

Aus dem
CharitéCentrum für Orthopädie und Unfallchirurgie
Centrum für Muskuloskeletale Chirurgie
Ärztlicher Direktor: Univ.-Prof. Dr. med. Carsten Perka
Geschäftsführender Direktor: Univ.-Prof. Dr. med. Michael Schütz

Habilitationsschrift

Einfluss spino-pelviner Interaktionen auf die funktionelle Anatomie der unteren Extremität

zur Erlangung der Lehrbefähigung
für das Fach Orthopädie und Unfallchirurgie

vorgelegt dem Fakultätsrat der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Dr. med. Robert Karl Zahn
aus Tübingen

Eingereicht: Juli 2018

Dekan: Univ.-Prof. Dr. med. Axel R. Pries

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr. med. Markus Tingart

2. Gutachter: Univ.-Prof. Dr. med. Tim Pohlemann

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen

1. Einleitung	1
1.1 Historischer Hintergrund und anatomische Grundlagen	1
1.2 Anatomische Interaktionen unter physiologischen Bedingungen.....	2
1.3 Funktionelle Interaktionen bei Erkrankungen des Bewegungsapparates.....	6
1.4 Klinische Relevanz und resultierende Fragestellungen.....	9
2. Ergebnisse	14
2.1 Einfluss der Lendenwirbelsäule auf die sagittale Balance.....	14
2.1.1 Ätiologie und Genese lumbaler Pathologien (Arbeit 1).....	14
2.1.2 Korrektur der degenerativ veränderten lumbalen Lordose (Arbeit 2).....	20
2.2 Einfluss Beckenkipfung auf die azetabuläre Orientierung.....	30
2.2.1 Beckenkipfung und funktionelle azetabuläre Orientierung (Arbeit 3)	30
2.2.2 Beckenkipfung und Referenzebenen der azetabulären Orientierung (Arbeit 4)	36
2.3 Einfluss der Belastung auf die untere Extremität	46
2.3.1 Belastung und mechanische Beinachse (Arbeit 5)	46
2.3.2 Belastungsabhängige postoperative Änderung der mechanischen Beinachse (Arbeit 6)...	54
3. Diskussion	60
3.1 Klinische Relevanz funktioneller anatomischer Interaktionen	60
3.2 Konzeption diagnostischer Algorithmen	65
3.3 Optimierung operativer Behandlungsstrategien	68
4. Zusammenfassung und Ausblick	72
5. Literaturangaben	74

Danksagung

Erklärung

Abkürzungen

ALIF	Anterior Lumbar Interbody Fusion
APP	Anterior Pelvic Plane
LL	Lumbar Lordosis
PI	Pelvic Incidence
PR	Pelvic Radius
PT	Pelvic Tilt
STA	Sacral Table Angle
SVA	Sagittal Vertical Axis

1. Einleitung

1.1 Historischer Hintergrund und anatomische Grundlagen

Bei der Evolution des Menschen mit Entwicklung des aufrechten bipeden Ganges entstand die einzigartige Anatomie und Funktion des humanen Bewegungsapparates [1-3]. Insbesondere weisen die Wirbelsäule, das Becken und die untere Extremität artenspezifische Eigenschaften auf, die sich von denjenigen der anderen Lebewesen unterscheiden [4-6]. Die senkrechte Orientierung des Körpers im Raum während des aufrechten Ganges und die damit verbundene Notwendigkeit eines balancierten Körperschwerpunktes wird durch komplexe Interaktionen des muskuloskelettalen Systems ermöglicht [7, 8]. In Abhängigkeit der Körperbewegung ändert sich die Stellung der einzelnen Bausteine des Skelettsystems zueinander und damit dessen gesamte räumliche Orientierung.

Charakteristische Merkmale der funktionellen Anatomie, wie die Formvarianten der Wirbelsäule, wurden bereits vor einem knappen Jahrhundert beschrieben [9]. Seitdem wurden weitere grundlegende Tatsachen und detaillierte Zusammenhänge bekannt. Wechselwirkungen zwischen der Wirbelsäule und dem Becken im seitlichen Profil werden in dem Modell der sagittalen Balance erörtert. Die Beckenkipfung bestimmt die dreidimensionale Orientierung des Azetabulums im Raum, welche Einfluss auf die funktionelle Anatomie der unteren Extremität hat [10]. Die Balance des menschlichen Körpers entsteht aus dem Zusammenspiel der einzelnen Elemente des muskuloskelettalen Systems [11].

Diese physiologischen Interaktionen bieten bei pathologischen Veränderungen des Bewegungsapparates Kompensationsmöglichkeiten und können ihrerseits sekundäre Alterationen oder Komorbiditäten aufweisen. Hippokrates erkannte die Existenz funktioneller Beziehungen bereits vor über 2000 Jahren und forderte, Wissen über die Wirbelsäule zu erlangen, da sie an vielen Krankheiten beteiligt zu sein schien [12-14].

Offensichtlich ist, dass eine skoliotische Fehlstellung der Wirbelsäule mit einem Beckenschiefstand und einer Beinlängendifferenz in Verbindung stehen kann [15, 16]. Eine veränderte Beckenkipfung scheint an der simultanen Entstehung von Beschwerden der Wirbelsäule und des Hüftgelenkes, dem sogenannten „hip-spine“ Syndrom, über welches 1983 erstmals berichtet wurde, beteiligt zu sein [17, 18]. Verschiedene weitere Krankheitsbilder können durch eine auffällige Lokomotion mit einer Änderung der gesamten

Körperstatik in Erscheinung treten. Veränderungen der Wirbelsäule, des Beckens und der unteren Extremität können mit neurobiologischen Alterationen zu einer Verlagerung des Körperschwerpunktes führen und den aufrechten Gang beeinflussen [11].

Das dynamische Gleichgewicht des Bewegungsapparates kann durch die Untersuchung funktioneller anatomischer Wechselbeziehungen in ihrer Gesamtheit verstanden werden. Eine Evaluation der klinischen Relevanz ist durch weiterführende Analyse bekannter Zusammenhänge möglich.

1.2 Anatomische Interaktionen unter physiologischen Bedingungen

Physiologische anatomische Interaktionen bestehen in den gegenseitigen Wechselbeziehungen der funktionellen Anatomie der Wirbelsäule mit der dreidimensionalen räumlichen Orientierung des Beckens und der unteren Extremität (Abbildung 1).

Sagittalprofil und sagittale Balance

Die Form der Wirbelsäule wird durch die Beckenanatomie und -stellung beeinflusst. Das Sagittalprofil und die sagittale Balance entstehen aus den resultierenden spino-pelvinen Wechselwirkungen und deren Einfluss auf die funktionelle Anatomie der unteren Extremität [10].

Normvarianten der Beckenstellung und des seitlichen Profils der Wirbelsäule wurden bereits 1927 beschrieben [9, 19, 20]. Der harmonische Rücken, der Hohlrundrücken, der Totalrundrücken und der Flachrücken galten als konstitutionelle Merkmale. In den 80er Jahren wurde das Modell des Sagittalprofils entworfen und bis zur heutigen Zeit weiterentwickelt [21-24]. Nach Roussouly können vier Typen des Sagittalprofils durch den Sacral Slope, die Pelvic Incidence (PI) und eine spezifische Ausprägung der lumbalen Lordose (*englisch*: Lumbar Lordosis, LL) voneinander unterschieden werden [25, 26]. Die PI ist die Summe von Pelvic Tilt (PT) und Sacral Slope. Unter sagittaler Balance versteht man die Vorgänge, die dazu führen, dass der Körperschwerpunkt ausgeglichen und zentriert ist [27]. Entscheidend für die sagittale Balance ist die Relation zwischen der Anatomie des Beckens und der Form der Wirbelsäule [28, 29]. Eine stabile, energieeffiziente Haltung setzt ein physiologisches spino-pelvines Alignment voraus [29, 30]. Die Wirbelsäule muss balanciert sein, um eine schmerzfreie Bewegung und Funktion zu ermöglichen [31].

Zur Definition und Bestimmung der sagittalen Balance dienen die Differenz zwischen PI und LL, die Sagittal Vertical Axis (SVA) und der PT [24, 25, 29, 32].

Unter dem Begriff PT werden zwei unterschiedliche Parameter verstanden. In Bezug auf die räumliche Orientierung des Beckens ist schlicht die Beckenkipfung gemeint [33]. Sie kann als Winkel, der durch die räumliche Frontalebene und der vorderen Beckenebene (*englisch*: Anterior Pelvic Plane, APP) gemessen werden. Nimmt dieser Wert positive Werte an, liegt eine Beckenkipfung nach vorne, bei negativen eine Beckenkipfung nach hinten vor. Der Parameter PT im Kontext des Modells des Sagittalprofils und der sagittalen Balance ist der Winkel, der durch eine Senkrechte und eine Linie durch die Hüftkopzentren und die Mitte der Endplatte des ersten sakralen Wirbelkörpers, welche wiederum als Hüftachse bezeichnet wird, gebildet wird [25]. Nimmt dieser Winkel positive Werte an oder vergrößert er sich, kippt das Becken nach hinten, umgekehrt verkleinert sich der Wert bei einer anterioren Beckenkipfung. Zur Eindeutigkeit wird im weiteren Text der Begriff Beckenkipfung in Bezug zur APP und PT ausschließlich im Kontext der sagittalen Balance verwendet.

Zudem wurden zahlreiche weitere Parameter, welche die sagittale Balance beschreiben, veröffentlicht [34, 35]. Der Pelvic Radius verbindet die Hüftkopzentren mit der Hinterkante des Sakrumplateaus [36]. Die Global Sagittal Axis ist der Winkel zwischen den Linien ausgehend vom Mittelpunkt der Femurkondylen zum siebten Halswirbelkörper und erneut zur Hinterkante des Sakrumplateaus [37].

Sagittale Balance und pelvine Anatomie

Die Lordose der Lendenwirbelsäule hat bei der Formgebung der gesamten Wirbelsäule eine Schlüsselfunktion. Jeder Typ des Sagittalprofils hat eine charakteristische Ausprägung und Form der LL [22, 34, 38-40]. Aufgrund der Änderung der Lordose in Abhängigkeit von Körperstellung und Bewegung hat sie einen individuellen physiologischen Schwankungsbereich, welcher zudem altersabhängige Veränderungen aufweist [41]. Der Wert der LL entspricht stets nur dem Winkel, der in einer Momentaufnahme der Wirbelsäule in einer bestimmten Position gemessen wird.

Über das Bewegungssegment zwischen dem letzten freien Lenden- und dem ersten sakralen Wirbelkörper steht die Wirbelsäule mit dem Becken, genauer dem Kreuzbein in Verbindung. So ist die funktionelle Anatomie der Lendenwirbelsäule unmittelbar von der Beckenstellung

abhängig. Dubouset stellte den Zusammenhang zwischen der Lordose der Lendenwirbelsäule und der Beckenkipfung pointiert dar, indem er das Becken als Wirbelkörper bezeichnete [30]. Da die Knochen des Beckens über die Amphiarthrose der *Articulatio sacroiliaca* und die *Symphysis pubica* stabil und kaum beweglich miteinander verbunden sind, kann der Beckenring als rigide betrachtet werden [5]. Parameter, welche die Beckenanatomie definieren, sind der PT und wiederum der Sacral Slope sowie die PI [22, 42]. Die beiden zuletzt genannten haben eine besondere Bedeutung, da sie nach Abschluss des Wachstums konstant sind, die individuelle Beckenanatomie kennzeichnen und Information über das Ausmaß der möglichen Beckenkipfung geben [25].

Typischerweise wird das Sagittalprofil und die sagittale Balance in lateralen Wirbelsäulenganzaufnahmen erhoben. Moderne Untersuchungsverfahren können das gesamte Skelettsystem eines stehenden Menschen mit einer vergleichsweise geringen Strahlenbelastung erfassen. Im Gegensatz zu radiologischen Untersuchungsverfahren mit physiologischer Belastung im Stand wird während schnittbildgebender Untersuchungen der Körper in liegender Position dargestellt.

Beckenkipfung und Hüftgelenk

Die Bewegung des Beckens ermöglicht mit der funktionellen Anatomie des Hüftgelenks die unterschiedlichen Positionen des menschlichen Körpers und dessen harmonische mannigfaltige Bewegungen [43].

Das Azetabulum wird durch Zusammenschluss aller drei Knochen des Beckens gebildet. Anteversion und Inklination bestimmen die räumliche Orientierung des Azetabulums. Die anatomische Anteversion und Inklination können in Relation zu einer pelvinen Referenz, beispielsweise der APP, gemessen werden und haben dann positions- und bewegungsunabhängige konstante Werte. Bei Lageänderung des Beckens ändert sich die funktionelle azetabuläre Orientierung im Raum, welche in Bezug zu einer außerhalb des Körpers gelegenen Referenz, wie der Frontal- oder Tischebene, gemessen werden kann. Die Beckenkipfung beeinflusst die azetabuläre Anteversion in einem stärkeren Ausmaß als die Inklination. Bei einer anterioren Beckenkipfung verkleinern sich beide Parameter, dagegen vergrößern sie sich bei der Beckenkipfung nach hinten. Bei den Positionen, die ein Mensch normalerweise alltäglich einnimmt, existiert der größte Unterschied der Beckenkipfung und damit auch der funktionellen azetabulären Orientierung zwischen der liegenden und

sitzenden Position [33]. Vergleichende Untersuchungen im Liegen, Stehen und Sitzen erbrachten grundlegende Kenntnisse der funktionellen Anatomie des Azetabulums [33, 44]. Die funktionelle Anatomie der unteren Extremität ist mit der Balance und Kinematik des Beckens und der Wirbelsäule verbunden [10].

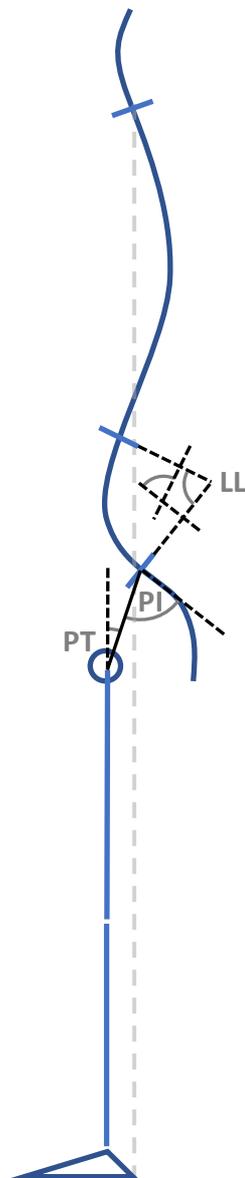


Abbildung 1 Schema der sagittalen Balance

Funktionelle anatomische Interaktionen der Wirbelsäule, des Beckens und der unteren Extremität beeinflussen die sagittale Balance.

Die Pelvic Incidence (PI) charakterisiert die funktionelle Anatomie des Beckens. Sie ist die Summe von Pelvic Tilt (PT) und Sacral Slope.

Die physiologische Lordose der Lendenwirbelsäule (LL) ist von der PI abhängig. Die Sagittal Vertical Axis (SVA) ist der Abstand des Lots vom Mittelpunkt des siebten Halswirbelkörpers, welches als gestrichelte graue Linie dargestellt ist, zu der Hinterkante des Sakrumplateaus.

Die sagittale Balance kann durch die SVA, den PT und die Differenz zwischen PI und LL bestimmt werden.

Weitere, nicht visualisierte Parameter beschreiben funktionelle Zusammenhänge und die Balance des Bewegungsapparates.

Funktionelle Anatomie der unteren Extremität

In Abhängigkeit der Stellung des Azetabulums und des Hüftgelenks ändert sich die funktionelle Anatomie der unteren Extremität [45, 46]. 2016 konnte gezeigt werden, dass für jede 5° der Beckenkippung nach vorne eine Innenrotation des Femurs zwischen 1,2° und 1,6° stattfindet [45]. Das Kniegelenk hat für die Funktion des Beines und Anatomie der unteren Extremität eine besondere Bedeutung, da es unterhalb des Hüftgelenks das Gelenk mit dem größten Bewegungsumfang ist. Die Hauptrichtung der Beweglichkeit liegt in der Sagittalebene und ist durch Beugung und Streckung seitlich orientiert, während die klinisch relevante Anatomie hauptsächlich in der Frontalebene evaluiert wird. Verschiedene Beinachsen und Winkel dienen der Definition der frontalen und sagittalen Bein geometrie. Ein wesentlicher Parameter zur Beurteilung der Anatomie der unteren Extremität in der Frontalebene ist die mechanische Beinachse.

Auch bei der Erfassung der Bein geometrie spielt die konventionell radiologische Diagnostik eine wichtige Rolle: Die mechanische Beinachse kann in anterior-posterioren Ganzbeinstandaufnahmen erhoben werden und setzt sich aus einer femoralen und einer tibialen Komponente zusammen. Die mechanischen Beinachsen haben in Ergänzung zu den anatomischen Achsen einen funktionellen Aspekt, indem sie die Traglinie abbilden, wobei die tibiale anatomische und mechanische Achse identisch sind [47]. Die Beinachsen können auch nach Wachstumsabschluss altersabhängige Veränderungen aufweisen [47-50]. Eine neutrale sowie möglicherweise eine konstitutionelle varische Beinachse gilt als physiologisch [51-53]. Die funktionelle Anatomie der unteren Extremität bietet mit der Beckenstellung Kompensationsmöglichkeiten zur Aufrechterhaltung der sagittalen Balance bei pathologischen Veränderungen des Bewegungsapparates [24, 27, 54].

1.3 Funktionelle Interaktionen bei Erkrankungen des Bewegungsapparates

Funktionelle anatomische Interaktionen können an der Entstehung pathologischer Veränderungen beteiligt sein. Komplexe Anpassungs- und Kompensationsmechanismen können zu weitreichenden Änderungen der gesamten Balance des Bewegungsapparates führen.

Reduktion der Lordose der Lendenwirbelsäule und sagittale Balance

Die LL ist für die Balance des Körperschwerpunktes wesentlich und kann degenerativ, traumatisch, infektiös oder iatrogen verändert sein [40, 41]. Komplexe Veränderungen liegen bei degenerativen Pathologien vor und betreffen eine Vielzahl von Funktionen des gesamten Bewegungsapparates [11]. Im Gegensatz zu dem im Volksmund negativ belegten Begriff des Hohlkreuzes ist die physiologische Lordose der Lendenwirbelsäule elementarer Bestandteil der sagittalen Balance [29]. Eine Reduktion der LL, welche bei den genannten Pathologien häufig anzutreffen ist, kann in einer Fehlstellung und gestörten Körperstatik resultieren [55]. Diese kann durch Verringerung der thorakalen Kyphose und Beckenkipfung nach hinten ausgeglichen oder vermindert werden [27]. Da die thorakale Kyphose im Alter jedoch ebenfalls zunimmt, bleibt als wesentlicher Kompensationsmechanismus die Zunahme der posterioren Beckenkipfung, welche ihrerseits zu einer Änderung der Artikulation des Hüftgelenkes führt [56]. Durch ein gleichzeitig bestehendes Extensionsdefizit bis hin zur Beugekontraktur des Hüftgelenkes, wie es bei einer gleichzeitig bestehenden Koxarthrose vorliegen kann, kann dieser Kompensationsmechanismus ebenfalls nur begrenzt oder nicht vorhanden sein [57]. Weitere Möglichkeiten, die sagittale Balance des Körpers aufrecht zu halten, ist die Translationsbewegung des Beckens nach hinten verbunden mit Beugung der Kniegelenke und einer Extension im oberen Sprunggelenk. Dadurch werden der Körperschwerpunkt und das Lot wieder nach hinten verlagert [11]. Eine Kombination der Kompensationsmechanismen entwickelt sich häufig bei älteren Menschen. Reichen diese ausgleichenden Vorgänge bei Fortschreiten der Veränderungen schließlich nicht mehr aus, den Körperschwerpunkt zentriert zu halten, resultiert eine Dysbalance, die fast immer in Form einer Verlagerung des Gravitationszentrums nach vorne in Erscheinung tritt [58].

