

**Diplomarbeit**

**Verteilung der koronalen Knieausrichtung anhand der  
CPAK-Klassifikation in einer österreichischen  
osteoarthrotischen Population**

eingereicht von

**Peter Schieder**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor der gesamten Heilkunde**

**(Dr. med. univ.)**

an der

**Medizinischen Universität Graz**

ausgeführt an der

**Universitätsklinik für Orthopädie und Traumatologie**

unter der Anleitung von

**Assoz. Prof. Priv.-Doz. Dr. med. univ. et scient. med. Patrick Sadoghi**

**Dr. med. univ. Christoph Fetz**

## **Eidesstattliche Erklärung**

*Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe, andere als die angegebenen Quellen nicht verwendet habe und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.*

*Des Weiteren erkläre ich hiermit, dass, sofern bei der Erstellung dieser Arbeit Künstliche Intelligenz (KI) Werkzeuge zur Generierung und/oder Korrektur bestimmter Textpassagen verwendet wurden, dieser Einsatz unter Einhaltung ethischer Grundsätze, akademischer Integrität und den Vorgaben meiner Universität erfolgte, sowie in Folge dies transparent gemacht und in angemessener Weise gekennzeichnet wurde.*

*Graz, am 17.11.2025*

*Peter Schieder eh.*

## **Danksagungen**

Zunächst möchte ich Klinikvorstand Univ.-Prof. Dr. med. univ. Andreas Leithner für die Möglichkeit danken, meine Diplomarbeit an der Universitätsklinik für Orthopädie und Traumatologie der Medizinischen Universität Graz durchführen zu können.

Mein besonderer Dank gilt meinem Hauptbetreuer Assoz. Prof. Priv.-Doz. Dr. med. univ. et scient. med. Patrick Sadoghi und meinen weiteren Betreuern Dr. med. univ. Christoph Fetz und Dr. med. univ. Amir Koutp für ihre kontinuierliche Unterstützung, die wertvolle fachliche Expertise, sowie die konstruktive Begleitung während der Entstehung dieser Arbeit.

Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei meinen Eltern und meiner Familie, die mir das Studium ermöglicht und mich durch ihre ständige Unterstützung und ihren Rückhalt in allen Phasen getragen haben. Ohne sie wäre die Verwirklichung dieser Arbeit nicht möglich gewesen. Auch meinen Freunden und Freundinnen danke ich für die vielen positiven Erfahrungen während des Studiums, die diese Zeit bereichert haben.

Abschließend sei all jenen gedankt, die hier nicht namentlich erwähnt wurden, deren fachliche oder persönliche Unterstützung jedoch wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat und die mich auf meinem Weg in den letzten Jahren begleitet haben.

# Zusammenfassung

## Hintergrund

Das Ziel dieser retrospektiven Analyse ist es, die Verteilung der koronalen Knieausrichtung anhand der CPAK-Klassifikation in einer österreichischen osteoarthrotischen Population zu untersuchen und den Zusammenhang mit Geschlecht, Alter und Body-Mass-Index zu analysieren. Die CPAK-Klassifikation ist ein im Februar 2021 publiziertes System zur Klassifizierung der koronalen Ausrichtung des Kniegelenkes.

## Material und Methoden

Diese retrospektive Analyse von 400 Kniegelenken in einer österreichischen osteoarthrotischen Population wurde von Oktober 2020 bis Dezember 2024 an der Universitätsklinik für Orthopädie und Traumatologie der Medizinischen Universität Graz durchgeführt. Anhand standardisierter anterior-posterior Beinachsenröntgen wurden radiologische Messungen des Lateral Distal Femoral Angle (LDFA) und Medial Proximal Tibial Angle (MPTA) durchgeführt. Die Joint Line Obliquity (JLO) und der Arithmetic Hip Knee Ankle Angle (aHKA) wurden rechnerisch ermittelt und die Kniegelenke den Phänotypen der CPAK-Klassifikation zugeordnet. Die Daten wurden mittels Shapiro-Wilk-Test, Welch's t-Test, Pearson's Chi<sup>2</sup>-Test, Fisher's Exact-Test, logistischer Regressionsanalyse, linearer Regressionsanalyse und multinomialer logistischer Regressionsanalyse statistisch analysiert. Die statistische Signifikanz wurde mit einem p-Wert von < 0,05 definiert.

## Ergebnisse

Die Studienpopulation bestand aus 400 Kniegelenken, davon waren 266 (66,5 %) von weiblichen Patientinnen und 134 (33,5 %) von männlichen Patienten. Das mittlere Alter betrug  $68,3 \pm 9,23$  Jahre, der mittlere Body-Mass-Index lag bei  $30,4 \pm 5,52$  kg/m<sup>2</sup>. Der mittlere aHKA zeigte mit  $-0,03^\circ$  eine leichte Varus-Tendenz und einen signifikanten Unterschied zwischen den Geschlechtern, mit einer größeren Varus-Ausrichtung bei Männern als bei Frauen ( $-1,40^\circ$  vs.  $+0,67^\circ$ ;  $p < 0,001$ ). Die häufigsten CPAK-Phänotypen waren I und II (je 21,75 %), gefolgt von VI (15,5 %), III (15,25 %), V (12,5 %) und IV (11,25 %). Die CPAK-Phänotypen VII (0,5 %), VIII (0,5 %) und IX (1,0 %) waren am seltensten vertreten. Die CPAK-Verteilung unterschied sich signifikant nach Geschlecht ( $p = 0,023$ ), jedoch nicht nach Alter. Männer hatten eine höhere Wahrscheinlichkeit für eine Varus-Ausrichtung ( $p < 0,001$ ) gegenüber Frauen und zeigten häufiger bestimmte CPAK-Phänotypen (III, VI, VIII). Der Body-Mass-Index war

lediglich bei Männern mit einer größeren Varus-Ausrichtung assoziiert ( $p = 0,033$ ), jedoch nicht bei Frauen.

### **Schlussfolgerungen**

Es zeigen sich in dieser österreichischen osteoarthrotischen Population geschlechtsspezifische Unterschiede in der koronalen Ausrichtung und der Verteilung der CPAK-Phänotypen. Männer zeigen häufiger eine größere Varus-Ausrichtung als Frauen. Der Body-Mass-Index ist bei Männern mit einer größeren Varus-Ausrichtung assoziiert. Das Alter zeigt keinen signifikanten Einfluss auf die Knieausrichtung. Diese Ergebnisse liefern die ersten regionsspezifischen Daten der CPAK-Klassifikation in einer österreichischen osteoarthrotischen Population. Diese Daten können zum Vergleich mit anderen Populationen herangezogen werden und bei individualisierten Ausrichtungsstrategien bei der Implantation von Knie-Totalendoprothesen unterstützen.

# Abstract

## Purpose

The aim of this retrospective analysis is to describe the distribution of coronal plane alignment of the knee based on CPAK phenotypes in an Austrian osteoarthritic population and to analyse if there is an association with age, body mass index and sex. The CPAK classification, published in February 2021, is a new system for describing the coronal plane alignment of the knee.

## Materials and Methods

This retrospective analysis of 400 knees in an Austrian osteoarthritic population was conducted from October 2020 to December 2024 at the University Clinic for Orthopedics and Traumatology at the Medical University of Graz. Radiological measurements of the lateral distal femoral angle (LDFA) and medial proximal tibial angle (MPTA) were performed using standardized long-leg standing radiographs. The joint line obliquity (JLO) and arithmetic hip knee ankle angle (aHKA) were calculated and the knees were assigned to the CPAK phenotypes. The data were statistically analysed using the Shapiro-Wilk test, Welch's t-test, Pearson's Chi<sup>2</sup> test, Fisher's exact test, logistic regression, linear regression and multinomial logistic regression. Statistical significance was defined at  $p < 0.05$ .

## Results

The study population consisted of 400 knees, of which 266 (66.5 %) were from female and 134 (33.5 %) from male patients. The mean age was  $68.3 \pm 9.23$  years with a mean body mass index of  $30.4 \pm 5.52$  kg/m<sup>2</sup>. The mean aHKA showed with  $-0.03^\circ$  a slight varus tendency and a significant difference between the sexes, with greater varus alignment in males than in females ( $-1.40^\circ$  vs.  $+0.67^\circ$ ,  $p < 0.001$ ). The most common CPAK phenotypes were I and II (21.75 % each), followed by VI (15.5 %), III (15.25 %), V (12.5 %) and IV (11.25 %). The CPAK phenotypes VII (0.5 %), VIII (0.5 %) and IX (1.0 %) were the least common. CPAK distribution differed significantly by sex ( $p = 0.023$ ) but not by age. Males were more likely to have a greater varus alignment ( $p < 0.001$ ) and to have certain CPAK phenotypes (III, VI, VIII). Body mass index was associated with varus alignment in males ( $p = 0.033$ ), but not in females.

## Discussion

This Austrian osteoarthritic population shows gender-specific differences in coronal alignment and the distribution of CPAK phenotypes. Males are more likely than females to have greater

varus alignment. Body mass index is associated with greater varus alignment only in males. Age shows no significant influence on knee alignment. These results provide the first region-specific data on CPAK classification in an Austrian osteoarthritic population. This data can be used to compare this population with others and to support individualized alignment strategies in total knee arthroplasty.

## **Angaben von bereits erfolgten Veröffentlichungen**

Parallel zu dieser Diplomarbeit entstand eine wissenschaftliche Publikation zum selben Forschungsthema, die unter dem Titel „Sex-specific differences in coronal knee alignment and CPAK distribution in an Austrian population“ im Fachjournal *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery* veröffentlicht wurde.

- Koutp Amir, Schieder Peter, Fetz Christoph, Schroedter Rene, Leitner Lukas, Leithner Andreas, Sadoghi Patrick. Sex-specific differences in coronal knee alignment and CPAK distribution in an Austrian population. Arch Orthop Trauma Surg 145, 512. November 2025. <https://doi.org/10.1007/s00402-025-06125-y>

# Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung.....	II
Danksagungen .....	III
Zusammenfassung .....	IV
Abstract .....	VI
Angaben von bereits erfolgten Veröffentlichungen .....	VIII
Inhaltsverzeichnis .....	IX
Abkürzungen und deren Erklärung .....	1
Abbildungsverzeichnis .....	2
Tabellenverzeichnis .....	3
1 Einleitung .....	4
1.1 Anatomie des Kniegelenkes .....	5
1.1.1 Knöcherne Strukturen.....	5
1.1.2 Knorpel.....	6
1.1.3 Menisci .....	6
1.1.4 Bandapparat.....	7
1.1.5 Muskulatur.....	7
1.1.6 Gelenkscapsel.....	8
1.1.7 Bewegungsumfang und funktionelle Anatomie .....	8
1.2 Gonarthrose .....	9
1.2.1 Definition und Epidemiologie .....	9
1.2.2 Ätiologie .....	10
1.2.3 Pathogenese .....	10
1.2.4 Klinik und Diagnostik .....	11
1.2.5 Therapie.....	13
1.3 CPAK-Klassifikation.....	16
2 Material und Methoden .....	19
2.1 Studiendesign .....	19

2.2	Radiologische Datenerhebung.....	19
2.3	Statistische Analyse.....	20
3	Ergebnisse .....	22
4	Diskussion .....	27
4.1	Stärken und Limitationen .....	29
4.2	Fazit.....	29
	Literaturverzeichnis.....	31

## **Abkürzungen und deren Erklärung**

CPAK	Coronal Plane Alignment of the Knee
LDFA	Lateral Distal Femoral Angle
MPTA	Medial Proximal Tibial Angle
JLO	Joint Line Obliquity
aHKA	Arithmetic Hip Knee Ankle Angle
mHKA	Mechanical Hip Knee Ankle Angle
BMI	Body-Mass-Index
SD	Standarddeviation (Standardabweichung)
DGOU	Deutsche Gesellschaft für Orthopädie und Unfallchirurgie
K-TEP	Knie-Totalendoprothese
OR	Odds Ratio
95 %-KI	95 %-Konfidenzintervall

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Articulatio genus dexter: a) von ventral b) von dorsal c) von lateral .....	5
Abbildung 2: Mikulicz-Linie .....	9
Abbildung 3: Gonarthrose .....	12
Abbildung 4: Knie-Totalendoprothese .....	15
Abbildung 5: Vergleich eines Kniegelenkes a) mit initial erhaltenem Gelenksspalt b) nach degenerativem Verlust des medialen Gelenksspaltes .....	17
Abbildung 6: Definition des aHKA und der JLO .....	17
Abbildung 7: Definition der Phänotypen I-IX der CPAK-Klassifikation .....	18
Abbildung 8: Lateral Distal Femoral Angle .....	20
Abbildung 9: Medial Proximal Tibial Angle .....	20
Abbildung 10: Verteilung des aHKA zwischen Frauen und Männern .....	23
Abbildung 11: Verteilung der CPAK-Phänotypen I-IX .....	24
Abbildung 12: Geschlechterverteilung der CPAK-Phänotypen .....	25

