

**Zusammenfassung**

Der Meniskus ist ein integraler Bestandteil eines gesunden Kniegelenks. Er besteht hauptsächlich aus Kollagenfasern, die dreischichtig angeordnet sind. Insbesondere die tiefe, zirkumferente Kollagenfaserschicht ermöglicht die Umwandlung axialer Druckbelastung in zirkumferenten Stress, was zur Lastenverteilung auf dem Tibiaplateau und zum Schutz des Knorpels beiträgt. Meniskusverletzungen sind häufig und erhöhen das Risiko einer Osteoarthritis erheblich. Bei akuten traumatischen sowie degenerativ bedingten Meniskusverletzungen wird zunächst eine konservative Therapie empfohlen, sofern keine mechanischen Symptome wie Gelenkblockaden vorliegen. Diese umfasst unter anderem Physiotherapie, entzündungshemmende Medikamente und intraartikuläre Injektionen. Bei persistierenden Beschwerden oder mechanischen Einschränkungen kann jedoch eine arthroskopische Intervention erforderlich sein. Neben der Meniskusnaht und der partiellen Meniskektomie stellen allogene Meniskustransplantationen sowie der Einsatz von Meniskusimplantaten vielversprechende therapeutische Alternativen dar, insbesondere bei ausgedehnten Meniskusläsionen. Kommerziell erhältliche Meniskusimplantate scheitern unter anderem jedoch oft daran, die natürliche Kollagenfaserorientierung nachzuahmen. Die Finite-Elemente-Methode (FEM) bietet eine virtuelle Simulationsplattform, um Implantate effizienter zu entwickeln und zu testen. Eine interdisziplinäre Zusammenarbeit ist dabei unerlässlich.

**Schlüsselwörter**

Meniskusimplantat – Finite Element Methode – virtuelle Simulation

A.-C. Moser et al.

## REVIEW / SPECIAL ISSUE

# Entwicklung von Meniskusimplantaten mithilfe virtueller Simulationsmethoden: Eine interdisziplinäre Herangehensweise

Anna-Christina Moser<sup>a,b,\*</sup>, Jennifer Fritz<sup>a,b</sup>, Andreas Kesselring<sup>c</sup>, Florian Schüssler<sup>c</sup>, Alexander Otahal<sup>a,b</sup> und Stefan Nehrer<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Zentrum für Regenerative Medizin, Department für Gesundheitswissenschaften, Universität für Weiterbildung Krems, Krems an der Donau, Österreich

<sup>b</sup> Austrian Cluster for Tissue Regeneration, Österreich

<sup>c</sup> Department für Industrial Engineering, Fachhochschule Technikum Wien, Wien, Österreich

Eingegangen/submitted: 19.12.2024; überarbeitet/revised 12.2.2025; akzeptiert/accepted: 19.2.2025  
Online verfügbar seit/Available online: xxxx

**Anatomischer Hintergrund**

Der Meniskus spielt eine zentrale Rolle im Kniegelenk, indem er als Stoßdämpfer und Stabilisator fungiert. Die Meniskusoberfläche besteht aus einer etwa 10 µm dicken Schicht Kollagenfibrillen. Darunter folgt femur- und tibiaseitig eine lamelläre Schicht von circa 150 µm Dicke, in der sich die Kollagenfasern überkreuzen. Den Hauptbestandteil des Meniskusinneren bilden zirkumferent verlaufende Kollagenfaserbündel, die vereinzelt von radialen Kollagenfasern umschnürt werden [22]. Bei axialer Kniegelenksbelastung werden die Menisken aufgrund ihres keilförmigen Querschnitts aus dem Gelenkspalt herausgedrückt. Da sie über ihre Verankerungsligamente im Knochen befestigt sind, entstehen entlang der zirkumferen-

ten Kollagenfaserschicht Zugspannungen in Umfangsrichtung, die eine komplette Extrusion verhindern [19]. Dadurch sind die Menisken in der Lage, Druck aufzunehmen und bis zu 81 % der axialen Gelenkkräfte zu übertragen [21,30]. Die Hauptfunktion der Menisken besteht also darin, die kraftübertragende Kontaktfläche zwischen Femur und Tibia zu vergrößern und dadurch den Kontaktdruck zu reduzieren. Damit schützen sie so den Gelenkknorpel vor überlastungsbedingter Degeneration [9].

