

Die Verteilung der Knorpeldegeneration an der menschlichen Patella in Beziehung zur individuellen subchondralen Mineralisierung

F. Eckstein, M. Müller-Gerbl, R. Putz
Anatomische Anstalt München

Zusammenfassung

Nach Arbeiten von *Pauwels* und *Kummer* kann die Verteilung der subchondralen Mineralisierung als Parameter der längerfristigen Beanspruchung in den Gelenken gelten. Ausgehend von eigenen Untersuchungen an der Patella zur Verteilung der subchondralen Knochendichte, wurden diese Befunde in der vorliegenden Arbeit den makroskopisch sichtbaren Knorpelschäden gegenübergestellt. Läsionen der lateralen Patellafacette sind Arealen hoher, Schäden der „odd facet“ dagegen Arealen geringer subchondraler Mineralisierung zuzuordnen. Die Knorpelschäden der lateralen Facette werden als Folge einer hohen Dauerbeanspruchung und die Schäden der „odd facet“ als Ausdruck einer generellen Unterforderung im medialen Gelenkbereich bei seltenen, kurzfristigen Spitzenbelastungen interpretiert.

Distribution of Degenerative Changes of the Human Patella in Relation to the Individual Subchondral Mineralisation

According to *Pauwels* and *Kummer* the distribution of the subchondral mineralisation can be taken as a measure of the long-term mechanical loading in the joints. Based on a previous study concerning the density distribution of the subchondral bone of the human patella, these results were compared in the following paper with the macroscopically visible cartilage lesions. Degenerative changes on the lateral facet of the patella coincide with regions of high bone mineralisation, those on the „odd facet“ on the other hand with areas of low subchondral density. The cartilage lesions on the lateral facet are seen as being due to high and constant mechanical stress, those on the „odd facet“ to short infrequent stress-peaks.

Einleitung

Das Femoropatellargelenk ist nicht nur der Ort der häufigsten und frühesten Knorpeldegeneration im menschlichen Körper überhaupt (*Ficat* u. *Hungerford* 1977), sondern kann nach diesen Autoren geradezu als Modell beim Studium von Knorpelschäden angesehen werden. *Ficat* (1973) bezeichnet es als „observatoire idéal de l'arthrose“. Allerdings konnte seit den ersten Beschreibungen femoropatellarer Knorpelschäden durch *Büdinger* (1906) keine Einigkeit über Verteilung, Progression oder Ätiologie dieser Läsionen erzielt werden. Eine Beteiligung mechanischer Faktoren an ihrer Entstehung ist unbestritten (*Hohne* 1983), zum exakten Wirkmechanismus bestehen jedoch recht unterschiedliche, zum Teil widersprüchliche Konzepte.

Mit der CT-Osteoabsorptiometrie (*Müller-Gerbl* u. Mitarb. 1989/1990) steht die Möglichkeit einer zerstörungsfreien, flächenhaften Darstellung der subchondralen Mineralisierung zur Verfügung, aus der auf die langfristige Beanspruchung in Gelenken rückge-

schlossen werden kann (*Pauwels* 1965). In einer vorangehenden Arbeit (*Eckstein* u. Mitarb. 1992) konnten wir eine weitgehend konstante Verteilung der subchondralen Knochendichte nachweisen, die sich im Einklang mit modernen Konzepten zur Druckübertragung im Femoropatellargelenk befindet und als Ausdruck der individuellen mechanischen Beanspruchungssituation interpretiert werden kann.

Vor dem Hintergrund der Theorie von *Radin* u. Mitarb. (1970/1975/1978), die in einer Zunahme der Steifigkeit des subchondralen Knochens den Initialschritt zur Arthroseentwicklung sehen, erhebt sich die Frage, in welchem Zusammenhang die mittels CT-Osteoabsorptiometrie erhobenen Mineralisierungsmuster mit der Initiierung und Progression patellarer Knorpelschäden stehen.

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist daher die makroskopische Dokumentation von Knorpelschäden an der menschlichen Patella und ihre Gegenüberstellung zur individuellen subchondralen Mineralisierung.

Material

Wir untersuchten 30 Kniegelenkspräparate aus einem laufenden anatomischen Präparierkurs, welche in 4%iger Formalinlösung fixiert waren. Sie stellten eine Auswahl aus 120 Präparaten dar, wobei eine ausgewogene Altersverteilung mit einem möglichst hohen Anteil von Präparaten jüngerer Individuen angestrebt wurde. Das erreichte Lebensalter betrug zwischen 47 und 90 Jahren. Fünfzehn Fälle mit einem Alter von weniger als 60 Jahren (Gruppe J = jung, Durchschnittsalter 53 Jahre) wurden 15 Präparaten von Menschen mit einem Lebensalter von über 60 Jahren (Gruppe A = alt, Durchschnittsalter 73 Jahre) gegenübergestellt. Insgesamt sieben Präparate stammten von Frauen (Gruppe W) und wurden mit einer Auswahl von sieben Präparaten männlicher Individuen gleichen Lebensalters (Gruppe M) verglichen.