Azetabuläre Pathologien und Beckenkipfung

Eine veränderte Beckenkipfung wurde ebenfalls bei azetabulären Pathologien beobachtet. So wurde beispielsweise eine vermehrte anteriore Beckenkipfung bei Menschen mit Hüftdysplasie registriert [16, 59]. Durch die vermehrte Beckenkipfung nach vorne erhöht sich die vordere Überdachung des Hüftkopfes indem die funktionelle Anteversion des Azetabulums verringert wird. Ob es sich bei diesem Vorgang um einen reinen Kompensationsmechanismus handelt, oder die veränderte Beckenkipfung selbst möglicherweise Bestandteil der Pathologie ist, ist nicht eindeutig geklärt. Kausal für eine

veränderte Beckenkipfung als Bestandteil der Pathologie könnten Alterationen des Kapselbandapparats oder auch der Muskulatur sein. Umgekehrt kann eine vermehrte Beckenkipfung nach hinten zu einer verminderten vorderen azetabulären Überdachung des Hüftkopfes führen.

Bei weiteren Pathologien des Hüftgelenkes, wie den beiden Formen des femoroazetabulären Impingements und degenerativen Veränderungen des Hüftgelenkes weist die Beckenkipfung ebenfalls Veränderungen auf [60-62]. Bei Bestehen einer manifesten Koxarthrose liegt häufig ein erhöhte anteriore Beckenkipfung vor. Die Beckenkipfung kann bei Vorliegen einer azetabulären oder spinalen Pathologie verändert sein und selbst eine pathologische funktionelle Artikulation der Hüftgelenke verursachen [63].

Pathologien des Kniegelenkes und funktionelle Anatomie der unteren Extremität

Die anatomische Konfiguration des Kniegelenkes bestimmt die Geometrie des Beines. Die Anatomie der unteren Extremität kann ebenfalls primäre oder sekundäre Alterationen aufweisen. Eine Beugekontraktur des Kniegelenkes kann eine Beinlängendifferenz verursachen [15, 16]. Pathologische Beinlängendifferenzen können in einem Beckenschiefstand und einer kompensatorischen skoliotischen Fehlstellung oder Deformität der Wirbelsäule resultieren [15]. Darum ist Differenzierung der Ätiologie und Genese dieser Pathologien essentiell. Beinachsendeformationen, Rotationsfehler oder eine pathologische Stellung des Kniegelenks können durch Bestimmung der Achsen und Winkel altersabhängig definiert werden [47, 48, 64]. Sofern im Rahmen einer degenerativen Veränderung des Kniegelenkes eine varische Beinachsendeformation vorliegt, kann eine Varusgonarthrose entstehen [51]. In der Knieendoprothetik wird eine neutrale mechanische Beinachse, welche für die Funktion und Standzeit bedeutend zu sein scheint, als optimale Ausrichtung gesehen und dient somit als Güte- und Qualitätskriterium [47, 52, 65]. Dadurch hat die Aufnahmetechnik und Verlässlichkeit der Messmethode der mechanischen Beinachse eine besondere Bedeutung [47]. Die während der Röntgenaufnahme vorliegende Rotation des Beines, Beugung im Kniegelenk und Muskelaktivität scheinen das Messergebnis zu beeinflussen [66, 67]. Änderungen, Abweichungen und Unterschiede von nur wenigen Grad sind für Diagnostik und Behandlung der Pathologien des Kniegelenkes und der Beinachsendeformationen relevant [47, 52].

1.4 Klinische Relevanz und resultierende Fragestellungen

Die skizzierten Zusammenhänge belegen, dass funktionelle anatomische Interaktionen an physiologischen Bewegungsabläufen und pathologischen Veränderungen des Bewegungsapparates beteiligt sind. In dieser Habilitationsschrift wird die klinische Relevanz spino-pelviner Interaktionen und der funktionellen Anatomie der unteren Extremität in Relation zur sagittalen Balance und Belastung evaluiert. In jeweils zwei Arbeiten zu einem der Themenkomplexe folgt einer grundlegenden Arbeit eine weiterführende Studie mit einer klinischen Fragestellung (Abbildung 2).

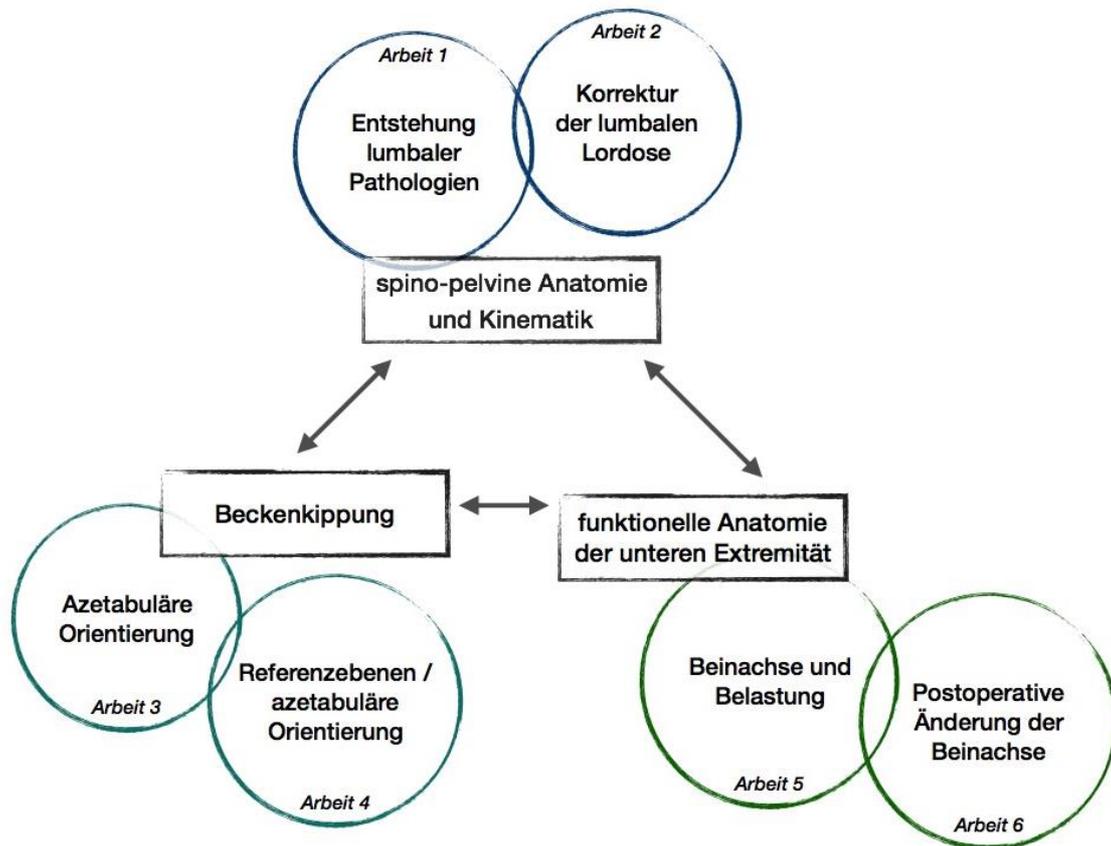


Abbildung 2 Inhaltliche Darstellungen und Verbindung der drei Themengebiete der Habilitationsschrift

Ätiologie und Genese lumbaler Pathologien

Die Beckenanatomie beeinflusst das Profil der Wirbelsäule. Basierend auf den einwirkenden Kräften wird vermutet, dass die verschiedenen Typen des Sagittalprofils mit spezifischen degenerativen Veränderungen der Lendenwirbelsäule assoziiert sind. Anhand konstanter anatomischer Parameter kann das ursprüngliche Sagittalprofil trotz fortgeschrittener degenerativer Veränderungen des gesamten muskuloskelettalen Systems rekonstruiert werden.

Kenntnis über die Ätiologie und damit die Prädisposition für spezifische lumbale degenerative Alterationen würde nicht nur grundlegende Einsicht in die Pathogenese der Degenerationsprozesse geben, sondern unter verschiedenen Aspekten klinisch relevant sein. Im Kontext der Pathogenese degenerativer Veränderungen der Lendenwirbelsäule mit dem Sagittalprofil und der sagittalen Balance lautet die fundamentale Fragestellung (**Arbeit 1**):

- Sind spezifische lumbale Pathologien mit den konstanten anatomischen Beckenparametern und der determinierten Beckenanatomie assoziiert?

Möglichkeiten der operativen Korrektur degenerativer Veränderungen der Lendenwirbelsäule

Operative Behandlungsstrategien der Lendenwirbelsäule, insbesondere deren degenerativer Pathologien, beinhalten die Wiederherstellung der LL und der sagittalen Balance. Der Standard implantatbasierter Operationsverfahren der Lendenwirbelsäule ist die dorsale Instrumentierung durch pedikelschraubenbasierte Systeme. Korrigierende Eingriffe degenerativer Veränderungen der Lendenwirbelsäule werden meist in Kombination mit intervertebralen Platzhaltern zur intersomatischen Fusion und Korrektur der Deformität in Form dorsaler Repositionsspondylodesen durchgeführt.

Nachteile und Komplikationen einer Spondylodese können aufgrund der Fixation und Fusion der Bewegungssegmente in einer bestimmten Position entstehen. Um die Nachteile der rigiden Spondylodese zu vermeiden, wurden dynamische Implantate und die Bandscheibenprothese entwickelt. Vorteile der Bandscheibenprothese gegenüber Fusionsverfahren werden in der verbleibenden Beweglichkeit des operierten Segmentes gesehen. Wird die Implantation einer Bandscheibenprothese mit einer anterioren Diskektomie und Repositionsspondylodese (*englisch*: anterior lumbar interbody fusion, ALIF)

kombiniert, spricht man von einer Hybridversorgung. Die jeweiligen Verfahren haben ein operationsspezifisches Komplikationsrisiko.

Häufig liegen degenerative Veränderungen der Bandscheiben und der angrenzenden Wirbelkörper des vorletzten und eine Degeneration des gesamten letzten lumbalen Bewegungssegmentes vor. Zur Korrektur der dadurch verursachten reduzierten LL kann eine Repositionsspondylodese oder alternativ eine Hybridversorgung L4-S1 durchgeführt werden [68]. Das Konzept der Hybridversorgung dieser Bewegungssegmente vereinigt die Vorteile der Implantation einer Bandscheibenprothese L4/5 und einer ALIF L5/S1 mit guten klinischen Ergebnissen der einzelnen Operationen.

Eine Untersuchung mit direktem Vergleich kann die Evaluation der semirigiden Hybridversorgung mit einer rigiden dorsalen Repositionsspondylodese in Kombination mit einer transforaminalen interkorporellen Fusion L4-S1 ermöglichen (**Arbeit 2**):

- Besteht ein klinisch relevanter Unterschied zwischen einer Hybridversorgung und einer dorsalen Repositionsspondylodese mit posteriorer intersomatischer Fusion?
- Welchen Einfluss haben die beiden Operationsverfahren auf die individuelle Lordose der Lendenwirbelsäule und sagittale Balance?

Physiologischer Zusammenhang zwischen Beckenkipfung und funktioneller Anatomie des Azetabulums

Die Lordose der Lendenwirbelsäule und die Beckenkipfung sind funktionell direkt miteinander verbunden. Die Beckenkipfung wird durch die Körperposition und sagittale Balance beeinflusst und bestimmt die räumliche Orientierung des Azetabulums. Die Beckenkipfung könnte unter physiologischen Bedingungen durch die anatomische Orientierung des Azetabulums beeinflusst werden (**Arbeit 3**):

- Existiert ein physiologischer Zusammenhang zwischen der Beckenkipfung und der Anatomie des Azetabulums?

Einfluss der Beckenkipfung auf die Referenzebenen der azetabulären Orientierung

Die korrekte anatomische Orientierung ist für die Stellung der Diagnose, Planung und anschließende Durchführung operativer Eingriffe von Pathologien des Azetabulums und des

Hüftgelenkes wesentlich. Die Beckenkipfung beeinflusst die funktionelle azetabuläre Orientierung. Eine fehlerhafte Orientierung oder Malposition der azetabulären Komponente eines Gelenkersatzes ist mit dem Auftreten von Komplikationen assoziiert. Eine veränderte Beckenkipfung könnte Einfluss auf die Referenzebenen der azetabulären Orientierung haben und zu einer fehlerhaften azetabulären Orientierung oder Malposition der azetabulären Komponente während einer Prothesenimplantation führen (**Arbeit 4**):

- Welchen Einfluss hat die Beckenkipfung auf die Referenzebenen der azetabulären Orientierung?

Einfluss der physiologischen Belastung auf die mechanische Beinachse

Während die sagittale Balance die funktionelle Anatomie der Lendenwirbelsäule und des Azetabulums beeinflusst, ist die Anatomie der unteren Extremität in der koronaren Ebene für deren Funktion und für operative Eingriffe des Kniegelenkes von entscheidender Bedeutung. Die mechanische Beinachse ist ein wesentlicher Parameter der funktionellen Anatomie der unteren Extremität, der zudem prognostische Bedeutung hat. In Ganzbeinstandaufnahmen kann die mechanische Beinachse gemessen, korrigierende Eingriffe oder ein Ersatz des Kniegelenks geplant und beurteilt werden.

Die Geometrie der unteren Extremität könnte aufgrund der Krafteinwirkung auf das Kniegelenk von der Belastung des Beines abhängig sein. Ein Zusammenhang zwischen der funktionellen Geometrie der unteren Extremität und der Belastung ist bislang nicht bekannt und wäre klinisch relevant (**Arbeit 5**):

- Ist die mechanische Beinachse von der postoperativen Belastung der unteren Extremität abhängig?

Belastungsabhängige postoperative Änderung der mechanischen Beinachse

Die initiale radiologische Evaluation der mechanischen Beinachse wird oftmals nur wenige Tage nach operativen Eingriffen des Kniegelenkes durchgeführt. Nachdem gezeigt werden konnte, dass die funktionelle Anatomie der unteren Extremität von der postoperativen Belastung abhängig ist, erschien eine Änderung der mechanischen Beinachse nach Implantation eines Oberflächenersatzes des Kniegelenks möglich. Unmittelbar postoperativ

könnte die Ganzbeinstandaufnahme nicht die tatsächliche Beinachse widerspiegeln. Eine zeitabhängige Änderung der funktionellen Anatomie der unteren Extremität wäre für den postoperativen Zeitpunkt der Bestimmung der mechanischen Beinachse relevant (**Arbeit 6**):

- Führt die postoperative Belastungssteigerung zur Änderung der mechanischen Beinachse innerhalb des ersten Jahres nach Knie-TEP Implantation?

2. Ergebnisse

2.1 Einfluss der Lendenwirbelsäule auf die sagittale Balance

2.1.1 Ätiologie und Genese lumbaler Pathologien (**Arbeit 1**)

Strube P, Pumberger M, Sonnow L, Zippelius T, Nowack D, **Zahn RK**, Putzier M

Association between lumbar spinal degeneration and anatomic pelvic parameters

Clin Spine Surg. 2018 Jul;31(6):263-267

<http://doi.org/10.1097/BSD.0000000000000660>

Es wird angenommen, dass die verschiedenen Typen des Sagittalprofils mit spezifischen degenerativen Pathologien der Lendenwirbelsäule assoziiert sind [25]. Da die Beckenanatomie das spino-pelvine Alignment beeinflusst, könnten degenerative Veränderungen der Lendenwirbelsäule in Abhängigkeit der individuellen Beckenform entstehen [25, 69].

Potentiell prädisponierende Faktoren für die Entwicklung einer lumbalen Degeneration wurden durch Analyse der Assoziation der konstanten anatomischen Beckenparameter Pelvic Radius (PR), Sacral Table Angle (STA) und PI mit spezifischen monosegmentalen degenerativen Veränderungen der Lendenwirbelsäule untersucht. Unterschieden wurde zwischen einem Bandscheibenvorfall, einer Bandscheibendegeneration/Osteochondrose, einer Spinalkanalstenose und der degenerativen Spondylolisthese.

Die drei Parameter unterschieden sich zwischen den jeweiligen Krankheitsbildern. Der PR der Patienten mit Spinalkanalstenose unterschied sich von allen weiteren und schien in Kombination mit der PI und dem STA spezifisch für die Entwicklung einer dorsalen Pathologie zu sein. Patienten mit dorsalen Pathologien zeigten eine größere PI, im Vergleich zu kleineren Werten bei Patienten mit einer ventralen Degeneration. Der STA zeigte signifikante Unterschiede zwischen den untersuchten degenerativen Veränderungen.

Die konstanten pelvinen anatomischen Parameter sind spezifisch für einzelne Degenerationsmuster. Die anatomisch determinierte Beckenform ist mit spezifischen degenerativen Veränderungen der Lendenwirbelsäule assoziiert.

2.1.2 Korrektur der degenerativ veränderten lumbalen Lordose (**Arbeit 2**)

Hoff E, Strube P, Pumberger M, **Zahn RK**, Putzier M

ALIF and total disc replacement versus 2-level circumferential fusion with TLIF: a prospective, randomized, clinical and radiological trial

Eur Spine J. 2016 May;25(5):1558-1566

<https://doi.org/10.1007/s00586-015-3852-y>

Dorsale Repositionsspondylodesen sind erfolgreiche operative Therapiemöglichkeiten einer symptomatischen degenerativen Veränderung der Bandscheibe und Osteochondrose eines Bewegungssegmentes [70]. Häufig liegt ein bisegmentales Degenerationsmuster der beiden kaudalen Bewegungssegmente mit einer Reduktion der LL vor [71]. Als Alternative zur dorsalen Spondylodese kann unter der genannten Konstellation eine Hybridversorgung mit Implantation einer Bandscheibenprothese L4/5 und ALIF L5/S1 durchgeführt werden [72].

Vor diesem Hintergrund erfolgte in einer prospektiv randomisierten Untersuchung mit 62 Patienten erstmals der direkte Vergleich zwischen einer Hybridversorgung und einer dorsalen Repositionsspondylodese mit transforaminaler intersomatischer Fusion L4-S1.

Bei allen operierten Patienten, welche nachuntersucht wurden, konnte postoperativ eine signifikante Beschwerdelinderung beobachtet werden, die bis zum Studienende anhielt. Unmittelbar postoperativ sowie drei Jahre nach dem Eingriff beklagten Patienten mit einer Hybridversorgung weniger Schmerzen als Patienten mit fusionierten Bewegungssegmenten. Deutlich voneinander unterschied sich die postoperative LL und Kinematik der Lendenwirbelsäule zwischen den beiden Gruppen. Die LL nahm insgesamt in beiden Gruppen zu. Die Hybridversorgung führte zu einer Rekonstruktion der Lordose auf Höhe der operierten Segmente mit einem größeren Bewegungsumfang der Segmente L4/5 und L3/4. Nach dorsalen Repositionsspondylodese nahm dagegen die LL oberhalb der instrumentierten Segmente und der Bewegungsumfang L3/4 zu.

Die untersuchten Verfahren unterscheiden sich in ihrer Zugangsmorbidität und postoperativen spino-pelvinen Kinematik. Die Hybridversorgung ist ein erfolgreiches operatives Konzept degenerativer Veränderungen lumbaler Bewegungssegmente.