**Moderne Therapieansätze und Langzeitfolgen von Meniskusverletzungen**

Meniskusverletzungen gehören zu den häufigsten Erkrankungen des Kniegelenks und entstehen entweder

## Development of meniscus implants using virtual simulation methods: an interdisciplinary approach

### Summary

The meniscus is an integral part of a healthy knee joint. It consists mainly of collagen fibers, which are arranged in a three-layered manner. In particular, the deep, circumferential collagen fiber layer enables the conversion of axial compressive loads into circumferential hoop stress, contributing to load distribution on the tibial plateau and protecting the cartilage. Meniscus injuries are common and significantly increase the risk of osteoarthritis. In cases of acute traumatic or degenerative meniscus injuries, conservative therapy is initially recommended, provided there are no mechanical symptoms such as joint locking. This therapy includes physiotherapy, anti-inflammatory medications, and intra-articular injections. However, if symptoms persist or mechanical restrictions occur, arthroscopic intervention may be necessary. In addition to meniscus suturing and partial meniscectomy, allogeneic meniscus transplantation and the use of meniscus implants represent promising therapeutic alternatives, particularly for extensive meniscus damage. However, commercially available meniscus implants often fail to replicate the natural collagen fiber orientation. The finite element method (FEM) provides a virtual simulation platform to develop and test implants more efficiently. Interdisciplinary collaboration is essential in this process.

### Keywords

meniscus implant – Finite Element Method – virtual simulation

durch traumatische Ereignisse oder degenerative Prozesse. Sie sind oft mit Symptomen wie Schmerzen, Gelenkblockaden und Ergussbildung verbunden und führen häufig zu operativen Eingriffen, die heute meist arthroskopisch erfolgen.

### Behandlungsstrategien für degenerative Meniskusläsionen

Im Jahr 2016 initiierte die European Society for Sports Traumatology, Knee Surgery and Arthroscopy (ESSKA) das European Meniscus Consensus Project, um eine evidenzbasierte Behandlungsstrategie für degenerative Meniskusläsionen (DMLs) zu etablieren [5,23]. Die Ergebnisse dieser Initiative empfehlen zunehmend eine konservative Therapie, da Studien keinen eindeutigen Vorteil arthroskopischer Eingriffe zeigen. Patienten mit DMLs sollten zunächst über einen Zeitraum von mindestens drei Monaten mit Physiotherapie, entzündungshemmenden Medikamenten und gezielten Übungen behandelt werden. Erst wenn diese Maßnahmen nicht ausreichend wirken oder mechanische Symptome wie Gelenkblockaden auftreten, kann eine weiterführende Diagnostik mittels Magnetresonanztomographie (MRT) erfolgen. Eine Arthroskopie wird nur in Fällen von schwerwiegenden Beschwerden und bei fehlender Arthrose in Betracht gezogen [3,28].

### Therapieansätze bei traumatischen Meniskusrupturen

Für traumatische Meniskusrupturen (AMT) veröffentlichte die ESSKA 2018 eine überarbeitete Konsensusempfehlung, die eine strukturierte Entscheidungsfindung in der klinischen Praxis ermöglicht [18,23].

Da diese Verletzungen häufig mit weiteren Kniegelenkschäden einhergehen, ist eine umfassende Diagnostik mittels MRT und Röntgen essenziell [12]. Unmittelbar nach der Verletzung sollte das PRICE-Protokoll (protection, rest, ice, compression, elevation) angewendet werden. Die Wahl der weiteren Therapie hängt von verschiedenen Faktoren wie Alter, Aktivitätsniveau, Art des Risses und möglichen Begleitverletzungen ab [8]. Bei Patienten ohne mechanische Symptome, insbesondere wenn die Beschwerden weniger als drei Monate bestehen, sind konservative Maßnahmen wie Physiotherapie, gezielte Übungen und entzündungshemmende Medikamente die erste Wahl. Bestehen anhaltende Schmerzen oder liegt eine Gelenkblockade vor, kann ein operativer Eingriff erforderlich sein [1,8,12].