Methoden

Dokumentation der Knorpeldegeneration

Die Kniegelenke wurden im Präparierkurs eröffnet, die patellare Gelenkfläche wurde freigelegt. Die makroskopisch sichtbare Knorpeldegeneration wurde in bezug auf ihre Ausdehnung sowie den Grad der Knorpelschädigung in einer zweidimensionalen Gelenkflächenschablone, die nach Vermessung der Facetengrößen aller Kniescheiben angefertigt worden war, dokumentiert (Abb. 1). Wir stützten uns dabei auf eine bei der Arthroskopie übliche Klassifikation (Gschwend und Bischoffsberger 1971): Grad 1: blasige Auftreibung und Glanzverlust des Knorpels, Grad 2: Aufsplitterung und Zerklüftung, Grad 3: Eburnisierung des subchondralen Knochen. Die Knorpelschäden wurden anschließend je nach Grad mit Hilfe eines Graphikprogrammes (Studio 8) und eines Apple Macintosh Computers mit verschiedenen Graustufen belegt. In einem weiteren Schritt wurden Summationsbilder für die Gesamtheit aller Kniescheiben sowie Untergruppen dargestellt, indem die Verteilungsmuster unter Zerlegung der Flächen in jeweils 50% der Bildpunkte sukzessive paarweise graphisch summiert wurden. Dabei zeigen die Grauwerte im Summationsbild den Schadensgrad, die Dichte der Bildpunkte die Häufigkeit im jeweiligen Areal an.

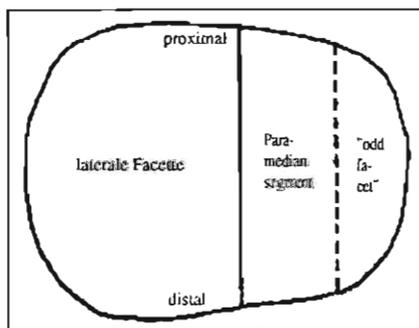


Abb. 1 Umriss-Schablone der Gelenkfläche der Patella mit ihren drei Facetten, bestimmt aus 30 vermessenen Kniescheiben

Bestimmung der subchondralen Mineralisierung

Die Kniegelenke wurden in Extensionsstellung in einem Computertomographen (Siemens Delta Scan 50 FS 2) axial zwischen Tibiaplateau und oberem Patellapol geschichtet. An den im Abstand von 4 mm gewonnenen Schnittbildern mit einer überlappenden Schichtdicke von 8 mm wurden mittels CT-Osteoabsorptiometrie (Müller-Gerbl u. Mitarb. 1989/1990) Isodensiten, d.h. Linien gleicher Hounsfielddichte von 400, 500, 600, 700 und 800 Hounsfield Units (HU) zur Darstellung gebracht. Die Dichte in 1,5 mm Tiefe unter der Gelenkfläche wurde auf die Gelenkfläche übertragen und aus den Schnittbildern die Verteilung in der Gelenkschablone rekonstruiert.

Die entstehenden sechs Bereiche von <400 HU' bis >800 HU' wurden im Computer mit genormten Grauwerten belegt. Anschließend erfolgte die Übereinanderschichtung dieser Muster zu Summationsbildern in einem Schwarz-Weiß-Mischprogramm. Für jede Durchschnittsverteilung wurden die neu entstandenen Grauzwischenstufen in einem weiteren Schritt den jeweils nächstliegenden, ursprünglichen Graubereichen zugeordnet, um die Isodensiten im Summationsbild wiederherzustellen.

Gegenüberstellung von Knorpeldegeneration und subchondraler Mineralisierung

Zum Vergleich der Verteilungen wurden an definierten Punkten der 30 Kniescheiben der Grad der Knorpelschädigung sowie der zugehörige Hounsfieldbereich abgelesen. Die Anzahl entsprechender Wertekombinationen wurde zunächst für alle 30 Patellae als prozentuale Verteilung der drei Knorpelschadensgrade in sieben Hounsfieldbereichen dargestellt und anschließend für die Gruppen J und A getrennt betrachtet, um einen Eindruck der Entwicklung der Knorpelschadensverteilung in den verschiedenen Hounsfieldbereichen unter Berücksichtigung des Lebensalters zu gewinnen.

Ergebnisse

Knorpeldegeneration

Knorpelschäden finden sich in allen Präparaten: Grad 1 an allen 30, Grad 2 an 29 und Grad 3 an 7 Präparaten. Die individuellen Verteilungsmuster zeigen eine große Variationsbreite. Häufig sind schwere Schäden (Grad 2 und 3) an der „odd facet“ (Randsegment) (Abb. 2a), am Sekundärfirst (Abb. 2b) und im Zentrum der lateralen Facette (Abb. 2c). Im Summationsbild (Abb. 3) wird deutlich, daß an der „odd facet“ alle Grade der Knorpelschädigung gehäuft vorkommen und Schäden 2./3. Grades sich darüber hinaus oft am Sekundärfirst, im Zentrum der lateralen Facette und am distalen Patellarand finden.

Bei einem Vergleich der Gruppen J und A zeigt sich, daß in jüngerem Lebensalter die Schäden