2.2 Einfluss Beckenkipfung auf die azetabuläre Orientierung

2.2.1 Beckenkipfung und funktionelle azetabuläre Orientierung (**Arbeit 3**)

Zahn RK, Grotjohann S, Ramm H, Zachow S, Putzier M, Perka C, Tohtz S

Pelvic tilt compensates for increased acetabular anteversion

Int Orthop. 2016 Aug;40(8):1571-1575

<https://doi.org/10.1007/s00264-015-2949-6>

Die spino-pelvine Kinematik und Beckenkipfung beeinflussen die funktionelle azetabuläre Orientierung [33]. Die Anteversion ist stärker von der Beckenkipfung abhängig als die Inklination [73]. Die Beckenkipfung wird durch die sagittale Balance beeinflusst und Alterationen der sagittalen Balance können zu einer veränderten funktionellen azetabulären Orientierung führen [74]. Die native anatomische Form des Azetabulums könnte Einfluss auf die Beckenkipfung und sagittale Balance haben [75]. In einer ersten Untersuchung der funktionellen azetabulären Orientierung wurde der Zusammenhang zwischen Beckenkipfung und anatomischer azetabulärer Anteversion evaluiert.

Die Beckenkipfung und azetabuläre Anteversion von 138 Patienten wurden mit einer innovativen Methode basierend auf computertomographischen Datensätzen in dreidimensionalen Modellen gemessen. Die Auswertung umfasste eine altersabhängige und geschlechterspezifische Analyse.

Bei einer mittleren neutralen Beckenkipfung bestätigten sich bereits bekannte geschlechterspezifische Mittelwerte der azetabulären Anteversion. Die anatomische Anteversion zeigte eine positive Korrelation mit der Beckenkipfung nach vorne, Individuen mit großer anatomischer azetabulärer Anteversion hatten eine erhöhte anteriore Beckenkipfung verglichen mit Individuen mit geringer Anteversion.

Es existiert ein physiologischer Zusammenhang zwischen der Beckenkipfung und der nativen azetabulären Orientierung. Die Beckenkipfung kompensiert eine erhöhte azetabuläre Anteversion.

2.2.2 Beckenkipfung und Referenzebenen der azetabulären Orientierung (**Arbeit 4**)

Zahn RK, Grotjohann S, Pumberger M, Ramm H, Zachow S, Putzier M, Perka C, Tohtz S

Influence of pelvic tilt on functional acetabular orientation

Technol Health Care. 2017 Jun;25(3):557-565

<https://doi.org/10.3233/THC-161281>

Eine korrekte azetabuläre Orientierung ist für das Erkennen und Behandlung von vielen funktionellen und degenerativen Pathologien der Wirbelsäule, des Beckens und der Hüftgelenke wichtig [74]. Eine fehlerhafte azetabuläre Orientierung kann zu einer Malposition der azetabulären Komponente einer Hüftgelenktotalendoprothese führen, und damit deren Funktion und Bewegungsumfang beeinflussen, das Risiko einer Luxation erhöhen, den Abrieb verstärken und die Standzeit des Gelenkersatzes reduzieren [76]. Referenzebenen dienen als Hilfsmittel der azetabulären Orientierung. In Bezug zur APP kann die anatomische, in Relation zur Tischebene die funktionelle azetabuläre Orientierung bestimmt werden [33].

In einer weiterführenden Arbeit wurde überprüft, ob die Referenzebenen in Abhängigkeit der Beckenkipfung unterschiedliche Informationen der azetabulären Orientierung geben. Es wurden 138 Becken untersucht. Azetabuläre Anteversion und Inklination wurden in Bezug zur APP und Tischebene gemessen. Korrelations- und Gruppenanalysen der Beckenkipfung und azetabulären Anteversion sowie Inklination außerhalb einer Standardabweichung zeigten, dass sich in 21% der Individuen die azetabuläre Orientierung aufgrund einer verstärkten Beckenkipfung deutlich zwischen den beiden Referenzebenen unterschied.

Bei verstärkter Beckenkipfung können die beiden untersuchten Referenzebenen nicht gleichwertig für die azetabuläre Orientierung verwendet werden. Die präzise individuelle azetabuläre Orientierung kann nur unter Berücksichtigung der Beckenkipfung bestimmt werden.

2.3 Einfluss der Belastung auf die untere Extremität

2.3.1 Belastung und mechanische Beinachse (**Arbeit 5**)

Zahn RK, Renner L, Perka C, Hommel H

Weight bearing radiography depends on limb loading

Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2018 Epub ahead of print

<https://doi.org/10.1007/s00167-018-5056-6>

Spino-pelvine Interaktionen stehen in einem funktionellen Zusammenhang mit der Anatomie unteren Extremität [29]. In Ganzbeinstandaufnahmen kann die mechanische Beinachse zuverlässig gemessen werden [51]. Verschiedene Faktoren beeinflussen dieses Messergebnis [77]. Die Belastung des Beines und die Kraftverteilung auf das Kniegelenk könnten einen Einfluss auf die mechanische Beinachse haben [78, 79]. Das Ziel der prospektiven Untersuchung war die Überprüfung einer Beziehung zwischen der mechanischen Beinachse und der Belastung.

Die Belastung des Beines und die mechanische Beinachse von 115 Patienten wurden 10 Tage und drei Monate nach Oberflächenersatz des Kniegelenks evaluiert.

Die Beinachse zeigte in beiden Messungen eine positive Korrelation mit der Belastung. Die Belastung des Beines nahm im postoperativen Verlauf zu, was zu einer Änderung der Beinachse führte. Die Änderungen und Unterschiede waren bei Patienten mit unmittelbar postoperativ inkompletter Streckung besonders stark ausgeprägt.

Es existiert ein physiologischer Zusammenhang zwischen der mechanischen Beinachse und der Belastung der unteren Extremität. Die Belastung nimmt innerhalb der ersten drei Monate nach Oberflächenersatz des Kniegelenks zu, gleichzeitig ändert sich die mechanische Beinachse.

2.3.2 Belastungsabhängige postoperative Änderung der mechanischen Beinachse (Arbeit 6)

Zahn RK, Fussi J, von Roth P, Perka C, Hommel H

Postoperative Increased Loading Leads to an Alteration in the Radiological Mechanical Axis After Total Knee Arthroplasty

J Arthroplasty. 2016 Aug;31(8):1803-1807

<https://doi.org/10.1016/j.arth.2016.01.034>

Die Reliabilität der Ganzbeinstandaufnahme ist klinisch relevant, da die mechanische Beinachse ein wesentliches Kriterium für die Beurteilung der funktionellen Anatomie des Beines ist [47]. Im vorigen Kapitel wurde beschrieben, dass die mechanische Beinachse von der Belastung der unteren Extremität abhängig ist [80]. Aufgrund der postoperativen Belastungssteigerung wird in dieser prospektiven Studie die Hypothese einer Änderung der mechanischen Beinachse innerhalb des ersten Jahres nach Oberflächenersatz des Kniegelenks überprüft.

Die mechanische Beinachse wurde in Ganzbeinstandaufnahmen von 156 Patienten 7 Tage, 3 und 12 Monate nach Implantation eines Oberflächenersatzes des Kniegelenks gemessen.

Es zeigte sich eine signifikante Änderung der mechanischen Beinachse zwischen den ersten beiden Messungen. Dieser Unterschied war erneut bei Patienten mit postoperativ unvollständiger Streckung besonders ausgeprägt. Ab dem dritten Monat wurde keine weitere Änderung der Beinachse innerhalb des ersten postoperativen Jahres beobachtet.

Die radiologisch gemessene mechanische Beinachse ändert sich nach Implantation eines Oberflächenersatzes des Kniegelenks. Die Aussagekraft der Ganzbeinstandaufnahme unmittelbar postoperativ ist aufgrund einer veränderten Belastung des Beines eingeschränkt. Die mechanische Beinachse kann in einer Ganzbeinstandaufnahme nur bei physiologischer Belastung und vollständiger Streckung zuverlässig gemessen werden.

3. Diskussion

In dieser Habilitationsschrift wurde die klinische Relevanz funktioneller anatomischer Interaktionen ausgehend von dem aktuellen Stand der Wissenschaft evaluiert. Da die Beckenanatomie die sagittale Balance beeinflusst, wurde überprüft, ob es eine Assoziation zwischen der pelvinen Anatomie und spezifischen degenerativen Veränderungen der Lendenwirbelsäule gibt. Die Relevanz der sagittalen Balance und Beckenkipfung für Operationen an der Wirbelsäule und dem Hüftgelenk wurde durch Analyse von Wechselbeziehungen der spino-pelvinen Kinematik mit der azetabulären Orientierung untersucht. Vergleichbar mit der Bedeutung des Körperschwerpunktes für die sagittale Balance wurde der Einfluss der Belastung auf die mechanische Beinachse ermittelt. Es konnten klinisch relevante Zusammenhänge spino-pelviner Interaktionen mit der funktionellen Anatomie der unteren Extremität nachgewiesen werden.

3.1 Klinische Relevanz funktioneller anatomischer Interaktionen

Sagittale Balance und Lendenwirbelsäule

Das Verständnis der Ätiologie und Genese einer Pathologie ist die Voraussetzung für deren korrektes Erkennen und die erfolgreiche Behandlung. Bestimmte Veränderungen der Wirbelsäule können aufgrund der spezifischen Kräfteverteilung in Abhängigkeit des Sagittalprofils entstehen [25, 81, 82]. Das Sagittalprofil wird durch die funktionelle Beckenanatomie und LL bestimmt und ist in seinem Phänotyp variabel [24, 83, 84]. Die PI ist ein wesentlicher Parameter des Modells des Sagittalprofils, der durch die Beckendicke, die räumliche Orientierung des Beckens und des Sakrums bestimmt wird [85, 86]. Durch den Einfluss verschiedener Faktoren bei der Kalkulation der PI könnte eine Unschärfe des Wertes als Prädiktor entstehen. Zudem kann die individuelle PI Änderungen aufweisen [83, 85]. Daraus resultierte die Fragestellung, ob spezifische degenerative lumbale Pathologien mit pelvinen Parametern, welche nach Wachstumsabschluss konstant sind, assoziiert sind.

Der PR hat als reine Linie zwischen den Hüftkopfbzentrren und der Hinterkante des Sakrumplateaus einen ursprünglichen Charakter [36, 87]. Jackson et al. beschrieben den PR bereits 1998 in einer Technik zur Einschätzung der sagittalen spino-pelvinen Balance mit Aussagekraft für die Entstehung lumbaler Pathologien [36]. Die von Legaye und Duval-

Beaupère konzipierte PI inkludiert die räumliche Orientierung des Beckens und Sakrums [86]. Die PI entspricht als Winkel zwischen der Senkrechten durch die Mitte des Sakrumplateaus und der Verbindungslinie zu den Hüftkopffzentren, welche als pelvic thickness bezeichnet wird, dem komplementären Winkel zu dem 1985 von During et al. entworfenem pelvisacral angle [28, 87]. Der STA charakterisiert die anatomische Form des Sakrums und dessen räumliche Orientierung, welche die PI beeinflusst.

Es konnte gezeigt werden, dass spezifische lumbale degenerative Pathologien mit den konstanten anatomischen Beckenparametern und der individuellen Beckenform assoziiert sind [69]. Die Assoziation des PR und STA mit einzelnen Pathologien war sogar ausgeprägter als diejenige mit der PI [69]. Die Form und Stellung des Sakrums schien die Entstehung der untersuchten degenerativen Veränderungen ebenfalls relevant zu beeinflussen. Diese Zusammenhänge sind aufgrund der auf die Lendenwirbelsäule einwirkenden Kräfte, welche im Zeitverlauf zu einem Verschleiß der am stärksten belasteten Strukturen führen können, biomechanisch erklärbar [69]. Im Rahmen der Genese von Veränderungen der Wirbelsäule ist die Beckenform ein relevanter Faktor, der mit spezifischen lumbalen degenerativen Pathologien assoziiert ist [69].

Die klinische Relevanz dieser Veränderungen wird bei der Analyse der Indikationen operativer Eingriffe der Wirbelsäule deutlich: Die Mehrheit aller Spondylodesen der Wirbelsäule wird aufgrund lumbaler degenerativer Pathologien durchgeführt [70, 88]. Eine rigide Fusion mit Bewegungsverlust der operierten Segmente, die Rate an Anschlussdegenerationen, die Zugangsmorbidität und weitere operationsspezifische Komplikationen können das klinische Ergebnis nach dorsalen Repositionsspondylodesen beeinträchtigen [89].

Operative Behandlungsstrategien degenerativ veränderter Segmente der Lendenwirbelsäule beinhalten die Dekompression bedrängter neuraler Strukturen und die Korrektur der dreidimensionalen spinalen Deformität unter Berücksichtigung der Balance [90, 91]. In den vergangenen Jahrzehnten wurden verschiedene Operationstechniken entwickelt, die diese Zielsetzung auf unterschiedliche Weise verwirklichen [92]. Aufgrund des operativen Zugangsweges können dorsale, laterale Verfahren und anteriore Fusionsoperationen voneinander unterschieden werden [92]. Diese Eingriffe unterscheiden sich in ihrer Technik voneinander und haben operationsspezifische Komplikationsraten [88, 93-97]. In Verbindung mit der individuellen sagittalen Balance und der Möglichkeit einer flexiblen Rekonstruktion

der LL wurde erstmals eine Hybridversorgung mit einer dorsalen Repositionsspondylodese direkt miteinander verglichen [89].

In der prospektiv randomisierten Untersuchung konnten eine balancierte Wiederherstellung der LL und eine geringere Schmerzintensität nach Hybridversorgung mit einer im Vergleich unterschiedlichen spino-pelvinen Kinematik beobachtet werden. Während zum Zeitpunkt der Publikation nur eine vergleichbare Studie vorlag, wurden zwischenzeitlich weitere Untersuchungen mit übereinstimmenden Ergebnissen sowie eine Metaanalyse, in welcher unsere Publikation eingeschlossen wurde, veröffentlicht [71, 72]. In Übereinstimmung mit der Literatur waren implantatassoziierte Komplikationen und fehlgeschlagene Fusionen gering und scheinen für das unterschiedliche operative Ergebnis nicht verantwortlich zu sein [72, 89]. Im Vergleich zu dorsalen oder lateralen Operationstechniken ermöglicht die ALIF die Rekonstruktion und Korrektur der LL in einem größeren Ausmaß [98-100]. Um zugangsbedingte Unterschiede der Ergebnisse zu detektieren, könnte in einer zukünftigen Untersuchung die Hybridversorgung mit einer ALIF und einer dorsalen Fusionsoperation der gleichen Bewegungssegmente verglichen werden [89, 101]. Zusammenfassend resultieren die untersuchten Operationsstrategien in einer unterschiedlichen spino-pelvinen Balance und Kinematik [89].

Beckenkipfung und Hüftgelenk

Die Beckenkipfung beeinflusst die azetabuläre Orientierung. In Abhängigkeit der Beckenkipfung ändert sich die funktionelle azetabuläre Anteversion und Inklination [33, 73]. Somit besteht ein Zusammenhang zwischen spino-pelvinen Interaktionen und der Artikulation der Hüfte. Eine reduzierte azetabuläre Überdachung eines dysplastischen Azetabulums kann zu einer übermäßigen Beweglichkeit und einer Instabilität des Hüftgelenkes führen. Die verminderte Überdachung kann durch sagittale Rotation des Beckens nach vorne ausgeglichen werden [73]. Bei Patienten mit Hüftdysplasie kann eine veränderte Beckenkipfung mit erhöhter Beckeninklination auftreten [59, 102]. Eine verstärkte Beckenkipfung kann jedoch auch die Entstehung einer pathologischen azetabulären Orientierung und eines azetabulären Impingements verursachen [73, 103, 104].

In Arbeit 3 dieser Habilitationsschrift konnte eine positive Korrelation zwischen der anatomischen azetabulären Anteversion, welche in Relation zur APP gemessen wurde und der Beckenkipfung nach vorne nachgewiesen werden [75]. Individuen mit einer großen

azetabulären Anteversion hatten eine signifikant stärker ausgeprägte anteriore Beckenkipfung. Darum scheint die Beckenkipfung eine große anatomische Anteversion des Azetabulums auszugleichen. Dieser Kompensationsmechanismus beeinflusst die gesamte sagittale Balance. Da bei dem Studienkollektiv keine Pathologien der Wirbelsäule und der Hüftgelenke vorlagen, handelt es sich um einen physiologischen Zusammenhang. Dass dieser Kompensationsmechanismus bei physiologischer Anteversion vorliegt war nicht bekannt und verdeutlicht die Bedeutung funktioneller anatomischer Interaktionen für die gesamte Körperstatik und Kinematik des Bewegungsapparates [75].

Die korrekte Stellung der Diagnose und erfolgreiche Behandlung der Hüftdysplasie, des femoroazetabulären Impingements und der Koxarthrose setzt die Berücksichtigung der Beckenkipfung voraus [105-111]. Nach Hüftgelenkersatz ist die Ausrichtung der implantierten Hüftpfanne in Relation zum Schaft entscheidend für die Funktion und die Standzeit einer Hüftgelenktotalendoprothese [112-115]. Die Anteversion der Hüftpfanne steht in direkter Verbindung mit dem Risiko der Inzidenz einer der häufigsten Komplikation: der Luxation des Kunstgelenkes [112, 116].

Navigierte Eingriffe des Hüftgelenkes basieren meist auf der APP, bei konventionellen Operationstechniken kann die Tischebene als Referenzebene verwendet werden [117]. Aufgrund des Zusammenhangs der Beckenkipfung mit der räumlichen Orientierung des Azetabulums wurde in einer weiteren Arbeit untersucht, ob die APP und Tischebene als gleichwertige Referenzebenen der azetabulären Orientierung unter Evaluation der Beckenkipfung verwendet werden können. Es konnte gezeigt werden, dass anhand beider Referenzebenen bei verstärkter anteriorer oder posteriorer Beckenkipfung nicht gleichermaßen die anatomische und funktionelle azetabuläre Orientierung ermittelt werden kann [117]. Bei verstärkter Beckenkipfung unterschied sich die Orientierung durch die Referenzebenen deutlich voneinander. Diese Unterschiede waren geschlechterspezifisch und bei Frauen stärker ausgeprägt [75, 117, 118]. Aufgrund einer durchschnittlich neutralen Beckenkipfung fiel dieser Unterschied bei Vergleich der Mittelwerte der untersuchten Parameter nicht auf [117, 119]. Die Beckenkipfung hat eine große interindividuelle Variabilität [120]. Es wurde davon ausgegangen, dass der individuelle Unterschied der Beckenkipfung zwischen stehender und liegender Position jedoch gering ist [120]. Schnittbildgebende Verfahren wie die Computertomographie und Magnetresonanztomographie werden deshalb häufig stellvertretend ohne Korrektur der

Beckenkipfung verwendet, um das Hüftgelenk zu untersuchen [120, 121]. Insbesondere bei einem stark ausgeprägten individuellen Unterschied der Beckenkipfung zwischen stehender und liegender Position kann eine Fehlbestimmung der azetabulären Orientierung resultieren, die durch Einschluss der Beckenkipfung in die Analyse vermieden werden kann [103, 114, 121-124]. Untersuchungen der individuellen Beckenkipfung, azetabulären Orientierung und sagittalen Balance in verschiedenen Körperpositionen können weitere klinisch relevante Informationen über funktionelle Interaktionen geben [123, 125]. Bei verstärkter Beckenkipfung ist die Tischebene eine valide Referenzebene für die funktionelle Orientierung des Azetabulums. Die APP kann verwendet werden, um die anatomische azetabuläre Orientierung unabhängig von der Beckenkipfung zu bestimmen [117].

Belastung und untere Extremität

Die funktionelle Anatomie der unteren Extremität kann anhand der mechanischen Beinachse beurteilt werden [80]. Beinachsendeformationen und Fehlstellungen der unteren Extremität können mit Hilfe der mechanischen Beinachse erkannt, operative Korrekturen und der künstliche Ersatz des Kniegelenks geplant und dessen Genauigkeit sowie Qualität beurteilt werden. Deshalb ist es klinisch relevant, dass in der radiologischen Ganzbeinaufnahme die tatsächliche Beinachse gemessen wird. Die Rotation des Beines, Beugung des Kniegelenks und Muskelaktivität beeinflussen das Messergebnis der Beinachse [66, 77, 79, 126-129].

