

F. Unfallchirurgie (I)

Donnerstag, 23. April 1987

a) Therapie der Meniscusschäden

38. Anatomie und Biomechanik des Kniegelenksmeniscus

B. Kummer

Anatomisches Institut der Universität, Joseph-Stelzmann-Straße 9, D-5000 Köln 41

Anatomy and Biomechanics of the Menisci

Summary. The menisci enlarge the weight-bearing surface to an extension twice of the pure contact surface between the femur condyles and the tibia plateau. Furthermore they widen the range of the articular resultant force. Consequently, the balancing muscular forces can be implemented more economically. The menisci are adapted to their functional stressing: circular tension is resisted by circularly arranged collagen fiber bundles. Split lines, however, show a more complex arrangement.

Key words: Knee joint – Menisci.

Zusammenfassung. Die Menisci vergrößern nicht nur die Tragfläche des Kniegelenks im Vergleich zur reinen Kontaktfläche zwischen Femurkondylen und Tibiaplateau auf das Doppelte, sondern sie erweitern auch den Spielraum der Gelenksresultierenden beträchtlich. Folglich können die das Gleichgewicht herstellenden Muskeln ökonomischer eingesetzt und die Kreuzbänder entlastet werden. Die Menisci bestehen aus dicken Kollagenfaserbündeln, die – an die mechanische Beanspruchung angepaßt – zirkulär orientiert sind. Das Spaltlinienbild zeigt jedoch eine kompliziertere Struktur.

Schlüsselwörter: Kniegelenk – Menisci.

Die Bewegungen im Kniegelenk werden durch den Kreuzbandapparat geführt und die daraus resultierende Bewegungsbahn des Tibiaplateaus bestimmt wiederum die Kontur der Femurkondylen [1, 2, 5, 6]. Diese Kinematik ist durch die Eigenschaften des „überschlagenen Gelenkvierecks“ festgelegt. Das gleiche technische Modell macht auch klar, daß die beiden artikulierenden Flächen – Femurkondylen auf der einen und Tibiaplateau auf der anderen Seite – in keiner Gelenkstellung kongruent sein können, sondern daß sie sich stets nur in einem sehr kleinen Bereich berühren (Abb. 1).

Diese kleine Kontaktfläche würde bei gegebener Last eine relativ hohe Beanspruchung erfahren, die durch Zwischenschaltung der Menisci in etwa auf die Hälfte reduziert wird (vgl. Abb. 2 und [4]). Doch die Menisci vergrößern nicht nur die Lastaufnahme- fläche, sondern sie ermöglichen zugleich einen erheblich größeren Spielraum für die Kniegelenksresultierende (Abb. 3).

Die Gelenksresultierende ist die vektorielle Summe aus allen am Gelenk angreifenden Muskeln und dem zu tragenden Körpergewicht (oder Teilgewicht). Wenn am Gelenk

$w_s = 50$ $i = 10$
 $a = 180$ $p = 170$
 $f = 90$ $t = 200$

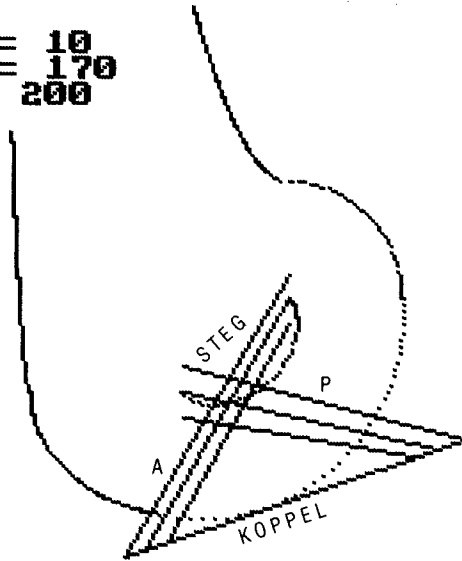
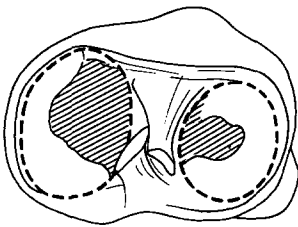