### Operative Therapieoptionen und langfristige Folgen

Die chirurgischen Verfahren zur Behandlung von Meniskusverletzungen umfassen die Teilmeniskektomie, Meniskusnaht oder in komplexeren Fällen eine Meniskusrekonstruktion [9]. Während die Teilmeniskektomie insbesondere bei schlecht durchbluteten Meniskusarealen Anwendung findet, zeigen Nahttechniken (outside-in, inside-out, all-inside) bei gut durchbluteten Rissen eine höhere Erfolgsrate [12]. Dennoch macht die partielle Meniskektomie weiterhin den größten Anteil aller Meniskusoperationen aus. Langfristig hat sich jedoch gezeigt, dass eine Meniskusresektion nachteilige Auswirkungen auf die biomechanische Stabilität des Kniegelenks hat. Durch die teil-

weise oder vollständige Entfernung des Meniskus steigt die Belastung auf die knorpeligen Gelenkflächen erheblich an, was das Risiko für die Entwicklung einer Gonarthrose um das 4- bis 14-Fache deutlich erhöht [9,20,27]. Aus diesem Grund wird heute eine möglichst sparsame Resektion angestrebt, und wo immer möglich, wird auf eine Rekonstruktion oder den Ersatz des Meniskusgewebes gesetzt, um Langzeitschäden zu minimieren.

### Alternative Therapien und Meniskuserersatzverfahren

Die ESSKA-Konsensusempfehlungen betonen, dass der Meniskuserhalt oberste Priorität haben sollte, da die langfristigen klinischen und radiologischen Ergebnisse nach einer arthroskopisch erfolgten partiellen Meniskektomie schlechter ausfallen als nach meniskuserhaltenden Maßnahmen. Zudem zeigen aktuelle Erkenntnisse, dass viele zuvor als irreparabel geltende Meniskusrisse erfolgreich genäht werden können. Dennoch bestehen technische Herausforderungen bei Meniskusnähten, insbesondere in schlecht durchbluteten Arealen. Eine Alternative stellt die allogene Meniskustransplantation (MAT) dar, bei der Spendergewebe eingesetzt wird, um die natürliche Funktion des Meniskus wiederherzustellen [14–15,24]. Diese Methode kann die Kniebelastung normalisieren und den Knorpel schützen. Allerdings birgt sie Risiken wie eine unzureichende Passform des Transplantats, ein mögliches Versagen des Implantats oder Infektionen. In bestimmten Fällen können stattdessen synthetische Meniskusgerüste verwendet werden, die das Wachstum von Faserknorpel unter-

stützen. Langzeitstudien zeigen insgesamt gute Ergebnisse für die MAT, insbesondere wenn Fixierung und Stabilisierung korrekt durchgeführt werden [14–15,24–25].

### Probleme bestehender Meniskusimplantate

Der Einsatz von Meniskusimplantaten stellt eine Therapieoption in der Behandlung von Meniskusverletzungen dar. Kommerziell erhältliche Meniskusimplantate weisen jedoch hohe klinische Versagensraten zwischen 12 % und 32 % auf [7,17,31]. Diese erhebliche Ausfallrate ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass die aktuellen Implantate die natürliche Kollagenfaserorientierung des menschlichen Meniskus nicht nachbilden können [7]. Dies führt letztendlich zum Versagen des Implantats und beeinträchtigt die langfristige Funktionalität des Kniegelenks.

### Innovationsbedarf und Lösungsansatz

Die Entwicklung eines Meniskusimplantats, das an die individuelle Anatomie des Patienten angepasst werden kann und die natürliche Kollagenfaserorientierung imitiert, ist daher von großem wissenschaftlichem und klinischem Interesse. Ein solcher Ansatz könnte die klinischen Ergebnisse erheblich verbessern und das Risiko von Osteoarthrose nach Meniskusverletzungen reduzieren [26]. Die Herstellung von Prototypen ist jedoch zeitaufwendig und erfordert umfangreiche in-vitro, ex-vivo und in-vivo Tests. Diese Prozesse sind nicht nur kostspielig, son-

dern verlängern auch die Zeit bis zur Marktreife eines neuen Implantats.

### Die Finite-Elemente-Methode als Lösungsansatz

Der Einsatz von computergestützten Simulationsmethoden, wie der Finite-Elemente-Methode (FEM), kann die Anzahl präklinisch notwendiger in-vitro, in-vivo sowie ex-vivo Versuchen auf ein Minimum reduzieren. Bei der FEM handelt es sich um ein numerisches Berechnungsverfahren zur Lösung strukturmechanischer, mathematisch-physikalischer oder chemischer Modelle und Problemstellungen. Die möglichen Einsatzgebiete sind groß und vielfältig: Sie reichen vom allgemeinen Maschinenbau und Fahrzeugbau über die Elektroindustrie und Optik bis hin zur chemischen Industrie und Reaktorsicherheit [6].