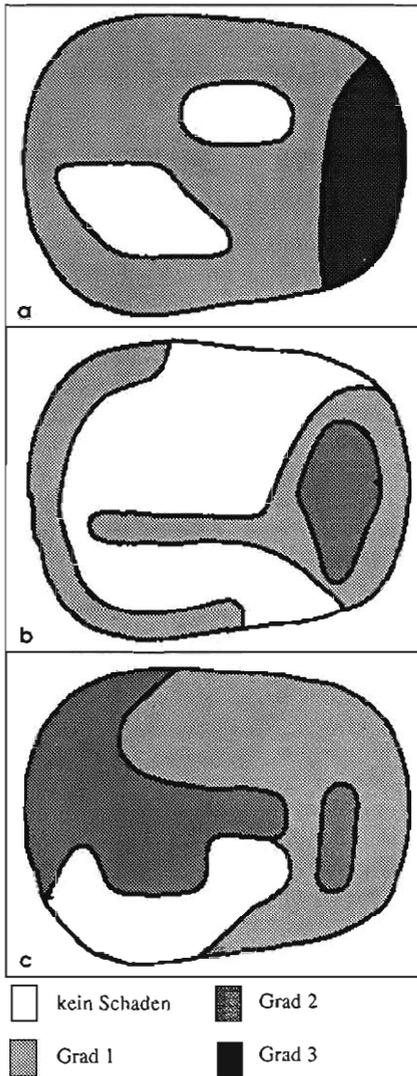


Abb. 2 Flächenhafte Verteilung der Knorpeldegeneration an der Patella
 a) Einzelbeispiel mit Schädigung der „odd facet“ (Präp. Nr. 17)
 b) Einzelbeispiel mit Schädigung des Sekundärfirstes (Präp. Nr. 19)
 c) Einzelbeispiel mit Schädigung der lateralen Facette (Präp. Nr. 20)

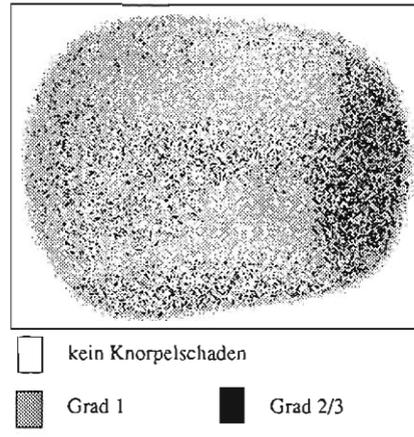


Abb. 3 Summationsbild der Verteilung der Knorpeldegeneration an allen Kniescheiben (n=30). Grauwert der Bildpunkte = Grad des Knorpelschadens. Dichte der Bildpunkte = Häufigkeit des Knorpelschadensgrades im jeweiligen Gelenkbereich

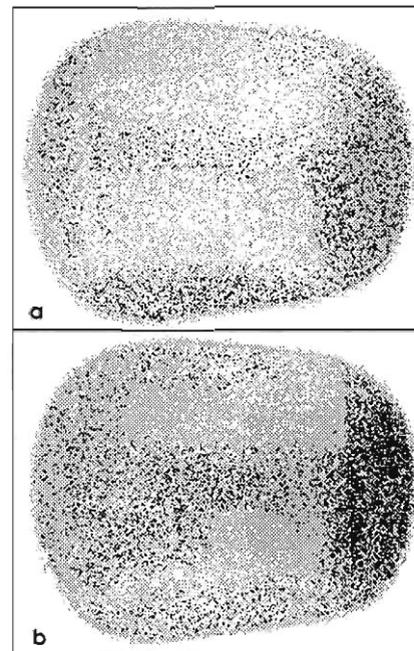


Abb. 4 Summationsbilder der Verteilung der Knorpeldegeneration
 a) Gruppe J (jung/n=15)
 b) Gruppe A (alt/n=15)

vornehmlich in der Patellaperipherie lokalisiert sind (Abb. 4a). In höherem Lebensalter nehmen schwere Schäden an Randsegment und Sekundärfirst zu und sind im lateralen Bereich zentral gelegen (Abb. 4b). Die Summationsbilder der Gruppen M und W weisen Unterschiede bei beiden Geschlechtern auf. Bei beiden Gruppen sind die Schäden an „odd facet“ und Sekundärfirst an sich sehr ausgeprägt. Während jedoch bei den Frauen die zentrale laterale Facette deutlich von Schäden 2./3. Grades in Mitleidenschaft gezogen ist (Abb. 5b), gehen bei den Männern die Schäden im Zentrum der lateralen Facette nicht über Grad 1 hinaus (Abb. 5a).

Subchondrale Mineralisierung

Die Maxima subchondraler Mineralisierung liegen konstant im proximalen Anteil der lateralen Facette und betragen zwischen 600 und 1100 HU. Die Dichtewerte nehmen zum Rand hin ab (Abb. 6), wobei die Verteilungsmuster bei einem Teil der Präparate konzentrisch konfiguriert sind, sich bei anderen dagegen inselförmige Dichteanstiege im Bereich des Sekundärfirstes beobachten lassen. Die „odd facet“ ist subchondral nur gering mineralisiert.

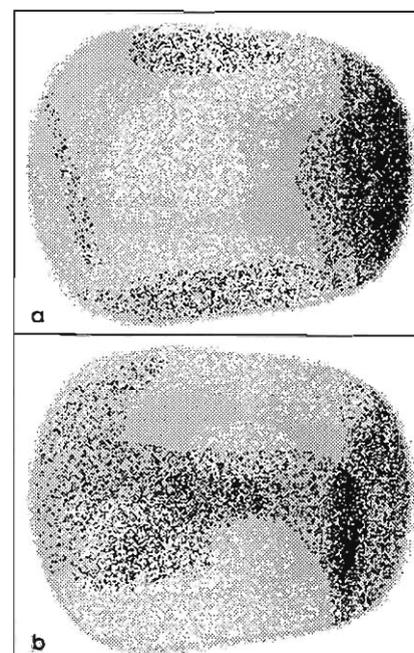


Abb. 5 Summationsbilder der Verteilung der Knorpeldegeneration
 a) Gruppe M (männlich/n=7)
 b) Gruppe W (weiblich/n=7)

