es zu einer Mitbeteiligung der Epiphysenfuge des Hüftkopfes kommen (28). Bei Überwiegen der metaphysären Knochenapposition über das epiphysäre Wachstum kann es in folgenden Deformitäten resultieren (Abb. 6) (29–31):

- Coxa brevis: Verkürzung und Verbreiterung des Schenkelhalses,
- Coxa vara: Verkleinerung des Schenkelschaftwinkels (CCD-Winkel),
- Verkürzung der Beinlänge,
- Trochanterhochstand.

Bei Wachstumsstörungen im Hüftkopf kann es zu unterschiedlichen Hüftkopfdeformitäten kommen (7,31–33):

- Coxa magna: Femurkopfvergrößerung/-verbreiterung (Abb. 6),
- Coxa irregularis: Deformierung der Hüftkopfeiphyse mit eventuellem Auftreten eines *hinge-abduction*-Phänomen: das Anstoßen des lateralen Femurkopfes am ventrolateralen Acetabulum (Abb. 7),
- Coxa plana: Abflachung des Hüftkopfes mit konsekutiver Gelenkinkongruenz (Abb. 7).

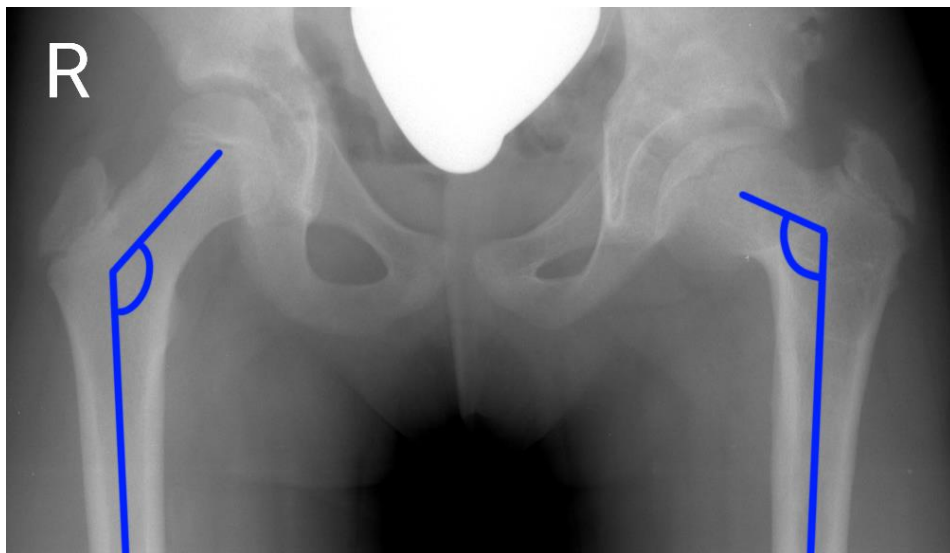


Abb. 6: Morbus Perthes links mit Coxa magna, brevis und vara und Trochanterhochstand

Eingezeichnet sind die projizierten CCD (Centrum-Collum-Diaphysen)-Winkel, der auf der erkrankten Seite (links) verkleinert ist. Klinikinternes Röntgenbild

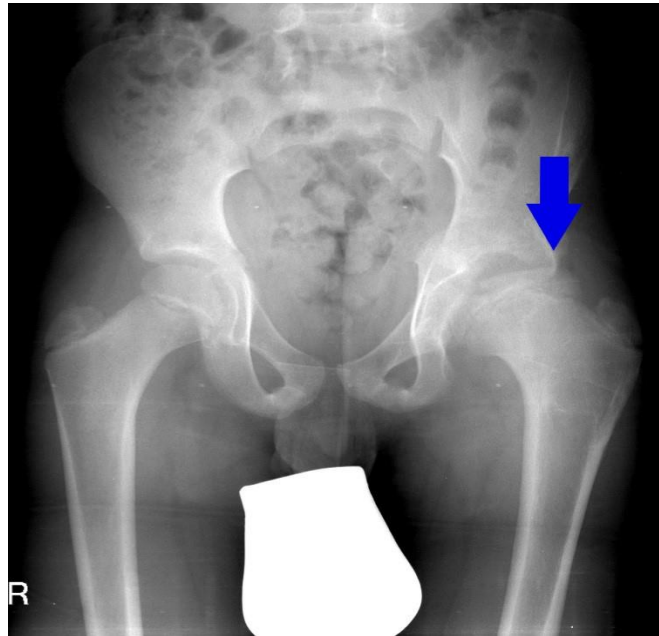


Abb. 7: Coxa irregularis mit Coxa plana und brevis bei Morbus Perthes links
 Der Pfeil markiert das *hinge abduction*-Phänomen. Klinikinternes Röntgenbild

Ein dezentrierter und/oder asphärischer Femurkopf und eine verminderte Hüftkopfüberdachung stellen präarthrotische Deformitäten dar. Jedoch führt nicht jede Deformität zu einer frühzeitigen Arthrose. Eine Coxa magna stellt nach heutigem Wissen keine präarthrotische Deformität dar und der Trochanterhochstand eine relative präarthrotische Deformität (7).

Auf den Trochanterhochstand und dessen Folgen werden im Folgenden nun genauer eingegangen.

1.6.3. Trochanterhochstand und dessen Folgen

Der Trochanter major ist nicht von der aseptischen Knochennekrose betroffen, da dieser eine extrakapsuläre Blutzufuhr hat (34). Dessen Wachstum findet demnach weiterhin statt, zum einen über epiphysäres Wachstum und zum anderen über appositionelles Wachstum an der Spitze und der lateralen Seitenwand (Abb. 5).

Am Trochanter major setzen unterschiedliche Muskeln an (Abb. 8). Die dorsalen Hüftmuskeln kann man in eine dorsolaterale und eine pelvitrochantäre Gruppe einteilen. Zur dorsolateralen Gruppe zählt der *Musculus (m.) gluteus maximus* (in Abb. 8 nicht dargestellt) und die *Musculi (Mm.) glutei medius und minimus*, die als kleine Gluteus-Muskeln zusammengefasst werden. Die kleinen Gluteus-Muskeln setzen am Trochanter major an und sind die wichtigsten Abduktoren und Innenrotatoren des Hüftgelenkes. Sie stabilisieren das Becken beim Stehen und Gehen.

Die Bezeichnung pelvitrochantäre Gruppe weist auf den Ursprung und den Ansatz hin; sie setzen am oder in der Nähe des Trochanter majors an (*M. piriformis*, *Mm obturatorii internus und externus*, *Mm gemelli superior und inferior* und *M. quadratus*). Sie fungieren als Außenrotatoren (35).

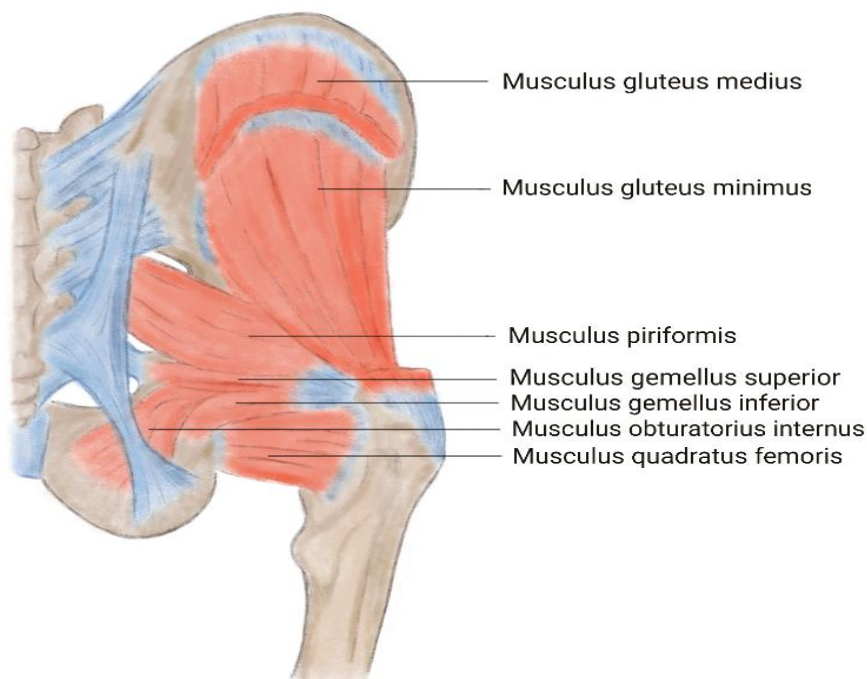


Abb. 8: Anatomische Zeichnung der dorsalen Hüftmuskeln, die am Trochanter major ansetzen

Eigene Abbildung

Wenn das Wachstum von Femurkopf und -hals im Rahmen der Morbus Perthes-Erkrankung beeinträchtigt ist, kommt es durch das unveränderte intakte Wachstum des Trochanter majors zu einem Trochanterhochstand. Dadurch nähern sich Ursprung und Ansatz der Abduktoren an und die Vorspannung reduziert sich. Dies führt zu einer

Insuffizienz der Abduktoren. Klinisch imponiert im Einbeinstand ein Absinken des Beckens zur Schwungseite, das sogenannte Trendelenburgzeichen (Abb. 9) oder ein Neigen des Rumpfes zur Standbeinseite, dem Duchenne-Hinken (20,35).

Biomechanische Veränderungen führen zu Veränderung der Belastungsverhältnisse des Gelenkes, welche zu frühzeitiger Arthrose führen können (36–38).

Weitere Komplikationen des Trochanterhochstandes sind Tendinopathien, Bursitis trochanterica und das extrartikuläre Impingement zwischen Os ileum und dem Trochanter, was zu Bewegungseinschränkungen und Schmerzen führen kann (39).

Klinisch kann sich der Trochanterhochstand zudem als “*Gear stick-sign*” erkennen machen. Es kommt zu einer eingeschränkten Abduktion des Hüftgelenkes in Hüftgelenksexension und zu einer regelrechten Abduktion bei Hüftbeugung (40,41).

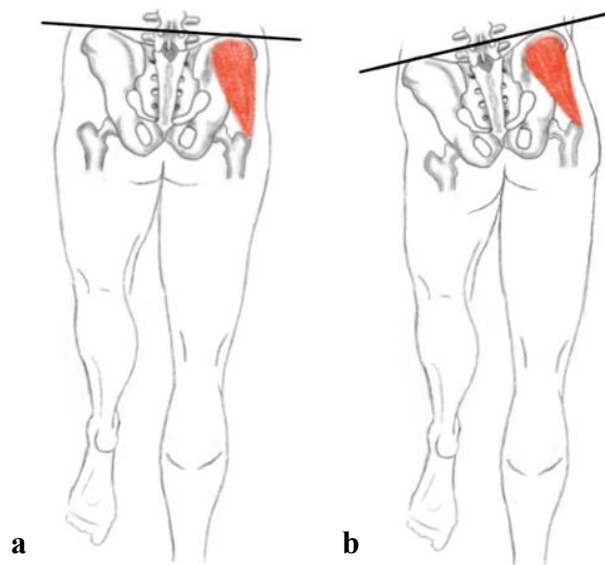


Abb. 9: Trendelenburgzeichen

a: Beim Einbeinstand dienen die kleinen Gluteus-Muskeln der Stabilisierung des Beckens und verhindern das Absinken des Beckens zur Gegenseite; **b:** Bei funktioneller Insuffizienz der kleinen Gluteus-Muskeln sinkt beim Einbeinstand das Bein zur gesunden Seite ab. Eigene Abbildung

1.7 Therapieprinzipien

Bis heute ist eine ursächliche Therapie des Morbus Pertes nicht möglich. Ziel sämtlicher Maßnahmen ist der Erhalt oder Wiederherstellung der Gelenkbeweglichkeit, sowie der Erhalt des *Containments*; einer guten Kongruenz zwischen Hüftkopf und Pfanne. In der Vergangenheit herrschten Diskussionen bezüglich der Be- bzw. Entlastung des betroffenen Hüftgelenkes. Eine strikte Entlastung des Hüftgelenkes scheint nicht erforderlich zu sein, sodass man in den frühen Stadien aktuell eine Belastungsreduktion anstrebt im Sinne einer „*reduced activity*“, demnach ein gelenkschonendes Verhalten mit „Schritte sparen“ und Vermeidung von Sprung- und Stoßbelastung (5,7,42).

Die Art der Therapie richtet sich nach dem Schweregrad, dem Stadium, dem Vorliegen von Risikozeichen, dem Ausmaß der Bewegungseinschränkung des Hüftgelenkes und dem Alter des Patienten. Der Erhalt oder die Wiederherstellung der Gelenkbeweglichkeit wird üblicher Weise durch konservative Maßnahmen -im Wesentlichen Physiotherapie- angestrebt. Zeigt sich radiologisch eine Dezentrierung des Hüftkopfes und damit ein *Containment*-Verlust sind meist operative Maßnahmen indiziert.

1.7.1. Etablierte operative Verfahren

Ziel einer operativen Therapie ist die Wiederherstellung der Zentrierung des Hüftgelenkes, das sogenannte *Containment*, und Vermeidung einer Deformierung des Hüftkopfes, um eine präarthrotische Deformität und damit eine frühzeitige Coxarthrose zu vermeiden. Der Eingriff sollte während des Fragmentations- oder frühen Reparationsstadiums durchgeführt werden, um während der Phase der Remodellierung des Hüftkopfes bestmögliche Voraussetzungen zu haben (5,7,43).

Es gibt unterschiedliche Verfahren zur Wiederherstellung des *Containments*: Zum einen besteht die Möglichkeit einer *Containment*-Verbesserung durch eine Osteotomie am Femur und zum anderen durch eine Osteotomie am Becken.

Am proximalen Femur wird bei entsprechender Indikation eine intertrochantäre Femurvarisierungsosteotomie (FVO) mit wahlweise Derotation durchgeführt (Abb. 10) (7,44). Jedoch führt diese Umstellung zu einer Verringerung des CCD-Winkels und kann somit zu einem iatrogenen Trochanterhochstand führen (45–48).

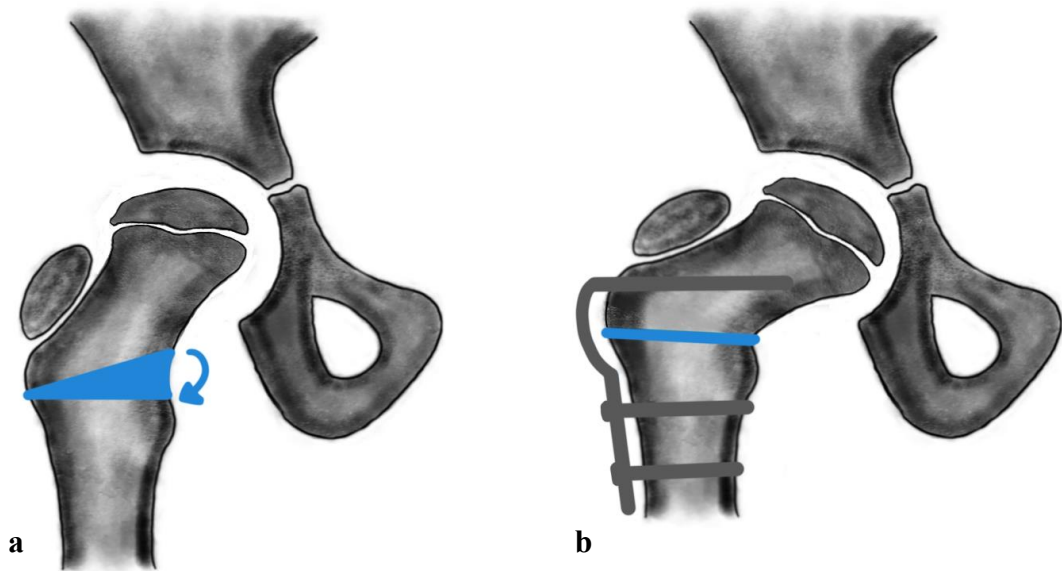


Abb. 10: Schematisch dargestelltes Prinzip einer intertrochantären Femurvarisierungsosteotomie (FVO)

a: Knochenteil wird intertrochantär entnommen; **b:** Fixierung durch eine Platte. Es zeigt sich eine bessere Hüftkopfüberdachung. Eigene Abbildung

Am Becken gibt es altersabhängige Osteotomien. Zum einen gibt es die Möglichkeit der Salter-Osteotomie (7,49) und zum anderen die Triple-Osteotomie (7,50).

Die Salter-Osteotomie (Abb. 11) ist nur möglich, solange die Symphyse genügend beweglich ist, sodass dieses Operationsverfahren über dem 8. LJ nicht mehr indiziert ist. Bei rigiden Beckenverhältnissen, in der Regel über dem 8. LJ, ist die Tripleosteotomie nach Tönnis (Abb. 12) indiziert.

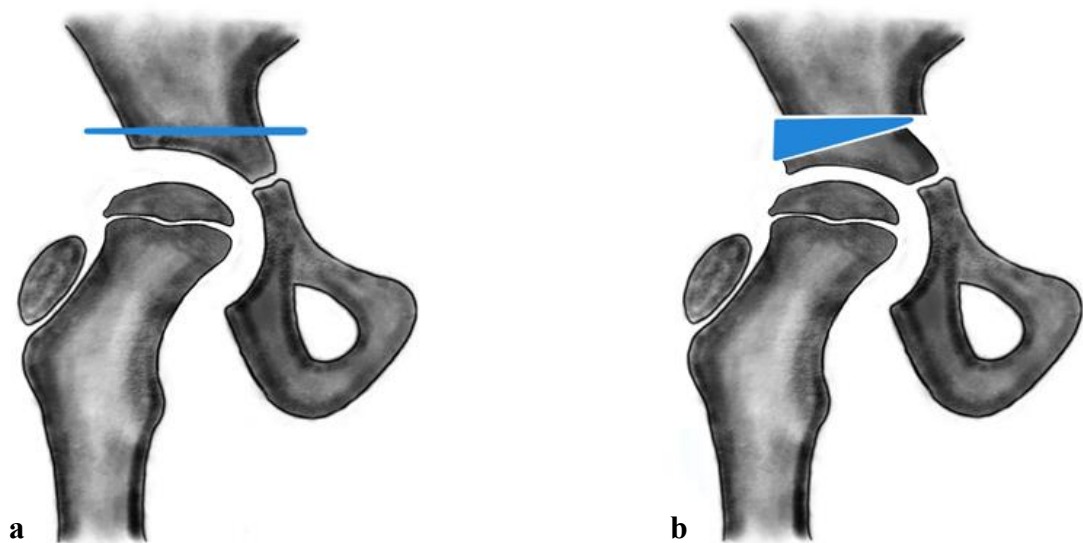


Abb. 11: Schematisch dargestelltes Prinzip der Beckenosteotomie nach Salter

a: Osteotomie am Os ileum; **b:** Schwenken des Fragementes mit Knochenkeilinterponat. Eigene Abbildung

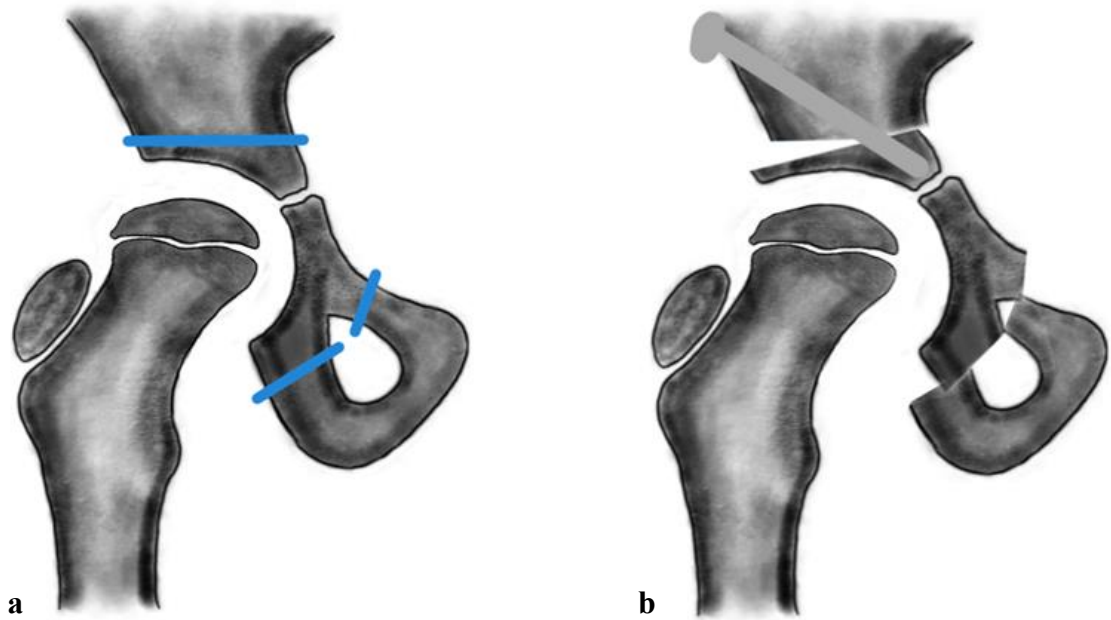


Abb. 12: Schematisch dargestelltes Prinzip der Tripleosteotomie

a: Osteotomie an Os ileum, Os ischii und Os pubis; **b:** Fixierung nach Schwenken des Pfannendachs. Eigene Abbildung

1.7.2. Trochanterapophyseodese

Zur Vermeidung eines Trochanterhochstandes oder bei Hochstand mit ausreichendem Restwachstum ist die Trochanterapophyseodese eine Therapieoption. Es ist kein allgemein etabliertes Verfahren, weswegen verschiedene Techniken beschrieben sind, auf die im Folgenden eingegangen werden.

Das Prinzip der Epiphyseodesen beschrieb 1933 erstmalig Phemister (51,52) als Verfahren, bei dem das Längenwachstum durch Ausräumen der Wachstumsfuge und Einsetzen eines Knochenspans dauerhaft blockiert werden sollte (Abb. 13 a). 1949 wurde ein temporäres Verfahren von Blount (53) eingeführt, dass das Wachstum durch Klammerung der Wachstumsfugen nur vorübergehend gehemmt werden sollte. Während bei den temporären Verfahren der Epiphyseodesen die Wachstumsfugen durch spezielle Implantate so lange blockiert werden, bis das gewünschte Korrekturziel erreicht ist, werden bei den definitiven Epiphyseodesen die Wachstumszonenanteile zerstört und somit das Wachstumspotenzial dauerhaft begrenzt (54).

Die Trochanterapophyseodese ist ein wachstumhemmendes Verfahren. Es wurde erstmalig von Langenskiöld (55) 1957 vorgestellt als eine Methode zur Behandlung von moderater kindlicher Coxa vara mittels Phemister Technik. Bei dieser Methode wird ein Knochenblock aus der Epiphysenfuge entnommen und anschließend wird die Epiphysenfuge kürettiert und das Knochenstück um 180° gedreht und wieder eingesetzt, sodass eine knöcherne Durchbauung der Wachstumsfuge entsteht (51) (Abb. 13 a). Im Verlauf wurde diese Technik modifiziert, so kann alternativ eine temporäre Epiphyseodese beispielsweise mittels einer Zweiloch-Platte (Abb. 13 c) erfolgen. Dabei findet weiter apophysäres Wachstum im Bereich der Trochanterspitze statt. Eine weitere Option ist die partielle Destruktion der Epiphysenfuge und anschließende Implantation von Schrauben mit wahlweiser Unterlegscheibe, um das apophysäre Wachstum einzudämmen (Abb. 13 b).

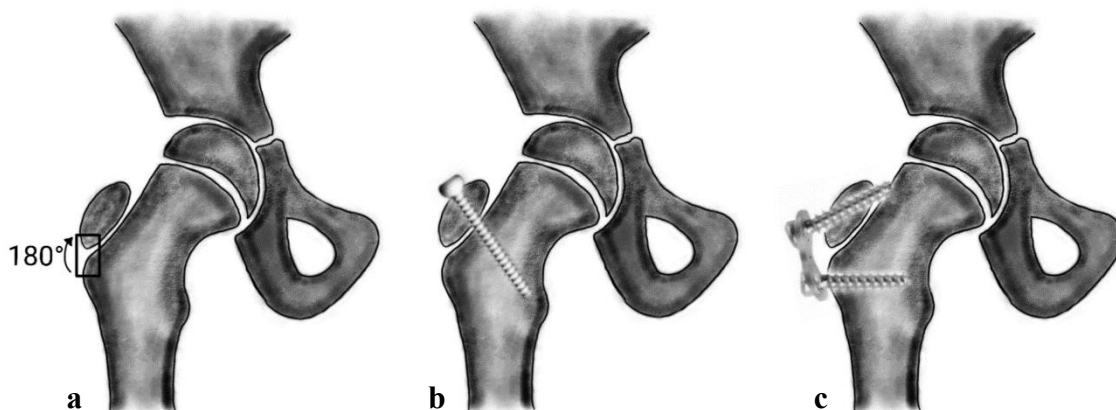


Abb. 13: Verfahren der Wachstumshemmung am Trochanter major

a: Verfahren nach Phemister; **b:** Schraubenimplantation; **c:** Zweiloch-Platten-Implantation. Eigene Abbildung

Einige Autoren (45,46) empfehlen die Durchführung der Trochanterapophyseodese nach Durchführung einer FVO.

Die Trochanterapophyseodese ist jedoch zum aktuellen Zeitpunkt kein etabliertes Verfahren zur Prävention eines Trochanterhochstandes (39,45,54,56–58).

1.8 Ziel der Studie

Der Trochanterhochstand ist eine bekannte und relativ häufig auftretende Folgeerscheinung nach Morbus Perthes. Es führt zu Veränderungen der biomechanischen Verhältnisse und kann unter anderem zu einer Insuffizienz der Glutealmuskulatur führen. Mittels unterschiedlicher Techniken kann das Wachstum des Trochanter majors gebremst werden.

Ziel der vorliegenden Studie ist es, die Effektivität der Trochanterapophyseodese mittels partieller Kürrettage der Fuge und transepiphysärer Schraubenimplantation anhand radiologischer Verlaufsuntersuchungen zu evaluieren. Dabei soll der Einfluss des Alters bei Operation und des Geschlechts berücksichtigt werden.

2. Methodik

2.1 Ethikvotum

Der Studie liegt ein positives Votum der Ethikkommission an der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf mit der Studiennummer 2019-753 vor. Alle Patienten bzw. die Vorsorgebevollmächtigten wurden über die Studie aufgeklärt und erteilten ihr Einverständnis zur Studienteilnahme.

2.2 Patientenkollektiv

Für die Studie wurden retrospektiv 46 Patienten rekrutiert, die zwischen 2006 und 2019 in der Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie des Universitätsklinikums Düsseldorf eine Trochanterapophyseodese erhalten hatten. Einschlusskriterien waren

- die Diagnose eines unilateralen Morbus Perthes,
- das Vorhandensein eines Röntgenbildes (Beckenübersichtsaufnahme) präoperativ,
- eine Folgeuntersuchung mit röntgenologischer Kontrolle von mindestens 24 Monaten,
- das Einverständnis der Patienten bzw. der Vorsorgebevollmächtigten.

Ausgeschlossen wurden

- Patienten mit einem bilateralem Morbus Perthes,
- Patienten mit einer anderen Grunderkrankung, die zu einem Trochanterhochstand geführt hat, wie zum Beispiel eine Hüftdysplasie oder eine Osteomyelitis.

Insgesamt konnten 46 Patienten, 33 männliche und 13 weibliche, in diese Studien eingeschlossen werden. Das durchschnittliche Alter zum OP-Zeitpunkt betrug 8,0 Jahre mit einer Standardabweichung (SD) von 1,3 Jahren. 44 Patienten waren mit einer *Containment*-wiederherstellenden Operation (OP) versorgt worden. Tabelle 3 zeigt eine deskriptive Übersicht zum Patientenkollektiv.

Patientenkollektiv (n = 46)		
Geschlecht	weiblich	28,3% (13)
	männlich	71,7% (33)
Alter [Jahre]	MW $\pm$ SD	8,0 $\pm$ 1,3
	Min	5,3
	Max	11,8
Betroffene Seite	rechts	65,2% (30)
	links	34,8% (16)
Vor-Operationen	keine	4,3% (2)
	Beckenosteotomie	17,4% (8)
	Femurosteotomie	17,4% (8)
	Femur- und Beckenosteotomie	60,9% (28)

Tabelle 3: Deskriptive Übersicht zum Patientenkollektiv

MW $\pm$ SD: Mittelwert $\pm$ Standardabweichung; Min: Kleinster Wert; Max: Größter Wert; n: Anzahl der inkludierten Patienten

2.3 Operative Technik der Trochanterapophyseodese

Die Indikation zur Trochanterapophyseodese wurde gestellt bei manifestem oder drohendem Trochanterhochstand als unmittelbare Folge des Morbus Perthes oder bei Zustand nach FVO. Für die Trochanterapophyseodese wurde die Epiphyse des Trochanter major zunächst partiell destruiert mittels Kürettage oder Bohrung. Anschließend erfolgte unter Bildverstärker (BV) -Kontrolle die transepiphysäre K- (Kirschner-) Draht-Positionierung, über die dann zwei kanülierte Spongiaschrauben mit Unterlegscheibe eingebracht wurden (Abb. 14).

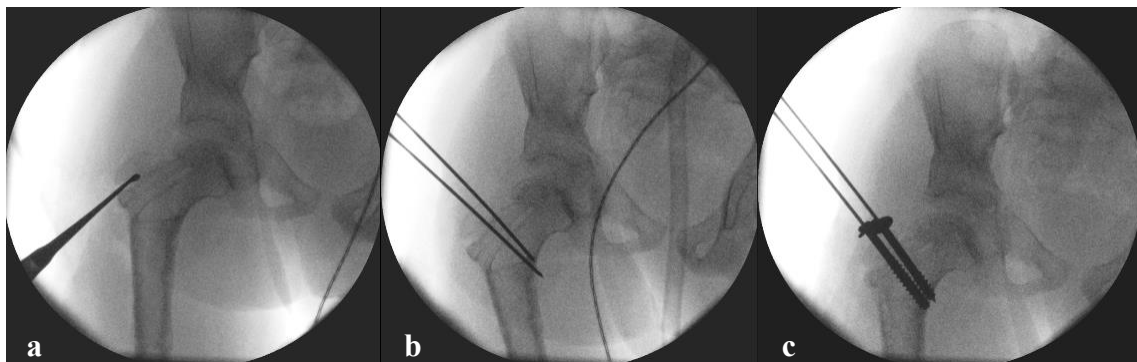


Abb. 14: Operatives Vorgehen der Trochanterapophyseodese

a: Partielle Destruktion der Epiphysenfuge; **b:** Positionierung der K-Drähte; **c:** Einbringen der zwei kanülierten Spongiaschrauben mit Unterlegscheiben. Klinikinterne intraoperativ angefertigte BV-Aufnahmen

2.4 Radiologische Auswertung

Zur Evaluation des Effekts der Trochanterapophyseodese erfolgte die Auswertung von Röntgenaufnahmen in festgelegten Messintervallen des Beckens im a.p.-Strahlengang, die im Stehen unmittelbar präoperativ sowie postoperativ bis maximal Wachstumsabschluss angefertigt wurden. Die Auswertung erfolgte sowohl an der erkrankten, operierten Hüfte, als auch an der gesunden, kontralateralen Hüfte. Die nicht erkrankte Hüfte diente in der Auswertung als Kontrollseite. Die Röntgenbilder wurden in einem medizinischen Bildarchivierungs- und Kommunikationssystem (PACS) an einem Befundungsmonitor manuell ausgewertet. Zur Bestimmung der Intrarater-Reliabilität erfolgte die Auswertung der Röntgenbilder verblindet erneut nach einem Intervall von zwei Wochen.