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Radiologische Klassifikation der Arthrose nach Kellgren-Lawrence .....	13
Tabelle 2: Deskriptive Statistik der demographischen Daten der Studienpopulation .....	22
Tabelle 3: Verteilung der CPAK-Phänotypen I-IX in der Studienpopulation.....	24

# 1 Einleitung

Die Bestimmung der idealen koronalen Ausrichtung bei der Implantation einer Knie-Totalendoprothese ist eine große Herausforderung (1). Lange wurde das mechanische Alignment bei Knie-Totalendoprothesen als Goldstandard angesehen (2–4). Um die Patientenzufriedenheit zu verbessern, wurde im Verlauf die Methode des kinematischen Alignments entwickelt (1), welche ein verbessertes Gleichgewicht des Weichteilgewebes (5–9) und eine natürlichere Kniebewegung ermöglicht (10–12). Jedoch besteht weiterhin Unklarheit über Ziele der Ausrichtung, die optimale kinematische Operationstechnik und die Auswahl der geeigneten PatientInnen (5,7,9,13–17). Die bisherige Terminologie der Beinachsen mit der Einteilung in die drei Untergruppen Varus, Valgus und Neutral zeigt Lücken, da sie weder die Gelenkslinie noch die ursprüngliche mechanische Beinachse abbildet (18). Mit dem Auftreten arthrotischer Veränderungen kommt es häufig zu einer Verschiebung der ursprünglichen mechanischen Beinachse, die entweder die ursprüngliche Ausrichtung verstärkt oder im Verlauf der Gonarthrose sogar ins Gegenteil verkehren kann. Ohne Kenntnisse der individuellen Ausgangsausrichtung ist eine präzise Rekonstruktion der Anatomie mittels kinematischer Techniken erschwert. Zudem bleibt die Bedeutung der Joint Line Obliquity unzureichend geklärt, obwohl sie für die Wiederherstellung der physiologischen Gelenkskinematik möglicherweise ebenso relevant ist wie die mechanische Beinachse selbst (19). Im Februar 2021 wurde mit der CPAK-Klassifikation ein neues System zur Klassifikation der Ausrichtung des Kniegelenkes veröffentlicht, welches den Arithmetic Hip Knee Ankle Angle (aHKA) mit der Joint Line Obliquity (JLO) kombiniert und neun verschiedene Phänotypen unterscheidet. Die CPAK-Klassifikation bietet eine detailliertere Beschreibung der nativen Ausrichtung des Kniegelenkes und unterstützt individuelle Ausrichtungsstrategien bei der Implantation von kinematischen und mechanischen Knie-Totalendoprothesen (1). Laut einer im Mai 2025 publizierten Metanalyse, unter Berücksichtigung von 38 Studien, variiert die Verteilung der CPAK-Phänotypen in Abhängigkeit von geschlechtsspezifischen, geographischen und osteoarthrotischen Faktoren. Um diesen Unterschieden gerecht zu werden, wäre in Zukunft ein individueller Ansatz für die Implantation von Knie-Totalendoprothesen wünschenswert (20). Es liegen bereits publizierte Studien über die Verteilung der CPAK-Klassifikation in verschiedenen Populationen vor (21–28).

Ziel dieser Diplomarbeit ist es, die Verteilung der Phänotypen der CPAK-Klassifikation und geschlechtsspezifische Unterschiede in einer österreichischen osteoarthrotischen Population

zu untersuchen. Zudem zielt die Diplomarbeit darauf ab, den Zusammenhang zwischen der koronalen Ausrichtung und dem Geschlecht, Alter oder Body-Mass-Index zu analysieren.

## 1.1 Anatomie des Kniegelenkes

Das Kniegelenk (*Articulatio genus*) setzt sich aus mehreren Teilgelenken zusammen und verbindet die *proximale Tibia*, das *distale Femur* und die *Patella*. Das *Femoropatellargelenk* verbindet die Gelenksfläche der *Patella* mit der *Facies patellaris* des *Femurs*. Das *Femorotibialgelenk* besteht aus den Gelenksflächen des *medialen* und *lateralen Femurkondylus* des *distalen Femurs* und des *medialen* und *lateralen Tibiakondylus* der *proximalen Tibia*. Das *Femorotibialgelenk* kann aus klinischer Sicht auch in ein *mediales* und ein *laterales Kompartiment* unterteilt werden (29).

### 1.1.1 Knöcherne Strukturen



Abbildung 1: *Articulatio genus dexter*: a) von ventral b) von dorsal c) von lateral (30)

Am distalen Ende des *Femurs* befinden sich die spiralig gekrümmten *Femurkondylen*, deren Krümmungsradius nach dorsal zunimmt. Bei zunehmender Flexion des Kniegelenkes vermindert sich so die Kontaktfläche zur *Tibia*, was zu einer abnehmenden Gelenkskongruenz führt. Die beiden *Femurkondylen* sind durch die *Fossa intercondylaris* getrennt, in der die Kreuzbänder verlaufen. Seitlich der *Femurkondylen* treten der *Epicondylus medialis* und *Epicondylus lateralis* hervor, die als Ansatzpunkte für Sehnen und Bänder dienen. Der Knorpelüberzug beschränkt sich auf die dorsalen und kaudalen Bereiche der *Femurkondylen* und geht ventral kontinuierlich in die *Patellagleitrinne* über.

Die Patella stellt das größte Sesambein des menschlichen Körpers dar und ist funktionell in die Sehne des *Musculus quadriceps femoris* integriert. Proximal endet sie in einer abgerundeten *Basis patellae* und distal im zugespitzten *Apex patellae*. Die dorsale Fläche ist mit Gelenksknorpel überzogen und in zwei Gelenksfacetten unterteilt, die mit der *Facies patellaris* des *Femurs* artikulieren.

Das proximale Ende der *Tibia* weist zwei mit Gelenksknorpel überzogene *Facies articulares* auf, die mit dem *Femur* artikulieren. Die mediale Gelenksfläche ist schwach konkav geformt und bildet eine Pfanne für den *medialen Femurkondylus*. Die laterale Gelenksfläche hingegen zeigt eine nahezu plane Struktur, die nach anterior und posterior abfällt. Aufgrund dieser Morphologie ist die Gelenkskongruenz zwischen *Femur* und *Tibia* gering. Zwischen den beiden Gelenksflächen am *Tibiaplateau* liegt die *Eminentia intercondylaris* (29).

### 1.1.2 Knorpel

Die Gelenksflächen des Kniegelenkes an *Femur*, *Tibia* und *Patella* sind von hyalinem Gelenksknorpel überzogen und weisen im Vergleich zu allen anderen Gelenken die größte Knorpeldicke auf. Die Dicke des Gelenksknorpels an der dorsalen Fläche der *Patella* beträgt im Durchschnitt etwa 3 mm, wobei lokale Maximalwerte von bis zu 7 mm beobachtet werden können. Die Dicke an den *Femurkondylen* und den *Tibiakondylen* liegt im Durchschnitt zwischen 2 und 3 mm. Die Ernährung des Gelenksknorpels erfolgt durch die Synovia und das subchondrale Fettgewebe. Durch die ausgeprägte Knorpeldicke zeigt sich in der Bildgebung ein sehr weiter „radiologischer Gelenksspalt“. Die Verformbarkeit des Knorpels trägt dazu bei, die bestehende Inkongruenz der artikulierenden Gelenksflächen zu reduzieren (29).

### 1.1.3 Menisci

Die *Menisci* übernehmen im Kniegelenk eine wesentliche Funktion bei der Druckverteilung und Stabilisierung. Aufgrund der relativ kleinen Kontaktflächen im Kniegelenk sind die *Menisci*, trotz der dicken Knorpelschicht, hohen Belastungen ausgesetzt. Durch ihre keilförmige Form, mit größerer Dicke in der Peripherie und spitzer Abflachung nach medial, bilden sie auf den *Tibiakondylen* Gelenkspfannen für die Druckverteilung der *Femurkondylen*. Der *mediale Meniscus* ist C-förmig, weniger stark gekrümmt und durch seine Verbindung zum *Ligamentum collaterale mediale* in seiner Beweglichkeit eingeschränkt. Der *laterale Meniscus* dagegen ist fast O-förmig, also stärker gekrümmt als der *mediale Meniscus* und durch seine fehlende Kapselverbindung deutlich beweglicher.

Beugung und Außenrotation führen zu erhöhter Spannung am *medialen Meniscus* und begünstigen hier Verletzungen, wohingegen der *laterale Meniscus* aufgrund seiner besseren Verschieblichkeit weniger verletzungsanfällig ist. Die *Menisci* sind über ihre Vorder- und Hinterhörner in den *Areae intercondylares* der *Tibia* verankert. Histologisch sind die *Menisci* aus Faserknorpel aufgebaut. Die vaskuläre Versorgung der *Menisci* ist insgesamt nur schwach ausgeprägt und erfolgt über die knöchernen Ansatzstellen sowie die Gelenkkapsel (29).

#### **1.1.4 Bandapparat**

Der ventrale Teil der Bandstrukturen im Kniegelenk wird im Wesentlichen durch die Sehne des *Musculus quadriceps femoris*, die in die Sehne eingelagerte *Patella* sowie das *Ligamentum patellae* gebildet. Letzteres verbindet die *Patella* mit der *Tuberositas tibiae*. Zusätzlich ziehen die *Retinacula patellae medialis et lateralis* vom *Musculus quadriceps femoris* ausgehend, seitlich an der *Patella* vorbei, zu den entsprechenden *Tibiakondylen*. In der Frontalebene sichern das *Ligamentum collaterale mediale* und *Ligamentum collaterale laterale* das Kniegelenk. Das *Ligamentum collaterale mediale* verstärkt die mediale Kapselwand und besitzt eine deltaförmige Form mit einer *Pars anterior* und einer *Pars posterior*. Das mediale Seitenband verhindert das mediale Aufklappen des Kniegelenkes. Das *Ligamentum collaterale laterale* liegt extrakapsulär und verhindert das laterale Aufklappen des Kniegelenkes. Intrakapsulär in der *Fossa intercondylaris*, aber extrasynovial, verlaufen das *Ligamentum cruciatum anterius* und das *Ligamentum cruciatum posterius*. In Streckstellung sind diese maximal gespannt und bei Flexion sichern diese das Kniegelenk vor allem in der Sagittalebene. Dorsal des Kniegelenkes verlaufen das *Ligamentum popliteum obliquum* und das *Ligamentum popliteum arcuatum* (29).

#### **1.1.5 Muskulatur**

Die Flexion im Kniegelenk erfolgt vor allem durch die ischiocrurale Muskulatur, insbesondere durch den *Musculus semimembranosus*, den *Musculus semitendinosus*, den *Musculus biceps femoris* und den *Musculus gastrocnemius*. Die Extension wird vollständig über den *Musculus quadriceps femoris* durchgeführt. An der Außenrotation des Unterschenkels, bei gebeugtem Kniegelenk, ist hauptsächlich der *Musculus biceps femoris* beteiligt, welcher durch den *Musculus tensor fasciae latae* unterstützt wird. Für die Innenrotation sind vor allem der *Musculus semimembranosus* und der *Musculus*

*semitendinosus* verantwortlich, welche durch den *Musculus popliteus* und den *Musculus sartorius* unterstützt werden (29).

### 1.1.6 Gelenkkapsel

Die Gelenkkapsel setzt im Bereich der *Femurkondylen* und *Tibiakondylen* an, nur wenige Millimeter distal der Knochen-Knorpel-Grenzen. Proximal der *Facies patellaris* befindet sich die *Bursa suprapatellaris*, die stets mit der Gelenkhöhle in Verbindung steht und den *Recessus suprapatellaris* bildet. Die Innenseite der Gelenkkapsel wird durch die *Membrana synovialis* und die Außenseite durch die *Membrana fibrosa* gebildet. Ventral befindet sich das *Corpus adiposum infrapatellare* (Hoffa-Fettkörper), welches das *Ligamentum patellae* und die *Retinacula patellae* polstert (29).

