



Muskuloskeletale Simulationen: die Zukunft der Kinderorthopädie?

Als nicht invasive Methode bieten muskuloskeletale Simulationen die Möglichkeit, Bewegungsabläufe und biomechanische Prozesse zu untersuchen. Sie erfreuen sich von Jahr zu Jahr größerer Beliebtheit und finden immer mehr Einzug in die Orthopädie. Vor allem in der Kinderorthopädie konnten sie für verschiedene Krankheitsbilder klinisch relevante Erkenntnisse liefern.

Muskuloskeletale Simulationen sind eine etablierte Technologie, welche die Möglichkeit bietet, neuromechanische Prozesse des menschlichen Körpers darzustellen. Somit kann das Verhalten des Bewegungsapparats untersucht werden, ohne aufwendige und invasive Versuche an lebenden Organismen durchzuführen.¹ Dass muskuloskeletale Simulationen an Bedeutung gewonnen haben, dokumentiert auch die kontinuierlich wachsende Anzahl der Publikationen zu diesem Thema in den letzten 20 Jahren. Laut Google Scholar kam es in diesem Zeitraum zu einem 40-fachen Zuwachs der pro Jahr veröffentlichten Beiträge.

Bewegungsabhängige Gelenkbelastungen werden grundlegend von drei Faktoren beeinflusst: der Bewegungsausführung, der Muskelkoordination und der muskuloskelettalen Geometrie. Muskuloskeletale Simulationen basieren auf der Integration von biomechanischen und neurophysiologischen Modellierungen und berücksichtigen somit diese drei Faktoren. Das Modell selbst beschreibt die Geometrie und Eigenschaften von Knochen, Muskeln und Gelenken. Durch die anschließenden Simulationen wird die Funktionsweise des motorischen Nervensystems nachgebildet. Dabei können die Simulationen für die Analyse von Gelenkbewegungen, der Muskel-dynamik sowie der auf Knochen und Gelenke wirkenden Kräfte und Momente genutzt werden.²

Muskuloskeletale Simulationen finden Anwendung in verschiedenen Bereichen der Medizin, wobei sie in der Orthopädie und Kinderorthopädie bereits einen hohen Stellenwert haben. Hier werden sie eingesetzt, um die Ursachen von Verletzungen

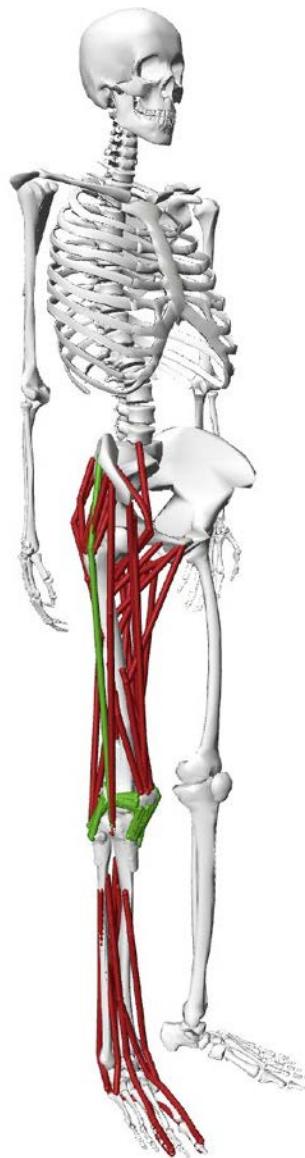


Abb. 1: Muskuloskelettales Modell: zeigt die Skelettgeometrie, wobei die roten Linien Muskeln und die grünen Linien Ligamente repräsentieren

KEYPOINTS

- Muskuloskeletale Simulationen bieten die Möglichkeit, neuromechanische Prozesse des menschlichen Körpers darzustellen und biomechanische Größen zu berechnen.
- Muskuloskeletale Simulationen können Einblicke in den Zusammenhang von Struktur, Funktion und Gelenkbelastungen geben.
- Langfristig könnten die Berechnungen bei der Planung von klinischen Interventionen unterstützen.

und Erkrankungen des Bewegungsapparats zu untersuchen. Simulationen können auch zur Behandlungsplanung verwendet werden, um das Risiko für Komplikationen zu reduzieren und das Outcome zu verbessern.³ Weitere Anwendungsbereiche sind die Sportwissenschaft und die Sportorthopädie. Hier können muskuloskeletale Simulationen dazu beitragen, die Leistung bzw. das Training von Sportler*innen zu verbessern und das Verletzungsrisiko zu verringern.⁴ In diesem Artikel werden die Grundlagen der muskuloskelettalen Simulationen erklärt und besonders der Anwendungsbereich der Kinderorthopädie diskutiert.