2.4.1. Auswahl der radiologischen Parameter

Folgende Parameter wurden bestimmt: 1) Trochanterhöhe (TH), 2) artikulotrochantäre Distanz (ATD) und 3) Centrum-Trochanter-Distanz (CTD).

- 1) Die Trochanterhöhe wurde definiert als Distanz zwischen der Basis und der Spritze des ossifizierten Trochanter majors entlang der Femurschaftachse (23) (Abb. 15 a),
- 2) Die artikulotrochantäre Distanz (ATD) wurde definiert als Distanz zwischen dem höchsten Punkt des Femurkopfes und der knöchernen Spitze des Trochanter majors entlang der Femurschaftachse (59) (Abb. 15 b). Die ATD war positiv, wenn die kranialste Stelle des Femurkopfes oberhalb der Trochanterspitze war. Wenn die Trochanterspitze kranial des höchsten Punktes des Femurkopfes gelegen war, war die ATD negativ (Abb. 16),
- 3) Die Centrum-Trochanter-Distanz (CTD) wurde definiert als Distanz zwischen Trochanterspitze und dem Mittelpunkt des Hüftkopfes entlang der Femurschaftachse (46,60) (Abb. 15 c).

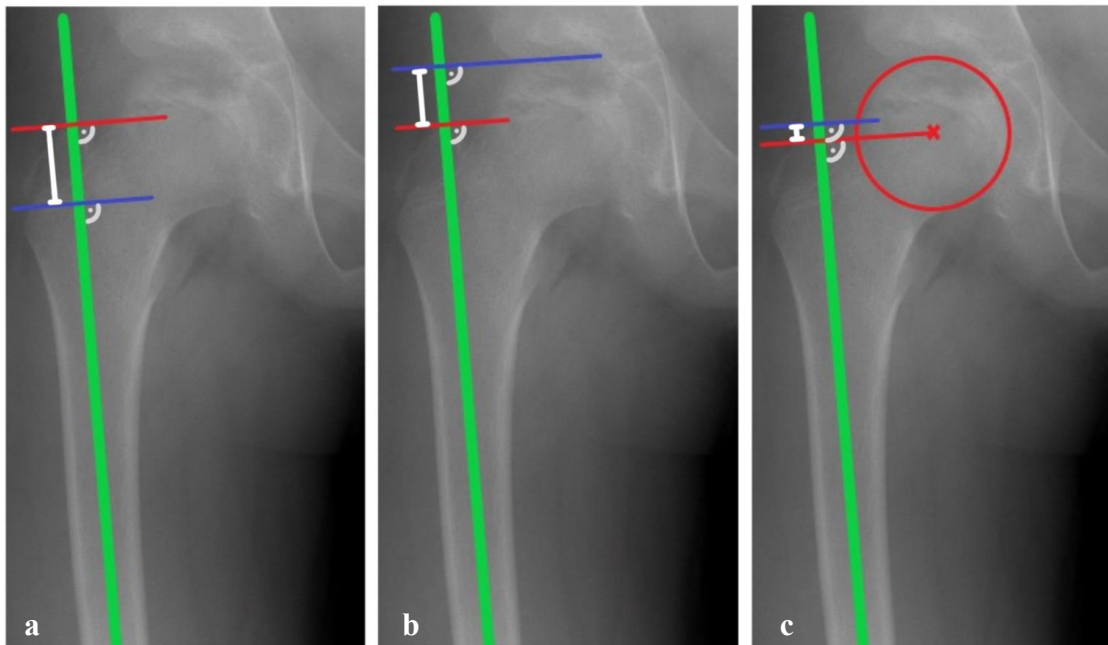


Abb. 15: Messungen der radiologischen Parameter

a: Messung der TH: Die grüne Linie stellt die Femurschaftachse dar. Die rote und blaue Linie stehen senkrecht zur Femurschaftachse und verlaufen durch die Trochanterspitze (rot) und die Trochanterbasis (blau); **b:** Messung der ATD: Die grüne Linie stellt die Femurschaftachse dar. Die rote und blaue Linie stehen senkrecht zur Femurschaftachse und verlaufen durch die Trochanterspitze (rot) und den höchsten Punkt des Femurkopfes (blau); **c:** Messung der CTD: Die grüne Linie stellt die Femurschaftachse dar. Die rote und blaue Linie stehen senkrecht zur Femurschaftachse und verlaufen durch die Trochanterspitze (blau) und den Hüftkopfmittelpunkt (rot). Eigene Abbildung mit klinikinternen Röntgenbildern

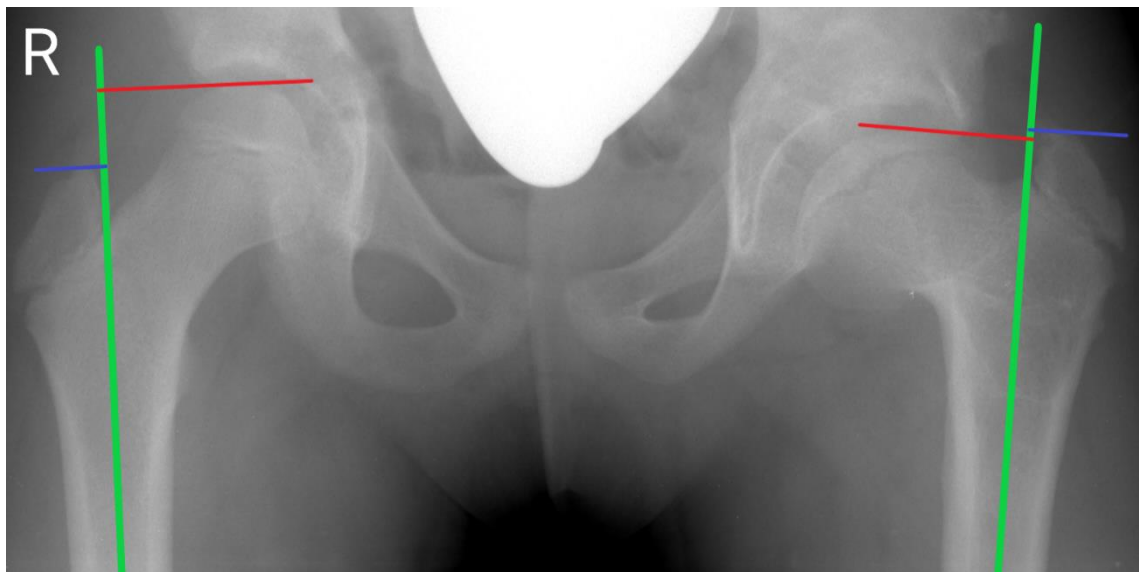


Abb. 16: Messung der ATD (artikulothorantären Distanz)

Röntgenbild einer weiblichen Patientin, Morbus Perthes links. Die rechte Hüfte zeigt einen positiven Wert der artikulothorantären Distanz (ATD) und die linke, erkrankte Hüfte einen negativen Wert. Grüne Linie: Femurschaftachse; rote Linie: Orthogonale durch kranialsten Punkt des Hüftkopfes; blaue Linie: Orthogonale durch Trochanterspitze. Eigene Abbildung mit klinikinternen Röntgenbildern

Zur Bestimmung des Hüftkopfmittelpunktes zeichnete man einen konzentrischen Kreis ein, den sogenannten „Best Fit Circle“ (61,62). Der Mittelpunkt dieses Kreises stellte den Mittelpunkt des Hüftkopfes dar.

Bei asphärischen Hüftköpfen zeigte sich bei Nutzung des „Best Fit Circle“ eine Distalisierung des Mittelpunktes mit potenzieller Verfälschung des Mittelpunktes. In der vorliegenden Arbeit wurde bei asphärischen, deformen Hüftköpfen eine Ellipse eingezeichnet und der Mittelpunkt dessen als Hüftkopfmittelpunkt festgelegt (Abb. 17).

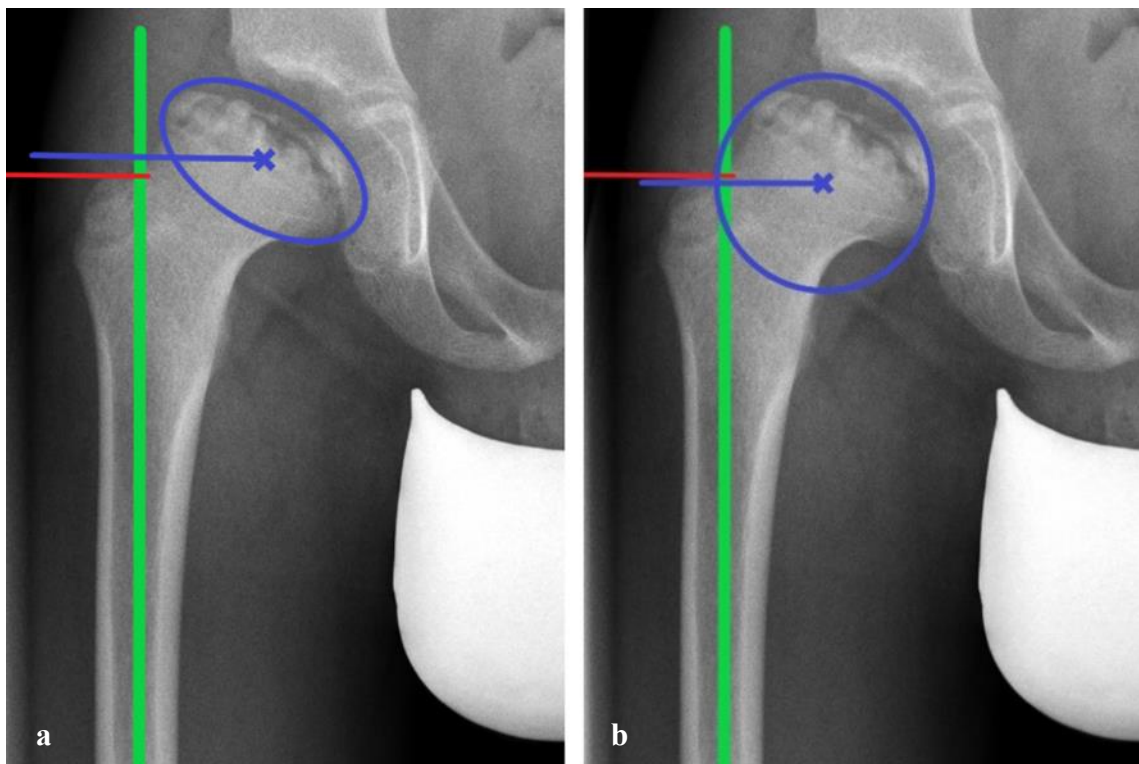


Abb. 17: Messung der CTD (Centrum-Trochanter-Distanz)

Röntgenbild eines männlichen Patienten mit Morbus Perthes rechts.

a: CTD-Messung mittels Ellipse. Es zeigt sich eine positive CTD; **b:** CTD-Messung mittels konzentrischem Kreis. Das Hüftkopfszentrum liegt im Vergleich zu „a“ distaler und die CTD wird negativ.

Grüne Linie: Longitudinale entlang der Femurschaftachse; rote Linie: Orthogonale durch Trochanterspitze; blaue Linie: Orthogonale durch Mittelpunkt des Hüftkopfes. Eigene Abbildung mit klinikinternen Röntgenbildern

2.5 Datenanalyse

2.5.1. Statistisch-analytische Auswertung

Die statistische und analytische Auswertung und Diagrammerstellung dieser Arbeit erfolgten mit Hilfe des Tabellenkalkulationsprogramms *Microsoft Office Excel* sowie mit *Python 3.8.5* für Windows. *Python* ist eine universale Programmiersprache und ermöglicht statistische Berechnungen und Erstellung von Grafiken.

Die Intrarater-Reliabilität wurde bestimmt durch die Intraklassen-Korrelation mit paarweisem Vergleich der erhobenen Messdaten beider Untersuchungszeitpunkte. Die Intraklassen-Korrelationskoeffizienten wurden mit dem Paket *psych 2.1.9* der Programmiersprache *R* berechnet.

Es wurde eine analytisch-statistische Auswertung mit dem Ziel einer vergleichenden Darstellung durchgeführt. Vergleich zwischen

- normaler, nicht erkrankter Hüfte - im Folgenden Kontrollseite genannt - und pathologischer, operierten Hüfte - im Folgenden Interventionsseite genannt -,
- Geschlecht,
- Patienten, die zum OP-Zeitpunkt unter 8 Jahre (U8) und 8 Jahre und älter (Ü8) gewesen sind.

Die statistische Analyse der vorliegenden Arbeit umfasste eine deskriptive Analyse der Daten, einschließlich Mittelwerte (MW) und Standardabweichungen (SD) sowie die Maximal (Max)- und Minimalwerte (Min) mit grafischer Darstellung.

Um statistische Tests durchführen zu können, wurden zunächst die vorliegenden metrischen Daten aus der Excel-Tabelle mittels Shapiro-Test auf Normalverteilung getestet. Dabei wurde die *Python*-Bibliothek *scipy 1.7.1 (statistical functions)* verwendet.

Die Normalverteilung stellte die Voraussetzung für parametrische Rechenverfahren dar. Bei Vorliegen einer Normalverteilung wurden T-Tests und Wilcoxon-Tests durchgeführt. Sofern die Voraussetzungen für einen T-Test für unabhängige Stichproben nicht erfüllt waren, bei zum Beispiel keinem Vorliegen einer Normalverteilung, wurde ein Mann-Whitney-U-Test durchgeführt.

Für die parametrische Auswertung ANOVA (englisch: *Analysis of Variance*, kurz ANOVA) und Regressionsanalyse wurde die *Python*-Bibliothek *pingouin 0.5* genutzt.

Die Varianzanalyse ANOVA wurde verwendet, um zu überprüfen, ob ein statistisch signifikanter Unterschied innerhalb der vergleichenden Gruppen - Kontroll- vs. Interventionsseite, männlich vs. weiblich und U8 vs. Ü8 - vorliegend ist. Voraussetzung zur Durchführung einer ANOVA-Testung war, dass die Messwerte der radiologischen Parameter unabhängig voneinander erhoben worden sind und jeweils annähernd normalverteilt waren. Die Unabhängigkeit der Messwerte konnte nicht eingehalten

werden, da aufeinanderfolgende Kontrolluntersuchungen in den festgelegten Messintervallen naturgemäß nicht unabhängig voneinander sein konnten. Daher befand man sich in der Situation eine „*Repeated Measures ANOVA*“ bzw. eine „*Mixed ANOVA*“ durchzuführen. Eine weitere schwächere Voraussetzung zur Durchführung einer ANOVA-Testung war, dass die Varianzen aller Differenzen der Messwerte in den jeweiligen Messintervallen der einzelnen radiologischen Parameter der Kontroll- bzw. Interventionsseite gleich sind. Da sich die Varianzen in dieser Arbeit unterschieden, wurde mit Hilfe der sogenannten Greenhouse-Geisser-Korrektur, die den p-Wert entsprechend anders berechnet, Abhilfe geschaffen, um dennoch eine ANOVA durchzuführen.

Eine Regressionsanalyse wurde durchgeführt, um zu ermitteln, ob es einen linearen Zusammenhang zwischen den unabhängigen Variablen - Alter zum Zeitpunkt der Trochanterapophyseodese, Zeit (entsprechend den Messintervallen) und Geschlecht - und den abhängigen Variablen - die radiologischen Parameter: TH, ATD und CTD - gab und um zu schauen, wie stark dieser war. Da in dieser Studie mehrere unabhängige Variable - auch Regressor genannt - untersucht worden sind, wurde eine multiple Regressionsanalyse durchgeführt. Es sollte eruiert werden, ob die abhängigen Variablen durch eine Regressionsgleichung vorhergesagt werden konnten, also ob ein funktionaler Zusammenhang zwischen Zielgröße - radiologische Parameter - und den Einflussgrößen - Geschlecht, Alter bei Operation, Zeit - vorlag. Es wurde der Korrelationskoeffizient „ R “ ermittelt, der die Stärke des Zusammenhangs ausdrückte. „ R^2 “ war der sogenannte Determinationskoeffizient und gab an, wie sehr die Varianz der abhängigen Variablen durch die unabhängigen Variablen erklärt werden konnte. Die Werte von R^2 liegen zwischen 0 und 1, wobei 1 bedeutet, dass die abhängige Variable vollständig durch die unabhängige Variable erklärt werden kann. Anschließend wurde eine ANOVA durchgeführt, um Aussagen über die statistische Signifikanz zu treffen. Die Darstellung der Regression erfolgte in einer räumlichen Darstellung; einer Regressionsebene. Sofern die abhängigen Variablen durch die Regressionsgleichung vorhergesagt werden konnte, konnte anhand des Regressionskoeffizienten „ β “ der Regressionsgleichung das geschätzte Wachstum berechnet werden.

Der Signifikanzwert wird als p-Wert bezeichnet. Testergebnisse mit einem p-Wert von unter 0,05 ($p < 0,05$) wurden als statistisch signifikant erachtet. Die signifikanten Unterschiede wurden jeweils unter Angabe des p-Wertes dargestellt.

2.5.2. Beurteilung der Effektivität

Zur Bestimmung der Effektivität der Trochanterapophyseodese im Verlauf erfolgte die radiologische Auswertung in unterschiedlichen Zeitintervallen. Die Entwicklung der gesunden Hüfte diente als Vergleich. Folgende Intervalle wurden definiert:

- 1) T0: Ausgangsbefund zum Zeitpunkt unmittelbar vor der Operation,
- 2) FU1: Untersuchungsbefund im Zeitraum 10 bis < 24 Monate postoperativ,
- 3) FU2: Untersuchungsbefund im Zeitraum 24 bis < 46 Monate postoperativ,
- 4) FU3: Untersuchungsbefund im Zeitraum 46 bis < 72 Monate postoperativ,
- 5) FU4: Untersuchungsbefund im Zeitraum ≥ 72 Monate bzw. knöcherne Durchbauung der Epiphysenfuge der gesunden Hüfte als Zeichen der Adoleszenz.

In der Therapie bei Patienten mit Morbus Perthes strebt man ein physiologisches Ergebnis mit einem sphärischen Gelenk und einer normalen Relation zwischen Höhe des Trochanter majors und des Hüftkopfes an. Dieses physiologische Ergebnis stellte in der vorliegenden Arbeit die nicht erkrankte, kontralaterale Hüfte dar und wurde somit als „Therapieziel“ festgelegt.

Die Effektivität der Trochanterapophyseodese wurde ermittelt, in dem

- 1) das Wachstum des Trochanter major, gemessen anhand der Trochanterhöhe (TH), sowohl der Kontroll- als auch der Interventionsseite vom Ausgangszeitpunkt (t0) bis zur Adoleszenz (FU4) berechnet und anschließend verglichen worden ist,
- 2) die artikulotrochantäre-Distanz (ATD) der Kontroll- und Interventionsseite bis zum Zeitpunkt der Adoleszenz verglichen worden ist. Im Verlauf sollten sich optimaler Weise die der Kontroll- und Interventionsseite annähern,
- 3) die Centrum-Trochanter-Distanz (CTD) der Kontroll- und Interventionsseite bis zum Zeitpunkt der Adoleszenz verglichen worden ist,
- 4) der Anteil von optimalen Ergebnissen sowie Über- und Unterkorrekturen anhand von ATD und CTD ermittelt worden ist. Als Referenzbereich wurden die SD von jeweils ATD und CTD der Kontrollseite zum Zeitpunkt der Adoleszenz (FU4) ermittelt und mit der Interventionsseite korreliert. Ein optimales OP-Ergebnis wurde definiert bei Werten innerhalb der ± 1 SD. Eine Unterkorrektur lag vor bei Werten unter - 2 SD und eine Überkorrektur bei Werten über + 2 SD.

3. Ergebnisse

3.1 Soziodemographische Merkmale

Im Zeitraum von 2006 bis 2019 erfüllten 46 Patienten die Einschlusskriterien und konnten in die Studie aufgenommen werden. Zum OP-Zeitpunkt betrug das Alter im Durchschnitt $8,0 \text{ Jahre} \pm 1,3 \text{ Jahren}$ (Abb. 18). 72% der Patienten waren männlich, das Verhältnis männlich zu weiblich betrug 2,5:1. Bei 65% war die rechte Hüfte betroffen.

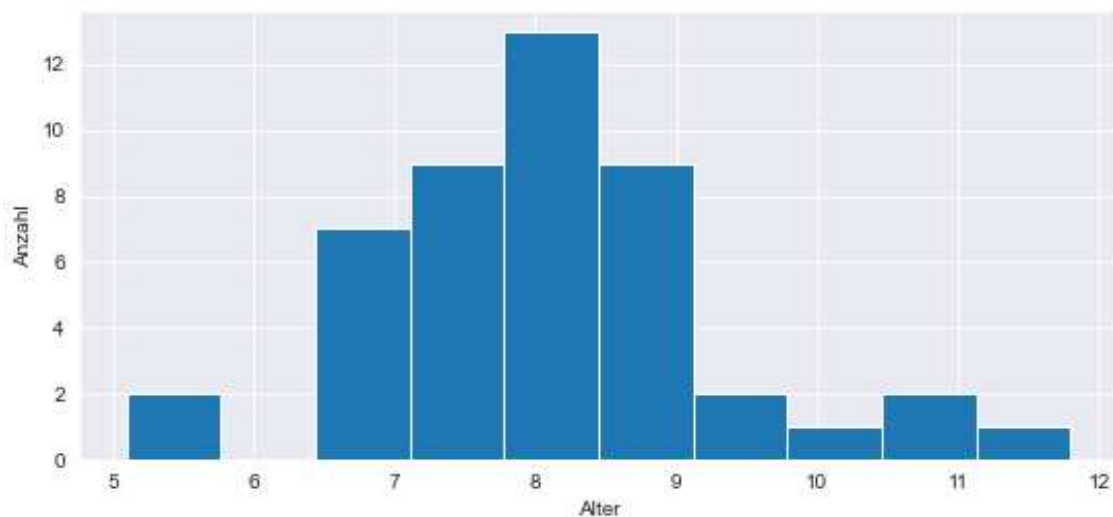


Abb. 18: Übersicht der Altersverteilung zum Zeitpunkt der Operation

y-Achse: Anzahl der inkludierten Patienten, x-Achse: Alter in Jahren

3.1.1. Deskriptive Übersicht der Vergleichsgruppe „Alter zum Zeitpunkt der OP“

In der Tabelle 4 ist die deskriptive Übersicht der Gruppen U8 und Ü8 dargestellt. Das Geschlechterverhältnis innerhalb der Gruppen zeigt eine annähernd homogene Verteilung.

		U8	Ü8
Anzahl		20 (43,5%)	26 (56,5%)
Geschlecht	weiblich	6 (30%)	7 (27%)
	männlich	14 (70%)	19 (73%)
Alter [Jahre]	MW $\pm$ SD	7,0 $\pm$ 0,7	8,9 $\pm$ 1
	Min	5,3	8,0
	Max	7,9	11,8

Tabelle 4: Deskriptive Übersicht der Gruppen U8 (< 8 Jahre) und Ü8 ($\geq$ 8 Jahre)

MW: Mittelwert; SD: Standardabweichung; Min: Kleinster Wert; Max: Größter Wert

3.1.2. Deskriptive Übersicht der Vergleichsgruppe „Geschlecht“

Die deskriptive Übersicht der männlichen und weiblichen Patienten ist in Tabelle 5 dargestellt.

		Männlich	Weiblich
Anzahl		33 (72%)	13 (28%)
Alter [Jahre]	MW $\pm$ SD	8,2 $\pm$ 1,4	7,9 $\pm$ 1,1
	Min	5,3	5,4
	Max	11,8	9,5

Tabelle 5: Deskriptive Übersicht der Patienten unterteilt in die Geschlechter

MW: Mittelwert; SD: Standardabweichung; Min: Kleinster Wert; Max: Größter Wert

3.2 Intrarater-Reliabilität

Die Analyse des Intraklassen-Korrelationskoeffizienten (ICC) für die verschiedenen Messungen der einzelnen Parameter mit paarweisem Vergleich und absoluter Übereinstimmung zur Reliabilitätsüberprüfung des Untersuchers ergab einen ICC-Wert von mindestens 0,88 und einen p-Wert von deutlich unter 0,01 (Tabelle 6). Dies zeigt eine ausgezeichnete Intrarater-Reliabilität.

Parameter in den einzelnen Messintervallen	ICC	p-Wert
ATD n t0	0.98	< 0,01
ATD p t0	0.99	< 0,01
CTD n t0	0.98	< 0,01
CTD p t0	0.98	< 0,01
TH n t0	0.99	< 0,01
TH p t0	0.98	< 0,01
ATD n FU 1	0.98	< 0,01
ATD p FU 1	0.99	< 0,01
CTD n FU 1	0.99	< 0,01
CTD p FU 1	0.96	< 0,01
TH n FU 1	0.99	< 0,01
TH p FU 1	0.99	< 0,01
ATD n FU 2	0.99	< 0,01
ATD p FU 2	0.99	< 0,01
CTD n FU 2	0.99	< 0,01
CTD p FU 2	0.99	< 0,01
TH n FU 2	0.99	< 0,01
TH p FU 2	0.98	< 0,01
ATD n FU 3	0.97	< 0,01
ATD p FU 3	0.99	< 0,01
CTD n FU 3	0.98	< 0,01
CTD p FU 3	0.99	< 0,01
TH n FU 3	0.98	< 0,01
TH p FU 3	0.97	< 0,01
ATD n FU 4	0.99	< 0,01
ATD p FU 4	0.99	< 0,01
CTD n FU 4	0.98	< 0,01
CTD p FU 4	0.99	< 0,01
TH n FU 4	0.94	< 0,01
TH p FU 4	0.88	< 0,01

Tabelle 6: Intraklassen-Korrelationskoeffizienten (ICC) und p-Werte

ATD: artikulotrochantäre Distanz; CTD: Centrum-Trochanter-Distanz; TH: Trochanterhöhe; n: normale, gesunde Hüfte (Kontrollseite); p: pathologische, operierte Hüfte (Interventionsseite); t0, FU1, FU2, FU3, FU4: festgelegte Messintervalle

3.3 Auswertung - Trochanterhöhe (TH)

3.3.1. Entwicklung der gesunden Hüfte

Der Trochanter major der gesunden Hüfte, gemessen an der TH, wächst annähernd linear bis zum 11. LJ durchschnittlich $3,0 \pm 0,8$ mm pro Jahr ($p < 0,05$) (Tabelle 7, Abb. 19). Zwischen dem 11. und 12. LJ scheint ein verstärktes Wachstum aufzutreten von 5,6 mm pro Jahr ($p = 0,001$). Anschließend nimmt das Wachstum ab und zeigt keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Altersgruppen ($p > 0,05$).

Alter [Jahre]	Anzahl *	TH MW $\pm$ SD [in mm]
5 - < 6	2	11,7 $\pm$ 5,7
6 - < 7	6	16,3 $\pm$ 3,8
7 - < 8	18	19,2 $\pm$ 3,7
8 - < 9	33	23,3 $\pm$ 3,4
9 - < 10	24	25,5 $\pm$ 4,0
10 - < 11	23	28,3 $\pm$ 4,2
11 - < 12	14	33,9 $\pm$ 5,0
12 - < 13	12	36,7 $\pm$ 5,7
13 - < 14	10	37,7 $\pm$ 5,4
14 - < 15	7	41,5 $\pm$ 1,8
15 - < 16	11	42,4 $\pm$ 4,7
≥ 16	7	44,0 $\pm$ 3,4

Tabelle 7: Altersabhängige Mittelwerte der Trochanterhöhe (TH) der gesunden Hüfte

*Anzahl der ausgewerteten Röntgenbilder; MW: Mittelwert; SD: Standardabweichung; mm: Millimeter

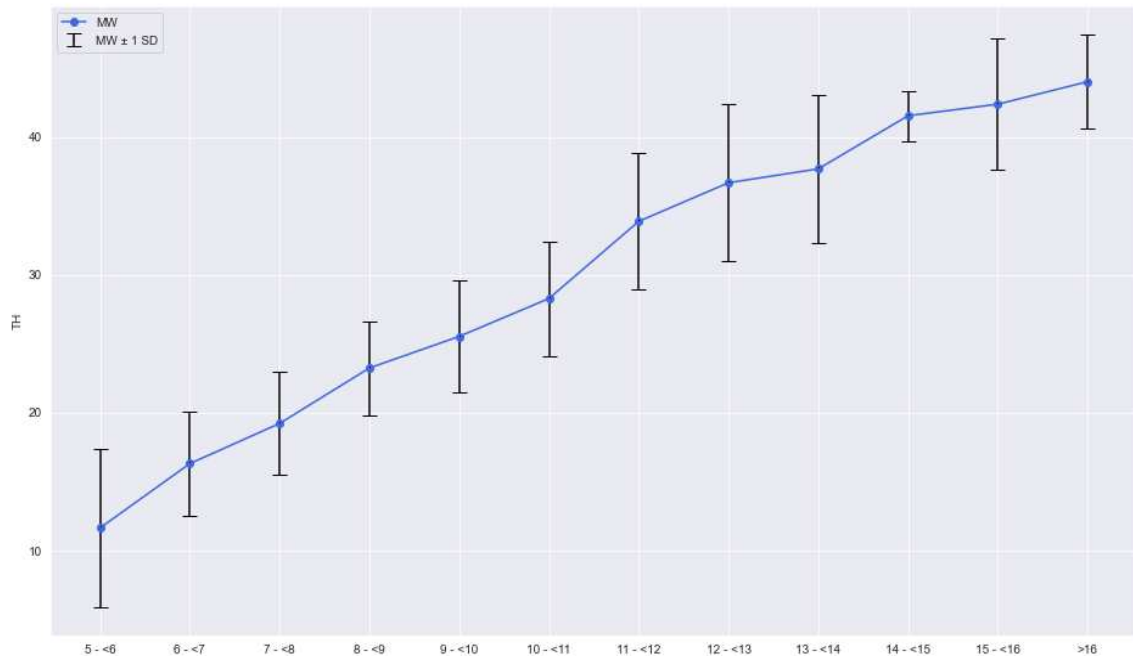


Abb. 19: Entwicklung der Trochanterhöhe (TH) der gesunden Hüfte

y-Achse: TH in Millimetern (mm), x-Achse: Alter in Jahren. MW: Mittelwert; SD: Standardabweichung (Bezug zu Tabelle 7)

Um Unterschiede im Wachstum zwischen Jungen und Mädchen zu eruieren, wurde die Entwicklung der gesunden Hüfte geschlechtsspezifisch untersucht (Tabelle 8, Abb. 20).