### 1.1.7 Bewegungsumfang und funktionelle Anatomie

Funktionell spricht man beim Kniegelenk von einem *Trochoginglymus*, also einem Drehscharniergelenk. Bewegungen erfolgen sowohl entlang der Transversalachse als auch der Longitudinalachse. Die Extension und Flexion umfassen einen Bewegungsumfang von  $5^{\circ}$ - $0^{\circ}$ - $140^{\circ}$ . Die Transversalachse verläuft dabei durch die Gelenksrollen der *Femurkondylen*, diese ist jedoch, aufgrund der variierenden Krümmungsradien der *Femurkondylen*, nicht konstant. Bei der Flexion kommt es zu einer zunehmenden Verlagerung nach dorsal-kranial. Die Flexion im Kniegelenk entspricht einer kombinierten Roll-Gleit-Bewegung, bei der initial bis ungefähr  $20^{\circ}$  das Abrollen der *Femurkondylen* überwiegt und ab dann überwiegend ein Gleitvorgang erfolgt. Am Ende der vollständigen Extension führt die Spannung des vorderen Kreuzbandes zu einer physiologischen Außenrotation von  $5$ - $10^{\circ}$ , die man als Schlussrotation bezeichnet. Die Longitudinalachse, um die Rotationsbewegungen erfolgen, ist etwas nach medial versetzt und zieht durch das *Tuberculum intercondylare mediale* der *Tibia*. Der Bewegungsumfang für Außen- und Innenrotation im Kniegelenk beträgt etwa  $30^{\circ}$ - $0$ - $10^{\circ}$ . Die Bewegungen in der Frontalebene, wie Abduktion und Adduktion, sind durch die Kollateralbänder nahezu vollständig unterbunden (31).

Die mechanische Beinachse, auch als Mikulicz-Linie (Abbildung 2) oder Tragelinie des Beines bezeichnet, beschreibt die gedachte Verbindungslinie zwischen dem Zentrum des Hüftkopfes und dem Mittelpunkt des oberen Sprunggelenkes. Unter physiologischen Bedingungen verläuft die mechanische Beinachse etwa 4 mm medial des

Kniegelenkszentrums. Eine Fehlstellung mit Verlagerung der Achse nach medial bezeichnet man als *Genu varum*, nach lateral als *Genu valgum* (32).

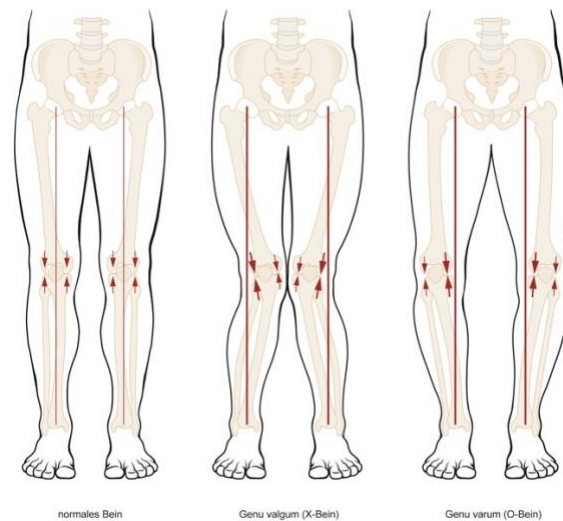


Abbildung 2: Mikulicz-Linie (31)

Die im Verlauf der Arbeit verwendeten Begriffe Arithmetic Hip Knee Ankle Angle (aHKA) und Mechanical Hip Knee Ankle Angle (mHKA) beziehen sich beide auf die mechanische Beinachse.

## 1.2 Gonarthrose

### 1.2.1 Definition und Epidemiologie

Als Gonarthrose wird die degenerative Erkrankung des Kniegelenkes mit Verbrauch des hyalinen Gelenksknorpels bezeichnet, wodurch es sekundär zu Knochenläsionen und zu entzündlichen Prozessen im Kniegelenk kommt. Jeder Mensch entwickelt mit zunehmendem Alter unaufhaltsam Arthrosen. Die im Kniegelenk auftretende Arthrose bezeichnet man als Gonarthrose. Bereits die Hälfte der Bevölkerung entwickelt um das Alter von 40 Jahren degenerative Gelenksveränderungen und im Alter von 65 Jahren ist nahezu jeder Mensch davon betroffen. Nach der Wirbelsäule ist das Kniegelenk am zweithäufigsten von Arthrosen betroffen. Wenn die retropatelläre Gelenkfläche von der Arthrose betroffen ist, spricht man von der sogenannten Retropatellararthrose. Bei Betreffen des medialen oder lateralen Gelenkspaltes spricht man von unikompartimenteller medialer oder lateraler Gonarthrose. Ist das gesamte Kniegelenk von der Arthrose betroffen, liegt eine Pangonarthrose vor (32,33).

### **1.2.2 Ätiologie**

Das Auftreten eines Ungleichgewichtes von Belastung und Belastungsfähigkeit kann das Entstehen einer Arthrose begünstigen. Die primäre Arthrose entsteht idiopathisch und eine sekundäre Arthrose kann sich aus präarthrotischen Veränderungen entwickeln. Unter dem Begriff Präarthrose versteht man präarthrotische Veränderungen, denen nachweisbare Faktoren zu Grunde liegen. Ursachen solcher präarthrotischen Veränderungen können statisch bedingte Fehlstellungen, Überlastungsschäden bei Varus- oder Valgus-Fehlstellungen, posttraumatische Ursachen (Frakturen, Luxationen, Knorpeldefekte), Immobilisation, Entzündungen (unspezifisch, spezifisch, rheumatoid), kongenitale Entwicklungsstörungen, endokrine Erkrankungen (Hyperparathyreoidismus, Hypothyreose) oder auch metabolische Störungen (Gicht, Diabetes mellitus, Chondrokalzinose) sein (32–34).

### **1.2.3 Pathogenese**

Degenerative Erkrankungen, so auch die Arthrose, verlaufen typischerweise progredient. Anfangs kommt es zu einem Elastizitätsverlust des Gelenksknorpels, zu Veränderungen der Knorpelgrundsubstanz und zur Demaskierung der kollagenen Fasern. Im Röntgen sichtbare Frühzeichen sind eine Abnahme der Knorpelhöhe, Gelenksspaltverschmälerung und subchondrale Sklerosierung. Die Veränderungen des Knorpels führen zu Schub- und Scherkräften im Gelenk, die der Knochen durch den Anbau von Exophyten und Osteophyten versucht zu kompensieren. Dies bezeichnet man als Arthrosis deformans, bei der die Deformierung des Gelenkes beginnt. Mit dem Voranschreiten der Arthrose wird der Gelenksknorpel immer dünner und die kraftaufnehmenden Flächen im Gelenk immer kleiner. Der Knochen beginnt sich unter den maximal beanspruchten Arealen zurückzubilden und es entstehen subchondrale Zysten. Jahrelang können diese Vorgänge klinisch unauffällig verlaufen. Beschleunigt sich der Verlauf, kann sich die Arthrose auch klinisch bemerkbar machen. Es kann zu reaktiven Entzündungen der Synovia kommen, einer sogenannten aktivierten Arthrose, oder es können auch subchondrale Knochennekrosen entstehen, welchen eingebrochene subchondrale Zysten zugrunde liegen. Durch die Synovitis kommt es zusätzlich auch zu vermehrter Bildung von Synovialflüssigkeit und zur Bildung eines Gelenksergusses (32,33).

#### 1.2.4 Klinik und Diagnostik

Die Hauptsymptome der Arthrose sind Schmerzen, Schwellungen, zunehmende Deformitäten, Bewegungseinschränkungen und der Funktionsverlust des Gelenkes. Trotz bereits vorhandener radiologischer Veränderungen bleiben die meisten PatientInnen jahrelang beschwerdefrei und es kommt erst im weiteren Verlauf der Erkrankung zum Auftreten von klinischen Beschwerden. Die ersten Symptome sind oft diffuse Gelenks- und Muskelschmerzen, welche belastungsabhängig sind und durch Gelenksüberbelastung auftreten. Durch die oft weiter vom Gelenk entfernten Schmerzen wird die Arthrose im Frühstadium oft nicht erkannt und kann fälschlicherweise als rheumatisches Beschwerdebild eingeordnet werden. Im Anfangsstadium wird auch von den PatientInnen häufig eine Steifigkeit des Kniegelenkes oder ein Anlaufschmerz beschrieben, welcher nach kurzzeitigem Sitzen oder Stehen auftritt und sich nach kurzer Bewegung wieder bessert. Der für die Gonarthrose charakteristische Schmerz ist belastungs- und bewegungsabhängig und nimmt in der Regel im Verlauf des Tages zu. Im Falle einer Retropatellararthrose manifestieren sich die Schmerzen ausschließlich oder verstärkt beim Treppensteigen, im Vergleich zum Gehen auf ebenem Gelände. Schmerzen, die lokalisiert im Bereich des medialen oder lateralen Gelenkspaltes auftreten, können auf eine isolierte mediale oder laterale Gonarthrose hindeuten. Mit Progredienz der Gonarthrose können die Schmerzen dauerhaft, in Ruhe und über Nacht auftreten, und sowohl eine venöse Hypertonie als auch eine entzündliche Komponente zur Ursache haben. Die venöse Hypertonie entsteht durch vermehrte Knochenmarksfibrose im Bereich der Gelenksknochen. Die Entzündungsreaktion präsentiert sich als Synovitis, bei der vermehrt Synovialflüssigkeit im Gelenk gebildet wird und einen Kniegelenkserguss zur Folge haben kann. Die daraus resultierende Schwellung kann sich entweder oberhalb der *Patella* oder im Bereich der Kniekehle manifestieren, wo sie als sogenannte Baker-Zyste bezeichnet wird. Die Baker-Zyste ist eine dorsale Ausstülpung der Kniegelenkscapsel zwischen dem *Musculus gastrocnemius* und dem *Musculus semimembranosus* und ist ungefähr ab einem Durchmesser von 2 cm tastbar. Die definitive Diagnose der Baker-Zyste erfolgt mittels Magnetresonanztomographie oder Sonographie. Die Symptomatik manifestiert sich als Schwellung in der Kniekehle, die insbesondere bei Beugung im Kniegelenk zu Druckbeschwerden führt. Bei zunehmender Größe besteht die Möglichkeit der Bildung von Thrombosen bei gestörtem Blutfluss durch Venenkompression oder auch von Empfindungsstörungen durch Nervenkompression. Die zunehmende Deformität der Gelenke führt zu einer zunehmenden Achsenfehlstellung,

wodurch es zu Bewegungseinschränkungen kommen kann. Zugleich kann es durch die verminderte Bewegung zu einer Muskelatrophie kommen, wodurch die Belastungsfähigkeit des Gelenkes weiter abnimmt. Dies kann eine Instabilität mit zusätzlicher Bandlockerung zur Folge haben, was als Schlottergelenk bezeichnet wird. Auch eine spontane Versteifung, also eine Ankylose, ist möglich (32,33). Eine Anamnese und eine körperliche Untersuchung reichen in der Regel aus, um die Diagnose der Arthrose zu stellen. Eine Bestätigung kann eine unter Belastung durchgeführte anterior-posterior Röntgenaufnahme des tibiofemorales Kompartiments und eine Röntgenaufnahme des patellofemorales Kompartiments, als laterale oder Skyline-Ansicht, bringen (35).



Abbildung 3: Gonarthrose (eigene Aufnahme)

Gelenkspaltverschmälerung, subchondrale Sklerosierung, osteophytäre Anbauten oder subchondrale Zysten bzw. Deformierungen sind typische radiologische Veränderungen der Gonarthrose. Es ist bekannt, dass der Schweregrad der radiologischen Veränderungen nicht zwingend mit der klinischen Symptomatik korreliert. So können auch bei ausgeprägten Arthrosezeichen in der Bildgebung nur geringe klinische Beschwerden vorliegen, während umgekehrt bei minimalen radiologischen Befunden eine deutliche Symptomatik vorliegen kann. Die Arthrose wird nach der radiologischen Klassifikation nach Kellgren und Lawrence in fünf Grade unterteilt (siehe Tabelle 1). In speziellen Fällen kann ergänzend eine Magnetresonanztomographie sinnvoll sein (32). Blut- oder Urintests zur Diagnose der Arthrose gibt es keine. Eine Gelenkspunktion ist nicht routinemäßig indiziert, kann aber bei ausgewähltem Patientenkollektiv zur Unterscheidung von anderen Arthritiden eingesetzt werden (35).