Die Grundlage der FEM ist die Diskretisierung des zu untersuchenden Gebietes. Das bedeutet, dass das gesamte komplexe Gebiet in eine endliche Anzahl kleiner, einfacher und überschaubarer Teile unterteilt wird, die sogenannten finiten Elemente. Jedes dieser Elemente hat gut definierte geometrische und physikalische Eigenschaften. Durch diese Unterteilung kann ein Problem, das ursprünglich durch komplizierte Differentialgleichungen beschrieben wird und für das es keine einfache analytische Lösung gibt, in ein System von algebraischen Gleichungen umgewandelt werden. Diese Gleichungen werden numerisch gelöst und dadurch die Analyse komplexer Strukturen und Materialien ermöglicht [4].

Die FEM ist ein etabliertes Werkzeug in der orthopädischen Forschung,

insbesondere bei der Entwicklung von Kniegelenksendoprothesen sowie in der Knorpel- und Ligamentforschung. Zum Einsatz kommt beispielsweise der Abaqus Knee Simulator, ein validiertes computergestütztes Modellierungswerkzeug, das speziell für die Analyse und Simulation von Knieimplantaten entwickelt wurde. Er bietet

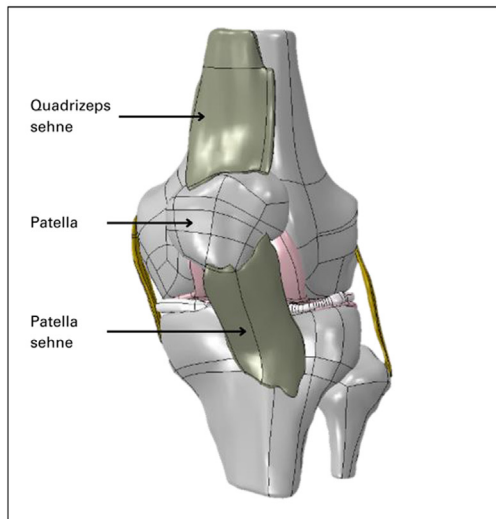
fünf benutzerfreundliche Workflows, die es ermöglichen, verschiedene Implantatdesigns effizient zu bewerten und dabei die Abhängigkeit von zeitaufwändigen physischen Tests zu reduzieren. Dieses Tool wird häufig eingesetzt, um die Belastungsverteilung, das Kontaktverhalten und das Verschleißverhalten von Knieprothesen unter

verschiedenen Bedingungen zu untersuchen [16].

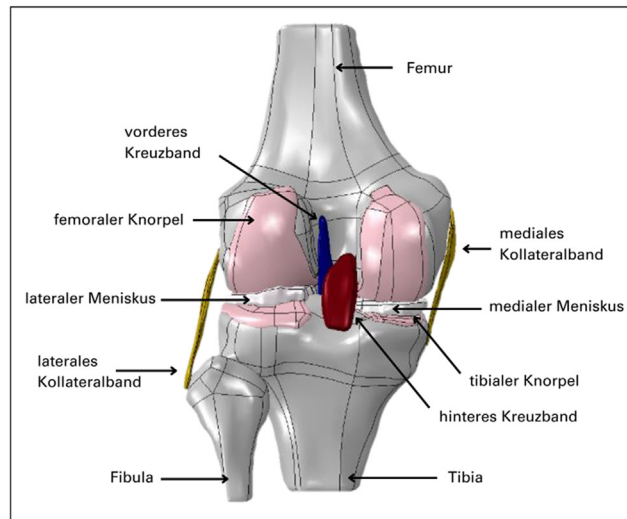
In der Knorpelforschung wird die FEM verwendet, um die mechanischen Eigenschaften des Gelenkknorpels zu analysieren und die Auswirkungen von Verletzungen oder degenerativen Veränderungen zu bewerten. Studien haben beispielsweise gezeigt, dass der Ver-