Da ein signifikanter Unterschied einer Messung der mechanischen Beinachse zwischen liegender und stehender Position existiert, konnte ein Zusammenhang zwischen der Belastung und mechanischer Beinachse vermutet werden [78, 79]. Bis zur Veröffentlichung der Studie und Erstellen dieser Habilitationsschrift wurde der Einfluss der Belastung auf die mechanische Beinachse noch nicht publiziert [80]. Klinische Bedeutung hätte eine Verbindung zwischen Belastung und funktioneller Anatomie der unteren Extremität, da die Beinachse häufig unmittelbar postoperativ in Ganzbeinaufnahmen vermessen wird, wenn schmerzbedingt noch keine Vollbelastung möglich oder in der Nachbehandlung nicht vorgesehen ist. Es konnte erstmals gezeigt werden, dass die mechanische Beinachse von der Belastung abhängt. Die postoperative Änderung der mechanischen Beinachse korrelierte mit einer Zunahme der Belastung des Beines [80]. Diese Ergebnisse wären klinisch relevant, falls es neben einer Änderung der postoperativ gemessenen mechanischen Beinachse eine zeitabhängige individuelle unterschiedliche Abweichung von der neutralen Achse gäbe. In

einer weiteren Arbeit konnte diese postoperative Änderung der mechanischen Beinachse nach Implantation einer Kniegelenkstotalendoprothese mit signifikanter unterschiedlicher Verteilung dieser sogenannten „Ausreißer“ nachgewiesen werden [130].

3.2 Konzeption diagnostischer Algorithmen

Visualisierung funktioneller Interaktionen

Funktionelle anatomische Interaktionen mit stark veränderter Körperstatik können bereits durch die Inspektion erkannt werden. Weniger augenscheinliche Pathologien und Zusammenhänge können erst durch eine differenzierte klinische Untersuchung und Anwendung diagnostischer Hilfsmittel erkannt und dargestellt werden. Klassifikationen und Therapieempfehlung vieler Pathologien des Bewegungsapparates beruhen auf den Ergebnissen radiologischer Untersuchungen. Das korrekte Erfassen realer anatomischer Verhältnisse in der bildgebenden Diagnostik ist darum wesentlich. Die meisten radiologischen Verfahren bilden das dynamische Gleichgewicht des Bewegungsapparates in einer bestimmten Position in einer statischen Momentaufnahme einer Körperregion ab. Verschiedene radiologische Untersuchungsmethoden wurden entwickelt, um den Bewegungsapparat und dessen Pathologien unter einem funktionellen Blickwinkel darzustellen.

Diagnostischer Algorithmus bei Pathologien der Wirbelsäule

Röntgenaufnahmen der Wirbelsäule, des Beckens und der unteren Extremität im Stand erfassen die individuelle Anatomie und räumliche Orientierung unter Belastung. Es konnte gezeigt werden, dass für verschiedenen Pathologien ein klinisch relevanter Unterschied zwischen Röntgenaufnahmen in liegender und stehender Position besteht [78, 103, 109, 122, 131-133]. Schnittbildgebende Untersuchungstechniken ermöglichen eine detaillierte Visualisierung spinaler Pathologien. Funktionsaufnahmen und Wirbelsäulenganzaufnahmen bilden die funktionelle Anatomie der Wirbelsäule in verschiedenen Ebenen ab. Da die Körperstellung einen relevanten Einfluss auf die Balance hat, werden Wirbelsäulenganzaufnahmen standardisiert durchgeführt, um vergleich- und reproduzierbar zu sein [134].

Das gesamte Skelett mit seinen funktionellen anatomischen Wechselwirkungen kann durch innovative Untersuchungsmethoden mit geringer Strahlenbelastung dreidimensional radiologisch erfasst werden [37, 135-137]. Die zugrundeliegende Technik wurde 1992 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet [135, 138]. Diese Untersuchungen sind für die Diagnostik und Planung operativer Eingriffe der Wirbelsäule relevant [24, 56, 139]. Parameter, die in Aufnahmen des gesamten Bewegungsapparates gemessen werden können, zeigen eine hohe Korrelation mit der gesundheitsbezogenen Lebensqualität, die durch moderne Evaluationsmethoden erfasst werden kann (*englisch*: Patient Reported Outcome Measures) [37]. Anhand der kumulativen Befunde der klinischen und bildgebenden Diagnostik kann die Behandlung spinaler Pathologien unter Berücksichtigung funktioneller Interaktionen, der resultierenden Balance der Wirbelsäule und der gesamten Körperstatik exakt geplant werden.

Diagnostisches Vorgehen bei Hüftgelenkspathologien

Die Beckenkipfung beeinflusst die azetabuläre Orientierung und sollte bei der Planung operativer Eingriffe der Wirbelsäule und des Hüftgelenks berücksichtigt werden [108, 110, 140]. Die individuelle Beckenkipfung und räumliche Orientierung des Azetabulums zeigen positionsabhängige relevante Unterschiede [33, 141]. Es konnte gezeigt werden, dass die als sicher geltende Pfannenpositionierung von der Beckenkipfung abhängig ist und über die Hälfte der Prothesen bei vermeintlich korrekter Pfannenposition innerhalb der sogenannten „safe zone“ luxieren [105, 112, 142].

Die spino-pelvine Kinematik und Beckenkipfung ändern sich bei verschiedenen Pathologien der Wirbelsäule und der Hüftgelenke [18, 27, 108, 143]. Bei Koexistenz dieser symptomatischen Pathologien stellt sich dem Wirbelsäulen- und Hüftchirurgen die Frage der Reihenfolge und Art und Weise der Behandlung [74, 144]. Die Schwierigkeit besteht aufgrund einer deutlich erhöhten Komplikationsrate und schlechter klinischer Ergebnisse eines Hüftgelenkersatzes bei gleichzeitigem Bestehen einer adulten spinalen Deformität aber auch vor oder nach deren erfolgreicher operativen Korrektur [143, 145-149]. Eine vergleichbare Situation mit einem deutlich erhöhten Komplikations- und Luxationsrisiko aufgrund einer pathologischen Balance und spino-pelvinen Kinematik liegt bei der Spondylitis ankylosans als Komorbidität vor [150, 151]. Nach langstreckiger lumbaler Repositionsspondylodese kann das Risiko der Luxation eines zuvor implantierten Kunstgelenkes um 340 % und die Notwendigkeit einer Revision um 220 % erhöht sein [148]. Mit Rekonstruktion der LL und Reduktion des PT

reduziert sich nach operativer Korrektur der spinalen Deformität eine erhöhte azetabuläre Anteversion nahezu im Verhältnis eins zu eins zum PT [57, 74]. Nach Implantation einer Hüft-TEP ändert sich der PT normalerweise nur minimal. Bei Vorliegen eines komorbiden Rückenschmerzes wurde nach Implantation eines Hüftgelenkersatzes die Normalisierung einer zuvor veränderten LL, Beckenkipfung und femoralen Rotation mit Verbesserung der sagittalen Balance und Besserung der Lumbago beobachtet [152-155]. Die Beugekontraktur der Hüfte kann die physiologische Beweglichkeit des Beckens verhindern und die posteriore Beckenkipfung als Kompensationsmechanismus der reduzierten LL limitieren [57]. Das Vorliegen einer Hüftbeugekontraktur wurde als Kriterium für den primären Hüftgelenkersatz mit postoperativer Reevaluation der Indikation einer Operation einer koexistenten lumbalen degenerativen Pathologie vorgestellt und ein darauf basierender Algorithmus entworfen [57]. Das sagittale Anschauungsmodell konnte erweitert werden, als gezeigt wurde, dass Veränderungen des Kniegelenks nicht nur zu einem veränderten Gangbild führen sondern die sagittale Balance beeinflussen können [156].

Diagnostischer Algorithmus bei Pathologien der unteren Extremität

Die Beugung des Kniegelenks kann als Kompensationsmechanismus oder als Bestandteil einer Pathologie des Gelenks vorliegen [10, 27, 156]. Die Untersuchung des Kniegelenks erfolgt in Relation zu den geschilderten Wechselbeziehungen. Als Besonderheit besteht der Zusammenhang zwischen mechanischer Beinachse und Belastung, welcher in der klinischen Routinediagnostik bislang nicht erfasst wird. Die Ganzbeinstandaufnahme ist eine statische Untersuchung der unteren Extremität. Dynamische Gang- und Belastungsanalysen können weitere relevante Information über die Kinematik und Funktion des nativen und endoprothetisch ersetzten Kniegelenks geben [157]. Weitere Verbindungen können durch detaillierte Untersuchungen in mehreren Dimensionen erkannt werden [15]. Skoliotische Fehlstellungen und Deformitäten interagieren mit dem Beckenstand, Beinlängendifferenzen und Fehlstellungen der unteren Extremität [15, 16]. Die physikalische Krafteinwirkung hat einen Einfluss auf die gesamte funktionelle Anatomie der unteren Extremität [158].

Eine differenzierte Diagnostik ermöglicht die exakte Planung einer optimalen individuellen Behandlung unter Berücksichtigung funktioneller anatomischer Wechselwirkungen und altersabhängiger sowie geschlechterspezifischer Faktoren [108, 118, 145, 159]. Die Implementierung neuer Kenntnisse in klinische Prozesse ist Gegenstand aktueller

interdisziplinärer Forschung [74, 141, 152, 156]. Im folgenden Kapitel werden Möglichkeiten der Integration funktioneller anatomischer Interaktionen in operative Behandlungskonzepte erörtert.

3.3 Optimierung operativer Behandlungsstrategien

Mit der steigenden Zahl durchgeführter Eingriffe auf Grund von Pathologien des Bewegungsapparates haben operationsassoziierte Komplikationen eine zunehmende klinische Relevanz erhalten. Die optimale Therapie dieser Komplikationen mit Möglichkeiten operativer Revisionen wird in aktuellen Studien untersucht. Eine spezifische Komplikationsanalyse kann die Reduktion von Komplikationen und die Optimierung operativer Behandlungskonzepte ermöglichen.

Operative Eingriffe an der Wirbelsäule

Komplikationen nach operativen Eingriffen an der Wirbelsäule können aufgrund biomechanischer Ursachen entstehen [95, 148, 160]. Funktionelle anatomische Interaktionen können das Risiko einer Anschlussdegeneration des angrenzenden Bewegungssegmentes, Anschlussfraktur oder eines Implantatversagens erhöhen [70, 161]. Optimal durchgeführte komplexe operative Korrekturen adulter spinaler Deformitäten sind erfolgreiche Operationen, welche es ermöglichen, die Deformität zu korrigieren, Schmerzen zu lindern und neurologische Defizite zu reduzieren [162]. Moderne Untersuchungsmethoden der gesundheitsbezogenen Lebensqualität belegen den Erfolg dieser Eingriffe [90, 162].

Die physiologische Lordose der beweglichen Lendenwirbelsäule steht in Zusammenhang mit dem Sagittalprofil und der sagittalen Balance [25, 27, 28]. Die physiologische individuelle LL kann in Relation zur PI ermittelt werden: $LL = PI \pm 9^\circ$. Die Rekonstruktion der LL und Fixation lumbaler Bewegungssegmente in einer optimalen Position mit einer anzustrebenden Differenz von weniger als 10° dieses sogenannten „PI-LL Mismatch“ hat eine hohe Korrelation zur Lebensqualität [23, 41, 163, 164].

Das Sagittalprofil kann anhand des Sacral Slopes, der sich aufgrund der konstanten PI in Abhängigkeit des PT ändert, bestimmt werden. Der PT dient mit der SVA zur Bestimmung der sagittalen Balance [165]. Diese Parameter werden für die Charakterisierung adulter spinaler Deformitäten und Klassifikation der Balance verwendet [166]. Ein weiterer Schritt zu einer

umfassenden Betrachtung des Bewegungsapparates ist die erst kürzlich publizierte global sagittal axis [137]. Dieser Parameter umfasst das Gleichgewicht der Wirbelsäule und unteren Extremität, zeigt eine hohe Korrelation mit der gesundheitsbezogenen Lebensqualität und den weiteren Parametern der sagittalen Balance [37]. Verschiedene Studien konnten belegen, dass eine persistierende postoperative Dysbalance mit schlechten klinischen Ergebnissen und einer erhöhten Rate von Komplikationen assoziiert ist [167]. Da nicht nur die knöchernen (Lenden-)Wirbelsäule am Degenerationsprozess und an der Aufrechterhaltung der Balance beteiligt ist, wurden altersabhängige Überlegungen in die Definition von Zielwerten und Behandlungsstrategien einbezogen [163, 164, 168-170]. Diese individuellen Zielparameter können manuell gemessen oder softwarebasiert berechnet werden [171, 172]. Computersimulationen können bei der individuellen Planung operativer Korrekturen unter Berücksichtigung funktioneller Interaktionen hilfreich sein [168, 173, 174].

Die Herausforderung koexistenter Pathologien

Liegen bei einem Patienten gleichzeitig symptomatische Erkrankungen der Wirbelsäule und der Hüftgelenke vor, können sich diese gegenseitig und das Ergebnis deren operativer Behandlung beeinflussen [17, 153]. Nach operativer Behandlung einer der symptomatischen Pathologien können sich die Beschwerden der weiteren ohne deren gezielte Behandlung bessern, welches für den Betroffenen und Operateur erfreulich, aber nicht immer erklärbar ist [57, 152]. Umgekehrt können Operationen oder persistierende Pathologien der Wirbelsäule und des Hüftgelenkes einen negativen Einfluss aufeinander haben [143, 146, 175]. Eine höchst unerfreuliche Beobachtung sind persistierende postoperative Beschwerden, die aufgrund einer vermeintlich konkurrierenden oder sogar übersehenen Komorbidität bestehen [147]. In Abhängigkeit dieser Komorbiditäten und Voroperationen wurden für den Gelenkersatz der Hüfte, welcher als Operation des 20. Jahrhunderts bezeichnet wurde, sehr hohe Komplikationsraten registriert, welche den Titel nicht rechtfertigen würden, gälten sie generell für den alloarthroplastischen Hüftgelenkersatz [176].

Evaluation der spino-pelvinen Kinematik

Bei pathologischer spino-pelviner Kinematik ist das Risiko einer funktionellen Malposition der azetabulären Komponenten als wesentlicher Risikofaktor der Luxation einer

Hüftgelenktotalendoprothese deutlich erhöht [76, 108, 148-150]. Die individuelle Beckenkipfung kann eine funktionelle Fehlposition der Pfanne in über der Hälfte der implantierten Hüftgelenktotalendoprothesen verursachen [177]. Möglicherweise besteht aufgrund der höheren Korrelation der bei Frauen ohnehin variableren Beckenkipfung mit der azetabulären Orientierung ein geschlechterspezifischer Unterschied, der die erhöhte Wahrscheinlichkeit einer Prothesenluxation verursacht [75, 117].

Die Frage der optimalen individuellen Pfannenposition kann nur unter Bezug zur Beckenkipfung und Berücksichtigung der Komorbiditäten sowie der spino-pelvinen Kinematik beantwortet werden [141]. Die sagittale Balance und spino-pelvine Kinematik hat in der Endoprothetik des Hüftgelenkes einen relevanten Stellenwert erhalten. Ein PT von weniger als 25° und eine Differenz zwischen PI und LL von weniger als 10° können eine balancierte Situation definieren [108, 144]. Die Feststellung der spino-pelvinen Beweglichkeit ergibt sich aus der klinischen Untersuchung und des radiologischen Befundes [144]. Eine Unterteilung ist durch Bestimmung der Differenz des Sacral Slope zwischen sitzender und stehender Position möglich [111]. Anhand dieser Kategorisierung kann die individuell optimale Pfannenpositionierung ermittelt werden [108].

Die Endoprothetik des Kniegelenks und funktionelle Anatomie der unteren Extremität

Die Translation funktioneller anatomischer Interaktionen der unteren Extremität in klinische Behandlungskonzepte erscheint nur auf den ersten Blick einfacher. Die mechanische Beinachse wird in Ganzbeinstandaufnahmen unter physiologischer Belastung korrekt abgebildet [80]. Darum sollte bei der Beurteilung der Beinachse die Belastung berücksichtigt werden [130]. Der genaue Zeitpunkt, an dem die mechanische Beinachse erstmals korrekt in einer Ganzbeinstandaufnahme gemessen werden kann, wurde bislang nicht bestimmt. Unsere Untersuchungen waren auf einen Zeitraum von 3 und 12 Monate limitiert, da die mechanische Beinachse und Belastung ab dem dritten postoperativen Monat konstant blieben [130]. Änderungen der Beinachse über einen längeren Zeitraum könnten von verschiedenen Faktoren, wie der Ausrichtung der Prothese oder vom Körpergewicht und BMI beeinflusst werden und relevant für die Funktion und Standzeit einer Kniegelenktotalendoprothese sein [178, 179]. Verschiedene Methoden der Prothesenimplantation erzielen eine sehr hohe Genauigkeit mit vergleichbaren klinischen Ergebnissen [180].

Eine Reduktion unbefriedigender Ergebnisse, welche in bis zu einem Viertel nach einem alloarthroplastischen Ersatz des Kniegelenkes beobachtet wurden, ist durch weiterführende Untersuchungen möglich [181, 182]. Die komplexe Kinematik des nativen Kniegelenks wird durch den Gelenkersatz verändert [180, 183, 184]. Um die Funktion zu verbessern und die Patientenzufriedenheit zu erhöhen werden moderne Prothesendesigns und Operationstechniken unter funktionellen Gesichtspunkten entwickelt [183, 185]. In aktuellen Untersuchungen wird die ideale Geometrie für die Funktion und Standzeit einer Knieendoprothese und überprüft [65]. Faktoren wie die Muskulatur, Alterationen des Kapsel-Band-Apparates und die konstitutionelle varische Beinachse können einen Einfluss auf die optimale Rekonstruktion der Achse und die Funktion des nativen und endoprothetisch ersetzten Kniegelenks haben [51, 186].

Insgesamt erhöhen die Auswahlmöglichkeit verschiedener Implantate und Prothesendesigns sowie unterschiedliche Operationsverfahren und -techniken die Anzahl der Faktoren, welche einen relevanten Einfluss auf das Behandlungsergebnis haben. Ein optimales operatives Behandlungskonzept beinhaltet die Differenzierung zwischen primärer Pathologie und sekundären Veränderungen, Erfassen von Komorbiditäten, Kompensationsmechanismen und Möglichkeit zur postoperativen Adaptation. Der operative Eingriff sollte die Gesamtheit individueller relevanter funktioneller Wechselbeziehungen des muskuloskelettalen Systems mitsamt neurobiologischer altersabhängiger Veränderungen berücksichtigen [169, 187]. Durch eine standardisierte Planung unter Berücksichtigung individueller funktioneller Interaktionen kann eine klinisch signifikante Optimierung operativer Behandlungsstrategien erzielt werden [168]. Das postoperative Behandlungsergebnis kann durch eine detaillierte Evaluation mit Erfassen der gesundheitsbezogenen Lebensqualität und Erwartung der Patienten an den operativen Eingriff beurteilt werden. In internationalen Projekten wird untersucht, ob durch vergleichbare universelle Methoden die gesundheitsbezogene Lebensqualität allgemeingültig erfasst werden kann [188, 189].

4. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Habilitationsschrift wurde die klinische Relevanz spino-pelviner Interaktionen und der funktionellen Anatomie der unteren Extremität erörtert. Erstmals konnte gezeigt werden, dass spezifische degenerative Veränderungen der Wirbelsäule mit der anatomischen Beckenform assoziiert sind. Die postoperative individuelle spino-pelvine Kinematik ist von der operativen Rekonstruktion der lumbalen Lordose abhängig. Die Beckenkipfung beeinflusst die azetabuläre Orientierung und kompensiert eine erhöhte azetabuläre Anteversion. Eine korrekte individuelle azetabuläre Orientierung ist nur unter Berücksichtigung der Beckenkipfung und spino-pelvinen Kinematik möglich. Die mechanische Beinachse wird durch die physikalische Krafteinwirkung beeinflusst und kann nur unter physiologischer Belastung reliabel erfasst werden.

Die funktionelle Anatomie des menschlichen Körpers ist nicht auf eine räumliche Ebene beschränkt. Das Modell der sagittalen Balance beschreibt einen klinisch relevanten Teil der mehrdimensionalen Wechselbeziehungen des gesamten Bewegungsapparates. Die Balance der Wirbelsäule könnte einen relevanten Einfluss auf die räumliche Orientierung der Scapula, dreidimensionale Kinematik des Schultergelenks und Funktionen der oberen Extremität haben [190]. Bislang wurden Zusammenhänge zwischen der Wirbelsäule und der Schulter vornehmlich bei idiopathischen adoleszenten Skoliosen in der Frontalebene untersucht [191, 192].

Funktionelle anatomische Interaktionen sind an einer Vielzahl physiologischer und pathologischer Vorgänge des Bewegungsapparates beteiligt. Detaillierte Kenntnisse dieser individuellen Wechselwirkungen ermöglichen unter Berücksichtigung der Ätiologie, Pathogenese und altersabhängiger Faktoren eine rationale Diagnostik und fundierte Behandlung [7, 140]. Im Rahmen der multifaktoriellen Genese von Erkrankungen und ihren Symptomen ist die Differenzierung zwischen koexistenten Pathologien und funktionellen Zusammenhängen differentialdiagnostisch bedeutend und unmittelbar klinisch relevant.

Konventionelle Röntgenaufnahmen dienen der Planung operativer Eingriffe des Bewegungsapparates wie dem alloarthroplastischen Ersatz des Hüftgelenkes. Moderne bildgebende Untersuchungsmethoden können in Zukunft eine funktionelle dreidimensionale Planung operativer Eingriffe unter Berücksichtigung anatomischer Beziehungen ermöglichen.

Um die Strahlenbelastung zu reduzieren, werden in aktuellen Studien Parameter untersucht, welche in gezielten radiologischen Aufnahmen einer Körperregion erhoben werden können und Aussagekraft über funktionelle Verbindungen und die gesamte Balance des Bewegungsapparates haben [35, 193]. Diese auf die Diagnostik bezogene Perspektive spiegelt die grundsätzliche Intention einer Steigerung der Effizienz wider. Zahlreiche Studien hatten zuvor die sozioökonomische und gesundheitspolitische Bedeutung von Erkrankungen des Bewegungsapparates aufgezeigt [194, 195].

Die Wissenschaft der Medizin beinhaltet mit der Identifikation der für das Behandlungsergebnis relevanten Faktoren die Evaluation des Behandlungserfolges mit einer Komplikationsanalyse und das Erfassen des Wohlergehens der Patienten mit modernen wissenschaftlichen Methoden [169, 196-198]. Die Charité – Universitätsmedizin Berlin ist an internationalen Projekten zur interdisziplinären Erfassung der gesundheitsbezogenen Lebensqualität beteiligt [147, 188, 189]. Die Daten chirurgischer Forschung sind die wissenschaftliche Grundlage der Behandlung und Operationen der nächsten Generation [199].

In der aktuellen medizinischen Epoche werden dreidimensionale Modelle zur operativen Planung computerassistierter Operationen entwickelt und Möglichkeiten des bereits in anderen Fachgebieten erfolgreichen und unserem mechanisch geprägten Fach naheliegenden Einsatzes roboterunterstützter Chirurgie untersucht [200-207]. Moderne Implantat- und Prothesendesigns werden unter patientenspezifischen und funktionellen Überlegungen entworfen [208]. Blickt man unter einem präventiven Blickwinkel weiter, sind Strategien zur Verhinderung des Entstehens von Pathologien der Wirbelsäule und anderer Körperregionen durch Identifikation prädisponierender Faktoren vorstellbar. Die erfolgreiche Behandlung präarthrotischer Deformitäten des Hüftgelenkes konnte nach deren Erkennen die Inzidenz einer sekundären Koxarthrose reduzieren [209, 210]. Die Prävention ist eine wichtige Facette in der aktuellen für die Medizin bedeutenden Ära.

Innerhalb der gesamten Dimension des medizinischen Fortschrittes kann die Evaluation der klinischen Relevanz funktioneller anatomischer Interaktionen die Optimierung existierender und Konzeption neuer Behandlungsstrategien von Pathologien des Bewegungsapparats ermöglichen.

5. Literaturangaben

1. Straus WL, Jr. Fossil evidence of the evolution of the erect, bipedal posture. *Clin Orthop*. 1962;25:9-19. Epub 1962/01/01. PubMed PMID: 13978793.
2. Jenkins FA, Jr. Chimpanzee bipedalism: cineradiographic analysis and implications for the evolution of gait. *Science*. 1972;178(4063):877-9. Epub 1972/11/24. PubMed PMID: 5085987.
3. Lovejoy CO. The origin of man. *Science*. 1981;211(4480):341-50. Epub 1981/01/23. doi: 10.1126/science.211.4480.341. PubMed PMID: 17748254.
4. Asmussen E, Klausen K. Form and function of the erect human spine. *Clin Orthop*. 1962;25:55-63. Epub 1962/01/01. PubMed PMID: 13965250.
5. Lovejoy CO, Suwa G, Spurlock L, Asfaw B, White TD. The pelvis and femur of *Ardipithecus ramidus*: the emergence of upright walking. *Science*. 2009;326(5949):71e1-6. Epub 2009/10/08. PubMed PMID: 19810197.
6. Williams SA, Russo GA. Evolution of the hominoid vertebral column: The long and the short of it. *Evol Anthropol*. 2015;24(1):15-32. Epub 2015/02/17. doi: 10.1002/evan.21437. PubMed PMID: 25684562.
7. Hayden AM, Hayes AM, Brechbuhler JL, Israel H, Place HM. The effect of pelvic motion on spinopelvic parameters. *Spine J*. 2018;18(1):173-8. Epub 2017/08/20. doi: 10.1016/j.spinee.2017.08.234. PubMed PMID: 28821443.
8. Duval-Beaupere G, Schmidt C, Cosson P. 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):451-62. Epub 1992/01/01. PubMed PMID: 1510296.
9. Schede F. Haltungsfehler (Haltungsverfall) und Skoliosen. *Klin Wschr*. 1927;39, 40.
10. Lazennec JY, Folinais D, Bendaya S, Rousseau MA, Pour AE. The global alignment in patients with lumbar spinal stenosis: our experience using the EOS full-body images. *Eur J Orthop Surg Traumatol*. 2016;26(7):713-24. Epub 2016/08/31. doi: 10.1007/s00590-016-1833-4. PubMed PMID: 27573076.
11. Ferrero E, Liabaud B, Challier V, Lafage R, Diebo BG, Vira S, et al. Role of pelvic translation and lower-extremity compensation to maintain gravity line position in spinal deformity. *J Neurosurg Spine*. 2016;24(3):436-46. doi: 10.3171/2015.5.SPINE14989. PubMed PMID: 26565764.
12. Chang A, Lad EM, Lad SP. Hippocrates' influence on the origins of neurosurgery. *Neurosurg Focus*. 2007;23(1):E9. Epub 2007/10/27. doi: 10.3171/foc.2007.23.1.9. PubMed PMID: 17961056.
13. Marketos SG, Skiadas P. Hippocrates. The father of spine surgery. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1999;24(13):1381-7. Epub 1999/07/15. PubMed PMID: 10404583.
14. Panourias IG, Stranjalis G, Stavrinou LC, Sakas DE. The Hellenic and Hippocratic origins of the spinal terminology. *J Hist Neurosci*. 2011;20(3):177-87. Epub 2011/07/09. doi: 10.1080/0964704X.2010.510180. PubMed PMID: 21736439.
15. Janusz P, Tyrakowski M, Monsef JB, Siemionow K. Influence of lower limbs discrepancy and pelvic coronal rotation on pelvic incidence, pelvic tilt and sacral slope. *Eur Spine J*. 2016;25(11):3622-9. Epub 2016/10/28. doi: 10.1007/s00586-016-4458-8. PubMed PMID: 26940054.
16. Kocabiyik A, Misir A, Kizkapan TB, Yildiz KI, Kaygusuz MA, Alpay Y, et al. Changes in Hip, Knee, and Ankle Coronal Alignments After Total Hip Arthroplasty With Transverse Femoral

Shortening Osteotomy for Unilateral Crowe Type IV Developmental Dysplasia of the Hip. *J Arthroplasty*. 2017;32(11):3449-56. Epub 2017/06/24. doi: 10.1016/j.arth.2017.05.044. PubMed PMID: 28641973.

17. Offierski CM, MacNab I. Hip-spine syndrome. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1983;8(3):316-21. Epub 1983/04/01. PubMed PMID: 6623198.

18. Weinberg DS, Gebhart JJ, Liu RW. Hip-spine syndrome: A cadaveric analysis between osteoarthritis of the lumbar spine and hip joints. *Orthop Traumatol Surg Res*. 2017;103(5):651-6. Epub 2017/06/05. doi: 10.1016/j.otsr.2017.05.010. PubMed PMID: 28578098.

19. Hohmann G. [Franz Schede - 70. birthday on July 9, 1952]. *Z Orthop Ihre Grenzgeb*. 1952;82(2):144-50. Epub 1952/01/01. PubMed PMID: 14951634.

20. Bethge R. [Franz Schede - in memory of his 100th birthday on 9 July 1982]. *Beitr Orthop Traumatol*. 1982;29(7):349-53. Epub 1982/07/01. PubMed PMID: 6215916.

21. Stagnara P, De Mauroy JC, Dran G, Gonon GP, Costanzo G, Dimnet J, et al. Reciprocal angulation of vertebral bodies in a sagittal plane: approach to references for the evaluation of kyphosis and lordosis. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1982;7(4):335-42. Epub 1982/07/01. PubMed PMID: 7135066.

22. Vaz G, Roussouly P, Berthonnaud E, Dimnet J. Sagittal morphology and equilibrium of pelvis and spine. *Eur Spine J*. 2002;11(1):80-7. Epub 2002/04/05. PubMed PMID: 11931071; PubMed Central PMCID: PMC3610486.

23. Laouissat F, Sebaaly A, Gehrchen M, Roussouly P. Classification of normal sagittal spine alignment: refounding the Roussouly classification. *Eur Spine J*. 2017. Epub 2017/04/30. doi: 10.1007/s00586-017-5111-x. PubMed PMID: 28455623.

24. Sebaaly A, Grobost P, Mallam L, Roussouly P. Description of the sagittal alignment of the degenerative human spine. *Eur Spine J*. 2017. Epub 2017/11/28. doi: 10.1007/s00586-017-5404-0. PubMed PMID: 29177554.

25. Roussouly P, Pinheiro-Franco JL. Biomechanical analysis of the spino-pelvic organization and adaptation in pathology. *Eur Spine J*. 2011;20 Suppl 5:609-18. doi: 10.1007/s00586-011-1928-x. PubMed PMID: 21809016; PubMed Central PMCID: PMC3175914.

26. Roussouly P, Gollogly S, Berthonnaud E, Dimnet J. Classification of the normal variation in the sagittal alignment of the human lumbar spine and pelvis in the standing position. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2005;30(3):346-53. Epub 2005/02/01. PubMed PMID: 15682018.

27. Barrey C, Roussouly P, Le Huec JC, D'Acunzi G, Perrin G. Compensatory mechanisms contributing to keep the sagittal balance of the spine. *Eur Spine J*. 2013;22 Suppl 6:S834-41. doi: 10.1007/s00586-013-3030-z. PubMed PMID: 24052406; PubMed Central PMCID: PMC3830026.

28. Le Huec JC, Aunoble S, Philippe L, Nicolas P. Pelvic parameters: origin and significance. *Eur Spine J*. 2011;20 Suppl 5:564-71. Epub 2011/08/11. doi: 10.1007/s00586-011-1940-1. PubMed PMID: 21830079; PubMed Central PMCID: PMC3175921.

29. Le Huec JC, Saddiki R, Franke J, Rigal J, Aunoble S. Equilibrium of the human body and the gravity line: the basics. *Eur Spine J*. 2011;20 Suppl 5:558-63. Epub 2011/08/03. doi: 10.1007/s00586-011-1939-7. PubMed PMID: 21809013; PubMed Central PMCID: PMC3175916.

30. Dubousset J. Pelvic obliquity: a review. *Orthopedics*. 1991;14(4):479-81. Epub 1991/04/01. PubMed PMID: 2038583.

31. Kretzer RM. Adult Degenerative Spinal Deformity: Overview and Open Approaches for Treatment. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2017;42 Suppl 7:S16. Epub 2017/03/16. doi: 10.1097/BRS.0000000000002028. PubMed PMID: 28296697.
32. Roussouly P, Pinheiro-Franco JL. Sagittal parameters of the spine: biomechanical approach. *Eur Spine J*. 2011;20 Suppl 5:578-85. doi: 10.1007/s00586-011-1924-1. PubMed PMID: 21796394; PubMed Central PMCID: PMC3175922.
33. Lazenec JY, Boyer P, Gorin M, Catonne Y, Rousseau MA. Acetabular anteversion with CT in supine, simulated standing, and sitting positions in a THA patient population. *Clin Orthop Relat Res*. 2010;469(4):1103-9. Epub 2010/12/17. doi: 10.1007/s11999-010-1732-7. PubMed PMID: 21161739; PubMed Central PMCID: PMC3048248.
34. Boulay C, Tardieu C, Hecquet J, Benaim C, Mouilleseaux B, Marty C, et al. Sagittal alignment of spine and pelvis regulated by pelvic incidence: standard values and prediction of lordosis. *Eur Spine J*. 2006;15(4):415-22. doi: 10.1007/s00586-005-0984-5. PubMed PMID: 16179995; PubMed Central PMCID: PMC3489325.
35. Goldschmidt E, Angriman F, Ferreyro B, Agarwal N, Zhou J, Chen K, et al. Design and Testing of 2 Novel Scores That Predict Global Sagittal Alignment Utilizing Cervical or Lumbar Plain Radiographs. *Neurosurgery*. 2018;82(2):163-71. Epub 2017/04/19. doi: 10.1093/neuros/nyx178. PubMed PMID: 28419292.
36. Jackson RP, Peterson MD, McManus AC, Hales C. Compensatory spinopelvic balance over the hip axis and better reliability in measuring lordosis to the pelvic radius on standing lateral radiographs of adult volunteers and patients. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1998;23(16):1750-67. Epub 1998/09/05. PubMed PMID: 9728376.
37. Diebo BG, Oren JH, Challier V, Lafage R, Ferrero E, Liu S, et al. Global sagittal axis: a step toward full-body assessment of sagittal plane deformity in the human body. *J Neurosurg Spine*. 2016;25(4):494-9. Epub 2016/05/21. doi: 10.3171/2016.2.SPINE151311. PubMed PMID: 27203811.
38. Gelb DE, Lenke LG, Bridwell KH, Blanke K, McEneaney KW. An analysis of sagittal spinal alignment in 100 asymptomatic middle and older aged volunteers. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1995;20(12):1351-8. Epub 1995/06/15. PubMed PMID: 7676332.
39. Decker S, Muller CW, Omar M, Krettek C, Schwab F, Trobisch PD. [Sagittal Balance of the Spine--Clinical Importance and Radiographic Assessment]. *Z Orthop Unfall*. 2016;154(2):128-33. Epub 2015/12/17. doi: 10.1055/s-0041-109327. PubMed PMID: 26670303.
40. Been E, Kalichman L. Lumbar lordosis. *Spine J*. 2014;14(1):87-97. doi: 10.1016/j.spinee.2013.07.464. PubMed PMID: 24095099.
41. Asai Y, Tsutsui S, Oka H, Yoshimura N, Hashizume H, Yamada H, et al. Sagittal spino-pelvic alignment in adults: The Wakayama Spine Study. *PLoS One*. 2017;12(6):e0178697. Epub 2017/06/07. doi: 10.1371/journal.pone.0178697. PubMed PMID: 28586366; PubMed Central PMCID: PMC5460860.
42. Duval-Beaupere G, Marty C, Barthel F, Boiseaubert B, Boulay C, Comnard MC, et al. Sagittal profile of the spine prominent part of the pelvis. *Stud Health Technol Inform*. 2002;88:47-64. PubMed PMID: 15459980.
43. Lewis CL, Laudicina NM, Khuu A, Loverro KL. The Human Pelvis: Variation in Structure and Function During Gait. *Anat Rec (Hoboken)*. 2017;300(4):633-42. Epub 2017/03/16. doi: 10.1002/ar.23552. PubMed PMID: 28297184; PubMed Central PMCID: PMC545133.

44. Lazenec JY, Charlot N, Gorin M, Roger B, Arafati N, Bissery A, et al. Hip-spine relationship: a radio-anatomical study for optimization in acetabular cup positioning. *Surg Radiol Anat.* 2004;26(2):136-44. Epub 2003/11/08. doi: 10.1007/s00276-003-0195-x. PubMed PMID: 14605752.
45. Bagwell JJ, Fukuda TY, Powers CM. Sagittal plane pelvis motion influences transverse plane motion of the femur: Kinematic coupling at the hip joint. *Gait Posture.* 2016;43:120-4. Epub 2015/10/17. doi: 10.1016/j.gaitpost.2015.09.010. PubMed PMID: 26471322.
46. MacWilliams BA, McMulkin ML, Davis RB, Westberry DE, Baird GO, Stevens PM. Biomechanical changes associated with femoral derotational osteotomy. *Gait Posture.* 2016;49:202-6. Epub 2016/07/28. doi: 10.1016/j.gaitpost.2016.07.002. PubMed PMID: 27450671.
47. Abdel MP, Oussedik S, Parratte S, Lustig S, Haddad FS. Coronal alignment in total knee replacement: historical review, contemporary analysis, and future direction. *Bone Joint J.* 2014;96-B(7):857-62. doi: 10.1302/0301-620X.96B7.33946. PubMed PMID: 24986936.
48. Sabharwal S, Zhao C. The hip-knee-ankle angle in children: reference values based on a full-length standing radiograph. *J Bone Joint Surg Am.* 2009;91(10):2461-8. Epub 2009/10/03. doi: 10.2106/JBJS.I.00015. PubMed PMID: 19797583.
49. Whitaker AT, Vuillermin C. Lower extremity growth and deformity. *Curr Rev Musculoskelet Med.* 2016;9(4):454-61. Epub 2016/10/07. doi: 10.1007/s12178-016-9373-4. PubMed PMID: 27709486; PubMed Central PMCID: PMC5127953.
50. Thienpont E, Schwab PE, Cornu O, Bellemans J, Victor J. Bone morphotypes of the varus and valgus knee. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2017;137(3):393-400. Epub 2017/01/23. doi: 10.1007/s00402-017-2626-x. PubMed PMID: 28110363.
51. Bellemans J, Colyn W, Vandenneucker H, Victor J. The Chitranjan Ranawat award: is neutral mechanical alignment normal for all patients? The concept of constitutional varus. *Clin Orthop Relat Res.* 2012;470(1):45-53. doi: 10.1007/s11999-011-1936-5. PubMed PMID: 21656315; PubMed Central PMCID: PMC3237976.
52. Lombardi AV, Jr., Berend KR, Ng VY. Neutral mechanical alignment: a requirement for successful TKA: affirms. *Orthopedics.* 2011;34(9):e504-6. Epub 2011/09/10. doi: 10.3928/01477447-20110714-40. PubMed PMID: 21902145.
53. Nishida K, Matsumoto T, Takayama K, Ishida K, Nakano N, Matsushita T, et al. Remaining mild varus limb alignment leads to better clinical outcome in total knee arthroplasty for varus osteoarthritis. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2017;25(11):3488-94. Epub 2016/08/11. doi: 10.1007/s00167-016-4260-5. PubMed PMID: 27506810.
54. Lee A, Park J, Lee S. Gait analysis of elderly women after total knee arthroplasty. *J Phys Ther Sci.* 2015;27(3):591-5. doi: 10.1589/jpts.27.591. PubMed PMID: 25931687; PubMed Central PMCID: PMC4395671.
55. Lamartina C, Berjano P. Classification of sagittal imbalance based on spinal alignment and compensatory mechanisms. *Eur Spine J.* 2014;23(6):1177-89. doi: 10.1007/s00586-014-3227-9. PubMed PMID: 24682355.
56. Diebo BG, Ferrero E, Lafage R, Challier V, Liabaud B, Liu S, et al. Recruitment of compensatory mechanisms in sagittal spinal malalignment is age and regional deformity dependent: a full-standing axis analysis of key radiographical parameters. *Spine (Phila Pa 1976).* 2015;40(9):642-9. doi: 10.1097/BRS.0000000000000844. PubMed PMID: 25705962.