Der Verlauf ist sowohl bei den männlichen als auch bei den weiblichen Patienten annähernd gleich. Ein vermehrtes Wachstum ist zwischen dem 11. und 12. LJ zu eruieren.

Wegen des kleinen Datensatzes ist jedoch keine statistisch signifikante Aussage zu treffen.

	Männlich		Weiblich	
Alter [Jahre]	Anzahl *	TH MW $\pm$ SD [in mm]	Anzahl *	TH MW $\pm$ SD [in mm]
5 - < 6	1	7,6	1	15,7
6 - < 7	5	15,6 $\pm$ 3,8	1	19,9
7 - < 8	12	18,6 $\pm$ 3,4	6	20,5 $\pm$ 4,5
8 - < 9	23	22,6 $\pm$ 3,0	10	24,8 $\pm$ 4,0
9 - < 10	17	24,5 $\pm$ 3,8	7	28,2 $\pm$ 3,6
10 - < 11	16	26,9 $\pm$ 4,3	7	31,4 $\pm$ 1,4
11 - < 12	11	33,0 $\pm$ 4,4	3	37,0 $\pm$ 6,8
12 - < 13	10	36,1 $\pm$ 6,2	2	39,4 $\pm$ 0,2
13 - < 14	5	36,9 $\pm$ 6,8	5	38,4 $\pm$ 4,1
14 - < 15	3	41,4 $\pm$ 0,3	4	41,7 $\pm$ 2,5
15 - < 16	10	42,4 $\pm$ 5,0	1	42,2
≥ 16	6	45,0 $\pm$ 2,5	1	38,3

Tabelle 8: Altersabhängige Mittelwerte der Trochanterhöhe (TH) der gesunden Hüfte der weiblichen und männlichen Patienten

*Anzahl der ausgewerteten Röntgenbilder; MW: Mittelwert; SD: Standardabweichung; mm: Millimeter

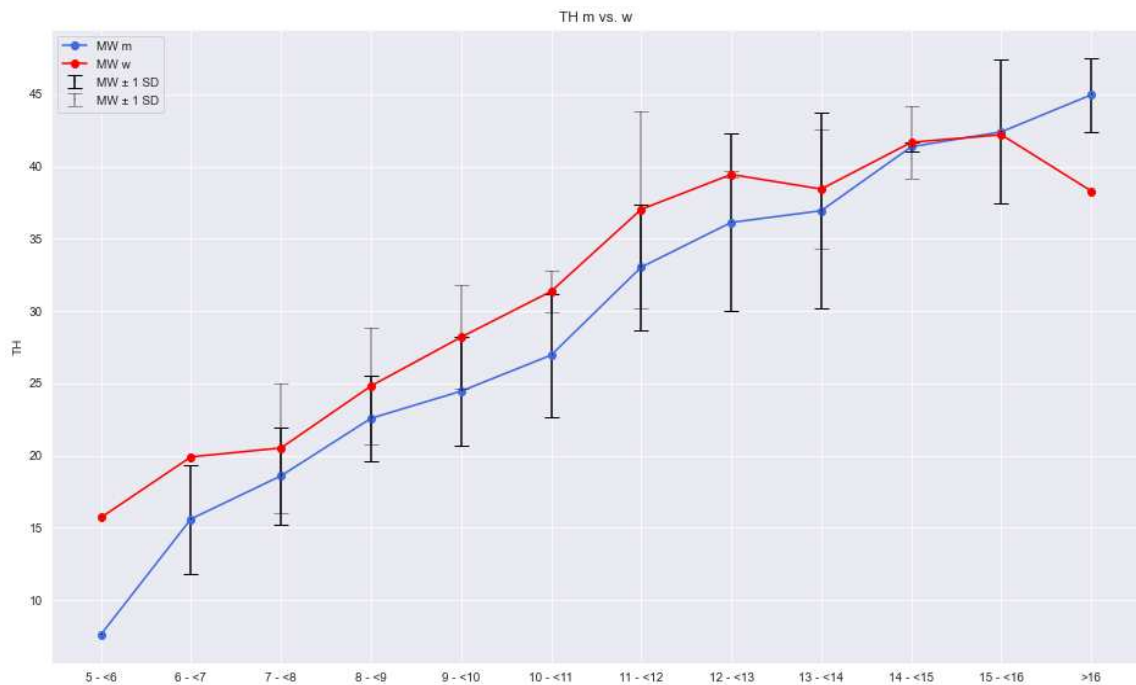


Abb. 20: Entwicklung der Trochanterhöhe (TH) der gesunden Hüfte der weiblichen (w; rot) und männlichen (m; blau) Patienten

y-Achse: TH in mm (Millimetern), x-Achse: Alter in Jahren. MW: Mittelwert; SD: Standardabweichung (Bezug zu Tabelle 8)

3.3.2. Vergleich zwischen Kontroll- und Interventionsseite

Im Durchschnitt wuchs der Trochanter major der Kontrollseite während des Beobachtungszeitraumes (T0 bis FU4) $20,4 \pm 6,9$ mm und der Trochanter der Interventionsseite $14,5 \pm 6,4$ mm (Tabelle 9, Abb. 21). Somit konnte durch die Trochanterapophyseodese das Trochanterwachstum um 28,9% gehemmt werden ($p = 0,005$).

	T0	FU1	FU2	FU3	FU4
Anzahl *	46	43	36	23	22
TH n MW $\pm$ SD [in mm]	$21,2 \pm 5,2$	$25,6 \pm 6,0$	$30,5 \pm 6,4$	$37,3 \pm 5,5$	$42,5 \pm 3,7$
TH p MW $\pm$ SD [in mm]	$19,0 \pm 4,9$	$21,8 \pm 4,6$	$25,7 \pm 4,5$	$30,7 \pm 4,2$	$33,6 \pm 4,2$
p-Werte (n vs. p)	0,04	0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001

Tabelle 9: Mittelwerte (MW) und Standardabweichung (SD) für den Parameter “Trochanterhöhe” (TH) der gesunden (n) und erkrankten Hüfte (p) im Verlauf

p-Werte (n vs. p): vergleichende (vs.: *versus*) Auswertung mittels T-Test von gesunder (n) und erkrankter (p) Hüfte; * Anzahl der inkludierten Patienten in den jeweiligen Messintervallen (T0-FU4); mm: Millimeter

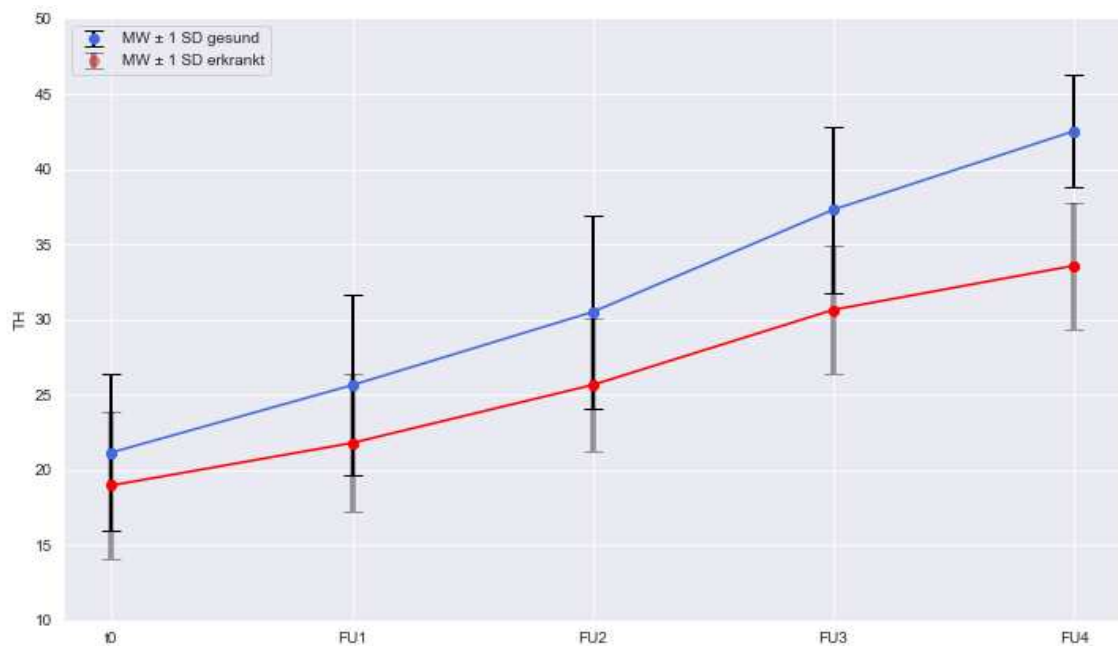


Abb. 21: Entwicklung der Trochanterhöhe (TH) der gesunden (blau) und erkrankten (rot) Hüfte
y-Achse: TH in Millimetern (mm), x-Achse: Zeitlicher Verlauf vom Ausgangszeitpunkt t0 bis zur Adoleszenz (FU4). MW: Mittelwert; SD: Standardabweichung (Bezug zu Tabelle 9)

	p-Werte der Interventionsseite	p-Werte der Kontrollseite
T0 vs. FU1	< 0,01	< 0,01
FU1 vs. FU2	< 0,01	< 0,01
FU2 vs. FU3	< 0,01	< 0,01
FU3 vs. FU4	< 0,01	< 0,01

Tabelle 10: Überblick der p-Werte der Interventions- und Kontrollseite für den Parameter „Trochanterhöhe“ zwischen den einzelnen Messintervallen t0 bis FU4
Vergleichende Auswertung mittels T-Test; vs.: *versus*

In der statistischen Auswertung mittels T-Test (Tabelle 9 und 10) konnten sowohl statistisch signifikante Unterschiede der erhobenen Werte der TH zwischen der Kontroll- und Interventionsseite ermittelt werden, als auch statistisch signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Messintervallen.

Die durchgeführte Regressionsanalyse ist in den Tabellen 11 und 12 dargestellt.

Die Einflussgröße „Geschlecht“ zeigte mit einem „Relimp“-Wert von 1,41 in der Kontrollseite und 1,88 in der Interventionsseite einen zu vernachlässigenden geringen Einfluss, weswegen das Regressionsmodell angepasst worden ist, um die Varianz genauer zu erklären. Daraus ergab sich die korrigierte Analyse, die in den Tabellen 11 und 12 dargestellt ist.

Da der Determinationskoeffizient „ R^2 “ bei der Kontrollseite 0,79 und bei der Interventionsseite 0,75 betrug, konnte von einem linearen Zusammenhang zwischen TH und den unabhängigen Variablen - Zeit und OP-Alter - ausgegangen werden.

Bei der Kontrollseite (Tabelle 11, Abb. 22) konnte 82,4% der Varianz von „TH“ mit der Variablen „Zeit“ erklärt werden und 17,6% mit der Variablen „Alter zum Zeitpunkt der OP“ ($p < 0,01$).

Bei der Interventionsseite (Tabelle 12, Abb. 23) konnte 73,2% der Varianz von „TH“ mit der Variablen „Zeit“ und 26,8% mit der Variablen „OP-Alter“ erklärt werden ($p < 0,01$).

Variable	β	R^2	<i>Relimp</i> [in %]	p-Wert		R^2	<i>Relimp</i> [in %]	p-Wert
Zeit	0,008	0,8	80,52	< 0,01	→	0,79	82,41	< 0,01
OP-Alter	2,63	0,8	18,07	< 0,01		0,79	17,59	< 0,01
Geschlecht	-2,32	0,8	1,41	0,01				

Tabelle 11: Regressionsanalyse der abhängigen Variablen „TH“ (Trochanterhöhe) der Kontrollseite (n)

Vor (links) und nach Korrektur (rechts) durch Eliminierung der unabhängigen Variablen „Geschlecht“. R^2 : Determinationskoeffizient; *Relimp*: relative importance of predictors in a regression model in Prozent (%); OP: Operation

Variable	R^2	<i>Relimp</i> [in %]	p-Wert		R^2	<i>Relimp</i> [in %]	p-Wert
Zeit	0,76	70,83	< 0,01	→	0,75	73,17	< 0,01
OP-Alter	0,76	27,29	< 0,01		0,75	26,83	< 0,01
Geschlecht	0,76	1,88	< 0,01				

Tabelle 12: Regressionsanalyse der abhängigen Variablen „TH“ (Trochanterhöhe) der Interventionsseite (p)

Vor (links) und nach Korrektur (rechts) durch Eliminierung der unabhängigen Variablen „Geschlecht“. R^2 : Determinationskoeffizient; *Relimp*: relative importance of predictors in a regression model in Prozent (%); OP: Operation

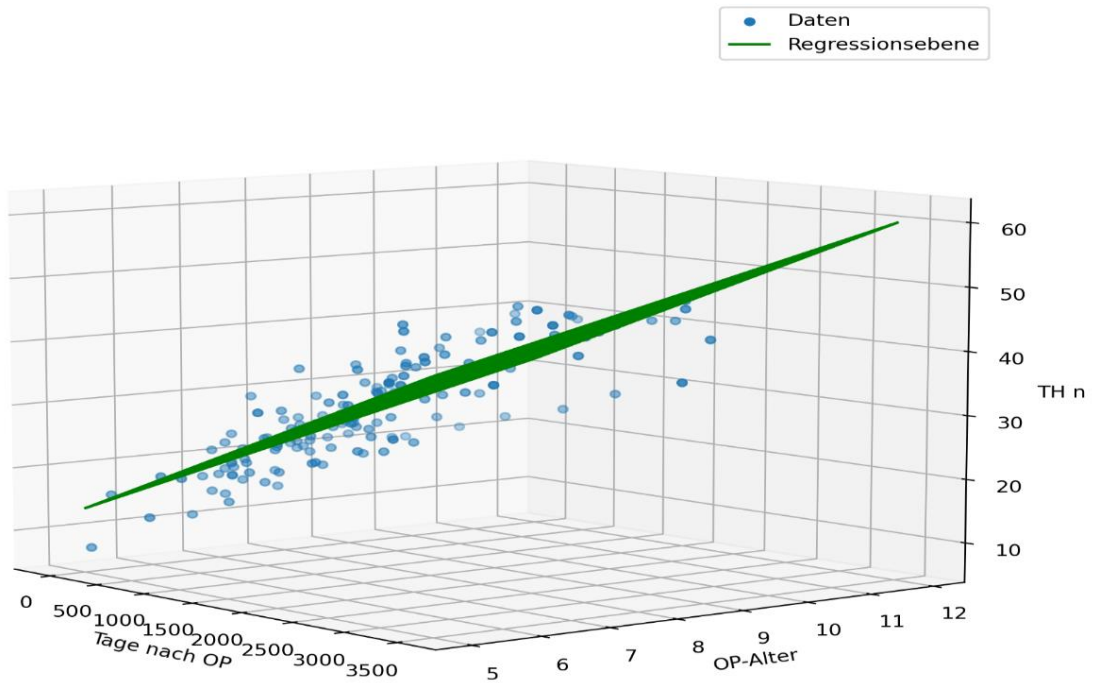


Abb. 22: Regressionsfläche der abhängigen Variablen „TH“ (Trochanterhöhe) der Kontrollseite (n)
y-Achse: Variable „TH“; x_1 und x_2 -Achse: unabhängige Variable „Zeit“, entsprechend „Tage nach OP“, und „OP-Alter“ in Jahren

Regressionsgleichung: $TH(n) = 1,42 + 0,0081 \times \text{Tage nach OP} + 2,5 \times \text{OP-Alter}$

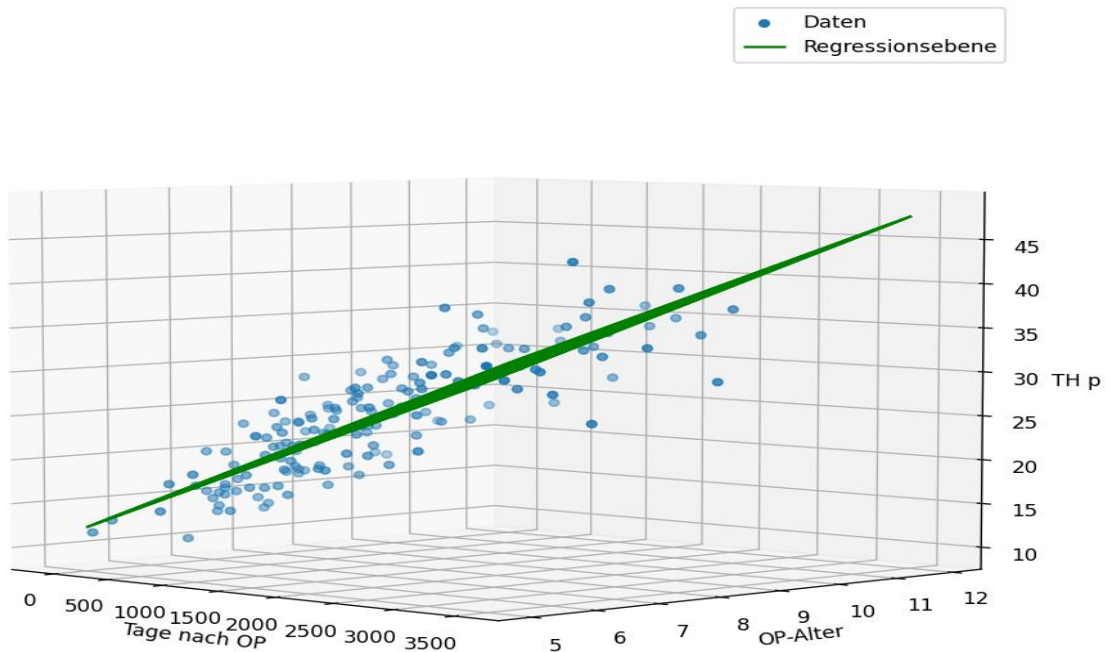


Abb. 23: Regressionsfläche der abhängigen Variable „TH“ (Trochanterhöhe) der Interventionsseite (p)

y-Achse: Variable „TH“; x_1 und x_2 -Achse: unabhängige Variable „Zeit“, entsprechend „Tage nach OP“, und „OP-Alter“ in Jahren

Regressionsgleichung: $TH(p) = 1,26 + 0,0056 \times \text{Tage nach OP} + 2,24 \times \text{OP-Alter}$

Da ein linearer Zusammenhang vorlag, konnte anhand des Regressionskoeffizienten der Regressionsgleichung (Abb. 22 und 23) das Wachstum ermittelt werden. Der Regressionskoeffizient „ β “ für die abhängige Variable „TH“ der Kontrollseite betrug $\beta = 0,0081$ und der Interventionsseite $\beta = 0,0056$. Daraus ergibt sich ein Wachstum von

- 2,96 mm pro Jahr der Kontrollseite,
- 2,04 mm pro Jahr der Interventionsseite.

Das Trochanterwachstum wurde durch die Trochanterapophyseodese somit um 0,92 mm pro Jahr gehemmt.

3.3.3. Vergleich der Altersgruppen

Die Entwicklung der TH der Kontroll- und Interventionsseite beider Altersgruppen - U8 und Ü8 - sind in Tabelle 13 und Abbildung 24 dargestellt.

In der Gruppe U8 wuchs der Trochanter major der Kontrollseite im Beobachtungszeitraum durchschnittlich $23,2 \pm 5,6$ mm und der Interventionsseite durchschnittlich $16,3 \pm 6,2$ mm. Das Wachstum wurde somit in der Gruppe U8 um 29,7% durch die Trochanterapophyseodese gehemmt ($p = 0,02$).

In der Gruppe Ü8 wuchs der Trochanter major der Kontrollseite im Beobachtungszeitraum im Durchschnitt $18,0 \pm 7,1$ mm und der Interventionsseite im Durchschnitt $13,0 \pm 6,4$ mm. In der Gruppe Ü8 wurde das Wachstum somit um 27,8% durch die Trochanterapophyseodese gehemmt, der Unterschied war nicht statistisch signifikant ($p = 0,07$).

Anhand der ANOVA-Testung konnte ein statistisch signifikanter Einfluss von Alter zum Zeitpunkt der Operation auf die TH ermittelt werden (p (Kontrollseite) = 0,04, p (Interventionsseite) < 0,01).

	T0	FU1	FU2	FU3	FU4
U8					
Anzahl [×]	20	20	15	12	10
TH n <i>MW ± SD</i> [in mm]	$18,0 \pm 4,7$	$21,1 \pm 4,9$	$26,8 \pm 4,7$	$36,0 \pm 6,1$	$42,6 \pm 4,0$
TH p <i>MW ± SD</i> [in mm]	$15,5 \pm 3,0$	$18,7 \pm 2,8$	$22,7 \pm 3,2$	$28,7 \pm 4,1$	$32 \pm 4,7$
Ü8					
Anzahl [×]	26	23	21	11	12
TH n <i>MW ± SD</i> [in mm]	$23,6 \pm 4,2$	$28,7 \pm 5,2$	$33,2 \pm 6,3$	$38,7 \pm 4,6$	$42,5 \pm 3,7$
TH p <i>MW ± SD</i> [in mm])	$21,7 \pm 4,5$	$24,5 \pm 4,2$	$27,8 \pm 4,0$	$32,8 \pm 3,3$	$34,9 \pm 3,4$
p-Werte für TH n (U8 vs. Ü8)	< 0,01 *	< 0,01	< 0,01	0,25	0,94
p-Werte für TH p (U8 vs. Ü8)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01	0,06 *

Tabelle 13: Mittelwerte (MW) und Standardabweichung (SD) für den Parameter “Trochanterhöhe” (TH) der Gruppen U8 (< 8 Jahre) und Ü8 (≥ 8 Jahre) der gesunden (n) und erkrankten Hüfte (p) im Verlauf

[×]: Anzahl der Patienten in den jeweiligen Messintervallen (T0-FU4); p-Werte (U8 vs. Ü8): vergleichende (vs.: *versus*) Auswertung mittels T-Test und *: Mann-Whitney-U-Test von U8 und Ü8; mm: Millimeter

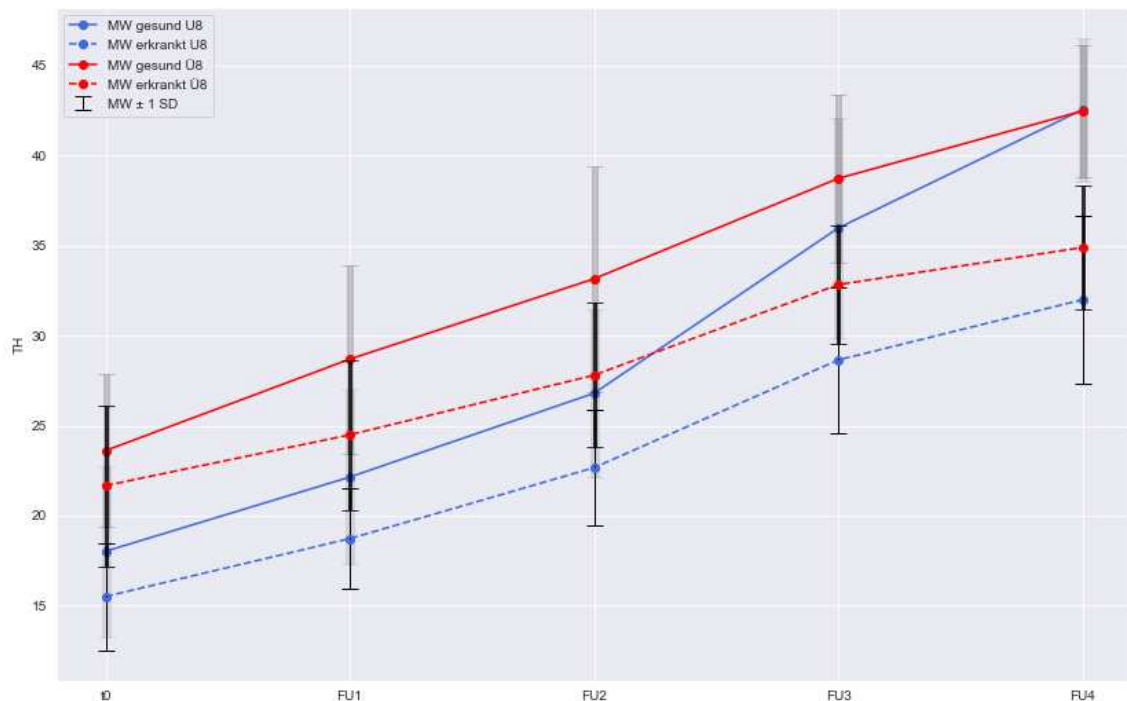


Abb. 24: Entwicklung der Trochanterhöhe (TH) der der Altersgruppen U8 (< 8 Jahre; blau) und Ü8 (≥ 8 Jahre; rot) der gesunden und erkrankten Hüfte

y-Achse: TH in Millimetern (mm), x-Achse: Zeitlicher Verlauf vom Ausgangszeitpunkt t0 bis zur Adoleszenz (FU4). MW: Mittelwert; SD: Standardabweichung (Bezug zu Tabelle 13)

Um Unterschiede im Hinblick auf das Alter bei OP festzustellen, wurde ebenfalls eine Regressionsanalyse durchgeführt (Tabelle 14 und 15).

Der Determinationskoeffizient R^2 (Tabelle 15) der Gruppe Ü8 war im Gegensatz zur der Gruppe U8 kleiner, sodass die Regressionsgleichung besser durch die Werte der Gruppe U8 dargestellt werden konnte. Dies wird in den Abbildungen 25 bis 28 deutlich, da die Gruppe Ü8 eine größere Streuung der Messdaten in Relation zur Regressionsfläche aufweist.

In der Gruppe U8 (Tabelle 14) hatte die Variable „Zeit“ den größten Einfluss auf die TH bei einem „Relimp“-Wert von 94,4% in der Kontrollseite und 98,5% in der Interventionsseite ($p < 0,001$). Die Variable „OP-Alter“ ist bei der Gruppe U8 weitgehend vernachlässigbar.

Im Gegensatz dazu konnten in der Gruppe Ü8 (Tabelle 15) in der Kontrollseite 16,2% und in der Interventionsseite 22% der Varianz mit der Variablen „OP-Alter“ erklärt werden.

Das legt die Vermutung nahe, dass die OP zu einem Zeitpunkt über dem 8. LJ ineffektiv war. Eine veränderte Perspektive der Regressionsebene (Abb. 29) lässt vermuten, dass die über 10-Jährigen nicht adäquat durch die Regressionsebene beschrieben werden können. Eine valide, statistisch signifikante Aussage ist jedoch nicht möglich.

Kontrollseite (n)

	R ²	Relimp [in %]	p-Wert
Zeit	0,85	90,7	< 0,01
OP-Alter	0,85	5,8	< 0,01
Geschlecht	0,85	3,5	< 0,01

→

R ²	Relimp [in %]	p-Wert
0,83	94,4	< 0,01
0,83	5,6	< 0,01

Interventionsseite (p)

	R ²	Relimp [in %]	p-Wert
Zeit	0,79	93,3	< 0,01
OP-Alter	0,79	1,7	< 0,01
Geschlecht	0,79	5	< 0,01

→

R ²	Relimp [in %]	p-Wert
0,76	98,5	< 0,01
0,76	1,5	0,01

Tabelle 14: Regressionsanalyse der abhängigen Variablen „TH“ (Trochanterhöhe) der Gruppe U8 (< 8 Jahre) der Kontrollseite (n) und Interventionsseite (p)

Vor (links) und nach Korrektur (rechts) durch Eliminierung der unabhängigen Variablen „Geschlecht“.
R²: Determinationskoeffizient; *Relimp*: relative importance of predictors in a regression model in Prozent;
OP: Operation, Zeit entspricht „Tage nach OP“.