Abb. 1. Computermodell des distalen Femurendes mit Kreuzbandapparat. Zugrundegelegt wird der Mechanismus des „überschlagenen Gelenkvierecks“ [1, 2, 5, 6]. Der „Steg“ ist der femorale Knochenabschnitt, an dem die beiden Kreuzbänder entspringen, die „Koppel“ entspricht dem Tibiaplateau zwischen den Kreuzbandansätzen. Die Kondylenkontur ergibt sich dann als jene Kurve, die von der Koppel in allen denkbaren Gelenkstellungen tangiert wird: „Koppelhüllkurve“. Dabei wird vorausgesetzt, daß in allen Stellungen zumindest Teile jedes Kreuzbandes völlig gestreckt sind. Die Buchstabenbezeichnungen bedeuten: *A*, vorderes Kreuzband; *a*, relative Länge des vorderen Kreuzbandes; *f*, relative Länge des Stegs (Abstand der beiden mittleren Kreuzbandfasern); *i*, im Bild dargestellte Beugstellung der Koppel (Anzahl der bis dahin berechneten Positionen); *P*, hinteres Kreuzband; *p*, relative Länge des hinteren Kreuzbandes; *t*, relative Länge der Koppel (Abstand der beiden mittleren Kreuzbandfasern); w_s , Neigungswinkel des Stegs gegen die Vertikale



KONTAKTFLÄCHE
 ohne Menisci: 40-50%
 der normalen
 Kontaktfläche!

Abb. 2. Vergleich der kraftübertragenden Fläche des intakten Kniegelenks (*gestrichelte Kontur*) mit der Tragfläche nach Meniscektomie (*schraffierte Fläche*)

Gleichgewicht herrschen soll, dann muß ihr Drehmoment null sein, d. h. sie verläuft durch das momentane Drehzentrum des Gelenks. Außerdem muß die Resultierende genau rechtwinklig auf die Gelenkfläche auftreffen, da die Gelenkpartner sich nur dann in Ruhe befinden, wenn keine Tangentialkräfte (Schubkräfte) zwischen ihnen wirksam sind.

Abbildung 4 zeigt, daß eine Gelenksresultierende, die gegen den dem Meniscus zugehörigen Teil des Meniscofemoralgelenks gerichtet ist, nur durch eine zusätzliche Muskelkraft oder (wie im Bild dargestellt) durch die Spannung eines Kreuzbandes in die meniscusfreie Gelenkfläche gelenkt werden kann. Dies geschieht nach Meniscektomie. Dabei werden dann in erster Linie die Kreuzbänder beansprucht und zwar bei einer nach vorn gerichteten Gelenksresultierenden (Abb. 4) das hintere und bei einer nach hinten gerichteten Resultierenden das vordere Kreuzband. Zusätzliche Muskelkräfte können die Kreuz-

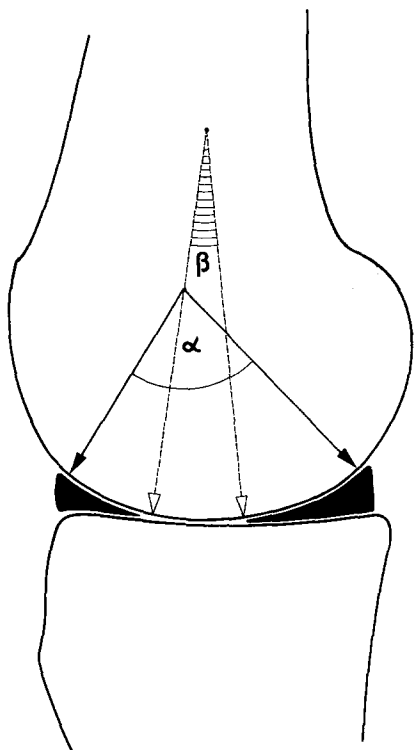


Abb. 3. Möglicher Verkehrsraum der Kniegelenksresultierenden bei intakten Menischi (Winkel α) und nach Menishektomie (Winkel β)