Muskuloskeletale Modelle

Ein muskuloskelettales Modell ist ein mathematisches Konstrukt, das die Interaktionen zwischen Muskeln, Knochen und Gelenken des menschlichen Körpers simuliert (Abb. 1). Das Modell umfasst typischerweise eine Reihe von Differenzialgleichungen, welche die Bewegungen und die auf Knochen und Gelenke wirkenden Kräfte mathematisch beschreiben.²

Das Erstellen eines muskuloskelettalen Modells beginnt mit der Erfassung der Geometrie des zu simulierenden Körperteils,



H. Kainz, Wien
M. Svehlik, Graz

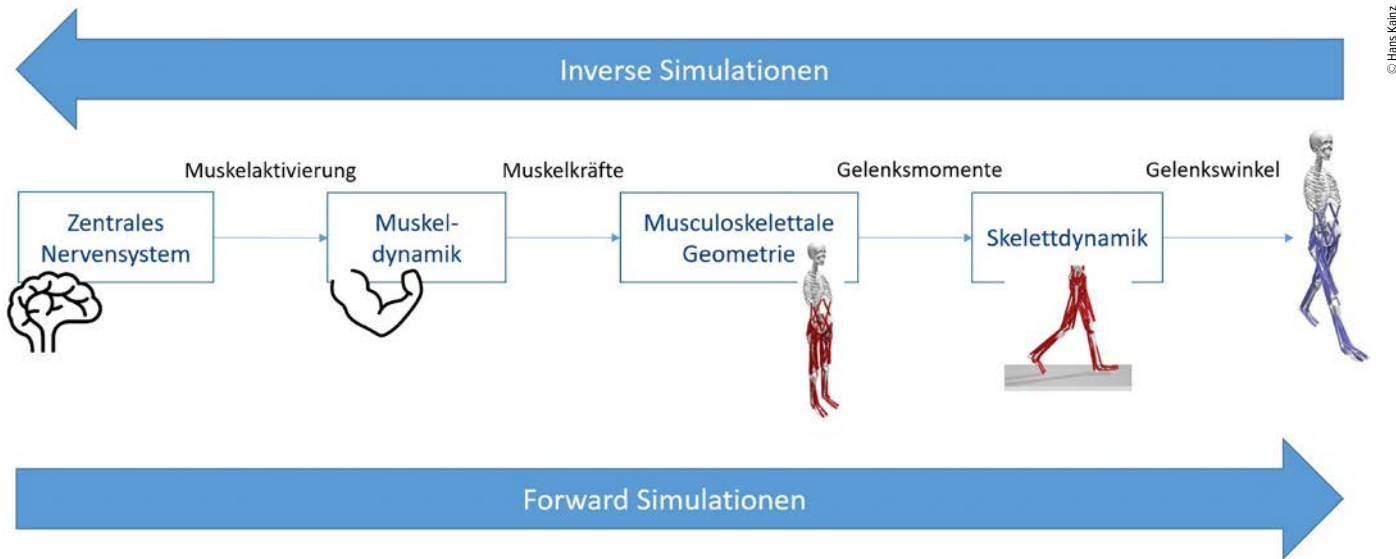


Abb. 2: Schematische Darstellung der Vorgehensweise bei inversen bzw. Forward-Simulationen. Die einzelnen Schritte der Simulation werden in entgegengesetzten Richtungen ausgeführt