Kontrollseite (n)

	R ²	Relimp [in %]	p-Wert
Zeit	0,73	82,9	< 0,01
OP-Alter	0,73	16,5	< 0,01
Geschlecht	0,73	0,6	0,1

→

R ²	Relimp [in %]	p-Wert
0,72	83,8	< 0,01
0,72	16,2	< 0,01

Interventionsseite (p)

	R ²	Relimp [in %]	p-Wert
Zeit	0,70	75,4	< 0,01
OP-Alter	0,70	23,3	< 0,01
Geschlecht	0,70	1,3	< 0,01

→

R ²	Relimp [in %]	p-Wert
0,68	77,0	< 0,01
0,68	23,0	< 0,01

Tabelle 15: Regressionsanalyse der abhängigen Variablen „TH“ (Trochanterhöhe) der Gruppe Ü8 (≥ 8 Jahre) der Kontrollseite (n) und Interventionsseite (p)

Vor (links) und nach Korrektur (rechts) durch Eliminierung der unabhängigen Variablen „Geschlecht“.
R²: Determinationskoeffizient; *Relimp*: relative importance of predictors in a regression model in Prozent;
OP: Operation

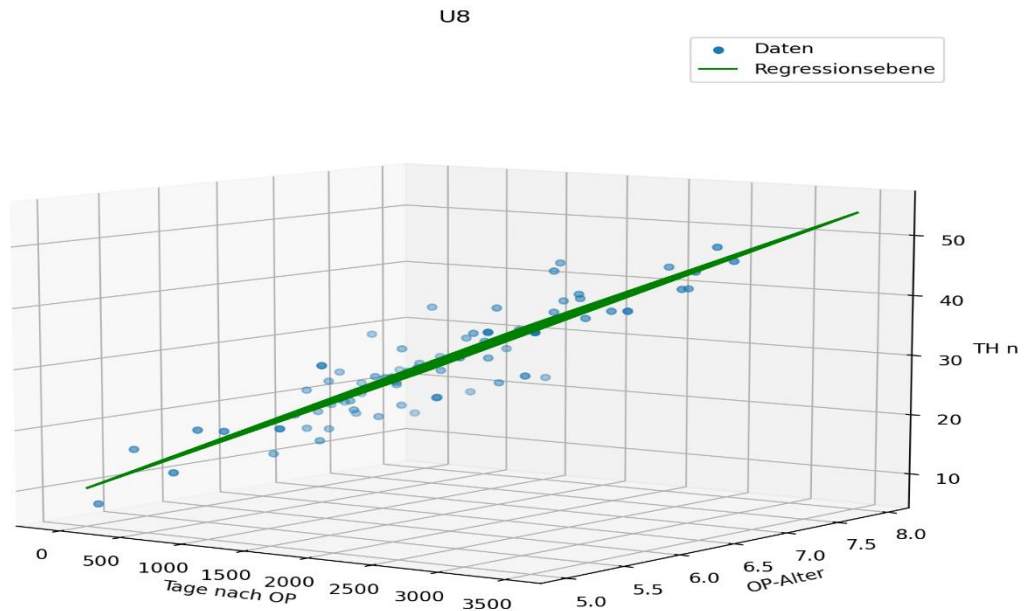


Abb. 25: Regressionsfläche der Gruppe „U8“ (< 8 Jahre) der Kontrollseite (n) für die abhängige Variable „Trochanterhöhe“ (TH)

y-Achse: Variable „TH“; x_1 und x_2 -Achse: unabhängige Variable „Zeit“, entsprechend „Tage nach OP“, und „OP-Alter“

Regressionsgleichung: $TH(n)_{U8} = (-7,91) + 0,0093 \times \text{Tage nach OP} + 3,68 \times \text{OP-Alter}$

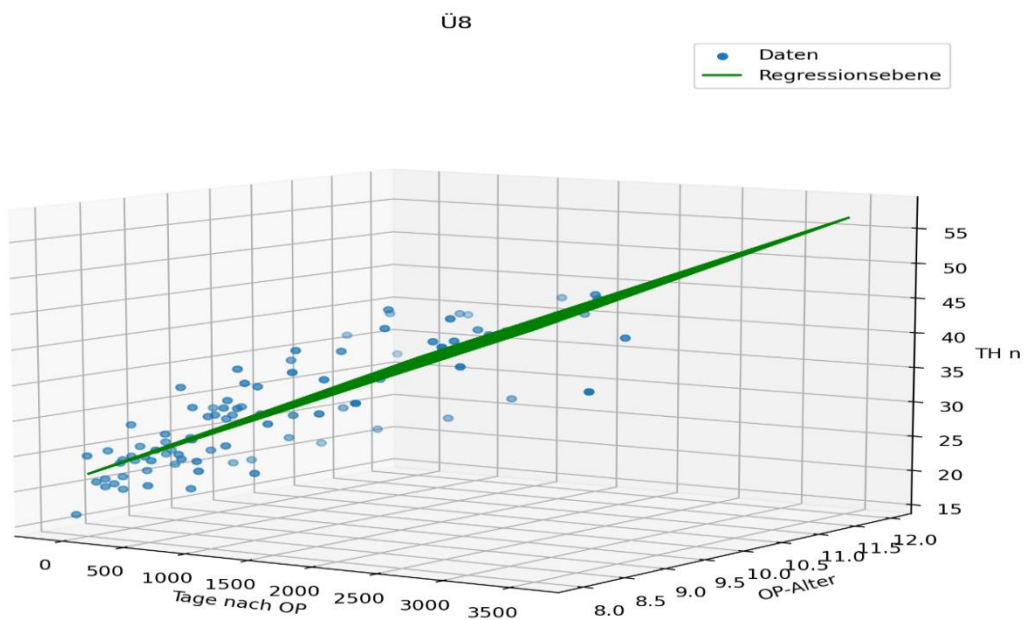


Abb. 26: Regressionsfläche der Gruppe „Ü8“ (≥ 8 Jahre) der Kontrollseite (n) für die abhängige Variable „Trochanterhöhe“ (TH)

y-Achse: Variable „TH“; x_1 und x_2 -Achse: unabhängige Variable „Zeit“, entsprechend „Tage nach OP“, und „OP-Alter“

Regressionsgleichung: $TH(n)_{\dot{U}8} = 4,2 + 0,007 \times \text{Tage nach OP} + 2,29 \times \text{OP-Alter}$

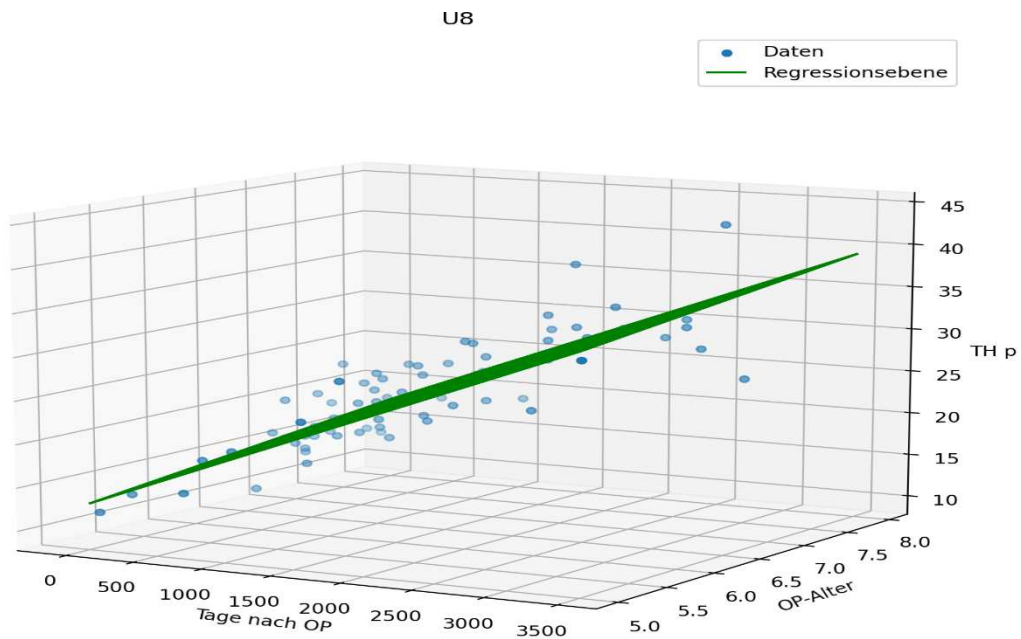


Abb. 27: Regressionsfläche der Gruppe U8 (< 8 Jahre) der Interventionsseite (p) für die abhängige Variable „Trochanterhöhe“ (TH)

y-Achse: Variable „TH“; x_1 und x_2 -Achse: unabhängige Variable „Zeit“, entsprechend „Tage nach OP“, und „OP-Alter“

Regressionsgleichung: TH (p) U8 = 6,02 + 0,0062 x Tage nach OP + 1,42 x OP-Alter

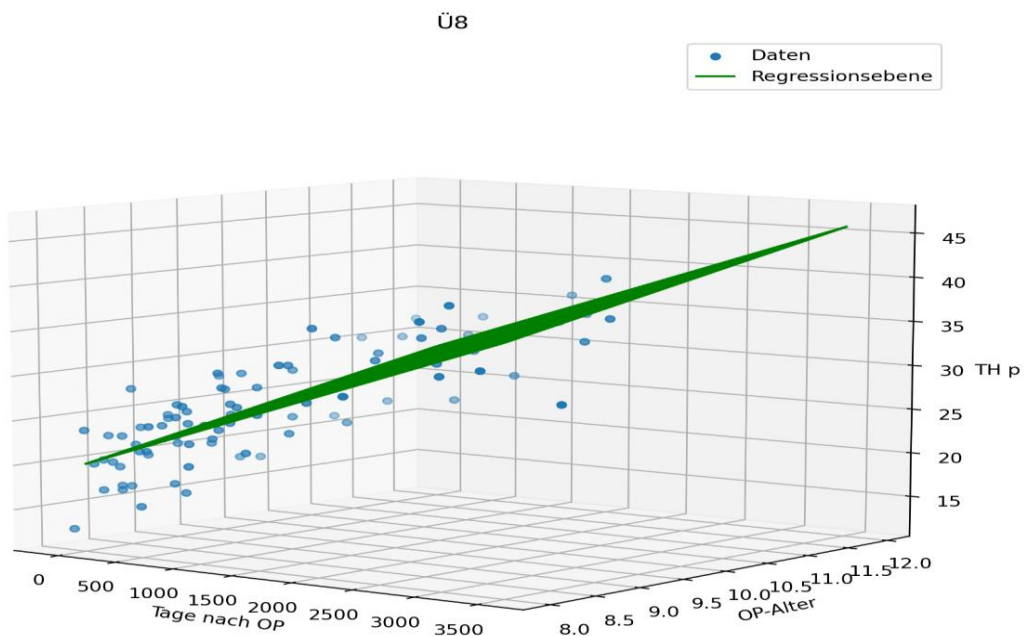


Abb. 28: Regressionsfläche der Gruppe Ü8 (≥ 8 Jahre) der Interventionsseite (p) für die abhängige Variable „Trochanterhöhe“ (TH)

y-Achse: Variable „TH“; x_1 und x_2 -Achse: unabhängige Variable „Zeit“, entsprechend „Tage nach OP“, und „OP-Alter“

Regressionsgleichung: TH (p) Ü8 = 3,78 + 0,0049 x Tage nach OP + 2,06 x OP-Alter

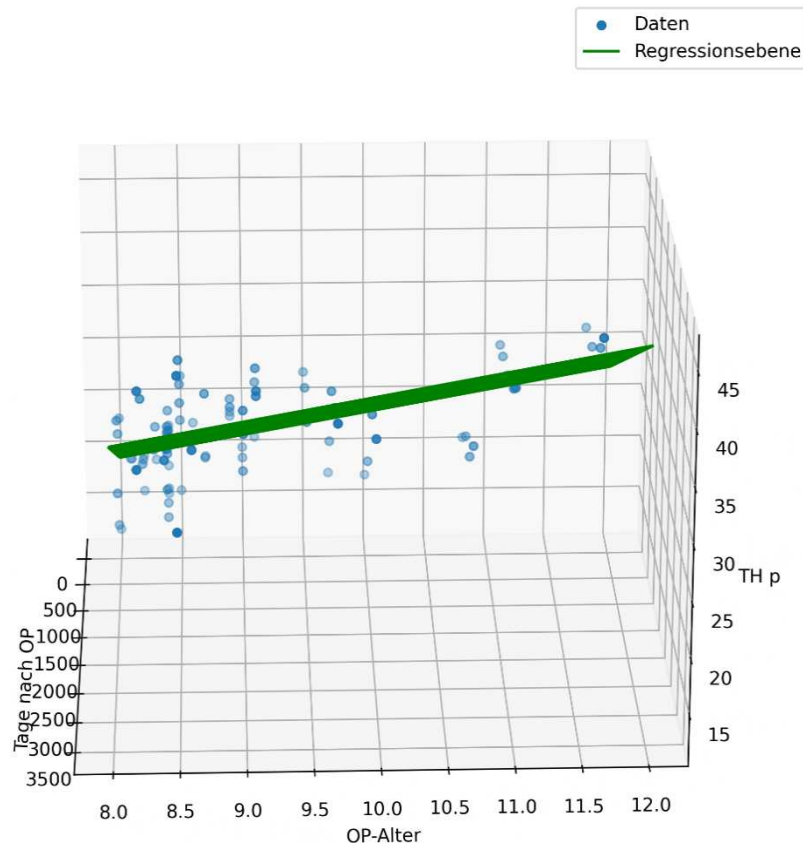


Abb. 29: Veränderte Perspektive der räumlichen Darstellung der Regressionssebene der Gruppe Ü8 (≥ 8 Jahre) der Interventionsseite (p) (Abb. 28) zur räumlichen Darstellung der Streubreite der Messwerte der Trochanterhöhe (TH)

y-Achse: Variable „TH“; x_1 und x_2 -Achse: unabhängige Variable „Zeit“, entsprechend „Tage nach OP“, und „OP-Alter“

Bei Vorliegen eines linearen Zusammenhanges wurde das durchschnittliche Wachstum anhand des Regressionskoeffizienten „ β “ der Regressionsgleichungen (Abb.25-28) in den jeweiligen Altersgruppen berechnet:

- U8-Kontrollseite: 3,39 mm pro Jahr,
- Ü8-Kontrollseite: 2,55 mm pro Jahr,
- U8-Interventionsseite: 2,26 mm pro Jahr,
- Ü8-Interventionsseite: 1,79 mm pro Jahr.

Somit ergibt sich eine Hemmung durch die Trochanterapophyseodese von

- 1,13 mm pro Jahr in der Gruppe U8,
- 0,76 mm pro Jahr in der Gruppe Ü8.

3.3.4. Vergleich der Geschlechter

In Tabelle 16 und Abbildung 30 sind die Ergebnisse der TH differenziert nach Geschlecht.

Die Kontrollseite zeigte in dem Beobachtungszeitraum bei den männlichen Patienten ein Wachstum von insgesamt durchschnittlich $22,0 \pm 7,3$ mm, bei den weiblichen Patienten von durchschnittlich $17,5 \pm 5,3$ mm. Der Trochanter major konnte durch die Trochanterapophyseodese im Durchschnitt bei den männlichen Patienten um 28,6 % ($p = 0,02$) und bei den weiblichen um 29,7 % ($p = 0,09$) gehemmt werden.

In der statistischen Testung zeigte sich in der Kontrollseite im letzten Messintervall (FU4) ein signifikanter Unterschied zwischen den Messwerten der männlichen und weiblichen Patienten ($p = 0,006$). Das zeigt, dass das Wachstum bei den weiblichen Patienten früher abgeschlossen ist, was in der Abbildung 31 ebenfalls deutlich wird.

In der ANOVA-Testung zeigte sich kein Einfluss der Variablen „Geschlecht“ auf die TH ($p = 0,18$).

	T0	FU1	FU2	FU3	FU4
Männlich					
Anzahl [×]	33	31	26	16	14
TH n <i>MW ± SD</i> [in mm]	$20,7 \pm 5,5$	$24,8 \pm 6,1$	$30,0 \pm 6,3$	$37,1 \pm 6,1$	$44,3 \pm 2,7$
TH p <i>MW ± SD</i> [in mm]	$18,4 \pm 5,0$	$21,1 \pm 4,7$	$25,2 \pm 4,5$	$31,1 \pm 4,7$	$34,8 \pm 4,6$
Weiblich					
Anzahl [×]	13	12	10	7	8
TH n <i>MW ± SD</i> [in mm]	$22,4 \pm 4,5$	$27,8 \pm 5,3$	$32,0 \pm 6,9$	$37,9 \pm 4,2$	$39,5 \pm 3,4$
TH p <i>MW ± SD</i> [in mm]	$20,4 \pm 4,8$	$23,6 \pm 3,9$	$27,0 \pm 4,2$	$29,7 \pm 2,9$	$31,5 \pm 2,5$
p-Werte TH n (m vs. w)	0,1	0,1	0,27	0,71	< 0,01
p-Werte TH p (m vs. w)	0,07	0,02 *	0,13 *	0,68	0,09

Tabelle 16: Mittelwerte (MW) und Standardabweichung (SD) für den Parameter “Trochanterhöhe” (TH) in Abhängigkeit vom Geschlecht der gesunden (n) und erkrankten Hüfte (p) im Verlauf

[×]: Anzahl der Patienten in den jeweiligen Messintervallen (T0-FU4); p-Werte (m vs. w): vergleichende (vs.: versus) Auswertung mittels T-Test und Mann-Whitney-U-Test* von männlich (m) und weiblich (w); mm: Millimeter

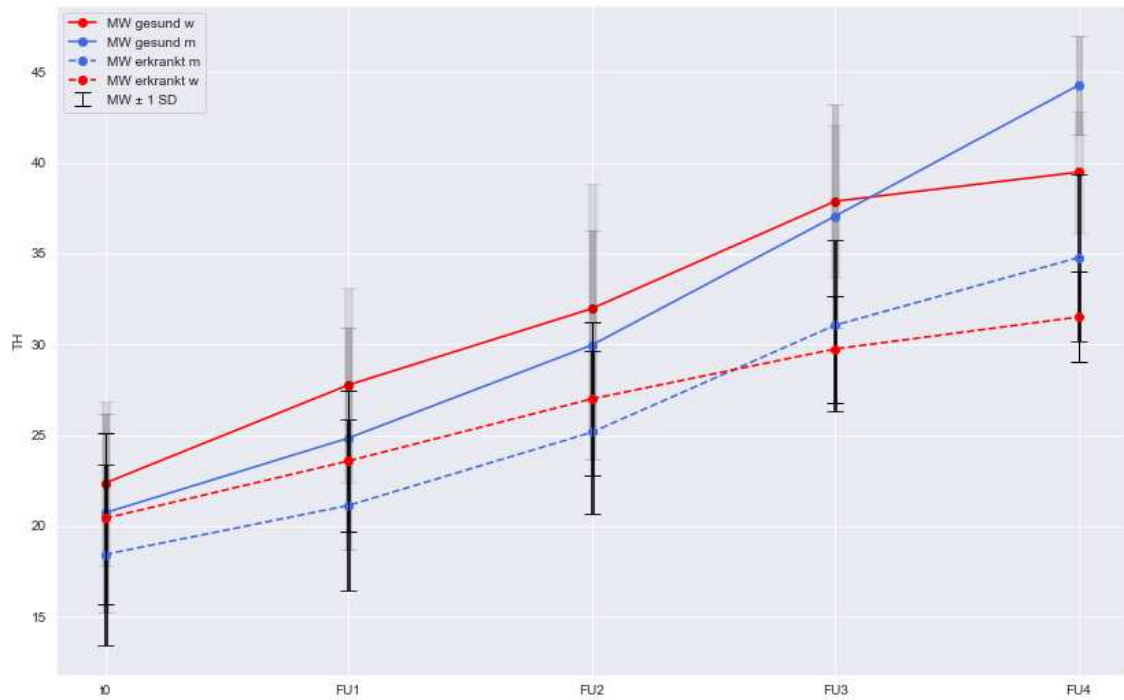


Abb. 30: Entwicklung der Trochanterhöhe (TH) der weiblichen (w; rot) und männlichen (m; blau) Patienten der gesunden und erkrankten Hüfte
y-Achse: TH in Millimetern (mm), x-Achse: Zeitlicher Verlauf vom Ausgangszeitpunkt t0 bis zur Adoleszenz (FU4). MW: Mittelwert (MW); SD: Standardabweichung (Bezug zu Tabelle 16)

3.4 Auswertung - Centrum-Trochanter-Distanz (CTD)

3.4.1. Entwicklung der gesunden Hüfte

Die Analyse der Centrum-Trochanter-Distanz (CTD) im Verlauf des Wachstums zeigt, dass es zu einer Negativierung der CTD kommt; die Trochanter Spitze liegt demnach höher als das Hüftkopfbereich (Abb. 31, Tabelle 17). Wegen des kleiner werdenden Datensatzes zeigt sich die Graphik volatil, sodass keine Aussage zum Wachstumsprozess zu treffen ist.

Alter [Jahre]	Anzahl *	CTD MW $\pm$ SD [in mm]
5 - < 6	2	1,9 $\pm$ 0,8
6 - < 7	6	2,3 $\pm$ 3,4
7 - < 8	18	2,1 $\pm$ 4,1
8 - < 9	33	1,4 $\pm$ 4,6
9 - < 10	24	-1,0 $\pm$ 5,8
10 - < 11	23	0,5 $\pm$ 5,1
11 - < 12	14	-6,4 $\pm$ 6,3
12 - < 13	12	-4,4 $\pm$ 4,3
13 - < 14	10	-7,7 $\pm$ 7,7
14 - < 15	7	-3,9 $\pm$ 2,3
15 - < 16	11	-8,1 $\pm$ 6,1
≥ 16	7	-6,4 $\pm$ 7,9

Tabelle 17: Altersabhängige Mittelwerte der Centrum-Trochanter-Distanz (CTD) der gesunden Hüfte

*Anzahl der ausgewerteten Röntgenbilder; CTD: Centrum-Trochanter-Distanz; MW: Mittelwert; SD: Standardabweichung; mm: Millimeter

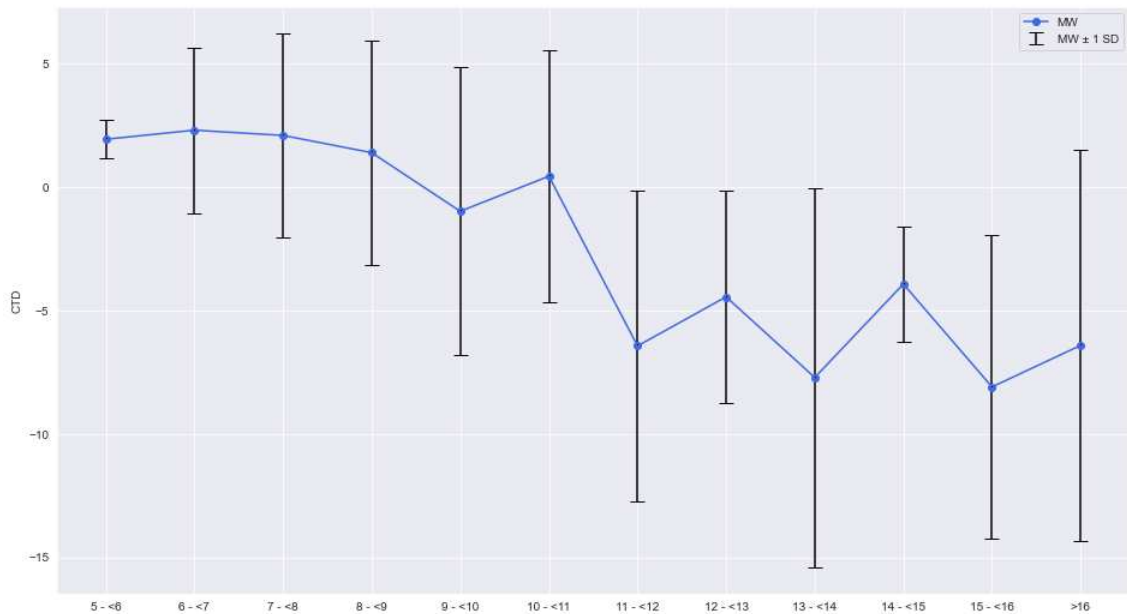


Abb. 31: Entwicklung der Centrum-Trochanter-Distanz (CTD) der gesunden Hüfte

y-Achse: CTD in Millimetern (mm), x-Achse: Alter in Jahren. MW: Mittelwert; SD: Standardabweichung (Bezug zu Tabelle 17)

In der geschlechtsspezifischen Untersuchung (Tabelle 18 und Abb. 32) fällt auf, dass es bei den männlichen Patienten zu einer Negativierung der CTD zu einem späteren Zeitpunkt kommt als bei den weiblichen Patienten. Wegen des kleinen Datensatzes ist jedoch keine valide Aussage zu treffen und lässt keine Rückschlüsse auf die Population zu.

Alter [Jahre]	Männlich		Weiblich	
	Anzahl *	CTD MW ± SD [in mm]	Anzahl *	CTD MW ± SD [in mm]
5 - < 6	1	1,4	1	2,5
6 - < 7	5	2,8 ± 3,5	1	0
7 - < 8	12	2,8 ± 3,5	6	0,8 ± 5,3
8 - < 9	23	2,3 ± 3,9	10	-0,8 ± 5,7
9 - < 10	17	0,5 ± 5,6	7	-4,5 ± 5,2
10 - < 11	16	1,9 ± 4,4	7	-2,8 ± 5,4
11 - < 12	11	-5,7 ± 6,8	3	-9,2 ± 2,9
12 - < 13	10	-4,5 ± 4,3	2	-4,1 ± 6,0
13 - < 14	5	-7,6 ± 10,4	5	-7,8 ± 5,0
14 - < 15	3	-2,9 ± 0,4	4	-4,7 ± 3,0
15 - < 16	10	-7,9 ± 6,4	1	-9,8
≥ 16	6	-7,1 ± 8,4	1	-2,0

Tabelle 18: Altersabhängige Mittelwerte der CTD der gesunden Hüfte der weiblichen und männlichen Patienten

*Anzahl der ausgewerteten Röntgenbilder; MW: Mittelwert; SD: Standardabweichung; mm: Millimeter

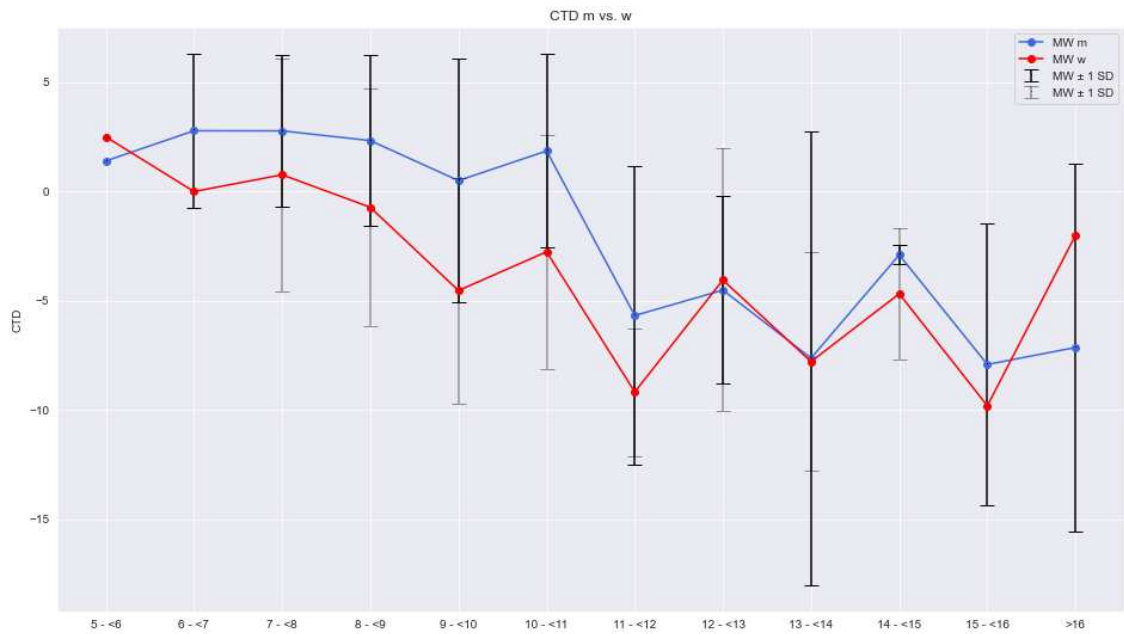


Abb. 32: Entwicklung der Centrum-Trochanter-Distanz (CTD) der gesunden Hüfte der weiblichen (w; rot) und männlichen (m; blau) Patienten

y-Achse: CTD in Millimetern (mm), x-Achse: Alter in Jahren. MW: Mittelwert; SD: Standardabweichung (Bezug zu Tabelle 18)

3.4.2. Vergleich zwischen Kontroll- und Interventionsseite

In Tabelle 19 und Abbildung 33 sind die erhobenen Messdaten des Parameters „CTD“ zusammengefasst und dargestellt.

Die CTD der Kontrollseite negativierte sich im Verlauf ($p < 0,001$). Zum Ausgangszeitpunkt war der Trochanter im Schnitt um $0,9 \pm 5,6$ mm unterhalb des Mittelpunktes des Hüftkopfes und zum Zeitpunkt der Adoleszenz $6,5 \pm 5,3$ mm oberhalb des Mittelpunktes.

Im Gegensatz dazu zeigte sich bei der Interventionsseite kein statistisch signifikanter Unterschied im Verlauf ($p = 0,13$) und zwischen den jeweiligen Messintervallen (Tabelle 20).

Die erhobenen Werte für die CTD der Kontroll- und Interventionsseite näherten sich im Verlauf an, was durch die Abbildung 33 verdeutlicht wird, und zeigten im dritten und letzten Messintervall keine statistisch signifikanten Unterschiede (Tabelle 19). Somit zeigte sich ein positiver Effekt der Trochanterapophyseodese auf die CTD.

In der ANOVA-Testung hat die Variable „Befund“, also Kontroll- oder Interventionsseite, einen Einfluss auf die Werte der CTD ($p < 0,01$).

Die Variable „Zeit“ hat isoliert keinen statistisch signifikanten Einfluss auf die erhobenen Werte der CTD ($p = 0,14$). Jedoch sofern man die Interaktion mit der Variable „Befund“ in die ANOVA-Testung inkludiert, zeigt sich ein statistisch signifikanter Einfluss ($p < 0,01$).

	T0	FU1	FU2	FU3	FU4
Anzahl *	46	43	26	23	22
CTD n <i>MW ± SD</i> [in mm]	$0,9 \pm 5,6$	$-0,3 \pm 6,2$	$-2,2 \pm 6,5$	$-5,4 \pm 4,9$	$-6,5 \pm 5,3$
CTD p <i>MW ± SD</i> [in mm]	$-7,9 \pm 6,9$	$-6,3 \pm 6,9$	$-7,5 \pm 7,5$	$-8,8 \pm 8,3$	$-7,8 \pm 9,1$
p-Werte (n vs. p)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,1	0,58

Tabelle 19: Mittelwerte (MW) und Standardabweichung (SD) für den Parameter „Centrum-Trochanter-Distanz“ (CTD) der gesunden (n) und erkrankten Hüfte (p) im Verlauf

p-Werte (n vs. p): vergleichende (vs.: *versus*) Auswertung mittels T-Test von gesunder (n) und erkrankter (p) Hüfte; * Anzahl der inkludierten Patienten in den jeweiligen Messintervallen (T0-FU4); mm: Millimeter

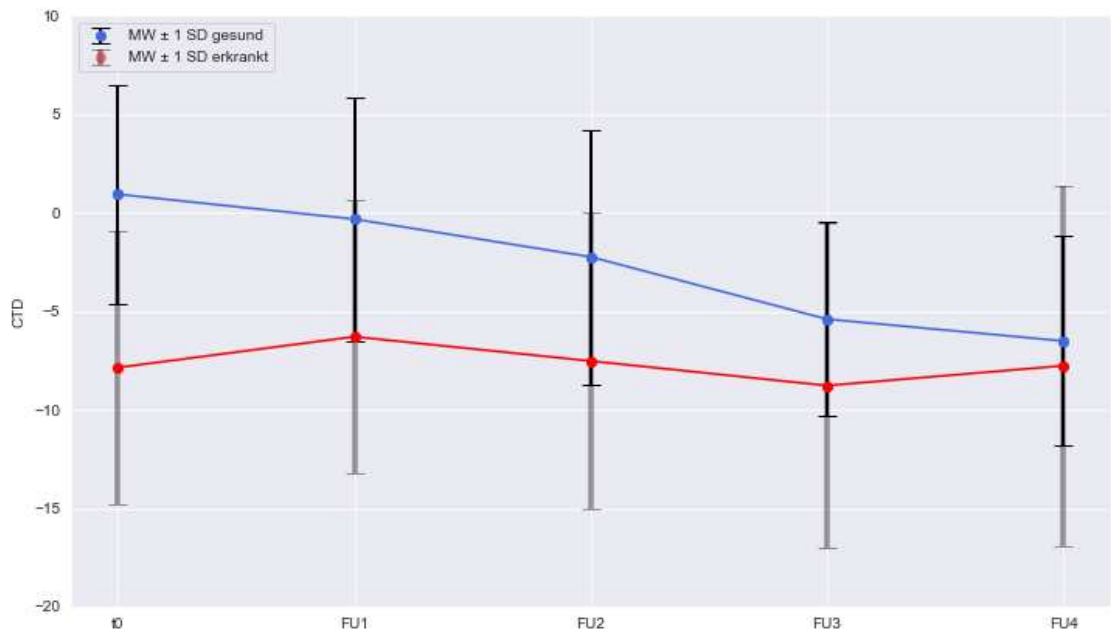


Abb. 33: Entwicklung der Centrum-Trochanter-Distanz (CTD) der gesunden (blau) und erkrankten (rot) Hüfte

y-Achse: CTD in Millimetern (mm), x-Achse: Zeitlicher Verlauf vom Ausgangszeitpunkt t0 bis zur Adoleszenz (FU4). MW: Mittelwert; SD: Standardabweichung (Bezug zu Tabelle 19)

	p-Werte der Interventionsseite	p-Werte der Kontrollseite
T0 vs. FU1	0,02	< 0,01
FU1 vs. FU2	0,35	0,025
FU2 vs. FU3	0,71	< 0,01
FU3 vs. FU4	0,29	0,48

Tabelle 20: Überblick der p-Werte der Interventions- und Kontrollseite für den Parameter “Centrum-Trochanter-Distanz” zwischen den einzelnen Messintervallen t0 bis FU4
Vergleichende Auswertung mittels T-Test; vs.: *versus*

Die Regressionsanalyse der Kontrollseite zeigte, dass die Variable „CTD“ nur zu einem geringen Anteil ($R^2 = 0,28$) durch das Regressionsmodell beschrieben werden kann (Tabelle 21), was ebenfalls durch die Streuung in Abbildung 34 veranschaulicht wird.