Grad	Morphologie
0	Gelenksspalt normal weit
1	Geringe Verschmälerung des Gelenksspaltes, geringe subchondrale Sklerosierung
2	Geringe Verschmälerung des Gelenksspaltes, Osteophyten vorhanden
3	Gelenksspaltverschmälerung, ausgeprägte Osteophytenbildung, Unregelmäßigkeiten der Gelenksfläche
4	Kein Gelenksspalt vorhanden, Destruktion der Gelenkspartner, Fehlstellung

*Tabelle 1: Radiologische Klassifikation der Arthrose nach Kellgren-Lawrence (32)*

### **1.2.5 Therapie**

Die Behandlung der Gonarthrose basiert auf einem multimodalen Ansatz und umfasst nicht-medikamentöse, medikamentöse sowie chirurgische Optionen. Ein akzeptabler Zustand wird dann angenommen, wenn die PatientInnen und die behandelnden ÄrztInnen die Symptome, Funktion und Nebenwirkungen der Therapie als zufriedenstellend einstufen, andernfalls sind Anpassungen der Therapie erforderlich (35).

Die Bewegungstherapie ist ein wesentlicher Bestandteil der Behandlung der Gonarthrose (36–40). Die bewegungsorientierte Behandlung trägt zur Schmerzlinderung bei und führt zur Funktionsverbesserung. Anfangs können dabei Schmerzen auftreten, jedoch überwiegt der Langzeiteffekt (36). Zu den Trainingszielen gehören die Aufrechterhaltung und Verbesserung der aeroben Fitness, der Beweglichkeit und der Kraft sowie auch die Verringerung der Sturzgefahr. Die Bewegungstherapie wird idealerweise von einem Physiotherapeuten initiiert und individuell an die PatientInnen angepasst (35). Übergewichtigen PatientInnen mit Gonarthrose wird eine Gewichtsreduktion empfohlen (39,40). Gehhilfen können zur Entlastung des Kniegelenkes beitragen. Orthesen sind nur bei speziellen Indikationen, wie zum Beispiel bei Instabilität, sinnvoll. Edukative Maßnahmen zur Förderung der Compliance sind ebenfalls zu empfehlen (36). Eine Metaanalyse über psychologische Interventionen zur Schmerzbewältigung konnte eine Verringerung der Schmerzen und eine Verbesserung der Funktion bei PatientInnen mit Osteoarthrose zeigen (41).

In der medikamentösen Therapie stehen nichtsteroidale Antirheumatika (NSAR) im Vordergrund. Initial wird eine topische Anwendung in möglichst niedriger Dosis und kürzester notwendiger Dauer empfohlen. Ist die topische Therapie nicht mehr ausreichend,

kann diese auch oral erfolgen. Hier sollte eine begleitende Gabe von Protonenpumpeninhibitoren, bei entsprechendem gastrointestinalem Risiko, erfolgen. In ausgewählten Situationen kann auch eine Analgesie mit Paracetamol, Metamizol oder schwach wirksamen Opioiden erfolgen. Intraartikuläre Glukokortikoid-Injektionen können kurzfristige Linderungen der Beschwerden über wenige Wochen verschaffen (36). Regelmäßige Glukokortikoid-Injektionen werden nicht empfohlen, da diese mit einem strukturierten Knorpelverlust assoziiert sein können. Eine Studie mit einer regelmäßigen intraartikulären Glukokortikoid-Therapie über zwei Jahre zeigte einen größeren Knorpelverlust als die Vergleichskohorte mit Kochsalzinjektionen (42). Für die Gabe von Hyaluronsäure besteht keine klare Evidenz, sodass laut der DGOU (Deutsche Gesellschaft für Orthopädie und Unfallchirurgie e.V.) keine klare Empfehlung gegeben werden kann (36,43). Eine intraartikuläre Therapie mit plättchenreichem Plasma (PRP) kann laut der DGOU mit zurückhaltender Empfehlung erwogen werden, falls andere Optionen nicht den gewünschten Effekt erzielen (36).

Operative Möglichkeiten sind entweder gelenkserhaltende oder gelenksersetzende Therapien. Arthroskopische Maßnahmen, wie Lavage oder Debridement, werden bei gesicherter Arthrose nicht empfohlen. Für knorpelregenerative Operationen bei Gonarthrose kann bei fehlender Evidenz keine Empfehlung abgegeben werden. Bei moderatem Schweregrad der Arthrose (Kellgren-Lawrence  $\leq 3$ ) und vorhandener Fehlstellung kann eine Umstellungsosteotomie durchgeführt werden (36). Bei fortgeschrittener Arthrose und persistierenden Schmerzen soll ein Kniegelenkersatz in Betracht gezogen werden, da dieser mit einer deutlichen Schmerzlinderung, einer Funktionsverbesserung und einer hohen Patientenzufriedenheit in Verbindung steht (44). Unikondyläre Prothesen können bei Beteiligung eines Kompartiments erwogen werden (36). Von der DGOU wird bei folgenden Indikationen eine Implantation einer Knie-Totalendoprothese empfohlen: Bestehende Knieschmerzen über drei Monate, Nachweis von fortgeschrittener Gonarthrose mit Kellgren-Lawrence Grad 3 bis 4 oder Osteonekrose mit Defekt der Gelenksflächen oder Deformierung, Versagen einer adäquaten konservativen Therapie über drei Monate, Einschränkungen der Lebensqualität über drei Monate und Bestehen eines subjektiven auf das Kniegelenk bezogenen Leidensdruckes (45). Bei Knie-Totalendoprothesen kann zwischen mechanischem und kinematischem Alignment unterschieden werden. Das mechanische Alignment war seit den Anfängen der Entwicklung der Knie-Totalendoprothesen die Methode der Wahl (2–4), bei der die Ausrichtung zu einer

horizontalen Gelenkslinie und einer neutralen mechanischen Beinachse führt (46). Diese Methode berücksichtigt jedoch nicht die inhärente Variabilität der koronalen Ausrichtung zwischen PatientInnen (47–51) sowie biomechanische Folgen, die sich aus diesem Einheitsansatz ergeben (8,10–12,52,53). Um eine Verbesserung der Patientenzufriedenheit zu ermöglichen, wurde im Laufe der Zeit die Methode des kinematischen Alignments entwickelt (1). Die Methode des kinematischen Alignments versucht die ursprüngliche Ausrichtung des Kniegelenkes vor der Arthrose wiederherzustellen, indem die ursprünglichen Achsen, um welche die Bewegungen im Kniegelenk erfolgen, nachgebildet werden (9,13,54). Diese Methode ermöglicht eine natürlichere Kniebewegung (10–12) und ein verbessertes Gleichgewicht des Weichteilgewebes (5–9). Trotz intensiver Forschung ist derzeit noch nicht abschließend geklärt, was die Ziele der Ausrichtung, die optimale kinematische Operationstechnik und die Auswahl der geeigneten PatientInnen angeht (5,7,9,13–17). Die arthrotischen Veränderungen führen häufig zu einer Verschiebung der ursprünglichen mechanischen Beinachse und ohne genaue Kenntnisse der individuellen ursprünglichen Ausrichtung ist eine präzise Rekonstruktion der Anatomie mittels kinematischer Techniken erschwert (19). Hier bietet die Einführung der CPAK-Klassifikation eine neue Möglichkeit Lösungsstrategien zu entwickeln (1).



Abbildung 4: Knie-Totalendoprothese (eigene Aufnahme)

### 1.3 CPAK-Klassifikation

Die CPAK-Klassifikation wurde unter dem Titel „Coronal Plane Alignment of the Knee (CPAK) Classification - a new system for describing knee phenotypes“ von S. J. MacDessi, W. Griffiths-Jones, I. A. Harris, J. Bellemans und D. B. Chen im *The Bone & Joint Journal* im Februar 2021 publiziert. In dieser neuen Klassifikation der Ausrichtung des Kniegelenkes werden zwei unabhängige Parameter, nämlich die Joint Line Obliquity (JLO) und der Arithmetic Hip Knee Ankle Angle (aHKA), kombiniert. Zur Berechnung dieser zwei Parameter werden der Medial Proximal Tibial Angle (MPTA) und der Lateral Distal Femoral Angle (LDFA) benötigt. Der MPTA ist definiert als der mediale Winkel zwischen der mechanischen Tibiaachse und der proximalen Gelenkslinie der *Tibia*. Die mechanische Tibiaachse zieht sich vom Tibiaplateau-Zentrum bis zum Zentrum des Sprunggelenkes in die Talusmitte. Die proximale Gelenkslinie der *Tibia* verläuft am Tibiaplateau entlang der *Facies articulares*. Der LDFA ist als der laterale Winkel zwischen der mechanischen Achse des *Femurs* und der distalen Gelenkslinie des *Femurs* definiert. Die mechanische Femurachse zieht sich vom Zentrum des Femurkopfes bis hin zum interkondylären Punkt zwischen *medialem* und *lateralem Femurkondylus*. Die proximale Gelenkslinie am *Femur* zieht sich entlang der *Facies articulares* des *medialen* und *lateralen Femurkondylus*. Die Veranschaulichungen des MPTA und des LDFA sind in den Abbildungen 5, 8 und 9 dargestellt. Der aHKA ist definiert als die Differenz zwischen MPTA und LDFA (1). Die gesamte Ausrichtung der unteren Extremität, sprich der Mechanical Hip Knee Ankle Angle (mHKA), kann sich im Laufe der Zeit im Rahmen von arthrotischen Prozessen und der damit einhergehenden einseitigen Gelenkspaltverengung deutlich verändern (55). Falls jedoch an den zentralen Kompartiment-Kontaktpunkten kein arthrotischer Knochenverlust vorliegt, kann die Ausrichtung der unteren Extremität mithilfe des aHKA abgeschätzt werden, da der aHKA nicht durch die tibiofemorale Subluxation oder die Gelenkspaltverengung beeinflusst wird. Wie in Abbildung 5 dargestellt, kann sich der mHKA verändern und sich eine größere Varus-Ausrichtung im Vergleich zum Ausgangszustand bilden, wenn es degenerativ bedingt zu einem Verlust des medialen Gelenkspaltes kommt. Der LDFA, MPTA und somit auch der aHKA bleiben jedoch stabil. Diese Methode geht davon aus, dass der aHKA dem mHKA entspricht, falls die distalen femoralen und proximalen tibialen Gelenkslinien parallel sind. Somit kann der aHKA zur Abschätzung der Grundausrichtung eingesetzt werden (1,18). Ein negativer aHKA weist auf eine Varus-Stellung des Kniegelenkes hin und wurde mit aHKA kleiner als  $-2^\circ$  definiert. Die Neutral-Stellung des

Kniegelenkes ist mit einem aHKA von  $0 \pm 2^\circ$  definiert. Bei einem aHKA größer als  $+2^\circ$  spricht man von einer Valgus-Stellung. Der aHKA wurde also in die drei Untergruppen Varus, Neutral und Valgus unterteilt.

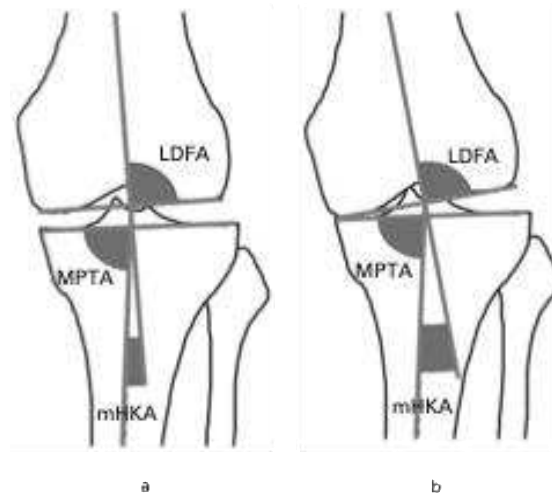


Abbildung 5: Vergleich eines Kniegelenkes a) mit initial erhaltenem Gelenkspalt b) nach degenerativem Verlust des medialen Gelenkspaltes (1)

In Abbildung 6 wird die Einteilung des aHKA und der JLO gezeigt. Die JLO wird als Summe von MPTA und LDFA definiert und ist unabhängig von der mechanischen Achse der unteren Extremität. Wenn man die Gelenkslinien beider Kniegelenke nach medial verlängert, wird eindeutig sichtbar, ob diese unter, über oder im Niveau der horizontalen Gelenkslinie liegen (1).