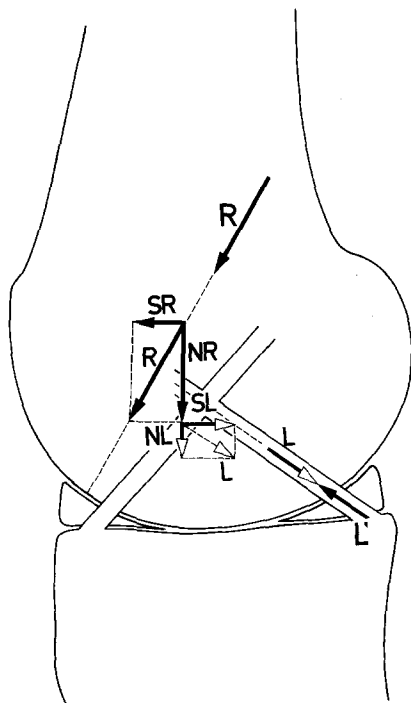


Abb. 4. Korrektur der nach vorn gerichteten Kniegelenksresultierenden bei fehlendem Meniscus durch das hintere Kreuzband. Die Buchstabenbezeichnungen bedeuten: L , Spannung des hinteren Kreuzbands; L' , Zug des hinteren Kreuzbands an der Tibia (Gegenkraft zu L); NL , vertikale (Normal-)Komponente von L ; NR , Normalkomponente von R ; R , Kniegelenksresultierende; SL , horizontale (Schub-)Komponente von L ; SR , Schubkomponente von R . Bei fehlendem Meniscus findet die Kraft R in ihrer ursprünglichen Richtung keine zu ihr normal gestellte Gelenkfläche (Meniscus) vor, sie muß daher durch eine Zusatzkraft (Bandspannung L) senkrecht gegen das Tibiaplateau gelenkt werden. Die Gesamtbelastung des Tibiaplateaus beträgt nun $NR + NL$. Diese Summe ist größer als R .

bänder entlasten. Der *M. quadriceps femoris* kann beispielsweise die Beanspruchung des hinteren Kreuzbandes herabsetzen.

In jedem Fall vergrößert aber die zusätzlich einzubringende Kraft die Gelenksresultierende. Dies trägt zur weiteren Erhöhung der Gelenkbeanspruchung bei, die wegen der Reduzierung der Tragfläche bei fehlenden Menisci ohnehin beträchtlich angestiegen ist. Daraus wird verständlich, daß eine Überbeanspruchung des Gelenkknorpels und die daraus resultierende Arthrose nach Menisektomie praktisch unumgänglich sind.

Die vom Femurkondylus auf den Meniscus übertragenen Normalkräfte treffen auf das Meniscotibialgelenk unter einem schiefen Winkel auf, denn wegen des keilförmigen Querschnitts des Meniscus sind die Gelenkflächen von Meniscofemoral- und Meniscotibialgelenk gegeneinander geneigt (vgl. Abb. 5). Doch auch im Meniscotibialgelenk können ausschließlich Normalkräfte übertragen werden. Deswegen sind hier die schräg zur tibialen Oberfläche gerichteten Teilkkräfte P_i je in eine Normalkomponente N_i und eine Tangentialkomponente T_i zu zerlegen. Der auf die Tibia wirkende Druck besteht in der Summe aller Normalkräfte. Aus der Kräftezerlegung in Abb. 5 läßt sich leicht erkennen, daß die Normalkraft N_i auf dem Tibiaplateau stets kleiner ist als die auf den Meniscus übertragene Teilkraft P_i . Die Differenz erscheint als Tangentialkraft T_i , die den Meniscus zentrifugal nach außen zu schieben trachtet. Wegen der Fesselung seiner beiden Hörner an das Tibiaplateau kann der Meniscus dieser Verschiebungstendenz nicht nachgeben, denn dabei müßte entweder der Krümmungsbogen geöffnet oder der Ring geweitet werden. Dadurch entstehen im Gewebe des Meniscus zirkuläre Spannungen (Abb. 6), die zur Ausbildung derber, vornehmlich zirkulär orientierter Kollagenfaserbündel führen. Diese Faserbündel lassen sich an histologischen Flachschnitten im polarisierten Licht deutlich nachweisen. Sie sind am Außenrand besonders dicht, untereinander parallel und eindeutig zirkulär ausgerichtet. Im mittleren Bereich des Meniscus sind sie vielfach zopfartig verflochten, jedoch immer noch hauptsächlich zirkulär, und nahe dem Innenrand erscheint ihre Struktur im histologischen Schnitt aufgelockert, netzartig und nicht mehr so eindeutig zirkulär orientiert.