57. Sultan AA, Khlopas A, Piuuzzi NS, Chughtai M, Sodhi N, Mont MA. The Impact of Spino-Pelvic Alignment on Total Hip Arthroplasty Outcomes: A Critical Analysis of Current Evidence. *J Arthroplasty*. 2017. Epub 2017/12/14. doi: 10.1016/j.arth.2017.11.021. PubMed PMID: 29233568.
58. Barrey C, Roussouly P, Perrin G, Le Huec JC. Sagittal balance disorders in severe degenerative spine. Can we identify the compensatory mechanisms? *Eur Spine J*. 2011;20 Suppl 5:626-33. doi: 10.1007/s00586-011-1930-3. PubMed PMID: 21796393; PubMed Central PMCID: PMC3175931.
59. Fujii M, Nakashima Y, Sato T, Akiyama M, Iwamoto Y. Acetabular tilt correlates with acetabular version and coverage in hip dysplasia. *Clin Orthop Relat Res*. 2012;470(10):2827-35. Epub 2012/05/01. doi: 10.1007/s11999-012-2370-z. PubMed PMID: 22544668; PubMed Central PMCID: PMC3441999.
60. Bredow J, Katinakis F, Schluter-Brust K, Krug B, Pfau D, Eysel P, et al. Influence of hip replacement on sagittal alignment of the lumbar spine: An EOS study. *Technol Health Care*. 2015;23(6):847-54. doi: 10.3233/THC-151029. PubMed PMID: 26409517.
61. Shah SM, Munir S, Walter WL. Changes in spinopelvic indices after hip arthroplasty and its influence on acetabular component orientation. *J Orthop*. 2017;14(4):434-7. Epub 2017/08/11. doi: 10.1016/j.jor.2017.07.018. PubMed PMID: 28794584; PubMed Central PMCID: PMC5545810.
62. Zhu J, Wan Z, Dorr LD. Quantification of pelvic tilt in total hip arthroplasty. *Clin Orthop Relat Res*. 2010;468(2):571-5. Epub 2009/08/29. doi: 10.1007/s11999-009-1064-7. PubMed PMID: 19714387; PubMed Central PMCID: PMC2806995.
63. Hu J, Qian BP, Qiu Y, Wang B, Yu Y, Zhu ZZ, et al. Can acetabular orientation be restored by lumbar pedicle subtraction osteotomy in ankylosing spondylitis patients with thoracolumbar kyphosis? *Eur Spine J*. 2017;26(7):1826-32. Epub 2016/07/21. doi: 10.1007/s00586-016-4709-8. PubMed PMID: 27435486.
64. Peersman G, Taeymans K, Jans C, Vuylsteke P, Fennema P, Heyse T. Malrotation deformities of the lower extremity and implications on total knee arthroplasty: a narrative review. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2016;136(11):1491-8. Epub 2016/08/18. doi: 10.1007/s00402-016-2554-1. PubMed PMID: 27531495.
65. Lording T, Lustig S, Neyret P. Coronal alignment after total knee arthroplasty. *EFORT Open Rev*. 2016;1(1):12-7. Epub 2017/05/04. doi: 10.1302/2058-5241.1.000002. PubMed PMID: 28461909; PubMed Central PMCID: PMC5367581.
66. Radtke K, Becher C, Noll Y, Ostermeier S. Effect of limb rotation on radiographic alignment in total knee arthroplasties. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2010;130(4):451-7. Epub 2009/11/10. doi: 10.1007/s00402-009-0999-1. PubMed PMID: 19898854.
67. Jamali AA, Meehan JP, Moroski NM, Anderson MJ, Lamba R, Parise C. Do small changes in rotation affect measurements of lower extremity limb alignment? *J Orthop Surg Res*. 2017;12(1):77. Epub 2017/05/24. doi: 10.1186/s13018-017-0571-6. PubMed PMID: 28532505; PubMed Central PMCID: PMC5441094.
68. Scott-Young M, McEntee L, Schram B, Rathbone E, Hing W, Nielsen D. Concurrent Use of Lumbar Total Disc Arthroplasty and Anterior Lumbar Interbody Fusion: The Lumbar Hybrid Procedure for the Treatment of Multilevel Symptomatic Degenerative Disc Disease: A Prospective Study. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2018;43(2):E75-E81. Epub 2017/06/10. doi:

10.1097/BRS.0000000000002263. PubMed PMID: 28598895; PubMed Central PMCID: PMC5757668.

69. Strube P, Pumberger M, Sonnow L, Zippelius T, Nowack D, Zahn RK, et al. Association Between Lumbar Spinal Degeneration and Anatomic Pelvic Parameters. *Clin Spine Surg*. 2018. Epub 2018/06/05. doi: 10.1097/BSD.0000000000000660. PubMed PMID: 29863597.

70. Rajae SS, Kanim LE, Bae HW. National trends in revision spinal fusion in the USA: patient characteristics and complications. *Bone Joint J*. 2014;96-B(6):807-16. Epub 2014/06/04. doi: 10.1302/0301-620X.96B6.31149. PubMed PMID: 24891583.

71. Aunoble S, Meyrat R, Al Sawad Y, Tournier C, Leijssen P, Le Huec JC. Hybrid construct for two levels disc disease in lumbar spine. *Eur Spine J*. 2010;19(2):290-6. Epub 2009/11/06. doi: 10.1007/s00586-009-1182-7. PubMed PMID: 19888610; PubMed Central PMCID: PMC2899811.

72. Lackey A, Phan K, Mobbs R. A systematic review and meta-analysis of outcomes in hybrid constructs for multi-level lumbar degenerative disc disease. *J Clin Neurosci*. 2016;34:23-9. Epub 2016/08/01. doi: 10.1016/j.jocn.2016.06.011. PubMed PMID: 27475322.

73. Dandachli W, Ul Islam S, Richards R, Hall-Craggs M, Witt J. The influence of pelvic tilt on acetabular orientation and cover: a three-dimensional computerised tomography analysis. *Hip Int*. 2013;23(1):87-92. Epub 2013/02/12. doi: EF8BC941-5207-426D-B9FA-DF1B6AE21D43 [pii] 10.5301/HIP.2013.10715. PubMed PMID: 23397204.

74. Buckland AJ, Vigdorichik J, Schwab FJ, Errico TJ, Lafage R, Ames C, et al. Acetabular Anteversion Changes Due to Spinal Deformity Correction: Bridging the Gap Between Hip and Spine Surgeons. *J Bone Joint Surg Am*. 2015;97(23):1913-20. doi: 10.2106/JBJS.O.00276. PubMed PMID: 26631991.

75. Zahn RK, Grotjohann S, Ramm H, Zachow S, Putzier M, Perka C, et al. Pelvic tilt compensates for increased acetabular anteversion. *Int Orthop*. 2016;40(8):1571-5. Epub 2015/09/01. doi: 10.1007/s00264-015-2949-6. PubMed PMID: 26318879.

76. Esposito CI, Carroll KM, Sculco PK, Padgett DE, Jerabek SA, Mayman DJ. Total Hip Arthroplasty Patients With Fixed Spinopelvic Alignment Are at Higher Risk of Hip Dislocation. *J Arthroplasty*. 2017. Epub 2018/01/10. doi: 10.1016/j.arth.2017.12.005. PubMed PMID: 29310920.

77. Kannan A, Hawdon G, McMahon SJ. Effect of flexion and rotation on measures of coronal alignment after TKA. *J Knee Surg*. 2012;25(5):407-10. Epub 2012/11/15. doi: 10.1055/s-0032-1313756. PubMed PMID: 23150351.

78. Gbejuade HO, White P, Hassaballa M, Porteous AJ, Robinson JR, Murray JR. Do long leg supine CT scanograms correlate with weight-bearing full-length radiographs to measure lower limb coronal alignment? *Knee*. 2013;21(2):549-52. Epub 2013/07/16. doi: S0968-0160(13)00102-6 [pii] 10.1016/j.knee.2013.05.009. PubMed PMID: 23849161.

79. Paternostre F, Schwab PE, Thienpont E. The difference between weight-bearing and non-weight-bearing alignment in patient-specific instrumentation planning. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2014;22(3):674-9. doi: 10.1007/s00167-013-2687-5. PubMed PMID: 24051507.

80. Zahn RK, Renner L, Perka C, Hommel H. Weight-bearing radiography depends on limb loading. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2018. Epub 2018/07/12. doi: 10.1007/s00167-018-5056-6. PubMed PMID: 29992465.

81. Ghailane S, Bouloussa H, Challier V, Vergari C, Yoshida G, Obeid I, et al. Radiographic Classification for Degenerative Spondylolisthesis of the Lumbar Spine Based on Sagittal Balance: A Reliability Study. *Spine Deform.* 2018;6(4):358-65. Epub 2018/06/12. doi: 10.1016/j.jspd.2017.12.001. PubMed PMID: 29886905.
82. Cacciola G, Pisani A, Cavaliere P, Pitrone B, Rizzo D, Rizzo G, et al. High values of pelvic incidence: A possible risk factor for zigoapophyseal facet arthrosis in young. *J Orthop.* 2018;15(2):333-6. Epub 2018/06/09. doi: 10.1016/j.jor.2018.02.011. PubMed PMID: 29881147; PubMed Central PMCID: PMC5990124.
83. Jin HM, Xu DL, Xuan J, Chen JX, Chen K, Goswami A, et al. Changes in Pelvic Incidence, Pelvic Tilt, and Sacral Slope in Situations of Pelvic Rotation. *Clin Spine Surg.* 2017;30(7):E923-E30. Epub 2016/09/20. doi: 10.1097/BSD.0000000000000444. PubMed PMID: 27642817.
84. Yeh KT, Lee RP, Chen IH, Yu TC, Peng CH, Liu KL, et al. Are There Age- and Sex-related Differences in Spinal Sagittal Alignment and Balance Among Taiwanese Asymptomatic Adults? *Clin Orthop Relat Res.* 2018;476(5):1010-7. Epub 2018/02/09. doi: 10.1007/s11999.0000000000000140. PubMed PMID: 29419634.
85. Place HM, Hayes AM, Huebner SB, Hayden AM, Israel H, Brechbuhler JL. Pelvic incidence: a fixed value or can you change it? *Spine J.* 2017;17(10):1565-9. Epub 2017/07/04. doi: 10.1016/j.spinee.2017.06.037. PubMed PMID: 28669858.
86. Legaye J, Duval-Beaupere G, Hecquet J, Marty C. Pelvic incidence: a fundamental pelvic parameter for three-dimensional regulation of spinal sagittal curves. *Eur Spine J.* 1998;7(2):99-103. PubMed PMID: 9629932; PubMed Central PMCID: PMC3611230.
87. Doring J, Goudfroof H, Keessen W, Beeker TW, Crowe A. Toward standards for posture. Postural characteristics of the lower back system in normal and pathologic conditions. *Spine (Phila Pa 1976).* 1985;10(1):83-7. Epub 1985/01/01. PubMed PMID: 3157224.
88. Pumberger M, Chiu YL, Ma Y, Girardi FP, Mazumdar M, Memtsoudis SG. National in-hospital morbidity and mortality trends after lumbar fusion surgery between 1998 and 2008. *J Bone Joint Surg Br.* 2012;94(3):359-64. Epub 2012/03/01. doi: 10.1302/0301-620X.94B3.27825. PubMed PMID: 22371544.
89. Hoff EK, Strube P, Pumberger M, Zahn RK, Putzier M. ALIF and total disc replacement versus 2-level circumferential fusion with TLIF: a prospective, randomized, clinical and radiological trial. *Eur Spine J.* 2016;25(5):1558-66. Epub 2015/03/10. doi: 10.1007/s00586-015-3852-y. PubMed PMID: 25749689.
90. York PJ, Kim HJ. Degenerative Scoliosis. *Curr Rev Musculoskelet Med.* 2017;10(4):547-58. Epub 2017/10/06. doi: 10.1007/s12178-017-9445-0. PubMed PMID: 28980155; PubMed Central PMCID: PMC5685967.
91. Putzier M, Pumberger M, Halm H, Zahn RK, Franke J. [Surgical treatment of de-novo scoliosis]. *Orthopade.* 2016. doi: 10.1007/s00132-016-3313-2. PubMed PMID: 27514825.
92. Mobbs RJ, Phan K, Malham G, Seex K, Rao PJ. Lumbar interbody fusion: techniques, indications and comparison of interbody fusion options including PLIF, TLIF, MI-TLIF, OLIF/ATP, LLIF and ALIF. *J Spine Surg.* 2015;1(1):2-18. Epub 2016/09/30. doi: 10.3978/j.issn.2414-469X.2015.10.05. PubMed PMID: 27683674; PubMed Central PMCID: PMC5039869.
93. Forsth P, Olafsson G, Carlsson T, Frost A, Borgstrom F, Fritzell P, et al. A Randomized, Controlled Trial of Fusion Surgery for Lumbar Spinal Stenosis. *N Engl J Med.* 2016;374(15):1413-23. doi: 10.1056/NEJMoa1513721. PubMed PMID: 27074066.

94. Ghogawala Z, Dziura J, Butler WE, Dai F, Terrin N, Magge SN, et al. Laminectomy plus Fusion versus Laminectomy Alone for Lumbar Spondylolisthesis. *N Engl J Med.* 2016;374(15):1424-34. doi: 10.1056/NEJMoa1508788. PubMed PMID: 27074067.
95. Pumberger M, Chiu YL, Ma Y, Girardi FP, Vougioukas V, Memtsoudis SG. Perioperative mortality after lumbar spinal fusion surgery: an analysis of epidemiology and risk factors. *Eur Spine J.* 2012;21(8):1633-9. Epub 2012/04/25. doi: 10.1007/s00586-012-2298-8. PubMed PMID: 22526700; PubMed Central PMCID: PMC3535239.
96. Ailon T, Smith JS, Shaffrey CI, Lenke LG, Brodke D, Harrop JS, et al. Degenerative Spinal Deformity. *Neurosurgery.* 2015;77 Suppl 4:S75-91. doi: 10.1227/NEU.0000000000000938. PubMed PMID: 26378361.
97. Worley N, Marascalchi B, Jalai CM, Yang S, Diebo B, Vira S, et al. Predictors of inpatient morbidity and mortality in adult spinal deformity surgery. *Eur Spine J.* 2016;25(3):819-27. doi: 10.1007/s00586-015-4104-x. PubMed PMID: 26155895.
98. Phan K, Thayaparan GK, Mobbs RJ. Anterior lumbar interbody fusion versus transforaminal lumbar interbody fusion--systematic review and meta-analysis. *Br J Neurosurg.* 2015;29(5):705-11. Epub 2015/05/15. doi: 10.3109/02688697.2015.1036838. PubMed PMID: 25968330.
99. Hsieh PC, Koski TR, O'Shaughnessy BA, Sugrue P, Salehi S, Ondra S, et al. Anterior lumbar interbody fusion in comparison with transforaminal lumbar interbody fusion: implications for the restoration of foraminal height, local disc angle, lumbar lordosis, and sagittal balance. *J Neurosurg Spine.* 2007;7(4):379-86. Epub 2007/10/16. doi: 10.3171/SPI-07/10/379. PubMed PMID: 17933310.
100. Burkus JK, Schuler TC, Gornet MF, Zdeblick TA. Anterior lumbar interbody fusion for the management of chronic lower back pain: current strategies and concepts. *Orthop Clin North Am.* 2004;35(1):25-32. Epub 2004/04/06. doi: 10.1016/S0030-5898(03)00053-1. PubMed PMID: 15062715.
101. Chen B, Akpolat YT, Williams P, Bergey D, Cheng WK. Survivorship and clinical outcomes after multi-level anterior lumbar reconstruction with stand-alone anterior lumbar interbody fusion or hybrid construct. *J Clin Neurosci.* 2016;28:7-11. Epub 2016/02/22. doi: 10.1016/j.jocn.2015.10.033. PubMed PMID: 26896904.
102. Tannast M, Pfannebecker P, Schwab JM, Albers CE, Siebenrock KA, Buchler L. Pelvic morphology differs in rotation and obliquity between developmental dysplasia of the hip and retroversion. *Clin Orthop Relat Res.* 2012;470(12):3297-305. Epub 2012/07/17. doi: 10.1007/s11999-012-2473-6. PubMed PMID: 22798136; PubMed Central PMCID: PMC3492631.
103. Ross JR, Tannenbaum EP, Nepple JJ, Kelly BT, Larson CM, Bedi A. Functional acetabular orientation varies between supine and standing radiographs: implications for treatment of femoroacetabular impingement. *Clin Orthop Relat Res.* 2015;473(4):1267-73. Epub 2015/01/07. doi: 10.1007/s11999-014-4104-x. PubMed PMID: 25560956; PubMed Central PMCID: PMC3435356.
104. Wassilew GI, Heller MO, Diederichs G, Janz V, Wenzl M, Perka C. Standardized AP radiographs do not provide reliable diagnostic measures for the assessment of acetabular retroversion. *J Orthop Res.* 2012;30(9):1369-76. doi: 10.1002/jor.22086. PubMed PMID: 22411574.