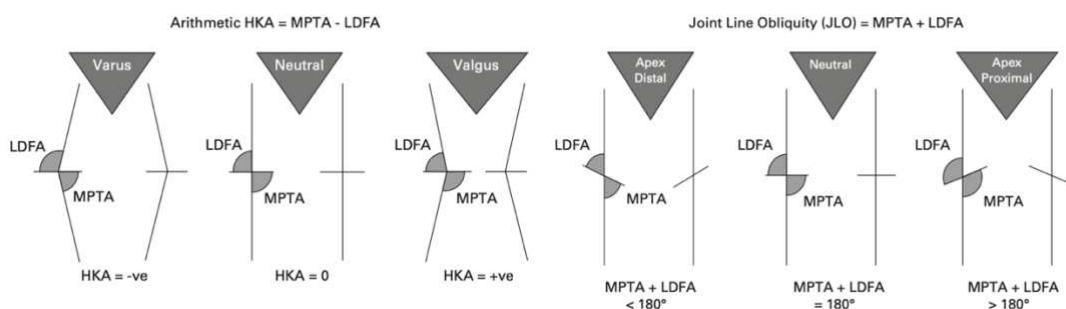


Abbildung 6: Definition des aHKA (links) und der JLO (rechts) (1)

Die Richtung der JLO wird in der CPAK-Klassifikation beschrieben als Apex Distal bei einer JLO unter  $177^\circ$ , Neutral bei einer JLO  $180 \pm 3^\circ$  und Apex Proximal bei einer JLO über  $183^\circ$ . Der Apex Distal beschreibt eine nach medial abfallende Gelenkslinie im Vergleich zur

horizontalen Gelenkslinie, der Apex Proximal eine nach medial ansteigende Gelenkslinie über die horizontale Gelenkslinie. Die Kombination dieser zwei Dimensionen (aHKA, JLO) ermöglicht eine Matrix aus neun Phänotypen, wodurch diese Klassifikation der koronalen Knieausrichtung ermöglicht wird. Die Definitionen der CPAK-Phänotypen I-IX sind in Abbildung 7 dargestellt (1).

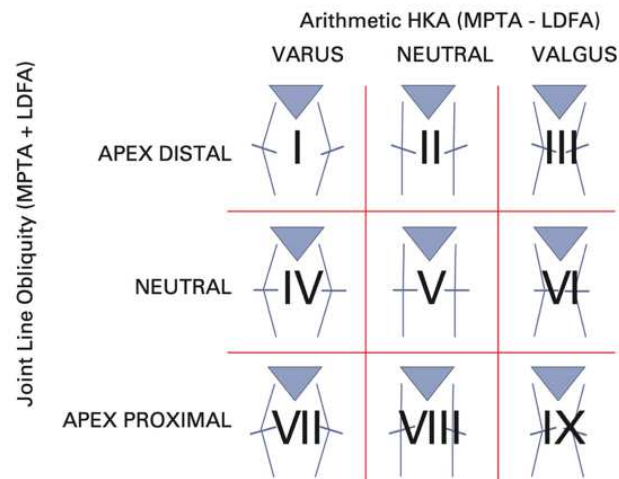


Abbildung 7: Definition der Phänotypen I-IX der CPAK-Klassifikation (1)

Im ersten Teil der Studie der CPAK-Klassifikation wurde eine Studienpopulation von jeweils 500 gesunden als auch 500 osteoarthrotischen Kniegelenken untersucht. In weiterer Folge wurde eine deskriptive Statistik über die Häufigkeit der einzelnen Phänotypen der CPAK-Klassifikation erstellt. Im zweiten Teil wurde untersucht, wie die CPAK-Klassifikation praktisch angewendet werden kann, um vorherzusagen, welche CPAK-Phänotypen bei einer kinematischen Knie-Totalendoprothese, im Vergleich zur mechanischen Methode, eine bessere Weichteilbalance erreichen. Hierfür wurden 138 Knie-Totalendoprothesen untersucht, welche randomisiert in kinematische und mechanische Alignments aufgeteilt wurden (1).

## **2 Material und Methoden**

### **2.1 Studiendesign**

Die retrospektive Analyse wurde an der Universitätsklinik für Orthopädie und Traumatologie der Medizinischen Universität Graz durchgeführt. Das Ziel dieser Analyse war es, die Verteilung der Kniephänotypen in der österreichischen osteoarthrotischen Population anhand der CPAK-Klassifikation darzustellen. Darüber hinaus wurde untersucht, ob ein Zusammenhang zwischen den einzelnen Phänotypen der CPAK-Klassifikation und dem Alter, Geschlecht sowie Body-Mass-Index der PatientInnen besteht. Bisher existieren bereits Daten über die Verteilung in anderen Populationen, jedoch existieren derzeit nach unserem Wissensstand noch keine Daten über die Verteilung der CPAK-Klassifikation in der österreichischen osteoarthrotischen Population. Das Ethikvotum (EK31-176 ex 2018/2019) zur Durchführung der retrospektiven Analyse wurde am 02.04.2019 durch die Ethikkommission der Medizinischen Universität Graz erteilt. Es wurde seither durch jährliche Folgevoten verlängert und ist zum aktuellen Zeitpunkt gültig. Die Studienpopulation umfasste eine Kohorte von 400 Kniegelenken bei PatientInnen, die an der Universitätsklinik für Orthopädie und Traumatologie der Medizinischen Universität Graz aufgrund von Gonarthrose behandelt wurden und für die Implantation einer Knie-Totalendoprothese vorgesehen waren. Die Auswahl der PatientInnen erfolgte retrospektiv anhand definierter Ein- und Ausschlusskriterien. Für die Analyse wurden PatientInnen im Zeitraum von Oktober 2020 bis Dezember 2024 rekrutiert. Die Kriterien für den Einschluss waren das Vorhandensein der vollständigen demographischen Daten, wie Alter, Geschlecht und Body-Mass-Index, sowie der vollständigen radiologischen Messungen. Es wurden nur PatientInnen der österreichischen Population inkludiert. Notwendig war zusätzlich das Vorhandensein einer Gonarthrose, der Teil der Bevölkerung ohne Gonarthrose wurde in dieser Analyse nicht untersucht. PatientInnen mit bereits implantierter Knie-Totalendoprothese, unikondylärer Knieprothese, Korrekturosteotomie oder periartikulärer Fraktur derselben Extremität wurden exkludiert. Radiologische Aufnahmen mit unzureichender Qualität für akkurate Messungen wurden ebenfalls exkludiert.

### **2.2 Radiologische Datenerhebung**

Die 400 Röntgenaufnahmen wurden präoperativ und standardisiert im Zeitraum von Oktober 2020 bis Dezember 2024 durchgeführt. Es wurden anterior-posterior Beinachsenröntgen der

jeweiligen gesamten unteren Extremität aufgenommen. Der Zugriff auf die Röntgenaufnahmen erfolgte über das Patientenmanagementsystem der Universitätsklinik für Orthopädie und Traumatologie der Medizinischen Universität Graz. Die radiologischen Messungen wurden mithilfe des Picture Archiving and Communication Systems (PACS) durchgeführt und durch einen Beobachter auf den nächsten Grad genau gemessen. Auf jeder Röntgenaufnahme erfolgte die manuelle Messung des Medial Proximal Tibial Angle (MPTA) und des Lateral Distal Femoral Angle (LDFA). Die Abbildungen 8 und 9 zeigen die Veranschaulichung der durchgeführten Messungen. Der Arithmetic Hip Knee Ankle Angle (aHKA) und die Joint Line Obliquity (JLO) wurden rechnerisch ermittelt. Der aHKA errechnet sich aus der Differenz von MPTA und LDFA, die JLO aus der Addition von MPTA und LDFA (Abbildung 6). Der mechanische Hip Knee Ankle Angle (mHKA) wurde ebenfalls berechnet und deltaHKA als Differenz von aHKA und mHKA angegeben.



Abbildung 9: Lateral Distal Femoral Angle (LDFA)  
(eigene Aufnahme)



Abbildung 9: Medial Proximal Tibial Angle (MPTA)  
(eigene Aufnahme)

### 2.3 Statistische Analyse

Die für die Statistik verwendeten Variablen waren die CPAK-Phänotypen (I bis IX), der aHKA (Varus, Neutral und Valgus), die JLO (Apex Distal, Neutral und Apex Proximal), das

Geschlecht (männlich/weiblich), der Body-Mass-Index (kg/m<sup>2</sup>) und das Alter (kontinuierlich und in Gruppen eingeteilt: < 60, 60-70 und > 70 Jahren). Das Alignment wurde dichotomisiert in Varus-Ausrichtung (aHKA < 0°) oder Valgus-/Neutral-Ausrichtung (aHKA ≥ 0°). Eine weitere dichotome Variable wurde mit Valgus-Ausrichtung (aHKA > 0°) oder Varus-/Neutral-Ausrichtung (aHKA ≤ 0°) definiert. Die Datenerfassung erfolgte mit Microsoft Excel (Version 16.100) und die Datenanalyse wurde mit der Statistiksoftware R (R Foundation, Version 4.4.1.) durchgeführt. Die deskriptive Statistik umfasste das Minimum, das Maximum, den arithmetischen Mittelwert sowie die Standardabweichung (SD). Die Prüfung auf Normalverteilung erfolgte mit dem Shapiro-Wilk-Test. Der Zusammenhang von aHKA und den Geschlechtern wurde mit dem Welch's t-Test für zwei unabhängige Variable untersucht. Für die Assoziation von CPAK-Phänotyp und dem Geschlecht, beziehungsweise der Altersgruppe, wurden der Pearson's Chi<sup>2</sup>-Test sowie der Fisher's Exact-Test angewendet. Der Zusammenhang zwischen der Knieausrichtung (Varus, Valgus, Neutral) und den Altersgruppen (< 60, 60-70 und > 70 Jahren) wurde mit derselben Methode untersucht. Die logistische Regressionsanalyse wurde eingesetzt, um die Auswirkungen von Geschlecht, Alter und Body-Mass-Index auf die Varus-Ausrichtung versus Valgus-/Neutral-Ausrichtung (=Nicht-Varus-Ausrichtung) sowie auf die Valgus-Ausrichtung versus Varus-/Neutral-Ausrichtung (=Nicht-Valgus-Ausrichtung) zu untersuchen. Mithilfe der linearen Regressionsanalyse wurde die Vorhersage des aHKA mit den Prädiktoren Geschlecht, Alter, Body-Mass-Index und der Wechselwirkung zwischen Body-Mass-Index und Geschlecht analysiert. Zusätzlich wurden Analysen für geschlechtsspezifische Untergruppen durchgeführt. Der Einfluss von Geschlecht, Alter und Body-Mass-Index auf die CPAK-Phänotypen wurde mittels einer multinomialen logistischen Regressionsanalyse evaluiert. Die grafische Darstellung der Ergebnisse erfolgte unter anderem mithilfe von Stacked Bar Charts, Boxplots und Scatterplots. Die statistische Signifikanz wurde mit einem p-Wert von < 0,05 festgelegt. Da es sich um eine retrospektive konsekutive Analyse handelt, wurde im Vorhinein keine Bestimmung der Stichprobengröße durchgeführt. Die verfügbare Stichprobe (Gesamt: n = 400, Frauen: n = 266, Männer: n = 134;  $\alpha = 0,05$ , zweiseitig) wies eine Aussagekraft von 96,7 % auf, um den beobachteten Unterschied des aHKA zwischen den Geschlechtern (2,06°, gepoolte SD: 5,10°; Cohen's d: 0,40) festzustellen. Ein Unterschied von mindestens 1,76° wäre mit einer Aussagekraft von 90 % nachweisbar gewesen, ein Unterschied von mindestens 1,52° mit einer Aussagekraft von 80 %.

### 3 Ergebnisse

Die Analyse umfasste insgesamt 400 Kniegelenke von insgesamt 380 verschiedenen PatientInnen. Es wurden bei 20 PatientInnen beide Kniegelenke inkludiert und analysiert, da diese bilateral eine Knie-Totalendoprothese implantiert bekamen. 266 (66,5 %) der untersuchten Kniegelenke waren von weiblichen Patientinnen und 134 (33,5 %) von männlichen Patienten. Das mittlere Alter lag bei  $68,33 \pm 9,23$  Jahren und die PatientInnen waren zwischen 43 und 89 Jahren alt. Der mittlere Body-Mass-Index betrug  $30,39 \pm 5,52$  kg/m<sup>2</sup>, das Minimum lag bei 17,6 kg/m<sup>2</sup> und das Maximum lag bei 50,1 kg/m<sup>2</sup>.

