

Aus dem Zentrum für Muskuloskeletale Chirurgie
Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

Einfluss der Beckenkipfung auf die funktionelle acetabuläre Orientierung

zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor medicinae (Dr. med.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

Von

Sarah Grotjohann
aus Rostock

Datum der Promotion: 25.06.2017

Zusammenfassung

Einleitung

Die Beckenkipfung beeinflusst die azetabuläre Orientierung (AO). Die azetabuläre Anteversion (AA) und Inklination (AI) definieren die anatomische azetabuläre Orientierung. Die Beckenkipfung bestimmt durch eine räumliche Lageänderung die funktionelle Orientierung des Azetabulums. Mittels der vorderen Beckenebene kann die anatomische AO definiert werden. In Bezug zur Ebene des Operationstisches oder schnittbildgebender Untersuchungen kann die funktionelle AO im Raum bestimmt werden.

Diese Arbeit analysiert, inwiefern die Beckenkipfung einen Einfluss auf die funktionelle Pfannenorientierung hat. Des Weiteren wurde überprüft, ob die jeweilig gemessene Anteversion/ Inklination äquivalente Informationen für eine korrekte azetabuläre Orientierung liefern.

Material/ Methodik

Die Auswertung beruhte auf einer CT – basierten, dreidimensionalen Rekonstruktion knöcherner Beckenoberflächen von 138 Patienten in Rückenlage. Die APP wurde durch die ventralsten Punkte der beiden Spinae illiacae anteriores superiores sowie der Tuberculae pubicae festgelegt. Der Winkel zwischen der APP und der Frontalebene bestimmte die Beckenkipfung.

Ergebnisse

Die mittlere Beckenkipfung betrug $-0,1^\circ \pm 5,5^\circ$. Eine physiologische Beckenkipfung lag bei 79% der untersuchten Individuen vor. Die relativ zur APP gemessene AA betrug $18,3^\circ \pm 4,5^\circ$ und $18,5^\circ \pm 4,6^\circ$ relativ zur Tischebene. Die AI lag bei $46,9^\circ \pm 3,7^\circ$ für beide Referenzebenen. Eine positive Korrelation ließ sich zwischen Beckenkipfung und der AA, welche in Bezug zur APP gemessen wurde, feststellen (Gesamtkollektiv: $p < 0,01$, $r = 0,497$, $R^2 = 0,320$). Zwischen der AA, welche relativ zur Tischebene gemessen wurde, und der Beckenkipfung zeigte sich eine negative Korrelation (Gesamtkollektiv: $p < 0,01$, $r = -0,366$, $R^2 = 0,117$). Insgesamt wiesen 21% des Kollektivs eine erhöhte anteriore bzw. posteriore Beckenkipfung von $8,5^\circ \pm 1,8^\circ$ bzw. $-10,3^\circ \pm 4,5^\circ$ auf. Diese

Zusammenfassung

Personen zeigten eine signifikante Differenz der jeweiligen AA von $8,3^\circ \pm 3,1^\circ$ (Frauen) und $7,7^\circ \pm 3,6^\circ$ (Männer) bei erhöhter posteriorer Beckenkipfung sowie von $6,2^\circ \pm 1,0^\circ$ (Frauen) und $5,4^\circ \pm 2,0^\circ$ (Männer) bei erhöhter anteriorer Beckenkipfung. AI zeigte geringere Differenzen von durchschnittlich $2,2^\circ \pm 0,8^\circ$ bei gesteigerter Beckenkipfung.

Diskussion

Die Beckenkipfung hatte einen kompensatorischen Effekt auf die azetabuläre Orientierung. Bei erhöhter anatomischer Anteversion reduzierte die gleichzeitige vordere Beckenkipfung die funktionelle AA. Umgekehrtes galt für die verminderte anatomische Anteversion, bei welcher die beobachtete vermehrte hintere Beckenkipfung die funktionelle AA vergrößerte/ normalisierte. Während die APP die Beckenkipfung indirekt berücksichtigt, wurde sie durch die Tischebene nicht beachtet. Bei Individuen mit physiologischer Beckenkipfung können beide Referenzebenen für eine korrekte AO verwendet werden. Bei Individuen mit erhöhter Beckenkipfung stellt die Tischebene keine zuverlässige Referenzebene für die Bestimmung der anatomischen AO dar.

Schlussfolgerung

Die Arbeit zeigt, dass die anatomische Anteversion die Beckenkipfung beeinflusst und dass die funktionelle azetabuläre Orientierung von der Beckenkipfung abhängt. Die Bestimmung der Beckenkipfung sollte für eine korrekte azetabuläre Orientierung erfolgen.

Zusammenfassung

Introduction

Pelvic tilt influences acetabular orientation (AO). Anteversion (AA) and inclination (AI) define anatomical acetabular orientation. Pelvic tilt determines functional acetabular orientation because of its spatial relocation. Anterior pelvic plane is used for calculation of anatomical AO, whereas functional AO is defined by the table plane of operating table or medical imaging.

The following analysis shows, if there is an influence of pelvic tilt on functional AO. Secondary was verified, if anteversion and inclination give equivalent information for correct AO.

Material and methods

Computed tomography – based three dimensional reconstruction of bony pelvic structures provided the basis of the following analysis. 138 pelvises were determined with the patients supine. APP was distinguished by the most ventral points of the right and left Spina iliaca anterior superior and both pubic tubercles, while the angle between APP and coronal plane defined pelvic tilt.

Results

Pelvic tilt supine amounted to $-0,1^{\circ} \pm 5,5^{\circ}$. 79% of the collective showed a physiological pelvic tilt. AA amounted to $18,3^{\circ} \pm 4,5^{\circ}$ relative to APP and $18,5^{\circ} \pm 4,6^{\circ}$ relative to table plane. AI was $46,9^{\circ} \pm 3,7^{\circ}$ for both reference planes. AA and pelvic tilt correlated positive relative to APP (all: $p < 0,01$, $r = 0,497$, $R^2 = 0,320$) and negative relative to table plane (all: $p < 0,01$, $r = -0,366$, $R^2 = 0,117$). 29 persons showed increased posterior or anterior pelvic tilt of $-10,3^{\circ} \pm 4,5^{\circ}$ respectively $8,5^{\circ} \pm 1,8^{\circ}$. These individuals showed a difference of AA between both reference planes. AA differed from $8,3^{\circ} \pm 3,1^{\circ}$ (females) and $7,7^{\circ} \pm 3,6^{\circ}$ (males) with extensive posterior tilt and from $6,2^{\circ} \pm 1,0^{\circ}$ (females) and $5,4^{\circ} \pm 2,0^{\circ}$ (males) with extensive anterior tilt. AI showed less marked differences of $2,2^{\circ} \pm 0,8^{\circ}$ for extensive pelvic tilt.

Discussion

Pelvic tilt compensated for increased AO. Individuals with high anatomical AA showed high pelvic tilt, which reduced functional AA. Conversely individuals with low anatomical AA had low pelvic tilt and therefore enlarged functional AA. Pelvic tilt is considered by

Zusammenfassung

APP, but it is not by table plane. Hence in individuals with physiological pelvic tilt both reference planes can be used for correct AO. By contrast table plane is no reliable reference plane for correct anatomical AO in individuals with extensive pelvic tilt.

Conclusion

Anatomical anteversion influences pelvic tilt. Pelvic tilt has a compensating influence on functional acetabular orientation. In conclusion results of this study serve to further understand the functional anatomy of the acetabulum and demonstrate the importance of pelvic tilt for correct AO.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Inhaltsverzeichnis	7
Abbildungsverzeichnis.....	10
Tabellenverzeichnis.....	11
Abkürzungsverzeichnis.....	13
1 Einleitung	14
1.1 Orientierung des Beckens und des Azetabulums.....	14
1.1.1 Entwicklung des pelvinen Sagittalprofils	14
1.1.2 Reifung des Azetabulums	15
1.1.3 Anatomie und Artikulation im Erwachsenenalter.....	16
1.2 Einfluss von Reifungsverzögerung und Pathologien im Wachstumsalter auf die räumliche Orientierung des Azetabulums.....	18
1.2.1 Azetabulum: Hüftdysplasie	18
1.2.2 Coxales Femur: Epiphyseolysis Capitis femoris	19
1.3 Beckenkippung.....	19
1.3.1 Determinanten der Beckenkippung im Erwachsenenalter	20
1.3.1.1 BMI und Körpergröße.....	20
1.3.1.2 Körperhaltung und Exposition	20
1.3.1.3 Lendenlordose und Beckenkippung	21
1.4 Korrektur einer pathologischen azetabulären Orientierung und Hüftendoprothetik.....	22
1.4.1 Die pathologisch erhöhte Anteversion	22
1.4.2 Die pathologische Retroversion	22
1.4.3 Die Hüftendoprothetik	23
1.5 Referenzebenen für die azetabuläre Orientierung.....	25
1.5.1 Konventionelle Hüftchirurgie	25

Inhaltsverzeichnis

1.5.2	Navigierte Hüftendoprothetik	26
1.5.3	Einfluss der Beckenkipfung auf die azetabuläre Re – Orientierung bei der Hüftendoprothetik.....	27
1.6	Aufgabenstellung und Hypothese.....	29
2	Material und Methodik.....	30
2.1	Patientenkollektiv.....	30
2.2	Computertomographische Aufnahmetechnik.....	30
2.3	Extraktion der anatomischen Markierungspunkte.....	31
2.4	Markierungspunkte	31
2.4.1	Azetabulum/ Pfanneneingangsebene	31
2.4.2	Vordere Beckenebene	32
2.5	Beckenkipfung.....	34
2.6	Statistische Auswertung	35
3	Ergebnisse	37
3.1	Anatomische azetabuläre Orientierung	37
3.2	Funktionelle azetabuläre Orientierung.....	38
3.3	Beckenkipfung.....	38
3.4	Einfluss der Beckenkipfung auf die Orientierung des Azetabulums	40
3.4.1	Korrelation zwischen anatomischer Anteversion und Beckenkipfung	40
3.4.2	Beckenkipfung bei erhöhter/ erniedrigter anatomischer Anteversion	41
3.4.3	Korrelation zwischen funktioneller Anteversion und Beckenkipfung	43
3.4.4	Beckenkipfung bei erhöhter/ erniedrigter funktioneller Anteversion	44
3.4.5	Korrelation zwischen anatomischer Inklination und Beckenkipfung	46
3.4.6	Korrelation zwischen funktioneller Inklination und Beckenkipfung	46
3.5	Zuverlässigkeit der Referenzebenen unter Berücksichtigung der Beckenkipfung.....	46
3.5.1	Azetabuläre Orientierung bei neutraler Beckenkipfung.....	46
3.5.2	Verstärkte anteriore bzw. posteriore Beckenkipfung.....	47

3.5.2.1	Anteversion bei erhöhter posteriorer Beckenkipfung.....	48
3.5.2.2	Anteversion bei erhöhter anteriorer Beckenkipfung.....	49
3.5.2.3	Inklination bei erhöhter posteriorer Beckenkipfung.....	51
3.5.2.4	Inklination bei erhöhter anteriorer Beckenkipfung	52
4	Diskussion.....	54
4.1	Zuverlässigkeit der verwendeten Methode.....	54
4.2	Azetabuläre Orientierung.....	54
4.3	Beckenkipfung.....	56
4.4	Einfluss der Beckenkipfung auf die Pfannenorientierung	58
4.4.1	Nichtparametrische Korrelationsanalyse.....	58
4.4.2	Kompensationsmechanismus	59
4.5	Zuverlässigkeit der Referenzebenen unter Berücksichtigung der Beckenkipfung.....	60
4.6	Funktioneller Aspekt	64
4.7	Klinische Relevanz	65
4.8	Limitationen	66
4.9	Schlussfolgerung.....	67
5	Literaturverzeichnis.....	69
6	Danksagung.....	81
7	Eidesstattliche Versicherung.....	82
8	Lebenslauf	83
9	Publikationsliste	86

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Charakterisierung sagittaler Beckenparameter mittels stehender, seitlicher Röntgenaufnahmen [3]14

Abbildung 2: Prozentuale Geschlechterverteilung des Kollektivs30

Abbildung 3: Markierung der APP und der Pfanneneingangsebene am Modell33

Abbildung 4: Beckenkipfung im Sagittalprofil.....34

Abbildung 5: Korrelation der anatomischen azetabulären Anteversion und der Beckenkipfung, A (Gesamtkollektiv), B (Frauen), C (Männer).....41

Abbildung 6: Erhöhte bzw. erniedrigte anatomische Anteversion und Beckenkipfung .43

Abbildung 7: Korrelation der funktionellen azetabulären Anteversion und der Beckenkipfung, Gesamtkollektiv.....44

Abbildung 8: Erhöhte bzw. erniedrigte funktionelle Anteversion und Beckenkipfung, Kastendiagramm, Gesamtkollektiv45

Abbildung 9: Einfluss der Beckenkipfung auf die anatomische (grau) und funktionelle (weiß) Anteversion, Gesamtkollektiv (A), Frauen (B), Männer (C).....62

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Lageabhängige Dynamik der Beckenkipfung.....21

Tabelle 2: Sichere Zone25

Tabelle 3: Malpositionierung der Pfanne bei konventioneller Hüftchirurgie unter Berücksichtigung der Patientenlagerung.....26

Tabelle 4: Änderung der azetabulären Orientierung unter dem Einfluss der Beckenkipfung.....28

Tabelle 5: Markierungspunkte des Azetabulums32

Tabelle 6: Markierungspunkte der vorderen Beckenebene32

Tabelle 7: Anatomische azetabuläre Orientierung.....37

Tabelle 8: Funktionelle azetabuläre Orientierung38

Tabelle 9: Erhobene Werte der Beckenkipfung39

Tabelle 10: Parameter der übermäßig anterioren bzw. posterioren Beckenkipfung40

Tabelle 11: Korrelation zwischen der anatomischen azetabulären Anteversion und der Beckenkipfung.....41

Tabelle 12: Beckenkipfung bei erhöhter/ erniedrigter anatomischer Anteversion.....42

Tabelle 13: Korrelation zwischen der funktionellen azetabulären Anteversion und der Beckenkipfung.....44

Tabelle 14: Beckenkipfung bei erhöhter/ erniedrigter funktioneller Anteversion45

Tabelle 15: Anatomische und funktionelle Orientierung bei physiologischer Beckenkipfung.....47

Tabelle 16: Anatomische und funktionelle Anteversion bei erhöhter posteriorer Beckenkipfung.....49

Tabelle 17: Anatomische und funktionelle Anteversion bei erhöhter anteriorer Beckenkipfung.....50

Tabelle 18: Anatomische und funktionelle Inklination bei erhöhter posteriorer Beckenkipfung.....52

Tabelle 19: Anatomische und funktionelle Inklination bei erhöhter anteriorer Beckenkipfung.....53

Tabellenverzeichnis

Tabelle 20: Werte der Anteversion im Literaturvergleich	55
Tabelle 21: Werte der Inklination im Literaturvergleich	56

Abkürzungsverzeichnis

AA	azetabuläre Anteversion
AI	azetabuläre Inklination
AO	azetabuläre Orientierung
a. – p.	anteroposterior
APP	anterior pelvic plane, vordere Beckenebene
BMI	Body Mass Index
CCD – Winkel	Centrum – Collum – Diaphysen - Winkel
CT	Computertomographie
FAI	femoroazetabuläres Impingement
kV	Kilovolt
mA	Milliampere
max	maximal
min	minimal
mm	Millimeter
MRT	Magnetresonanztomographie
ms	Millisekunde
n	Anzahl
p	Irrtumswahrscheinlichkeit
r	Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman
ROM	range of motion
R ²	Bestimmtheitsmaß
SD	Standardabweichung (<i>engl.</i> : standard deviation)
TEP	Totalendoprothese
THA	total hip arthroplasty

1 Einleitung

1.1 Orientierung des Beckens und des Azetabulums

1.1.1 Entwicklung des pelvinen Sagittalprofils

Die Beckenmorphologie des Stehenden wird durch verschiedene Parameter, wie z. B. die Beckenkipfung (*engl.*: pelvic tilt) beschrieben. Die Parameter weisen eine Spezifität für jedes Individuum sowie eine Unabhängigkeit von der dreidimensionalen Orientierung des Beckens auf.

Die Definition des pelvisakralen Winkels im Jahr 1985 machte eine anfängliche Beurteilung des sagittalen Beckenprofils möglich. Gebildet wird dieser Winkel durch eine Tangente des Kreuzbeinplateaus und einer Geraden zwischen dem Hüftgelenkszentrum und dem Mittelpunkt des Kreuzbeinplateaus (Abbildung 1) [1].

Die 1992 von Duval – Beaupère et al. beschriebene „pelvic incidence“ meinte den Winkel zwischen der Senkrechten, die durch den Mittelpunkt der Deckplatte des Wirbelkörpers S1 verläuft und der Geraden zwischen dem Hüftgelenkszentrum und dem Mittelpunkt des Kreuzbeinplateaus. Die Pelvic incidence und der pelvisakarale Winkel bilden demnach einen Komplementärwinkel (Abbildung 1) [2].

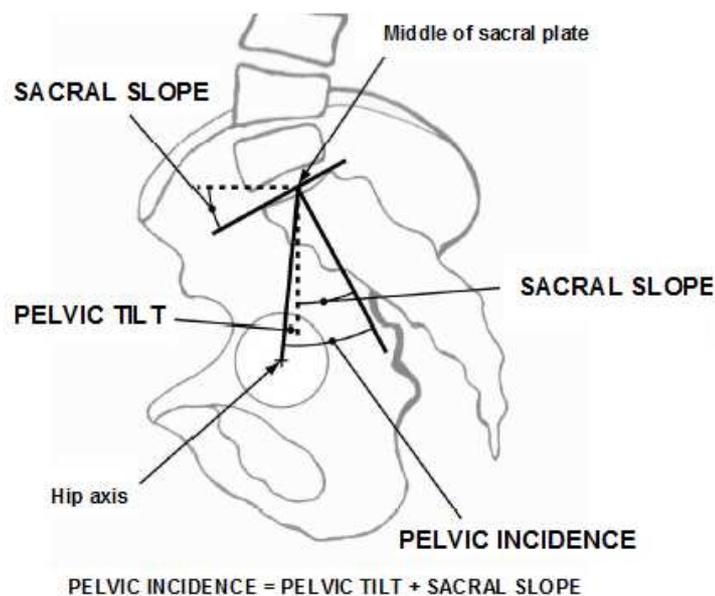


Abbildung 1: Charakterisierung sagittaler Beckenparameter mittels stehender, seitlicher Röntgenaufnahmen [3]

Einleitung

Jackson et al. formulierten im Jahr 2000 den pelvinen Lordosewinkel, welcher aus der Tangente der S1 – Wirbelkörperdeckplatte und der Geraden zwischen dem Hüftkopfzentrum und der Hinterkante des Kreuzbeinplateaus gebildet wird [4]. Im direkten Vergleich erwiesen sich alle drei Methoden als ähnlich reliabel [5].

Die pelvic incidence des Erwachsenen zeichnet sich durch eine relative Konstanz aus [6, 7]. Bezüglich des Verhaltens der pelvic incidence im Kinder – und Jugendalter wurden verschiedene Ergebnisse eruiert. Die vorhandenen Studien weisen jeweils eine geringe Stichprobe auf. So zeigten Descamps et al. eine relative Stabilität der pelvic incidence bei Kindern unter 10 Jahren sowie einen signifikanten Anstieg im Jugendalter mit maximalen Werten im Erwachsenenalter [8]. Hingegen stellten Mangione et al. fest, dass die pelvic incidence gerade im Kindesalter einen starken Anstieg aufweist, während sie ab dem 10. Lebensjahr nahezu konstant bleibt [9].

Mac – Thiong et al. untersuchten 180 gesunde Kinder und Adoleszenten im Alter zwischen 4 und 18 Jahren, dies stellt die bis dato größte Studie zu dieser Thematik dar. Es zeigte sich ein kontinuierlicher, linearer Anstieg der pelvic incidence mit dem Alter. Während Erwachsene eine pelvic incidence von durchschnittlich $55,4^\circ$ aufweisen, beträgt sie bei Kindern und Adoleszenten $48,4^\circ$ [3].

Geometrisch gesehen (Abbildung 1) entspricht die pelvic incidence der Summe aus der Beckenkipfung und der sakralen Neigung (*engl.*: sacral slope). Durch die Kippung des Beckens wird das Kreuzbeinplateau hinter den Hüftgelenkszentren und entsprechend der Hüftachse gehalten. Folglich reguliert sie die Ausrichtung des Körperschwerpunktes über der Hüfte und der unteren Extremität [10]. Die sakrale Neigung erhöht sich mit dem Beginn des aufrechten Ganges, in dem sich das Kreuzbeinplateau zunehmend nach vertikal ausrichtet. Es bleibt durch zunehmendes Alter unbeeinflusst und stabil nach Erlernen des Gehens [3].

1.1.2 Reifung des Azetabulums

Os pubis, Os ilium und Os ischii bilden gemeinsam die knöchernen Bestandteile des Os coxae und treffen mit anteilig einem Fünftel des Os pubis und jeweils zwei Fünfteln des Os ilium und Os ischii in einer Y – förmigen Wachstumsfuge des im lateralen Beckenbereich gelegenen Azetabulums aufeinander [11, 12].

Einleitung

Die Entwicklung des Azetabulums erfolgt in verschiedenen Phasen und weist eine Geschlechterdifferenz auf. So ist die Wachstumsgeschwindigkeit von Os pubis und Os ischii zunächst gleich schnell. Vor Abschluss der Wachstumsphase steigt die Wachstumsgeschwindigkeit des Os pubis, so dass die Beckenlänge im Vergleich zu der Sitzbeinlänge zunimmt und der ischiopuberale Index sich vergrößert [13]. Insgesamt überwiegt das vertikale Wachstum das horizontale Wachstum aller drei Anteile des Os coxae, wobei das vertikale Wachstum des Os ischii am stärksten ausgeprägt ist [14].