Die Regressionsanalyse der Interventionsseite (Tabelle 22) zeigte keinen linearen Zusammenhang bei einem R^2 -Wert von annähernd 0. Die Abbildung 35 zeigt eine zunehmende Fächerung der Messdaten in Relation zur Regressionsfläche.

	R^2	<i>Relimp</i> [in %]	p-Wert		R^2	<i>Relimp</i> [in %]	p-Wert
Zeit	0,32	50,6	< 0,01	➔	0,28	58,4	< 0,01
OP-Alter	0,32	40,1	< 0,01		0,28	41,6	< 0,01
Geschlecht	0,32	9,3	< 0,01				

Tabelle 21: Regressionsanalyse der abhängigen Variablen „CTD“ (Centrum-Trochanter-Distanz) der Kontrollseite (n)

Vor (links) und nach Korrektur (rechts) durch Eliminierung der unabhängigen Variablen „Geschlecht“. R^2 : Determinationskoeffizient; *Relimp*: relative importance of predictors in a regression model in Prozent; OP: Operation

	R^2	<i>Relimp</i> [in %]	p-Wert		R^2	<i>Relimp</i> [in %]	p-Wert
Zeit	0,04	4,3	0,6	➔	0,03	5,4	0,6
OP-Alter	0,04	85,6	0,01		0,03	94,6	0,02
Geschlecht	0,04	10,1	0,3				

Tabelle 22: Regressionsanalyse der abhängigen Variablen „CTD“ (Centrum-Trochanter-Distanz) der Interventionsseite (p).

Vor (links) und nach Korrektur (rechts) durch Eliminierung der unabhängigen Variablen „Geschlecht“. R^2 : Determinationskoeffizient; *Relimp*: relative importance of predictors in a regression model in Prozent; OP: Operation

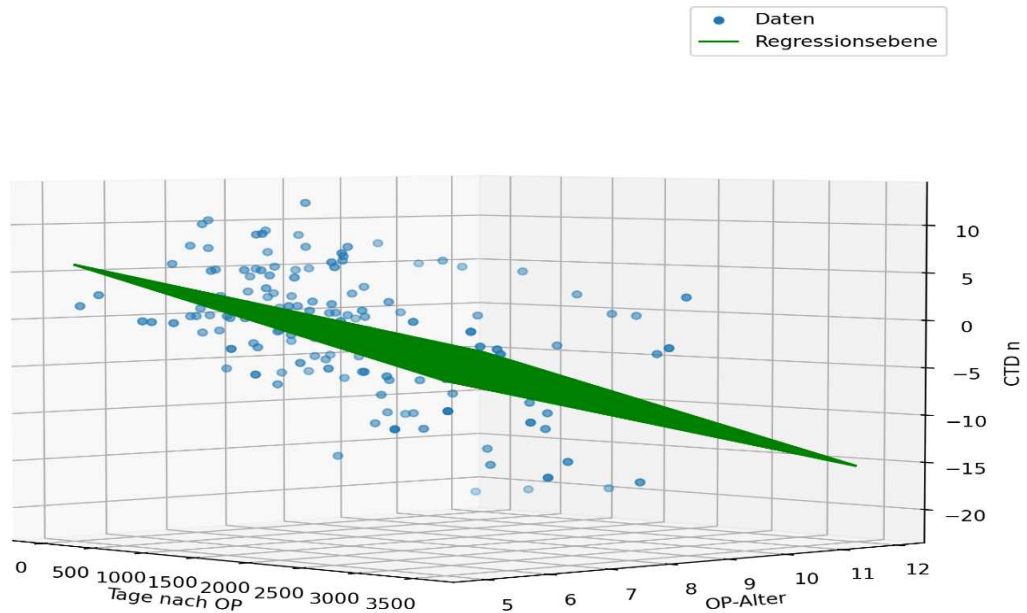


Abb. 34: Regressionsfläche der abhängigen Variablen „CTD“ (Centrum-Trochanter-Distanz) der Kontrollseite (n)

y-Achse: Variable „CTD“; x_1 und x_2 -Achse: unabhängige Variable „Zeit“, entsprechend „Tage nach OP“, und „OP-Alter“

Regressionsgleichung: $CTD(n) = (-13,79) + 0,0029 \times \text{Tage nach OP} + 1,6 \times \text{OP-Alter}$

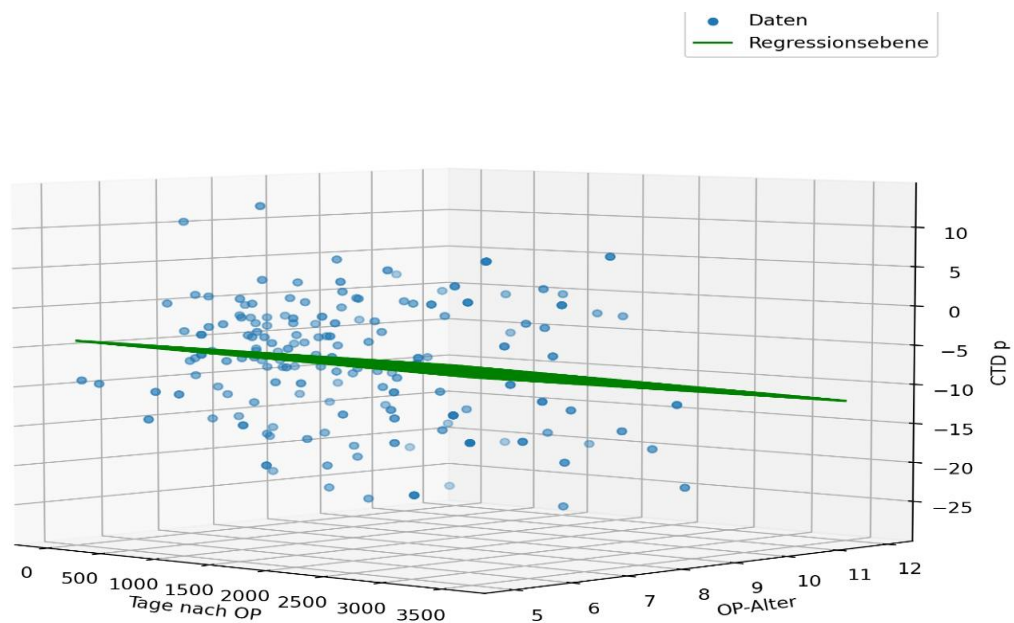


Abb. 35: Regressionsfläche der abhängigen Variablen „CTD“ (Centrum-Trochanter-Distanz) der Interventionsseite (p)

y-Achse: Variable „CTD“; x_1 und x_2 -Achse: unabhängige Variable „Zeit“, entsprechend „Tage nach OP“, und „OP-Alter“

Regressionsgleichung: $CTD(p) = (-0,75) + 0,0004 \times \text{Tage nach OP} + 0,97 \times \text{OP-Alter}$

3.4.3. Vergleich der Altersgruppen

Die Ergebnisse der CTD der Altersgruppen sind in Tabelle 23 und Abbildung 36 zusammengefasst.

Die CTD der Kontrollseite, sowohl der Gruppe U8 als auch Ü8, wurde über den gesamten Beobachtungszeitraum negativ. Es zeigten sich im ersten und zweiten Messintervall (FU1 und FU2) statistisch signifikante Unterschiede der Messwerte zwischen U8 und Ü8 (Tabelle 23).

In der Interventionsseite gab es keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Altersgruppen U8 und Ü8 ($p > 0,05$).

In beiden Gruppen kommt es über den Verlauf zu einer Annäherung der Messwerte der Interventionsseite an den physiologischen Zustand der Kontrollseite. Es zeigten sich keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen beiden Gruppen ($p > 0,05$).

In der ANOVA-Testung hat die Variable „Alter“ einen Einfluss auf die Werte der CTD der Kontrollseite ($p = 0,03$), jedoch keinen Einfluss auf die Interventionsseite ($p = 0,35$).

	T0	FU1	FU2	FU3	FU4
U8					
Anzahl [×]	20	20	15	12	10
CTD n <i>MW ± SD</i> [in mm]	2,5 ± 4,1	1,7 ± 4,0	0,9 ± 3,6	-4,0 ± 2,3	-6,3 ± 4,3
CTD p <i>MW ± SD</i> [in mm]	-6,1 ± 6,1	-4,4 ± 6,5	-7,0 ± 6,7	-9,1 ± 7	-7,1 ± 9
Ü8					
Anzahl [×]	26	23	21	11	12
CTD n <i>MW ± SD</i> [in mm]	-0,3 ± 6,3	-2,1 ± 7,2	-4,4 ± 7,2	-7,0 ± 6,5	-6,7 ± 6,3
CTD p <i>MW ± SD</i> [in mm]	-9,2 ± 7,3	-8,0 ± 7,0	-7,9 ± 8,2	-8,4 ± 9,8	-8,3 ± 9,7
p-Werte CTD n (U8 vs. Ü8)	0,16	0,03	0,004	0,17	0,99
p-Werte CTD p (U8 vs. Ü8)	0,31	0,12	0,99	0,95	0,87

Tabelle 23: Mittelwerte (MW) und Standardabweichung (SD) für den Parameter “Centrum-Trochanter-Distanz” (CTD) der Gruppen U8 (<8 Jahre) und Ü8 (≥8 Jahre) der gesunden (n) und erkrankten Hüfte (p) im Verlauf

[×]:Anzahl der Patienten in den jeweiligen Messintervallen (T0-FU4); p-Werte (U8 vs. Ü8): vergleichende (vs.: *versus*) Auswertung mittels T-Test von U8 und Ü8; mm: Millimeter

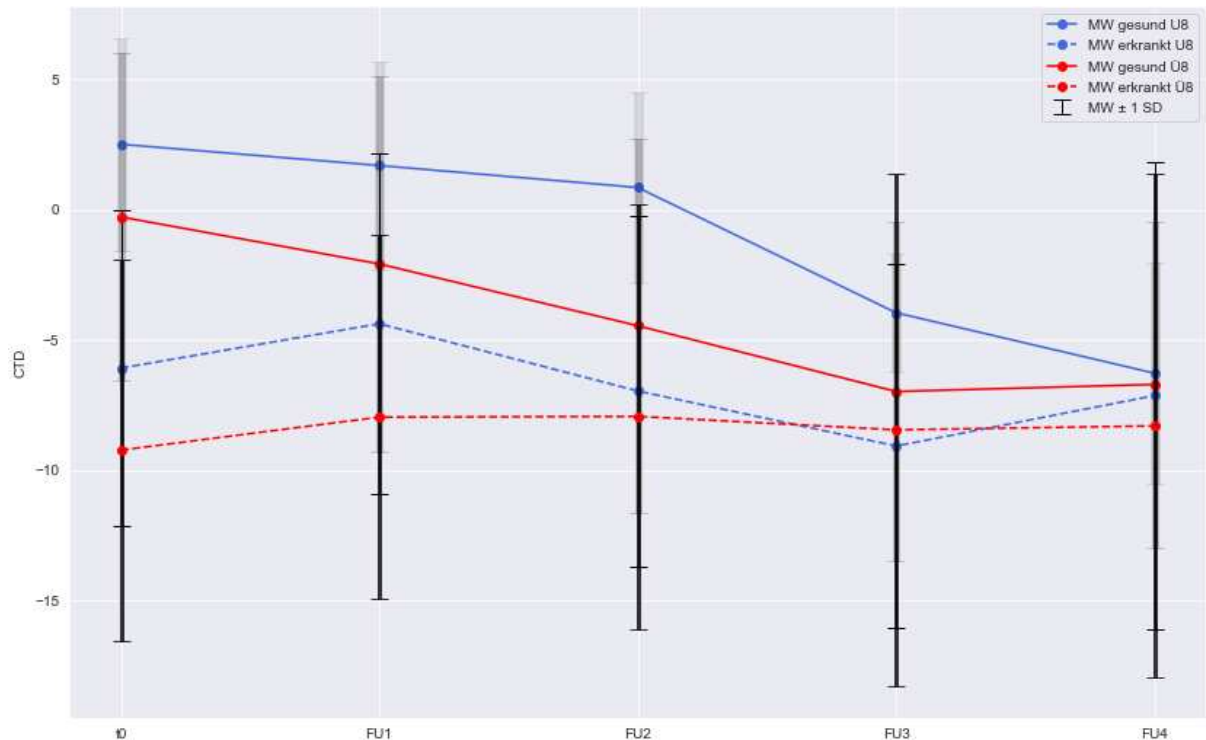


Abb. 36: Entwicklung der Centrum-Trochanter-Distanz (CTD) der Altersgruppen U8 (< 8 Jahre; blau) und Ü8 (≥ 8 Jahre; rot) der gesunden und erkrankten Hüfte

y-Achse: CTD in Millimetern (mm), x-Achse: Zeitlicher Verlauf vom Ausgangszeitpunkt t0 bis zur Adoleszenz (FU4). MW: Mittelwert; SD: Standardabweichung (Bezug zu Tabelle 23)

3.4.4. Vergleich der Geschlechter

Tabelle 24 und Abbildung 37 veranschaulichen die Ergebnisse des Parameters „CTD“ im Vergleich der männlichen und weiblichen Patienten.

Die CTD der Kontrollseite negativierte sich im Verlauf sowohl bei den männlichen als auch bei den weiblichen Patienten. Anhand der statistischen Auswertung ist jedoch nur die Veränderung der CTD der männlichen Patienten statistisch signifikant (p (männlich) < 0,01, p (weiblich) = 0,06).

Die Interventionsseite der männlichen Patienten und der weiblichen Patienten zeigte keine statistisch signifikante Änderung über den gesamten Beobachtungszeitraum (p (männlich) = 0,33, p (weiblich) = 0,25).

Sowohl bei den männlichen als auch den bei weiblichen Patienten kam es zu einer Annäherung der Messwerte der Interventionsseite an die Kontrollseite ohne statistisch signifikanten Unterschied der Geschlechter (p > 0,05).

Anhand der ANOVA-Testung konnte kein statistisch signifikanter Einfluss der Variablen „Geschlecht“ auf den Parameter „CTD“ ermittelt werden (p = 0,14).

	T0	FU1	FU2	FU3	FU4
Männlich					
Anzahl [×]	33	31	26	16	14
CTD n <i>MW ± SD</i> <i>[in mm]</i>	1,7 ± 4,1	0,6 ± 4	-1,3 ± 3,6	-5,6 ± 2,3	-7,2 ± 4,3
CTD p <i>MW ± SD</i> <i>[in mm]</i>	-6,8 ± 6,1	-6,1 ± 6,5	-6,2 ± 6,7	-10,6 ± 7	-9,1 ± 9
Weiblich					
Anzahl [×]	13	12	10	7	8
CTD n <i>MW ± SD</i> <i>[in mm]</i>	-0,9 ± 6,3	-2,7 ± 7,2	-4,7 ± 7,2	-4,9 ± 6,5	-5,2 ± 6,3
CTD p <i>MW ± SD</i> <i>[in mm]</i>	-10,4 ± 7,3	-6,8 ± 7,0	-10,9 ± 8,2	-4,6 ± 9,8	-5,5 ± 9,7
p-Werte CTD n (m vs. w)	0,03	0,05	0,14	0,87	0,65 *
p-Werte CTD p (m vs. w)	0,04	0,34 *	0,08 *	0,32	0,43

Tabelle 24: Mittelwerte (MW) und Standardabweichung (SD) für den Parameter “Centrum-Trochanter-Distanz” (CTD) in Abhängigkeit vom Geschlecht der gesunden (n) und erkrankten Hüfte (p) im Verlauf

[×]:Anzahl der Patienten in den jeweiligen Messintervallen (T0-FU4); p-Werte (m vs. w): vergleichende (vs.: versus) Auswertung mittels T-Test und Mann-Whitney-U-Test* von männlich (m) und weiblich (w); mm: Millimeter

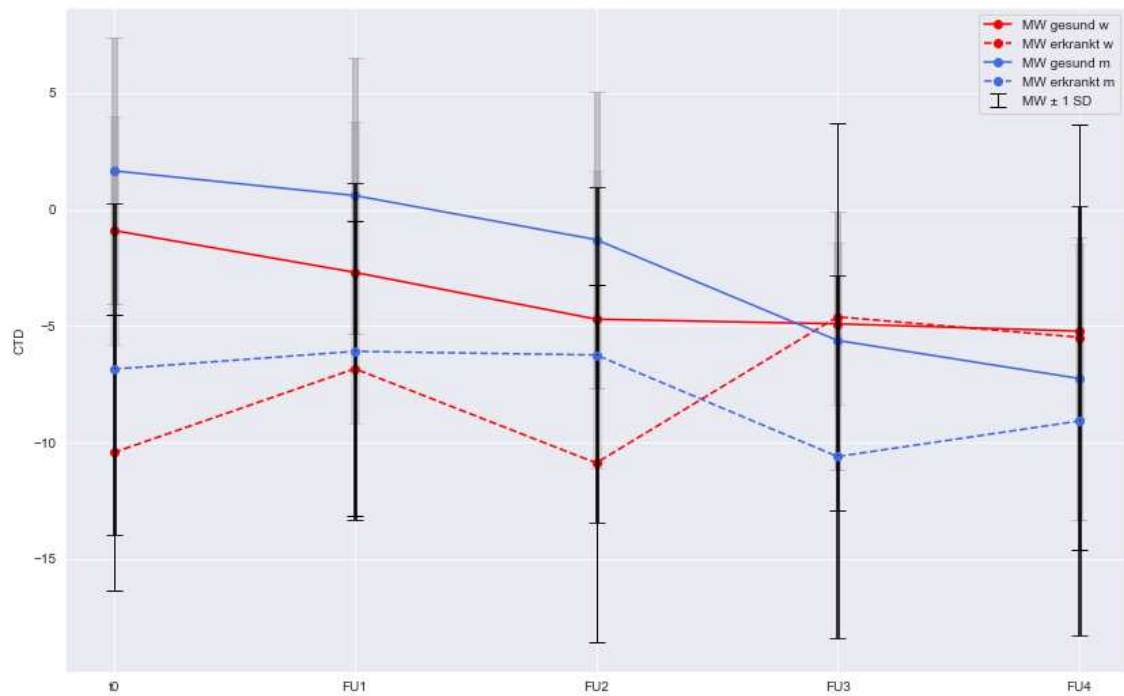


Abb. 37: Entwicklung der Centrum-Trochanter-Distanz (CTD) der männlichen (m; blau) und weiblichen (w; rot) Patienten der gesunden und erkrankten Hüfte

y-Achse: CTD in Millimetern (mm), x-Achse: Zeitlicher Verlauf vom Ausgangszeitpunkt t0 bis zur Adoleszenz (FU4). MW: Mittelwert; SD: Standardabweichung (Bezug zu Tabelle 24)

3.5 Auswertung - Artikulotrochantäre Distanz (ATD)

3.5.1. Entwicklung der gesunden Hüfte

Die Analyse der artikulotrochantären Distanz (ATD) ergibt, dass dieser Parameter im Verlauf des Wachstums konstant bleibt (Tabelle 25, Abb. 38).

Alter [Jahre]	Anzahl *	ATD MW $\pm$ SD [in mm]
5 - < 6	2	17,5 $\pm$ 0,6
6 - < 7	6	19,2 $\pm$ 3,5
7 - < 8	18	19,7 $\pm$ 3,5
8 - < 9	33	20,4 $\pm$ 4,5
9 - < 10	24	18,3 $\pm$ 4,7
10 - < 11	23	21,4 $\pm$ 5,3
11 - < 12	14	15,8 $\pm$ 6,3
12 - < 13	12	17,7 $\pm$ 4,1
13 - < 14	10	15,5 $\pm$ 7,2
14 - < 15	7	20,1 $\pm$ 3,0
15 - < 16	11	16,5 $\pm$ 5,8
≥ 16	7	19,4 $\pm$ 7,9

Tabelle 25: Altersabhängige Mittelwerte der artikulotrochantären Distanz (ATD) der gesunden Hüfte

*Anzahl der ausgewerteten Röntgenbilder; MW: Mittelwert; SD: Standardabweichung; mm: Millimeter

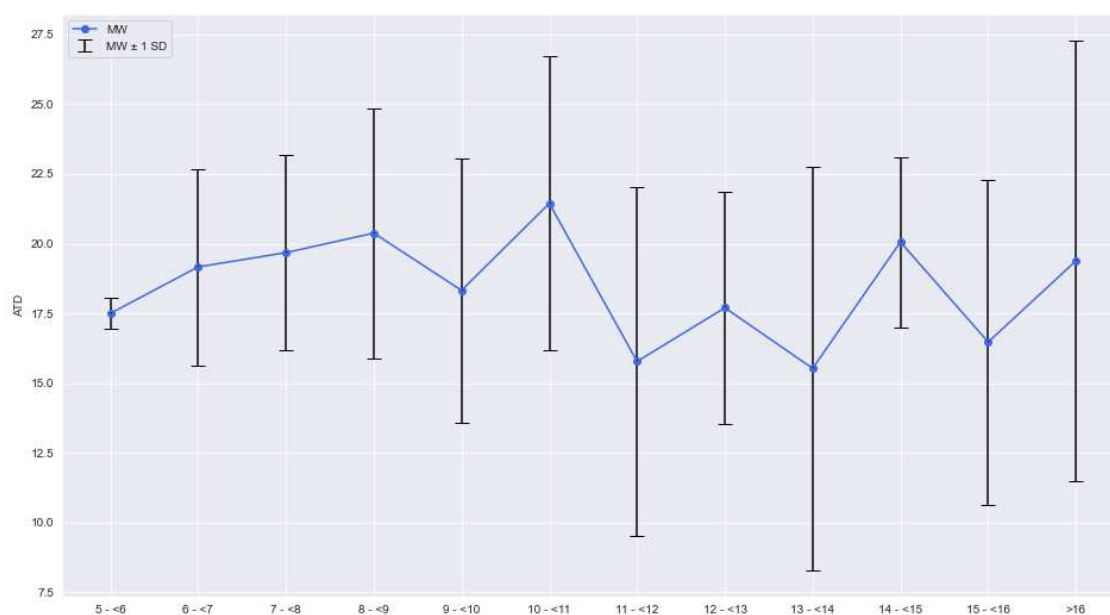


Abb. 38: Entwicklung der artikulotrochantären Distanz (ATD) der gesunden Hüfte

y-Achse: ATD in Millimetern (mm), x-Achse: Alter in Jahren. MW: Mittelwert; SD: Standardabweichung (Bezug zu Tabelle 25)

In der Differenzierung des Geschlechts lassen sich keine Unterschiede zwischen den männlichen und weiblichen Patienten eruieren (Tabelle 26, Abb. 39). Eine statistische Testung ist wegen des geringen Datensatzes nicht möglich.

	Männlich		Weiblich	
Alter [Jahre]	Anzahl *	ATD MW $\pm$ SD [in mm]	Anzahl *	ATD MW $\pm$ SD [in mm]
5 - < 6	1	17,9	1	17,1
6 - < 7	5	19,8 $\pm$ 3,6	1	16,1
7 - < 8	12	20,2 $\pm$ 2,5	6	18,6 $\pm$ 5,0
8 - < 9	23	19,5 $\pm$ 3,1	10	18,1 $\pm$ 5,2
9 - < 10	17	19,8 $\pm$ 4,5	7	14,8 $\pm$ 3,4
10 - < 11	16	23,3 $\pm$ 3,7	7	17,2 $\pm$ 6,1
11 - < 12	11	16,5 $\pm$ 6,4	3	13,2 $\pm$ 6,3
12 - < 13	10	17,6 $\pm$ 4,1	2	18,2 $\pm$ 6,4
13 - < 14	5	16,4 $\pm$ 9,4	5	14,6 $\pm$ 5,2
14 - < 15	3	21,5 $\pm$ 1,1	4	19,0 $\pm$ 3,8
15 - < 16	10	16,7 $\pm$ 6,1	1	14,5
≥ 16	6	19,4 $\pm$ 8,7	1	19,6

Tabelle 26: Altersabhängige Mittelwerte der artikulothoracären Distanz (ATD) der gesunden Hüfte der weiblichen und männlichen Patienten

*Anzahl der ausgewerteten Röntgenbilder; MW: Mittelwert; SD: Standardabweichung; mm: Millimeter

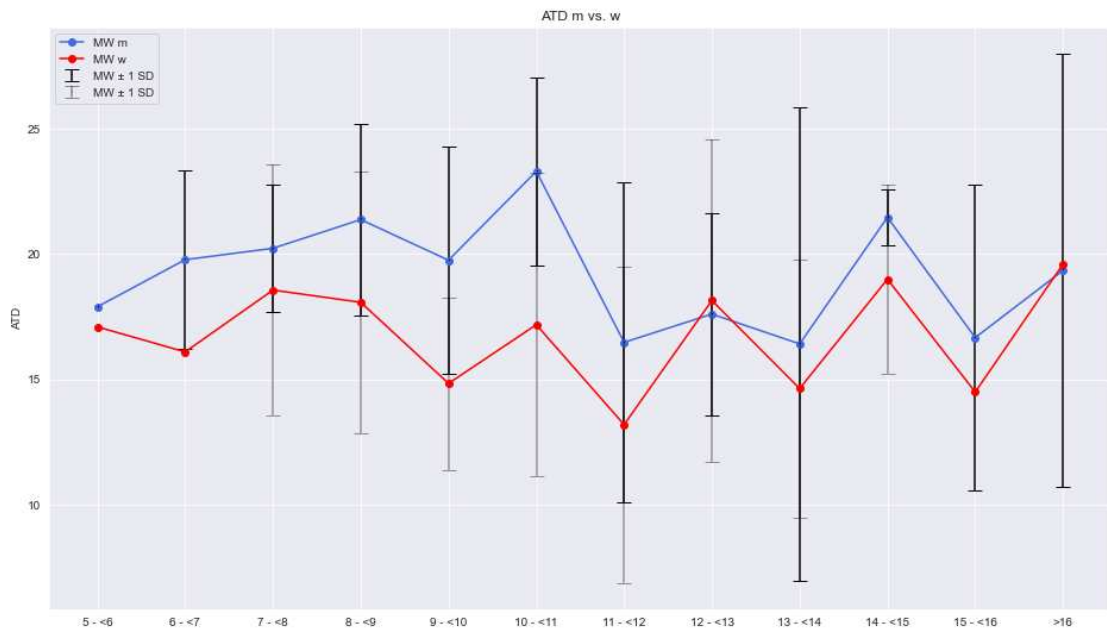


Abb. 39: Entwicklung der artikulothoracären Distanz (ATD) der gesunden Hüfte der weiblichen (w; rot) und männlichen (m; blau) Patienten

y-Achse: ATD in Millimetern (mm), x-Achse: Alter in Jahren. MW: Mittelwert; SD: Standardabweichung (Bezug zu Tabelle 26)

3.5.2. Vergleich zwischen Interventions- und Kontrollseite

Die Ergebnisse der gesunden und erkrankten Hüfte im Hinblick auf den Parameter „ATD“ sind in Tabelle 27 zusammengefasst und in der Abbildung 40 veranschaulicht.

Die ATD der Kontrollseite war stets positiv, ohne statistisch signifikante Veränderung während des Beobachtungszeitraumes ($p = 0,69$). Es zeigten sich ebenfalls keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den jeweiligen Messintervallen (Tabelle 28).

Auf der Interventionsseite zeigte sich eine statistisch signifikante Zunahme der ATD im Verlauf ($p < 0,01$).

Die Werte der Interventionsseite näherten sich im Verlauf den Werten der Kontrollseite an. Somit zeigte sich ein positiver Effekt der Trochanterapophyseodese auf die ATD.

Während zum Zeitpunkt t0, FU1 und FU2 signifikante Unterschiede bestanden, waren diese zum Zeitpunkt FU3 und FU4 nicht mehr vorhanden.

Der statistische Test ANOVA zeigte einen statistisch signifikanten Unterschied bei der Variablen „Befund“, also zwischen der Interventions- und Kontrollseite ($p = 0,04$). Die Interaktion „Zeit“ und „Befund“ zeigte einen statistisch signifikanten Einfluss ($p < 0,01$).