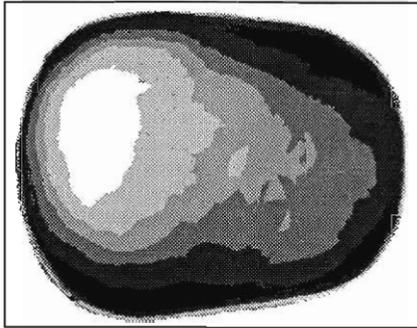


Abb. 6 Summationsbild der Verteilung der subchondralen Mineralisierung aller Knie-scheiben (n=30)

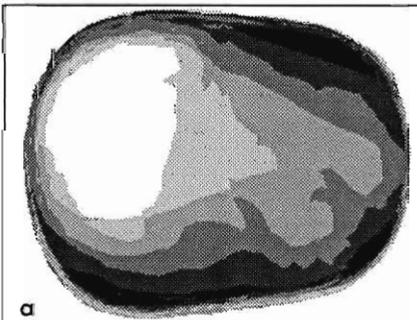


Abb. 7 Summationsbilder der Verteilung der subchondralen Mineralisierung

a) Gruppe J (jung/ n=15)
b) Gruppe A (alt/ n=15)

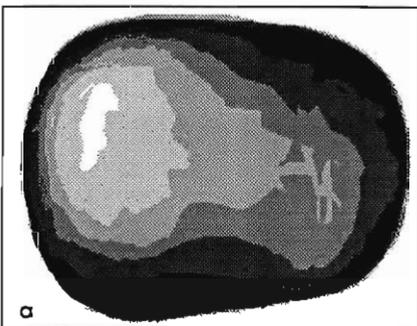
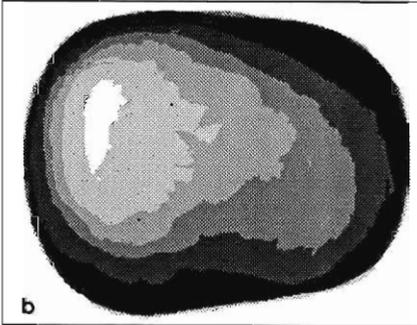
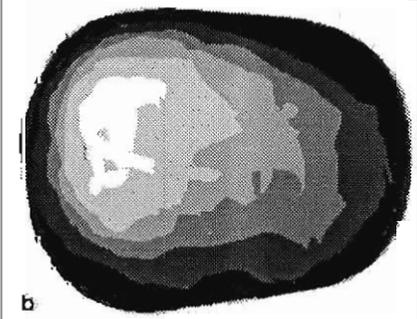


Abb. 8 Summationsbilder der Verteilung der subchondralen Mineralisierung

a) Gruppe M (männlich/n=7)
b) Gruppe W (weiblich/n=7)



Bei der jüngeren Gruppe J findet sich eine größere Ausdehnung der höchsten Dichtestufe und eine Ausdehnung mittlerer Dichtebereiche weiter nach medial (Fig. 7a) als bei Gruppe A (Abb. 7b). Bei Gruppe M (Abb. 8a) zeigt die höchste Dichtestufe eine geringfügig kleinere Ausdehnung als bei Gruppe W (Abb. 8b).

Gegenüberstellung von Knorpeldegeneration und subchondraler Mineralisierung

Über Bereichen mittleren Mineralisierungsgrades (500–800 HU) ist der Knorpel prozentual am häufigsten ungeschädigt (30–39%) und am seltensten von starken Knorpelschäden (Grad 2 und 3) betroffen (7–13%) (Abb. 9). Sowohl über Regionen geringer subchondraler Dichte (<500 HU) wie sehr hoher Mineralisierung (>800 HU) ist der Knorpel seltener intakt (17–29%) und häufiger stark geschädigt (16–33%). Bei einem Vergleich der Durchschnittsverteilungen von Knorpelschäden (Abb. 3) und subchondraler Mineralisierung (Abb. 6) lassen sich die Knorpelschäden in den gering mineralisierten Bereichen der „odd facet“ zuordnen, diejenigen in hochmineralisierten Arealen dagegen der zentralen lateralen Facette. Dieser Zusammenhang läßt sich auch an Einzelbeispielen nachvollziehen, so stimmt bei Präparat Nr. 21 der Bereich zweitgradiger Schädigung (Abb. 10a) fast exakt mit dem Dichtebereich >500 HU (Abb. 10b) überein. Bei Präparat Nr. 24 liegt dagegen ein zweitgradiger Knorpelschaden des Randsegmentes (Abb. 11a) im Bereich <400 HU (Abb. 11b).

Vergleicht man die beiden Geschlechter (Abb. 5a/b und 8a/b), so fällt auf, daß die Knorpelschäden unterschiedlich gelegen sind, während bei der Verteilung der subchondralen Dichte weitgehende Übereinstimmung besteht. In der Gegenüberstellung von Gruppe J und A (Abb. 4a/b und 7a/b) zeigt sich, daß Knorpelschäden bei der älteren Vergleichsgruppe deutlich häufiger sind, während der subchondrale Knochen geringer mineralisiert ist.