Der synostotische Verschluss der azetabulären Wachstumsfuge erfolgt zwischen dem 11. und 13. Lebensjahr. Dabei besteht eine zeitlich frühere Ausreifung der Fuge für das weibliche Geschlecht [15, 16]. Im Alter von 10 Jahren erreicht das weibliche Geschlecht den abschließenden Wachstumsschub, während dieser beim männlichen Geschlecht im Alter von 14 Jahren auftritt. Die Reifung des Azetabulums ist bei den Frauen mit etwa 13 Jahren und bei den Männern mit 16 Jahren abgeschlossen [17, 18].

1.1.3 Anatomie und Artikulation im Erwachsenenalter

Das Hüftgelenk bietet in seiner strukturellen Beschaffenheit ein Höchstmaß an Stabilität und Beweglichkeit, infolge dessen eine Kraftübertragung zwischen Rumpf und unterer Extremität sowie die Ausführung statischer und lokomotorischer Bewegungsabläufe gewährleistet wird [19].

Bestehend aus Femurkopf und Azetabulum [20], stellt es das größte Kugelgelenk des Menschen dar [11]. Aufgrund der Morphologie der beiden artikulierenden Strukturen, in dem das Azetabulum den Femurkopf über dessen Äquator hinaus umschließt, bildet das Hüftgelenk eine Sonderform des Kugelgelenkes, das sogenannte Nussgelenk [12]. Diese Art des Gelenkes ermöglicht eine Bewegung entlang aller drei Hauptbewegungsachsen und ist folglich durch eine ausgeprägte Beweglichkeit gekennzeichnet [19]. Der maximale Bewegungsumfang für das Hüftgelenk (*engl.*: range of motion, ROM), ist durch eine Flexion – Extensionsspanne von 140° bis 160°, einem Adduktion – Abduktionsbereich von 65° bis 80° und einem Rotationsausmaß von 70° bis 95° charakterisiert [12, 20, 21].

Auf dem knöchernen und distal durch die Incisura acetabuli unterbrochenem Pfannenrand des Azetabulums, dem Limbus acetabuli, ist das Labrum acetabuli als eine Gelenkklippe aus Faserknorpel und straffem Bindegewebe angelagert [11, 12]. Die

Einleitung

aus hyalinem Knorpel bestehende azetabuläre Gelenkfläche bildet die halbmondförmige Facies lunata, der sich die mit Fett – und lockerem Bindegewebe gefüllte Fossa acetabuli anschließt [12, 22]. Während das im Bereich der Incisura acetabuli verlaufende Ligamentum transversum acetabuli der Vervollständigung des Labrums acetabuli dient, führt das Ligamentum capitis femoris die aus der Arteria obturatoria stammende Arteria ligamentum capitis femoris zur Versorgung des Femurkopfes [12]. Die aus der Arteria femoralis entspringende Arteria circumflexa femoris medialis versorgt über die Äste der Arteriae retinaculae superiores vor allem die epiphysären Anteile des Femurkopfes, während die Arteriae retinaculae inferiores aus der Arteria circumflexa femoris lateralis überwiegend der metaphysären Ernährung dienen. Mit zunehmendem Alter obliterieren die Gefäße [23].

Der Femurkopf stellt den proximalen Anteil des Femurs dar. Er ist eine zu zwei Dritteln mit hyalinem Knorpel bedeckte Kugel, die als artikulierende Gelenkfläche funktioniert [11, 20]. Der Schenkelhals und die Hauptachse des femoralen Schaftes bilden einen Winkel in der Frontalebene, der als Centrum – Collum – Diaphysen – Winkel (*kurz*: CCD – Winkel) bezeichnet wird und beim Erwachsenen physiologisch 125° beträgt [11, 12, 20]. Der aus der Collum – und Kondylenachse gebildete Antetorsionswinkel weist physiologische Werte zwischen 12° und 15° auf [11, 12, 20].

Mit einer Zugfestigkeit von über 350 kg stellt das Ligamentum iliofemorale das stärkste Band des Hüftgelenkes dar und gilt aufgrund der Verringerung einer übermäßigen Oberschenkelexension mit Verhinderung einer Dorsalkippung des Beckens sowie der hemmenden Wirkung auf die Adduktion des gestreckten Beines, als der wesentlichste Faktor für die Sicherung der statischen Funktion des Hüftgelenkes im Stand [12, 19]. Gemeinsam mit dem Ligamentum pubofemorale und dem Ligamentum ischiofemorale entsteht ein ringförmiger Bandapparat um die artikulierenden Strukturen des Hüftgelenkes, der bei Extension eine Verschraubung der Bänder und eine Annäherung von Azetabulum und Femurkopf mit luxationsvermeidender Stabilisierung des Gelenkes verursacht [20]. Eine Erschlaffung der Bänder bei Flexion hingegen erhöht die Beweglichkeit im Gelenk [12].

Die kräftig entwickelten Muskelgruppen, zu denen neben der inneren und äußeren Hüftmuskulatur, die Muskeln der Adduktoren -, Extensoren – und Flexorengruppe

Einleitung

gezählt werden, ermöglichen eine ausreichende Stabilisierung des Hüftgelenkes entlang der Bewegungsachsen [11].

1.2 Einfluss von Reifungsverzögerung und Pathologien im Wachstumsalter auf die räumliche Orientierung des Azetabulums

1.2.1 Azetabulum: Hüftdysplasie

Die Hüftgelenksdysplasie ist gekennzeichnet durch ein abgeflachtes, steil angelegtes Azetabulum mit entsprechend unzureichender Überdachung des Femurkopfes. Bedingt durch die erhöhte mechanische Belastung der azetabulären Strukturen [24, 25], zählt die Hüftgelenksdysplasie zu den ätiologischen Faktoren (25 bis 43%) einer sekundären Koxarthrose [24, 26, 27].

Für die Ausbildung einer Hüftgelenksdysplasie wird ein multifaktorielles Geschehen angenommen, dessen Genese durch genetische, endemische und intrauterin lagebedingte Faktoren wie z. B. einer Beckenendlage prädisponiert wird [21, 28-32]. Des Weiteren besteht eine deutliche Assoziation zum weiblichen Geschlecht [30-33]. Eine genetische Komponente konnte ebenfalls nachgewiesen werden [15].

Fujii et al. untersuchten „acetabular tilt“ an 40 Personen mit bekannter Hüftdysplasie. Acetabular tilt entspricht dabei dem Winkel zwischen der Geraden entlang der Incisura acetabuli und dem Hüftkopfbereich sowie der Geraden zwischen der Spina iliaca anterior superior und dem Tuberculum pubicum. Bei den meisten Patienten mit einer Hüftdysplasie war acetabular tilt erhöht, d. h. das Azetabulum vermehrt nach hinten rotiert. Dabei wurde eine gleichzeitige Erhöhung der azetabulären Anteversion sowie Verminderung der vorderen, femoralen Überdachung des Azetabulums detektiert [34].

Klinisch stellt sich die Dysplasie im Kindesalter durch eine verringerte Stabilität des Gelenkes mit Hypermobilität und einer erhöhten Luxationsgefahr dar [21, 26]. Des Weiteren wird häufig eine kompensatorische Hyperlordose zum Ausgleich des Kapsel – und Labrumschmerzes beobachtet [21]. Die Dysplasie des Adoleszenten – bzw. jungen Erwachsenen ist durch bewegungsabhängige Schmerzen im Bereich der Leiste gekennzeichnet [27].

1.2.2 Coxales Femur: Epiphyseolysis Capitis femoris

Die Epiphyseolysis capitis femoris meint die Lösung und Abkippung des Hüftkopfes vom Schenkelhals entlang der Wachstumsfuge. Epidemiologisch betrachtet, sind vor allem männliche Jugendliche um das 12. Lebensjahr betroffen [35]. Zugleich wurde ein häufigeres Auftreten bei Adipositas beobachtet [35, 36].

Monazzam et al. untersuchten CT – Datensätze von 23 Patienten mit nachgewiesener Epiphyseolysis capitis femoris und verglichen sie mit einer Kontrollgruppe von 67 gesunden Patienten. Sie stellten eine Retroversion des Azetabulums bei gleichzeitig erhöhter femoraler Überdachung fest [37]. Dies kann die Entstehung des sogenannten femoroazetabulären Impingements (FAI) begünstigen [38-40], welches als ein innerhalb der physiologischen range of motion auftretender pathologischer Kontakt zwischen Azetabulum und proximalem Femur definiert ist [19, 41].

Unterschieden werden zwei Arten des Impingements [19, 41-44]. Während vorwiegend junge Erwachsene männlichen Geschlechts von einem cam – Impingement, resultierend aus einer Offsetstörung, d.h. einer Störung des Femurkopf – Schenkelhalsüberganges mit fehlender Taillierung des Schenkelhalses betroffen sind [19, 24, 45], entsprechen typischerweise Frauen mittleren Alters dem Patientenkollektiv des pincer – Impingements [41]. Die azetabuläre Retroversion ist stark assoziiert mit dieser Art des Impingements und resultiert, wie zuvor beschrieben, in einer Zunahme der femoralen Überdachung durch das Azetabulum [24, 41, 46-48]. In bis zu 42 Prozent der Fälle liegt ein paralleles Auftreten beider Formen vor [42].

Bedingt durch die pathologische Anatomie treten unphysiologische Translations – und Kompressionskräfte auf, die eine mechanische Schädigung von Knorpel und Labrum acetabuli verursachen. Dementsprechend zählt das FAI zu den prädisponierenden Faktoren einer Koxarthrose [42-45, 49, 50].

1.3 Beckenkipfung

Der Winkel zwischen der vorderen Beckenebene (*engl.*: anterior pelvic plane, APP) und der Frontalebene definiert die Beckenkipfung, die der Rotation um die axiale Achse bzw. der Orientierung des Beckens in der sagittalen Ebene entspricht [51-56].

Einleitung

Bei paralleler Ausrichtung der APP und der Frontalebene beträgt die Beckenkipfung null Grad. Demgemäß entspricht ein negativer Winkel einer posterioren Beckenkipfung, d.h. einer Kippung des Beckens nach dorsal, umgekehrt wird eine anteriore Kippung des Beckens durch einen positiven Winkel dargestellt [53, 55-57].

1.3.1 Determinanten der Beckenkipfung im Erwachsenenalter

1.3.1.1 BMI und Körpergröße

Uysal et al. untersuchten anhand von 400 CT - Datensätzen, inwiefern die Körpergröße und der Body Mass Index (BMI) einen Einfluss auf die spinopelvinen Parameter wie z.B. die Beckenkipfung ausüben. Die Studie stellt die zurzeit größte zu diesem Thema publizierte Untersuchung dar.

Es konnte eine schwach positive Korrelation zwischen der Beckenkipfung und der Körpergröße dargestellt werden. Des Weiteren wurde eine ebenfalls schwach positive Korrelation zwischen der Beckenkipfung und der Masse des mesenterialen Fettgewebes detektiert [58].

1.3.1.2 Körperhaltung und Exposition

Die Analyse der Beckenkipfung war Gegenstand vieler Untersuchungen, innerhalb derer sich neben der ausgeprägten interindividuellen Schwankungsbreite bei gleichzeitiger individueller, relativ konstanter Determination, eine lageabhängige Dynamik sowie eine Altersabhängigkeit verzeichnen ließen.

Die Lageabhängigkeit äußert sich neben der interindividuellen Schwankungsbreite in einer relativen Zunahme der posterioren Beckenkipfung während des Wechsels der Körperposition aus der Rückenlage in eine sitzende bzw. stehende Haltung (Tabelle 1) [52, 59-62].

Tabelle 1: Lageabhängige Dynamik der Beckenkipfung

Autor	Publikationsjahr	Beckenkipfung in Rückenlage	Beckenkipfung im Stehen
Nishihara et al. [62]	2003	-37° bis 30°	-46° bis 33°
Lembeck et al. [60]	2005	-17° bis 3°	-27° bis 3°
DiGioia et al. [52]	2006	-22° bis 27°	-
Parratte et al. [63]	2007	-	-22° bis 14°
Babisch et al. [64]	2008	-3° bis 27°	-12° bis 23°
Blondel et al. [51]	2009	-	-6° bis 14°
Murphy et al. [61]	2013	-8° bis 21°	-13° bis 3°
Marrat et al. [53]	2014	-	-19° bis 17,9°
Grammatopoulos et al. [65]	2014	-50° bis 29°	-

(-) = nicht erhoben, negative Werte: posteriore Beckenkipfung, positive Werte: anteriore Beckenkipfung

Mit einer maximalen Differenz von weniger als zehn Grad zwischen liegender und stehender Körperposition, zeigt die Beckenkipfung eine relative, individuelle Konstanz [64, 66, 67].

1.3.1.3 Lendenlordose und Beckenkipfung

Der spinopelvine Komplex, gebildet aus Becken und Wirbelsäule, ermöglicht den aufrechten Gang des Menschen. Die anatomischen Strukturen untereinander stehen in einer funktionellen Balance, können sich wechselseitig beeinflussen und Veränderungen kompensieren [7].

Dementsprechend weisen Menschen mit zunehmendem Lebensalter, bedingt durch die Kompensation altersbedingter kyphotischer Deformitäten, eine Zunahme der posterioren Beckenkipfung auf [68, 69]. Mit Hilfe dieser Mechanismen gelingt eine Ausrichtung des Körperlotes.

Einleitung

Degenerationen des Hüftgelenkes wie primäre und sekundäre Arthrosen äußern sich symptomatisch durch eine progressive Bewegungseinschränkung mit konsekutiver Kontraktur der Flexoren und Adduktoren und in der Folge einer Zunahme der anterioren Beckenkipfung. Kompensatorisch weisen Patienten mit Hüftgelenksarthrose in frühen Stadien häufig eine beginnende lumbale Lordose mit einer Progredienz zur Hyperlordose in Spätstadien auf [21, 70].

1.4 Korrektur einer pathologischen azetabulären Orientierung und Hüftendoprothetik

1.4.1 Die pathologisch erhöhte Anteversion

Wie zuvor erwähnt, besteht bei der Hüft dysplasie eine verminderte vordere, femorale Überdachung bei gleichzeitig erhöhter azetabulärer Anteversion [34].

Die operative Korrektur gelingt zum einen durch Korrekturosteotomien des Beckens, z.B. durch die Azetabuloplastik nach Salter oder Pemberton sowie durch Beckenosteotomien wie der periazetabulären Osteotomien nach Ganz oder auch Tönnis. Zum anderen werden intertrochantäre Osteotomien des proximalen Femurs angewandt [71]. Aufgrund der verringerten femoralen Hüftkopfüberdachung bei pathologischer Anteversion ist eine anteriore Rotation des Azetabulums indiziert [34].

1.4.2 Die pathologische Retroversion

Die pathologische Retroversion kann mit dem Vorliegen eines anterioren pincer – Impingements assoziiert sein [41, 72].

Die operative Korrektur des übermäßig retrovertierten Azetabulums gelingt mittels einer periazetabulären Osteotomie oder auch durch eine Reduktion der anterioren Azetabulumwand, die eine Zunahme der azetabulären Anteversion mit Verringerung des pathologischen Kontaktes zwischen proximalem Femur und Azetabulum ermöglicht [24].

Siebenrock et al. untersuchten retrospektiv 22 Patienten mit symptomatischer Retroversion. Alle Patienten erhielten zehn Jahre zuvor eine periazetabuläre Osteotomie mit antevertierter Ausrichtung des Azetabulums. Es zeigte sich ein positives Langzeitergebnis der Methode [72].

1.4.3 Die Hüftendoprothetik

Die Implantation eines alloarthroplastischen Hüftgelenksersatzes ist eine der erfolgreichsten orthopädischen Operationen [55, 73]. Jährlich werden in Deutschland etwa 210 000 Primärimplantationen durchgeführt. Bei ungefähr 36 000 Patienten ist aufgrund von Komplikationen, aseptischen Lockerungen und/ oder Verschleißerscheinungen ein Revisionseingriff erforderlich, der einen kompletten oder teilweisen Prothesenaustausch impliziert [74].

Primäre und sekundäre Koxarthrosen, fortgeschrittene Hüftkopfnekrosen, Schenkelhalsfrakturen nach Versagen einer osteosynthetischen Primärtherapie, operable Tumore und proximale Femurmetastasen stellen Indikationen für einen endoprothetischen Hüftgelenkersatz dar [75].

Der Einfluss hüftchirurgischer Eingriffe auf die Beckenkipfung war Gegenstand verschiedener Studien.

Paratte et al. untersuchten die prä - und postoperative Beckenkipfung von 21 Patienten, die eine unilaterale Totalendoprothese des Hüftgelenkes (Hüft – TEP) erhielten. Es ließ sich eine Abnahme der Beckenkipfung von präoperativ $13,9 \pm 4,8^\circ$ auf $10,5 \pm 5,5^\circ$ ein Jahr nach der Operation detektieren. Etwa 31% des Patientenkollektivs zeigten eine Abnahme der Beckenkipfung von mehr als 5% innerhalb des ersten postoperativen Jahres [76].

In einer weiteren Studie von Lee et al. erfolgte die postoperative Analyse der Beckenparameter von 29 Patienten jeweils nach sechs bis acht Wochen sowie einem und zwei Jahren. Während die präoperative Beckenkipfung $31,9^\circ$ betrug, ließ sich direkt postoperativ zunächst eine Abnahme der Beckenkipfung bis auf $13,9^\circ$ verzeichnen. Im weiteren Verlauf wurde ein Anstieg der Beckenkipfung vermerkt, der mit einer durchschnittlichen Kippung von $19,8^\circ$ weiterhin unterhalb der präoperativen Beckenkipfung lag [77].

Andere Studien konnten keine signifikanten Veränderungen der individuell determinierten Beckenkipfung im Vergleich zu präoperativen Werten zeigen [51, 52, 62, 64].

Einleitung

Die aseptische Lockerung aufgrund osteolytischer Prozesse stellt die häufigste Komplikation nach Implantation eines künstlichen Hüftgelenkersatzes dar, gefolgt von der Prothesenluxation [75]. Des Weiteren können neben der periprothetischen Infektion, das Impingementsyndrom und der erhöhte Abrieb der Prothese auftreten [55, 73, 78-80].

Die Prothesenluxation stellt mit einer Inzidenzrate von 0,3 bis 10 Prozent nach Primärimplantation und 10 bis 28 Prozent nach Revisionseingriffen, eine der häufigsten Komplikationen endoprothetischer Eingriffe des Hüftgelenkes dar [55, 81-83]. Luxierende Ereignisse während der ersten drei postoperativen Monate, sogenannte Frühluxationen, treten mit einer Wahrscheinlichkeit von bis zu 50 Prozent auf und sind im Vergleich zu späteren Luxationsereignissen durch ein geringeres Rezidivrisiko nach Revisionsendoprothetik gekennzeichnet [83, 84]. Insgesamt ereignen sich 75 Prozent der Prothesenluxationen innerhalb des ersten postoperativen Jahres [83].

Assoziiert ist die Prothesenluxation mit patienten-, indikations- und operationsspezifischen Risikofaktoren [83]. Kriterien wie die Pfannenorientierung, das Prothesendesign und der chirurgische Zugangsweg mit konsekutiver Weichteilschädigung sind operationsabhängig [83, 85]. So stellt der dorsale Zugangsweg eine Maximierung des Dislokationsrisikos dar [81, 86]. Eine der am häufigsten beobachteten Ursache für eine Luxation der Prothese liegt jedoch in der inakkuraten Orientierung des Azetabulums [81, 84, 85, 87, 88]. Die azetabuläre Orientierung beeinflusst die range of motion des Hüftgelenkes und kann zur Bildung eines Impingements führen, was wiederum die Luxation des Gelenkes begünstigt und den Abrieb der Prothese verstärkt. Das weibliche Geschlecht, die unzuverlässige Compliance sowie das zunehmende Lebensalter gehören zu den patientenspezifischen Faktoren in einer erhöhten Luxationsrate [81, 83, 85, 86, 89], während bestehende Pathologien des Hüftgelenkes z.B. Hüftgelenkdysplasien oder fulminant progrediente Arthritiden sowie Revisionsoperationen zu den indikationsspezifischen Risikofaktoren gezählt werden [83, 85].

Die von Lewinnek et al. 1978 beschriebene sichere Zone (*engl.*: safe zone) dient der Festlegung eines Bereiches für die intraoperativ anzustrebende, azetabuläre Orientierung mit dem Ziel der Risikominderung instabiler und luxierender Implantate.

Einleitung

Demgemäß gilt es, das Azetabulum in der Anteversion zwischen $15^\circ \pm 10^\circ$ und der Inklination um $40^\circ \pm 10^\circ$ auszurichten.

Während Pfannenorientierungen außerhalb dieser Zone laut Lewinnek et al. in einer sechsprozentigen Instabilitätsrate und einer dementsprechend erhöhten Inzidenz dislozierter Hüftgelenksimplantate resultieren, sinkt das Luxationsrisiko innerhalb der sicheren Zone ausgerichteten Pfannen um 1,5 Prozent [90]. Bezüglich der exakten Definition dieses Bereiches existieren jedoch differente Autorenmeinungen (Tabelle 2).

Tabelle 2: Sichere Zone

Autor	Publikationsjahr	Anteversion	Inklination
Lewinnek et al. [90]	1978	$15^\circ \pm 10^\circ$	$40^\circ \pm 10^\circ$
McCullum and Gray [91]	1990	$30^\circ \pm 10^\circ$	$40^\circ \pm 10^\circ$
Barrack et al. [92]	2001	$20^\circ \pm 10^\circ$	$45^\circ \pm 10^\circ$
Biedermann et al. [88]	2005	$15^\circ \pm 10^\circ$	$45^\circ \pm 10^\circ$
Streubreite		$5^\circ - 40^\circ$	$30^\circ - 55^\circ$

1.5 Referenzebenen für die azetabuläre Orientierung

Hüftchirurgische Verfahren können navigationsfrei (konventionell) oder navigiert erfolgen. Die anatomische Orientierung des Azetabulums im Rahmen navigierter Operationen wird durch die vordere Beckenebene bestimmt, während konventionelle Verfahren anatomische azetabuläre Orientierungspunkte und die Tischebene nutzen.