wie der Wirbelsäule oder eines Gelenks, was in der Regel durch Kadaverstudien erfolgt.^{5,6} Die Modelle sind dabei nicht auf ein Gelenk beschränkt und so umfassen komplexere Modellierungen ganze Extremitäten oder das gesamte muskuloskeletale System. Strukturen von besonderem Interesse können dabei detaillierter abgebildet werden. Anschließend werden die mechanischen Eigenschaften des Körperteils, einschließlich der Knochen, Muskeln, Bänder und Gelenke, integriert. Deren Modellierung erfolgt auf der Grundlage von klinischen Studien, In-vivo-Experimenten sowie Kadaverstudien. Um den zeitintensiven Schritt der Modellerstellung zu beschleunigen, ist es üblich, auf bereits bestehende Modelle mit dem gewünschten Fokus zurückzugreifen, sofern diese existieren. Bei diesen sogenannten generischen Modellen werden in der Regel individuelle Daten wie z. B. Körpergröße, Gewicht und Körpersegment-Proportionen der Patient*innen berücksichtigt und angepasst. Zusätzlich können generische Modelle weiter personalisiert werden, z. B. durch die Anpassung der knöchernen Geometrien, Muskelverläufe oder maximalen Muskelkräfte.⁷

Das so erstellte Modell bildet die Basis für die nachfolgenden muskuloskelettalen Simulationen. Bei den Simulationen unterscheidet man zwischen „inversen“ und „forward“-Simulationen (Abb. 2). Bei den inversen Simulationen werden Kräfte in Muskeln und auf Knochen berechnet, die während der Bewegung auftreten. Die da-

für notwendigen Bewegungsinformationen werden mit sogenannter 3D-Bewegungsanalyse aufgenommen. Die Simulation berechnet dann die Bewegung des Körperteils sowie die Kräfte und Momente, die auf die anatomischen Strukturen wirken (Abb. 3). Meist werden Bewegungsabläufe mit einer guten Reproduzierbarkeit, wie das Gehen, untersucht. Forward-Simulationen versuchen umgekehrt, ausgehend von einem Modell und einem Optimierungsansatz die Bewegungsumsetzung zu berechnen.²

Simulationen für den Rumpf und die obere Extremität werden zwar durchgeführt, sind aber im Vergleich zu Untersuchungen an der unteren Extremität noch nicht so weit verbreitet.⁸

Muskuloskelettale Simulationen in der Kinderorthopädie

Je nach Fragestellung und Anwendungsfall lassen sich für die Einsatzgebiete von muskuloskelettaler Modellierung unterschiedliche Unterteilungen treffen.

Verständnis der menschlichen Biomechanik

Muskuloskelettale Modellierung kann das Verständnis der menschlichen Biomechanik verbessern. Durch die Simulation von Muskelaktivität und Bewegungsmuster können die Funktionsweise des menschlichen Körpers besser verstanden und neue Erkenntnisse gewonnen werden, die zur Entwicklung neuer Therapie- und Rehabi-

litationsansätze beitragen können. So konnte z. B. gezeigt werden, dass die vermehrte Innenrotation des Beines beim Gehen bei Kindern mit Zerebralparese nicht durch die Verkürzung der Adduktoren, sondern durch vermehrte Antetorsion und die damit geänderte Mechanik des Hüftgelenkes verursacht wird.^{9,10}

Weitere Studien konnten zeigen, dass statische zweidimensionale Röntgenaufnahmen nicht immer Rückschlüsse auf die tatsächlichen Belastungen zulassen. So konnten Diskrepanzen zwischen Beinachsabweichungen und tatsächlichen Belastungen im Kniegelenk gefunden werden. Diese lassen sich durch mehrdimensionale Fehlstellungen, aber auch durch kompensatorische Bewegungsmuster erklären. Umgekehrt kann es auch bei physiologischer Beinachse durch ein entsprechendes Bewegungsmuster zu Überbelastungen kommen.^{11,12}

Biomarker zur Entscheidungsfindung

Mit muskuloskelettalen Modellen berechnete Parameter haben das Potenzial, bei Entscheidungen in der Interventionsplanung zu unterstützen. So konnte mittels muskuloskelettaler Modelle für Patient*innen mit Zerebralparese gezeigt werden, dass eine Verlängerung der Achillessehne bei einer isolierten Kontraktur des Musculus gastrocnemius zu einem massiven Kraftverlust der Plantarflexoren führen kann. Die Simulationen zeigten, dass das beste Outcome mit einer isolierten Verlän-