### Finite-Element-Model eines menschlichen Kniegelenks

ventrale Ansicht



dorsale Ansicht



craniale Ansicht - Tibiaplateau

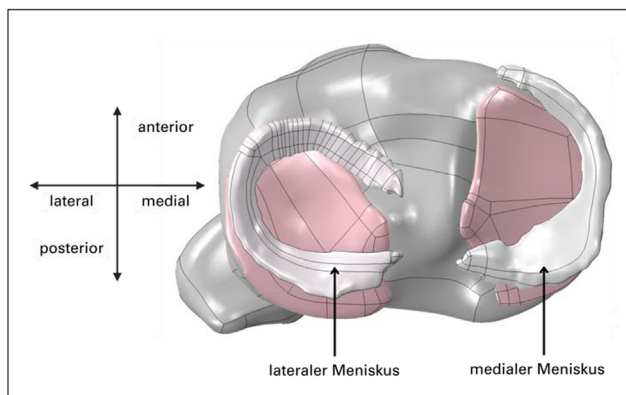


Abbildung 1

Finite-Element-Model eines menschliche Kniegelenks, angefertigt anhand von MRT Bildern [10].

lust von mehr als 20% des Meniskus zu einer signifikanten Erhöhung der Scherspannung im Knorpel führt, was das Risiko einer Kniegelenksdegeneration erhöht [29].

In der Ligamentforschung ermöglicht die FEM die Simulation verschiedener chirurgischer Verfahren, wie z.B. die Rekonstruktion des vorderen Kreuzbandes (VKB) oder des hinteren Kreuzbandes (HKB), um deren biomechanische Auswirkungen auf das Kniegelenk zu bewerten. Solche Analysen helfen dabei, die optimale Spannung und Positionierung von Transplantaten zu bestimmen, um die natürliche Funktion des Kniegelenks bestmöglich wiederherzustellen [2].

Obwohl die FEM in den oben genannten Bereichen umfassend eingesetzt wird, ist ihre Anwendung bei der Untersuchung von Meniskusimplantaten noch nicht so weit verbreitet. Bei der Entwicklung und Testung eines Meniskusimplantats ist es entscheidend, das biomechanische Verhalten des Implantats innerhalb des Kniegelenks zu verstehen. Durch die Anwendung der FEM kann ein detailliertes digitales Modell des Kniegelenks anhand von MRT bzw. CT-Bildern erstellt werden [10] (Abbildung 1). Dieses Modell umfasst alle relevanten anatomischen Strukturen und Materialien mit ihren spezifischen mechanischen Eigenschaften. Indem das Kniegelenk in viele kleine finite Elemente unterteilt wird, können biomechanische Spannungen und Dehnungen in jedem einzelnen Element während einer Gelenksbelastung berechnet werden [11].

Die FEM bietet bei der Entwicklung von Meniskusimplantaten vielfältige Möglichkeiten zur Optimierung von Design und Funktionalität.

Konkret bedeutet dies für Meniskusimplantate:

**Materialanalyse:** Unterschiedliche Materialien können virtuell getestet werden, um ihr Verhalten unter Belastung zu analysieren. Dadurch lässt sich ermitteln, welches Material die Eigenschaften des natürlichen Meniskus am besten nachahmt und die auftretenden Kräfte optimal verteilt.

**Strukturoptimierung:** Die spezifische Kollagenfaserorientierung des natürlichen Meniskus kann im FEM-Modell nachgebildet werden. Dies ermöglicht die Beurteilung der Bedeutung der Faseranordnung für die Funktion des Implantats und liefert Hinweise, wie diese im Design berücksichtigt werden kann.

**Belastungssimulation:** Verschiedene Bewegungen und Belastungen, wie sie im Alltag auftreten - etwa Gehen, Laufen oder Springen - können simuliert werden. So lässt sich erkennen, wie das Implantat unter realistischen Bedingungen reagiert und wo mögliche Schwachstellen liegen könnten.

**Chirurgische Fixierung:** Auch die Art der chirurgischen Fixierung des Implantats im Kniegelenk kann mithilfe der FEM untersucht werden. Unterschiedliche Fixierungsmethoden können verglichen werden, um die bestmögliche Stabilität und Funktionalität zu gewährleisten.