1.5.1 Konventionelle Hüftchirurgie

Hüftchirurgische Eingriffe können nach spezieller Lagerung des Patienten rein anhand anatomischer Orientierungspunkte konventionell durchgeführt werden. Der künstliche Hüftgelenksersatz kann in Rücken - oder Seitenlage erfolgen. Zu Operationsbeginn wird im Rahmen der Patientenlagerung das Becken ausgerichtet und anschließend der Patient in dieser Position gesichert. Bei der Rückenlage dient während der Operation

Einleitung

die Ebene des Operationstisches als zusätzliche Orientierungshilfe und Referenzebene [65].

Die Tischebene stellt die Referenzebene zur Bestimmung der intraoperativen Pfannenorientierung für die im weiteren Operationsverlauf folgende Prothesenimplantation dar. Bedingt durch intraoperative Lageveränderungen, treten Abweichungen des Beckens von der neutralen Position auf, die zum Zeitpunkt der Pfannenorientierung keine Berücksichtigung finden und infolgedessen eine akkurate Prothesenimplantation behindern [65, 93]. Im Hinblick auf die Präzision dieser Methode, gemessen an den außerhalb der sicheren Zone positionierten Pfannen, existieren verschiedene Angaben in der Literatur, denen eine insgesamt hohe Zahl inakkurat positionierter Pfannen gemein ist (Tabelle 3). Unter der Bedingung der stetigen intraoperativen Kontrolle der neutralen Beckenausrichtung gilt die Tischebene für die in Rückenlage durchgeführten Operationen als zuverlässige Referenzebene [66, 85].

Tabelle 3: Malpositionierung der Pfanne bei konventioneller Hüftchirurgie unter Berücksichtigung der Patientenlagerung

Autor	Publikationsjahr	Pfannenpositionierung außerhalb der sicheren Zone	Patientenlagerung
Digioia et al. [94]	2002	78%	Seitenlage
Saxler et al. [95]	2004	25,7%	Rückenlage
Minoda et al. [96]	2006	27,8%	Seitenlage
Bosker et al. [97]	2007	29,5 %	Seitenlage

1.5.2 Navigierte Hüftendoprothetik

Die Integration navigierter Systeme beim Gelenkersatz, deren Zielsetzung unter anderem in der Präzisionserhöhung intraoperativer Pfannenpositionierungen bestand, erwies sich durch Reduktion der außerhalb der sicheren Zone positionierten Pfannen als zuverlässige Operationstechnik [87, 98]. Differenziert wird zwischen

Einleitung

robotergestützten, bildfreien, C – Bogen - gestützten und CT – basierten Navigationssystemen.

Allen Verfahren ist die Nutzung der vorderen Beckenebene als Referenzebene für die Bestimmung der Pfannenorientierung gemein [60, 63, 67, 87, 98-100]. Diese Ebene, ferner als Lewinnek – Ebene bezeichnet, wird durch die Verbindungslinien der rechten und linken Spina iliaca anterior superior und der beiden Tuberculae pubicae definiert [53, 60, 66, 69, 101, 102].

Der Einsatz bildfreier Systeme gilt unter Navigationssystemen als das präferierte Verfahren für die Implantation eines alloarthroplastischen Hüftgelenkersatzes und weist im direkten Vergleich zu der konventionellen Hüftchirurgie eine höhere Präzision und eine Maximierung der Anzahl innerhalb der sicheren Zone orientierten Pfannen auf [79, 103]. Bedingt durch die Unabhängigkeit der bildfreien Navigation von der präoperativen Bildgebung, weist die Genauigkeit dieser Verfahren eine Abhängigkeit von der akkuraten, epikutanen Palpation der Knochenpunkte für die intraoperative Festlegung der APP auf [98, 99, 104]. Erschwerend wirken sich folglich die Seitenlage als Operationslage sowie die Adipositas bei Patienten mit einem Body Mass Index von mehr als 27 kg/m^2 auf die exakte Palpation der Knochenpunkte und demzufolge die Orientierung der Pfanne aus [63, 87, 105, 106]. Divergiert die Bestimmung der Orientierungspunkte um vier Millimeter, zeigt sich eine Differenz der Pfannenorientierung von sieben Grad für die Anteversion und zwei Grad für die Inklination [107]. Die äquivalent zur epikutanen Palpation eingesetzte Sonographie erwies sich als zuverlässige Methode, die auch bei adipösen Patienten eine präzise Bestimmung der azetabulären Orientierung gewährleistet [108].

Die bildbasierten Verfahren zeichnen sich im Gegensatz zu der bildfreien Navigation durch eine evaluierende Bildgebung aus. Während CT – basierte Systeme auf präoperativen, computertomographischen Aufnahmen beruhen, erfolgt die C – Bogen – gestützte Navigation unter Einsatz der Fluoroskopie [98, 99].

1.5.3 Einfluss der Beckenkipfung auf die azetabuläre Re – Orientierung bei der Hüftendoprothetik

Die Orientierung des Azetabulums wird durch die Beckenkipfung beeinflusst und ist folglich Teil einer dynamischen Wechselwirkung [53, 56, 64, 69]. Dementsprechend

Einleitung

resultiert die anteriore Beckenkipfung in einer Erniedrigung der anatomischen, azetabulären Anteversion, während die posteriore Beckenkipfung zu einer Zunahme der anatomischen Anteversion führt [66, 69, 109] (Tabelle 4). Im Vergleich zeigt sich die anatomische Inklination weniger stark durch die Beckenkipfung beeinflusst [64].

Radiologisch konnte erhoben werden, dass Pfannen, die im Sitzen innerhalb der sicheren Zone positioniert waren, in stehender Körperhaltung bei gleichzeitiger relativer Zunahme der posterioren Beckenkipfung signifikant außerhalb dieser Zone lagen [110]. Die azetabuläre Orientierung sowie die sichere Zone sind dementsprechend abhängig von der Beckenkipfung. Der funktionelle Aspekt wird durch die Methodik von Lewinnek et al. folglich nicht berücksichtigt.

Tabelle 4: Änderung der azetabulären Orientierung unter dem Einfluss der Beckenkipfung

Autor	Publikationsjahr	Kippung des Beckens um einen Grad	
		Anteversion	Inklination
Lembeck et al. [60]	2005	0,7°	-
Babisch et al. [64]	2008	0,8°	0,3°
Malik et al. [111]	2010	0,8°	-
Van Bosse et al. [112]	2011	0,8°	-
Dandachli et al. [113]	2013	0,5° bis 1°	-

(-) = nicht erhoben

1.6 Aufgabenstellung und Hypothese

Die Implantation einer Hüft – TEP ist eine der erfolgreichsten und häufigsten durchgeführten orthopädischen Operation weltweit [55, 73]. Die Malpositionierung der Pfanne zählt zu den häufigsten Ursachen für eine Instabilität oder Luxation der Prothese. Zudem beeinflusst sie die range of motion (ROM) und kann die Bildung eines Impingements nach Hüft – TEP begünstigen [81, 84, 85, 87, 88].

Die Orientierungshilfen bei konventionellen und navigierten Operationstechniken unterscheiden sich. Während die Tischebene die Referenzebene bei der konventionellen Endoprothetik darstellt, orientieren sich Navigationssysteme an der APP [60, 63, 65, 67, 87, 98-100].

Die Beckenkipfung beeinflusst die räumliche azetabuläre Orientierung [53, 56, 64, 69].

Die Hypothese der Arbeit besteht darin, dass die Anteversion und die Inklination als Parameter der azetabulären Orientierung durch die Beckenkipfung entscheidend bestimmt werden und es funktionelle Interaktionen zwischen Beckenkipfung und azetabulärer Orientierung gibt.

In dieser Arbeit wurde die azetabuläre Orientierung in Relation zur APP und der Tischebene bestimmt sowie in einem weiteren Schritt beurteilt, inwiefern die Beckenkipfung einen Einfluss auf die Pfannenorientierung ausübt. Des Weiteren erfolgt die Evaluierung, inwieweit die Referenzebenen unter Berücksichtigung der Beckenkipfung gleichwertig zuverlässig in der Bestimmung der Pfannenorientierung angewandt werden können. Dieser funktionelle Aspekt einer möglichen gegenseitigen Beeinflussung wurde durch Korrelationsanalysen untersucht.

2 Material und Methodik

2.1 Patientenkollektiv

Die Grundlage der Arbeit bildete die CT – basierte dreidimensionale Rekonstruktion knöcherner Beckenparameter von 138 Patienten. Es handelte sich um einen existierenden Datensatz. Das Kollektiv setzte sich aus insgesamt 55 weiblichen und 83 männlichen Patienten zusammen (Abbildung 1), die Altersgrenzen lagen bei 18 und 86 Jahren ($56,9 \pm 15,8$ Jahre).

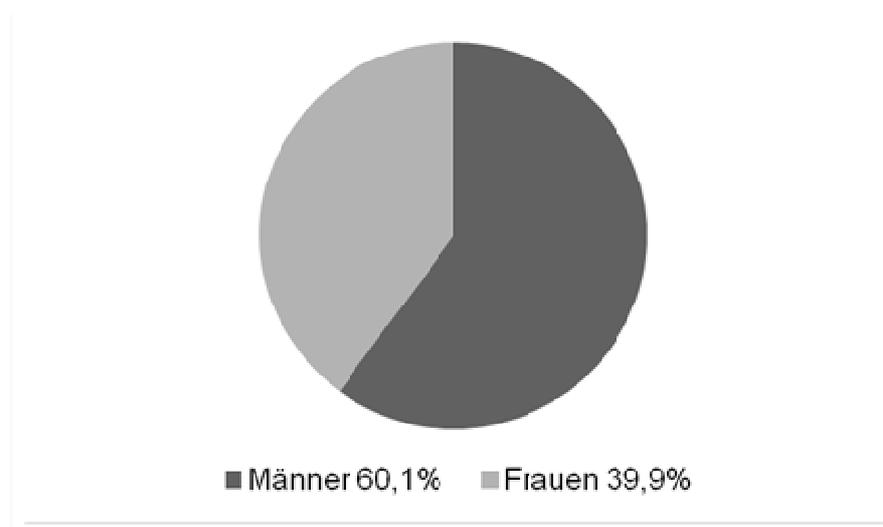


Abbildung 2: Prozentuale Geschlechterverteilung des Kollektivs

Für die Durchführung der Computertomographie wurden die Patienten in neutraler Rückenlage positioniert. Die Aufnahmen erfolgten aufgrund nicht orthopädischer Indikationen, infolgedessen angenommen werden konnte, dass die für die Analyse ausgewählten Becken keine Pathologien an Wirbelsäule, Becken oder Hüftgelenk aufwiesen. Untersucht werden sollte die funktionelle Beeinflussung im Rahmen physiologischer Verhältnisse.

2.2 Computertomographische Aufnahmetechnik

Die CT erfolgte mit Geräten Typ Aquilion 64 (Toshiba, Nasu, Japan) und MX8000 IDT 16 (Philips Medical System, Best, Niederlande). Die Schichtdicke betrug einen Millimeter, die Gantryneigung lag konstant bei null Grad. Die maximale Spannung war

120 kV, die Stromstärke 280 und 300 mA. Die Aufnahmedauer betrug 500 ms. Minimale und maximale Pixelgröße lagen zwischen 0,583 mm x 0,583 mm bzw. 0,885 mm x 0,885 mm.

2.3 Extraktion der anatomischen Markierungspunkte

Die Extraktion der anatomischen Markierungspunkte aus den zweidimensionalen CT – Datensätzen und dreidimensionalen Beckenrekonstruktionen erfolgte mithilfe der Software Amira®, die die Visualisierung und Analyse der Bilddaten ermöglichte. Die Bearbeitung der Becken erfolgte in alphabetischer Reihenfolge, wobei jeweils die ersten zwei Buchstaben des Vor – und Nachnamens der Patienten sowie das Alter und Geschlecht angegeben wurden.

Die Analyse und Bearbeitung der Markierungspunkte wurde im Anschluss in Zusammenarbeit mit dem ZUSE – Institut Berlin (ZIB, Berlin, Deutschland) durchgeführt. Der Mittelwert, die Standardabweichung (SD) und der Schwankungsbereich von minimalem bis maximalem Wert in Grad (°) dienen der präzisen Darstellung der untersuchten Parameter. Die Daten innerhalb einer Standardabweichung wurden als physiologisch definiert. Demgemäß wurden Werte außerhalb einer Standardabweichung größer bzw. kleiner des Mittelwertes des jeweiligen Parameters als erhöht bzw. erniedrigt definiert und gesondert betrachtet.

2.4 Markierungspunkte

2.4.1 Azetabulum/ Pfanneneingangsebene

Um eine exakte Bestimmung der Pfanneneingangsebene erreichen zu können, erfolgte die manuelle Markierung des Pfannenrandes (Margo acetabuli) mit minimal 25 Punkten. So wurden zunächst diejenigen Markierungspunkte mit der jeweils maximal ventralen, dorsalen, kranialen bzw. kaudalen Lage bestimmt. Anschließend erfolgte die Ergänzung der restlichen Punkte entlang des Pfannenrandes unter Aussparung der Incisura acetabuli (Tabelle 5, Abbildung 3).

Tabelle 5: Markierungspunkte des Azetabulums

Anatomische Struktur	Abkürzung	Definition
Azetabulum rechts/ links	ARIM – R/ L	Markierung des Pfannenrandes mit mindestens 25 Punkten unter Aussparung der Incisura acetabuli
	ARIMVent – R/ L	ventralster Punkt des Pfannenrandes
	ARIMDors – R/ L	dorsalster Punkt des Pfannenrandes
	ARIMCaud -R/ L	kaudalster Punkt des Pfannenrandes
	ARIMCran – R/ L	kranialster Punkt des Pfannenrandes
Incisura acetabuli rechts/ links	IAV – R/ L	ventraler Begrenzungspunkt der Inzisur
	IAD – R/ L	dorsaler Begrenzungspunkt der Inzisur

2.4.2 Vordere Beckenebene

Die Definition der vorderen Beckenebene erfolgte durch die ventralsten Punkte der rechten und linken Spina iliaca anterior superior sowie beider Tubercula pubica, die eine präzise Bestimmung der Symphysenmitte ermöglichen (Tabelle 6, Abbildung 3).

Tabelle 6: Markierungspunkte der vorderen Beckenebene

Anatomische Struktur	Abkürzung	Beschreibung
Spina iliaca anterior superior rechts	ASIS – R	ventralster Punkt der ASIS
Spina iliaca anterior superior links	ASIS – L	siehe ASIS - R
Tuberculum pubicum rechts	TCP - R	ventralster Punkt des Tuberculum pubicum
Tuberculum pubicum links	TCP - L	siehe TCP - L

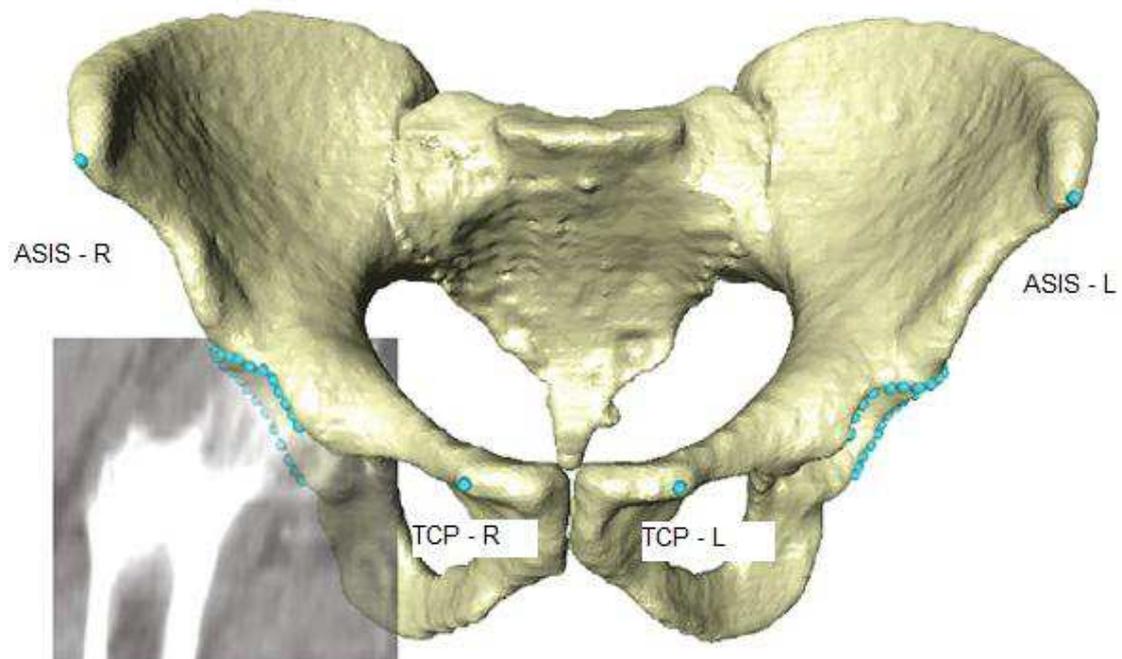


Abbildung 3: Markierung der APP und der Pfanneneingangsebene am Modell

Blaue Markierungspunkte illustrieren an einem rekonstruierten dreidimensionalen Modell die linke und rechte Spina iliaca anterior superior (ASIS – L und ASIS – R), beide Tuberculae pubicae (TCP – L und TCP – R) sowie den Margo acetabuli (Abbildung 3).

Die Berechnung der azetabulären Orientierung erfolgte durch die dreidimensionale Bestimmung der azetabulären Pfanneneingangsebene in Relation zu den zwei Referenzebenen. Während die anatomische Orientierung in Relation zur APP bestimmt wurde, stellte die Tischebene die Referenzebene für die Festlegung der funktionellen, azetabulären Orientierung dar.

2.5 Beckenkipfung

Die Beckenkipfung wurde definiert als der Winkel zwischen der APP und der frontalen Ebene und entsprach der Rotation um die transversale Achse bzw. der Orientierung des Beckens in der sagittalen Ebene.

Bei paralleler Ausrichtung der APP und der koronaren Ebene, betrug die Beckenkipfung null Grad. Demgemäß entsprach ein negativer Winkel einer posterioren Beckenkipfung, d.h. einer Kippung des Beckens nach dorsal, umgekehrt wurde eine anteriore Kippung des Beckens durch einen positiven Winkel dargestellt (Abbildung 4).

Die ermittelten Daten wurden durch den Mittelwert, die Standardabweichung und den Schwankungsbereich in Grad ($^{\circ}$) charakterisiert. Werte außerhalb einer Standardabweichung größer bzw. kleiner des Mittelwertes des jeweiligen Parameters wurden als erhöht bzw. erniedrigt definiert und gesondert betrachtet.

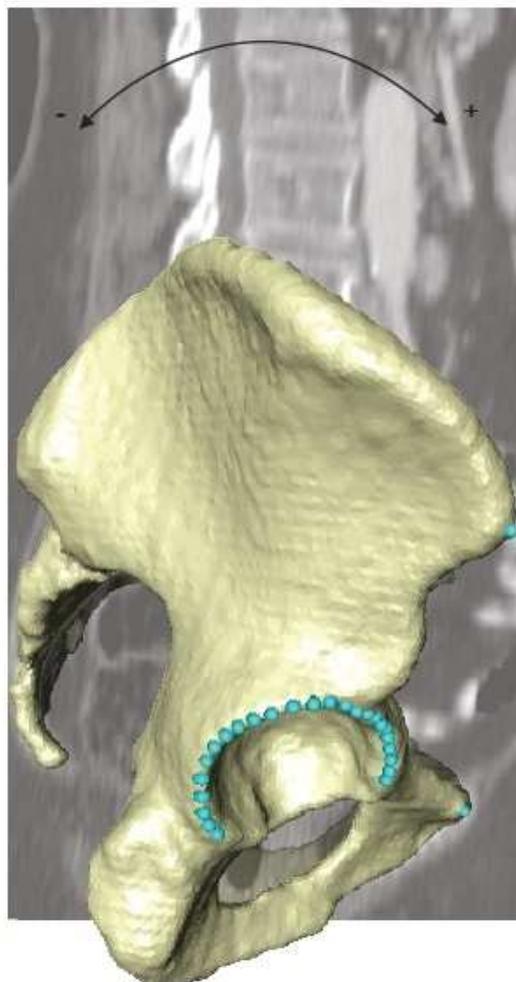


Abbildung 4: Beckenkipfung im Sagittalprofil

Die Abbildung 4 stellt die Beckenkipfung in der sagittalen Ebene anhand eines dreidimensionalen Modells dar. Die Richtung der Beckenkipfung, detektiert über die APP, wird mittels der abgebildeten Pfeile dargestellt: (+) = anterior, (-) = posterior.

Von den verfügbaren Datensätzen von 168 Patienten (Männer n = 96, Frauen n = 72) wurden 30 Becken aufgrund abgeschnittener bzw. inkompletter Bilddatensätze und dementsprechend unzureichend gewährleisteter Rekonstruktion aussortiert.

2.6 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung erfolgte unter Einsatz des U – Tests nach Mann – Whitney sowie der Bestimmung des Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman und der Durchführung einer Regressionsanalyse unter Verwendung der Software SPSS, Version 21 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA).

Für den Vergleich zweier unverbundener, nicht zwingend normalverteilter Stichproben wurde der Mann – Whitney – U Test als nichtparametrischer Rangtest eingesetzt.