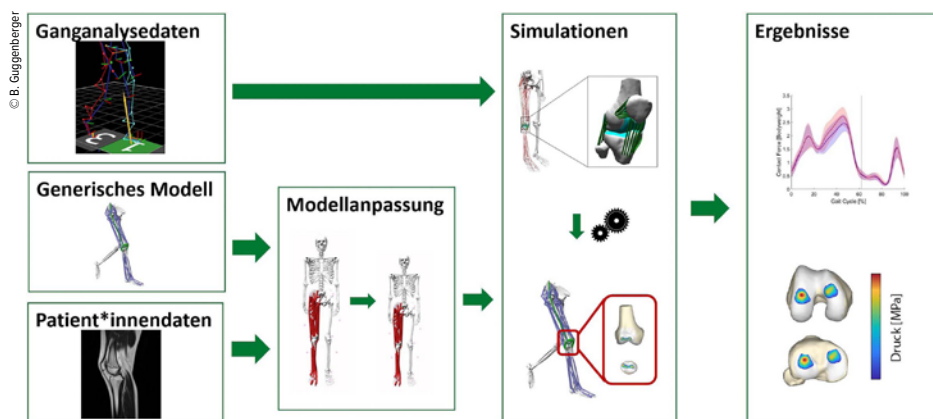


Abb. 3: Schematische Darstellung des Ablaufes einer inversen muskuloskelettalen Simulation. Ganganalysedaten, ein generisches Modell und personenspezifische Daten dienen als Input. Nach Modellanpassung erfolgt mit diesem und den Ganganalysedaten die Simulation

gerung des betroffenen Muskels erzielt wird und nicht mit einer allgemeinen Verlängerung der Achillessehne. Eine aktuelle Studie konnte weiters zeigen, dass sich eine Überkorrektur der Gastrocnemiussehnenlänge negativ auf die Gangfunktion auswirkt. Muskelsehnenlängen aus Simulationen können bei der Planung von Operationen unterstützen, um die Behandlung genauer auf die Patient*innen abzustimmen.

Neben Muskellängen und -kräften können auch berechnete Gelenkskräfte aus muskuloskelettalen Simulationen einen Mehrwert für die Interventionsplanung bringen. Ein Beispiel hierfür sind Patella-instabilitäten. In Studien mit computergenerierten Kniegeometrien konnte gezeigt werden, dass die Trochleaform und die Position der Tuberositas tibiae die Gelenkskräfte im patellofemorale Gelenk beeinflussen.¹³ In einem Projekt an der Medizinischen Universität Graz werden derzeit die Auswirkungen realer Kniegeometrien sowie jene des Gangbildes von Patient*innen mit Patella-instabilität auf die Kräfte im Kniegelenk untersucht.

Muskuloskelettale Simulationen in Kombination mit Finite-Elemente-Modellen ermöglichen die Berechnung von personenspezifischen Belastungen in der Wachstumsfuge und die Prognose von Knochenwachstum. An der Universität Wien werden derartige Simulationen eingesetzt, um den Zusammenhang zwischen Gangbild, Epiphysenbelastung und Knochenwachstum besser zu verstehen.^{14,15} In Zukunft könnte man die Belastungen in der Wachstumsfuge als Biomarker verwenden, um ein pathologisches Knochenwachstum vorherzusagen und im besten Fall mit frühzeitigen nicht-

operativen Interventionen (z. B. Gang-Training) die Fehlbildungen zu vermeiden.

Evidenzbasierte Rehabilitation

Muskuloskelettale Simulationen können verwendet werden, um – insbesondere bei motorischen Problemen – die Gründe für pathologische Gangbilder zu analysieren. Werden Muskelgruppen identifiziert, die im Bewegungsmuster aufgrund einer Schwäche nicht genutzt werden, so kann ein gezieltes Kräftigungstraining geplant werden. In einer Studie konnte z. B. gezeigt werden, dass das Gangbild bei Kindern mit Zerebralparese am meisten durch eine Schwäche in den Plantarflexoren, Hüftabduktoren und -flexoren beeinflusst wird. Der Fokus in der Befundung kann so gezielt auf vulnerable Muskelgruppen gerichtet werden, um realistische Ziele für die Rehabilitation festzulegen.