Betrachtet man die prozentuale Verteilung der Knorpelqualität in den einzelnen Hounsfieldbereichen bei den verschiedenen Altersgruppen (Abb. 12), so ergibt sich zwischen Gruppe J und A eine höhere Differenz im Vorhandensein von intaktem Knorpel (Abb. 11a) in den Arealen >600 HU (23–38%) als in den Bereichen <600 HU (7–20%). Bei Knorpelschäden 1. Grades liegt die Differenz höher in den Bereichen >600 HU

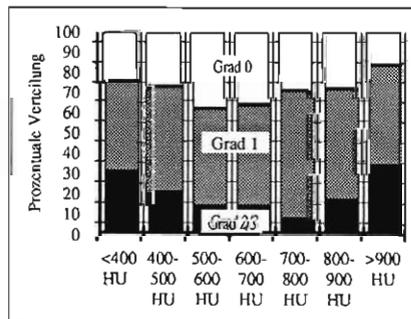


Abb. 9 Prozentuale Verteilung der Knorpelschadensgrade in sieben Hounsfieldbereichen an allen Knie-scheiben (n=30). Grad 0 = kein Knorpelschaden

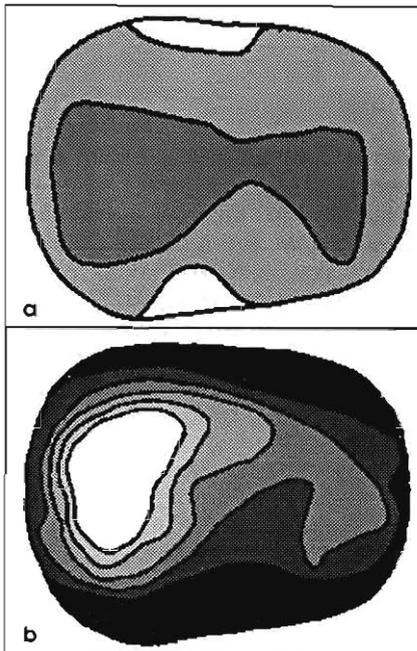


Abb. 10 Einzelbeispiel der Lokalisation eines schweren Knorpelschadens im Bereich hoher Mineralisierung (Präp. Nr. 21)
 a) Verteilung der Knorpeldegeneration
 b) Verteilung der subchondralen Hounsfielddichte

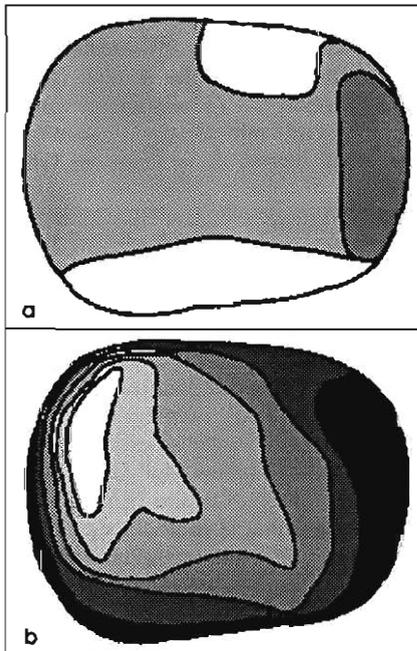


Abb. 11 Einzelbeispiel der Lokalisation eines schweren Knorpelschadens im Bereich geringer Mineralisierung (Präp. Nr. 24)
 a) Verteilung der Knorpeldegeneration
 b) Verteilung der subchondralen Hounsfielddichte

(20–28% gegenüber 3–10% bei <600 HU) und bei Knorpelschäden 2. und 3. Grades in den Bereichen über 800 HU (18–33% gegenüber 4–11% bei <800 HU).

Diskussion

Knorpeldegeneration

Die Häufigkeit der gefundenen Knorpel-läsionen entspricht der in der Literatur angegebenen extrem hohen Prävalenz patellarer Knorpelschäden (Meachim u. Emery 1974, Mitrovic u. Mitarb. 1987). Dabei sind die von uns beobachteten typischen Lokalisationen auch in der Literatur als solche beschrieben, so die

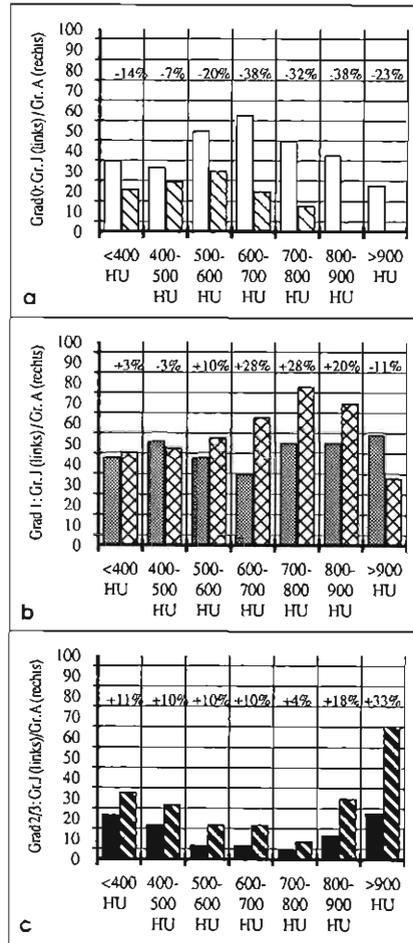


Abb. 12 Prozentuale Verteilung der Knorpelschadensgrade in sieben Hounsfieldbereichen vergleichend für Gruppe J (jung/ n=15/jeweils linke Säule) und Gruppe A (alt/n=15/rechte Säule). Prozentzahlen über den Säulen = Differenz zwischen Gruppe J und A.
 a) Grad 0 = kein Knorpelschaden
 b) Grad 1 der Knorpelschädigung
 c) Grad 2 und 3 der Knorpelschädigung

„odd facet“ von Goodfellow u. Mitarb. (1976) und Weh u. Lür (1987), der Sekundärfirst von Hungerford u. Goodfellow (1975) und Hehne (1983), sowie die zentrale laterale Facette als „zone critique“ der Knorpeldegeneration durch Ficat u. Mitarb. (1975) und Ficat u. Hungerford (1977).