Der p – Wert charakterisierte die Irrtumswahrscheinlichkeit des alpha - Fehlers. Das Signifikanzniveau wurde auf 0,05 festgelegt und bei $p < 0,05$ eine statistische Signifikanz angenommen.

Für die Evaluierung des Zusammenhanges zweier nicht normalverteilter Variablen erfolgte der Rangkorrelationstest nach Spearman, der zu den nichtparametrischen Korrelationsanalysen zählt und als Rangkorrelationskoeffizient r die Stärke eines Zusammenhanges zwischen zwei verglichenen Rängen widerspiegelte. Ein linearer Zusammenhang wird für diese Analyse nicht benötigt. Der Korrelationskoeffizient kann Werte zwischen -1 und 1 annehmen. Dementsprechend ergibt $r > 0$ eine positive Korrelation und $r < 0$ eine negative Korrelation, während $r = 0$ keinen Zusammenhang aufzeigt. Je nach Größe des Wertes ändert sich die Stärke des Zusammenhanges.

Im Rahmen der Regressionsanalyse wurde das Bestimmtheitsmaß R^2 festgelegt, um die Streuung einer abhängigen Variablen durch eine zweite unabhängige Variable

Material und Methodik

erklären zu können. Das Bestimmtheitsmaß kann Werte zwischen null und eins annehmen. Je größer R^2 ist, desto besser kann die Streuung der abhängigen durch die unabhängige Variable erklärt werden.

3 Ergebnisse

3.1 Anatomische azetabuläre Orientierung

Die Anteversion in Relation zur APP ergab bei den weiblichen Personen einen Mittelwert von $20,0^\circ \pm 4,4^\circ$ und bei den männlichen Individuen von $17,2^\circ \pm 4,2^\circ$. Folglich zeigten die Frauen signifikant größere Werte für die Anteversion als die Männer ($p < 0,005$). Die Inklination wies Mittelwerte von $46,8^\circ \pm 3,4^\circ$ für die Frauen und von $46,9^\circ \pm 3,9^\circ$ für die Männer auf. Die anatomische Inklination ließ dementsprechend keine geschlechterspezifischen Unterschiede erkennen (Tabelle 7).

Tabelle 7: Anatomische azetabuläre Orientierung

	Anatomische Anteversion	Anatomische Inklination
Gesamtkollektiv		
Mittelwert \pm SD	$18,3^\circ \pm 4,5^\circ$	$46,9^\circ \pm 3,7^\circ$
min	$5,8^\circ$	$32,9^\circ$
max	$29,6^\circ$	$55,8^\circ$
Frauen		
Mittelwert \pm SD	$20,0^\circ \pm 4,4^\circ$	$46,8^\circ \pm 3,4^\circ$
min	$10,7^\circ$	$37,6^\circ$
max	$29,6^\circ$	$52,9^\circ$
Männer		
Mittelwert \pm SD	$17,2^\circ \pm 4,2^\circ$	$46,9^\circ \pm 3,9^\circ$
min	$5,8^\circ$	$32,9^\circ$
max	$26,0^\circ$	$55,8^\circ$

Ergebnisse

3.2 Funktionelle azetabuläre Orientierung

Die relativ zur Tischebene bestimmte Anteversion ergab einen Mittelwert von $20,6^\circ \pm 4,1^\circ$ für die weiblichen und von $17,2^\circ \pm 4,5^\circ$ für die männlichen Individuen. Dies entsprach einer signifikant größeren Anteversion der Frauen im Vergleich zu den Männern ($p < 0,001$). Die Werte ergaben im Mittelwert eine Inklination der weiblichen Azetabula von $46,7^\circ \pm 3,5^\circ$ und zeigten mit $46,9^\circ \pm 3,8^\circ$ für die Männer keine geschlechterspezifische Differenz (Tabelle 8).

Tabelle 8: Funktionelle azetabuläre Orientierung

	Funktionelle Anteversion	Funktionelle Inklination
Gesamtkollektiv		
Mittelwert \pm SD	$18,5^\circ \pm 4,6^\circ$	$46,9^\circ \pm 3,7^\circ$
min	$7,2^\circ$	$33,6^\circ$
max	$31,7^\circ$	$56,4^\circ$
Frauen		
Mittelwert \pm SD	$20,6^\circ \pm 4,1^\circ$	$46,7^\circ \pm 3,5^\circ$
min	$11,6^\circ$	$37,1^\circ$
max	$31,7^\circ$	$53,8^\circ$
Männer		
Mittelwert \pm SD	$17,2^\circ \pm 4,5^\circ$	$46,9^\circ \pm 3,8^\circ$
min	$7,2^\circ$	$33,6^\circ$
max	$28,3^\circ$	$56,4^\circ$

3.3 Beckenkipfung

Die durchschnittliche Beckenkipfung des Gesamtkollektivs in Rückenlage betrug $-0,1^\circ \pm 5,5^\circ$ und wies einen Schwankungsbereich von $-18,3^\circ$ und $12,7^\circ$ auf. Die Frauen

Ergebnisse

zeigten im Mittel eine Kippung von $-0,2^\circ \pm 5,7^\circ$, die Männer von $-0,3^\circ \pm 5,4^\circ$ (Tabelle 9).

Es zeigten sich keine geschlechts – oder altersspezifischen Unterschiede für die Beckenkippung ($p > 0,05$).

Tabelle 9: Erhobene Werte der Beckenkippung

	Beckenkippung
Gesamtkollektiv	
Mittelwert \pm SD	$-0,1^\circ \pm 5,5^\circ$
min	$-18,3^\circ$
max	$12,7^\circ$
Frauen	
Mittelwert \pm SD	$-0,2^\circ \pm 5,7^\circ$
min	$-15,5^\circ$
max	$10,6^\circ$
Männer	
Mittelwert \pm SD	$-0,3^\circ \pm 5,4^\circ$
min	$-18,3^\circ$
max	$12,72^\circ$

Insgesamt 21% des untersuchten Kollektivs ($n = 29/138$) ließen eine verstärkte Beckenkippung erkennen, von denen 12 Personen eine erniedrigte und 17 Personen eine erhöhte Kippung des Beckens aufwiesen (Tabelle 10).

Ergebnisse

Während die erhöhte anteriore Beckenkipfung im Durchschnitt $8,5^\circ \pm 1,8^\circ$ (Frauen: $9,1^\circ \pm 1,3^\circ$, Männer: $7,9^\circ \pm 2,9^\circ$) betrug, betrug der Mittelwert einer verstärkten hinteren Beckenkipfung $-10,3^\circ \pm 4,5^\circ$ (Frauen: $-11,9^\circ \pm 4,3^\circ$, Männer: $-11,0^\circ \pm 4,9^\circ$).

Tabelle 10: Parameter der übermäßig anterioren bzw. posterioren Beckenkipfung

Beckenkipfung				
	verstärkt anterior	Anzahl (n)	verstärkt posterior	Anzahl (n)
gesamt	$8,5^\circ \pm 1,8^\circ$	17	$-10,3^\circ \pm 4,5^\circ$	12
min	$5,7^\circ$		$-18,3^\circ$	
max	$12,7^\circ$		$-5,4^\circ$	
Frauen	$9,1^\circ \pm 1,3^\circ$	7	$-11,9^\circ \pm 4,3^\circ$	5
min	$7,0^\circ$		$-15,5^\circ$	
max	$10,6^\circ$		$-7,1^\circ$	
Männer	$7,9^\circ \pm 2,9^\circ$	10	$-11,0^\circ \pm 4,9^\circ$	7
min	$5,5^\circ$		$-18,3^\circ$	
max	$12,7^\circ$		$-6,4^\circ$	

3.4 Einfluss der Beckenkipfung auf die Orientierung des Azetabulums

3.4.1 Korrelation zwischen anatomischer Anteversion und Beckenkipfung

Die azetabuläre Anteversion in Bezug zur APP zeigte eine positive Korrelation zur Beckenkipfung, die mit $p < 0,01$ für beide Geschlechter eine statistische Signifikanz aufwies.

Der Korrelationskoeffizient r betrug $0,698$ für Frauen und zeigte folglich einen deutlichen Zusammenhang. Das Bestimmtheitsmaß R^2 wurde mit $0,523$ ermittelt. Die

Ergebnisse

Korrelationsanalyse der männlichen Untersuchungspersonen wies mit $r = 0,396$ sowie $R^2 = 0,249$ einen weniger ausgeprägten positiven Zusammenhang auf.

In der Tabelle 11 wird die statistische Auswertung mittels Angabe des p – Wertes, des Korrelationskoeffizienten r und des Bestimmtheitsmaßes R^2 unter Berücksichtigung des Geschlechtes dargestellt.

Tabelle 11: Korrelation zwischen der anatomischen azetabulären Anteversion und der Beckenkipfung

	p - Wert	Korrelationskoeffizient (r)	Bestimmtheitsmaß (R^2)
gesamt	< 0,01	0,497	0,320
Frauen	< 0,01	0,698	0,523
Männer	< 0,01	0,396	0,249

Die Abbildungen 5 A, B und C dienen der Darstellung der positiven Korrelation zwischen der anatomischen azetabulären Anteversion und der Beckenkipfung.

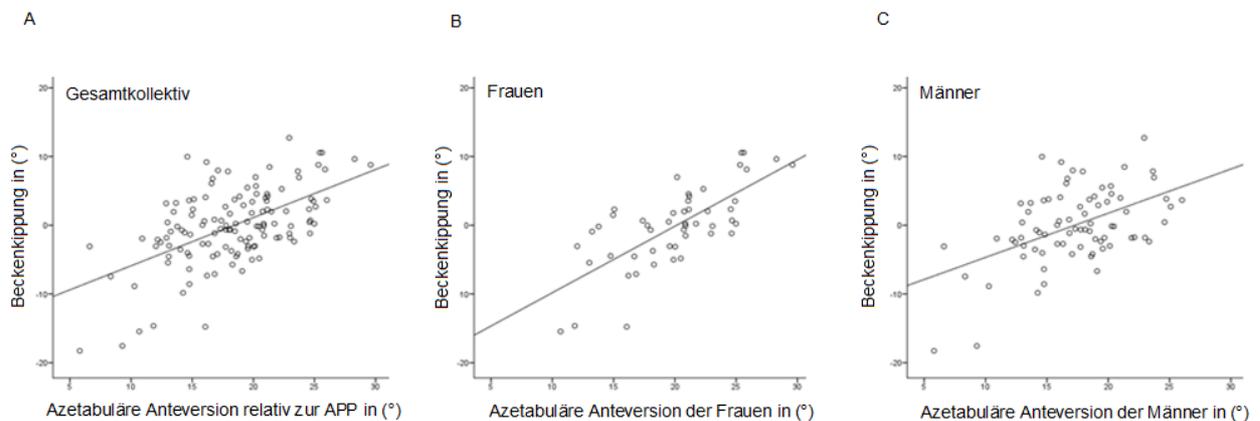


Abbildung 5: Korrelation der anatomischen azetabulären Anteversion und der Beckenkipfung, A (Gesamtkollektiv), B (Frauen), C (Männer)

3.4.2 Beckenkipfung bei erhöhter/ erniedrigter anatomischer Anteversion

Insgesamt wiesen 43 Personen des untersuchten Kollektivs, davon anteilig 20 Frauen und 23 Männer, eine abweichende Anteversion auf. Diejenigen Individuen des Gesamtkollektivs mit einer erhöhten Anteversion zeigten eine verstärkte anteriore

Ergebnisse

Kippung des Beckens mit Mittelwerten von $4,3^\circ \pm 4,7^\circ$, während Personen mit einer verminderten Anteversion eine verstärkte posteriore Beckenkippung - $4,9^\circ \pm 6,5^\circ$ aufwiesen ($p < 0,05$, Tabelle 12).

Frauen präsentierten eine Beckenkippung bei erhöhter bzw. erniedrigter Anteversion von $5,6^\circ \pm 4,5^\circ$ bzw. - $4,5^\circ \pm 6,5^\circ$ ($p < 0,05$), Männer von $2,7^\circ \pm 4,7^\circ$ bzw. - $5,4^\circ \pm 7,0^\circ$ ($p < 0,05$, Tabelle 12).

Tabelle 12: Beckenkippung bei erhöhter/ erniedrigter anatomischer Anteversion

	Anzahl (n)	Beckenkipfung	
		erhöhte Anteversion	erniedrigte Anteversion
gesamt	43	$4,3^\circ \pm 4,7^\circ$	$-4,9^\circ \pm 6,5^\circ$
Frauen	20	$5,6^\circ \pm 4,5^\circ$	$-4,5^\circ \pm 6,5^\circ$
Männer	23	$2,7^\circ \pm 4,7^\circ$	$-5,4^\circ \pm 7,0^\circ$

Das folgende Kastendiagramm zeigt die Beckenkippung bei erhöhter bzw. erniedrigter Anteversion für das Gesamtkollektiv (Abbildung 6).

Ergebnisse

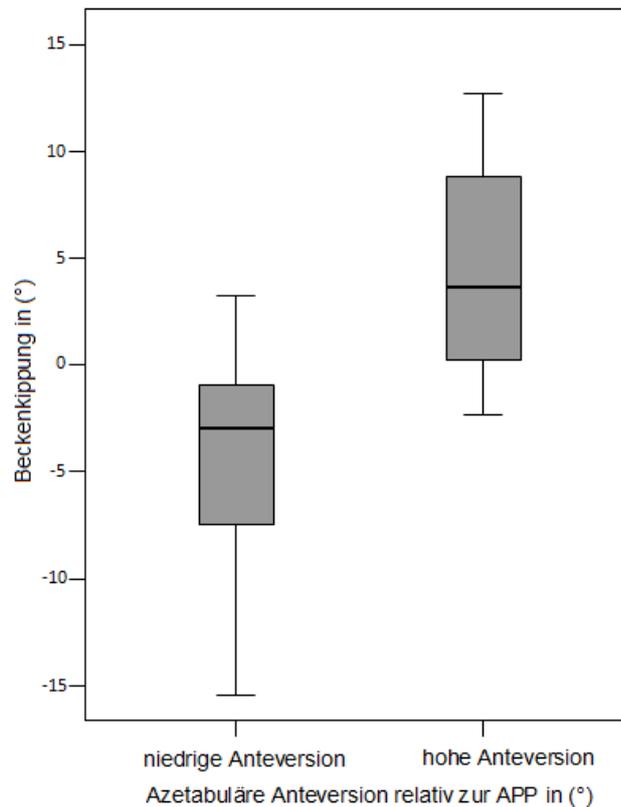


Abbildung 6: Erhöhte bzw. erniedrigte anatomische Anteversion und Beckenkipfung

3.4.3 Korrelation zwischen funktioneller Anteversion und Beckenkipfung

Zwischen der azetabulären Anteversion in Relation zur Tischebene und der Beckenkipfung konnte eine negative Korrelation dargestellt werden. Als Statistisch signifikant erwies sich der Zusammenhang mit $p < 0,05$ sowohl für die Frauen als auch für die Männer mit $p < 0,01$ (Tabelle 13).

Mit $r = -0,324$ korrelierten die Parameter für die Frauen mäßig negativ miteinander, jedoch zeigte das im Rahmen der Regressionsanalyse bestimmte Bestimmtheitsmaß R^2 mit $0,075$ keinen bzw. einen nur minimal vorhandenen Zusammenhang zwischen den zwei untersuchten Variablen. Die männlichen Untersuchungspersonen wiesen mit $r = -0,427$ ein ebenfalls mäßig, negativ korrelierendes Verhalten auf. $R^2 = 0,175$ verweist darauf, dass die Streuung der Beckenkipfung im Modell durch die azetabuläre Anteversion ebenfalls kaum erklärt werden kann (Tabelle 13).

Ergebnisse

Tabelle 13: Korrelation zwischen der funktionellen azetabulären Anteversion und der Beckenkipfung

	p - Wert	Korrelationskoeffizient (r)	Bestimmtheitsmaß (R ²)
gesamt	< 0,01	-0,366	0,117
Frauen	< 0,05	-0,324	0,075
Männer	< 0,01	-0,427	0,175

Aufgrund der niedrigen Korrelationen der funktionellen Anteversion und der Beckenkipfung wurde auf eine geschlechterspezifische Auswertung mittels Diagrammen verzichtet. Abbildung 7 zeigt die Auswertung für das Gesamtkollektiv.

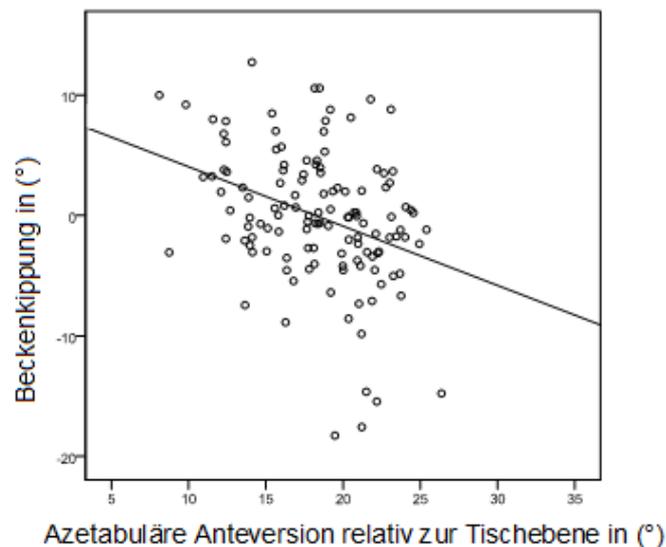


Abbildung 7: Korrelation der funktionellen azetabulären Anteversion und der Beckenkipfung, Gesamtkollektiv

3.4.4 Beckenkipfung bei erhöhter/ erniedrigter funktioneller Anteversion

Insgesamt 34 Personen des untersuchten Kollektivs, davon anteilig 11 Frauen und 23 Männer, wiesen eine erhöhte bzw. erniedrigte Anteversion in Relation zur Tischebene auf.

Eine erhöhte posteriore Beckenkipfung von $-2,5^{\circ} \pm 4,2^{\circ}$ zeigten Personen mit einer vermehrten Anteversion, während die Beckenkipfung mit $2,9^{\circ} \pm 4,7^{\circ}$ bei Personen mit einer verminderten Anteversion vermehrt anterior gerichtet war ($p < 0,05$; Abbildung 8).

Ergebnisse

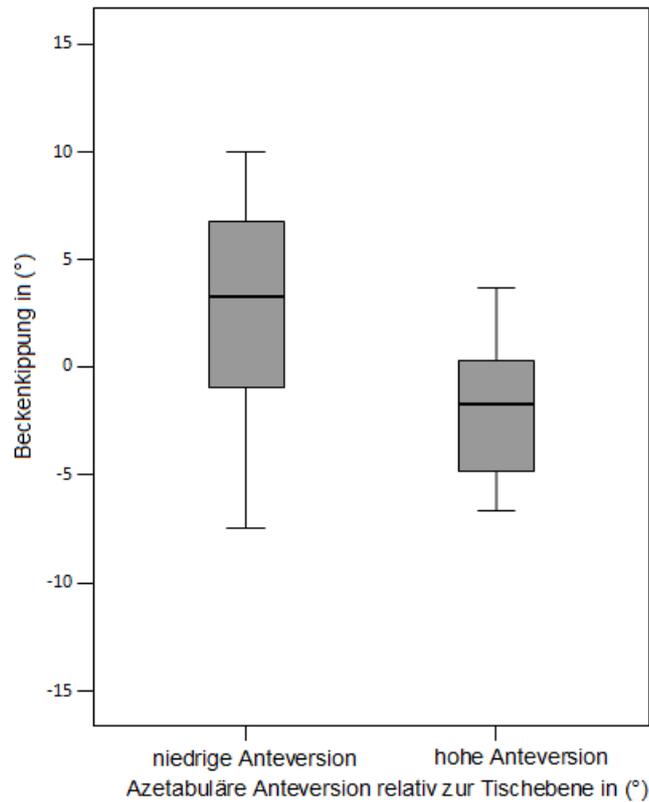


Abbildung 8: Erhöhte bzw. erniedrigte funktionelle Anteversion und Beckenklippung, Kastendiagramm, Gesamtkollektiv

Unter Berücksichtigung des Geschlechtes ließen sich die folgenden Daten erheben: die Frauen zeigten mit $-4,3^\circ \pm 6,2^\circ$ bzw. $1,1^\circ \pm 3,4^\circ$ von der Norm abweichende Beckenklippungen bei erhöhter bzw. verminderter Anteversion ($p > 0,05$). Selbiges stellte sich bei den männlichen Untersuchungspersonen mit Klippungen von $-1,2^\circ \pm 3,4^\circ$ bzw. $4,2^\circ \pm 4,0^\circ$ bei erhöhter bzw. erniedrigter Anteversion dar ($p < 0,05$, Tabelle 14).

Tabelle 14: Beckenklippung bei erhöhter/ erniedrigter funktioneller Anteversion

	Anzahl (n)	Beckenklippung	
		erhöhte Anteversion	erniedrigte Anteversion
gesamt	34	$-2,5^\circ \pm 4,2^\circ$	$2,9^\circ \pm 4,7^\circ$
Frauen	11	$-4,3^\circ \pm 6,2^\circ$	$1,1^\circ \pm 3,4^\circ$
Männer	23	$-1,2^\circ \pm 3,4^\circ$	$4,2^\circ \pm 4,0^\circ$

3.4.5 Korrelation zwischen anatomischer Inklination und Beckenkipfung

Gleichermaßen wie die Anteversion wurde die Inklination des Azetabulums in Relation sowohl zur APP als auch zur Tischebene bestimmt und in der Folge auf eine Korrelation hin untersucht.