105. Au J, Perriman DM, Neeman TM, Smith PN. Standing or supine x-rays after total hip replacement - when is the safe zone not safe? *Hip Int.* 2014;0. Epub 2014/08/07. doi: B23913B3-CC53-40D1-96D1-A3F9EE30D70C [pii] 10.5301/hipint.5000173. PubMed PMID: 25096454.
106. Blondel B, Parratte S, Tropiano P, Pauly V, Aubaniac JM, Argenson JN. Pelvic tilt measurement before and after total hip arthroplasty. *Orthop Traumatol Surg Res.* 2009;95(8):568-72. Epub 2009/11/17. doi: S1877-0568(09)00160-1 [pii] 10.1016/j.otsr.2009.08.004. PubMed PMID: 19910273.
107. Lembeck B, Mueller O, Reize P, Wuelker N. Pelvic tilt makes acetabular cup navigation inaccurate. *Acta Orthop.* 2005;76(4):517-23. Epub 2005/10/01. doi: G7812U8821635766 [pii] 10.1080/17453670510041501. PubMed PMID: 16195068.
108. Lum ZC, Coury JG, Cohen JL, Dorr LD. The Current Knowledge on Spinopelvic Mobility. *J Arthroplasty.* 2018;33(1):291-6. Epub 2017/09/25. doi: 10.1016/j.arth.2017.08.013. PubMed PMID: 28939031.
109. Maratt JD, Esposito CI, McLawhorn AS, Jerabek SA, Padgett DE, Mayman DJ. Pelvic tilt in patients undergoing total hip arthroplasty: when does it matter? *J Arthroplasty.* 2015;30(3):387-91. doi: 10.1016/j.arth.2014.10.014. PubMed PMID: 25453626; PubMed Central PMCID: PMC4359644.
110. Riviere C, Hardijzer A, Lazennec JY, Beaulé P, Muirhead-Allwood S, Cobb J. Spine-hip relations add understandings to the pathophysiology of femoro-acetabular impingement: A systematic review. *Orthop Traumatol Surg Res.* 2017;103(4):549-57. Epub 2017/04/05. doi: 10.1016/j.otsr.2017.03.010. PubMed PMID: 28373141.
111. Stefl M, Lundergan W, Heckmann N, McKnight B, Ike H, Murgai R, et al. Spinopelvic mobility and acetabular component position for total hip arthroplasty. *Bone Joint J.* 2017;99-B(1 Supple A):37-45. Epub 2017/01/04. doi: 10.1302/0301-620X.99B1.BJJ-2016-0415.R1. PubMed PMID: 28042117.
112. Abdel MP, von Roth P, Jennings MT, Hanssen AD, Pagnano MW. What Safe Zone? The Vast Majority of Dislocated THAs Are Within the Lewinnek Safe Zone for Acetabular Component Position. *Clin Orthop Relat Res.* 2016;474(2):386-91. Epub 2015/07/08. doi: 10.1007/s11999-015-4432-5. PubMed PMID: 26150264; PubMed Central PMCID: PMC4709312.
113. Elkins JM, Callaghan JJ, Brown TD. The 2014 frank stinchfield award: the 'landing zone' for wear and stability in total hip arthroplasty is smaller than we thought: a computational analysis. *Clin Orthop Relat Res.* 2014;473(2):441-52. Epub 2014/08/06. doi: 10.1007/s11999-014-3818-0. PubMed PMID: 25091222; PubMed Central PMCID: PMC4294904.
114. Lazennec JY, Thauront F, Robbins CB, Pour AE. Acetabular and Femoral Anteversions in Standing Position are Outside the Proposed Safe Zone After Total Hip Arthroplasty. *J Arthroplasty.* 2017;32(11):3550-6. Epub 2017/07/13. doi: 10.1016/j.arth.2017.06.023. PubMed PMID: 28697862.
115. Uemura K, Takao M, Otake Y, Koyama K, Yokota F, Hamada H, et al. Can Anatomic Measurements of Stem Anteversion Angle Be Considered as the Functional Anteversion Angle? *J Arthroplasty.* 2018;33(2):595-600. Epub 2017/10/11. doi: 10.1016/j.arth.2017.09.027. PubMed PMID: 28993085.

116. Perka C, Haschke F, Tohtz S. [Dislocation after total hip arthroplasty]. *Z Orthop Unfall*. 2012;150(2):e89-103, quiz e4-5. Epub 2012/04/14. doi: 10.1055/s-0031-1298419. PubMed PMID: 22498843.
117. Zahn RK, Grotjohann S, Pumberger M, Ramm H, Zachow S, Putzier M, et al. Influence of pelvic tilt on functional acetabular orientation. *Technol Health Care*. 2017;25(3):557-65. Epub 2016/12/03. doi: 10.3233/THC-161281. PubMed PMID: 27911346.
118. Kosuge D, Cordier T, Solomon LB, Howie DW. Dilemmas in imaging for peri-acetabular osteotomy: the influence of patient position and imaging technique on the radiological features of hip dysplasia. *Bone Joint J*. 2014;96-B(9):1155-60. Epub 2014/09/04. doi: 10.1302/0301-620X.96B9.34269. PubMed PMID: 25183583.
119. Wohlrab D, Radetzki F, Noser H, Mendel T. Cup positioning in total hip arthroplasty: spatial alignment of the acetabular entry plane. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2012;132(1):1-7. Epub 2011/08/30. doi: 10.1007/s00402-011-1379-1. PubMed PMID: 21874577.
120. Eilander W, Harris SJ, Henkus HE, Cobb JP, Hogervorst T. Functional acetabular component position with supine total hip replacement. *Bone Joint J*. 2013;95-B(10):1326-31. Epub 2013/10/01. doi: 95-B/10/1326 [pii] 10.1302/0301-620X.95B10.31446. PubMed PMID: 24078527.
121. van der Bom MJ, Groote ME, Vincken KL, Beek FJ, Bartels LW. Pelvic rotation and tilt can cause misinterpretation of the acetabular index measured on radiographs. *Clin Orthop Relat Res*. 2011;469(6):1743-9. Epub 2011/02/15. doi: 10.1007/s11999-011-1781-6. PubMed PMID: 21318629; PubMed Central PMCID: PMC3094614.
122. Jackson TJ, Estess AA, Adamson GJ. Supine and Standing AP Pelvis Radiographs in the Evaluation of Pincer Femoroacetabular Impingement. *Clin Orthop Relat Res*. 2016;474(7):1692-6. Epub 2016/02/26. doi: 10.1007/s11999-016-4766-7. PubMed PMID: 26913511; PubMed Central PMCID: PMC4887365.
123. Yun H, Murphy WS, Ward DM, Zheng G, Hayden BL, Murphy SB. Effect of Pelvic Tilt and Rotation on Cup Orientation in Both Supine and Standing Positions. *J Arthroplasty*. 2017. Epub 2017/12/26. doi: 10.1016/j.arth.2017.11.069. PubMed PMID: 29276116.
124. Ross JR, Nepple JJ, Philippon MJ, Kelly BT, Larson CM, Bedi A. Effect of Changes in Pelvic Tilt on Range of Motion to Impingement and Radiographic Parameters of Acetabular Morphologic Characteristics. *Am J Sports Med*. 2014. Epub 2014/07/26. doi: 0363546514541229 [pii] 10.1177/0363546514541229. PubMed PMID: 25060073.
125. Lazennec JY, Brusson A, Rousseau MA. Hip-spine relations and sagittal balance clinical consequences. *Eur Spine J*. 2011;20 Suppl 5:686-98. Epub 2011/07/29. doi: 10.1007/s00586-011-1937-9. PubMed PMID: 21796392; PubMed Central PMCID: PMC3175930.
126. Lonner JH, Laird MT, Stuchin SA. Effect of rotation and knee flexion on radiographic alignment in total knee arthroplasties. *Clin Orthop Relat Res*. 1996;(331):102-6. PubMed PMID: 8895625.
127. Brouwer RW, Jakma TS, Brouwer KH, Verhaar JA. Pitfalls in determining knee alignment: a radiographic cadaver study. *J Knee Surg*. 2007;20(3):210-5. PubMed PMID: 17665783.
128. Wright JG, Treble N, Feinstein AR. Measurement of lower limb alignment using long radiographs. *J Bone Joint Surg Br*. 1991;73(5):721-3. PubMed PMID: 1894657.

129. Thomas AC, Judd DL, Davidson BS, Eckhoff DG, Stevens-Lapsley JE. Quadriceps/hamstrings co-activation increases early after total knee arthroplasty. *Knee*. 2014;21(6):1115-9. doi: 10.1016/j.knee.2014.08.001. PubMed PMID: 25218971.
130. Zahn RK, Fussi J, von Roth P, Perka CF, Hommel H. Postoperative Increased Loading Leads to an Alteration in the Radiological Mechanical Axis After Total Knee Arthroplasty. *J Arthroplasty*. 2016;31(8):1803-7. Epub 2016/03/01. doi: 10.1016/j.arth.2016.01.034. PubMed PMID: 26923499.
131. Khalil JG, Nassr A, Maus TP. Physiologic imaging of the spine. *Radiol Clin North Am*. 2012;50(4):599-611. Epub 2012/05/31. doi: 10.1016/j.rcl.2012.04.004. PubMed PMID: 22643387.
132. Bouaicha S, Lamanna C, Jentzsch T, Simmen HP, Werner CM. Comparison of the sagittal spine lordosis by supine computed tomography and upright conventional radiographs in patients with spinal trauma. *Biomed Res Int*. 2014;2014:967178. Epub 2014/07/09. doi: 10.1155/2014/967178. PubMed PMID: 25003134; PubMed Central PMCID: PMC4066715.
133. Troelsen A, Jacobsen S, Romer L, Soballe K. Weightbearing anteroposterior pelvic radiographs are recommended in DDH assessment. *Clin Orthop Relat Res*. 2008;466(4):813-9. Epub 2008/03/13. doi: 10.1007/s11999-008-0156-0. PubMed PMID: 18335298; PubMed Central PMCID: PMC2504653.
134. Legaye J, Duval-Beaupere G. Influence of a variation in the position of the arms on the sagittal connection of the gravity line with the spinal structures. *Eur Spine J*. 2017;26(11):2828-33. Epub 2017/02/02. doi: 10.1007/s00586-017-4961-6. PubMed PMID: 28144735.
135. Dubousset J, Charpak G, Dorion I, Skalli W, Lavaste F, Deguise J, et al. [A new 2D and 3D imaging approach to musculoskeletal physiology and pathology with low-dose radiation and the standing position: the EOS system]. *Bull Acad Natl Med*. 2005;189(2):287-97; discussion 97-300. Epub 2005/08/24. PubMed PMID: 16114859.
136. Wybier M, Bossard P. Musculoskeletal imaging in progress: the EOS imaging system. *Joint Bone Spine*. 2013;80(3):238-43. Epub 2012/11/28. doi: 10.1016/j.jbspin.2012.09.018. PubMed PMID: 23177915.
137. Hasegawa K, Okamoto M, Hatsushikano S, Shimoda H, Ono M, Homma T, et al. Standing sagittal alignment of the whole axial skeleton with reference to the gravity line in humans. *J Anat*. 2017;230(5):619-30. Epub 2017/01/28. doi: 10.1111/joa.12586. PubMed PMID: 28127750; PubMed Central PMCID: PMC5382592.
138. Charpak G. [Prospects for the use in medicine of new detectors of ionizing radiation]. *Bull Acad Natl Med*. 1996;180(1):161-8; discussion 8-9. Epub 1996/01/01. PubMed PMID: 8696873.
139. Le Huec JC, Demezou H, Aunoble S. Sagittal parameters of global cervical balance using EOS imaging: normative values from a prospective cohort of asymptomatic volunteers. *Eur Spine J*. 2015;24(1):63-71. Epub 2014/10/27. doi: 10.1007/s00586-014-3632-0. PubMed PMID: 25344642.
140. Riviere C, Lazennec JY, Van Der Straeten C, Auvinet E, Cobb J, Muirhead-Allwood S. The influence of spine-hip relations on total hip replacement: A systematic review. *Orthop Traumatol Surg Res*. 2017;103(4):559-68. Epub 2017/04/05. doi: 10.1016/j.otsr.2017.02.014. PubMed PMID: 28373138.
141. Lazennec JY, Clark IC, Folinais D, Tahar IN, Pour AE. What is the Impact of a Spinal Fusion on Acetabular Implant Orientation in Functional Standing and Sitting Positions? *J Arthroplasty*. 2017;32(10):3184-90. Epub 2017/06/06. doi: 10.1016/j.arth.2017.04.051. PubMed PMID: 28578842.

142. Reina N, Putman S, Desmarchelier R, Sari Ali E, Chiron P, Ollivier M, et al. Can a target zone safer than Lewinnek's safe zone be defined to prevent instability of total hip arthroplasties? Case-control study of 56 dislocated THA and 93 matched controls. *Orthop Traumatol Surg Res.* 2017;103(5):657-61. Epub 2017/06/21. doi: 10.1016/j.otsr.2017.05.015. PubMed PMID: 28629942.
143. An VVG, Phan K, Sivakumar BS, Mobbs RJ, Bruce WJ. Prior Lumbar Spinal Fusion is Associated With an Increased Risk of Dislocation and Revision in Total Hip Arthroplasty: A Meta-Analysis. *J Arthroplasty.* 2018;33(1):297-300. Epub 2017/10/05. doi: 10.1016/j.arth.2017.08.040. PubMed PMID: 28974376.
144. Phan D, Bederman SS, Schwarzkopf R. The influence of sagittal spinal deformity on anteversion of the acetabular component in total hip arthroplasty. *Bone Joint J.* 2015;97-B(8):1017-23. Epub 2015/08/01. doi: 10.1302/0301-620X.97B8.35700. PubMed PMID: 26224815.
145. DelSole EM, Vigdorich JM, Schwarzkopf R, Errico TJ, Buckland AJ. Total Hip Arthroplasty in the Spinal Deformity Population: Does Degree of Sagittal Deformity Affect Rates of Safe Zone Placement, Instability, or Revision? *J Arthroplasty.* 2017;32(6):1910-7. Epub 2017/02/06. doi: 10.1016/j.arth.2016.12.039. PubMed PMID: 28153459.
146. Eneqvist T, Nemes S, Brisby H, Fritzell P, Garellick G, Rolfson O. Lumbar surgery prior to total hip arthroplasty is associated with worse patient-reported outcomes. *Bone Joint J.* 2017;99-B(6):759-65. Epub 2017/06/02. doi: 10.1302/0301-620X.99B6.BJJ-2016-0577.R2. PubMed PMID: 28566394.
147. Blizzard DJ, Sheets CZ, Seyler TM, Penrose CT, Klement MR, Gallizzi MA, et al. The Impact of Lumbar Spine Disease and Deformity on Total Hip Arthroplasty Outcomes. *Orthopedics.* 2017;40(3):e520-e5. Epub 2017/03/31. doi: 10.3928/01477447-20170327-03. PubMed PMID: 28358974.
148. Diebo BG, Beyer GA, Grieco PW, Liu S, Day LM, Abraham R, et al. Complications in Patients Undergoing Spinal Fusion After THA. *Clin Orthop Relat Res.* 2018;476(2):412-7. Epub 2018/02/02. doi: 10.1007/s11999-0000000000000009. PubMed PMID: 29389793.
149. Buckland AJ, Puvanesarajah V, Vigdorich J, Schwarzkopf R, Jain A, Klineberg EO, et al. Dislocation of a primary total hip arthroplasty is more common in patients with a lumbar spinal fusion. *Bone Joint J.* 2017;99-B(5):585-91. Epub 2017/04/30. doi: 10.1302/0301-620X.99B5.BJJ-2016-0657.R1. PubMed PMID: 28455466.
150. Blizzard DJ, Penrose CT, Sheets CZ, Seyler TM, Bolognesi MP, Brown CR. Ankylosing Spondylitis Increases Perioperative and Postoperative Complications After Total Hip Arthroplasty. *J Arthroplasty.* 2017;32(8):2474-9. Epub 2017/04/26. doi: 10.1016/j.arth.2017.03.041. PubMed PMID: 28438449.
151. Gu M, Zhang Z, Kang Y, Sheng P, Yang Z, Zhang Z, et al. Roles of Sagittal Anatomical Parameters of the Pelvis in Primary Total Hip Replacement for Patients with Ankylosing Spondylitis. *J Arthroplasty.* 2015;30(12):2219-23. Epub 2015/07/15. doi: 10.1016/j.arth.2015.06.027. PubMed PMID: 26164560.
152. Weng W, Wu H, Wu M, Zhu Y, Qiu Y, Wang W. The effect of total hip arthroplasty on sagittal spinal-pelvic-leg alignment and low back pain in patients with severe hip osteoarthritis. *Eur Spine J.* 2016;25(11):3608-14. Epub 2016/10/28. doi: 10.1007/s00586-016-4444-1. PubMed PMID: 26883265.

153. Ben-Galim P, Ben-Galim T, Rand N, Haim A, Hipp J, Dekel S, et al. Hip-spine syndrome: the effect of total hip replacement surgery on low back pain in severe osteoarthritis of the hip. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2007;32(19):2099-102. Epub 2007/09/01. doi: 10.1097/BRS.0b013e318145a3c5. PubMed PMID: 17762811.
154. Murphy WS, Klingenstein G, Murphy SB, Zheng G. Pelvic tilt is minimally changed by total hip arthroplasty. *Clin Orthop Relat Res*. 2013;471(2):417-21. Epub 2012/09/25. doi: 10.1007/s11999-012-2581-3. PubMed PMID: 23001502; PubMed Central PMCID: PMC3549170.
155. Piazzolla A, Solarino G, Bizzoca D, Montemurro V, Berjano P, Lamartina C, et al. Spinopelvic parameter changes and low back pain improvement due to femoral neck anteversion in patients with severe unilateral primary hip osteoarthritis undergoing total hip replacement. *Eur Spine J*. 2018;27(1):125-34. Epub 2017/03/18. doi: 10.1007/s00586-017-5033-7. PubMed PMID: 28303384.
156. Wang WJ, Liu F, Zhu YW, Sun MH, Qiu Y, Weng WJ. Sagittal alignment of the spine-pelvis-lower extremity axis in patients with severe knee osteoarthritis: A radiographic study. *Bone Joint Res*. 2016;5(5):198-205. Epub 2016/05/28. doi: 10.1302/2046-3758.55.2000538. PubMed PMID: 27231331; PubMed Central PMCID: PMC4921054.
157. Rodriguez JA, Bas MA, Orishimo KF, Robinson J, Nicholas SJ. Differential Effect of Total Knee Arthroplasty on Valgus and Varus Knee Biomechanics During Gait. *J Arthroplasty*. 2016;31(9 Suppl):248-53. Epub 2016/07/28. doi: 10.1016/j.arth.2016.06.061. PubMed PMID: 27460296.
158. Norton AA, Callaghan JJ, Amendola A, Phisitkul P, Wongsak S, Liu SS, et al. Correlation of knee and hindfoot deformities in advanced knee OA: compensatory hindfoot alignment and where it occurs. *Clin Orthop Relat Res*. 2015;473(1):166-74. Epub 2014/07/16. doi: 10.1007/s11999-014-3801-9. PubMed PMID: 25024033; PubMed Central PMCID: PMC4390938.
159. Grammatopoulos G, Speirs AD, Ng KCG, Riviere C, Rakhra KS, Lamontagne M, et al. The Acetabular and Spino-Pelvic Morphologies are Different in Subjects with Symptomatic Cam Femoro-Acetabular Impingement. *J Orthop Res*. 2018. Epub 2018/01/13. doi: 10.1002/jor.23856. PubMed PMID: 29323746.
160. Soroceanu A, Burton DC, Oren JH, Smith JS, Hostin R, Shaffrey CI, et al. Medical Complications after Adult Spinal Deformity Surgery: Incidence, Risk factors, and Clinical Impact. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2016. doi: 10.1097/BRS.0000000000001636. PubMed PMID: 27105460.
161. Phan K, Nazareth A, Hussain AK, Dmytriw AA, Nambiar M, Nguyen D, et al. Relationship between sagittal balance and adjacent segment disease in surgical treatment of degenerative lumbar spine disease: meta-analysis and implications for choice of fusion technique. *Eur Spine J*. 2018. Epub 2018/05/29. doi: 10.1007/s00586-018-5629-6. PubMed PMID: 29808425.
162. Smith JS, Lafage V, Shaffrey CI, Schwab F, Lafage R, Hostin R, et al. Outcomes of Operative and Nonoperative Treatment for Adult Spinal Deformity: A Prospective, Multicenter, Propensity-Matched Cohort Assessment With Minimum 2-Year Follow-up. *Neurosurgery*. 2016;78(6):851-61. doi: 10.1227/NEU.0000000000001116. PubMed PMID: 26579966.
163. Jalai CM, Cruz DL, Diebo BG, Poorman G, Lafage R, Bess S, et al. Full-Body Analysis of Age-Adjusted Alignment in Adult Spinal Deformity Patients and Lower-Limb Compensation. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2017;42(9):653-61. Epub 2016/12/16. doi: 10.1097/BRS.0000000000001863. PubMed PMID: 27974739.