Die Dominanz peripherer Schäden in jüngerem Lebensalter, wie sie bei Gruppe J zum Ausdruck kommt, erwähnen Emery u. Meachim (1973), das Auftreten zentraler Knorpelschäden erst in höherem Lebensalter Weh u. Lür (1987). Wie Meachim u. Mitarb. (1977) und Mitrovic u. Mitarb. (1987) finden auch wir, daß Frauen von Knorpelschäden stärker betroffen sind als Männer, vor allem was zentrale Knorpelschäden betrifft. Der Grund für eine häufigere Knorpeldegeneration bei Frauen in diesem Gelenkbereich ist nach Meachim u. Mitarb. (1977) und Pedley und Meachim (1979) unbekannt.

Subchondrale Mineralisierung

Daß sich die gefundenen Verteilungsmuster subchondraler Mineralisierung als Ausdruck einer längerfristigen, durchschnittlichen Beanspruchungsverteilung im Femoropatellargelenk interpretieren lassen, konnten wir bereits in einer vorangehenden Arbeit (Eckstein u. Mitarb. 1992) zeigen, indem diese den Be-

funden, die mittels Spannungsoptik und Spaltlinienanalyse (Tillmann u. Brade 1980) und Druckmeßfolie (Hehne 1983) gewonnen worden waren, gegenübergestellt wurden. Die Dichtemaxima an der proximalen lateralen Facette, welche bei allen Winkelgraden von 60 bis 140 Grad artikuliert, sehen wir als Folge der bei tiefer Kniebeugung ansteigenden Druckkräfte (Maquet 1976). Die bei einem Teil der Präparate zu beobachtenden inselförmigen Dichteanstiege im Bereich des Sekundärfirstes interpretieren wir als Ausdruck einer nahezu punktförmigen Auflage bei 120 Grad Beugewinkel (Hehne 1983).

Die geringe Mineralisierung der „odd facet“ führen wir auf ihre druckmäßig zwar hohe (Maquet 1976/Hehne 1983), aber zeitlich wohl eher seltene Beanspruchung (geringe relative Verweildauer der Resultierenden) bei 140 Grad Kniebeugewinkel zurück. Die etwas größere Ausdehnung von Bereichen höherer und mittlerer Mineralisierung bei jüngeren Individuen kann als Ausdruck einer für diese Gruppe vermuteten größeren Beugeaktivität angesehen werden.

Gegenüberstellung von Knorpeldegeneration und subchondraler Mineralisierung

Knorpelschäden in Bereichen sehr hoher Mineralisierung, wie sie z. B. auch am Hüftgelenk dokumentiert sind (Pauwels 1968, Tillmann 1978), können als Folge einer hohen Dauerbeanspruchung gesehen werden, wie sie angesichts der konstanten Lage subchondraler Dichtemaxima an der proximalen lateralen Facette zu vermuten ist. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen aufgrund klinischer und röntgenologischer Untersuchungen auch Ficat u. Mitarb. (1975) sowie Ficat u. Hungerford (1977), die ein Hyperpressionssyndrom der lateralen Patellafacette als eigenständiges Krankheitsbild herausarbeiten. Die Knorpelschäden am Sekundärfirst könnten dagegen durch dessen hohe Beanspruchung bei der nahezu punktförmigen Auflage bei 120 Grad Beugewinkel bedingt sein. Dies wird durch die bei einem Teil der Präparate beobachteten inselförmigen Dichteanstiege in diesem Bereich nahegelegt und wird auch von Hungerford u. Goodfellow (1975) und von Hehne (1983) hervorgehoben.

Die hohe Tendenz zur Knorpeldegeneration in niedrigmineralisierten Bereichen betrifft nach unseren Befunden in erster Linie die „odd facet“. Sie artikuliert bei einem Beugewinkel von 140 Grad (Hehne 1983) und ist dabei hohen Anpreßdrücken unterworfen (Maquet 1976). Ihre geringe subchondrale Mineralisierung und die daraus abzuleitende Vermutung einer geringen relativen Verweildauer der Resultierenden in diesem Gelenkbereich steht in Übereinstimmung mit der Aussage von Goodfellow u. Mitarb. (1976), daß die starke Schädigung dieser Facette mit ihrer seltenen Beanspruchung im Alltagsleben von Europäern zusammenhängt. Eine Erklärung dieser Schäden mit einer chronischen Minderernährung des Knorpels, die auf hohen medialen Knorpeldicken beruhen soll (Paar 1978, Morscher und Dick 1980), lehnen wir allerdings ab, da wir in einer vorangehenden Arbeit (Eckstein u. Mitarb. 1992) zeigen konnten, daß in den meisten Fällen höhere Knorpeldick-

ken lateral zu finden sind und dort oft keine derartigen Knorpelschäden vorkommen.

Wir vermuten vielmehr, daß seltene Belastungsspitzen, wie sie an der „odd facet“ auftreten, eine für das „Überleben“ des Gelenkknorpels ungünstige mechanische Umgebung schaffen und daß in Arealen mittleren Mineralisierungsgrades die häufigere Beanspruchung einen protektiven Faktor vor Knorpeldegeneration darstellt. Eine solche „Trainierbarkeit“ des Gelenkknorpels könnte durch eine Dickenanpassung des Gelenkknorpels an die Beanspruchungsverteilung im Femoropatellargelenk (Putz u. Mitarb. 1987, Eckstein u. Mitarb. 1992) gegeben sein. Diese Interpretation steht auch in Einklang mit Befunden von Hoaglund u. Mitarb. (1973) und Marar u. Mitarb. (1975), die die im Verhältnis zu Europäern bei Asiaten weit selteneren Schäden an der Patella in Zusammenhang mit deren Sitzgewohnheiten in tiefer Hockstellung (squatting), d. h. mit einer zeitlich häufigeren Beanspruchung der „odd facet“, bringen.