Die männlichen Untersuchungspersonen wiesen mit $r = 0,384$ eine geringfügig positive Korrelation zwischen der Inklination in Relation zur APP und der Beckenkipfung auf ($R^2 = 0,122$, $p < 0,001$). Demnach zeigten Männer mit einer hohen Inklination eine Zunahme der anterioren Beckenkipfung von $2,0^\circ \pm 3,2^\circ$, während die Beckenkipfung bei einer verminderten Inklination im Mittelwert $-1,1^\circ \pm 3,3^\circ$ betrug ($p < 0,05$).

Für die Frauen konnte keine Korrelation eruiert werden ($p = 0,09$).

3.4.6 Korrelation zwischen funktioneller Inklination und Beckenkipfung

Zwischen der relativ zur Tischebene bestimmten Inklination und der Beckenkipfung konnte für die Männer keine Korrelation dargelegt werden ($p = 0,78$, $r = 0,03$).

Die Inklination der Frau korrelierte mäßig negativ mit der Beckenkipfung. Eine statistische Signifikanz konnte nicht aufgezeigt werden ($p = 0,09$, $r = -0,24$).

3.5 Zuverlässigkeit der Referenzebenen unter Berücksichtigung der Beckenkipfung

3.5.1 Azetabuläre Orientierung bei neutraler Beckenkipfung

Insgesamt 109 Personen des Gesamtkollektivs wiesen eine Beckenkipfung mit Werten innerhalb einer Standardabweichung auf. Diese Gruppe wies keine Differenzen in der Bestimmung der Pfannenorientierungsparameter in Bezug zu den beiden untersuchten Referenzebenen auf ($p > 0,05$). So beliefen sich Anteversion bzw. Inklination des Gesamtkollektivs in Relation zur APP auf $18,3^\circ \pm 4,5^\circ$ bzw. $46,9^\circ \pm 3,7^\circ$ und in Relation zur Tischebene auf $18,5^\circ \pm 4,6^\circ$ bzw. $46,9^\circ \pm 3,7^\circ$.

Ergebnisse

Die anatomische Anteversion der Frau glich mit $20,0^\circ \pm 4,4^\circ$ der funktionellen Anteversion mit $20,6^\circ \pm 4,1^\circ$. Selbiges galt für die Inklination.

Mit $17,2^\circ \pm 4,2^\circ$ und $46,9^\circ \pm 3,9^\circ$ relativ zur APP sowie mit $17,2^\circ \pm 4,5^\circ$ und $46,9^\circ \pm 3,8^\circ$ relativ zur Tischebene zeigten auch die männlichen Untersuchungspersonen nahezu identische Ergebnisse für Anteversion und Inklination, ohne den Nachweis statistischer Unterschiede.

Die nachfolgende Tabelle 15 stellt die geschlechterspezifischen Ergebnisse der Pfannenorientierungsparameter in Relation zu den zwei untersuchten Referenzebenen bei physiologischer Beckenkipfung dar.

Tabelle 15: Anatomische und funktionelle Orientierung bei physiologischer Beckenkipfung

	Anteversion		Inklination	
	APP	Tischebene	APP	Tischebene
gesamt				
Mittelwert \pm SD	$18,3^\circ \pm 4,5^\circ$	$18,5^\circ \pm 4,6^\circ$	$46,9^\circ \pm 3,7^\circ$	$46,9^\circ \pm 3,7^\circ$
Frauen				
Mittelwert \pm SD	$20,0^\circ \pm 4,4^\circ$	$20,6^\circ \pm 4,1^\circ$	$46,8^\circ \pm 3,4^\circ$	$46,7^\circ \pm 3,5^\circ$
Männer				
Mittelwert \pm SD	$17,2^\circ \pm 4,2^\circ$	$17,2^\circ \pm 4,5^\circ$	$46,9^\circ \pm 3,9^\circ$	$46,9^\circ \pm 3,8^\circ$

3.5.2 Verstärkte anteriore bzw. posteriore Beckenkipfung

Insgesamt konnten bei 29 Personen des Gesamtkollektivs Werte außerhalb der physiologischen Beckenkipfung eruiert werden. Von diesen wiesen 12 Personen (Frauen $n = 5$, Männer $n = 7$) eine erniedrigte und 17 Personen (Frauen $n = 7$, Männer $n = 10$) eine erhöhte Beckenkipfung auf.

Ergebnisse

Im Folgenden wird der Einfluss der erhöhten bzw. erniedrigten Beckenkipfung auf die Bestimmung der Pfannenorientierungsparameter in Relation zu den zwei bekannten Referenzebenen erläutert.

3.5.2.1 Anteversion bei erhöhter posteriorer Beckenkipfung

Die erniedrigte Beckenkipfung betrug durchschnittlich $-10,3^\circ \pm 4,5^\circ$ für die gesamte Untersucherguppe ($n = 12/138$). Bei diesen Personen zeigte sich eine anatomische Anteversion von $13,3^\circ \pm 3,9^\circ$ und eine funktionelle Anteversion von $20,5^\circ \pm 3,1^\circ$. Demnach lässt sich feststellen, dass eine posteriore Beckenkipfung von mehr als $-10,3^\circ \pm 4,5^\circ$ unabhängig vom Geschlecht zu einer Abweichung in der Bestimmung der Anteversion in Abhängigkeit von der jeweiligen Referenzebene führt. Die Werte waren statistisch signifikant ($p = 0,001$, Tabelle 16).

Der Mittelwert der erhöhten posterioren Beckenkipfung zeigte einen Mittelwert von $-11,9^\circ \pm 4,3^\circ$ für die weiblichen Untersuchungspersonen ($n = 5/ 55$). Die relativ zur APP bestimmte Anteversion erreichte einen Mittelwert von $14,3^\circ \pm 2,8^\circ$, in Relation zur Tischebene von $22,6^\circ \pm 2,2^\circ$. Auch für diese Daten zeigte sich eine statistische Signifikanz ($p = 0,04$, Tabelle 16).

Der Mittelwert für die verstärkte posteriore Kippung des männlichen Beckens ($n = 7/ 83$) glich mit $-11,0^\circ \pm 4,9^\circ$ des für die Frauen bestimmten Mittelwertes. Die anatomische und funktionelle Anteversion zeigte mit $11,1^\circ \pm 3,6^\circ$ und $18,8^\circ \pm 2,8^\circ$ einen niedrigeren Mittelwert im Vergleich zu den Frauen. Auch diese Werte erwiesen sich als statistisch signifikant ($p = 0,02$, Tabelle 16).

Die Analyse der durchschnittlichen Anteversion zeigte bei erhöhter posteriorer Beckenkipfung eine Differenz zwischen der Referenzebenen von $8,3^\circ \pm 3,1^\circ$ für die Frauen und von $7,7^\circ \pm 3,6^\circ$ für die Männer.

Ergebnisse

Tabelle 16: Anatomische und funktionelle Anteversion bei erhöhter posteriorer Beckenkipfung

	APP	Tischebene	p - Wert
gesamt (n = 12/ 138)	Beckenkipfung: - 10,3° ± 4,5°, min: - 18,3°, max: - 5,4°		
Mittelwert ± SD	13,3° ± 3,9°	20,5° ± 3,1°	0,001
min	5,8°	13,7°	
max	19,1°	26,4°	
Frauen (n = 5/ 55)	Beckenkipfung: - 11,9° ± 4,3°, min: - 15,5°, max: - 7,1°		
Mittelwert ± SD	14,3° ± 2,8°	22,6° ± 2,2°	0,04
min	10,7°	21,0°	
max	16,8°	26,4°	
Männer (n = 7/ 83)	Beckenkipfung: - 11,0° ± 4,9°, min: -18,3°, max: - 6,4°		
Mittelwert ± SD	11,1° ± 3,6°	18,8° ± 2,8°	0,02
min	5,8°	13,7°	
max	14,8°	21,2°	

3.5.2.2 Anteversion bei erhöhter anteriorer Beckenkipfung

Von den 138 untersuchten Personen demonstrierten insgesamt 17 Personen, davon 7 Frauen und 10 Männer, eine verstärkte Beckenkipfung von durchschnittlich $8,5^\circ \pm 1,8^\circ$ sowie eine anatomische Anteversion von $23,7^\circ \pm 3,4^\circ$ und eine funktionelle Anteversion von $17,8^\circ \pm 3,2^\circ$ ($p = 0,002$, Tabelle 17).

Ergebnisse

Die Frauen (n = 7/ 55) wiesen eine durchschnittliche anteriore Beckenkipfung von $9,1^\circ \pm 1,3^\circ$ auf. Die relativ zur APP bestimmte Anteversion erreichte den Mittelwert von $25,8^\circ \pm 3,0^\circ$, in Relation zur Tischebene von $19,5^\circ \pm 2,5^\circ$ ($p = 0,02$, Tabelle 17).

Die erhöhte anteriore Beckenkipfung der Männer (n = 10/138) war mit $7,9^\circ \pm 2,9^\circ$ minimal geringer ausgeprägt als bei den Frauen. Gleichmaßen wiesen die Männer mit einer relativ zur APP bzw. Tischebene bestimmten Anteversion von $20,8^\circ \pm 2,4^\circ$ bzw. $15,4^\circ \pm 2,4^\circ$ niedrigere Werte auf ($p = 0,04$, Tabelle 17).

Die durchschnittliche Anteversion wies bei erhöhter Beckenkipfung eine Differenz zwischen der Referenzebenen von $6,2^\circ \pm 1,0^\circ$ für die Frauen und von $5,4^\circ \pm 2,0^\circ$ für die Männer auf.

Tabelle 17: Anatomische und funktionelle Anteversion bei erhöhter anteriorer Beckenkipfung

	APP	Tischebene	p - Wert
gesamt (n = 17/ 138)	Beckenkipfung: $8,5^\circ \pm 1,8^\circ$, min: $5,7^\circ$, max: $12,7^\circ$		
Mittelwert \pm SD	$23,7^\circ \pm 3,4^\circ$	$17,8^\circ \pm 3,2^\circ$	0,002
min	$17,9^\circ$	$12,4^\circ$	
max	$29,6^\circ$	$23,1^\circ$	
Frauen (n = 7/ 55)	Beckenkipfung: $9,1^\circ \pm 1,3^\circ$, min: $7,0^\circ$, max: $10,6^\circ$		
Mittelwert \pm SD	$25,8^\circ \pm 3,0^\circ$	$19,5^\circ \pm 2,5^\circ$	0,02
min	$20,2^\circ$	$15,6^\circ$	
max	$29,6^\circ$	$23,1^\circ$	
Männer (n = 10/ 83)	Beckenkipfung: $7,9^\circ \pm 2,9^\circ$, min: $5,5^\circ$, max: $12,7^\circ$		
Mittelwert \pm SD	$20,8^\circ \pm 2,4^\circ$	$15,4^\circ \pm 2,4^\circ$	0,04
min	$17,9^\circ$	$12,4^\circ$	
max	$23,6^\circ$	$18,9^\circ$	

3.5.2.3 Inklination bei erhöhter posteriorer Beckenkipfung

Der Einfluss einer erniedrigten Beckenkipfung auf die anatomische und funktionelle Inklination zeigte im Vergleich zur azetabulären Anteversion weniger stark differierende Werte.

So demonstrierten die weiblichen Untersuchungspersonen ($n = 5/55$) bei einer übermäßigen posterioren Beckenkipfung von $-11,9^\circ \pm 4,3^\circ$ eine zur APP bzw. Tischebene gemessene Inklination von $44,6^\circ \pm 2,8^\circ$ bzw. $47,4^\circ \pm 2,8^\circ$. Es ergab sich eine Differenz von $2,8^\circ \pm 1,0^\circ$. Die Daten zeigten mit $p = 0,04$ eine statistische Signifikanz (Tabelle 18).

Eine extensiv posteriore Beckenkipfung von $-11,0^\circ \pm 4,9^\circ$ führte bei den männlichen Untersuchungspersonen zu einer Differenz der in Relation zu den beiden Referenzebenen bestimmten Inklination von $2,1^\circ \pm 0,9^\circ$ ($p = 0,02$).

Ergebnisse

Tabelle 18: Anatomische und funktionelle Inklination bei erhöhter posteriorer Beckenkipfung

	APP	Tischebene	p - Wert
gesamt (n = 12/ 138)	Beckenkipfung: - 10,3° ± 4,5°, min: - 18,3°, max: - 5,4°		
Mittelwert ± SD	44,9° ± 2,2°	47,1° ± 2,2°	0,001
min	40,3°	43,0°	
max	47,8°	50,4°	
Frauen (n = 5/ 55)	Beckenkipfung: - 11,9° ± 4,3°, min: - 15,5°, max: - 7,1°		
Mittelwert ± SD	44,6° ± 2,8°	47,4° ± 2,8°	0,04
min	40,4°	43,5°	
max	47,3°	50,4°	
Männer (n = 7/ 83)	Beckenkipfung: - 11,0° ± 4,9°, min: -18,3°, max: - 6,4°		
Mittelwert ± SD	44,8° ± 2,5°	46,9° ± 2,5°	0,02
min	40,3°	43,0°	
max	47,8°	49,9°	

3.5.2.4 Inklination bei erhöhter anteriorer Beckenkipfung

Gleichermaßen wie die erniedrigte Beckenkipfung resultierte eine erhöhte Beckenkipfung in einer differenten Inklination relativ zu den Referenzebenen. Der Unterschied war im Vergleich zur Anteversion deutlich weniger ausgeprägt.

Eine Beckenkipfung der weiblichen Untersuchungspersonen (n = 7/55) von 9,1° ± 1,3° zeigte eine anatomische Inklination von 48,0° ± 2,4° und eine funktionelle Inklination 45,2° ± 2,5°. Es ergab sich folglich eine Differenz von 2,8° ± 0,5° zwischen beiden Referenzebenen (p = 0,02, Tabelle 19).

Ergebnisse

Die Männer (n = 10/83) demonstrierten eine Differenz der Inklination von $2,0^\circ \pm 0,8^\circ$ bei einer erhöhten anterioren Beckenkipfung von $7,9^\circ \pm 2,9^\circ$. Auch diese Werte waren statistisch signifikant ($p = 0,04$, Tabelle 19).

Tabelle 19: Anatomische und funktionelle Inklination bei erhöhter anteriorer Beckenkipfung

	APP	Tischebene	p - Wert
gesamt (n = 17/ 138)	Beckenkipfung: $8,5^\circ \pm 1,8^\circ$, min: $5,7^\circ$, max: $12,7^\circ$		
Mittelwert \pm SD	$47,7^\circ \pm 2,9^\circ$	$45,3^\circ \pm 2,7^\circ$	0,002
min	$43,8^\circ$	$40,9^\circ$	
max	$53,8^\circ$	$51,4^\circ$	
Frauen (n = 7/ 55)	Beckenkipfung: $9,1^\circ \pm 1,3^\circ$, min: $7,0^\circ$, max: $10,6^\circ$		
Mittelwert \pm SD	$48,0^\circ \pm 2,4^\circ$	$45,2^\circ \pm 2,5^\circ$	0,02
min	$43,8^\circ$	$40,9^\circ$	
max	$51,4^\circ$	$48,6^\circ$	
Männer (n = 10/ 83)	Beckenkipfung: $7,9^\circ \pm 2,9^\circ$, min: $5,5^\circ$, max: $12,7^\circ$		
Mittelwert \pm SD	$47,8^\circ \pm 3,7^\circ$	$45,8^\circ \pm 3,3^\circ$	0,04
min	$44,0^\circ$	$42,6^\circ$	
max	$53,8^\circ$	$51,4^\circ$	

4 Diskussion

Die vorliegende Arbeit untersuchte die funktionellen Interaktionen zwischen der Beckenkipfung und der azetabuläre Orientierung.

4.1 Zuverlässigkeit der verwendeten Methode

Wassilew et al. entwickelten eine Methode, mit Hilfe derer eine zuverlässige Bestimmung der azetabulären Orientierung ermöglicht werden konnte. Gleichmaßen wie in dieser Studie beruhte die Auswertung auf einer CT – basierten, dreidimensionalen Rekonstruktion knöcherner Beckenoberflächen. Die Extraktion der anatomischen Markierungspunkte erfolgte mit Amira®. Gezeigt werden konnte neben einer hohen Verlässlichkeit der Methode, des Weiteren eine starke Reproduzierbarkeit der gewonnenen Daten [102].

Pathologien des Azetabulums wie beispielsweise osteophytäre Veränderungen im Rahmen einer Arthrose wirken sich erschwerend auf die präzise Markierung des Pfannenrandes aus und reduzieren die Genauigkeit der Methode [114]. Die untersuchten CT – Datensätze wurden so gewählt, dass keine Pathologien an Wirbelsäule, Becken oder Hüftgelenk vorlagen. Aus diesem Grund konnte die Methode für die Bestimmung der azetabulären Orientierung angewandt werden.

Die Festlegung der Pfanneneingangsebene erfolgte mittels manueller Markierung des knöchernen Pfannenrandes. Mindestens 25 Markierungspunkte definierten die Ebene im Rahmen dieser Arbeit, während der Pfannenrand im Literaturvergleich durch mindestens zehn [66, 115] bis mindestens fünfzehn [116] Punkte markiert wurde.

4.2 Azetabuläre Orientierung

Anhand dieser Studie konnte gezeigt werden, dass die anatomische Anteversion für die weiblichen Becken im Vergleich zu den Männern höher ausfiel. Dementsprechend zeigten die Frauen einen Mittelwert von $20,0^\circ \pm 4,4^\circ$, die Männer von $17,2^\circ \pm 4,2^\circ$. Der Zusammenhang zwischen Geschlecht und Anteversion erwies sich als statistisch signifikant ($p < 0,005$, Tabelle 7).

Diskussion

Bestimmte man die funktionelle Anteversion, ergab sich ein Mittelwert von $20.6^\circ \pm 4.1^\circ$ für das weibliche und von $17.2^\circ \pm 4.5^\circ$ für das männliche Kollektiv und demgemäß ebenfalls eine signifikant größere Anteversion für die weiblichen Becken ($p < 0,001$, Tabelle 8).

Der geschlechterspezifische Unterschied der azetabulären Anteversion erwies sich in anderen Studien ebenfalls als statistisch signifikant. Während die Differenz bei Murtha et al. etwas größer ausfiel, entspricht sie in etwa den Werten bei Tohtz et al. und Higgins et al. (Tabelle 20).

Tabelle 20: Werte der Anteversion im Literaturvergleich

Autor	Publikationsjahr	Anteversion		
		Frauen	Männer	Differenz
Maruyama et al. [117]	2001	$21,3^\circ \pm 7,1^\circ$	$18,5^\circ \pm 5,8^\circ$	-
Murtha et al. [118]	2008	$24,1^\circ$	$19,3^\circ$	$4,8^\circ$
Tohtz et al. [116]	2010	$24,63^\circ \pm 6,61^\circ$	$21,31^\circ \pm 6,17^\circ$	$3,3^\circ$
Higgins et al. [119]	2014	anatomisch:		
		$24,7^\circ \pm 6,6^\circ$	$21,5^\circ \pm 6,1^\circ$	$3,5^\circ$
		radiologisch:		
		$20,5^\circ \pm 5,8^\circ$	$17,5^\circ \pm 5,0^\circ$	$3,5^\circ$
		operativ:		
		$32,6^\circ \pm 8,8^\circ$	$28,0^\circ \pm 7,6^\circ$	$3,5^\circ$

stat. signifikant = statistisch signifikant, (-) = nicht angegeben

Die azetabuläre Inklination in Relation zur APP bzw. Tischebene zeigte Mittelwerte von $46,8^\circ \pm 3,4^\circ$ bzw. $46,7^\circ \pm 3,5^\circ$ für die Frauen und $46,9^\circ \pm 3,9^\circ$ bzw. $46,9^\circ \pm 3,8^\circ$ für die

Diskussion

Männer. Eine Differenz zwischen den Geschlechtern stellte sich demnach nicht dar (Tabelle 7 und 8).

Im Vergleich der Literatur konnte für die Inklination keine signifikante Differenz zwischen den Geschlechtern entsprechend den Ergebnissen dieser Arbeit festgestellt werden. Hingegen legten Higgins et al. eine statistische signifikante Divergenz von $1,4^\circ$ für die anatomische Inklination dar, die für die radiologische und operative Inklination jedoch nicht bestätigt werden konnte (Tabelle 21).

Tabelle 21: Werte der Inklination im Literaturvergleich

Autor	Publikationsjahr	Inklination		
		Frauen	Männer	Differenz
Murtha et al. [118]	2008	$57,1^\circ$	$55,5^\circ$	-
Tohtz et al. [116]	2010	$53,0^\circ \pm 6,14^\circ$	$53,58^\circ \pm 6,68^\circ$	-
Higgins et al. [119]	2014	anatomisch:		
		$57,1^\circ \pm 4,5^\circ$	$55,7^\circ \pm 3,9^\circ$	$1,4^\circ$
		radiologisch:		
		$54,3^\circ \pm 4,5^\circ$	$53,6^\circ \pm 4,1^\circ$	-
		operativ:		
		$49,2^\circ \pm 4,2^\circ$	$49,9^\circ \pm 4,1^\circ$	-

(-) = keine signifikante Differenz vorhanden

4.3 Beckenkipfung

Die eingangs aufgeführte große, interindividuelle Schwankungsbreite der Beckenkipfung (Tabelle 1) konnte in dieser Arbeit bestätigt werden. Mit einem Schwankungsbereich des Gesamtkollektivs von $-18,3^\circ$ bis $12,7^\circ$ ergab sich ein Mittelwert der Beckenkipfung von $-0,1^\circ \pm 5,5^\circ$ (Tabelle 9). Nishihara [62], Grammatopoulos [65] und DiGioia et al. [52] wiesen eine größere Schwankungsbreite der Beckenkipfung nach. Lembeck et al. untersuchten eine Gruppe von 30 gesunden Männern zwischen 20 und 43 Jahren und eruierte eine verminderte Beckenkipfung im

Diskussion

Vergleich zu den Ergebnissen dieser Arbeit [60]. Die Untersuchungen von Murphy und Babisch et al. ergaben eine verstärkte Beckenkipfung [61, 64]. In die Studien eingeschlossen wurden Patienten mit bekannter Deformität des Hüftgelenkes (Koxarthrose, Dysplasie, FAI), wodurch die Zunahme der anterioren Beckenkipfung erklärt werden kann.