	Mittelwert	Spannweite	SD	p-Wert
Alter – Gesamt (Jahre)	68,33	43-89	$\pm 9,23$	0,00416 (Mann-Whitney U)
Alter – Männer (Jahre)	66,59	46-89	$\pm 9,00$	
Alter – Frauen (Jahre)	69,21	43-89	$\pm 9,24$	
BMI - Gesamt (kg/m <sup>2</sup> )	30,39	17,6-50,1	$\pm 5,52$	0,05462 (Mann-Whitney U)
BMI - Männer (kg/m <sup>2</sup> )	29,69	19,57-46,71	$\pm 5,21$	
BMI – Frauen (kg/m <sup>2</sup> )	30,74	17,58-50,12	$\pm 5,65$	
LDFA – Gesamt (°)	87,80	76-99	$\pm 2,72$	0,00317 (Mann-Whitney U)
LDFA – Männer (°)	88,33	80-94	$\pm 2,72$	
LDFA - Frauen (°)	87,53	76-99	$\pm 3,17$	
MPTA – Gesamt (°)	87,77	73-99	$\pm 3,43$	< 0,001 (Mann-Whitney U)
MPTA – Männer (°)	86,93	73-95	$\pm 3,39$	
MPTA – Frauen (°)	88,20	80-99	$\pm 3,38$	
aHKA – Gesamt (°)	-0,03	-21-16	$\pm 5,19$	< 0,001 (Welch's t-Test)
aHKA – Männer (°)	-1,40	-21-11	$\pm 4,82$	
aHKA – Frauen (°)	0,67	-16-16	$\pm 5,24$	
JLO – Gesamt (°)	175,57	160-189	$\pm 3,90$	0,42144 (Mann-Whitney U)
JLO – Männer (°)	175,26	164-185	$\pm 3,82$	
JLO – Frauen (°)	175,73	160-189	$\pm 3,94$	

*Tabelle 2: Deskriptive Statistik der demographischen Daten der Studienpopulation*

In der beiliegenden Tabelle 2 wird die deskriptive Statistik der demographischen Daten sowohl von der gesamten Studienpopulation als auch geschlechtsspezifisch dargestellt. Die p-Werte des Mann–Whitney U Tests und Welch’s t-Tests beziehen sich jeweils auf die gesamte Studienpopulation. Der Mittelwert des aHKA der gesamten Studienpopulation mit einer leichten Varus-Tendenz betrug  $-0,03^\circ$ , bei einer Spannweite von  $-21^\circ$  bis  $16^\circ$ . Die aHKA-Werte waren bei den Frauen normalverteilt ( $p = 0,235$ ), wohingegen dies bei Männern nicht der Fall war ( $p = 0,002$ ). Der Mittelwert des aHKA bei Frauen betrug  $+0,67^\circ$  und der der bei Männern erfassten Werte  $-1,40^\circ$ . Der Unterschied des aHKA zwischen den Geschlechtern war statistisch signifikant (Welch’s t-Test:  $p < 0,001$ ). Sprich, das beobachtete Alignment war bei Männern in einer größeren Varus-Ausrichtung als bei Frauen. In Abbildung 10 wurde der Unterschied zwischen Frauen und Männern in einem Boxplot dargestellt.

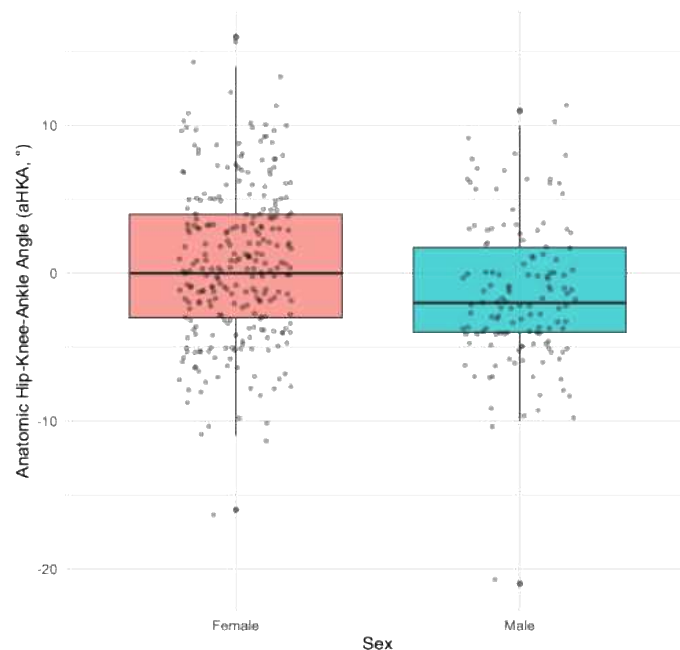


Abbildung 10: Verteilung des aHKA zwischen Frauen (links) und Männern (rechts) (56)

Die am häufigsten beobachteten CPAK-Phänotypen waren Phänotyp I und II (jeweils mit 21,75 %), gefolgt von VI (15,50 %), III (15,25 %), V (12,5 %) und IV (11,25 %). Die seltensten Ausprägungen waren VII (0,5 %), VIII (0,5 %) und IX (1,0 %). Die Tabelle 3 zeigt die absolute und die prozentuale Verteilung der Phänotypen sowohl für die gesamte Studienpopulation als auch geschlechterspezifisch.

CPAK-Phänotyp	Gesamt (n)	Gesamt (%)	Männer (n)	Männer (%)	Frauen (n)	Frauen (%)
I	87	21,75	40	29,85	47	17,67
II	87	21,75	29	21,64	58	21,80
III	61	15,25	11	8,21	50	18,80
IV	45	11,25	18	13,43	27	10,15
V	50	12,50	17	12,69	33	12,41
VI	62	15,50	17	12,69	45	16,92
VII	2	0,50	1	0,75	1	0,38
VIII	2	0,50	0	0,00	2	0,75
IX	4	1,00	1	0,75	3	1,13

Tabelle 3: Verteilung der CPAK-Phänotypen I-IX in der Studienpopulation

In Abbildung 11 zeigt der Scatterplot die Verteilung der CPAK-Phänotypen I-IX der gesamten Studienpopulation anhand von aHKA und JLO.

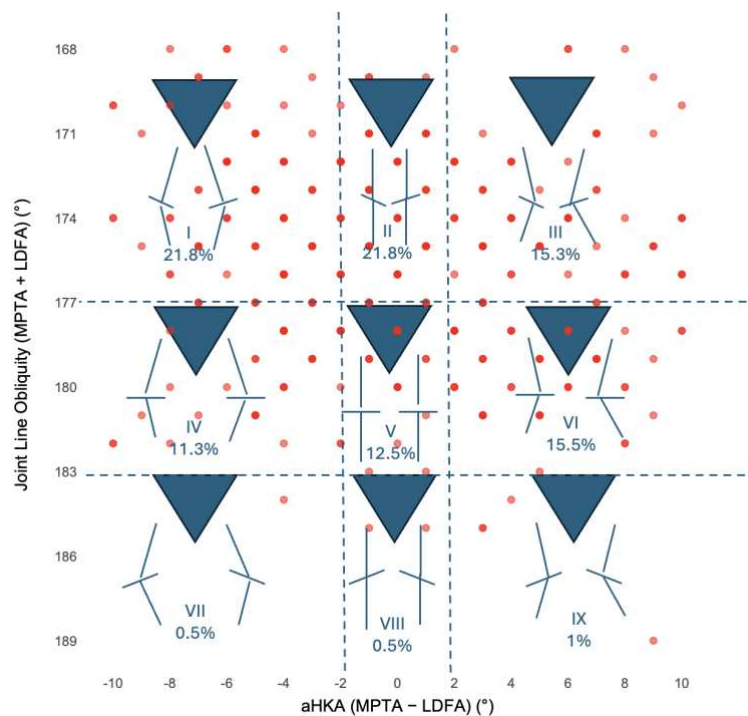


Abbildung 11: Verteilung der CPAK-Phänotypen I-IX (56)

Die vorliegende Analyse konnte keine signifikanten Unterschiede zwischen den Altersgruppen < 60, 60-70 und > 70 Jahren sowohl in Bezug auf den CPAK-Phänotypen (p

= 0,845) als auch auf die Varus-Ausrichtung versus Valgus-/Neutral-Ausrichtung ( $p = 0,173$ ) zeigen.

Der Pearson's Chi<sup>2</sup>-Test ( $p = 0,044$ ) und Fisher's Exact-Test ( $p = 0,023$ ) zeigten einen signifikanten Unterschied in der Verteilung der CPAK-Typen zwischen den Geschlechtern. Die Abbildung 12 zeigt als Stacked-Bar-Chart die prozentuale Verteilung der CPAK-Phänotypen nach Geschlecht.

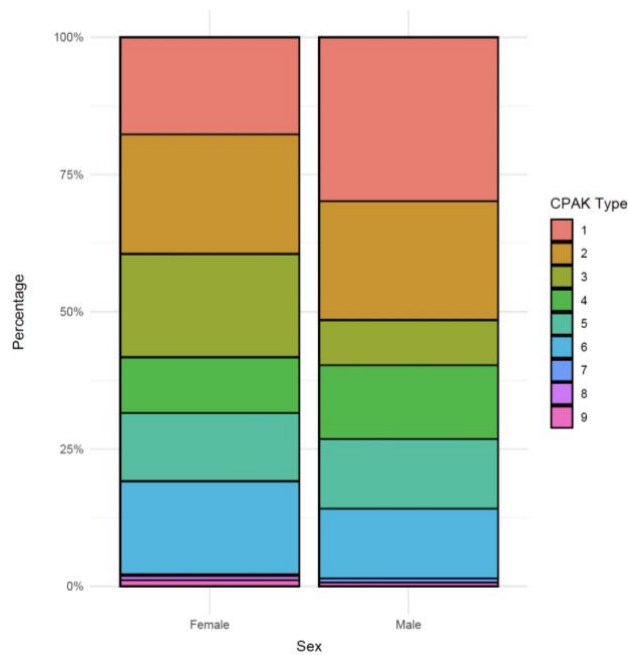


Abbildung 12: Geschlechterverteilung der CPAK-Phänotypen (56)

Des Weiteren wurde mithilfe der logistischen Regression die Vorhersage des Alignments untersucht. Hier zeigte sich das männliche Geschlecht als signifikanter Prädiktor für eine Varus-Ausrichtung ( $OR \approx 2,27$ ; 95 %-KI: 1,48–3,48;  $p < 0,001$ ) gegenüber einer Valgus-/Neutral-Ausrichtung. Der Body-Mass-Index zeigte in Bezug auf die Vorhersage des Alignments eine marginale Signifikanz ( $OR \approx 1,04$ ; 95 %-KI: 1,00–1,08;  $p = 0,053$ ). Das Alter konnte keinen statistisch signifikanten Zusammenhang aufzeigen. Für die Valgus-Ausrichtung zeigte das Geschlecht ebenfalls eine Signifikanz in Bezug auf die Vorhersage gegenüber einer Varus-/Neutral-Ausrichtung ( $OR \approx 0,40$ ; 95 %-KI: 0,25–0,63;  $p < 0,001$ ). Alter und Body-Mass-Index zeigten in diesem Modell keine Signifikanz.

In einem linearen Regressionsmodell wurde die Vorhersage des aHKA mit den Prädiktoren Body-Mass-Index, Geschlecht, Alter sowie der Interaktion Geschlecht mit Body-Mass-Index  $\times$  Geschlecht untersucht. Hier zeigten lediglich der Body-Mass-Index ( $p = 0,060$ ) und das Alter ( $p = 0,066$ ) einen marginalen Zusammenhang für die Vorhersage des aHKA. In

einem geschlechtsspezifischen linearen Modell war der Body-Mass-Index signifikant mit einer größeren Varus-Ausrichtung bei Männern ( $p = 0,033$ ) assoziiert, jedoch nicht bei Frauen.

In einem multinomialen logistischen Regressionsmodell mit den Prädiktoren Geschlecht, Alter und Body-Mass-Index zeigte das männliche Geschlecht einen signifikanten Prädiktor für die CPAK-Phänotypen III ( $p < 0,001$ ), VI ( $p = 0,017$ ) und VIII ( $p < 0,001$ ). Der Body-Mass-Index stellte einen marginalen Prädiktor für die Phänotypen III ( $p = 0,052$ ) und VIII ( $p = 0,050$ ) dar. Das Alter zeigte in diesem Modell keine Signifikanz als Prädiktor.

## 4 Diskussion

Diese retrospektive Analyse zeigt, nach unserem derzeitigen Wissensstand, die erste detaillierte Beschreibung des koronalen Alignments und der Verteilung der CPAK-Phänotypen in einer österreichischen osteoarthrotischen Population.