Auch können Untersuchungen mit muskuloskelettalen Modellen helfen, die Belastungen bei unterschiedlichen Übungen besser zu verstehen. Eine Studie beschrieb die Gelenkskräfte auf der medialen und lateralen Femurkondyle bei unterschiedlichen Bewegungsabläufen.¹⁶ Zusätzlich zeigte eine Studie der Universität Wien wie Übungen mit und ohne Theraband die Belastungen in der Hüfte beeinflussen.¹⁷ Dieses Wissen kann dafür eingesetzt werden, um Patient*innen zu beraten oder Übungen so zu wählen, dass Überbelastungen bestimmter Strukturen vermieden werden.

Ein anderes Anwendungsgebiet muskuloskelettaler Simulationen ist die Steigerung der Motivation von Kindern während der Rehabilitation. Übungsprogramme können in interaktive Spiele verpackt wer-

den, die auf der Simulation von Bewegungen basieren. Diese Kombination ermöglicht Kindern, spielerisch zu trainieren und ihre Fortschritte in einem Spiel visualisiert zu verfolgen. So ist es möglich, langwierige Rehabilitationsprozesse attraktiver zu gestalten. Dies kann dazu beitragen, dass Kinder engagiert bleiben und Übungen in der Rehabilitation motivierter umsetzen.¹⁸

Entwicklung und Testung von Orthesen und Implantaten

Muskuloskelettale Simulationen werden auch eingesetzt, um Designs von Orthesen oder Implantaten zu optimieren. Bereits in deren Entwicklungsprozess ermöglichen sie eine Abschätzung der auftretenden Belastungen. Durch die Simulation von verschiedenen Szenarien können die Entwickler die Auswirkungen von Veränderungen im Design auf die Langlebigkeit der Produkte bewerten. Auch können die Simulationen verwendet werden, um Prototypen von Orthesen oder Implantaten zu evaluieren. Durch die Simulation von Bewegungen und Aktivitäten können Entwickler*innen die auftretenden Belastungen erfassen, Schwachstellen identifizieren und die Prototypen entsprechend anpassen. Dies kann dazu beitragen, dass Probleme frühzeitig erkannt und behoben werden, bevor die Orthesen oder Implantate auf den Markt gebracht werden.^{3,19} Vor allem auch durch das strenge Medizinproduktegesetz sind muskuloskelettale Simulationen und Finite-Elemente-Berechnungen in dieser Branche bereits etabliert.

Prädiktive Simulationen, In-silico-Operationen

In der Orthopädie werden zunehmend prädiktive (forward) Simulationen eingesetzt, um pathologische Gangbilder besser zu verstehen sowie um die Ergebnisse von chirurgischen Eingriffen und anderen Behandlungen vorherzusagen. Bei Kindern mit Zerebralparese kommt es beispielsweise häufig vor, dass bei einer komplexen Operation mehrere Interventionen durchgeführt werden, um die Reha-Zeit zu reduzieren. Durch die Vielzahl der Interventionen ist es bei einem ausbleibenden Therapieerfolg jedoch schwierig zu identifizieren, welche Intervention für das Kind einen Vor- bzw. Nachteil hatte. Aus diesem Grund wurde in einem Forschungsprojekt die Plattform SimCP entwickelt.²⁰ Sie nutzt biomechanische Modelle, um das Gangbild von

Kindern mit Zerebralparese zu simulieren und die Auswirkungen verschiedener Behandlungen vorherzusagen. Die SimCP-Plattform hat das Potenzial, die Behandlung zu verbessern, indem sie personalisierte Vorhersagen und Empfehlungen bietet, die auf klinischen Daten und biomechanischen Simulationen basieren. Sie ermöglicht es Ärzt*innen und Therapeut*innen, verschiedene Interventionen zu testen und die beste Behandlung für jedes Kind zu identifizieren. Auf diese Weise können die Behandlungsergebnisse verbessert und die Lebensqualität von Kindern mit Zerebralparese kann erhöht werden.