Die Beckenkipfung wurde in Rückenlage bestimmt, eine Aussage über lageabhängige, dynamische Veränderungen kann folglich nicht getroffen werden.

Mit einer durchschnittlichen Beckenkipfung von $-0,2^\circ \pm 5,7^\circ$ der Frauen und $-0,3^\circ \pm 5,4^\circ$ der Männer konnte keine geschlechterspezifische Abhängigkeit eruiert werden ($p > 0,05$). Bestätigende Aussagen diesbezüglich existieren in der Literatur [52].

In unserer Arbeit konnte keine Korrelation zwischen dem Alter der untersuchten Individuen und der Beckenkipfung hergestellt werden ($p > 0,05$), wohingegen in der Literatur eine Zunahme der posterioren Beckenkipfung mit steigendem Lebensalter beobachtet werden konnte [68, 69]. Das mittlere Alter dieser Studie betrug $56,9 \pm 15,8$ Jahre. Bedingt durch die starke Verteilung vor allem in Richtung des hohen Alters ist es zu erklären, dass sich keine Korrelation darstellen ließ.

Insgesamt 21% des untersuchten Kollektivs ließen eine übermäßige Beckenkipfung erkennen, die sich für 12 Personen in einer verminderten und für 17 Personen in einer verstärkten Kippung des Beckens äußerte. Für das untersuchte Kollektiv präsentierten diejenigen Personen mit einer übermäßigen Ausrichtung des Beckens entlang der sagittalen Ebene eine erhöhte anteriore Beckenkipfung von $8,5^\circ \pm 1,8^\circ$ bzw. eine gesteigerte posteriore Kippung des Beckens von $-10,3^\circ \pm 4,5^\circ$ (Tabelle 10). Geschlechterspezifische Differenzen wurden nicht festgestellt.

Bereits in früheren Studien war die Beckenkipfung Gegenstand verschiedenster Untersuchungen, die unter anderem der Beurteilung der prozentualen Verteilung der Beckenkipfung innerhalb einer Population dienten.

Obwohl im Rahmen der statistischen Auswertung dieser Arbeit keine Normalverteilung vorausgesetzt wurde, sind die Ergebnisse dieser Arbeit mit der Literatur vergleichbar.

Diskussion

Dementsprechend analysierte neben Zhu et al. auch Marrat et al. den prozentualen Anteil eines Kollektivs, der eine Kippung des Beckens von mehr als 10° bzw. -10° aufwies. Mit anteilig 16,1% bzw. 17% des Gesamtkollektivs konnten ähnliche Daten in beiden Studien eruiert werden [53, 56]. Während die im Rahmen dieser Arbeit erhobene posteriore Beckenkippung in etwa -10° entsprach, fiel die erhöhte anteriore Beckenkippung mit $8,5^\circ \pm 1,8^\circ$ etwas niedriger als 10° aus.

4.4 Einfluss der Beckenkippung auf die Pfannenorientierung

4.4.1 Nichtparametrische Korrelationsanalyse

Im Rahmen der nichtparametrischen Korrelationsanalyse konnte zwischen der anatomischen Anteversion und der Beckenkippung eine positive Korrelation dargestellt werden, die für beide Geschlechter durch eine statistische Signifikanz gekennzeichnet war ($p < 0,01$). Während mit zunehmender Anteversion die Beckenkippung steigt, d.h. die anteriore Beckenkippung zunimmt, sinkt folglich die Beckenkippung bei Abnahme der Anteversion. Dies bedeutet definitionsgemäß eine Zunahme der posterioren Beckenkippung. Derweil diese Korrelation bei den Frauen eine deutliche Ausprägung zeigte ($r = 0,698$, $R^2 = 0,523$), erwies sie sich für das männliche Geschlecht als mäßig stark vorhanden ($r = 0,396$, $R^2 = 0,249$, Tabelle 11).

Insgesamt 20 Frauen und 23 Männer, dementsprechend 43 Personen (31%) des untersuchten Gesamtkollektivs, wiesen eine Anteversion außerhalb einer Standardabweichung auf. Festgestellt werden konnte für die Gruppe mit einer vermehrten Anteversion eine Zunahme des Mittelwertes der Beckenkippung von $-0,1^\circ \pm 5,5^\circ$ auf $4,3^\circ \pm 4,7^\circ$ (Frauen: $5,6^\circ \pm 4,5^\circ$, $p < 0,05$, Männer: $2,7^\circ \pm 4,7^\circ$, $p < 0,05$). Die Becken der Personen mit einer verminderten Anteversion, wiesen eine zunehmend posteriore Beckenkippung mit einem Mittelwert von $-4,9^\circ \pm 6,5^\circ$ auf (Frauen: $-4,5^\circ \pm 6,5^\circ$, $p < 0,05$, Männer: $-5,4^\circ \pm 7,0^\circ$, $p < 0,05$, Tabelle 12).

Eine mäßig ausgeprägte, negative Korrelation wurde zwischen der Anteversion in Relation zu der Tischebene und der Beckenkippung mit einer statistischen Signifikanz für die Frauen ($p < 0,05$, $r = -0,324$) und die Männer ($p < 0,01$, $r = -0,427$) erhoben. Dies bedeutet grundsätzlich, dass eine vermehrt antevertierte Hüftgelenkspfanne relativ zu der Tischebene mit einer zunehmend posterioren Beckenkippung einhergeht,

Diskussion

während eine geringe Anteversion mit einer steigenden, anterioren Beckenkipfung assoziiert ist. Mittels der durchgeführten Regressionsanalyse (Frauen: $R^2 = 0,075$, Männer: $R^2 = 0,175$) konnte hingegen für beide Geschlechter gezeigt werden, dass die Streuung der Beckenkipfung im Modell durch die azetabuläre Anteversion kaum bis geringfügig erklärt werden kann (Tabelle 13).

Für 11 Frauen und 23 Männer des Kollektivs (entsprechend 24%) konnte eine Anteversion relativ zu der Tischebene außerhalb einer Standardabweichung eruiert werden. Mit einem Mittelwert von $-2,5^\circ \pm 4,2^\circ$ (Frauen: $-4,3^\circ \pm 6,2^\circ$, $p > 0,05$, Männer: $-1,2^\circ \pm 3,4^\circ$, $p < 0,05$) stellte sich eine vermehrt posteriore Beckenkipfung bei erhöhter Anteversion dar, während Personen mit einer vermindert antevertierten Pfanne eine durchschnittliche anteriore Beckenkipfung von $2,9^\circ \pm 4,7^\circ$ (Frauen: $1,1^\circ \pm 3,4^\circ$, $p > 0,05$, Männer: $4,2^\circ \pm 4,0^\circ$, $p < 0,05$, Tabelle 14) aufwiesen. Demgemäß besteht für das weibliche Geschlecht kein statistischer Unterschied.

Die Korrelationsanalyse der Inklination des männlichen Geschlechtes als ein weiterer Pfannenorientierungsparameter zeigte eine geringfügig positive Korrelation relativ zur APP ($p < 0,001$, $r = 0,384$), während eine statistische signifikante Korrelation für die Männer in Relation zur Tischebene ($r = 0,03$, $p = 0,78$) sowie für die Frauen ($p = 0,09$) in Relation zu beiden Referenzebenen nicht nachgewiesen werden konnte.

4.4.2 Kompensationsmechanismus

Im direkten Vergleich der durchgeführten Korrelationsanalysen trat bei den Frauen die positive Korrelation der Anteversion in Relation zur APP und der Beckenkipfung deutlich stärker hervor als die negative Korrelation zwischen der Anteversion relativ zu der Tischebene und der Beckenkipfung. Eine in etwa gleich stark mäßig bis geringfügige Ausprägung zeigte die männliche Kohorte für die durchgeführten Korrelationsanalysen.

Es lässt sich feststellen, dass bei erhöhter anatomischer Anteversion die dabei gleichzeitig bestehende vordere Beckenkipfung die funktionelle Anteversion des Azetabulums reduziert. Umgekehrtes gilt für die verminderte anatomische Anteversion, bei welcher die zugleich beobachtete vermehrte hintere Beckenkipfung die funktionelle

Diskussion

Anteversion vergrößert und normalisiert. Es kann gefolgert werden, dass die Beckenkipfung einen kompensatorischen sowie stabilisierenden Effekt auf die Orientierung des Azetabulums ausübt, der für das weibliche Geschlecht in deutlich stärkerem Maße vorhanden ist.

Demgemäß weisen pathologische Veränderungen des Hüftgelenkes, deren Deformitäten in einer zunehmenden Pfannenanteversion resultieren, dies z.B. im Rahmen der Hüftgelenksdysplasie [34], häufig eine Progression der anterioren Beckenkipfung mit konsekutiv sekundärer lumbalen Lordose auf [120]. Selbige klinische Beobachtungen konnten für degenerative, arthrotische Prozesse erhoben werden [21, 70], wobei die anteriore Beckenkipfung bei Patienten mit Hüftgelenksdysplasie im Vergleich zu primär coxarthrotischen Pathologien signifikant um 4,7 Grad höher ausgeprägt ist [64].

4.5 Zuverlässigkeit der Referenzebenen unter Berücksichtigung der Beckenkipfung

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgte des Weiteren die Prüfung der Zuverlässigkeit der zwei analysierten Referenzebenen unter der Berücksichtigung der Beckenkipfung.

Eine physiologische Beckenkipfung konnte für 109 Personen und dementsprechend 79% des Gesamtkollektivs festgestellt werden. Anhand beider Referenzebenen konnten dieselben Ergebnisse für die azetabuläre Orientierung bestimmt werden.

Die in Tabelle 15 aufgeführten Daten zeigen die Resultate dieser Analyse. Während die Anteversion $18,3^\circ \pm 4,5^\circ$ bzw. $18,5^\circ \pm 4,6^\circ$ in Relation zur APP bzw. Tischebene betrug, wies die azetabuläre Inklination mit einem Mittelwert von $46,9^\circ \pm 3,7^\circ$ identische Ergebnisse für beide Referenzebenen auf.

Begründet werden kann dieses Resultat durch die Tatsache, dass die in dieser Arbeit erhobene Beckenkipfung mit $-0,1^\circ \pm 5,5^\circ$ im Mittel nahezu null Grad betrug und folglich die APP und die Tischebene durch eine parallele Ausrichtung gekennzeichnet waren bzw. die Ebenen einander entsprachen. In diesem Fall weisen Anteversion und

Diskussion

Inklination im Rahmen intra – und postoperativer Evaluierung kongruente Ergebnisse auf [121].

Wohlrab et al. stellten fest, dass die in Relation zu den beiden Referenzebenen bestimmten Pfannenorientierungsparameter nur geringfügige sowie statistisch nicht signifikante Differenzen aufwiesen und zeigten so die zuverlässige Anwendbarkeit sowohl der APP als auch der Tischebene im Rahmen hüftchirurgischer Verfahren. Die Anteversion relativ zur APP betrug $23,8^\circ \pm 7,1^\circ$ (links) und $24,8^\circ \pm 6,7^\circ$ (rechts), relativ zur Tischebene $24,7^\circ \pm 6,8^\circ$ (links) und $26,1^\circ \pm 6,6^\circ$ (rechts). Ebenso wies die Inklination relativ zur APP (links: $44,1^\circ \pm 4,0^\circ$, rechts: $44,6^\circ \pm 4,1^\circ$) identische Ergebnisse zur Tischebene (links: $44,6^\circ \pm 4,3^\circ$, rechts: $44,4^\circ \pm 4,1^\circ$) auf [85]. Im Vergleich zu dieser Arbeit wurde hingegen keine Korrelationsanalyse mit Berücksichtigung der Beckenkipfung durchgeführt, wodurch die Ergebnisse erklärt werden können.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Auswahl der Referenzebene keine Konsequenz für die Bestimmung der azetabulären Orientierung hat, solange das Becken physiologisch gekippt ist. Berücksichtigt werden muss dabei, dass diese physiologische Beckenkipfung bei nur knapp 80% des Kollektivs vorlag.

Des Weiteren wurde die Zuverlässigkeit der Referenzebenen der 29 Personen bzw. 21% des Gesamtkollektivs untersucht, deren Becken übermäßig gekippt war.

Bei allen 12 Personen differierte ab einer posterioren Kippung des Beckens von $-10,3^\circ \pm 4,5^\circ$ die Anteversion mit $13,3^\circ \pm 3,9^\circ$ in Relation zur APP von der Anteversion in Relation zu der Tischebene mit $20,5^\circ \pm 3,1^\circ$ ($p = 0,001$, Tabelle 16). Die Differenz erwies sich für die Frauen mit $8,3^\circ \pm 3,1^\circ$ im Vergleich zu den Männern mit $7,7^\circ \pm 3,6^\circ$ deutlich ausgeprägter.

In gleichem Maße wie für die übermäßig posteriore Beckenkipfung konnte für die verstärkt anteriore Beckenkipfung ein Einfluss auf die Referenzebenen dargelegt werden. Alle 17 Personen präsentierten ab einer durchschnittlichen anterioren Beckenkipfung von $8,5^\circ \pm 1,8^\circ$ eine Divergenz der Anteversion, die sich auf $23,7^\circ \pm 3,4^\circ$ in Relation zur APP und auf $17,8^\circ \pm 3,2^\circ$ in Relation zu der Tischebene belief ($p =$

Diskussion

0,002, Tabelle 17) und mit einer Differenz von $6,2^\circ \pm 1,0^\circ$ für die Frauen ebenfalls größer ausfiel als für die Männer mit $5,4^\circ \pm 2,0^\circ$.

Die beiden untersuchten Referenzebenen APP und die Tischebene galten laut vorherigen Studien trotz des Einflusses der Beckenkipfung als gleichermaßen geeignet für die exakte Bestimmung der azetabulären Orientierung [66, 67, 85]. Es zeigte sich eine deutliche Korrelation der anatomischen Anteversion und der Beckenkipfung insbesondere für das weibliche Geschlecht. Während die APP die Beckenkipfung indirekt berücksichtigt, wird die Orientierung des Beckens in der sagittalen Ebene durch die Tischebene nicht beachtet. Infolgedessen erscheint die funktionelle Anteversion nahezu physiologisch, trotz tatsächlicher Differenz (Abbildung 10).

Diesbezüglich kann geschlussfolgert werden, dass die Tischebene bei verstärkt anteriorer bzw. posteriorer Beckenkipfung keine zuverlässige Referenzebene für die Bestimmung der anatomischen Pfannenanteversion darstellt.

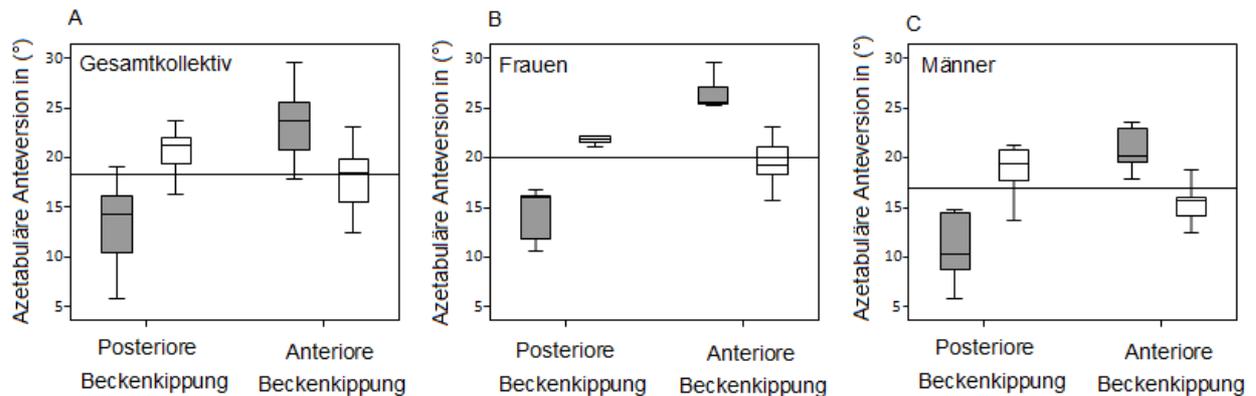


Abbildung 9: Einfluss der Beckenkipfung auf die anatomische (grau) und funktionelle (weiß) Anteversion, Gesamtkollektiv (A), Frauen (B), Männer (C)

Neben der Datenerhebung der Pfannenanteversion erfolgte des Weiteren die Analyse der azetabulären Inklination in gleicher Weise.

Die weiblichen Untersuchungspersonen wiesen eine geringe Differenz der Inklination zwischen den Referenzebenen von $2,8^\circ \pm 1,0^\circ$ bei übermäßig posteriorer

Diskussion

Beckenkipfung auf. Dies unterschied sich nur unwesentlich von der Differenz der Inklination des männlichen Kollektivs mit $2,1^\circ \pm 0,9^\circ$ (Tabelle 18).

In gleicher Weise beeinflusste die übermäßige anteriore Kippung des Beckens die Referenzebenen für die Bestimmung der Inklination in nur geringfügigem Maße. Die Frauen zeigten eine Differenz von $2,8^\circ \pm 0,5^\circ$ ($p = 0,02$) zwischen den Referenzebenen, die sich von den männlichen Becken mit $2,0^\circ \pm 0,8^\circ$ ($p = 0,04$) nur unerheblich unterschied (Tabelle 19).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass eine erhöhte posteriore bzw. anteriore Beckenkipfung einen Einfluss auf die Pfannenorientierungsparameter ausübt, der sich im Vergleich zur Anteversion für die Inklination durch einen deutlich geringeren Ausprägungsgrad darstellen ließ. Dies kann anhand vorheriger Studien bestätigt werden (Tabelle 4).

So untersuchten Lembeck et al. den Einfluss der Beckenkipfung auf die in Relation zur APP bestimmte Orientierung des Azetabulums im Hinblick auf die Zuverlässigkeit navigierter Hüftchirurgie anhand eines 30 Personen umfassenden Kollektivs. Für eine Dorsalkippung des Beckens um einen Grad, konnte eine Zunahme der azetabulären Anteversion von 0,7 Grad eruiert werden[60].

Babisch et al., Malik et al. sowie van Bosse et al. ermittelten eine Abweichung der Anteversion um 0,8 Grad für jede Veränderung der Beckenkipfung um einen Grad [64, 111, 112]. Die zusätzliche Analyse des Einflusses der Beckenkipfung auf die Inklination erwies sich mit einer Divergenz von 1,5 Grad als deutlich weniger betroffen [64].

In einer weiteren Studie großer Fallzahl wurden durch Zhu et al. anhand von 436 Patienten erhoben, dass eine Veränderung der Beckenkipfung um einen Grad die Anteversion konsekutiv um 0,8 Grad abweichen lässt, während die Inklination trotz extensiver Beckenkipfungen nur minimal beeinflusst wird. So ließ sich eine Differenz für die Inklination zwischen der APP und der Tischebene von durchschnittlich $1,7^\circ \pm 1,5^\circ$ feststellen [56].

Diskussion

Dandachli et al. erhoben die Daten für den Einfluss der Beckenkipfung auf die funktionelle Orientierung des Azetabulums anhand von 93 CT – Datensätzen mittels derer eine Minderung der azetabulären Anteversion um 2,5 bis 5 Grad für eine Zunahme der Beckenkipfung um fünf Grad nachgewiesen werden konnte. Der Effekt der Beckenkipfung auf die Inklination erwies sich ebenfalls als geringfügig [113].

4.6 Funktioneller Aspekt

Unter der Berücksichtigung des beschriebenen, kompensatorischen Effektes der Beckenkipfung auf die azetabuläre Orientierung ergeben sich verschiedene funktionelle Aspekte, die im Folgenden näher erläutert werden sollen.

Sowohl die Tischebene im Rahmen konventioneller Hüftchirurgie als auch die im Bereich der navigierten Chirurgie angewandte APP gelten für die Bestimmung der azetabulären Orientierung als zuverlässige Referenzebenen [66, 85, 87, 98]. Gemessen an den außerhalb der sicheren Zone positionierten Pfannen ist die konventionelle Operationsmethode des Weiteren durch eine hohe Zahl inakkuratere Pfannenpositionierungen gekennzeichnet (Tabelle 3).

Trotz dessen konnten keine signifikanten Differenzen der postoperativen Luxationsrate zwischen der konventionellen und der navigierten Methode eruiert werden [122]. Einen Erklärungsansatz für diese Beobachtung bietet der zuvor erörterte Kompensationsmechanismus, der eine inakkurate Pfannenpositionierung mit konsekutiv inexakter, intraoperativer Orientierung des Azetabulums mittels postoperativer, stabilisierender Ausrichtung des Beckens ausgleicht.

Das weibliche Geschlecht als ein wesentlicher Risikofaktor postoperativer Prothesendislokationen stellt einen weiteren funktionellen Aspekt des Einflusses der Beckenkipfung auf die azetabuläre Orientierung dar [81, 83, 85, 86, 89]. Wie bereits erwähnt, ist die positive Korrelation zwischen der azetabulären Anteversion und der Beckenkipfung für die Frauen im Vergleich zu den Männern in besonderem Maße ausgeprägt, d.h. der kompensatorische Effekt der Beckenkipfung auf die Anteversion ist stark vorhanden. Mit dem Wissen über den stabilisierenden Effekt der Beckenkipfung auf die azetabuläre Anteversion, muss folglich die Position des

Diskussion

weiblichen Beckens bei bildgebenden und operativen Verfahren in Rückenlage genau berücksichtigt werden. Die Vernachlässigung dieser Tatsache kann die stete Zugehörigkeit des weiblichen Geschlechtes zu den patientenspezifischen Risikofaktoren von Komplikationen nach hüftendoprothetischen Eingriffen begründen.