Die häufigsten Phänotypen der CPAK-Klassifikation in dieser Population waren I (21,75 %) und II (21,75 %), gefolgt von VI, III und V. Im internationalen Vergleich zu anderen Studienpopulationen zeigen sich hier große Ähnlichkeiten, obgleich es subtile Unterschiede gibt. Global gesehen zeigten sich in einer Metaanalyse mit 27604 untersuchten Kniegelenken ebenfalls die Phänotypen I (33,1 %) und II (25,9 %) am häufigsten in der osteoarthrotischen Bevölkerung. Auch auf Europa (n = 11663) bezogen waren in dieser Metaanalyse die Phänotypen I (29,2 %) und II (26 %) in der osteoarthrotischen Bevölkerung am weitesten verbreitet (20). Die Phänotypen VII-IX, die sich durch einen proximalen Apex der Joint Line Obliquity auszeichnen, waren in dieser österreichischen osteoarthrotischen Population in Summe mit 2 % am seltensten. Diese Beobachtung steht im Einklang mit den Ergebnissen anderer Populationen. Eine Analyse von 8739 osteoarthrotischen Kniegelenken zeigte, dass die Phänotypen VII-IX ebenfalls in nur 1,3 % der Fälle auftraten (57). Eine weitere wichtige Erkenntnis ist der signifikante geschlechtsspezifische Unterschied in der Verteilung der CPAK-Phänotypen, insbesondere in Bezug auf Männer mit Varus assoziierten Phänotypen. Diese Beobachtung zeigte sich bereits bei anderen Populationen (57). Die aHKA zeigte einen signifikanten Geschlechtsunterschied, der im Durchschnitt bei den Männern  $-1,40^\circ$  und bei den Frauen  $+0,67^\circ$  aufwies. Das bedeutet, dass Männer eine größere Varus-Ausrichtung zeigten als Frauen. Diese Beobachtung stimmt mit Studien aus verschiedenen geographisch gelegenen Bevölkerungsgruppen, wie zum Beispiel Japan, Türkei, Malaysia oder China (22,27,28,58), und auch verschiedenen Ethnien überein (59,60). Dieser geschlechtsspezifische Unterschied bleibt auch nach Bereinigung um Alter und Body-Mass-Index bestehen, was darauf hindeutet, dass hier wahrscheinlich anatomische geschlechtsspezifische Unterschiede in der Geometrie von *Femur* und *Tibia* zugrunde liegen.

Der Body-Mass-Index hat sich als geschlechtsspezifischer Prädiktor der Knieausrichtung herausgestellt. Bei Männern war ein höherer Body-Mass-Index mit einer stärkeren Varus-Stellung assoziiert, während bei Frauen kein signifikanter Zusammenhang nachgewiesen werden konnte. Ein höherer Body-Mass-Index wurde in weiteren Studien mit einer Varus-Stellung in Verbindung gebracht, insbesondere bei Männern (58,61). Ramazanian et al.

zeigten in einer Studie diese komplexen Beziehungen. Sie stellten fest, dass der aHKA bei Männern bei niedrigerem Body-Mass-Index in stärkerer Varus-Stellung eingestellt war als bei Frauen. Bei höherem Body-Mass-Index wurde bei Frauen, im Vergleich zu Männern, eine stärkere Varus-Stellung des aHKA beobachtet (62). Auch diese Beobachtungen waren ähnlich zu den Ergebnissen weiterer Studien (57,58,63). Die Widersprüchlichkeit dieser Berichte könnte auf Einschränkungen bezüglich der Stichprobengröße oder auf Unterschiede in der BMI-Verteilung zwischen den Studienpopulationen zurückzuführen sein (62,63).

In der vorliegenden Kohorte von Erwachsenen konnte kein Zusammenhang zwischen dem Alter und dem CPAK-Phänotyp festgestellt werden. Diese Beobachtung steht in Übereinstimmung mit den Ergebnissen vorangegangener Studien, die in der malaysischen und chinesischen Bevölkerung durchgeführt wurden (27,58). Diese Stabilität ab dem sechsten Lebensjahrzehnt steht im Gegensatz zu Längsschnittstudien, die eine fortschreitende Varus-Abweichung mit zunehmendem Alter berichten. Dies deutet darauf hin, dass solche Veränderungen möglicherweise früher im Leben auftreten oder durch osteoarthrotische Deformitäten im fortgeschrittenen Alter verdeckt werden. Eine ähnliche Stabilität wurde in anderen Querschnittsanalysen älterer Bevölkerungsgruppen beobachtet, was die Ansicht stützt, dass die koronale Ausrichtung im späteren Erwachsenenalter relativ konstant ist (64–66).

Für die klinische Praxis liefern diese Ergebnisse wertvolle regionale Referenzdaten für die präoperative Planung bei Knie-Totalendoprothesen (19,47,49). ChirurgInnen, die eine kinematische Ausrichtung anwenden, können die Erkenntnis, dass österreichische Männer häufiger Varus-Morphotypen und bestimmte CPAK-Typen aufweisen, als Orientierung für die Implantat-Positionierung und das damit einhergehende Gleichgewicht der Bandstabilität nutzen (19,47). Bei Männern mit erhöhtem Body-Mass-Index kann das Bewusstsein für die Möglichkeit einer stärkeren Varus-Ausrichtung ebenfalls die chirurgische Entscheidung beeinflussen. Zudem zeigte MacDessi et al., dass über alle CPAK-Phänotypen hinweg ein größerer Anteil der Knie-Totalendoprothesen mit kinematischem Alignment im Vergleich zu mechanischem Alignment ein optimaleres Gleichgewicht erreichten, wobei dieser Effekt bei Varus-Phänotypen (CPAK-Typen I, II und IV) am größten war (1).

## 4.1 Stärken und Limitationen

Die retrospektive Analyse profitiert von der relativ großen und gut charakterisierten Stichprobe mit klar definierten Ein- und Ausschlusskriterien. Des Weiteren profitiert sie von der Einbeziehung von vollständigem radiologischem Bildmaterial und der Anwendung von sowohl univariablen als auch multivariablen statistischen Analysen. Zudem bietet die Verwendung der CPAK-Klassifikation, im Vergleich zu der herkömmlich verwendeten Klassifikation in Varus, Neutral und Valgus, eine größere Aussagekraft und ermöglicht einen präzisen Vergleich mit internationalen Studienkohorten.

Nichtsdestotrotz sollten gegebene Einschränkungen berücksichtigt werden. Erstens wurden die retrospektive Rekrutierung und das Einbeziehen der Studienpopulation aus einer einzigen österreichischen Region, ohne Analyse des ethnischen Hintergrundes durchgeführt. Die Übertragung auf andere Regionen und ethnische Gruppen kann dadurch eingeschränkt sein. Zweitens wurde lediglich eine Kohorte mit Osteoarthritis untersucht, ohne Vergleich mit einer gesunden Studienpopulation. Drittens können die CPAK-Verteilung und die Ausrichtung des Kniegelenkes von funktionellen Ergebnissen, dem Grad der Arthritis, der Gelenkstabilität und der Weichteilspannung beeinflusst werden. Diese Faktoren wurden hier jedoch nicht mituntersucht. Viertens wurden die radiologischen Messungen unter statischen Bedingungen und unter Belastung durchgeführt und geben möglicherweise nicht vollständig die dynamische Ausrichtung während des Gehens wieder. Auch Rotationsfehlstellungen in der Bildgebung, wie femorale oder tibiale Torsion, wurden nicht bewertet und können radiologische Messfehler der koronalen Ausrichtung zur Folge haben. Fünftens lässt das Studiendesign keine Rückschlüsse auf kausale Zusammenhänge zwischen Body-Mass-Index, Alter und koronaler Ausrichtung zu. Sechstens lässt das Studiendesign auch keine Rückschlüsse bezüglich der Auswahl der chirurgischen Strategie der Knie-Totalendoprothese zwischen mechanischem oder kinematischem Alignment zu.

## 4.2 Fazit

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die österreichische Population geschlechtsspezifische Unterschiede in der koronalen Ausrichtung und Verteilung der CPAK-Phänotypen aufweist. Männer zeigen häufiger bestimmte CPAK-Phänotypen und eine größere Varus-Ausrichtung als Frauen. Der Body-Mass-Index ist ausschließlich bei der männlichen Population mit einer größeren Varus-Ausrichtung assoziiert. Das Alter zeigt keinen signifikanten Einfluss auf die koronale Ausrichtung bei Erwachsenen. Die

Ergebnisse liefern die ersten regionsspezifischen Referenzdaten für eine österreichische osteoarthrotische Population, welche zu einem besseren Verständnis der Verteilung der koronalen Knieausrichtung beitragen und zum Vergleich mit anderen Populationen herangezogen werden können. Zudem können die Ergebnisse individualisierte Ausrichtungsstrategien bei der Implantation von Knie-Totalendoprothesen unterstützen.

## Literaturverzeichnis

1. MacDessi SJ, Griffiths-Jones W, Harris IA, Bellemans J, Chen DB. Coronal Plane Alignment of the Knee (CPAK) classification a new system for describing knee phenotypes. *Bone and Joint Journal*. 2021 Feb 1;103 B(2):329–37.
2. Healthcare Quality Improvement Partnership. National joint Registry for England, Wales, Northern Ireland and the Isle of man. 15th annual report. 2018. <https://www.hqip.org.uk/resource/national-joint-registry-15th-annual-report-2018/#.XnQemC1L00o> (date last accessed 15 January 2019).
3. Australian Orthopaedic Association National Joint Replacement Registry (AOANJRR). Hip, knee & shoulder arthroplasty: 2019 Annual Report. AOA: Adelaide. 2019. <https://aoanjrr.sahmri.com/documents/10180/668596/Hip%2C+Knee+%26+Shoulder+Arthroplasty/c287d2a3-22df-a3bb-37a2-91e6c00bfcf0>.
4. Evans JT, Walker RW, Evans JP, Blom AW, Sayers A, Whitehouse MR. How long does a knee replacement last? A systematic review and meta-analysis of case series and national registry reports with more than 15 years of follow-up. *Lancet*. 2019;393(10172):655–663.
5. Hutt JRB, LeBlanc M- A, Massé V, Lavigne M, Vendittoli P- A. Kinematic TKA using navigation: surgical technique and initial results. *Orthop Traumatol Surg Res*. 2016;102(1):99–104.
6. Dossett HG, Estrada NA, Swartz GJ, LeFevre GW, Kwasman BG. A randomised controlled trial of kinematically and mechanically aligned total knee replacements: two-year clinical results. *Bone Joint J*. 2014;96- B(7):907–913.
7. Calliess T, Bauer K, Stukenborg- Colsman C, Windhagen H, Budde S, Ettinger M. Psi kinematic versus non- PSI mechanical alignment in total knee arthroplasty: a prospective, randomized study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2017;25(6):1743–1748.
8. MacDessi SJ, Griffiths- Jones W, Chen DB, et al. Restoring the constitutional alignment with a restrictive kinematic protocol improves quantitative soft-tissue balance in total knee arthroplasty: a randomized controlled trial. *Bone Joint J*. 2020;102- B(1):117–124.
9. Howell SM, Howell SJ, Kuznik KT, Cohen J, Hull ML. Does a kinematically aligned total knee arthroplasty restore function without failure regardless of alignment category? *Clin Orthop Relat Res*. 2013;471(3):1000–1007.

10. Blakeney W, Clément J, Desmeules F, Hagemester N, Rivière C, Vendittoli P- A. Kinematic alignment in total knee arthroplasty better reproduces normal gait than mechanical alignment. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2019;27(5):1410–1417.
11. Maderbacher G, Keshmiri A, Krieg B, Greimel F, Grifka J, Baier C. Kinematic component alignment in total knee arthroplasty leads to better restoration of natural tibiofemoral kinematics compared to mechanic alignment. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2019;27(5):1427–1433.
12. Niki Y, Nagura T, Nagai K, Kobayashi S, Harato K. Kinematically aligned total knee arthroplasty reduces knee adduction moment more than mechanically aligned total knee arthroplasty. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2018;26(6):1629–1635.
13. Howell SM, Papadopoulos S, Kuznik KT, Hull ML. Accurate alignment and high function after kinematically aligned TKA performed with generic instruments. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2013;21(10):2271–2280.
14. Almaawi AM, Hutt JRB, Masse V, Lavigne M, Vendittoli P- A. The impact of mechanical and restricted kinematic alignment on knee anatomy in total knee arthroplasty. *J Arthroplasty.* 2017;32(7):2133–2140.
15. McEwen P, Balendra G, Doma K. Medial and lateral gap laxity differential in computer- assisted kinematic total knee arthroplasty. *Bone Joint J.* 2019;101-B(3):331–339.
16. Waterson HB, Clement ND, Eyres KS, Mandalia VI, Toms AD. The early outcome of kinematic versus mechanical alignment in total knee arthroplasty: a prospective randomised control trial. *Bone Joint J.* 2016;98- B(10):1360–1368.
17. Young SW, Walker ML, Bayan A, Briant- Evans T, Pavlou P, Farrington B. The Chitranjan S. Ranawat Award : No difference in 2- year functional outcomes using kinematic versus mechanical alignment in TKA: A randomized controlled clinical trial. *Clin Orthop Relat Res.* 2017;475(1):9–20.
18. MacDessi SJ, Griffiths-Jones W, Harris IA, Bellemans J, Chen DB. The arithmetic HKA (aHKA) predicts the constitutional alignment of the arthritic knee compared to the normal contralateral knee. *Bone Jt Open.* 2020 Jul 1;1(7):339–45.
19. Victor JMK, Bassens D, Bellemans J, Gürsu S, Dhollander AAM, Verdonk PCM. Constitutional varus does not affect joint line orientation in the coronal plane. *Clin Orthop Relat Res.* 2014;472(1):98–104.