### Vorteile der FEM in der medizinischen Forschung

Der Einsatz der FEM kann die Anzahl der erforderlichen in-vitro, ex-vivo und in-vivo Versuche auf ein Minimum reduzieren. Dies führt zu erheblichen Einsparungen in Bezug auf Kosten und Zeit und beschleunigt

den Innovationsprozess [13]. Die erfolgreiche Entwicklung eines solchen Meniskusimplantats erfordert die Zusammenarbeit von Grundlagenforschern, Ingenieuren und Medizinern. Nur durch die Bündelung dieser Expertisen kann ein Implantat entwickelt werden, das sowohl biomechanisch effizient als auch klinisch effektiv ist.

### Fazit

Die Anwendung der Finite-Elemente-Methode in der Entwicklung von Meniskusimplantaten stellt einen vielversprechenden Ansatz dar, um den frühzeitigen Meniskusverlust zu kompensieren und somit die Entwicklung einer Gonarthrose hintenanzustellen. Ein implantierbares Meniskusersatzmaterial, das die natürliche Anatomie und Kollagenfaserorientierung nachahmt, könnte die langfristigen Therapieerfolge für PatientInnen signifikant erhöhen.

### Förderung

Das Projekt wurde durch die Gesellschaft für Forschungsförderung (GFF) Niederösterreich unter der Fördernummer LS20-033 finanziert.

### Interessenkonflikt

Die AutorInnen erklären, dass keine bekannten Interessenkonflikte im Zusammenhang mit der Forschung, Autorenschaft oder Veröffentlichung dieses Artikels bestehen.

### Autor\*innenschaft

Jede/r Autor/in war an der Erstellung des Artikels beteiligt. Alle AutorInnen haben der Veröffentlichung

chung der endgültigen Version nach sorgfältiger Prüfung und Genehmigung des Manuskripts zugestimmt. Angesichts seiner Rolle als Mitherausgeber, war Stefan Nehrer nicht an der Begutachtung dieses Artikels beteiligt und hat keinen Zugang zu Informationen bezüglich des Peer-Reviews.