Das am vollständigen Meniscus gewonnene Spaltlinienbild, das als Äquivalent der Faserarchitektur anzusehen ist, spiegelt das im histologischen Flachschnitt erkennbare Muster nur bedingt wider. Lediglich in der Nähe des Außenrandes verlaufen auch die Spaltlinien zirkulär und untereinander parallel; in der mittleren Zone und nahe dem Innenrand, vor allem im Bereich der Hinterhörner beider Menisci wird das Spaltlinienmuster jedoch komplizierter und läßt verschiedene singuläre Punkte erkennen [8]. Nach seinem histologischen Bau erscheint der Meniscus in erster Linie als ein derb kollagenfaseriges Gebilde. Vor allem in der mittleren Zone findet man zwischen den groben Kollagenfaserbündeln vereinzelt eingesprengte Chondrone. Ihr Vorkommen ist nicht häufiger als in den über ein Hypomochlion laufenden „Gleitsehnen“ (vgl. z. B. [7, 9, 10]), so daß es zweifelhaft erscheint, ob man diese Gewebskombination mit Berechtigung „Faserknorpel“ nennen darf.

An der konvexen Außenkontur beider Menisci ziehen aus ihnen über die Zirkumferenz des Tibiaplateaus kräftige Kollagenfasern distalwärts in die Gelenkkapsel. Hier liegt die Kapsel dem Tibiakopf eng an. Der Oberrand der Außenkontur ist dagegen durch einen deutlich ausgeprägten Graben gegenüber der Kapsel abgesetzt. In dieser Spalte findet man im histologischen Schnitt zahlreiche Synovialzotten. Der Spalt fehlt allerdings am Innenmeniscus in jenem Bereich der Konvexität, der dem inneren Collateralband anliegt. Jedoch auch an dieser Stelle ist die äußere Zirkumferenz des Innenmeniscus mit der fibrösen Kapsel lediglich durch lockeres Bindegewebe verbunden. Kräftige Kollagenfaserzüge, die den Meniscus an das mediale Collateralband fesseln könnten, wurden in den histologischen Präparaten nicht beobachtet.

Auf Radiärschnitten sieht man bei beiden Menisci zwischen ihrem Außenrand und der Faserkapsel des Kniegelenks zahlreiche weitlumige Blutgefäße, deren Äste im äußeren Drittel des Meniscus noch deutlich zu erkennen sind.

Die Menisci sind nach dieser Funktionsanalyse und morphologischen Untersuchung als Einrichtungen des Kniegelenks anzusehen, die imstande sind, den Flächendruck im Gelenk global zu reduzieren, insbesondere die von ihnen bedeckte Fläche des Tibiapla-

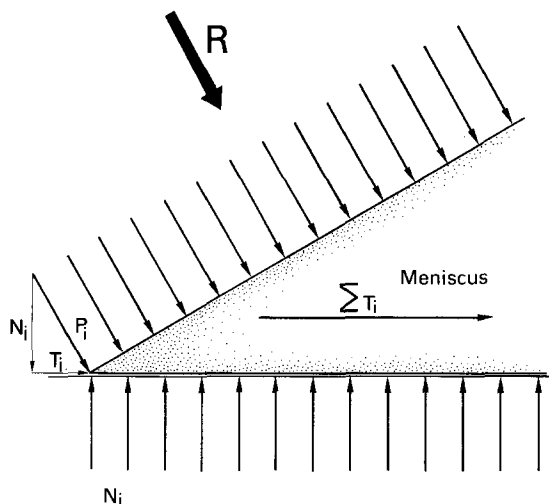


Abb. 5. Kraftübertragung im Meniscefemorale- und Meniscotibialgelenk. N_i , Normalkräfte im Meniscotibialgelenk; P_i , Normalkräfte im Meniscefemoralegelenk; R , Kniegelenksresultierende; T_i , Tangentialkomponente von P_i in bezug auf das Meniscotibialgelenk; ΣT_i , Summe aller radiär gerichteten Tangentialkomponenten im Meniscotibialgelenk. Es gelten folgende Beziehungen: $\Sigma P_i = R$; $N_i < P_i$.