	T0	FU1	FU2	FU3	FU4
Anzahl *	46	43	36	23	22
ATD n <i>MW ± SD</i> [in mm]	19,3 ± 5,0	19,6 ± 5,4	18,7 ± 5,9	17,5 ± 4,2	18,0 ± 5,7
ATD p <i>MW ± SD</i> [in mm]	11,2 ± 6,6	14,6 ± 7,4	14,1 ± 8,7	15,4 ± 8,6	18,5 ± 10,0
p-Werte (n vs. p)	< 0,01	< 0,01	0,01	0,3	0,84

Tabelle 27: Mittelwerte (MW) und Standardabweichung (SD) für den Parameter „artikulotrochantäre Distanz“ (ATD) der gesunden (n) und erkrankten Hüfte (p) im Verlauf

p-Werte (n vs. p): vergleichende (vs.: *versus*) Auswertung mittels T-Test von gesunder (n) und erkrankter (p) Hüfte; * Anzahl der inkludierten Patienten in den jeweiligen Messintervallen (T0-FU4); mm: Millimeter

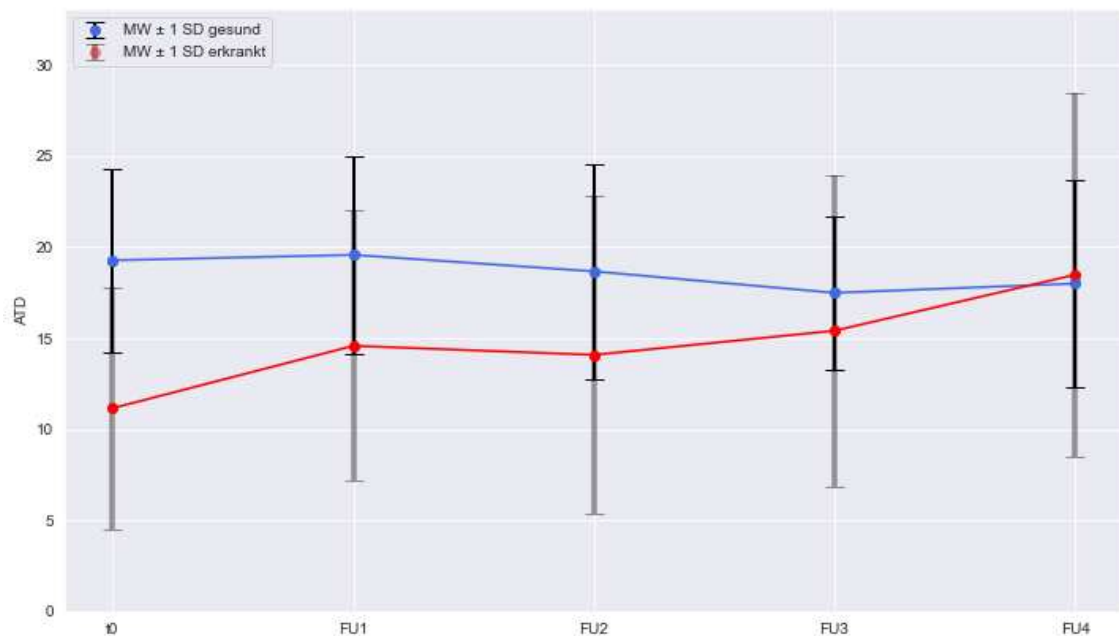


Abb. 40: Entwicklung der artikulotrochantären Distanz (ATD) der gesunden (blau) und erkrankten (rot) Hüfte

y-Achse: ATD in Millimetern (mm), x-Achse: Zeitlicher Verlauf vom Ausgangszeitpunkt t0 bis zur Adoleszenz (FU4). MW: Mittelwert; SD: Standardabweichung (Bezug zu Tabelle 27)

	p-Werte der Interventionsseite	p-Werte der Kontrollseite
T0 vs. FU1	< 0,01	0,59
FU1 vs. FU2	0,43	0,42
FU2 vs. FU3	0,47	0,06
FU3 vs. FU4	0,03	0,58

Tabelle 28: Überblick über die ermittelten p-Werte der Interventions- und Kontrollseite für den Parameter „ artikulotrochantäre Distanz“ zwischen den einzelnen Messintervallen t0 bis FU4
Vergleichende Auswertung mittels T-Test; vs.: *versus*

Die Regressionsanalyse der abhängigen Variablen „ATD“ zeigte keinen linearen Zusammenhang bei Werten des Determinationskoeffizienten „ R^2 “ von annähernd 0, sowohl in der Kontrollseite als auch in der Interventionsseite (Tabelle 29), was in den Abbildungen 41 und 42 veranschaulicht wird anhand der Streuung in Relation zur Regressionsfläche. Somit ließen sich die Messwerte der ATD nicht anhand einer Regressionsebene darstellen.

Kontrollseite (n)			
	R^2	Relimp [in %]	p-Wert
Zeit	0,1	7,3	0,3
OP-Alter	0,1	35,2	< 0,01
Geschlecht	0,1	57,5	< 0,01
Interventionsseite (p)			
Zeit	0,07	84,6	< 0,01
OP-Alter	0,07	0,2	0,8
Geschlecht	0,07	15,2	0,1

Tabelle 29: Regressionsanalyse der abhängigen Variablen „ATD“ (artikulothoracäre Distanz) der Kontrollseite (n) und Interventionsseite (p).

R^2 : Determinationskoeffizient; Relimp: relative importance of predictors in a regression model in Prozent (%); OP: Operation

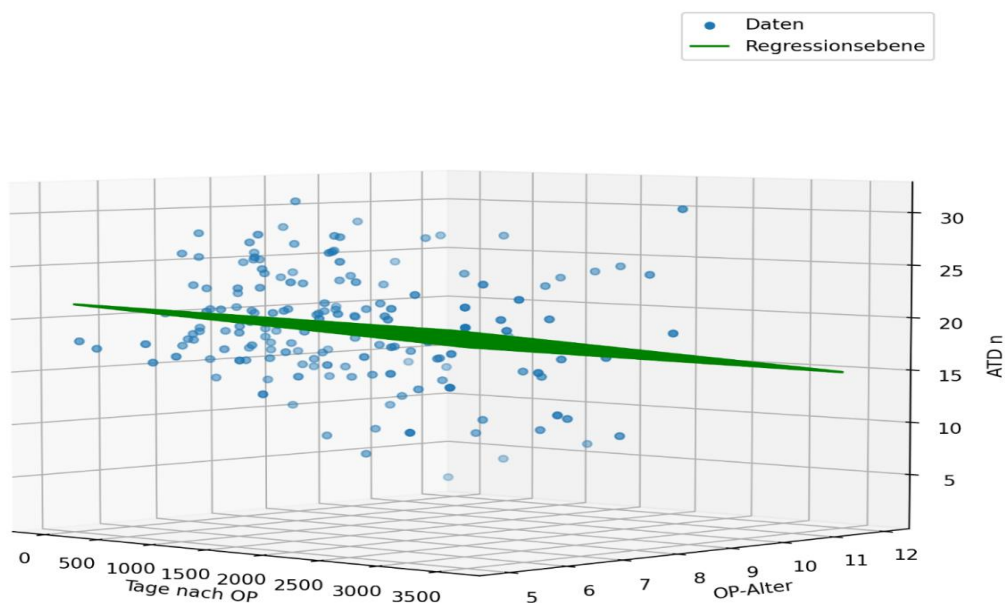


Abb. 41: Regressionsfläche der abhängigen Variablen „ATD“ (artikulothoracäre Distanz) der Kontrollseite (n)

y-Achse: Variable „ATD“; x_1 und x_2 -Achse: unabhängige Variable „Zeit“, entsprechend „Tage nach OP“, und „OP-Alter“

Regressionsgleichung: $ATD(n) = 24,8 + (-0,0006) \times \text{Tage nach OP} + (-0,67) \times \text{OP-Alter}$

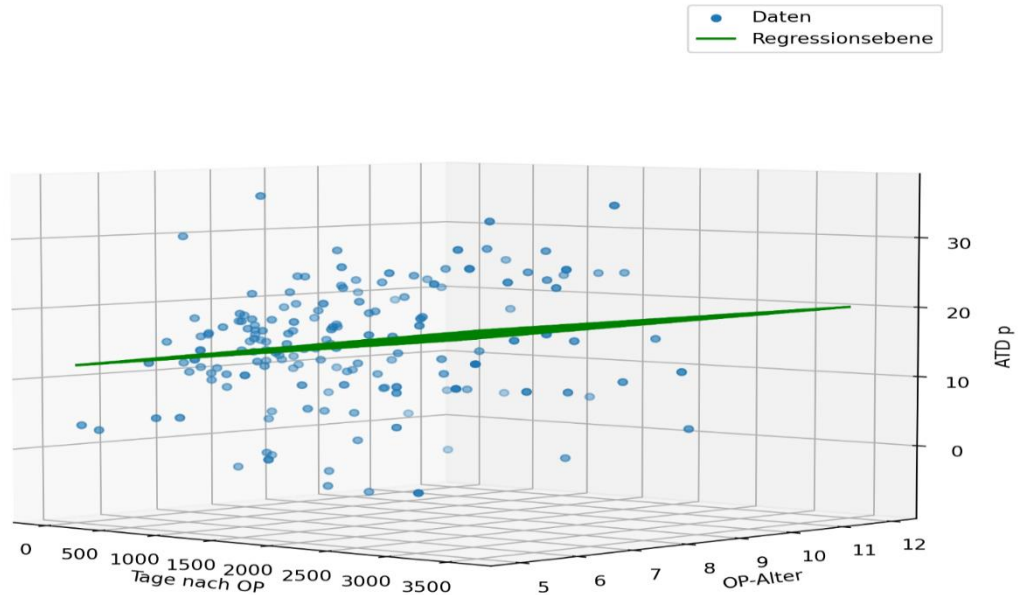


Abb. 42: Regressionsfläche der abhängigen Variablen „ATD“ (artikulothoracale Distanz) der Interventionsseite (p)

y-Achse: Variable „ATD“; x_1 und x_2 -Achse: unabhängige Variable „Zeit“, entsprechend „Tage nach OP“, und „OP-Alter“

Regressionsgleichung: $ATD(p) = 12,02 + 0,0023 \times \text{Tage nach OP} + 0,0066 \times \text{OP-Alter}$

3.5.3. Vergleich der Altersgruppen

Die erhobenen Messdaten in den jeweiligen Altersgruppen, U8 und Ü8, sind in Tabelle 30 zusammengefasst und in Abbildung 43 dargestellt.

Bei der Kontrollseite zeigte sich im Verlauf keine statistisch signifikante Veränderung der ATD sowohl in der Gruppe U8, als auch in der Gruppe Ü8 ($p(U8) = 0,71$, $p(Ü8) = 0,91$).

Die ATD der Interventionsseite vergrößert sich im Verlauf statistisch signifikant in beiden Altersgruppen über den gesamten Verlauf ($p(U8) = 0,038$, $p(Ü8) = 0,023$).

In beiden Altersgruppen kam es zu einer Annäherung der Werte der Interventionsseite an die Kontrollseite.

Nach Durchführung der ANOVA-Testung lassen sich keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Gruppen feststellen ($p = 0,07$). Das Alter hat keinen Einfluss auf die ATD ($p(\text{Interventionsseite}) = 0,86$, $p(\text{Kontrollseite}) = 0,12$).

	T0	FU1	FU2	FU3	FU4
U8					
Anzahl [×]	20	20	15	12	10
ATD n <i>MW ± SD</i> [in mm]	19,8 ± 3,6	20,6 ± 3,6	20,7 ± 3,8	18,1 ± 2,8	17,9 ± 4,4
ATD p <i>MW ± SD</i> [in mm]	11,5 ± 6,8	15,4 ± 7,3	13,5 ± 8	13,7 ± 7,8	18,1 ± 10,9
Ü8					
Anzahl [×]	26	23	21	11	12
ATD n <i>MW ± SD</i> [in mm]	18,9 ± 5,9	18,7 ± 6,5	17,2 ± 6,8	16,8 ± 5,4	18,1 ± 6,8
ATD p <i>MW ± SD</i> [in mm]	10,9 ± 6,6	13,9 ± 7,6	14,5 ± 9,4	17,3 ± 9,4	18,8 ± 9,6
p-Werte ATD n (U8 vs. Ü8)	0,87	0,18	0,04	0,5	0,82
p-Werte ATD p (U8 vs. Ü8)	0,88	0,66	0,66	0,47	0,81

Tabelle 30: Mittelwerte (MW) und Standardabweichung (SD) für den Parameter “artikulothoracische Distanz” (ATD) der Gruppen U8 (< 8 Jahre) und Ü8 (≥ 8 Jahre) der gesunden (n) und erkrankten Hüfte (p) im Verlauf

[×]: Anzahl der Patienten in den jeweiligen Messintervallen (T0-FU4); p-Werte (U8 vs. Ü8): vergleichende (vs.: *versus*) Auswertung mittels T-Test von U8 und Ü8; mm: Millimeter

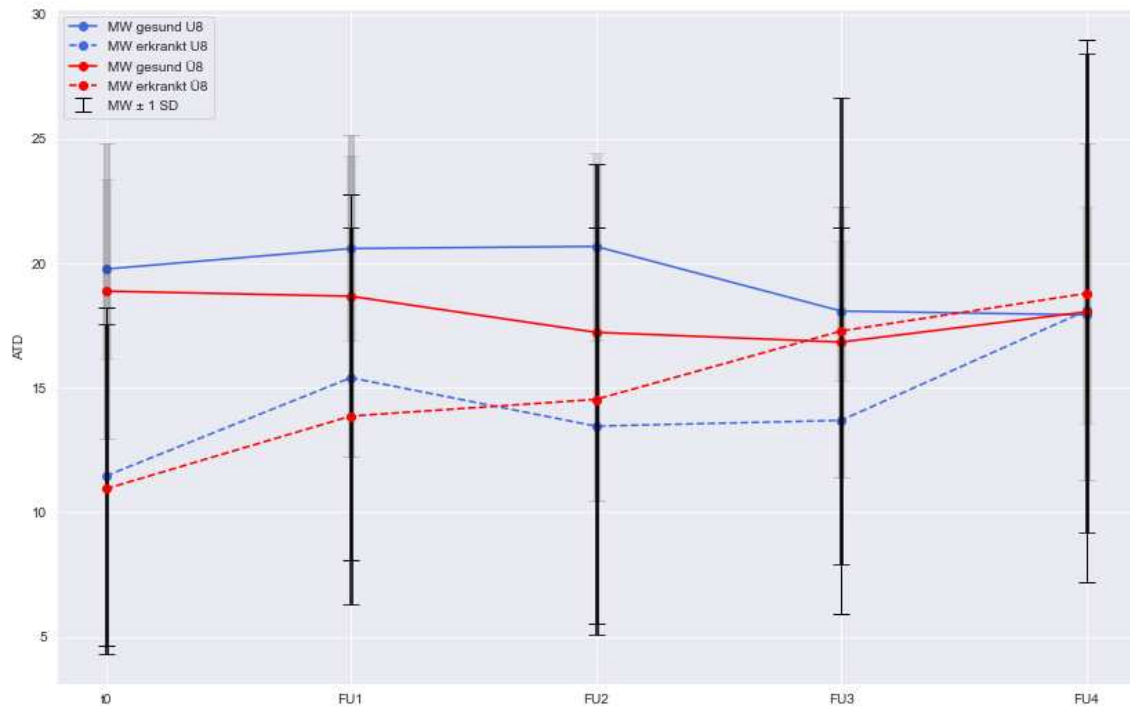


Abb. 43: Entwicklung der artikulotrochantären Distanz (ATD) der Altersgruppen U8 (< 8 Jahre; blau) und Ü8 (≥ 8 Jahre; rot) der gesunden und erkrankten Hüfte

y-Achse: ATD in Millimetern (mm), x-Achse: Zeitlicher Verlauf vom Ausgangszeitpunkt t0 bis zur Adoleszenz (FU4). MW: Mittelwert; SD: Standardabweichung (Bezug zu Tabelle 30)

3.5.4. Vergleich der Geschlechter

Die erhobenen Daten der ATD für das jeweilige Geschlecht sind in der Tabelle 31 zusammengefasst.

Die Kontrollseite - sowohl der weiblichen als auch der männlichen Patienten - zeigte keine signifikante Änderung über den Verlauf (p (männlich) = 0,26, p (weiblich) = 0,56).

Die ATD der Interventionsseite nahm über den Beobachtungszeitraum in beiden Gruppen statistisch signifikant zu (p = 0,04 in beiden Gruppen) und war zum Zeitpunkt FU4 vergleichbar mit der Kontrollseite, was durch die Abbildung 44 verdeutlicht wird. In dem dritten und letzten Messintervalle (FU3 und FU4) zeigten sich keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Messwerten innerhalb der Geschlechter (Tabelle 31).

Anhand der ANOVA-Testung zeigte sich kein statistisch signifikanter Einfluss der Variablen „Geschlecht“ auf die ATD (p = 0,44).

	T0	FU1	FU2	FU3	FU4
Männlich					
Anzahl [×]	33	31	26	16	14
ATD n <i>MW ± SD</i> [in mm]	20,2 ± 4,9	20,5 ± 5,3	20,1 ± 5,3	17,3 ± 4,5	18,2 ± 6,5
ATD p <i>MW ± SD</i> [in mm]	12,1 ± 6,8	15,2 ± 7,5	15,6 ± 8,1	14,1 ± 7,9	18,5 ± 9,2
Weiblich					
Anzahl [×]	13	12	10	7	8
ATD n <i>MW ± SD</i> [in mm]	17 ± 4,5	17,3 ± 5,3	14,9 ± 5,9	17,9 ± 3,6	17,7 ± 4,2
ATD p <i>MW ± SD</i> [in mm]	8,5 ± 5,5	13,1 ± 7,4	10,1 ± 9,6	18,5 ± 10	18,5 ± 11,9
p-Werte ATD n (m vs. w)	0,02	0,06	0,03	0,79	0,75
p-Werte ATD p (m vs. w)	0,13	0,43	0,28	0,38	0,94

Tabelle 31: Mittelwerte (MW) und Standardabweichung (SD) für den Parameter “artikulothrochantäre Distanz” (ATD) in Abhängigkeit vom Geschlecht der gesunden (n) und erkrankten Hüfte (p) im Verlauf

[×]: Anzahl der Patienten in den jeweiligen Messintervallen (T0-FU4); p-Werte (m vs. w): vergleichende (vs.: *versus*) Auswertung mittels T-Test von männlich (m) und weiblich (w); mm: Millimeter

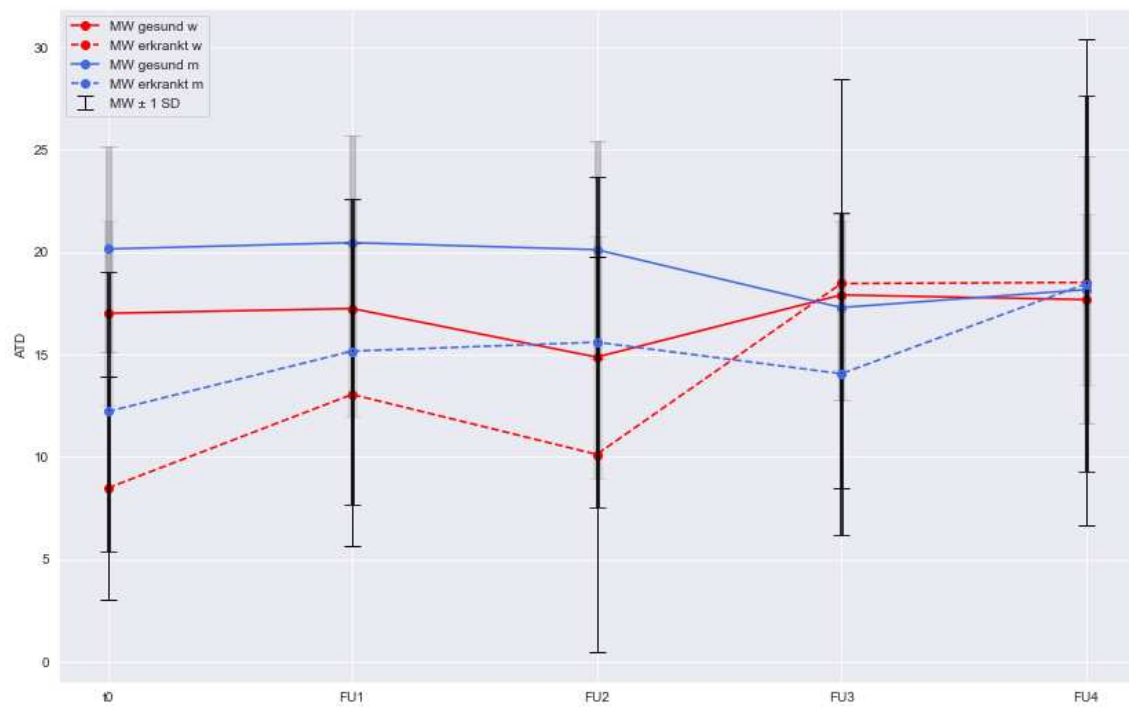


Abb. 44: Entwicklung der artikulotrochantären Distanz (ATD) der männlichen (m; blau) und weiblichen (w; rot) Patienten der gesunden und erkrankten Hüfte

y-Achse: ATD in Millimetern (mm), x-Achse: Zeitlicher Verlauf vom Ausgangszeitpunkt t0 bis zur Adoleszenz (FU4). MW: Mittelwert; SD: Standardabweichung (Bezug zu Tabelle 31)

3.6 Ermittlung der Über- und Unterkorrekturen

Die Ermittlung der Über- und Unterkorrekturen erfolgte anhand der Parameter „ATD“ und „CTD“ zum Zeitpunkt der Adoleszenz (FU4).

Die Ergebnisse (MW $\pm$ SD) der Kontrollseite dienten als Referenzbereich; ATD (FU4): $18,0 \pm 5,7$ mm, CTD (FU4): $-6,5 \pm 5,3$ mm.

Das optimale OP-Ergebnis wurde definiert anhand der Werte innerhalb einer SD $\pm$ 1. Werte kleiner -2 SD wurden als Unterkorrekturen definiert und Werte größer $+2$ SD als Überkorrekturen.

Sowohl anhand ATD als auch anhand CTD konnte ein optimaler OP-Erfolg bei 31,8% der Patienten erzielt werden (Tabelle 32, Abb. 45).

Anhand des Parameters „ATD“ kam es bei 18,2% zu einer Über-/Unterkorrektur und anhand des Parameters „CTD“ bei 31,8%. Nach manueller Analyse der Über- und Unterkorrekturen zeigt sich eine heterogene Alters- und Geschlechtsverteilung.

	Unterkorrekturen		Optimales Ergebnis		Überkorrekturen
	< - 2 SD	- 2 – - 1 SD	± 1 SD	1 – 2 SD	> 2 SD
ATD					
Anzahl (%)	2 (9.1)	4 (18.2)	7 (31.8)	7 (31.8)	2 (9.1)
m:w	1:1		6:1		2:0
U8:Ü8	1:1		3:4		1:1
CTD					
Anzahl (%)	5 (22.7)	4 (18.2)	7 (31.8)	4 (18.2)	2 (9.1)
m:w	4:1		5:2		2:0
U8:Ü8	1:4		3:4		1:1

Tabelle 32: Übersicht der optimalen OP-Ergebnisse sowie der Über- und Unterkorrekturen zum Zeitpunkt der Adoleszenz (FU4) gemessen anhand der Parameter „Artikulo-trochantäre Distanz“ (ATD) und „Centrum-Trochanter-Distanz (CTD)

SD: Standardabweichung; m: männlich; w: weiblich; U8: Gruppe der unter 8-Jährigen; Ü8: Gruppe der gleich/über 8-Jährigen

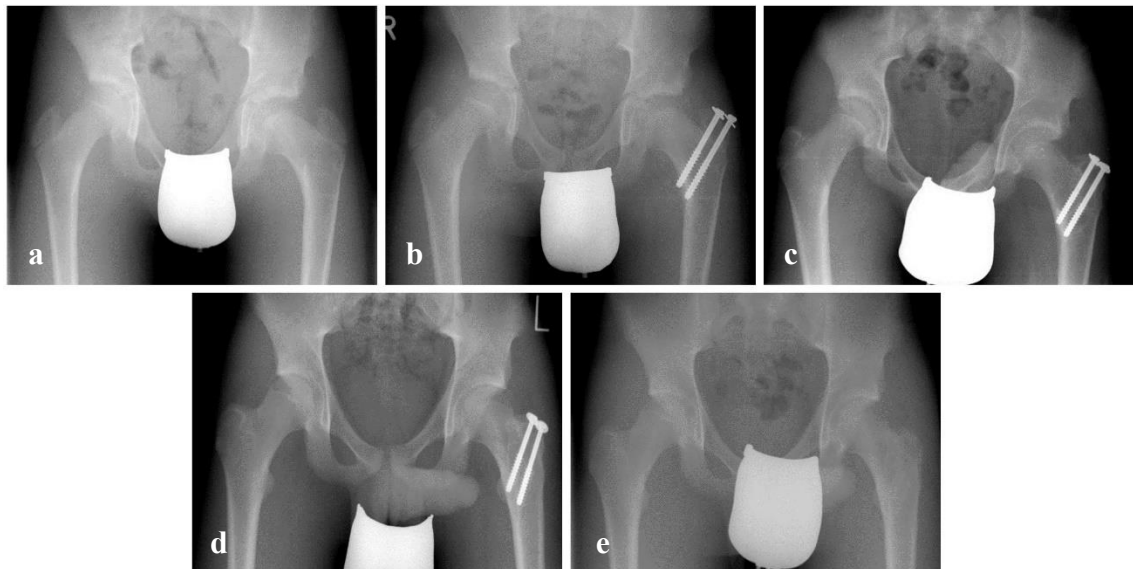


Abb. 45: Beispiel eines optimalen Verlaufes nach Trochanterapophyseodese

Männlicher Patient, Morbus Perthes links, 11 Jahre zum Zeitpunkt der Trochanterapophyseodese, stattgehabte Salter- und Femurvarisierungsoperation.

a: T0 mit einem Trochanterhochstand links; **b:** FU1 (Alter 12,1 Jahre); **c:** FU2 (Alter 13,7 Jahre); **d:** FU3 (Alter 15,8 Jahre); **e:** FU4 (Alter 16,5 Jahre) mit annähernd seitengleicher Trochanterhöhe. Klinikinterne Röntgenbilder

4. Diskussion

Die Therapie des Morbus Perthes ist Gegenstand anhaltender Diskussionen. Im Allgemeinen steht der Erhalt des *Containments* im Mittelpunkt der Therapie (7,42,63). Typische Residuen nach abgelaufenem Morbus Perthes sind unter anderem ein Trochanterhochstand, eine Coxa magna, sowie eine Schenkelhalsverbreiterung. Der Trochanterhochstand wird durch die häufig durchgeführte Femurvarisationsosteotomie (FVO) zur Verbesserung des *Containments* noch begünstigt (48). Daher empfehlen Shah et al. (45) und Matan et al. (47) diese OP mit einer Trochanterapophyseodese zu kombinieren, um einen Trochanterhochstand vorzubeugen.

Ein Trochanterhochstand verändert die Biomechanik des Hüftgelenkes und kann unter anderem zu einer Glutealinsuffizienz führen, was sich klinisch als Trendelenburgzeichen oder Duchenne-Hinken zeigt.

Die Indikation zur Therapie des Trochanterhochstands bzw. dessen Prävention wird unterschiedlich gesehen. Bei symptomatischem Trochanterhochstand kann durch eine Osteotomie am proximalen Femur der Trochanter major nach distal und lateral versetzt werden (41,64,65), alternativ gibt es die Möglichkeit der Umstellungsosteotomie im intertrochantären und Femurhalsbereich zur Valgisation und Verlängerung des Schenkelhalses mit resultierender Distalisierung des Trochanter majors (38,66,67). Die Trochanterapophyseodese stellt im Gegensatz dazu ein deutlich weniger invasives und aufwändiges Verfahren dar, was allerdings nur effektiv sein kann, wenn noch genügend Restwachstum vorhanden ist.

Seitdem das Verfahren der Epiphyseodese von Langenskiöld und Salenius (55) vorgestellt worden ist, gibt es einige Studien, die sich mit der Trochanterapophyseodese beschäftigt haben. Es gibt keine einheitlichen Ergebnisse in Bezug auf die Effektivität (39), Wahl des Implantates (56,68) und Zeitpunkt der Durchführung der OP (45,46,69).

Das Ziel dieser Studie bestand daher darin, die Resultate der in der Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie des Universitätsklinikums Düsseldorf durchgeführten Trochanterapophyseodese mittels partieller Destruktion der Epiphysenfuge und Implantation zweier Schrauben bei unilateral aufgetretenem Morbus Perthes zu evaluieren. Durch diese Studie unter Berücksichtigung der vorliegenden Datenlage sollte eine Evaluation der Ergebnisse dieser Methode erfolgen.

4.1 Diskussion der Methodik

4.1.1. Patientenkollektiv

Die Datenerhebung erfolgte retrospektiv.

Das Patientenkollektiv inkludierte 46 Patienten mit unilateralem Morbus Perthes, sodass die nicht affizierte, gesunde Seite als Kontrollseite zur Auswertung genommen werden konnte.

Es sollte speziell die Effektivität der Trochanterapophyseodese bei Patienten mit Morbus Perthes eruiert werden, somit lassen sich keine Aussagen treffen zur Effektivität der Trochanterapophyseodese bei Erkrankungen, die ebenfalls einen Trochanterhochstand als Komplikation mit sich bringen können, wie zum Beispiel die Hüftdysplasie oder Osteomyelitis am proximalen Femur.

4.1.2. OP-Indikation

Da die Trochanterapophyseodese zum jetzigen Zeitpunkt kein allgemein anerkanntes Verfahren in der Prävention des Trochanterhochstandes darstellt, gibt es keine allgemein akzeptierte Indikation.

In unserer Klinik erhielten die Kinder, die ein ausreichendes Wachstumspotenzial zeigten, eine Trochanterapophyseodese prophylaktisch bei schwerem Morbus Perthes und/oder radiologisch fortschreitendem Trochanterhochstand, unabhängig davon ob dieser nach FVO oder im Rahmen der Erkrankung aufgetreten ist.

Kitoh et al. (70) beschäftigten sich mit den prädiktiven Faktoren eines Trochanterhochstandes nach *Containment*-erhaltender-Therapie; entweder konservative Schienenbehandlung oder operative *Containment*-Wiederherstellung durch Beckenosteotomie mit oder ohne FVO. Dabei zeigte sich der Faktor „*lateral pillar* Gruppe C der Herring-Klassifikation“ als einziger statistisch signifikanter Risikofaktor - 44% der Herring C-Patienten zeigten einen Trochanterhochstand, während lediglich 10% der Gruppe B und *border*-Gruppe B/C einen solchen zeigten.

Daraus folgt, dass die Indikation zur prophylaktischen Wachstumshemmung des Trochanter majors insbesondere bei Patienten mit Morbus Perthes der Herring-Gruppe C ernsthaft zu diskutieren ist.

Joseph et al. (71) werteten 2634 Röntgenbilder von 620 Patienten mit Morbus Perthes, die entweder operativ oder konservativ behandelt worden sind, aus. Die Parameter „artikulotrochantäre Distanz (ATD)“, „Femurkopf-Radius“ und „Acetabulum-Radius“ zeigten sich bei Patienten mit irregulärem und abgeflachtem Hüftkopf pathologisch.