4.7 Klinische Relevanz

Die Implantation eines alloarthroplastischen Hüftgelenkersatzes stellt einen erfolgreichen sowie häufig durchgeführten hüftchirurgischen Eingriff dar [55, 73], deren zweithäufigste Komplikation nach der aseptischen Lockerung in der Prothesendislokation besteht [75]. Die inakkurate Bestimmung der azetabulären Orientierung mit konsekutiv fehlerhafter Pfannenpositionierung ist nach derzeitiger Studienlage eine der Hauptursachen für eine postoperative Luxation der Hüft – TEP [81, 84, 85, 87, 88]. Zudem hat die Pfannenposition einen entscheidenden Einfluss auf die Entwicklung eines Impingementsyndroms, den Gleitpaarungsverschleiß sowie das Auftreten osteolytischer Prozesse mit konsekutiver Implantatlockerung [85]. Folglich ist eine Optimierung der Pfannenpositionierung entscheidend für die postoperative Funktion einer Hüft – TEP und die Komplikationsrate.

Viele Studien untersuchten die Beckenkipfung sowie deren Konsequenz für die diagnostische und therapeutische Evaluierung der Pfannenorientierungsparameter und postulierten die unabdingbare Berücksichtigung der Beckenkipfung im Rahmen bildgebender und operativer Evaluierung mit dem Ziel einer akkuraten Bestimmung der azetabulären Orientierung [54, 69, 123-125].

Mit einer Differenz von weniger als zehn Grad zwischen dem Wechsel der Körperpositionen konnte für die Beckenkipfung eine individuelle Konstanz nachgewiesen werden [64, 66, 67].

Bezogen auf die Resultate dieser Arbeit kann folgender Schluss gezogen werden. Die Tischebene stellt bei denjenigen Individuen, die eine individuell determinierte, erhöhte anteriore bzw. posteriore Beckenkipfung aufweisen, keine zuverlässige Referenzebene für die akkurate Bestimmung der anatomischen Pfannenorientierung dar, wobei die Anteversion deutlich stärker durch Abweichungen gekennzeichnet ist als die

Diskussion

Pfanneninklination. Folglich sollte eine präoperative Evaluierung der individuellen Beckenkipfung sowie der funktionellen und anatomischen Orientierung des Azetabulums erfolgen, um eine fehlerhafte Pfannenorientierung zu vermeiden. Die präoperative Feststellung einer übermäßigen Beckenkipfung ist für die Planung des weiteren operativen Prozedere ausschlaggebend.

4.8 Limitationen

Limitationen der Studie ergeben sich resultierend aus der Tatsache, dass das Personenkollektiv der durchgeführten Studie für die computertomographischen Aufnahmen ausschließlich in neutraler Rückenlage positioniert wurde. Es erfolgte somit die strenge Beurteilung der untersuchten Parameter anhand der liegenden Körperposition. Somit bleibt unberücksichtigt, inwieweit sich die Beckenkipfung und das Sagittalprofil bei Bewegung bzw. Änderung der Körperhaltung genau verhalten. Insbesondere der funktionelle Aspekt zwischen der verstärkten Beckenkipfung und der azetabulären Orientierung im Sitzen oder Stehen bleibt ungeklärt. Die Analyse der Beckenparameter anhand verschiedener Körperpositionen könnte die Aussagekraft der spinopelvinen Interaktionen weiter optimieren. Die zuvor beschriebene individuelle Konstanz der Beckenkipfung beim Wechsel vom Liegen zum Stehen, relativiert diese Limitation.

Die Auswahl der CT – Datensätze aufgrund nicht - orthopädischer Indikationen ermöglichte einen Ausschluss hochgradiger Veränderungen des Beckens, der Hüftgelenke sowie der lumbalen Wirbelsäule. Faktoren wie Muskeln, Bänder oder Kontrakturen, die das Sagittalprofil ebenfalls beeinflussen können, fanden mittels des angewandten Verfahrens keine Berücksichtigung.

Die Methodik dieser Arbeit gilt, wie zuvor erwähnt, gegenüber intra – sowie interindividuellen Abweichungen als zuverlässig. Trotz der Annahme, dass diese Validitätsprüfung ausreichend sei, hätte die Extraktion der Markierungspunkte für diese Arbeit durch mindestens drei Beobachter erfolgen und folglich die methodische Aussagekraft erhöht werden können.

Diskussion

Des Weiteren erwies sich die exakte manuelle Bestimmung der dreidimensionalen Markierungspunkte anhand eines CT – Datensatzes als problematisch aufgrund der schwer zu erkennenden räumlichen Anordnung der Punkte in den verschiedenen Schichtansichten. Infolgedessen wurden die Datensätze mit statistischen Formmodellen bearbeitet, die die automatische Rekonstruktion der Knochenstrukturen in dreidimensionaler Form mit geschlossener Oberfläche gewährleisten. Anschließend erfolgte die Integration in den entsprechenden CT – Datensatz (Abbildung 3 und 4).

4.9 Schlussfolgerung

Das Zusammenspiel von Wirbelsäule, Hüftgelenk, und Becken ist eine funktionelle Interaktion, die durch eine wechselseitige Beeinflussung und Auslösung pathologischer Veränderungen der Strukturen untereinander gekennzeichnet ist [126-128]. Die Differenzierung der Interaktionen und das Verständnis über die physiologischen sowie pathologischen Wechselwirkungen sind folglich bedeutend für die diagnostische Evaluierung sowie die therapeutische Intervention, wobei insbesondere die individuelle Berücksichtigung der Beckenkipfung als wesentlich für die exakte Pfannenpositionierung und demgemäß für den Erfolg eines endoprothetischen Hüftgelenkersatzes gilt.

Die Ergebnisse dieser Arbeit bestätigen die zu Beginn aufgestellte Hypothese, dass die Beckenkipfung einen Einfluss auf die funktionelle Orientierung des Azetabulums ausübt, wobei dieser im Vergleich der Pfannenorientierungsparameter stärker für die azetabuläre Anteversion als die Inklination ausgeprägt ist.

So übt die Beckenkipfung einen kompensatorischen Effekt auf die funktionelle, azetabuläre Orientierung, vor allem auf die Anteversion aus, indem eine Zunahme der anterioren bzw. posterioren Beckenkipfung eine erhöhte bzw. erniedrigte Anteversion des Azetabulums ausgleicht. Dadurch bedingt, dass die Beckenkipfung mittels der APP Berücksichtigung findet, während die Tischebene diese nicht beachtet, erscheint eine von der Norm abweichende Anteversion aufgrund der zuvor erläuterten Kompensation in Relation zur Tischebene nahezu physiologisch. In der klinischen Konsequenz lässt sich demnach feststellen, dass die Tischebene bei übermäßig gekippten Becken keine zuverlässige Referenzebene für die präzise, anatomische Pfannenorientierung darstellt.

Diskussion

Klinisch bedeutungsvoll ist dies insofern, da eine übermäßige Beckenkipfung bei circa einem Fünftel des Gesamtkollektivs und demnach einem nicht zu vernachlässigenden Anteil vorlag. Diesbezüglich sind die Evaluierung der Beckenkipfung sowie die Bestimmung der anatomischen und der funktionellen Orientierung des Azetabulums im Rahmen bildgebender sowie operativer Verfahren unabdingbar für die Gewährleistung einer genauen Orientierung der Pfanne.

Die in dieser Studie gewonnenen Erkenntnisse belegen deutlich die funktionellen spinopelvinen Interaktionen und deren klinische Relevanz. Weitere Aspekte des Sagittalprofils sowie die Wechselwirkung der Strukturen bei verschiedenen Pathologien können durch anschließende Untersuchungen erfasst werden. Ziel ist es, die gegenseitige Beeinflussung der Strukturen detailliert zu untersuchen um Rückschlüsse auf die Entstehung und die Behandlung von Pathologien geben zu können.

5 Literaturverzeichnis

1. During, J., H. Goudfrooij, W. Keessen, T.W. Beeker, and A. Crowe, *Toward standards for posture. Postural characteristics of the lower back system in normal and pathologic conditions*. Spine (Phila Pa 1976), 1985. **10**(1): p. 83-7.
2. Duval-Beaupere, G., C. Schmidt, and P. Cosson, *A Barycentremetric study of the sagittal shape of spine and pelvis: the conditions required for an economic standing position*. Ann Biomed Eng, 1992. **20**(4): p. 451-62.
3. Mac-Thiong, J.M., E. Berthonnaud, J.R. Dimar, 2nd, R.R. Betz, and H. Labelle, *Sagittal alignment of the spine and pelvis during growth*. Spine (Phila Pa 1976), 2004. **29**(15): p. 1642-7.
4. Jackson, R.P., T. Kanemura, N. Kawakami, and C. Hales, *Lumbopelvic lordosis and pelvic balance on repeated standing lateral radiographs of adult volunteers and untreated patients with constant low back pain*. Spine (Phila Pa 1976), 2000. **25**(5): p. 575-86.
5. Jackson, R.P., T. Phipps, C. Hales, and J. Surber, *Pelvic lordosis and alignment in spondylolisthesis*. Spine (Phila Pa 1976), 2003. **28**(2): p. 151-60.
6. Marty, C., B. Boisaubert, H. Descamps, J.P. Montigny, J. Hecquet, J. Legaye, and G. Duval-Beaupere, *The sagittal anatomy of the sacrum among young adults, infants, and spondylolisthesis patients*. Eur Spine J, 2002. **11**(2): p. 119-25.
7. Roussouly, P. and J.L. Pinheiro-Franco, *Biomechanical analysis of the spinopelvic organization and adaptation in pathology*. Eur Spine J, 2011. **20 Suppl 5**: p. 609-18.
8. Descamps, H., Commare-Nordmann MC, Marty C, et al., *Modification of pelvic angle during the human growth*. Biom Hum Anthropol, 1999: p. 17:59-63.
9. Mangione, P., D. Gomez, and J. Senegas, *Study of the course of the incidence angle during growth*. Eur Spine J, 1997. **6**(3): p. 163-7.
10. Jackson, R.P. and C. Hales, *Congruent spinopelvic alignment on standing lateral radiographs of adult volunteers*. Spine (Phila Pa 1976), 2000. **25**(21): p. 2808-15.
11. Anderson, L.C. and D.J. Blake, *The anatomy and biomechanics of the hip joint*. J Back Musculoskelet Rehabil, 1994. **4**(3): p. 145-53.
12. Schünke, M., E. Schulte, and U. Schumacher, *Prometheus - Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem*, 2007, Georg Thieme Verlag. p. 406 - 433.

Literaturverzeichnis

13. Rissech, C. and A. Malgosa, *Pubis growth study: applicability in sexual and age diagnostic*. Forensic Sci Int, 2007. **173**(2-3): p. 137-45.
14. Rissech, C., M. Garcia, and A. Malgosa, *Sex and age diagnosis by ischium morphometric analysis*. Forensic Sci Int, 2003. **135**(3): p. 188-96.
15. Bruckl, R. and D. Tonnis, [*The growth of the juvenile hip joint. A planimetric study of x-ray films (author's transl)*]. Arch Orthop Trauma Surg, 1979. **93**(2): p. 149-59.
16. Weiner, L.S., M.A. Kelley, R.I. Ulin, and D. Wallach, *Development of the acetabulum and hip: computed tomography analysis of the axial plane*. J Pediatr Orthop, 1993. **13**(4): p. 421-5.
17. Faust, M.S., *Somatic development of adolescent girls*. Monogr Soc Res Child Dev, 1977. **42**(1): p. 1-90.
18. W, T.T., *Age changes in the pubic bone: the male white pubis*. Am J Phys Anthropol, 1921: p. 3:285-339.
19. Bowman, K.F., Jr., J. Fox, and J.K. Sekiya, *A clinically relevant review of hip biomechanics*. Arthroscopy, 2010. **26**(8): p. 1118-29.
20. Johnston, R.C., *Mechanical considerations of the hip joint*. Arch Surg, 1973. **107**(3): p. 411-7.
21. Niethard, F.U., J. Pfeil, and P. Biberthaler, *Duale Reihe - Orthopädie und Unfallchirurgie*. 2009: Georg Thieme Verlag. 20, 509 - 516, 530 - 534.
22. Gold, G.E., F. Cicuttini, M.D. Crema, F. Eckstein, A. Guermazi, R. Kijowski, T.M. Link, E. Maheu, J. Martel-Pelletier, C.G. Miller, J.P. Pelletier, C.G. Peterfy, H.G. Potter, F.W. Roemer, and D.J. Hunter, *OARSI Clinical Trials Recommendations: Hip imaging in clinical trials in osteoarthritis*. Osteoarthritis Cartilage, 2015. **23**(5): p. 716-731.
23. Bazak, N., M. Galanski, A. Chavan, B. Wippermann, D. Högemann, H. Kausche, A. Koehler, A. Leppert, J. Lotz, and H. Milbradt, *Kompendium der traumatologischen Röntgendiagnostik*. 2013: Springer Berlin Heidelberg.
24. Clohisy, J.C., P.E. Beaulé, A. O'Malley, M.R. Safran, and P. Schoenecker, *AOA symposium. Hip disease in the young adult: current concepts of etiology and surgical treatment*. J Bone Joint Surg Am, 2008. **90**(10): p. 2267-81.
25. Lewis, C.L., A. Khuu, and L.N. Marinko, *Postural correction reduces hip pain in adult with acetabular dysplasia: A case report*. Man Ther, 2015. **20**(3): p. 508-12.

Literaturverzeichnis

26. Coobs, B.R., A. Xiong, and J.C. Clohisy, *Contemporary Concepts in the Young Adult Hip Patient: Periacetabular Osteotomy for Hip Dysplasia*. J Arthroplasty, 2015.
27. Nunley, R.M., H. Prather, D. Hunt, P.L. Schoenecker, and J.C. Clohisy, *Clinical presentation of symptomatic acetabular dysplasia in skeletally mature patients*. J Bone Joint Surg Am, 2011. **93 Suppl 2**: p. 17-21.
28. Eddine, T.A., H. Migaud, C. Chantelot, A. Cotten, C. Fontaine, and A. Duquennoy, *Variations of pelvic anteversion in the lying and standing positions: analysis of 24 control subjects and implications for CT measurement of position of a prosthetic cup*. Surg Radiol Anat, 2001. **23**(2): p. 105-10.
29. Ibrahim, T., M. Riaz, and A. Hegazy, *The prevalence of developmental dysplasia of the hip in idiopathic clubfoot: a systematic review and meta-analysis*. Int Orthop, 2015.
30. Kolb, A., N. Schweiger, M. Mailath-Pokorny, A. Kaider, G. Hobusch, C. Chiari, and R. Windhager, *Low incidence of early developmental dysplasia of the hip in universal ultrasonographic screening of newborns: analysis and evaluation of risk factors*. Int Orthop, 2015.
31. Loder, R.T. and E.N. Skopelja, *The epidemiology and demographics of hip dysplasia*. ISRN Orthop, 2011. **2011**: p. 238607.
32. Ortiz-Neira, C.L., E.O. Paolucci, and T. Donnon, *A meta-analysis of common risk factors associated with the diagnosis of developmental dysplasia of the hip in newborns*. Eur J Radiol, 2012. **81**(3): p. e344-51.
33. Bache, C.E., J. Clegg, and M. Herron, *Risk factors for developmental dysplasia of the hip: ultrasonographic findings in the neonatal period*. J Pediatr Orthop B, 2002. **11**(3): p. 212-8.
34. Fujii, M., Y. Nakashima, T. Sato, M. Akiyama, and Y. Iwamoto, *Acetabular tilt correlates with acetabular version and coverage in hip dysplasia*. Clin Orthop Relat Res, 2012. **470**(10): p. 2827-35.
35. Loder, R.T., *The demographics of slipped capital femoral epiphysis. An international multicenter study*. Clin Orthop Relat Res, 1996(322): p. 8-27.
36. Chung, S.M., S.C. Batterman, and C.T. Brighton, *Shear strength of the human femoral capital epiphyseal plate*. J Bone Joint Surg Am, 1976. **58**(1): p. 94-103.

37. Monazzam, S., V. Krishnamoorthy, B. Bittersohl, J.D. Bomar, and H.S. Hosalkar, *Is the acetabulum retroverted in slipped capital femoral epiphysis?* Clin Orthop Relat Res, 2013. **471**(7): p. 2145-50.
38. Dodds, M.K., D. McCormack, and K.J. Mulhall, *Femoroacetabular impingement after slipped capital femoral epiphysis: does slip severity predict clinical symptoms?* J Pediatr Orthop, 2009. **29**(6): p. 535-9.
39. Fraitzl, C.R., W. Kafer, M. Nelitz, and H. Reichel, *Radiological evidence of femoroacetabular impingement in mild slipped capital femoral epiphysis: a mean follow-up of 14.4 years after pinning in situ.* J Bone Joint Surg Br, 2007. **89**(12): p. 1592-6.
40. Rab, G.T., *The geometry of slipped capital femoral epiphysis: implications for movement, impingement, and corrective osteotomy.* J Pediatr Orthop, 1999. **19**(4): p. 419-24.
41. Amanatullah, D.F., T. Antkowiak, K. Pillay, J. Patel, M. Refaat, C.A. Toupadakis, and A.A. Jamali, *Femoroacetabular impingement: current concepts in diagnosis and treatment.* Orthopedics, 2015. **38**(3): p. 185-99.
42. Allen, D., P.E. Beaulé, O. Ramadan, and S. Doucette, *Prevalence of associated deformities and hip pain in patients with cam-type femoroacetabular impingement.* J Bone Joint Surg Br, 2009. **91**(5): p. 589-94.
43. Beck, M., M. Kalhor, M. Leunig, and R. Ganz, *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, 2005. **87**(7): p. 1012-8.
44. Zadpoor, A.A., *Etiology of Femoroacetabular Impingement in Athletes: A Review of Recent Findings.* Sports Med, 2015.
45. Yamasaki, T., Y. Yasunaga, T. Shoji, S. Izumi, S. Hachisuka, and M. Ochi, *Inclusion and Exclusion Criteria in the Diagnosis of Femoroacetabular Impingement.* Arthroscopy, 2015.
46. Cibulka, M.T., *Sacroiliac joint dysfunction as a reason for the development of acetabular retroversion: a new theory.* Physiother Theory Pract, 2014. **30**(4): p. 249-53.
47. Wassilew, G.I., M.O. Heller, G. Diederichs, V. Janz, M. Wenzl, and C. Perka, *Standardized AP radiographs do not provide reliable diagnostic measures for the assessment of acetabular retroversion.* J Orthop Res, 2012. **30**(9): p. 1369-76.

48. Monazzam, S., J.D. Bomar, J.R. Dwek, H.S. Hosalkar, and A.T. Pennock, *Development and prevalence of femoroacetabular impingement-associated morphology in a paediatric and adolescent population: a CT study of 225 patients*. Bone Joint J, 2013. **95-B**(5): p. 598-604.
49. Ganz, R., J. Parvizi, M. Beck, M. Leunig, H. Notzli, and K.A. Siebenrock, *Femoroacetabular impingement: a cause for osteoarthritis of the hip*. Clin Orthop Relat Res, 2003(417): p. 112-20.
50. Tijssen, M., R. van Cingel, L. Willemsen, and E. de Visser, *Diagnostics of femoroacetabular impingement and labral pathology of the hip: a systematic review of the accuracy and validity of physical tests*. Arthroscopy, 2012. **28**(6): p. 860-71.
51. Blondel, B., S. Parratte, P. Tropiano, V. Pauly, J.M. Aubaniac, and J.N. Argenson, *Pelvic tilt measurement before and after total hip arthroplasty*. Orthop Traumatol Surg Res, 2009. **95**(8): p. 568-72.
52. DiGioia, A.M., M.A. Hafez, B. Jaramaz, T.J. Levison, and J.E. Moody, *Functional pelvic orientation measured from lateral standing and sitting radiographs*. Clin Orthop Relat Res, 2006. **453**: p. 272-6.
53. Maratt, J.D., C.I. Esposito, A.S. McLawhorn, S.A. Jerabek, D.E. Padgett, and D.J. Mayman, *Pelvic Tilt in Patients Undergoing Total Hip Arthroplasty: When Does it Matter?* J Arthroplasty, 2014.
54. Meftah, M., A. Yadav, A.C. Wong, A.S. Ranawat, and C.S. Ranawat, *A novel method for accurate and reproducible functional cup positioning in total hip arthroplasty*. J Arthroplasty, 2013. **28**(7): p. 1200-5.
55. Stephens, A., S. Munir, S. Shah, and W.L. Walter, *The kinematic relationship between sitting and standing posture and pelvic inclination and its significance to cup positioning in total hip arthroplasty*. Int Orthop, 2014.
56. Zhu, J., Z. Wan, and L.D. Dorr, *Quantification of pelvic tilt in total hip arthroplasty*. Clin Orthop Relat Res, 2010. **468**(2): p. 571-5.
57. Blendea, S., K. Eckman, B. Jaramaz, T.J. Levison, and A.M. Digioia, 3rd, *Measurements of acetabular cup position and pelvic spatial orientation after total hip arthroplasty using computed tomography/radiography matching*. Comput Aided Surg, 2005. **10**(1): p. 37-43.