Ausblick

Wohin könnten sich muskuloskelettale Modelle und Simulationen in den nächsten Jahren entwickeln? Eine genaue Prognose ist wie in vielen anderen Bereichen auch hier schwierig. Offen ist beispielsweise, wie der Einsatz von maschinellem Lernen und künstlicher Intelligenz die Simulationen vorantreiben wird. In Projekten wird versucht, mittels maschinellen Lernens und großer Datenmengen die Abschätzung von Muskel- und Gelenkskräften zu beschleunigen. Diese Ansätze haben das Potenzial, dass Simulationen mit wenigen Inputdaten rasch auf aussagekräftige Ergebnisse kommen. Auch können sie die Anwendung von Simulationen vereinfachen und somit einer breiteren Basis zugänglich machen.

Hier knüpft auch die stetige Weiterentwicklung der Simulationsabläufe und -softwares an, welche die Nutzung und den Einstieg in die Thematik erleichtern. Lag die Rechenzeit für die Untersuchung eines Bewegungsablaufes vor ein paar Jahren noch bei mehreren Stunden, so erreicht man heute – dank Optimierungen und stetig wachsender Rechenkapazitäten moderner Computer – Rechenzeiten von wenigen Minuten. Auch diese Entwicklungen fördern einen breiteren Einsatz muskuloskelettaler Modelle.

Die größeren Rechenkapazitäten und schnelleren Rechenzeiten ermöglichen zusätzlich die Durchführung von umfangreichen What-if-Untersuchungen. Darunter versteht man die Möglichkeit, einzelne Parameter zu verändern und dadurch deren Einfluss auf das Ergebnis zu untersuchen. So ist es zum Beispiel möglich, den kombinierten Einfluss von Femur-Anteversion, Collum-Diaphysen-Winkel und Tibia-

PRAXISTIPP



Über die
Gesellschaften ESMAC

(www.esmac.org) oder
GAMMA (www.g-a-m-m-a.org) ist es möglich, sich näher mit dem Thema zu beschäftigen. Zudem steht mit OpenSim eine kostenfreie Software für muskuloskelettale Simulationen zur Verfügung.

torsion auf die Gelenkskräfte der unteren Extremität zu untersuchen.¹⁰ Eine weitere Möglichkeit stellt die Nutzung von Gelenkskräften als Feedback in der Gangrehabilitation dar, woran auch an der Universität Wien geforscht wird.²¹

Zusammengefasst haben muskuloskelettale Simulationen das Potenzial, unser Verständnis für die Biomechanik sowie für die Pathomechanismen unterschiedlicher Krankheitsbilder zu verbessern. Sie können aber auch Biomarker liefern, um bei schwierigen Behandlungsentscheidungen zu unterstützen und Behandlungen individuell auf Patient*innen abzustimmen. Sind muskuloskelettale Simulationen derzeit aufgrund ihres Aufwandes zum Großteil noch der Forschung vorbehalten, dürften Entwicklungen wie gesteigerte Rechenkapazität, künstliche Intelligenz und die Weiterentwicklung der Simulationssoftwares in Zukunft zu einer vermehrten Nutzung im klinischen Alltag beitragen. ■

Autoren:

Bernhard Guggenberger, BSc MSc^{1,2,3}

Ass. Prof. Mag. **Hans Kainz**, MSc PhD²

Priv.-Doz. Dr. **Martin Svehlik**, PhD¹

¹ Department für Orthopädie und Traumatologie, Medizinische Universität Graz

² Neuromechanik-Forschungsgruppe, Zentrum für Sportwissenschaft und Universitätssport, Universität Wien

³ Institut Physiotherapie, FH Joanneum, Graz

Korrespondierender Autor:

Bernhard Guggenberger, BSc MSc

E-Mail: bernhard.guggenberger@medunigraz.at

■04

Literatur:

- 1 Delp SL et al.: Open-source software to create and analyze dynamic simulations of movement. *IEEE Trans Biomed Eng* 2007; 54(11): 1940-50
- 2 Seth A et al.: Simulating musculoskeletal dynamics and neuromuscular control to study human and animal movement. *PLoS Computat Biol* 2018; 14(7): e1006223
- 3 Killen BA et al.: In silico-enhanced treatment and rehabilitation planning for patients with musculoskeletal disorders: can musculoskeletal modelling and dynamic simulations really impact current clinical practice? *Appl Sci* 2020; 10: 7255
- 4 Bulat N et al.: Musculoskeletal simulation tools for understanding mechanisms of lower-limb sports injuries. *Curr Sports Med Rep* 2019; 18(6): 210-21
- 5 Delp SL et al.: An interactive graphics-based model of the lower extremity to study orthopaedic surgical procedures. *IEEE Trans Biomed Eng* 1990; 37(8): 757-67
- 6 Rajagopal A et al.: Full-body musculoskeletal model for muscle-driven simulation of human gait. *IEEE Trans Biomed Eng* 2016; 63(10): 2068-79
- 7 Kainz H et al.: Generic scaled versus subject-specific models for the calculation of musculoskeletal loading in cerebral palsy gait: effect of personalized musculoskeletal geometry outweighs the effect of personalized neural control. *Clin Biomech* 2021; 87: 105402
- 8 Smith SHL et al.: Review of musculoskeletal modelling in a clinical setting: current use in rehabilitation design, surgical decision making and healthcare interventions. *Clin Biomech* 2021; 83: 105292
- 9 Arnold AS et al.: Internal rotation gait: a compensatory mechanism to restore abduction capacity decreased by bone deformity? *Dev Med Child Neurol* 1997; 39(1): 40-4
- 10 Kainz H et al.: How do the femoral anteversion angle and neck-shaft angle influence muscle forces and joint loading during walking? *Research Square* 2022; in review
- 11 Stief F et al.: Dynamische Analyse der Gelenkbelastung bei Beinachsendiformitäten in der Frontalebene: Stellenwert der instrumentellen Ganganalyse. *Orthopäde* 2021; 50(7): 528-37
- 12 Farr S et al.: Functional and radiographic consideration of lower limb malalignment in children and adolescents with idiopathic genu valgum. *J Orthop Res* 2014; 32(10): 1362-70
- 13 Clouthier AL et al.: Influence of articular geometry and tibial tubercle location on patellofemoral kinematics and contact mechanics. *J Appl Biomech* 2022; 38(1): 58-66
- 14 Kainz H et al.: ESB Clinical Biomechanics Award 2020: Pelvis and hip movement strategies discriminate typical and pathological femoral growth – Insights gained from a multi-scale mechanobiological modelling framework. *Clin Biomech* 2021; 87: 105405
- 15 Koller W et al.: Intra- and inter-subject variability of femoral growth plate stresses in typically developing children and children with cerebral palsy. *Front Bioeng Biotechnol* 2023; 11: 1140527
- 16 Rossom S et al.: Knee joint loading in healthy adults during functional exercises: implications for rehabilitation guidelines. *J Orthop Sports Phys Ther* 2018; 48(3): 162-73
- 17 Buehler C et al.: Quantifying muscle forces and joint loading during hip exercises performed with and without an elastic resistance band. *Front Sports Act Living* 2021; 3: 695383
- 18 Carvalho I et al.: Robotic gait training for individuals with cerebral palsy: a systematic review and meta-analysis. *Arch Phys Med Rehabil* 2017; 98(11): 2332-44
- 19 Taylor M, Prendergast PJ: Four decades of finite element analysis of orthopaedic devices: where are we now and what are the opportunities? *J Biomech* 2015; 48(5): 767-78
- 20 Pitto L et al.: SimCP: a simulation platform to predict gait performance following orthopedic intervention in children with cerebral palsy. *Front Neurobot* 2019; 13: 54
- 21 Uhlrich SD et al.: Muscle coordination retraining inspired by musculoskeletal simulations reduces knee contact force. *Sci Rep* 2022; 12(1): 9842