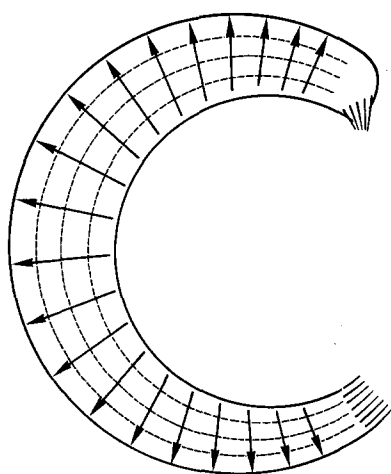


Abb. 6. Zirkuläre Zugbeanspruchung des Meniscus. Die Pfeile geben schematisch den in radiärer Richtung wirkenden Tangentialschub (ΣT_i , vgl. Abb. 5) an, der aus der Kompression durch den Femurkondylus resultiert. Wegen der Fixierung an seinen beiden Hörnern kann der Meniscus diesem Schub nicht nachgeben und es entstehen zirkuläre Zugspannungen (*gestrichelte Linien*)

teaus speziell zu entlasten (wobei ein Teil des vom Femurkondylus aufgenommenen Drucks in Zugspannungen transformiert und auf die Anheftungsstellen an der Tibia übertragen wird). Darüber hinaus reduzieren sie die Beanspruchung der Kreuzbänder und geben der Gelenksresultierenden einen größeren Spielraum. Ihre Entfernung erhöht die mechanische Beanspruchung von Gelenkknorpel und Kreuzbandapparat des Kniegelenks drastisch.

Literatur

1. Huson A (1973) The functional anatomy of the knee joint: the closed kinematic chain as a model of the knee joint. Proc Int Congr. The Knee Joint 324:163–168
2. Huson A (1974) Biomechanische Probleme des Kniegelenks. Orthopäde 3:119–126
3. Kummer B (1982) Cinématique du genou. Acta Orthop Belg 48:28–35

4. Kummer B (1987) Die Mechanik des Kniegelenks nach Menishektomie. In: Tiling Th (Hrsg) Arthroskopische Meniskus Chirurgie. Enke, Stuttgart
5. Menschik A (1974) Mechanik des Kniegelenks 1. Z Orthop 112:481–495
6. Menschik A (1975) Mechanik des Kniegelenks 2. Z Orthop 113:388–401
7. Pauwels F (1965) Grundriß einer Biomechanik der Frakturheilung. Verh Dtsch orthop Ges 34. Kongreß 1940. In: Ges Abh zur funktionellen Anatomie des Bewegungsapparats. Springer, Berlin Heidelberg New York, S 139–182
8. Pauwels F (1959) Die Struktur der Tangentialfaserschicht des Gelenkknorpels der Schulterpfanne als Beispiel für ein verkörpertes Spannungsfeld. Z Anat Entw Gesch 121:188–240. In: Ges Abh zur funktionellen Anatomie des Bewegungsapparats. Springer, Berlin Heidelberg New York 1965, S 424–479
9. Pauwels F (1965) Eine neue Theorie über den Einfluß mechanischer Reize auf die Differenzierung der Stützgewebe. Z Anat Entw Gesch 121:478–515. In: Ges Abh zur funktionellen Anatomie des Bewegungsapparats. Springer, Berlin Heidelberg New York, S 480–518
10. Ploetz E (1938) Funktioneller Bau und funktionelle Anpassung der Gleitsehne. Z Orthop 67:212–234

Weitere Literatur bei [3, 4]