Die unterschiedlichen Verteilungsmuster patellarer Knorpelschäden bei beiden Geschlechtern lassen sich auf der Basis subchondraler Dichtedifferenzen nicht erklären, da die Mineralisierungsmuster bei beiden Gruppen kaum Unterschiede ausweisen. Ob hierbei andere, z. B. hormonelle Faktoren eine Rolle spielen, oder ob es sich bei diesen Differenzen um Zufallsbefunde aufgrund relativ geringer Präparatezahlen (n=7) handelt, läßt sich im Rahmen unserer Studie nicht beantworten.

Die Theorie von Radin u. Mitarb. (1970/1975/1978), die eine Zunahme subchondraler Knochensteifigkeit als Initialschritt der Arthroseentstehung interpretieren, können wir angesichts unserer Befunde an sich nicht ausschließen, da durch die von uns erhobenen Zustandsbilder potentielle Initialveränderungen nicht unbedingt erfaßt werden. Sie kann durch unsere Befunde aber auch nicht bestätigt werden, da trotz ganz unterschiedlicher Schädigungsmuster in individuellen Fällen und beim Vergleich der beiden Geschlechter kaum Verteilungsunterschiede bei der subchondralen Mineralisierung zu beobachten sind. Dagegen spricht unserer Ansicht des weiteren, daß bei der älteren Vergleichsgruppe, bei der die Knorpelschäden deutlich häufiger zu beobachten sind, die subchondrale Dichte eher niedriger liegt. Es muß darüber hinaus die Einschränkung gemacht werden, daß von der subchondralen CT-Dichte nicht direkt auf die mechanischen Eigenschaften des subchondralen Knochens geschlossen werden kann. Da wir jedoch große Ähnlichkeiten der von uns gefundenen Mineralisierungsmuster mit einer Festigkeitsverteilung des subchondralen Patellaknochens nach Townsend u. Mitarb. (1976) beobachten und Bentzen u. Mitarb. (1987) am Tibiaplateau bereits hohe Korrelationen von CT-Dichte und physikalisch-mechanischen Parametern nachweisen konnten, halten wir vergleichende Aussagen für erlaubt.

Nach Abernethy u. Mitarb. (1978) sollen steile Gradienten der Knochensteifigkeit an der Initiierung von Knorpelschäden ursächlich beteiligt sein, da der Knorpel bei Druckbeanspruchungen lokalen Scherkräften unterworfen wird. Diese Meinung ist mit unseren

Befunden vereinbar, da aus obengenannten Überlegungen die steilen Dichteabfälle im Randbereich der Patella, wo der Knorpel sehr früh zur Degeneration neigt, solche Gradienten der Knochensteifigkeit nahelegen. Die von Radin u. Mitarb. (1978) formulierte und von Pedley und Meachim (1979) überprüfte Hypothese der Bedeutung einer hohen subchondralen Mineralisierung für die Progression von Knorpelschäden trifft auch auf unser Untersuchungsgut zu, da im Vergleich der jüngeren und älteren Gruppe die Knorpelschäden in den hochmineralisierten Bereichen (>600 HU) stärker zunehmen und die zweit- und drittgradigen Läsionen vor allem in den Arealen >800 HU voranschreiten.

Unsere Befunde zeigen, daß patellare Knorpelschäden in gleicher Weise wie arthrotische Veränderungen in anderen Gelenken aus einem Mißverhältnis von Beanspruchung und Belastbarkeit des Gelenkknorpels entstehen (Pauwels 1968, Tillmann 1978), wobei wir einer hohen Dauerbeanspruchung im lateralen Bereich und medial einer generellen Unterforderung des Knorpels mit seltenen, kurzfristigen Belastungsspitzen eine besondere Bedeutung beimessen. Eine gleichmäßig intermittierende Beanspruchung scheint dagegen die besten „Überlebenschancen“ für den Gelenkknorpel zu gewährleisten.

Die subchondrale Dichte können wir unseren Ergebnissen nach nicht, so wie Radin u. Mitarb. (1970/1975) dies nahelegen, quasi als einen „Hauptakteur“ im Schauspiel der arthrotischen Degeneration interpretieren, wohl aber als eine „Schaubühne“, die die Bedingungen der ablaufenden Handlung festlegt.

Literatur

- Abernethy, P. J., P. R. Townsend, R. M. Rose, E. L. Radin: Is chondromalacia patellae a separate clinical entity? *J. Bone Joint Surg.* 60B (1978) 205–210
- Bentzen, S. M., I. Hvid, J. Jørgensen: Mechanical strength of tibial trabecular bone evaluated by X-ray computed tomography. *J. Biomech.* 20 (1987) 743–752
- Büdingner, K.: Über Ablösung von Gelenkteilen und verwandte Prozesse. *Deutsche Ztschr. f. Chir.* 84 (1906) 311–365
- Eckstein, F., M. Müller-Gerbl, R. Putz: Distribution of the subchondral bone density and cartilage thickness in the human patella. *J. Anat.* 180 (1992) 425–433
- Emery, I. H., G. Meachim: Surface morphology and topography of patello-femoral cartilage fibrillation in Liverpool necropsies. *J. Anat.* 116 (1973) 103–120
- Ficat, P.: Les déséquilibres rotuliens de l'hyperpression à l'arthrose. *Médecine*, Paris (1973)
- Ficat, P., C. Ficat, A. Bailleux: Syndrome d'hyperpression externe de la rotule (SHPE). Son intérêt pour la connaissance de l'arthrose. *Rev. Chir. Orthop.* 61 (1975) 39–59
- Ficat, P., D. S. Hungerford: Disorders of the patellofemoral joint. *Médecine*, Paris (1977)
- Goodfellow, J., D. S. Hungerford, C. Woods: Patello-femoral joint mechanics and pathology. 2. Chondromalacia patellae. *J. Bone Joint Surg.* 58B (1976) 291–299