20. Giurazza G, Tanzilli A, Franceschetti E, Campi S, Gregori P, Parisi FR, et al. Coronal plane alignment of the knee phenotypes distribution varies significantly as a function of geographic, osteoarthritic and sex-related factors: A systematic review and meta-analysis. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. 2025 Oct 19;33(10):3592–605.
21. Digennaro V, Cecchin D, Villari E, Panciera A, Ferri R, Benvenuti L, et al. Distribution of knee alignment in the Italian arthritic population based on the CPAK classification. *Knee*. 2025 Oct;56:276–84.
22. Şenel A, Eren M, Sert S, Gürpınar T, Çarkçı E, Polat B. Phenotyping of the Turkish population according to Coronal Plane Alignment of the Knee classification: A retrospective cross-sectional study. *Jt Dis Relat Surg*. 2024 Jan 1;35(1):194–201.
23. León-Muñoz VJ, Hurtado-Avilés J, López-López M, Santonja-Medina F, Moya-Angeler J. The Distribution of Coronal Plane Alignment of the Knee Classification in a Sample of Spanish Southeast Osteoarthritic Population: A Retrospective Cross-Sectional Observational Study. *Medicina (Lithuania)*. 2024 Oct 1;60(10).
24. Dragosloveanu S, Capitanu BS, Josanu R, Vulpe D, Cergan R, Scheau C. Radiological Assessment of Coronal Plane Alignment of the Knee Phenotypes in the Romanian Population. *J Clin Med*. 2024 Jul 19;13(14).
25. Gao YH, Qi YM, Huang PH, Zhao XY, Qi X. Distribution of coronal plane alignment of the knee classification in Chinese osteoarthritic and healthy population: a retrospective cross-sectional observational study. *Int J Surg*. 2024 May 1;110(5):2583–92.
26. Rahman A, Lee M, Tan L, Wong S, Saturnino M, Purnomo G, et al. Coronal Plane Alignment of the Knee (CPAK) distribution in a diverse Asian population: Influence of ethnicity, sex and bilaterality. *J Exp Orthop [Internet]*. 2025 Apr 1 [cited 2025 Aug 6];12(2):e70192. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/40170705>
27. Wong WK, Abu Bakar Sajak A, Chua H Sen. The distribution of Coronal Plane Alignment of the Knee (CPAK) phenotypes in the Malaysian population and their correlation with demographic variables. *Arthroplasty (London, England) [Internet]*. 2024 Dec 4 [cited 2025 Aug 6];6(1):60. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/39627902>
28. Kubota M, Kaneko H, Yoshida K, Hada S, Kim Y, Shiozawa J, et al. The coronal plane alignment of the knee classification of a Japanese population indicates more

- varus deformity tendency compared with European countries. *Knee*. 2025 Mar;53:246–54.
29. Aust G, Engele J, Kirsch J, Mayerhofer A, Mense S, Salvetter J, et al. *Duale Reihe Anatomie*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2025.
  30. Schünke M, Schulte E, Schumacher U, Voll M, Wesker KH, editors. *PROMETHEUS Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2022.
  31. Waschke J., Paulsen Friedrich. Sobotta, *Atlas der Anatomie*. Band 1, *Allgemeine Anatomie und Bewegungsapparat*. Urban & Fischer; 2022.
  32. Ficklscherer Andreas, Weidert Simon. *Kurzlehrbuch Orthopädie und Unfallchirurgie*. Urban & Fischer; 2024.
  33. Niethard FU, Pfeil J, Biberthaler P, editors. *Duale Reihe Orthopädie und Unfallchirurgie*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2022.
  34. Breusch Steffen, Clarius Michael, Mau Hans, Sabo Desiderius. *Orthopädie Unfallchirurgie*. Elsevier; 2023.
  35. Sharma L. Osteoarthritis of the Knee. *New England Journal of Medicine*. 2021 Jan 7;384(1):51–9.
  36. Deutsche Gesellschaft für Orthopädie und Unfallchirurgie (DGOU). *S3-Leitlinie: Gonarthrose – Prävention, Diagnostik und Therapie*. AWMF-Register Nr. 187-050. Version 2025-05. Berlin: AWMF; 2025.
  37. Juhl C, Christensen R, Roos EM, Zhang W, Lund H. Impact of exercise type and dose on pain and disability in knee osteoarthritis: a systematic review and meta-regression analysis of randomized controlled trials. *Arthritis Rheumatol* 2014; 66: 622-36.
  38. Fransen M, McConnell S, Harmer AR, Van der Esch M, Simic M, Bennell KL. Exercise for osteoarthritis of the knee. *Cochrane Database Syst Rev* 2015; 1: CD004376.
  39. Kolasinski SL, Neogi T, Hochberg MC, et al. 2019 American College of Rheumatology/Arthritis Foundation guideline for the management of osteoarthritis of the hand, hip, and knee. *Arthritis Rheumatol* 2020; 72: 220-33.
  40. Bannuru RR, Osani MC, Vaysbrot EE, et al. OARSI guidelines for the non-surgical management of knee, hip, and polyarticular osteoarthritis. *Osteoarthritis Cartilage* 2019; 27: 1578-89.

41. Dixon KE, Keefe FJ, Scipio CD, Perri LM, Abernethy AP. Psychological interventions for arthritis pain management in adults: a meta-analysis. *Health Psychol* 2007; 26: 241-50.
42. McAlindon TE, LaValley MP, Harvey WF, et al. Effect of intra-articular triamcinolone vs saline on knee cartilage volume and pain in patients with knee osteoarthritis: a randomized clinical trial. *JAMA* 2017; 317: 1967-75.
43. Rutjes AWS, Jüni P, da Costa BR, Trelle S, Nüesch E, Reichenbach S. Viscosupplementation for osteoarthritis of the knee: a systematic review and meta-analysis. *Ann Intern Med* 2012; 157: 180-91.
44. Shan L, Shan B, Suzuki A, Nouh F, Saxena A. Intermediate and long-term quality of life after total knee replacement: a systematic review and meta-analysis. *J Bone Joint Surg Am* 2015; 97: 156-68.
45. Deutsche Gesellschaft für Orthopädie und Unfallchirurgie (DGOU), Deutsche Gesellschaft für Endoprothetik (AE). S2k-Leitlinie „Indikation Knieendoprothese“. Version 2023-03. AWMF-Register Nr. 187-004. Dresden: ZEGV / AWMF; 2023.
46. Hadi M, Barlow T, Ahmed I, Dunbar M, McCulloch P, Griffin D. Does malalignment affect revision rate in total knee replacements: a systematic review of the literature. *Springerplus*. 2015;4:835.
47. Cooke D, Scudamore A, Li J, Wyss U, Bryant T, Costigan P. Axial lower-limb alignment: comparison of knee geometry in normal volunteers and osteoarthritis patients. *Osteoarthritis Cartilage*. 1997;5(1):39–47.
48. Bellemans J, Colyn W, Vandenuecker 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.
49. Lin Y- H, Chang F- S, Chen K- H, Huang K- C, Su K- C. Mismatch between femur and tibia coronal alignment in the knee joint: classification of five lower limb types according to femoral and tibial mechanical alignment. *BMC Musculoskelet Disord*. 2018;19(1):411.
50. Moreland JR, Bassett LW, Hanker GJ. Radiographic analysis of the axial alignment of the lower extremity. *J Bone Joint Surg Am*. 1987;69(5):745–749.
51. Hirschmann MT, Hess S, Behrend H, Amsler F, Leclercq V, Moser LB. Phenotyping of hip- knee- ankle angle in young non-osteoarthritic knees provides better

- understanding of native alignment variability. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2019;27(5):1378–1384.
52. Blakeney W, Beaulieu Y, Kiss M- O, Rivière C, Vendittoli P- A. Less gap imbalance with restricted kinematic alignment than with mechanically aligned total knee arthroplasty: simulations on 3- D bone models created from CT- scans. *Acta Orthop.* 2019;90(6):602–609.
  53. Blakeney W, Beaulieu Y, Puliero B, Kiss M- O, Vendittoli P- A. Bone resection for mechanically aligned total knee arthroplasty creates frequent gap modifications and imbalances. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2020;28(5):1532–1541.
  54. Howell SM, Kuznik K, Hull ML, Siston RA. Results of an initial experience with custom- fit positioning total knee arthroplasty in a series of 48 patients. *Orthopedics.* 2008;31(9):857–863.
  55. Cerejo R, Dunlop DD, Cahue S, Channin D, Song J, Sharma L. The influence of alignment on risk of knee osteoarthritis progression according to baseline stage of disease. *Arthritis Rheum.* 2002;46(10):2632–2636.
  56. Koutp A, Schieder P, Fetz C, Schroedter R, Leitner L, Leithner A, et al. Sex-specific differences in coronal knee alignment and CPAK distribution in an Austrian population. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2025 Nov 24;145(1):512.
  57. Huber S, Mitterer JA, Vallant SM, Simon S, Hanak-Hammerl F, Schwarz GM, et al. Gender-specific distribution of knee morphology according to CPAK and functional phenotype classification: analysis of 8739 osteoarthritic knees prior to total knee arthroplasty using artificial intelligence. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy.* 2023 Oct 8;31(10):4220–30.
  58. Li S, Chen X, Liu S, Xu H, Yu Y, Li S, et al. Gender, BMI, and Age-Related Variations in Lower Limb Alignment Parameters and CPAK Phenotypes in Chinese Patients with Knee Osteoarthritis. *Orthop Surg.* 2024 Dec 2;16(12):3098–106.
  59. Shultz SJ, Nguyen AD, Schutz RJ. Differences in Lower Extremity Anatomical and Postural Characteristics in Males and Females Between Maturation Groups. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy.* 2008 Mar;38(3):137–49.
  60. Medina McKeon JM, Hertel J. Sex Differences and Representative Values for 6 Lower Extremity Alignment Measures. *J Athl Train.* 2009 May;44(3):249–55.

61. Sanghi D, Srivastava RN, Singh A, Kumari R, Mishra R, Mishra A. The association of anthropometric measures and osteoarthritis knee in non-obese subjects: a cross sectional study. *Clinics*. 2011 Jan;66(2):275–9.
62. Ramazanian T, Yan S, Rouzrokh P, Wyles CC, O Byrne TJ, Taunton MJ, et al. Distribution and Correlates of Hip-Knee-Ankle Angle in Early Osteoarthritis and Preoperative Total Knee Arthroplasty Patients. *J Arthroplasty*. 2022 Jun;37(6):S170–5.
63. Nicolella DP, O'Connor MI, Enoka RM, Boyan BD, Hart DA, Resnick E, et al. Mechanical contributors to sex differences in idiopathic knee osteoarthritis. *Biol Sex Differ*. 2012;3(1):28.
64. Kim SE, MacDessi S, Song D, Kim J Il, Choi BS, Han HS, et al. Coronal Plane Alignment of the Knee (CPAK) Type Shifts Toward Constitutional Varus with Increasing Kellgren and Lawrence Grade. *Journal of Bone and Joint Surgery*. 2025 Feb 5;107(3):297–303.
65. Zhai G, Ding C, Cicuttini F, Jones G. A longitudinal study of the association between knee alignment and change in cartilage volume and chondral defects in a largely non-osteoarthritic population. *J Rheumatol*. 2007 Jan;34(1):181–6.
66. Harada K, Mori Y, Kamimura M, Aki T, Koyama T, Aizawa T. Impact of Aging and Knee Osteoarthritis on Lower Limb Alignment and CPAK Classification: Gender Differences in a Japanese Cohort. *J Clin Med*. 2024 Oct 19;13(20):6250.