Um einen Trochanterhochstand vorzubeugen, ist daher zu erwägen bei Kindern unabhängig von den Voroperationen eine Trochanterapophyseodese bei asphärischem Kopf durchzuführen.

Kim et al. (48) stellten fest, dass 30% der Patienten mit Morbus Perthes und durchgeführter FVO zum Zeitpunkt der Adoleszenz einen iatrogenen Trochanterhochstand aufwiesen. Dies wurde in der Studie von Leitch et al. (32) bestätigt. Daher ist auch bei einer FVO die Indikation zur Trochanterapophyseodese regelhaft zu erwägen, wenn noch ausreichend Restwachstum zu erwarten ist, wie bereits in Studien von Matan et al. (47), Shah et al. (45) und Kwon et al. (46) untersucht worden ist.

4.1.3. OP-Technik

Es gibt verschiedene Techniken der Trochanterapophyseodese. Bislang gibt es nach unserem besten Wissen und Gewissen lediglich eine vergleichende Studie (56), sodass kein Verfahren gegenüber einem anderen als überlegen gelten kann.

In der Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie des Universitätsklinikums Düsseldorf wurde die Technik mit partieller Destruktion der Epiphysenfuge und Hemmung des Trochanterwachstums mittels zweier kanülierter Schrauben mit Unterlegscheibe genutzt.

Tongel et al. (72) und Langenskiöld et al. (55) benutzten die Phemister-Technik zur Hemmung des Trochanterwachstums. In beiden Studien wurde der radiologisch gemessene Parameter „ATD“ zur Eruierung des OP-Erfolges in den Folgeuntersuchungen kleiner, demnach kam es zu einer Verschlechterung. Das Durchschnittsalter zum Zeitpunkt der OP belief sich bei Tongel et al. auf 10,5 Jahre und bei Langenskiöld et al. war der überwiegende Teil der operierten Kinder älter als 8 Jahre. Daraus kann man schließen, dass entweder die OP-Technik unzureichend war oder die Kinder zum Zeitpunkt der OP kein ausreichendes Wachstumspotenzial mehr aufwiesen.

Akpinar et al. (56) beschäftigten sich mit der Effektivität anhand einer radiologischen Auswertung - ATD und TTD (Trochanter-Trochanter-Distanz, die Distanz zwischen Trochanter major und minor) - im Hinblick auf unterschiedliche Implantate: Zweiloch-Platte Typ *Eight-plate* (Fallzahl (n) = 9) vs. 1 Schraube (n = 13) vs. 1 Schraube mit Unterlegscheibe (n = 10). Das Durchschnittsalter zum Zeitpunkt der OP belief sich auf $10 \pm 2,3$ Jahre. Bei allen Implantaten kam es über den Nachuntersuchungszeitraum von $50 \pm 16,7$ Monaten zu einer Erniedrigung der ATD-Werte, was die Ergebnisse von Tongel et al. und Langenskiöld et al. bekräftigt. Der ausbleibende Effekt könnte wiederum auf das relativ hohe OP-Alter zurückzuführen sein. Anhand der TTD konnte jedoch ermittelt werden, dass die Implantate „Schrauben“ und „Schrauben mit Unterlegscheibe“ effektiver in der Hemmung des Wachstums des Trochanter majors waren als die *Eight-plates*, jedoch war der Effekt lediglich mit „Schraube mit Unterlegscheibe“ statistisch signifikant.

Stevens et al. (34) nutzten für die Trochanterapophyseodese *Eight-plates* und führten simultan ein Weichteilrelease (proximale Tenotomie der *Mm. adductor longus et brevis*, *M. gracilis* und *M. iliopsoas*) durch. Es wurde sowohl der klinische - anhand von Schmerz, Beweglichkeit und Trendelenburgzeichen -, als auch der radiologische Erfolg - anhand von CTD und CCD - ermittelt. Diese Studie inkludierte 12 Perthes-Patienten mit einem Durchschnittsalter von $7,3 \pm 1,5$ Jahren zum Zeitpunkt der OP. Es zeigten sich nach einem Nachuntersuchungsintervall von durchschnittlich 49 Monaten (*range*: 14-78 Monate) klinische Verbesserungen, jedoch keine Verbesserung der röntgenologischen Parameter.

Ein *Follow-up* von 49 Monaten betrachtet jedoch nicht das gesamte Wachstum, sodass es möglicherweise zu falsch negativen Werten im Hinblick auf die radiologische Auswertung gekommen ist. Die CTD änderte sich nicht bis zum Nachuntersuchungszeitpunkt, was mit den hier vorliegenden Ergebnissen vergleichbar ist. Es ist nicht auszuschließen, dass man eine radiologische Verbesserung hätte ermitteln können, wenn man andere radiologische Parameter ausgewählt hätte, wie zusätzlich zum Beispiel die ATD oder TH/TTD.

Shah et al. (45) und Kwon et al. (46) führten eine Trochanterapophyseodese mittels Schraubenimplantation mit partieller Destruktion der Trochanterepiphyse bei Patienten simultan zur bzw. nach FVO durch. Beide kamen zum Ergebnis, dass die Trochanterapophyseodese, jedoch altersabhängig, Erfolge zeigt, auf die im späteren Teil der Diskussion eingegangen wird.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die unterschiedlichen Verfahren der Trochanterapophyseodese unzureichend miteinander verglichen worden sind und man keine valide Aussage treffen kann, welches Verfahren effektiver ist.

4.1.4. Radiologische Untersuchung

Für die radiologische Auswertung wurden Beckenübersichtsaufnahmen im a.p.-Strahlengang herangezogen. Damit lassen sich die Parameter, die für die Beurteilung der Verhältnisse zwischen Trochanter major – Hüftkopf – Hüftgelenk relevant sind, bestimmen. Eine potenzielle Fehlerquelle stellt die Variabilität bei der Lagerung der Patienten während der Untersuchung dar. Durch unterschiedliche Kippung des Beckens und eine Variabilität in der Rotations- sowie Ab-/Adduktionsstellung des Hüftgelenkes kann es zu Verzerrungen in den Messungen kommen, die sich insbesondere bei den Verlaufsuntersuchungen auswirken können.

In dieser Arbeit sollten die Veränderungen am proximalen Femur während des Verlaufes - präoperativ bis zur Adoleszenz - festgestellt werden.

Shah et al. (45) verglichen lediglich die Röntgenbilder der operativ (FVO und Trochanterapophyseodese) versorgten Patienten bei Adoleszenz mit den nicht-operierten Kindern. Somit wurden nicht die Veränderungen im Verlauf beurteilt, was zu potenziell

falsch positiven Ergebnissen der operierten und falsch negativen der nicht-operierten Patienten geführt haben könnte.

Ebenso wurde in einigen Studien das Nachbeobachtungsintervall zu kurz gefasst. So wies das Kollektiv von Stevens et al. (34) zwar ein durchschnittliches *Follow-up* von 49 Monaten auf, aber es wurden auch Patienten inkludiert, die lediglich ein *Follow-up* von 14 Monaten aufwiesen. Es ist unwahrscheinlich, dass nach dieser Zeit in Anbetracht der Wachstumskurve des Trochanter majors ein nennenswerter Effekt erkennbar ist. Daher wurden in der vorliegenden Studie lediglich Patienten mit einem Mindest-*Follow-up* von 24 Monaten eingeschlossen.

Um die anatomischen Veränderungen am proximalen Femur in der Frontalebene zu beschreiben, bieten sich ATD und CTD, die bereits in der Literatur verwendet worden sind, an.

Seitdem Edgren (59) erstmalig die artikulotrochantäre Distanz (ATD) vorgestellt hatte, nutzen zahlreiche Autoren zur Beurteilung des OP-Erfolges die ATD. Die ATD ist jedoch kein Maß für das isolierte Wachstum des Trochanter majors, sondern impliziert zusätzlich das Wachstum des proximalen Femurs und die Veränderung des CCD-Winkels (40,55,59). Im Rahmen der Morbus Perthes-Erkrankung kommt es zu einer Wachstumsstörung im Bereich des Hüftkopfepiphyse und der benachbarten Fuge, sodass es zu einer Abflachung des Hüftkopfes, Erniedrigung des CCD-Winkels und Schenkelhalsverkürzung kommen kann, sodass die ATD im Vergleich zur gesunden Seite erniedrigt ist. Daher ermittelten wir zusätzlich die CTD sowie die TH.

Die Centrum-Trochanter-Distanz (CTD) ist ein weiterer etablierter Parameter für die Beurteilung des Trochanterhochstandes (34,40,46,73). Die CTD ist, genau wie die ATD, abhängig vom Wachstum im Bereich des proximalen Femurs und von der Neigung des Schenkelhalses. Problematisch ist die Bestimmung der CTD bei Hüftköpfen, die asphärisch und abgeflacht sind. Gängig ist die Methodik der Mittelpunktbestimmung mittels konzentrischer Kreise (74), dem sogenannten „*Best-Fit-Circle*“. In der vorliegenden Arbeit wurde bei abgeflachten, ellipsoiden Hüftköpfen eine Hüftkopf-umfassende Ellipse eingezeichnet. Die Methodik, die für die Hüftkopfmittelpunktbestimmung für den Parameter CTD in den Publikationen genutzt wurde, wird häufig nicht erwähnt. Dies ist somit eine potenzielle Fehlerquelle beim Vergleich der Ergebnisse mit anderen Studien.

Um das isolierte Wachstum des Trochanter majors zu ermitteln, wurde in der vorliegenden Arbeit die Trochanterhöhe (TH) gemessen. Dies ist jedoch kein Parameter, der in ähnlichen Studien angewendet wurde. In einigen wenigen Publikationen (56,69) wird statt der TH die TTD, die Distanz zwischen Trochanter major und Trochanter minor, gemessen. Nach unserer Einschätzung ist dies jedoch häufiger mit Messungenauigkeiten und einer potenziellen Verfälschung der Messwerte verbunden, denn teilweise ist der Trochanter minor auf den Röntgenaufnahmen nicht erkennbar aufgrund der Variabilität der Rotationsstellung. Zudem kann man im Röntgenbild lediglich den bereits verknöcherten Anteil des Trochanter major und minor erfassen und nicht die knorpelige

Vorstufe (7). Damit spiegelt das Röntgenbild nicht die tatsächlichen Verhältnisse des Trochanter majors und minors wider bei Kindern mit noch ausstehender Ossifikation. So postulierten Stevens und Coleman (68), dass man die Messungen bei jüngeren Patienten wegen des knorpeligen Anteils nicht valide durchführen kann und sollte erst ab dem 10. LJ angewendet werden.

Zusammenfassend weisen sämtliche radiologischen Parameter potenzielle Fehlerquellen auf, da nur der knöcherne Anteil des Trochanter majors gemessen werden kann. Die tatsächliche Höhe des Trochanter major (Knochen- und Knorpelanteil) kann lediglich mittels MRT bestimmt werden, was bei zukünftigen Studien eine sinnvolle Option wäre.

4.1.5. Statistische Auswertung

Die Grundlage der vorliegenden Studie sind Vermessungen von Röntgenbildern.

Es konnte gezeigt werden, dass eine hohe Intrarater-Reliabilität mit ICC-Werten zwischen 0,88 und 0,99 bestanden. Die Interrater-Reliabilität wurde nicht bestimmt, da die Röntgen-Parameter lediglich von einem Auswerter ermittelt wurden.

Die statistische Auswertung erfolgte mit dem Ziel der vergleichenden Darstellung. Es zeigte sich innerhalb der Altersgruppen zum Zeitpunkt der OP (U8/Ü8) eine annähernd gleiche relative Verteilung von Jungen und Mädchen. Gesamthaft ist die Anzahl der weiblichen Patienten sehr klein ($n(t_0) = 13$, $n(FU4) = 8$), sodass keine statistisch signifikanten Aussagen bezüglich des Therapieerfolges in Abhängigkeit vom Geschlecht getroffen werden konnte.

Anhand der Regressionsanalyse, ANOVA-Testung, statistischen Tests und Auswertung der vorliegenden metrischen Daten wurden die Veränderungen der einzelnen Parameter über den gesamten Verlauf herausgearbeitet und erzielten gute Ergebnisse. Zum Zeitpunkt der Adoleszenz konnten wegen fehlender Röntgenbilder oder fehlendem Verlauf bis zum Wachstumsabschluss lediglich die Ergebnisse von 22 Patienten ausgewertet werden. Dies könnte zu Verzerrungen und falsch positiven Operationsergebnissen führen. Die Reduktion der inkludierten Patienten hatte außerdem zur Folge, dass sich in der deskriptiven Analyse die Standardabweichung bei größer werdender Varianz vergrößert hatte.

4.2 Diskussion der Ergebnisse

4.2.1. Patientenkollektiv

Das Patientenkollektiv bestand aus 46 Patienten, 33 männlich und 13 weiblich, und entspricht damit annähernd einem Verhältnis von 4:1.

Der Hauptteil (71,7%) der inkludierten Patienten war zum Zeitpunkt der Trochanterapophyseodese zwischen dem 7. und 9. LJ.

78 % der Patienten (n = 36) hatten im Vorfeld eine FVO erhalten.

Tabelle 33 zeigt eine Übersicht der eigenen Arbeit und anderer Publikationen, die im Folgenden zur Diskussion herangezogen werden.

Dies hebt die Besonderheiten der vorliegenden Studie hervor: im Vergleich zu früheren Publikationen wurde ein großes Patientenkollektiv einbezogen und der Nachbeobachtungszeitraum erfasste definierte Intervalle bis zum Wachstumsabschluss. So konnten die Veränderungen des proximalen Femurs über den gesamten Beobachtungszeitraum verfolgt werden.

	Anzahl (m:w)	Alter bei OP [Jahren] $MW \pm SD$	Follow-up (FU)	Vor-OP	Radiologische Parameter
Uniklinik Düsseldorf	46 (33:13)	$8 \pm 1,3$ <8 J: $7,0 \pm 0,7$ ≥ 8 J: $8,9 \pm 1$	FU1, 2, 3 & 4 $\bar{\emptyset} 3,5 \pm 1,2$ J	8 FVO 8 BOT 28 FVO+ BOT 2 keine	TH, CTD, ATD
Shah et al. (45)	62 (45:17)	8,4 (range: 6-11,8)	$\bar{\emptyset}$ -Alter: 15,8 J (range: 13,5-19 J)	62 FVO	ATD, CTD, CCD, Kopf-Radius
Kwon et al. (46)	19 (19:0)	<8 J: $6,4 \pm 0,7$ ≥ 8 J: $8,5 \pm 1,1$	Adoleszenz	19 FVO	ATD, CTD, CCD
Tongel et al. (72)	31 (24:7)	10,5 (range: 7,9-12)	4,17 J (range: 7 Mo.-7,75 J.)	2 FVO 24 BOT	CCD, ATD
McCarthy et al. (69)	35 (21:14)	$7 \pm 2,2$ <6J: $4,9 \pm 0,9$ 6-8 J: $7,0 \pm 0,5$ >8 J: $9,7$ J	58 ± 24 Mo.	35 FVO	TTD, LTA, ATD

Tabelle 33: Deskriptive und vergleichende Übersicht der vorliegenden Arbeit mit anderen Publikationen

MW: Mittelwert; SD: Standardabweichung; $\bar{\emptyset}$: Durchschnitt; J: Jahre; Mo.: Monate; m: männlich; w: weiblich; FVO: Femurvarisierungsosteotomie; BOT: Beckenosteotomie; TH: Trochanterhöhe; ATD: Artikulotrochantäre Distanz; CTD: Centrum-Trochanter-Distanz; CCD: Centrum-Collum-Diaphysen-Winkel; TTD: Trochanter-Trochanter-Distanz; LTA: *Lesser trochanter-to-articular-distance*

4.2.2. Trochanterhöhe (TH)

Der Trochanter major ist nicht von der Erkrankung Morbus Perthes betroffen (37), sodass dessen Wachstum nicht beeinträchtigt wird.

Dies konnte in der vorliegenden Studie überraschender Weise nicht bestätigt werden. Hier zeigte sich zum Ausgangszeitpunkt ein signifikanter Unterschied zwischen der erkrankten und gesunden Seite. Die TH der erkrankten Seite war im Durchschnitt $2,2 \pm 2,6$ mm kleiner als die der Gegenseite. Dieser geringe Unterschied kann bedingt sein durch Messungenauigkeit oder aber durch eine „Verkipfung“ des Trochanter major, wenn eine FVO durchgeführt worden war, da dadurch die proximale und distale Begrenzung des Trochanter majors entlang der Femurachse näher beieinander zu liegen kommen und dadurch eine erniedrigte TH entsteht.

In der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, dass sich das Trochanterwachstum der Interventionsgruppe im Vergleich zur Kontrollgruppe, gemessen an der TH, im Verlauf statistisch signifikant reduzierte. Durch die Trochanterapophyseodese wurde das Wachstum um 28,9% gehemmt.

Bereits Salenius (55) stellte die Hypothese auf, dass das Wachstum des Trochanter majors im Rahmen der Trochanterapophyseodese um zirka 50 Prozent gehemmt werden könne.

McCarthy und Weiner (69) fanden heraus, dass durch die Trochanterapophyseodese das Wachstum gehemmt werden konnte: über einen durchschnittlichen Zeitraum von 58 ± 24 Monaten wuchs der Trochanter major mit Apophyseodese 4,3 mm weniger als der kontralaterale Trochanter der gesunden Hüfte. Das entsprach einer Hemmung um 0,9 mm pro Jahr. Dieses Ergebnis konnte durch die vorliegende Arbeit bestätigt werden. Die Regressionsanalyse ergab eine Wachstumshemmung von 0,92 mm pro Jahr.

McCarthy und Weiner setzten voraus, dass das Trochanterwachstum zu gleichen Anteilen epiphysär und appositionell erfolgt. Bei einem Trochanterwachstum der gesunden Hüfte von 18,5 mm über den Zeitraum - entsprechend zirka 9 mm appositionell und 9 mm epiphysär – und einer Hemmung von 4,3 mm nach Trochanterapophyseodese, kamen sie zu dem Ergebnis, dass das appositionelle Wachstum somit um 46% gehemmt wird.

Im Gegensatz dazu kam Kim et al. (75) nach Trochanterapophyseodese mittels zweier Schrauben zum Ergebnis, dass das appositionelle Wachstum nach Trochanterapophyseodese nicht gehemmt wird, jedoch das Gesamtwachstum des Trochanter majors um 24,3%. Dieses Ergebnis sollte jedoch kritisch betrachtet werden, da lediglich die Auswertung des ossifizierten Trochanteranteils erfolgte.

Knapik et al. (23) beschäftigten sich mit dem Wachstum des Trochanter majors und werteten Röntgen- und MRT-Bilder aus, um herauszufinden, zu welchem Zeitpunkt eine antegrade Nagelung bei Femurschaftfrakturen bei Kindern den geringsten Schaden an der Epiphyse anrichten kann. Es wurde herausgefunden, dass die Knorpelkappe bei Mädchen mit dem 7. LJ und bei Jungen mit dem 8. LJ am höchsten ist und anschließend lediglich die Ossifikation erfolgt. Demnach wäre es möglich, dass das appositionelle Wachstum

durch die Trochanterapophyseodese altersabhängig gehemmt werden könnte – dass also vor dem 7. LJ bei Mädchen bzw. 8. LJ bei Jungen sowohl das epiphysäre als auch das appositionelle Wachstum gebremst werden könnte, während danach lediglich das epiphysäre gebremst wird. Anhand der aktuellen Studienlage lässt sich diese Hypothese jedoch nicht bestätigen und sollte Gegenstand weiterer Investigationen sein.

Knapik et al. stellten ferner fest, dass das knöcherne Trochanterwachstum mit dem 11. LJ fast vollständig abgeschlossen war. Dieses Ergebnis entspricht nicht den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit. Anhand der vorliegenden Daten der TH-Werte kommt es nach dem 11. LJ zu einer weiteren Zunahme der TH auf der gesunden Seite von durchschnittlich 10,1 mm mit vermehrtem Wachstum zwischen dem 11. und 12. LJ (TH 11.- < 12.LJ.: 33,9 mm; TH $\geq$ 12.LJ: 44,0 mm).

Knapik et al. fanden ebenfalls heraus, dass es keine geschlechtsabhängigen Unterschiede gab, was mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit, bei der allerdings der Anteil der Mädchen nur gering war, übereinstimmt.

4.2.3. Centrum-Trochanter-Distanz (CTD)

Bislang gibt es kaum Studien, die sich mit den Normwerten der CTD beschäftigen, sodass dies Gegenstand weiterer Investigationen sein sollte. Omeroglu et al. (60) beschäftigten sich mit den Normwerten der CTD. Die Normwerte des unreifen, kindlichen und des skelettreifen proximalen Femurs sind vergleichend in der Tabelle 34 dargestellt. Die Spanne der Messwerte der „Kinder“ ist in der vorliegenden Arbeit größer, die Normwerte bei Skelettreife stimmen ungefähr überein. Omeroglu et al. zeigten, genau wie in der vorliegenden Arbeit, eine statistisch signifikante Verminderung der CTD der normalen Hüfte über den gesamten Zeitraum bis zur Adoleszenz.

	CTD - Kinder MW ± SD [in mm]	CTD - Erwachsene MW ± SD [in mm]
Omeroglu et al. (60)	4,8 ± 4,8 (range: -7-17) (Ø-Alter 9,2 ± 2,7 J)	-5,2 ± 6,1 (range: -25-13) (Ø-Alter 39,1 ± 16,2 J)
Uniklinik Düsseldorf	-0,3 ± 6,2 (range: -20,4-12,1) (Ø- Alter 9,4 ± 1,4 J)	-6,5 ± 5,3 (range: -18,7-2,7) (Ø-Alter 15,4 ± 1,5 J)

Tabelle 34: Übersicht über die Normwerte des radiologischen Parameters „CTD“ (Centrum-Trochanter-Distanz) der gesunden Hüfte in vergleichender Darstellung der vorliegenden Arbeit und der Studie von Omeroglu et al.

MW ± SD: Mittelwert ± Standardabweichung; mm: Millimeter; Ø: Durchschnitt; J: Jahre

Shah et al. (45) fanden einen positiven Effekt der Trochanterapophyseodese zum Zeitpunkt der Adoleszenz anhand der CTD heraus: diese betrug durchschnittlich -4,9 mm (range: -11,59-4,40), während bei Patienten ohne Trochanterapophyseodese ein Wert von durchschnittlich -16,74 mm (range: -21,56-6,99) ermittelt wurde. Die Adoleszenz ist in der vorliegenden Arbeit mit dem Messintervall FU4 gleichzustellen und es wurde ein Mittelwert von -7,8 ± 9,1 mm auf der erkrankten Seite ermittelt.

Kwon et al. (46) untersuchten die Effektivität der Trochanterapophyseodese altersabhängig - wie in der vorliegenden Arbeit, einerseits unter und andererseits gleich/über dem 8. LJ -, nachfolgend U8 und Ü8 genannt. Die Auswertung erfolgte vergleichend - direkt postoperativ und zum Zeitpunkt der Adoleszenz -, was in der vorliegenden Arbeit den Messintervallen t0 und FU4 entspricht. In der Tabelle 35 sind die Werte aus der Studie von Kwon et al. und den hier erzielten Ergebnissen gegenüber gestellt.

Die CTD der gesunden Hüfte verkleinerte und negatierte sich über den Zeitraum bis zur Adoleszenz in beiden Studien. In der Gruppe U8 der Studie von Kwon et al. zeigte sich eine Vergrößerung der CTD der erkrankten Hüfte, was für ein gutes OP-Ergebnis spricht

und in der Gruppe Ü8 zeigte sich eine Reduktion der CTD, was für einen schlechten OP-Erfolg spricht. Demnach ist der Effekt laut Kwon et al. altersabhängig und hat lediglich einen positiven Effekt in der Gruppe U8. Dies konnte in der vorliegenden Arbeit nicht bekräftigt werden. Denn insgesamt zeigte sich ein positiver Effekt auf die CTD über den Beobachtungszeitraum, der alters- und geschlechtsunabhängig ist.

	CTD n präoperativ MW ± SD <i>[in mm]</i>	CTD n Adoleszenz MW ± SD <i>[in mm]</i>	CTD p präoperativ MW ± SD <i>[in mm]</i>	CTD p Adoleszenz MW ± SD <i>[in mm]</i>
< 8 Jahre				
Universitätsklinik Düsseldorf	2,5 ± 4,1	-6,3 ± 4,3	-6,1 ± 6,1	-7,1 ± 9
Kwon et al. (46)	12,4 ± 2,8	6,1 ± 4,8	-0,6 ± 6	4,3 ± 3,2
≥ 8 Jahre				
Universitätsklinik Düsseldorf	-0,3 ± 6,3	-6,7 ± 6,3	-9,2 ± 7,3	-8,3 ± 9,7
Kwon et al. (46)	10,5 ± 4,3	5,2 ± 3,2	-2,1 ± 4,7	-5,1 ± 7,2

Tabelle 35: Vergleichende Darstellung der erhobenen altersabhängigen Messwerte für den Parameter “CTD” (Centrum-Trochanter-Distanz) der gesunden (n) und erkrankten (p) Hüfte der vorliegenden Arbeit und der Studie von Kwon et al.

MW ± SD: Mittelwert ± Standardabweichung; mm: Millimeter

4.2.4. Artikulotrochantäre Distanz (ATD)

Die artikulotrochantäre Distanz (ATD) wurde erstmalig von Edgren (59) beschrieben. Er bestimmte einen Normalwert der ATD von 21 mm bei Kindern zwischen dem 5. und 13. LJ. Dies wird durch McCarthy und Weiner (69) gestützt, die einen Normalwert von 20 mm ermittelten. Zudem wurden geschlechtsabhängige Unterschiede ermittelt: Mädchen 16,1 mm und Jungen 22,8 mm. Dies stimmt mit den Ergebnissen von Langenskiöld und Salenius (55) überein (Mädchen: $16 \pm 3,6$ mm, Jungs: $23 \pm 4,5$ mm). In der vorliegenden Arbeit konnten keine statistisch signifikanten Unterschiede der ATD zwischen den Geschlechtern festgestellt werden.

Pozdnikin et al. (40) zeigte mit einer hohen Fallzahl von 350 Patienten, wie in den hier vorliegenden Ergebnissen, dass die ATD der gesunden Hüfte bei jüngeren Patienten größer war. Bei den Patienten der Gruppe „*preschooler*“ (3.-7. LJ) zeigte sich eine durchschnittliche ATD von $20,8 \pm 1,3$ mm und in der Gruppe „*schooler*“ (8.- 17. LJ) eine durchschnittliche ATD von $18 \pm 3,5$ mm. Jedoch zeigten sich, genau wie in der vorliegenden Studie, keine statistisch signifikanten Unterschiede in den Altersgruppen.

Es zeigte sich zusammenfassend, dass in der vorliegenden Studie die ATD-Werte für die gesunde Hüfte mit den bereits publizierten Daten übereinstimmen.

Pozdnikin et al. (40) ermittelten einen Durchschnittswert der ATD der erkrankten, nicht operativ versorgten Hüfte von $-0,2 \pm 8,9$ mm, dieser reduzierte sich statistisch signifikant mit dem Alter („*preschooler*“: $5,1 \pm 5,5$ mm, „*schooler*“: $-2,3 \pm 9,2$ mm). Jedoch wurden in dieser Studie alle Erkrankungen, wie zum Beispiel auch die Hüft dysplasie und septische Arthritis, inkludiert, die zu einem Trochanterhochstand führen.

Shah et al. (45) untersuchten Röntgenbilder zum Zeitpunkt der Adoleszenz, entsprechend dem *Follow-up* FU4 in der vorliegenden Arbeit. Sie ermittelten erniedrigte ATD-Werte der nicht-operierten Hüften im Vergleich zu den operativ versorgten Kindern („*operative*“: 18,79 mm (*range*: 9,9-27,27), „*nonoperative*“: 11,75 mm (*range*: 4,17-15,65)). Der Mittelwert der ATD nach durchgeführter Trochanterapophyseodese entspricht annähernd dem hier vorliegendem Ergebnis (FU4: $18,5 \pm 9,9$ mm).

In der vorliegenden Arbeit konnte durch die Trochanterapophyseodese eine Vergrößerung des Parameters ATD während der *Follow-ups* geschlechts- und altersunabhängig erzielt werden.

In einigen Studien wurde zur Beurteilung der Effektivität der Trochanterapophyseodese die ATD bestimmt. So ermittelten Langenskiöld und Salenius (55), dass trotz wachstumshemmender OP nach Phemister die ATD-Werte sich postoperativ erniedrigten. Sie untersuchten die Röntgenbilder zwei Jahre vor und zwei Jahre nach durchgeführter OP. Die ATD-Werte erniedrigten sich zwar postoperativ, jedoch erfolgte die Abnahme der ATD postoperativ verlangsamt (präoperativ: Reduktion der ATD im Durchschnitt um 3-7 mm, postoperativ: 1-4 mm). Diese Ergebnisse sind jedoch zu hinterfragen, da Langenskiöld et al. keine Kinder ausgewertet hatten, die an Morbus

Perthes litten, sondern unter kongenitaler Hüftdyplasie. Im Gegensatz dazu hat der Morbus Perthes eine Selbstheilungstendenz. Eine weitere Limitierung stellt das Alter und Geschlecht des Patientenkollektives dar: im Durchschnitt war das Patientenkollektiv über dem 10. LJ und der Hauptteil der ausgewerteten Patienten war weiblich. Eventuell hat die OP bei den weiblichen Patienten über dem 10. LJ keinen Effekt bei reduzierter Wachstumstendenz, worauf jedoch zu einem späteren Zeitpunkt dieser Diskussion Stellung genommen wird.

Ein ähnliches Ergebnis wie Langenskiöld erzielten van Tongel et Fabry (72). Ebenfalls wurde nach der Phemister-Technik operiert und das durchschnittliche Alter bei OP betrug 10,5 Jahre. Die ATD erniedrigte sich postoperativ, weswegen die Hypothese aufgestellt worden ist, dass die Trochanterapophyseodese lediglich bei Kindern vor dem 8. LJ effektiv sei.

Diese Hypothese wird durch Kwon et al. (46) bestärkt, die, wie bereits beschrieben, die altersabhängige Effektivität beurteilt haben (4.2.3). Sie kamen zum Ergebnis, dass die ATD der Gruppe U8 im Verlauf zu- und in der Gruppe Ü8 abnimmt. Im Gegensatz dazu kam es in der vorliegenden Arbeit in beiden Gruppen zu einer Zunahme der ATD und es ließen sich keine statistisch signifikanten altersabhängigen Unterschiede feststellen (Tabelle 36).