- Henne, H. J.: Das Patellofemoralgelenk. *Enke*, Stuttgart (1983)
- Hoanglund, F. T., A. C. M. C. Yau, W. L. Wong: Osteoarthritis of the hip and other joints in Southern Chinese in Hong Kong. Incidence and related factors. *J. Bone Joint Surg.* 55A (1973) 545–557
- Hungerford, D. S., J. W. Goodfellow: Femoropatellare Kontaktzonen und ihre Beziehung zur Chondromalazie. *Z. Orthop.* 113 (1975) 784–786
- Maquet, P. G. J.: Biomechanics of the knee. *Springer*, Berlin–Heidelberg–New York (1976)
- Marar, B. C., M. C. Orth, V. K. Pillay: Chondromalacia of the patella in Chinese. *J. Bone Joint Surg.* 57A (1975) 342–345
- Meachim, G., I. H. Emery: Quantitative aspects of patellofemoral cartilage fibrillation in Liverpool necropsies. *Ann. Rheum. Dis.* 33 (1974) 39–47
- Meachim, G., G. Bentley, R. Baker: Effect of age on thickness of adult patellar articular cartilage. *Ann. Rheum. Dis.* 36 (1977) 563–568
- Mitrovic, D., A. Stankovic, O. Borda-Iriarte, M. Uzan, M. Quintero, A. Ryckewaert: Résultats de l'examen autopsique des cartilages des genoux chez 120 sujets décédés en milieu hospitalier 1. Articulation fémoro-patellaire. *Rev. Rheum. Mal. Osteoartic.* 54 (1987) 15–21
- Morscher, E., W. Dick: Die sagittale Patellaosteotomie bei Chondromalacia patellae. *Orthop. Praxis* 8 (1980) 692–695
- Müller-Gerbl, M., R. Putz, N. Hodapp, E. Schulte, B. Wimmer: Computed tomography-osteodensitometry for assessing the density distribution of subchondral bone as a measure of long term mechanical adaptation in individual joints. *Skeletal Radiol.* 18 (1989) 507–512
- Müller-Gerbl, M., R. Putz, N. Hodapp, E. Schulte, B. Wimmer: Die Darstellung der subchondralen Dichtemuster mittels der CT-Osteodensitometrie (CT-OAM) zur Beurteilung der individuellen Gelenkbeanspruchung am Lebenden. *Z. Orthop.* 128 (1990) 128–133
- Paar, O.: Zur Problematik der Chondropathia patellae. *Unfallheilkunde* 81 (1978) 694–697
- Pauwels, F.: Gesammelte Abhandlungen zur Biomechanik des Bewegungsapparates. *Springer*, Berlin–Heidelberg–New York 1965
- Pauwels, F.: Der Platz der Osteotomie in der operativen Behandlung der Coxarthrose. *Triangle* 8 (1968) 196–210
- Pedley, R. B., G. Meachim: Topographical variation in patellar subarticular calcified tissue density. *J. Anat.* 128 (1979) 737–745
- Putz, R., M. Müller-Gerbl, E. Schulte, B. Wimmer: Verteilung der Knorpeldichte und der Mineralisierung im Kniegelenk. In: Der alloplastische Ersatz des Kniegelenkes. Hrsg. von Refior, H. J., M. H. Hackenbroch, C. J. Wirth, Georg Thieme Verlag, Stuttgart–New York (1987)
- Radin, E. L., I. L. Paul, M. Lowy: A comparison of the dynamic force transmitting properties of subchondral bone and articular cartilage. *J. Bone Joint Surg.* 52A (1970) 444–456
- Radin, E. L., I. L. Paul, R. M. Rose: Mechanical factors in the aetiology of osteoarthritis. *Ann. Rheum. Dis. (Suppl.)* 34 (1975) 132–133
- Radin, E. L., P. J. Abernethy, P. M. Townsend, R. M. Rose: The role of bone changes in the degeneration of articular cartilage in osteoarthritis. *Acta Orthop. Belg.* 44 (1978) 55–63
- Tillmann, B.: Funktionelle Morphologie und Beanspruchung der Gelenke. *Verh. Anat. Ges.* 72 (1978) 47–63
- Tillmann, B., H. Brade: Morphologische und biomechanische Untersuchungen an der Facies articularis patellae. *Orthop. Praxis* 6 (1980) 462–467
- Townsend, P. R., R. E. Miegel, R. M. Rose, P. Raux, E. L. Radin: Structure and function of the human patella: The role of cancellous bone. *J. Biomed. Mater. Res. Symposium* 7 (1976) 605–611
- Weh, L., C. Lier: Plica medialis, Patellaform und Chondromalazie. *Z. Orthop.* 125 (1987) 54–62

Dr. F. Eckstein, Dr. M. Müller-Gerbl, Prof. Dr. R. Putz

Anatomische Anstalt
Ludwig-Maximilians-Universität München
Pettenkoferstr. 11
D-80336 München