58. Uysal, E., Y. Paksoy, M. Koplay, A. Nayman, and S. Gumus, *Effects of body mass index, mesenteric and abdominal subcutaneous adipose tissue on the spinopelvic parameters*. Wien Klin Wochenschr, 2015. **127**(23-24): p. 935-41.
59. Kojima, A., T. Nakagawa, and A. Tohkura, *Simulation of acetabular coverage of femoral head using anteroposterior pelvic radiographs*. Arch Orthop Trauma Surg, 1998. **117**(6-7): p. 330-6.
60. Lembeck, B., O. Mueller, P. Reize, and N. Wuelker, *Pelvic tilt makes acetabular cup navigation inaccurate*. Acta Orthop, 2005. **76**(4): p. 517-23.
61. Murphy, W.S., G. Klingenstein, S.B. Murphy, and G. Zheng, *Pelvic tilt is minimally changed by total hip arthroplasty*. Clin Orthop Relat Res, 2013. **471**(2): p. 417-21.
62. Nishihara, S., N. Sugano, T. Nishii, K. Ohzono, and H. Yoshikawa, *Measurements of pelvic flexion angle using three-dimensional computed tomography*. Clin Orthop Relat Res, 2003(411): p. 140-51.
63. Parratte, S. and J.N. Argenson, *Validation and usefulness of a computer-assisted cup-positioning system in total hip arthroplasty. A prospective, randomized, controlled study*. J Bone Joint Surg Am, 2007. **89**(3): p. 494-9.
64. Babisch, J.W., F. Layher, and L.P. Amiot, *The rationale for tilt-adjusted acetabular cup navigation*. J Bone Joint Surg Am, 2008. **90**(2): p. 357-65.
65. Grammatopoulos, G., H.G. Pandit, R. da Assuncao, A. Taylor, P. McLardy-Smith, K.A. De Smet, D.W. Murray, and H.S. Gill, *Pelvic position and movement during hip replacement*. Bone Joint J, 2014. **96-B**(7): p. 876-83.
66. Eilander, W., S.J. Harris, H.E. Henkus, J.P. Cobb, and T. Hogervorst, *Functional acetabular component position with supine total hip replacement*. Bone Joint J, 2013. **95-B**(10): p. 1326-31.
67. Mayr, E., O. Kessler, A. Prassl, F. Rachbauer, M. Krismer, and M. Nogler, *The frontal pelvic plane provides a valid reference system for implantation of the acetabular cup: spatial orientation of the pelvis in different positions*. Acta Orthop, 2005. **76**(6): p. 848-53.
68. Lazennec, J.Y., N. Charlot, M. Gorin, B. Roger, N. Arafati, A. Bissery, and G. Saillant, *Hip-spine relationship: a radio-anatomical study for optimization in acetabular cup positioning*. Surg Radiol Anat, 2004. **26**(2): p. 136-44.
69. Legaye, J., *Influence of the sagittal balance of the spine on the anterior pelvic plane and on the acetabular orientation*. Int Orthop, 2009. **33**(6): p. 1695-700.

Literaturverzeichnis

70. Weng, W.J., W.J. Wang, M.D. Wu, Z.H. Xu, L.L. Xu, and Y. Qiu, *Characteristics of sagittal spine-pelvis-leg alignment in patients with severe hip osteoarthritis*. Eur Spine J, 2015. **24**(6): p. 1228-36.
71. AWMF - *Leitlinie Hüftdysplasie*. Leitlinien der Deutschen Gesellschaft für Orthopädie und Orthopädische Chirurgie und des Berufsverbandes der Ärzte für Orthopädie (BVO), 2002, 28.09.2012.
72. Siebenrock, K.A., C. Schaller, M. Tannast, M. Keel, and L. Buchler, *Anteverting periacetabular osteotomy for symptomatic acetabular retroversion: results at ten years*. J Bone Joint Surg Am, 2014. **96**(21): p. 1785-92.
73. Moskal, J.T. and S.G. Capps, *Improving the accuracy of acetabular component orientation: avoiding malposition*. J Am Acad Orthop Surg, 2010. **18**(5): p. 286-96.
74. Statistisches Bundesamt Wiesbaden 2014. *Fallpauschalenbezogene Krankenhausstatistik (DRG - Statistik) Operationen und Prozeduren der vollstationären Patientinnen und Patienten in Krankenhäusern - Ausführliche Darstellung*. <http://www.destatis.de>.
75. Diehl, P., M. Haenle, P. Bergschmidt, H. Gollwitzer, J. Schauwecker, R. Bader, and W. Mittelmeier, *[Cementless total hip arthroplasty: a review]*. Biomed Tech (Berl), 2010. **55**(5): p. 251-64.
76. Parratte, S., M.W. Pagnano, K. Coleman-Wood, K.R. Kaufman, and D.J. Berry, *The 2008 Frank Stinchfield award: variation in postoperative pelvic tilt may confound the accuracy of hip navigation systems*. Clin Orthop Relat Res, 2009. **467**(1): p. 43-9.
77. Lee, J.H., K.H. Na, J.H. Kim, H.Y. Jeong, and D.G. Chang, *Is pelvic incidence a constant, as everyone knows? Changes of pelvic incidence in surgically corrected adult sagittal deformity*. Eur Spine J, 2015.
78. Davis, E.T., M. Schubert, M. Wegner, and M. Haimerl, *A new method of registration in navigated hip arthroplasty without the need to register the anterior pelvic plane*. J Arthroplasty, 2015. **30**(1): p. 55-60.
79. Lass, R., B. Kubista, B. Olischar, S. Frantal, R. Windhager, and A. Giurea, *Total hip arthroplasty using imageless computer-assisted hip navigation: a prospective randomized study*. J Arthroplasty, 2014. **29**(4): p. 786-91.

Literaturverzeichnis

80. Liodakis, E., S.G. Bergeron, D.J. Zukor, O.L. Huk, L.M. Epure, and J. Antoniou, *Perioperative Complications and Length of Stay After Revision Total Hip and Knee Arthroplasties: An Analysis of the NSQIP Database*. J Arthroplasty, 2015.
81. Alberton, G.M., W.A. High, and B.F. Morrey, *Dislocation after revision total hip arthroplasty : an analysis of risk factors and treatment options*. J Bone Joint Surg Am, 2002. **84-A**(10): p. 1788-92.
82. Lazennec, J.Y., P. Boyer, M. Gorin, Y. Catonne, and M.A. Rousseau, *Acetabular anteversion with CT in supine, simulated standing, and sitting positions in a THA patient population*. Clin Orthop Relat Res, 2011. **469**(4): p. 1103-9.
83. Preininger, B., F. Haschke, and C. Perka, *[Diagnostics and therapy of luxation after total hip arthroplasty]*. Orthopade, 2014. **43**(1): p. 54-63.
84. Patel, P.D., A. Potts, and M.I. Froimson, *The dislocating hip arthroplasty: prevention and treatment*. J Arthroplasty, 2007. **22**(4 Suppl 1): p. 86-90.
85. Wohlrab, D., F. Radetzki, H. Noser, and T. Mendel, *Cup positioning in total hip arthroplasty: spatial alignment of the acetabular entry plane*. Arch Orthop Trauma Surg, 2012. **132**(1): p. 1-7.
86. Morrey, B.F., *Difficult complications after hip joint replacement. Dislocation*. Clin Orthop Relat Res, 1997(344): p. 179-87.
87. Beckmann, J., C. Luring, M. Tingart, S. Anders, J. Grifka, and F.X. Kock, *Cup positioning in THA: current status and pitfalls. A systematic evaluation of the literature*. Arch Orthop Trauma Surg, 2009. **129**(7): p. 863-72.
88. Biedermann, R., A. Tonin, M. Krismer, F. Rachbauer, G. Eibl, and B. Stockl, *Reducing the risk of dislocation after total hip arthroplasty: the effect of orientation of the acetabular component*. J Bone Joint Surg Br, 2005. **87**(6): p. 762-9.
89. Brooks, P.J., *Dislocation following total hip replacement: causes and cures*. Bone Joint J, 2013. **95-B**(11 Suppl A): p. 67-9.
90. Lewinnek, G.E., J.L. Lewis, R. Tarr, C.L. Compere, and J.R. Zimmerman, *Dislocations after total hip-replacement arthroplasties*. J Bone Joint Surg Am, 1978. **60**(2): p. 217-20.
91. McCollum, D.E. and W.J. Gray, *Dislocation after total hip arthroplasty. Causes and prevention*. Clin Orthop Relat Res, 1990(261): p. 159-70.
92. Barrack, R.L., C. Lavernia, M. Ries, R. Thornberry, and E. Tozakoglou, *Virtual reality computer animation of the effect of component position and design on*

- stability after total hip arthroplasty*. Orthop Clin North Am, 2001. **32**(4): p. 569-77, vii.
93. DiGioia, A.M., B. Jaramaz, M. Blackwell, D.A. Simon, F. Morgan, J.E. Moody, C. Nikou, B.D. Colgan, C.A. Aston, R.S. Labarca, E. Kischell, and T. Kanade, *The Otto Aufranc Award. Image guided navigation system to measure intraoperatively acetabular implant alignment*. Clin Orthop Relat Res, 1998(355): p. 8-22.
94. Digioia, A.M., 3rd, B. Jaramaz, A.Y. Plakseychuk, J.E. Moody, Jr., C. Nikou, R.S. Labarca, T.J. Levison, and F. Picard, *Comparison of a mechanical acetabular alignment guide with computer placement of the socket*. J Arthroplasty, 2002. **17**(3): p. 359-64.
95. Saxler, G., A. Marx, D. Vandeveld, U. Langlotz, M. Tannast, M. Wiese, U. Michaelis, G. Kemper, P.A. Grutzner, R. Steffen, M. von Knoch, T. Holland-Letz, and K. Bernsmann, *The accuracy of free-hand cup positioning--a CT based measurement of cup placement in 105 total hip arthroplasties*. Int Orthop, 2004. **28**(4): p. 198-201.
96. Minoda, Y., T. Kadowaki, and M. Kim, *Acetabular component orientation in 834 total hip arthroplasties using a manual technique*. Clin Orthop Relat Res, 2006. **445**: p. 186-91.
97. Bosker, B.H., C.C. Verheyen, W.G. Horstmann, and N.J. Tulp, *Poor accuracy of freehand cup positioning during total hip arthroplasty*. Arch Orthop Trauma Surg, 2007. **127**(5): p. 375-9.
98. Gandhi, R., A. Marchie, F. Farrokhyar, and N. Mahomed, *Computer navigation in total hip replacement: a meta-analysis*. Int Orthop, 2009. **33**(3): p. 593-7.
99. Lin, F., D. Lim, R.L. Wixson, S. Milos, R.W. Hendrix, and M. Makhsous, *Limitations of imageless computer-assisted navigation for total hip arthroplasty*. J Arthroplasty, 2011. **26**(4): p. 596-605.
100. Philippot, R., J. Wegrzyn, F. Farizon, and M.H. Fessy, *Pelvic balance in sagittal and Lewinnek reference planes in the standing, supine and sitting positions*. Orthop Traumatol Surg Res, 2009. **95**(1): p. 70-6.
101. Kalteis, T., M. Handel, H. Bathis, L. Perlick, M. Tingart, and J. Grifka, *Imageless navigation for insertion of the acetabular component in total hip arthroplasty: is it as accurate as CT-based navigation?* J Bone Joint Surg Br, 2006. **88**(2): p. 163-7.

Literaturverzeichnis

102. Wassilew, G.I., V. Janz, M. Heller, M. Wenzl, C. Perka, and O. Hasart, *Validation of a CT image based software for three-dimensional measurement of acetabular cup orientation*. Technol Health Care, 2011. **19**(3): p. 185-93.
103. Von Recum, J., K. Wendl, J. Korber, A. Wentzensen, and P.A. Grutzner, *[CT-free image guided acetabulum navigation in clinical routine]*. Unfallchirurg, 2003. **106**(11): p. 929-34.
104. Richolt, J.A., H. Effenberger, and M.E. Rittmeister, *How does soft tissue distribution affect anteversion accuracy of the palpation procedure in image-free acetabular cup navigation? An ultrasonographic assessment*. Comput Aided Surg, 2005. **10**(2): p. 87-92.
105. Hasart, O., C. Perka, K. Christian, P. Asbach, V. Janz, and G.I. Wassilew, *Influence of body mass index and thickness of soft tissue on accuracy of ultrasound and pointer based registration in navigation of cup in hip arthroplasty*. Technol Health Care, 2010. **18**(4-5): p. 341-51.
106. Tannast, M., F. Langlotz, M. Kubiak-Langer, U. Langlotz, and K.A. Siebenrock, *Accuracy and potential pitfalls of fluoroscopy-guided acetabular cup placement*. Comput Aided Surg, 2005. **10**(5-6): p. 329-36.
107. Wolf, A., A.M. Digioia, 3rd, A.B. Mor, and B. Jaramaz, *Cup alignment error model for total hip arthroplasty*. Clin Orthop Relat Res, 2005(437): p. 132-7.
108. Wassilew, G.I., M.O. Heller, O. Hasart, C. Perka, I. Sudhoff, V. Janz, G.N. Duda, and C. Konig, *Ultrasound-based computer navigation of the acetabular component: a feasibility study*. Arch Orthop Trauma Surg, 2012. **132**(4): p. 517-25.
109. Zilber, S., J.Y. Lazennec, M. Gorin, and G. Saillant, *Variations of caudal, central, and cranial acetabular anteversion according to the tilt of the pelvis*. Surg Radiol Anat, 2004. **26**(6): p. 462-5.
110. Au, J., D.M. Perriman, T.M. Neeman, and P.N. Smith, *Standing or supine x-rays after total hip replacement - when is the safe zone not safe?* Hip Int, 2014. **24**(6): p. 616-623.
111. Malik, A., Z. Wan, B. Jaramaz, G. Bowman, and L.D. Dorr, *A validation model for measurement of acetabular component position*. J Arthroplasty, 2010. **25**(5): p. 812-9.

Literaturverzeichnis

112. van Bosse, H.J., D. Lee, E.R. Henderson, D.A. Sala, and D.S. Feldman, *Pelvic positioning creates error in CT acetabular measurements*. Clin Orthop Relat Res, 2011. **469**(6): p. 1683-91.
113. Dandachli, W., S. Ul Islam, R. Richards, M. Hall-Craggs, and J. Witt, *The influence of pelvic tilt on acetabular orientation and cover: a three-dimensional computerised tomography analysis*. Hip Int, 2013. **23**(1): p. 87-92.
114. Madadi, F., H. Yazdanshenas, F. Madadi, and S. Bazargan-Hejazi, *Double acetabular wall--a misleading point for hip arthroplasty: an anatomical, radiological, clinical study*. Int Orthop, 2013. **37**(6): p. 1007-11.
115. Lubovsky, O., E. Peleg, L. Joskowicz, M. Liebergall, and A. Khoury, *Acetabular orientation variability and symmetry based on CT scans of adults*. Int J Comput Assist Radiol Surg, 2010. **5**(5): p. 449-54.
116. Tohtz, S.W., D. Sassy, G. Matziolis, B. Preininger, C. Perka, and O. Hasart, *CT evaluation of native acetabular orientation and localization: sex-specific data comparison on 336 hip joints*. Technol Health Care, 2010. **18**(2): p. 129-36.
117. Maruyama, M., J.R. Feinberg, W.N. Capello, and J.A. D'Antonio, *The Frank Stinchfield Award: Morphologic features of the acetabulum and femur: anteversion angle and implant positioning*. Clin Orthop Relat Res, 2001(393): p. 52-65.
118. Murtha, P.E., M.A. Hafez, B. Jaramaz, and A.M. DiGioia, 3rd, *Variations in acetabular anatomy with reference to total hip replacement*. J Bone Joint Surg Br, 2008. **90**(3): p. 308-13.
119. Higgins, S.W., E.M. Spratley, R.A. Boe, C.W. Hayes, W.A. Jiranek, and J.S. Wayne, *A novel approach for determining three-dimensional acetabular orientation: results from two hundred subjects*. J Bone Joint Surg Am, 2014. **96**(21): p. 1776-84.
120. Matsuyama, Y., Y. Hasegawa, H. Yoshihara, T. Tsuji, Y. Sakai, H. Nakamura, N. Kawakami, T. Kanemura, Y. Yukawa, and N. Ishiguro, *Hip-spine syndrome: total sagittal alignment of the spine and clinical symptoms in patients with bilateral congenital hip dislocation*. Spine (Phila Pa 1976), 2004. **29**(21): p. 2432-7.
121. Wan, Z., A. Malik, B. Jaramaz, L. Chao, and L.D. Dorr, *Imaging and navigation measurement of acetabular component position in THA*. Clin Orthop Relat Res, 2009. **467**(1): p. 32-42.

Literaturverzeichnis

122. Xu, K., Y.M. Li, H.F. Zhang, C.G. Wang, Y.Q. Xu, and Z.J. Li, *Computer navigation in total hip arthroplasty: a meta-analysis of randomized controlled trials*. Int J Surg, 2014. **12**(5): p. 528-33.
123. Pullen, W.M., A. Henebry, and T. Gaskill, *Variability of acetabular coverage between supine and weightbearing pelvic radiographs*. Am J Sports Med, 2014. **42**(11): p. 2643-8.
124. Ross, J.R., J.J. Nepple, M.J. Philippon, B.T. Kelly, C.M. Larson, and A. Bedi, *Effect of changes in pelvic tilt on range of motion to impingement and radiographic parameters of acetabular morphologic characteristics*. Am J Sports Med, 2014. **42**(10): p. 2402-9.
125. Shon, W.Y., V. Sharma, O.J. Keon, J.G. Moon, and D.H. Suh, *Can pelvic tilting be ignored in total hip arthroplasty?* Int J Surg Case Rep, 2014. **5**(9): p. 633-6.
126. Chaleat-Valayer, E., J.M. Mac-Thiong, J. Paquet, E. Berthonnaud, F. Siani, and P. Roussouly, *Sagittal spino-pelvic alignment in chronic low back pain*. Eur Spine J, 2011. **20 Suppl 5**: p. 634-40.
127. Le Huec, J.C., S. Aunoble, L. Philippe, and P. Nicolas, *Pelvic parameters: origin and significance*. Eur Spine J, 2011. **20 Suppl 5**: p. 564-71.
128. Offierski, C.M. and I. MacNab, *Hip-spine syndrome*. Spine (Phila Pa 1976), 1983. **8**(3): p. 316-21.

Danksagung

6 Danksagung

Nach Vollendung meiner Dissertation möchte ich mich bei allen bedanken, die mich auf dem Weg dorthin intensiv unterstützten und begleiteten.

Ich bedanke mich bei Herrn Prof. Dr. med. Carsten Perka, der die Umsetzung des wissenschaftlichen Projektes in der Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie ermöglichte.

Mein Dank richtet sich ebenso an Herrn PD Dr. med. Stephan Tohtz für die ausgezeichnete fachliche Unterstützung. Durch seine weiterführenden sowie effizienten Anregungen und Gespräche hat er wesentlich zum Entstehen dieser Arbeit beigetragen.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Dr. med. Robert Karl Zahn, der mich von Beginn an mit hoher fachlicher Kompetenz und viel Engagement begleitete. Der regelmäßige fachliche Austausch mit ihm war für mich stets gewinnbringend. Ebenso wie sein kritischer Blick auf das Erreichte motivierte mich die wertschätzende und sachliche Art und Weise maßgeblich bei der Bearbeitung der Thematik.

Des Weiteren möchte ich den Kollegen des ZUSE – Institut Berlin meinen herzlichen Dank für die unkomplizierte und angenehme Zusammenarbeit aussprechen.

Ich bedanke mich ebenso herzlich bei meiner Familie, die mir jederzeit beratend und unterstützend zur Seite stand.

7 Eidesstattliche Versicherung

„Ich, Sarah Grotjohann, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema „Einfluss der Beckenkipfung auf die funktionelle azetabuläre Orientierung“, selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik und Resultaten entsprechen den URM und werden von mir verantwortet.

Meine Anteile an etwaigen Publikationen zu dieser Dissertation entsprechen denen, die in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem Betreuer angegeben sind. Sämtliche Publikationen, die aus dieser Dissertation hervorgegangen sind und bei denen ich Autor bin, entsprechen den URM und werden von mir verantwortet.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unwahren eidesstattlichen Versicherung (§156,161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.“

Datum

Unterschrift

Lebenslauf

8 Lebenslauf

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.

9 Publikationsliste

Anteilserklärung an etwaigen erfolgten Publikationen

Sarah Grotjohann hatte folgenden Anteil an den folgenden Publikationen:

Publikation 1

[Dr. med. Robert Karl Zahn, Sarah Grotjohann, Heiko Ramm, Dr. Stefan Zachow, PD Dr. med. Michael Putzier, Prof. Dr. med. Carsten Perka, PD Dr. med. Stephan Tohtz], [Pelvic sagittal rotation compensates for increased acetabular anteversion], [International Orthopaedics], [2015]

Beitrag im Einzelnen:

- manuelle Markierung anatomischer Punkte mittels der Software Amira®
- statistische Auswertung
- substantielle Mitwirkung an Entwurf und Anfertigung der Publikation in der vorliegenden Form

Publikation 2 (eingereicht)

[Dr. med. Robert Karl Zahn, Sarah Grotjohann, Dr. med. univ. Matthias Pumberger, Heiko Ramm, Dr. Stefan Zachow, PD Dr. med. Michael Putzier, Prof. Dr. med. Carsten Perka, PD Dr. med. Stephan Tohtz], [Influence of pelvic tilt on reference planes for acetabular orientation]

Beitrag im Einzelnen:

- manuelle Markierung anatomischer Punkte mittels der Software Amira®
- statistische Auswertung
- substantielle Mitwirkung an Entwurf und Anfertigung der Publikation in der eingereichten Form

Posterbeitrag (ausgezeichnet mit einem Posterpreis)

[Dr. med. Robert Karl Zahn, Sarah Grotjohann, Heiko Ramm, Dr. Stefan Zachow, Dr. med. univ. Matthias Pumberger, PD Dr. med. Michael Putzier, Prof. Dr. med. Carsten Perka, PD Dr. med. Stephan Tohtz], [Einfluss der Beckenkippung auf die funktionelle

Publikationsliste

azetabuläre Orientierung], [NOUV – Kongress, Hamburg], [Juni 2016]

Unterschrift, Datum und Stempel des betreuenden Hochschullehrers

Unterschrift der Doktorandin