	ATD n präoperativ MW ± SD <i>[in mm]</i>	ATD n Adoleszenz MW ± SD <i>[in mm]</i>	ATD p präoperativ MW ± SD <i>[in mm]</i>	ATD p Adoleszenz MW ± SD <i>[in mm]</i>
< 8 Jahre				
Universitätsklinik Düsseldorf	19,8 ± 3,6	17,9 ± 4,4	11,5 ± 6,8	18,1 ± 10,9
Kwon et al. (46)	31,4 ± 3,8	28,7 ± 5,1	17,4 ± 6,5	24,3 ± 4,4
≥ 8 Jahre				
Universitätsklinik Düsseldorf	18,9 ± 5,9	18,1 ± 5,7	10,9 ± 6,6	18,8 ± 9,6
Kwon et al. (46)	29,4 ± 5,7	24,6 ± 6	16,4 ± 5,6	13,1 ± 4,7

Tabelle 36: Vergleichende Darstellung der erhobenen altersabhängigen Messwerte für den Parameter “ATD” (artikulothorantäre Distanz) der gesunden (n) und erkrankten (p) Hüfte der vorliegenden Arbeit und der Studie von Kwon et al.

MW ± SD: Mittelwert ± Standardabweichung; mm: Millimeter

4.3 Diskussion der Effektivität

Wie bereits dargestellt ist die Effektivität der Trochanterapophyseodese in verschiedenen Studien sehr unterschiedlich und unterliegt laut einigen Publikationen dem Alter bei OP. In der vorliegenden Studie wurde die Effektivität in Abhängigkeit vom Alter und dem Geschlecht untersucht.

4.3.1. Im Hinblick auf das Alter

In der vorliegenden Arbeit konnte mittels Regressionsanalyse und ANOVA-Testung gezeigt werden, dass der Einfluss auf die TH nach Trochanterapophyseodese altersabhängig ist. Zudem war die Hemmung nach Trochanterapophyseodese in der Gruppe Ü8 von 27,8% nicht statistisch signifikant ($p = 0,07$). In der Gruppe U8 hatte die Variable „OP-Alter“ nur einen geringfügigen Einfluss auf die Regressionsgleichung, wobei in der Gruppe Ü8 das Alter einen vermehrten Einfluss hatte. Anhand der Regressionsebene konnte man darstellen, dass die erhobenen Messdaten der Kinder über dem 10. LJ nicht adäquat durch die Regressionsgleichung beschrieben werden konnte. Da die Datenbasis in der vorliegenden Arbeit jedoch zu klein ist, konnte keine valide, statistisch signifikante Aussage getroffen werden, ab welchem LJ die Trochanterapophyseodese keinen oder nur einen reduzierten Effekt hat.

Tongel und Fabry (72) postulierten, dass eine Trochanterapophyseodese unter dem 8. LJ durchgeführt werden sollte, da sie keine radiologische Verbesserung, gemessen an ATD und CCD, bei den durchschnittlich 10,5-Jährigen zum Zeitpunkt der OP feststellen konnten. Auch Gage und Cary (76) rieten an, eine Trochanterapophyseodese nicht bei über 8-Jährigen durchzuführen. Jedoch muss man dieses Ergebnis kritisch betrachten, da in der Studie lediglich 15 Patienten inkludiert worden sind, wovon nur 4 Patienten über dem 8. LJ gewesen sind, was nicht repräsentativ ist, um eine statistisch valide Aussage treffen zu können.

Im Gegensatz dazu kamen McCarthy und Weiner (69) zu dem überraschenden Ergebnis, dass die Trochanterapophyseodese bei den über 8-Jährigen effektiver war. Bei den unter 6-Jährigen wurde eine Wachstumshemmung um zirka 0,4 mm pro Jahr und bei den über 8-Jährigen um 1,7 mm pro Jahr ermittelt. Es könnte jedoch zu falsch negativen Werten bei den unter 6-Jährigen gekommen sein, da bei einem durchschnittlichen Nachuntersuchungszeitraum von 58 Monaten kein pubertärer Wachstumsschub inkludiert gewesen ist. Ein weiterer Faktor, der gegebenenfalls zu einer Verfälschung der Ergebnisse von McCarthy et al. geführt haben könnte, ist die Tatsache, dass die Gruppen eine unterschiedliche Geschlechterverteilung hatten (Gruppe unter 6-Jährigen ($n = 13$): 6 Mädchen, Gruppe über 8-Jährigen ($n = 11$): 3 Mädchen). Die Hypothese, dass Mädchen ein geringeres Wachstumspotenzial besitzen, wird im nächsten Abschnitt der vorliegenden Arbeit diskutiert.

Kwon et al. (46) und Shah et al. (45) führten die Trochanterapophyseodese nach oder simultan zur FVO durch. Um zu untersuchen, ob diese Ergebnisse mit den vorliegenden Daten verglichen werden konnten, wurden die Vor-Operationen in die deskriptive Übersicht inkludiert (Tabelle 33). Das vorliegende Patientenkollektiv stellt eine gute Vergleichsgruppe zu Shah et al. und Kwon et al. dar.

Wie bereits unter 4.2.3 und 4.2.4 beschrieben, arbeiteten Kwon et al. altersabhängige Unterschiede heraus: In der Gruppe U8 kam es zu einer Verbesserung und in der Gruppe Ü8 zu einer Verschlechterung der erhobenen Werte anhand der radiologischen Parameter CTD und ATD. Dies konnte in der vorliegenden Arbeit nicht bestätigt werden. Zusammenfassend waren ATD und CTD nach ANOVA-Testung statistisch signifikant altersunabhängig.

Shah et al. (45) ermittelten die Rate der Über- und Unterkorrekturen anhand der Parameter CTD, ATD und Abduktorenhebelarmes. Es erfolgte ein Vergleich der gemessenen Werte der erkrankten Hüfte mit den der gesunden Hüfte. Sofern alle Werte der 3 Parameter der erkrankten Hüfte innerhalb der 5. bis 95. Perzentile (entsprechend ± 2 SD) der erhobenen Messwerte der gesunden Hüfte lagen, wurde dies als optimales OP-Ergebnis definiert. 60% der Patienten erzielten in dieser Studie ein optimales Korrekturergebnis, bei 30% zeigte sich eine Unterkorrektur (OP-Alter: $9,53 \pm 1,74$) und bei 10% eine Überkorrektur (OP-Alter: $7,65 \pm 1,79$).

Wenn man in der vorliegenden Arbeit das Ergebnis als „optimal“ definiert hätte bei Werten von ATD und CTD binnen zweier SD, so würden 68,2% ein optimales Ergebnis, 22,7% eine Unterkorrektur und 9,1% eine Überkorrektur aufweisen. Somit erzielte diese Arbeit vergleichbare Ergebnisse zu Shah et al..

Shah et al. eruierten mittels einer logistischen Regressionsanalyse eine altersabhängige Effektivität der Trochanterapophyseodese anhand des Parameters „CTD“: bei einem Alter von 6 Jahren zum Zeitpunkt der OP war eine Effektivität von 94%, bei 8 Jahren 80% und bei 10 Jahren 52% zu eruieren.

In der vorliegenden Arbeit war das Durchschnittsalter zum Zeitpunkt der Trochanterapophyseodese $8 \pm 1,3$ Jahre. Lediglich 6 Patienten (13%) waren unter dem 7. LJ, wovon nur 2 Patienten (4%) unter dem 6. LJ waren. Ebenso ist die Datenbasis von 4 Patienten (8,7%) über dem 10. LJ sehr klein, sodass keine validen Aussagen zur Effektivität unter dem 6. LJ und über dem 10. LJ möglich waren.

Shah et al. konnten zudem eruieren, dass der Hüftkopf bei den Unterkorrekturen flach und irregulär und bei den Überkorrekturen sphärisch war, was die Hypothese aufwirft, dass der Schweregrad der Perthes-Erkrankung einen Einfluss auf die Effektivität der Trochanterapophyseodese hat. Die Sphärizität der Hüftköpfe und der Schweregrad wurden in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt und sollte in weiteren Studien untersucht werden.

4.3.2. Im Hinblick auf das Geschlecht

Die Hypothese, dass Mädchen im Vergleich zu gleichaltrigen Jungen ein geringeres Wachstumspotenzial besitzen, wird gestützt durch die Erkenntnis, dass die Epiphysenfugen früher schließen als bei den Jungen (77) und der skelettale Reifungsprozess bei den Jungen länger andauert (78).

Guille et al. (79) beschäftigten sich mit dem Verlauf der Morbus Perthes-Erkrankung und arbeiteten geschlechtsspezifische Unterschiede heraus. Es zeigte sich, dass die Mädchen die skelettale Reife früher als Jungs erreichen und demnach eine kürzere Periode für das Remodelling des Hüftkopfes haben. So fand der Schluss der Femurkopfeiphysenfuge mit zirka 12,9 Jahren bei den Mädchen und mit 15,8 Jahren bei den Jungen statt. Dies konnte in der vorliegenden Arbeit weitgehend nach manueller Analyse bestätigt werden, da es bei den weiblichen Patienten in den letzten beiden Messintervallen (FU3 und FU4) zu keiner wesentlichen Veränderung der Messwerte gekommen ist im Vergleich zu den Jungen.

Zusammenfassend konnten in der vorliegenden Arbeit keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen Mädchen und Jungen ermittelt werden. Jedoch ist der Datensatz an weiblichen Patienten zu klein, um statistisch signifikante Aussagen treffen zu können. Somit sollte dies in weiterführenden Studien mit einem größeren Datensatz erneut überprüft werden.

4.4 Limitierungen

Im Folgenden werden auf die Limitierungen der vorliegenden Studie eingegangen.

Bei der vorliegenden Studie handelt es sich um ein retrospektives Studiendesign. Der Nachteil einer retrospektiven Studie ist, dass die zu untersuchenden Merkmale unzureichend erhoben worden sind. So kam es zu fehlenden Röntgenbildern in den jeweilig gewählten Messintervallen.

Eine weitere Limitation stellt das Studienkollektiv dar: nicht alle Patienten konnten bis zum Wachstumsabschluss radiologisch verfolgt werden (lediglich 22 von 46 inkludierten Patienten) und die Anzahl der Patienten zu unterschiedlichen Nachuntersuchungszeitpunkten variierte; die Anzahl an Mädchen war äußerst gering, so dass der Einfluss des Geschlechts nur unzureichend untersucht werden konnte; dies entspricht allerdings der Tatsache, dass deutlich mehr Jungen von der Erkrankung M. Perthes betroffen sind als Mädchen (Verhältnis 4:1).

Eine weitere Limitierung ist das Patientenalter. Der Hauptteil des Patientenkollektivs war zum Zeitpunkt der OP zwischen dem 7. und 9. LJ, sodass keine validen Aussagen bezüglich der Effektivität der Trochanterapophyseodese bei Patienten unter dem 7. LJ und über dem 9. LJ möglich waren.

Die Beurteilung der Effektivität der Trochanterapophyseodese erfolgte lediglich anhand einer radiologischen Auswertung. Eine Korrelation mit klinischen und funktionellen *Outcome*-Parametern fehlt und sollte zukünftig erfolgen. Des Weiteren wurde ein möglicher Einfluss von den Morbus Perthes charakterisierenden Faktoren wie Schweregrad (Klassifikation nach Herring und Caterall) und Stadium der Erkrankung nicht berücksichtigt.

Eine radiologische Auswertung bei Kindern beinhaltet unterschiedliche Fehlerquellen: die Messungen bzgl. des Trochanters berücksichtigen lediglich den bereits ossifizierten Anteil des Trochanter majors, sodass es über den Zeitraum zu Messungenauigkeiten kommen kann. Allerdings wurde diese Fehlerquelle dadurch relativiert, dass jeweils die gesunde Gegenseite zum Vergleich herangezogen wurde. Wegen der Variabilität der Lagerung der Patienten bei der radiologischen Untersuchung kann es ebenfalls zu Verzerrungen in den Messungen kommen, die sich potenziell auf die Verlaufsuntersuchungen auswirken können. Um diese Fehlerquelle zu dezimieren oder zu inkludieren, hätte der Beckenkippsindex oder Drehungsindex des Beckens mitausgewertet werden können.

Das Erreichen einer zufriedenstellenden Intrarater-Reliabilität wurde in der vorliegenden Studie überprüft und gesichert. Jedoch erfolgte keine Auswertung der Daten durch einen weiteren Beobachter, sodass die Objektivität des Untersuchers in der vorliegenden Arbeit durch die Interrater-Reliabilität nicht ausgeschlossen werden kann.

4.5 Schlussfolgerung

Zusammenfassend zeigt sich anhand der vorliegenden Daten die Trochanterapophyseodese mittels zweier Schrauben und Kürretage der Epiphysenfuge als effektives Verfahren zur Vorbeugung und Behandlung eines Trochanterhochstandes bei Kindern mit ausreichendem Wachstumspotenzial.

Das Trochanterwachstum wurde im Schnitt um 29% gehemmt und anhand der Regressionsanalyse konnte eine Hemmung von 0,92 mm pro Jahr ermittelt werden. Eine Differenzierung der altersabhängigen Effektivität war anhand der vorliegenden Daten nicht möglich, da der Anteil der unter 6-Jährigen und über 10-Jährigen zu klein war. In der vorliegenden Arbeit zeigten sich gute Ergebnisse bei den Kindern zwischen dem 7. und 9. LJ, wo 31,8% ein optimales OP-Ergebnis erzielten.

Obwohl in der vorliegenden Arbeit kein geschlechts- und altersabhängiger Einfluss auf die Parameter ATD und CTD ermittelt werden konnte, scheint das Alter einen Einfluss auf die TH zu haben, was in weiteren Studien mit einer höheren Fallzahl untersucht werden sollte.

Zudem fand lediglich die radiologische Auswertung statt. Die vorliegenden Daten werden zu einem späteren Zeitpunkt mit den vorliegenden klinischen und ganganalytischen Daten korreliert, um die Auswirkungen der Trochanterapophyseodese auf die Funktionalität und Biomechanik zu eruieren.

5. Literaturverzeichnis

1. Calvé J. Calvé J (1910) Sur une forme particulière de coxalgie greffée. Sur les déformations caractéristiques de l'extrémité supérieure du fémur. Rev Chir 42:54.
2. Legg AT. An Obscure Affection of the Hip-Joint. Boston Med Surg J. 17. Februar 1910;162(7):202–4.
3. Perthes GC (1910) Über die Arthrosis deformans juvenilis. Deutsch Z Chir 107:111.
4. Sponseller P, Desai S, Millis M. Abnormalities of proximal femoral growth after severe Perthes' disease. J Bone Joint Surg Br. August 1989;71-B(4):610–4.
5. Nelitz M, Lippacher S, Krauspe R, Reichel H. Perthes Disease. Dtsch Aerzteblatt Int 2009; 106(31-32):517-23.
6. Purry N. The incidence of Perthes' disease in three population groups in the Eastern Cape region of South Africa. J Bone Joint Surg Br. Juni 1982;64-B(3):286–8.
7. Hefti F, Brunner R, Hasler C, Jundt G, Krieg A, Freuler FK. Kinderorthopädie in der Praxis. 3., vollst. überarb. Aufl. Berlin: Springer; 2015: S. 53-58; 214; 241–254.
8. Kristmundsdottir F, Burwell RG, Harrison MHM. Delayed skeletal maturation in Perthes' disease. Acta Orthop Scand. Januar 1987;58(3):277–9.
9. Waldenström H. The Definite Form of the Coxa Plana. Acta Radiol. Juli 2016;57(7):e79–94.
10. Peters KM. Knochenkrankheiten: Klinik Diagnose Therapie. Springer; 2013: S.121-24.
11. Herring JA, Neustadt JB, Williams JJ, Early JS, Browne RH. The Lateral Pillar Classification of Legg-Calve-Perthes Disease: J Pediatr Orthop. März 1992;12(2):143–50.
12. Catterall A. The natural history of Perthes' disease. J Bone Joint Surg Br. Februar 1971;53(1):37–53.
13. Stulberg SD, Cooperman DR, Wallensten R. The natural history of Legg-Calvé-Perthes disease. J Bone Joint Surg Am. September 1981;63(7):1095–108.
14. Herring JA, Kim HT, Browne R. Legg-Calve-Perthes disease. Part II: Prospective multicenter study of the effect of treatment on outcome. J Bone Joint Surg Am. Oktober 2004;86(10):2121–34.
15. Wiig O, Terjesen T, Svenningsen S. Prognostic factors and outcome of treatment in Perthes' disease: A PROSPECTIVE STUDY OF 368 PATIENTS WITH FIVE-YEAR FOLLOW-UP. J Bone Joint Surg Br. Oktober 2008;90-B(10):1364–71.

16. Ippolito E, Tudisco C, Farsetti P. The long-term prognosis of unilateral Perthes' disease. *J Bone Joint Surg Br.* März 1987;69-B(2):243–50.
17. Froberg L, Christensen F, Pedersen NW, Overgaard S. Long-term follow-up of a patient cohort with Legg–Calvé–Perthes disease. *J Pediatr Orthop B.* September 2011;20(5):273–7.
18. Engelhardt P. Die Spätprognose des Morbus Perthes: Welche Faktoren bestimmen das Arthroserisiko? *Z Für Orthop Ihre Grenzgeb.* 14. Mai 2008;123(02):168–81.
19. McAndrew MP, Weinstein SL. A long-term follow-up of Legg-Calvé-Perthes disease.: *J Bone Jt Surg.* Juli 1984;66(6):860–9.
20. Shapiro F. Legg–Calve–Perthes Disease. In: *Pediatric Orthopedic Deformities.* Elsevier; 2001:272–375.
21. Heimkes B. Die großen Apophysen: Funktionelle Beanspruchung und Bedeutung. *Orthop.* März 2016;45(3):206–12.
22. Exner U, Herausgeber. *Normalwerte in Wachstum und Entwicklung.* 2. Aufl. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2003: S.77.
23. Knapik DM, McCarthy C, Liu RW. Developmental Patterns of the Greater Trochanter in Skeletally Immature Patients. *J Pediatr Orthop.* Juli 2019;39(6):e412–6.
24. Zaghoul A. Hip Joint: Embryology, Anatomy and Biomechanics. *Biomed J Sci Tech Res.* 20. Dezember 2018;12(3):9304-18.
25. Zoetis T, Tassinari M, Bagi C, Walthall K, Hurtt M. Postnatal Developmental Milestones. Hood R. *Developmental and Reproductive Toxicology*; 2005:S. 969–1130.
26. Johnson KJ, Davies AM. Congenital and Developmental Abnormalities. Davies AM, Johnson KJ, Whitehouse RW. *Imaging of the Hip & Bony Pelvis.* Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag; 2006: S. 93–105.
27. Knipe H. Ossification centres of the hip. *Radiopaedia.org*; 2013
28. Park KW, Rejuso CA, Cho WT, Song HR. Timing of premature physeal closure in Legg-Calve-Perthes Disease. *Int Orthop.* Oktober 2014;38(10):2137–42.
29. Staatz G, Honnef D, Piroth W, Radkow T, Pareto-Reihe Radiologie Kinderradiologie. Hrsg. 1. Auflage. Stuttgart: Thieme; 2007: S. 355.
30. Švehlík M, Kraus T, Steinwender G, Zwick EB, Linhart WE. Pathological gait in children with Legg-Calvé-Perthes disease and proposal for gait modification to decrease the hip joint loading. *Int Orthop.* Juni 2012;36(6):1235–41.
31. Bowen JR, Schreiber FC, Foster BK, Wein BK. Premature femoral neck physeal closure in Perthes' disease. *Clin Orthop.* Dezember 1982;(171):24–9.

32. Leitch JM, Paterson DC, Foster BK. Growth disturbance in Legg-Calvé-Perthes disease and the consequences of surgical treatment. Clin Orthop. Januar 1991;(262):178–84.
33. Keret D, Harrison MH, Clarke NM, Hall DJ. Coxa plana--the fate of the physis.: J Bone Jt Surg. Juli 1984;66(6):870–7.
34. Gililland JM, Anderson LA, Stevens PM, Novais E. Guided growth of the trochanteric apophysis combined with soft tissue release for Legg–Calve–Perthes disease. Strateg Trauma Limb Reconstr. 30. April 2014;9(1):37–43.
35. Sobotta J, Paulsen F, Waschke J, Herausgeber. Atlas der Anatomie des Menschen; 23. Aufl. München: Elsevier, Urban & Fischer; 2010: S. 306-7.
36. Beck M, Kalhor M, Leunig M, Ganz R. Hip morphology influences the pattern of damage to the acetabular cartilage: FEMOROACETABULAR IMPINGEMENT AS A CAUSE OF EARLY OSTEOARTHRITIS OF THE HIP. J Bone Joint Surg Br. Juli 2005;87-B(7):1012–8.
37. Parvizi J, Leunig M, Ganz R. Femoroacetabular Impingement: J Am Acad Orthop Surg. September 2007;15(9):561–70.
38. Louahem M’sabah D, Assi C, Cottalorda J. Proximal femoral osteotomies in children. Orthop Traumatol Surg Res. Februar 2013;99(1):S171–86.
39. Schneidmueller D, Carstens C, Thomsen M. Surgical Treatment of Overgrowth of the Greater Trochanter in Children and Adolescents. J Pediatr Orthop. Juli 2006;26(4):486–90.
40. Pozdnyukov IY, Baskov VE, Barsukov DB, Bortulev PI, Krasnov AI. Relative overgrowth of the greater trochanter and trochanteric-pelvic impingement syndrome in children: causes and X-ray anatomical characteristics. Pediatr Traumatol Orthop Reconstr Surg. 2. Oktober 2019;7(3):15–24.
41. Macnicol M, Makris D. Distal transfer of the greater trochanter. J Bone Joint Surg Br. September 1991;73-B(5):838–41.
42. Westhoff B, Martiny F, Krauspe R. Morbus Perthes. Z Für Orthop Unfallchirurgie. 22. Dezember 2014;152(06):617–35.
43. Joseph B, Nair NS, Rao K. L. N, Mulpuri K, Varghese G. Optimal Timing for Containment Surgery for Perthes Disease: J Pediatr Orthop. September 2003;601–6.
44. Axer A. SUBTROCHANTERIC OSTEOTOMY IN THE TREATMENT OF PERTHES’ DISEASE: A PRELIMINARY REPORT. J Bone Joint Surg Br. August 1965;47:489–99.
45. Shah H, Siddesh ND, Joseph B, Nair SN. Effect of Prophylactic Trochanteric Epiphyseodesis in Older Children With Perthes’ Disease. J Pediatr Orthop. Dezember 2009;29(8):889–95.

46. Kwon KS, Wang SI, Lee JH, Moon YJ, Kim JR. Effect of greater trochanteric epiphysiodesis after femoral varus osteotomy for lateral pillar classification B and B/C border Legg–Calvé–Perthes disease: A retrospective observational study. *Medicine (Baltimore)*. August 2017;96(31):e7723.
47. Matan AJ, Stevens PM, Smith JT, Santora SD. Combination Trochanteric Arrest and Intertrochanteric Osteotomy for Perthes' Disease: *J Pediatr Orthop*. Januar 1996;10–4.
48. Kim HK, da Cunha AM, Browne R, Kim HT, Herring JA. How Much Varus Is Optimal with Proximal Femoral Osteotomy to Preserve the Femoral Head in Legg-Calvé-Perthes Disease?: *J Bone Jt Surg-Am Vol*. Februar 2011;93(4):341–7.
49. Salter RB, Thompson GH. Legg-Calvé-Perthes disease. The prognostic significance of the subchondral fracture and a two-group classification of the femoral head involvement. *J Bone Joint Surg Am*. April 1984;66(4):479–89.
50. Tönnis D, Behrens K, Tscharrani F. A Modified Technique of the Triple Pelvic Osteotomy: Early Results: *J Pediatr Orthop*. November 1981;1(3):241–9.
51. Phemister. OPERATIVE ARRESTMENT OF LONGITUDINAL GROWTH OF BONES IN THE TREATMENT OF DEFORMITIES: *Journal of Bone and Joint Surgery, American Volume* 1933;(15):1-15.
52. Nouth F, Kuo LA. Percutaneous epiphysiodesis using transphyseal screws (PETS): prospective case study and review. *J Pediatr Orthop*. Dezember 2004;24(6):721–5.
53. Blount WP, Clarke GR. Control of bone growth by epiphyseal stapling; a preliminary report. *J Bone Joint Surg Am*. Juli 1949;31A(3):464–78.
54. Dabash S, Prabhakar G, Potter E, Thabet AM, Abdelgawad A, Heinrich S. Management of growth arrest: Current practice and future directions. *J Clin Orthop Trauma*. März 2018;9:S58–66.
55. Langenskiöld A, Salenius P. Epiphysodesis of the Greater Trochanter. *Acta Orthop Scand*. Januar 1967;38(1–4):199–219.
56. Akpınar E, Ozyalvac O, Bayhan I, Beng K, Kocabiyik A, Yagmurlu M. Greater trochanter apophysiodesis in Legg–Calve–Perthes disease: Which implant to choose? *Indian J Orthop*. 2019;53(4):548.
57. d'Heurle A, McCarthy J, Klimaski D, Stringer K. Proximal Femoral Growth Modification: Effect of Screw, Plate, and Drill on Asymmetric Growth of the Hip. *J Pediatr Orthop*. Februar 2018;38(2):100–4.
58. Burghardt RD, Herzenberg JE, Standard SC, Paley D. Temporary hemiepiphysal arrest using a screw and plate device to treat knee and ankle deformities in children: a preliminary report. *J Child Orthop*. 1. Juni 2008;2(3):187–97.
59. Edgren W. Coxa plana. A clinical and radiological investigation with particular reference to the importance of the metaphyseal changes for the final shape of the proximal part of the femur. *Acta Orthop Scand Suppl*. 1965;Suppl 84:1-129.

60. Omeroğlu H, Uçar DH, Tümer Y. A new measurement method for the radiographic assessment of the proximal femur: the center-trochanter distance. *Acta Orthop Traumatol Turc.* 2004;38(4):261–4.
61. Waldt S, Woertler K, Herausgeber. *Measurements and Classifications in Musculoskeletal Radiology.* Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2014: S.11.
62. Karimi D, Kallemose T, Troelsen A, Klit J. Hip malformation is a very common finding in young patients scheduled for total hip arthroplasty. *Arch Orthop Trauma Surg.* April 2018;138(4):581–9.
63. Westhoff B, Martiny F, Krauspe R. Aktuelle Behandlungsstrategie des Morbus Perthes. *Orthop.* Dezember 2013;42(12):1008–17.
64. Doudoulakis JK. Trochanteric advancement for premature arrest of the femoral-head growth plate: 6-year review of 30 hips. *Acta Orthop Scand.* Januar 1991;62(2):92–4.
65. Garrido IM, Moltó FJL, Lluch DB. Distal transfer of the greater trochanter in acquired coxa vara. Clinical and radiographic results. *J Pediatr Orthop Part B.* Januar 2003;12(1):38–43.
66. Hasler CC, Morscher EW. Femoral Neck Lengthening Osteotomy After Growth Disturbance of the Proximal Femur: *J Pediatr Orthop B.* Oktober 1999;8(4):271–5.
67. Akgul T, Şen C, Balci HI, Polat G. Double Intertrochanteric Osteotomy for Trochanteric Overgrowth and a Short Femoral Neck in Adolescents. *J Orthop Surg.* Dezember 2016;24(3):387–91.
68. Stevens PM, Coleman SS. Coxa breva: its pathogenesis and a rationale for its management. *J Pediatr Orthop.* Oktober 1985;5(5):515–21.
69. McCarthy JJ, Weiner DS. Greater trochanteric epiphysiodesis. *Int Orthop.* August 2008;32(4):531–4.
70. Kitoh H, Kaneko H, Mishima K, Matsushita M, Ishiguro N. Prognostic factors for trochanteric overgrowth after containment treatment in Legg–Calvé–Perthes disease. *J Pediatr Orthop B.* September 2013;22(5):432–6.
71. Joseph B, Varghese G, Mulpuri K, Rao K. L. N, Nair NS. Natural Evolution of Perthes Disease: A Study of 610 Children Under 12 Years of Age at Disease Onset: *J Pediatr Orthop.* September 2003;23(5):590–600.
72. Van Tongel A, Fabry G. Epiphysiodesis of the greater trochanter in Legg-Calvé-Perthes disease: The importance of timing. *Acta Orthop Belg.* Juni 2006;72(3):309–13.
73. Gur V, Yapici F, Albayrak K. The Effect of Trochanteric Epiphysiodesis in Patients Who Underwent Tönnis Triple Innominate Osteotomy for Legg-Calve-Perthes Disease. *Arch Basic Clin Res.* 1. Februar 2021;3(1):6–11.

74. Mose K. Methods of measuring in Legg-Calvé-Perthes disease with special regard to the prognosis. Clin Orthop. August 1980;(150):103–9.
75. Kim SS, Kim HJ, Jung SY, Im CS, Kim DR. The Effect of Screw Apophysiodesis of Greater Trochanter in Legg-Calve-Perthes Disease. J Korean Orthop Assoc. 2018;53(1):29.
76. Gage JR, Cary JM. The effects of trochanteric epiphyseodesis on growth of the proximal end of the femur following necrosis of the capital femoral epiphysis.: J Bone Jt Surg. Juli 1980;62(5):785–94.
77. Cech D, Martin S. Functional movement development across the life span. 3rd ed. St. Louis, Mo: Elsevier; 2012. 370 S.
78. Mora S, Gilsanz V. Pubertal Growth of the Male Skeleton. In: Osteoporosis in Men. Elsevier; 2010: S. 95–103.
79. Guille JT, Lipton GE, Szöke G, Bowen JR, Harcke HT, Glutting JJ. Legg-Calvé-Perthes Disease in Girls. A Comparison of the Results with Those Seen in Boys*: J Bone Jt Surg. September 1998;80(9):1256–63.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen Menschen meinen Dank aussprechen, die mich bei der Anfertigung und Bearbeitung meiner Dissertation unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr. med. Bettina Westhoff für die Bereitstellung des Themas, der hervorragenden Begleitung, der Anregungen und Korrekturen.

Außerdem möchte ich mich bei Herrn PD Dr. med. Bernd Bittersohl bedanken, der mich stets auf meinem Weg mit Rat und Tat begleitet hat und meinen beruflichen Werdegang positiv geprägt hat.

Die statistische Auswertung erfolgte mit freundlicher Unterstützung von Lars Winkler, M. Sc. Mathematik, nach Beratung durch Julia Camilleri des statistischen Beratungsbüros des Institutes für systemische Neurowissenschaften der Heinrich-Heine-Universität.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei den Menschen bedanken, die stets für mich da waren und mich ermutigt haben: meine bessere Hälfte, meine Schwester, mein Schwager und meine Freunde.