## Literatur

- [1] S.G.F. Abram, D.J. Beard, A.J. Price, & BASK Meniscal Working Group. Arthroscopic meniscal surgery: a national society treatment guideline and consensus statement, *Bone Joint J.* 101-B (2019) 652–659.
- [2] A.H. Alafiah, N. Mohd Nor, A. Mohd Noor, A three dimensional finite element of anterior cruciate ligament model, *Adv. Mat. Res.* 626 (2012) 896–901.
- [3] Arthroscopic partial meniscectomy versus sham surgery for a degenerative meniscal tear - PubMed. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24369076/>.
- [4] K.-J. Bathe, *Finite Element Procedures*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 2006.
- [5] P. Beaufils et al., Surgical management of degenerative meniscus lesions: the 2016 ESSKA meniscus consensus, *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* 25 (2017) 335–346.
- [6] M.M. Bhatti, *The Finite Element Method Its Basis and Fundamentals*.
- [7] A.A.M. Dhollander, V. Condello, V. Madonna, M. Bonomo, P. Verdonk, Meniscal Augmentation and Replacement (MenaFlex, Actifit, and NUSurface), in: J. Farr, A.H. Gomoll (Eds.), *Cartilage Restoration: Practical Clinical Applications*, Springer International Publishing, Cham, 2018, pp. 371–382, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-77152-6\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-319-77152-6_28).
- [8] M.N. Doral, O. Bilge, G. Huri, E. Turhan, R. Verdonk, Modern treatment of meniscal tears, *EFORT Open Rev.* 3 (2018) 260–268.
- [9] L. Dürselen, M. Freutel, *Biomechanik des Meniskus, Orthopädie und Unfallchirurgie* up2date 10 (2015) 215–227.
- [10] A. Erdemir, Open knee: open source modeling and simulation in knee biomechanics, *J. Knee Surg.* 29 (2016) 107–116.
- [11] A. Erdemir, S. Sibole, *Open Knee: A Three-Dimensional Finite Element Representation of the Knee Joint* (2010).
- [12] C. Hulet, H. Pereira, G. Peretti, M. Denti (Eds.), *Surgery of the Meniscus*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2016.
- [13] In-vitro- und in-vivo-Untersuchungen zur selektiven... von Kurt Heininger | ISBN 978-3-642-77093-7 | Fachbuch online kaufen - Lehmanns.de. <https://www.lehmanns.de/shop/medizin-pharmazie/24448708-9783642770937-in-vitro-und-in-vivo-untersuchungen-zur-selektiven-immunadsorptionsbehandlung-neurologischer-erkrankungen>.
- [14] H.A. Kazi, W. Abdel-Rahman, P.A. Brady, J.C. Cameron, Meniscal allograft with or without osteotomy: a 15-year follow-up study, *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* 23 (2015) 303–309.
- [15] P. Kempshall et al., Outcome of meniscal allograft transplantation related to articular cartilage status: advanced chondral damage should not be a contraindication, *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.: Off. J. ESSKA* 23 (2014).
- [16] *Knee Simulator. Dassault Systèmes* <https://www.3ds.com/products/simulia/abaqus/knee-simulator> (2023).
- [17] S. Kohli, J. Schwenck, I. Barlow, Failure rates and clinical outcomes of synthetic meniscal implants following partial meniscectomy: a systematic review, *Knee Surg. Relat. Res.* 34 (2022) 27.
- [18] S. Kopf et al., Management of traumatic meniscus tears: the 2019 ESSKA meniscus consensus, *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* 28 (2020) 1177–1194.
- [19] S.D. Masouros, I.D. McDermott, A.A. Amis, A.M.J. Bull, *Biomechanics of the meniscus-meniscal ligament construct of the knee*, *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* 16 (2008) 1121–1132.
- [20] R. Papalia, A. Del Buono, L. Osti, V. Denaro, N. Maffulli, Meniscectomy as a risk factor for knee osteoarthritis: a systematic review, *Br. Med. Bull.* 99 (2011) 89–106.
- [21] E. Peña, B. Calvo, M.A. Martínez, D. Palanca, M. Doblaré, Finite element analysis of the effect of meniscal tears and meniscectomies on human knee biomechanics, *Clin. Biomech. (Bristol, Avon)* 20 (2005) 498–507.
- [22] W. Petersen, B. Tillmann, Collagenous fibril texture of the human knee joint menisci, *Anat. Embryol. (Berl.)* 197 (1998) 317–324.
- [23] G. Samitier et al., Biological Therapies in Orthopedics and Sports Medicine, in: M.T. Hirschmann, E. Kon, K. Samuelsson, M. Denti, D. Dejour (Eds.), *ESSKA Instructional Course Lecture Book: Milan 2021*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2020, pp. 227–253, [https://doi.org/10.1007/978-3-662-61264-4\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-662-61264-4_28).
- [24] G. Samitier et al., Meniscal allograft transplantation. Part 1: systematic review of graft biology, graft shrinkage, graft extrusion, graft sizing, and graft fixation, *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* 23 (2015) 310–322.
- [25] T.M. Southworth, N.B. Naveen, T.M. Tauro, J. Chahla, B.J. Cole, Meniscal allograft transplants, *Clin. Sports Med.* 39 (2020) 93–123.
- [26] E. Stocco et al., Meniscus regeneration by 3D printing technologies: Current advances and future perspectives, *J. Tissue Eng.* 13 (2022) 20417314211065860.
- [27] M.J. Strobel, T. Zantop, *Strobel Arthroskopische Chirurgie: Teil I: Kniegelenk*, Springer, Berlin Heidelberg, 2014.
- [28] Surgery versus physical therapy for a meniscal tear and osteoarthritis - PubMed. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23506518/>.
- [29] A.V. Vasiladis et al., Finite element analysis of the knee joint: a computational tool to analyze the

combined behavior after treatment of torn ligaments and menisci in the human knee joint, *Sicot J* 10 (2024) 45.

- [30] P.S. Walker, M.J. Erkman, The role of the menisci in force transmission across the knee, *Clin. Orthop. Relat. Res.* (1975) 184–192, <https://doi.org/10.1097/00003086-197506000-00027>.
- [31] P.W. Winkler et al., Meniscal substitution, a developing and long-awaited demand, *J. Exp. Orthop.* 7 (2020) 55.

**Korrespondenzadresse.**

Anna-Christina Moser.

Dr.-Karl-Dorrek-Straße, 30,

3500 Krems an der Donau, Österreich.

E-Mail: [anna-christina.moser@donau-uni.ac.at](mailto:anna-christina.moser@donau-uni.ac.at)

Available online at: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

**ScienceDirect**