164. Lafage R, Schwab F, Glassman S, Bess S, Harris B, Sheer J, et al. Age-Adjusted Alignment Goals Have the Potential to Reduce PJK. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2017;42(17):1275-82. Epub 2017/03/07. doi: 10.1097/BRS.0000000000002146. PubMed PMID: 28263226.
165. Bess S, Schwab F, Lafage V, Shaffrey CI, Ames CP. Classifications for adult spinal deformity and use of the Scoliosis Research Society-Schwab Adult Spinal Deformity Classification. *Neurosurg Clin N Am*. 2013;24(2):185-93. Epub 2013/04/09. doi: 10.1016/j.nec.2012.12.008. PubMed PMID: 23561557.
166. Schwab F, Ungar B, Blondel B, Buchowski J, Coe J, Deinlein D, et al. Scoliosis Research Society-Schwab adult spinal deformity classification: a validation study. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2012;37(12):1077-82. Epub 2011/11/03. doi: 10.1097/BRS.0b013e31823e15e2. PubMed PMID: 22045006.
167. Matsumoto T, Okuda S, Maeno T, Yamashita T, Yamasaki R, Sugiura T, et al. Spinopelvic sagittal imbalance as a risk factor for adjacent-segment disease after single-segment posterior lumbar interbody fusion. *J Neurosurg Spine*. 2017;26(4):435-40. Epub 2017/01/07. doi: 10.3171/2016.9.SPINE16232. PubMed PMID: 28059683.
168. Lafage R, Bess S, Glassman S, Ames C, Burton D, Hart R, et al. Virtual Modeling of Postoperative Alignment After Adult Spinal Deformity Surgery Helps Predict Associations Between Compensatory Spinopelvic Alignment Changes, Overcorrection, and Proximal Junctional Kyphosis. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2017;42(19):E1119-E25. Epub 2017/02/12. doi: 10.1097/BRS.0000000000002116. PubMed PMID: 28187069.
169. Scheer JK, Lafage R, Schwab FJ, Liabaud B, Smith JS, Mundis GM, et al. Under-Correction of Sagittal Deformities Based on Age-Adjusted Alignment Thresholds Leads to Worse HRQOL While Over-Correction Provides No Additional Benefit. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2017. Epub 2017/10/11. doi: 10.1097/BRS.0000000000002435. PubMed PMID: 29016433.
170. Hosogane N, Ames C, Matsumoto M, Yagi M, Matsuyama Y, Taneichi H, et al. Ethnic Variations in Radiographic Parameters and SRS-22 Scores in Adult Spinal Deformity: A Comparison Between North American and Japanese Patients Above 50 Years of Age With Minimum 2-Year Follow-up. *Clin Spine Surg*. 2018. Epub 2018/01/10. doi: 10.1097/BSD.0000000000000610. PubMed PMID: 29315120.
171. Gupta M, Henry JK, Schwab F, Klineberg E, Smith JS, Gum J, et al. Dedicated Spine Measurement Software Quantifies Key Spino-Pelvic Parameters More Reliably Than Traditional Picture Archiving and Communication Systems Tools. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2016;41(1):E22-7. Epub 2015/11/17. doi: 10.1097/BRS.0000000000001216. PubMed PMID: 26571173.
172. Lafage R, Ferrero E, Henry JK, Challier V, Diebo B, Liabaud B, et al. Validation of a new computer-assisted tool to measure spino-pelvic parameters. *Spine J*. 2015;15(12):2493-502. doi: 10.1016/j.spinee.2015.08.067. PubMed PMID: 26343243.
173. Oh T, Scheer JK, Smith JS, Hostin R, Robinson C, Gum JL, et al. Potential of predictive computer models for preoperative patient selection to enhance overall quality-adjusted life years gained at 2-year follow-up: a simulation in 234 patients with adult spinal deformity. *Neurosurg Focus*. 2017;43(6):E2. Epub 2017/12/02. doi: 10.3171/2017.9.FOCUS17494. PubMed PMID: 29191094.
174. Ailon T, Scheer JK, Lafage V, Schwab FJ, Klineberg E, Sciubba DM, et al. Adult Spinal Deformity Surgeons Are Unable to Accurately Predict Postoperative Spinal Alignment Using

- Clinical Judgment Alone. *Spine Deform.* 2016;4(4):323-9. Epub 2016/12/09. doi: 10.1016/j.jspd.2016.02.003. PubMed PMID: 27927523.
175. Sing DC, Barry JJ, Aguilar TU, Theologis AA, Patterson JT, Tay BK, et al. Prior Lumbar Spinal Arthrodesis Increases Risk of Prosthetic-Related Complication in Total Hip Arthroplasty. *J Arthroplasty.* 2016;31(9 Suppl):227-32 e1. Epub 2016/07/23. doi: 10.1016/j.arth.2016.02.069. PubMed PMID: 27444852.
176. Learmonth ID, Young C, Rorabeck C. The operation of the century: total hip replacement. *Lancet.* 2007;370(9597):1508-19. Epub 2007/10/30. doi: 10.1016/S0140-6736(07)60457-7. PubMed PMID: 17964352.
177. Pierrepont J, Hawdon G, Miles BP, Connor BO, Bare J, Walter LR, et al. Variation in functional pelvic tilt in patients undergoing total hip arthroplasty. *Bone Joint J.* 2017;99-B(2):184-91. Epub 2017/02/06. doi: 10.1302/0301-620X.99B2.BJJ-2016-0098.R1. PubMed PMID: 28148659.
178. Shimada N, Deie M, Hirata K, Hiata Y, Orita N, Iwaki D, et al. Courses of change in knee adduction moment and lateral thrust differ up to 1 year after TKA. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2016;24(8):2506-11. doi: 10.1007/s00167-015-3688-3. PubMed PMID: 26183731.
179. Orishimo KF, Kremenic IJ, Deshmukh AJ, Nicholas SJ, Rodriguez JA. Does total knee arthroplasty change frontal plane knee biomechanics during gait? *Clin Orthop Relat Res.* 2012;470(4):1171-6. Epub 2011/11/30. doi: 10.1007/s11999-011-2196-0. PubMed PMID: 22125248; PubMed Central PMCID: PMC3293981.
180. Goh GS, Liow MHL, Tay DK, Lo NN, Yeo SJ, Tan MH. Accelerometer-Based and Computer-Assisted Navigation in Total Knee Arthroplasty: A Reduction in Mechanical Axis Outliers Does Not Lead to Improvement in Functional Outcomes or Quality of Life When Compared to Conventional Total Knee Arthroplasty. *J Arthroplasty.* 2018;33(2):379-85. Epub 2017/10/22. doi: 10.1016/j.arth.2017.09.005. PubMed PMID: 29054725.
181. Bonnin MP, Basigliani L, Archbold HA. What are the factors of residual pain after uncomplicated TKA? *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2011;19(9):1411-7. Epub 2011/05/21. doi: 10.1007/s00167-011-1549-2. PubMed PMID: 21598009.
182. Carr AJ, Robertsson O, Graves S, Price AJ, Arden NK, Judge A, et al. Knee replacement. *Lancet.* 2012;379(9823):1331-40. Epub 2012/03/09. doi: 10.1016/S0140-6736(11)60752-6. PubMed PMID: 22398175.
183. Mannan A, Akinyooye D, Hossain F. A Meta-analysis of Functional Outcomes in Patient-Specific Instrumented Knee Arthroplasty. *J Knee Surg.* 2017;30(7):668-74. Epub 2016/12/03. doi: 10.1055/s-0036-1593869. PubMed PMID: 27907935.
184. Matziolis G, Pfiel S, Wassilew G, Boenicke H, Perka C. Kinematic analysis of the flexion axis for correct femoral component placement. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2011;19(9):1504-9. Epub 2011/05/26. doi: 10.1007/s00167-011-1554-5. PubMed PMID: 21611781.
185. Courtney PM, Lee GC. Early Outcomes of Kinematic Alignment in Primary Total Knee Arthroplasty: A Meta-Analysis of the Literature. *J Arthroplasty.* 2017;32(6):2028-32 e1. Epub 2017/03/28. doi: 10.1016/j.arth.2017.02.041. PubMed PMID: 28341278.
186. Ritter MA, Faris PM, Keating EM, Meding JB. Postoperative alignment of total knee replacement. Its effect on survival. *Clin Orthop Relat Res.* 1994;(299):153-6. Epub 1994/02/01. PubMed PMID: 8119010.

187. Lee JH, Kim KT, Lee SH, Kang KC, Oh HS, Kim YJ, et al. Overcorrection of lumbar lordosis for adult spinal deformity with sagittal imbalance: comparison of radiographic outcomes between overcorrection and undercorrection. *Eur Spine J.* 2016;25(8):2668-75. Epub 2016/02/18. doi: 10.1007/s00586-016-4441-4. PubMed PMID: 26883266.
188. Fischer F, Gibbons C, Coste J, Valderas JM, Rose M, Leplege A. Measurement invariance and general population reference values of the PROMIS Profile 29 in the UK, France, and Germany. *Qual Life Res.* 2018. Epub 2018/01/20. doi: 10.1007/s11136-018-1785-8. PubMed PMID: 29350345.
189. King MT, Stockler MR, O'Connell RL, Buizen L, Joly F, Lanceley A, et al. Measuring what matters MOST: validation of the Measure of Ovarian Symptoms and Treatment, a patient-reported outcome measure of symptom burden and impact of chemotherapy in recurrent ovarian cancer. *Qual Life Res.* 2018;27(1):59-74. Epub 2017/12/19. doi: 10.1007/s11136-017-1729-8. PubMed PMID: 29248998.
190. Leardini A, Berti L, Begon M, Allard P. Effect of trunk sagittal attitude on shoulder, thorax and pelvis three-dimensional kinematics in able-bodied subjects during gait. *PLoS One.* 2013;8(10):e77168. Epub 2013/11/10. doi: 10.1371/journal.pone.0077168. PubMed PMID: 24204763; PubMed Central PMCID: PMC3812214.
191. Gotfryd AO, Silber Caffaro MF, Meves R, Avanzi O. Predictors for Postoperative Shoulder Balance in Lenke 1 Adolescent Idiopathic Scoliosis: A Prospective Cohort Study. *Spine Deform.* 2017;5(1):66-71. Epub 2017/01/01. doi: 10.1016/j.jspd.2016.09.046. PubMed PMID: 28038696.
192. Zang L, Fan N, Hai Y, Lu SB, Su QJ, Yang JC, et al. Evaluation of the predictors of postoperative aggravation of shoulder imbalance in severe and rigid thoracic or thoracolumbar scoliosis. *Eur Spine J.* 2016;25(10):3353-65. Epub 2015/11/06. doi: 10.1007/s00586-015-4313-3. PubMed PMID: 26538156.
193. Chen RQ, Hosogane N, Watanabe K, Funao H, Okada E, Fujita N, et al. Reliability Analysis of Spino-Pelvic Parameters in Adult Spinal Deformity: A Comparison of Whole Spine and Pelvic Radiographs. *Spine (Phila Pa 1976).* 2016;41(4):320-7. Epub 2015/11/19. doi: 10.1097/BRS.0000000000001208. PubMed PMID: 26579961.
194. DALYs GBD, Collaborators H. Global, regional, and national disability-adjusted life-years (DALYs) for 315 diseases and injuries and healthy life expectancy (HALE), 1990-2015: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2015. *Lancet.* 2016;388(10053):1603-58. Epub 2016/10/14. doi: 10.1016/S0140-6736(16)31460-X. PubMed PMID: 27733283; PubMed Central PMCID: PMC5388857.
195. Denis A, Zelmar A, Le Pogam MA, Chaleat-Valayer E, Bergeret A, Colin C. The PRESLO study: evaluation of a global secondary low back pain prevention program for health care personnel in a hospital setting. Multicenter, randomized intervention trial. *BMC Musculoskelet Disord.* 2012;13:234. Epub 2012/11/28. doi: 1471-2474-13-234 [pii] 10.1186/1471-2474-13-234. PubMed PMID: 23181446; PubMed Central PMCID: PMC3579727.
196. Schnabel TG. Is medicine still an art? *N Engl J Med.* 1983;309(20):1258-61. Epub 1983/11/17. doi: 10.1056/NEJM198311173092020. PubMed PMID: 6633583.
197. McCulloch P, Feinberg J, Philippou Y, Koliaas A, Kehoe S, Lancaster G, et al. Progress in clinical research in surgery and IDEAL. *Lancet.* 2018. Epub 2018/01/24. doi: 10.1016/S0140-6736(18)30102-8. PubMed PMID: 29361334.

198. Stokes OM, Cole AA, Breakwell LM, Lloyd AJ, Leonard CM, Grevitt M. Do we have the right PROMs for measuring outcomes in lumbar spinal surgery? *Eur Spine J.* 2017;26(3):816-24. Epub 2017/01/11. doi: 10.1007/s00586-016-4938-x. PubMed PMID: 28070683.
199. Vedula SS, Hager GD. Surgical data science: The new knowledge domain. *Innov Surg Sci.* 2017;2(3):109-21. Epub 2017/09/25. doi: 10.1515/iss-2017-0004. PubMed PMID: 28936475; PubMed Central PMCID: PMC5602563.
200. Mobbs RJ, JieChoy W, Wilson P, McEvoy A, Phan K, Parr WCH. L5 Enbloc Vertebrectomy with Customised Reconstructive Implant: Comparison of Patient Specific versus Off-The-Shelf Implant. *World Neurosurg.* 2018. Epub 2018/01/26. doi: 10.1016/j.wneu.2018.01.078. PubMed PMID: 29366999.
201. Wilcox B, Mobbs RJ, Wu AM, Phan K. Systematic review of 3D printing in spinal surgery: the current state of play. *J Spine Surg.* 2017;3(3):433-43. Epub 2017/10/24. doi: 10.21037/jss.2017.09.01. PubMed PMID: 29057355; PubMed Central PMCID: PMC5637198.
202. Fan Y, Peng Du J, Liu JJ, Zhang JN, Liu SC, Hao DJ. Radiological and clinical differences among three assisted technologies in pedicle screw fixation of adult degenerative scoliosis. *Sci Rep.* 2018;8(1):890. Epub 2018/01/19. doi: 10.1038/s41598-017-19054-7. PubMed PMID: 29343756; PubMed Central PMCID: PMC5772356.
203. Barbash GI, Glied SA. New technology and health care costs--the case of robot-assisted surgery. *N Engl J Med.* 2010;363(8):701-4. Epub 2010/09/08. doi: 10.1056/NEJMp1006602. PubMed PMID: 20818872.
204. Shademan A, Decker RS, Opfermann JD, Leonard S, Krieger A, Kim PC. Supervised autonomous robotic soft tissue surgery. *Sci Transl Med.* 2016;8(337):337ra64. Epub 2016/05/06. doi: 10.1126/scitranslmed.aad9398. PubMed PMID: 27147588.
205. Kim HJ, Jung WI, Chang BS, Lee CK, Kang KT, Yeom JS. A prospective, randomized, controlled trial of robot-assisted vs freehand pedicle screw fixation in spine surgery. *Int J Med Robot.* 2017;13(3). Epub 2016/09/28. doi: 10.1002/rcs.1779. PubMed PMID: 27672000.
206. Fan Y, Du J, Zhang J, Liu S, Xue X, Huang Y, et al. Comparison of Accuracy of Pedicle Screw Insertion Among 4 Guided Technologies in Spine Surgery. *Med Sci Monit.* 2017;23:5960-8. Epub 2017/12/17. PubMed PMID: 29247503; PubMed Central PMCID: PMC5741952.
207. Patel V. Future of Robotics in Spine Surgery. *Spine (Phila Pa 1976).* 2018;43(7S Suppl 1):S28. Epub 2018/03/15. doi: 10.1097/BRS.0000000000002554. PubMed PMID: 29538074.
208. Pfitzner T, von Roth P, Preininger B, Perka C. [Does the ideal total knee arthroplasty for younger patients exist?]. *Z Orthop Unfall.* 2014;152(4):393-8. Epub 2014/08/22. doi: 10.1055/s-0034-1368605. PubMed PMID: 25144851.
209. Wyles CC, Heidenreich MJ, Jeng J, Larson DR, Trousdale RT, Sierra RJ. The John Charnley Award: Redefining the Natural History of Osteoarthritis in Patients With Hip Dysplasia and Impingement. *Clin Orthop Relat Res.* 2017;475(2):336-50. Epub 2016/04/14. doi: 10.1007/s11999-016-4815-2. PubMed PMID: 27071391; PubMed Central PMCID: PMC5213917.
210. Lerch TD, Steppacher SD, Liechti EF, Tannast M, Siebenrock KA. One-third of Hips After Periacetabular Osteotomy Survive 30 Years With Good Clinical Results, No Progression of Arthritis, or Conversion to THA. *Clin Orthop Relat Res.* 2017;475(4):1154-68. Epub 2016/12/03. doi: 10.1007/s11999-016-5169-5. PubMed PMID: 27905061; PubMed Central PMCID: PMC5339143.

Danksagung

Besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr. med. Carsten Perka, Ärztlicher Direktor des Centrums für Muskuloskeletale Chirurgie der Charité - Universitätsmedizin Berlin, der diese Arbeit und die berufliche Entwicklung ermöglicht hat. Ich danke ihm für das in mich gesetzte Vertrauen und seine Unterstützung.

Herrn Univ.-Prof. Dr. med. Michael Putzier, Leitender Oberarzt des Centrums für Muskuloskeletale Chirurgie am Standort Charité Campus Mitte, danke ich für die Unterstützung meiner klinischen und wissenschaftlichen Tätigkeit, die den beruflichen Werdegang entscheidend beeinflusst hat.

Ich danke Herrn Univ.-Prof. Dr. med. Michael Schütz für die Unterstützung, die Möglichkeit zur Gestaltung und Förderung gemeinsamer Projekte sowie das Vertrauen in meine Person.

Herrn PD Dr. med. Stephan Tohtz danke ich herzlich für die gemeinsame Zeit der klinischen und wissenschaftlichen Arbeit, in der er Mentor und Vorbild war.

Herrn PD Dr. med. Hagen Hommel, Chefarzt des Zentrums für Orthopädie, Sportmedizin und Rehabilitation im Krankenhaus Märkisch-Oderland, gilt mein Dank für die professionelle Kooperation in einem äußerst angenehmen Umfeld und die Möglichkeit der Fortführung dieser Zusammenarbeit.

Herr Univ.-Prof. Dr. med. Rainer Meffert, Direktor der Klinik und Poliklinik für Unfall-, Hand-, Plastische und Wiederherstellungschirurgie des Universitätsklinikums Würzburg, ermöglichte mir mit Berufsbeginn ein wissenschaftliches Arbeiten. Für dieses Vertrauen, die Möglichkeit und Förderung gilt mein Dank.

Allen Kollegen, welche den bisherigen beruflichen Werdegang unterstützt haben, gilt mein Dank.

Im Rahmen der Kooperation mit dem Zuse Institut Berlin danke ich allen beteiligten Mitarbeitern.

Allen an den wissenschaftlichen Projekten beteiligten Doktoranden gilt ebenfalls mein Dank.

- unbeschreiblicher Dank gilt meiner Familie -

Erklärung

§ 4 Abs. 3 (k) der HabOMed der Charité

Hiermit erkläre ich, dass

- weder früher noch gleichzeitig ein Habilitationsverfahren durchgeführt oder angemeldet wurde,
- die vorgelegte Habilitationsschrift ohne fremde Hilfe verfasst, die beschriebenen Ergebnisse selbst gewonnen sowie die verwendeten Hilfsmittel, die Zusammenarbeit mit anderen Wissenschaftlern/Wissenschaftlerinnen und mit technischen Hilfskräften sowie die verwendete Literatur vollständig in der Habilitationsschrift angegeben wurden,
- mir die geltende Habilitationsordnung bekannt ist.

Ich erkläre ferner, dass mir die Satzung der Charité – Universitätsmedizin Berlin zur Sicherung Guter Wissenschaftlicher Praxis bekannt ist und ich mich zur Einhaltung dieser Satzung verpflichte.

Datum

Unterschrift